

Otso Patjas

# Testiaseman päivitys ja saannon tutkiminen sekä parantaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Automaatiotekniikka

Insinöörityö

7.1.2016

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Otso Patjas Testiaseman päivitys ja saannon tutkiminen sekä parantaminen 29 sivua + 2 liitettä 7.1.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	
Ohjaajat	Testi-insinööri Olli-Matti Hanhinen, Vaisala Oyj Testausylläpidon tiiminjohtaja Teemu Loman, Vaisala Oyj Lehtori Jari Savolainen
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena oli päivittää DMPAS6-testiaseman AOUT–1-testi Windows 7 -ympäristöön ja tutkia testisaantoa Gage R&amp;R -ajojen avulla. Insinööriyö tehtiin Vaisala Oyj:lle, ja se sai alkunsa vanhan testiaseman epäluotettavasta toiminnasta. Työ aloitettiin testiaseman päivittämisellä, jonka jälkeen siirryttiin Gage R&amp;R -ajojen suunnittelusta toteutukseen ja lopuksi tulosten analysointiin.</p> <p>Testiasemassa tehdään lämpökompensointi piirikorteille, eli AOUT–1-moduuleille. Lämpökompensoinnin aikana mitataan piirikortin ulostuloarvoja, kun moduulin sisään tuloon pakotetaan eri DAC-arvoja eri lämpötiloissa. Moduulit asennetaan testin jälkeen ilmanpainemittareihin, jotta asiakas saisi näistä tarkemman analogisen lähtösignaalin ilmanpainemittauksia varten.</p> <p>Testiaseman epäluotettava toiminta ja vanha käyttöjärjestelmä olivat jo pitkään häirinneet testiaseman käyttöä. Testiasema päästää satunnaisesti läpi virheellisiä piirikortteja sekä puolestaan hylkää toimiviksi osoittautuneita kappaleita. Tässä insinööriyössä perehdyttiin testin kulkuun ja selvitettiin Gage R&amp;R -menetelmän avulla, johtuuko testin epäluotettava toiminta mittalaitteista aiheutuvasta vaihtelusta tai testipaikkojen eroavaisuuksista. Tuloksia analysoitiin Minitab-ohjelman avulla.</p> <p>Tulosten analysoinnissa mittalaitteiden toistettavuus osoittautui erinomaiseksi, eikä myöskään testipaikkojen vaihtaminen aiheuttanut huomattavia eroavaisuuksia mittaustuloksissa. Työn tuloksena Gage R&amp;R -testin avulla pystyttiin sulkemaan pois vaihtoehdot mittalaitteen ja testijigin vaihtelevasta toimivuudesta, mikä olisi aiheuttanut epäluotettavia tuloksia mittauksissa.</p>	
Avainsanat	Piirikortti, varianssianalyysi, Gage R&R

Author Title Number of Pages Date	Otso Patjas Update of Test Station and Exploration and Improvement of the Test Yield 29 pages + 2 appendices 7 January 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automation Technology
Specialisation option	
Instructors	Olli-Matti Hanhinen, Test Engineer, Vaisala PLC Teemu Loman, Test Maintenance's Team Leader, Vaisala PLC Jari Savolainen, Senior Lecturer, Metropolia
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to update DMPAS6 test station's AOUT-1 test into a Windows 7 platform and to explore the test yield by using Gage R&amp;R studies. The thesis was commissioned by Vaisala PLC and it was initiated due to test station's unreliable functioning. The work for this study was begun by updating the test station, after which the Gage R&amp;R studies were designed and implemented. Finally, the results were analyzed.</p> <p>The test station performs a temperature compensation for circuit boards, i.e. AOUT-1 modules. Output values of the modules are measured during the temperature compensation, when the input of the module is forced to a different DAC values at different temperatures. After the test, the modules will be installed in to barometers to achieve more accurate analog output signal for the air pressure measurements.</p> <p>The test station's unreliable functioning and its old operating system have been disturbing the usage of the station for a long time. The test station randomly allows incorrect modules and, in turn, rejects modules that are proven to work properly. This thesis focuses on exploring the test yield by using Gage R&amp;R studies to determine whether the functioning is unreliable due to variation caused by measuring devices or differences between test positions. The results were analyzed by using Minitab program.</p> <p>According to the analysis, the repeatability of measuring devices proved to be excellent, and there were no significant differences between positions in the test jig. Thus, with the help of Gage R&amp;R studies, it was possible to exclude the variation caused by measuring devices and the test jig, which would have led to unreliable results in measurements.</p>	
Keywords	Circuit board, ANOVA, Gage R&R

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tuotannon laadunohjaus	2
2.1	Laatukäsitys	2
2.2	Tilastollinen prosessinohjaus	3
2.2.1	Vaihtelu	4
2.2.2	Yleiset ja erityisyyt	4
3	Testausympäristö	6
3.1	ESD-suojaus	6
3.2	Testiasema	7
3.3	AOUT–1-testi ja testattava tuote	8
3.4	Mittalaitteet	10
3.5	Testiohjelma	11
3.6	Windows-alustan päivitys	12
4	Gage R&R	13
4.1	Toistettavuus ja uusittavuus menetelmät	15
4.2	Varianssianalyysi	16
5	Gage R&R -suunnitelma	18
5.1	Testiajot	18
5.1.1	Toistettavuustestit	18
5.1.2	Uusittavuustestit	19
5.2	Tutkittavat muuttujat	19
6	Tulokset ja päätelmät	21
7	Yhteenveto	27
	Lähteet	28

## Liitteet

Liite 1. Toistettavuustestien tulokset

Liite 2. Paikkariippuvuustestien tulokset

## Lyhenteet

ANOVA	Analyze of Variances, varianssianalyysi
AOUT	Analog Output, analoginen ulostulo
COM	Sarjaportin laitetunnus
DAC	Digital to Analog Chip, mikropiiri, joka muuntaa digitaalisen tiedon analogiseen muotoon
ESD	Electrostatic Discharge, sähköstaattinen purkaus
GBIP	General Purpose Interface Bus, automatisoidun testilaitteiston kanssa kommunikointiin tarkoitettu väylä
GRR	Gage Repeatability and Reproducibility, mittalaitteelle suoritettava toistettavuus- ja uusittavuustesti
LCL	Lower Control Limit, alavalvontaraja
PCI	Peripheral Component Interconnect, tietokoneen lisälaitteiden liittämiseen käytettävä tietokoneväylä
R&R	Repeatability & Reproducibility, toistettavuus ja uusittavuus
RS232	Recommended Standard 232, sarjaliikennestandardi tiedonsiirtoon
SPC	Statistical Process Control, tilastollinen prosessin ohjaus
UCL	Upper Control Limit, ylävalvontaraja
USB	Universal Serial Bus, Sarjaväylästandardi, jonka avulla tietokoneeseen voidaan kytkeä oheislaitteita
UUT	Unit Under Test, testattava kappale

## 1 Johdanto

Vaisala Oyj on maailman johtava olosuhteiden ja teollisuuden mittausratkaisuja tarjoava yritys. Vaisalan tärkeimpiin asiakkaisiin kuuluvat muun muassa Puolustusvoimat, kansalliset ilmatieteen laitokset ja lentokentät ympäri maailmaa. Tuote- ja palveluvalikoima on erittäin laaja; se kattaa niin säämittaukseen liittyvät pienet mittalaitteet ja anturit, kuin myös suuremmat kokonaisuudet – kuten automaattiset sääasemat ja lentosääjärjestelmät huolto- ja ylläpitopalveluineen. Vaisalan tuotekokoelmaan kuuluvat myös BAROCAP®-digitaaliset barometrit, jotka soveltuvat niin vaativiin teollisuuden ilmanpainemittauksiin, kuin laboratorioalan ammattilaisillekin. [1.]

Tässä työssä käsitellään laadun merkitystä jatkuvasti kasvavilla markkinoilla ja sitä, mitä laatu käytännössä nykyään tarkoittaa sekä asiakkaan että yrityksen näkökulmasta. Vaisala Oyj on tunnettu tuotteidensa laadusta, mikä pitää vuodesta toiseen yrityksen kovassa suosiossa maailmalla.

Opinnäytetyön varsinaisena tavoitteena on päivittää testiaseman tietokoneen Windows uudempaan versioon ja tutkia testiaseman saantoa. Tarkoituksena on selvittää Gage R&R -menetelmän avulla, vaikuttaako mittalaitteiden toistettavuus tai testipaikkojen eroavaisuus mittaustuloksiin, eli esiintyykö tuloksissa vaihtelua niiden takia.

Testiasema oli toiminut huonosti jo pidemmän aikaa, minkä seurauksena sitä haluttiin tutkia. Työ sai alkunsa Vaisalan testausylläpidon tiiminvetäjän ehdotuksesta, joka herätti opinnäytetyön tekijän mielenkiinnon tutustua Gage R&R -menetelmään sekä datankäsittelyyn Minitab-ohjelman avulla, joiden osaamisesta saattaisi olla myöhemmin hyötyä työelämässä. Työ jakautuu käytännössä kolmeen pääosaan: Windowsin päivittämiseen, Gage R&R -testien suunnitteluun ja ajamiseen sekä tulosten käsittelyyn ja analysointiin.

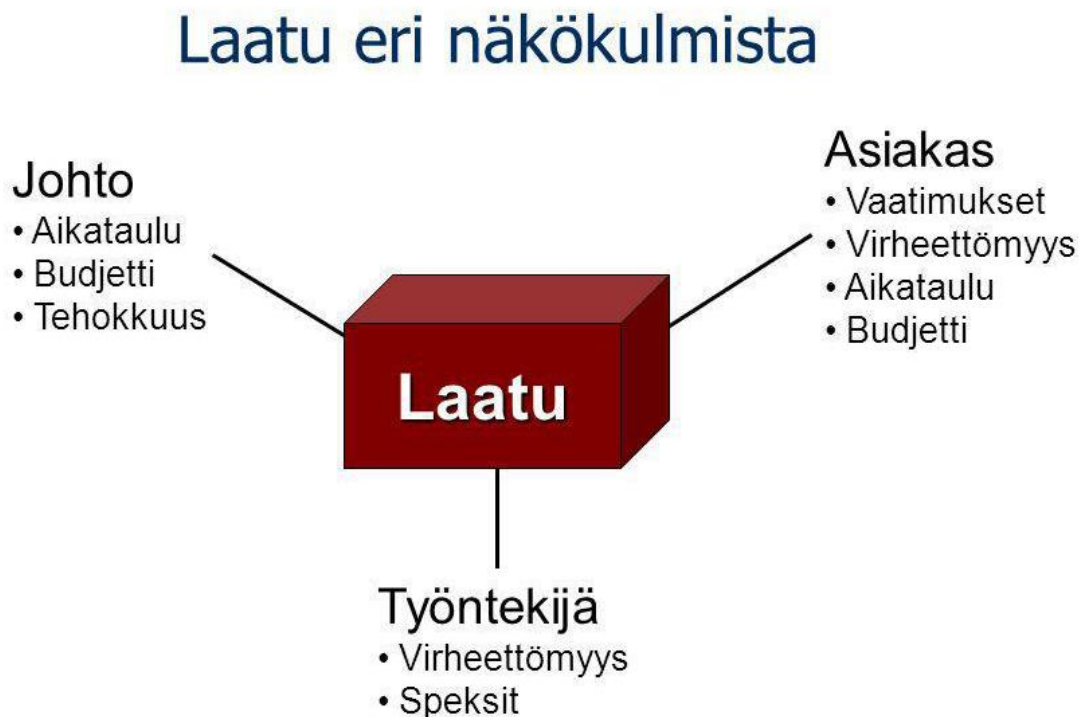
Aiheen mielenkiintoisin osa tulee varmasti olemaan testitulosten käsittely ja tulosten perusteella tehdyt päätelmät, joiden pohjalta voidaan lähteä luotettavammin joko parantamaan tai etsimään testiaseman ongelmakohtia. Työssä lopussa olevat liitteet ovat kokonaisuudessaan Gage R&R -testien tuloksia.

## 2 Tuotannon laadunohjaus

### 2.1 Laatukäsitys

Laatu on käsite, joka on erittäin vaikeasti määriteltävissä, sillä arvioijan näkökulma vaikuttaa tulokseen; laatu saa eri sisällön riippuen siitä, missä asemassa laadun arvioija on ja mitä hän on tekemässä. Tämän lisäksi käsite on aikaan sidottu. Laadusta on käyty vilkasta keskustelua jo 1960-luvulta lähtien, ja sanan merkitys on selvästi muuttunut ajan saatossa. Vieläkään ei välttämättä ole selkeää määritelmää, josta tutkijat ja filosofit olisivat samaa mieltä. [2, s. 16–17.]

Laatu-sanalla ymmärretään selvästi eri asioita, joten on tärkeää tiedostaa eri näkökulmien vaikutus laadun merkitsevyyteen. Kuvassa 1 on esitelty muutama eri perspektiivi, josta laatua voidaan tarkkailla.



Kuva 1. Laatu eri näkökulmista [3].

Yrityksmaailmassa laatu käytännössä tarkoittaa asiakkaan tarpeiden täyttämistä yrityksen kannalta mahdollisimman tehokkaalla ja kannattavalla tavalla. Kuitenkaan asiakas-tyytyväisyyteen ei kannata pyrkiä hinnalla millä hyvänsä, ellei se ole yritykselle kannat-



tavaa. Tuotteiden ja palveluiden kehittyminen, modernisointi sekä uudet innovaatiot aiheuttavat tilanteita, joissa laadulle asetetaan jatkuvasti uusia vaatimuksia. Tuote saattaa myös olla yrityksen mielestä kaikin puolin erinomainen, mutta asiakkaan mielestä ylilaatua, josta hän ei halua maksaa turhaan. Esimerkiksi tilanne, jolloin tuotteessa on reilusti enemmän ominaisuuksia verrattuna asiakkaan tarpeisiin. Toisaalta, mikäli laatu on nimenomaan se tekijä, jolla yritys saavuttaa kilpailuedun markkinoilla, ei voida puhua ylilaadusta. [4, s. 18–20.]

Joseph Juranin [4, s. 19–20] kokonaisvaltaisen laadunhallinnan laatumääritelmän mukaan laatu on soveltuvuutta käyttötarkoitukseen. Tämä määritelmä ottaa yksinkertaisella tavalla huomioon hyvän laadun ominaisuudet.

## 2.2 Tilastollinen prosessinohjaus

Tri Walter A. Shewhart loi tilastollisen prosessinohjauksen (SPC, Statistical Process Control) jo 1920–30-luvulla, mutta vasta 1980-luvulla yritykset alkoivat kiinnostua laadun parantamisesta, kun tri W. Edwards Deming alkoi opettaa tilastollisuuteen liittyvää laatujohtamista. [5, s. 10.]

Tilastollisessa ajattelumallissa vallitsee periaate, jonka mukaan kaikki työ muodostaa keskenään sidoksissa olevia prosesseja, jotka ovat vaihtelevia, ja että vaihtelun pienentäminen mahdollistaa työn paranemisen.

SPC:tä käytetään apuna tutkittaessa systeemin tai prosessin tilaa sekä sillä voidaan selvittää, johtuuko hajonta yleisistä syistä vai vaikuttaako systeemiin jokin poikkeava häiriö, eli erityisyys. SPC:llä ensin erotetaan yleiset ja erityisyyt toisistaan ja pyritään sitten ohjaamaan prosessia siihen suuntaan, että siihen vaikuttavat ainoastaan yleiset hajontaa aiheuttavat tekijät. Mahdolliset erityisyyt pyritään aina poistamaan mahdollisimman nopeasti. [5, s. 10.]

### 2.2.1 Vaihtelu

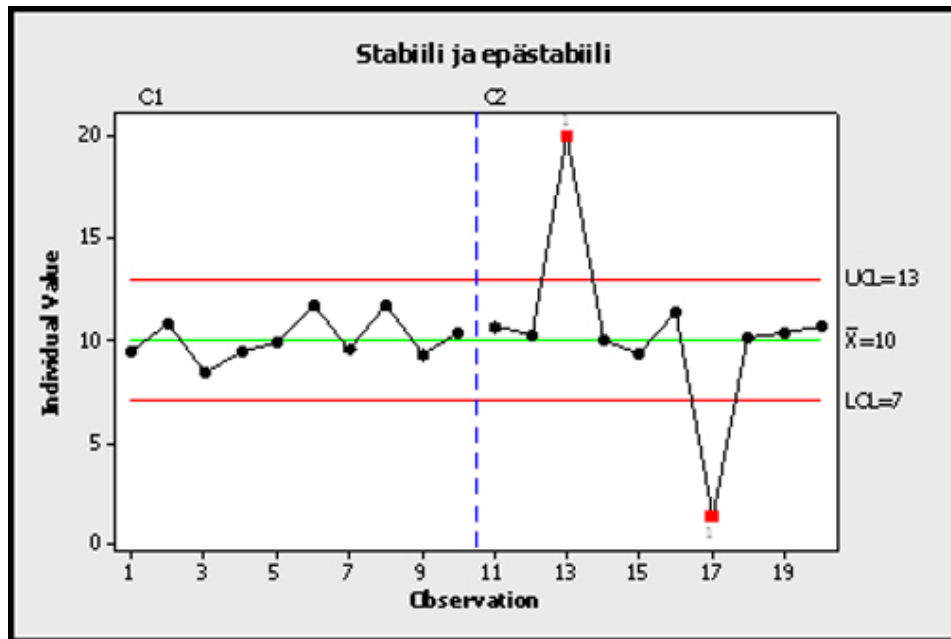
Vaihtelua tapahtuu kaikkialla, minkä vuoksi kaikki maailman ilmiöt kuten mittauksetkin voidaan ymmärtää vain likimain. Joka puolella tapahtuva vaihtelu, kohina ja häiriösumu aiheuttavat sen, ettei sataprosenttista varmuutta ole olemassakaan. Myös kaikkien prosessien ulostulossa esiintyy vaihtelua, jonka takia kaksi samanlaista tuotetta tai tuoteominaisuutta eivät milloinkaan ole samanlaisia. [5, s. 11.]

Kaikissa mittalaitteissa esiintyy hajontaa ja niilläkin on omat tarkkuutensa. Mittalaitteiden lisäksi mittaustapahtumassa voi esiintyä hajontaa, joka johtuu muun muassa mitaajasta, mittausten menetelmästä ja ympäristön olosuhteista. Näin ollen prosessin ohjauksessa on tärkeää ymmärtää vaihtelun merkitys. Prosessissa vaihtelua aiheuttavat joko yleiset tai erityisyydet. [5, s. 11.]

### 2.2.2 Yleiset ja erityisyydet

Mittausprosessissa tai -systeemissä suurin osa virheistä (94–98 %) johtuu satunnaisesta vaihtelusta, eli yleisistä syistä. Tämä vaihtelu on täysin normaalia ja se johtuu prosessista itsestään, eikä sitä voida poistaa. Mikäli satunnaista vaihtelua lähdetäisiin korjaamaan, olisi siitä vain haittaa ja systeemi muuttuisi epästabiilimmaksi, eli vaihtelu todennäköisesti kasvaisi vaan entisestään. Sen sijaan, jos yritys haluaa pienentää satunnaista vaihtelua, on investoitava itse systeemin parantamiseen esimerkiksi parantamalla laitteita. [5, s. 11–14.]

Erityisyydet muodostuvat poikkeavista tekijöistä, jotka eivät ole ennakoitavissa. Erityisyydet poikkeavat selvästi muusta prosessin hajonnasta, ja ovat siten tunnistettavissa. Vaihtelusta noin 2–6 % muodostuu erityisyydet. [5, s. 11–14.]



Kuva 2. Yleisistä ja erityisistä johtuvia poikkeamia [6].

Kuvassa 2 on esimerkki kahdesta eri prosessista. Vasemmanpuoleinen stabiili prosessi pysyy ohjausrajojen sisällä, jolloin kyse on normaalista satunnaisesta vaihtelusta, eli puhutaan yleisistä syistä aiheutuvasta vaihtelusta. Ohjausrajat määräytyvät prosessin sisäisen käyttäytymisen perusteella. Oikeanpuoleisessa epästabiilissa prosessissa kaksi pistettä on selvästi ohjausrajojen ulkopuolella. Tämän kaltaista hajontaa kutsutaan erityisistä johtuviksi poikkeamiksi.

Eryityisyyttä voi aiheuttaa esimerkiksi materiaalipoikkeamat tai ohjelmointi- ja asetusvirheet. Prosessin parantamiseksi tulisi ensisijaisesti keskittyä löytämään erityisistä johtuva vaihtelu. Eryityisyyden löytäminen edellyttää hyvää systeemin tuntemusta ja teollista koesuunnittelua. [5, s. 11–14.]

### 3 Testausympäristö

#### 3.1 ESD-suojaus

Tämän opinnäytetyön käytännön työn osuus tehtiin Vaisalassa erään testiaseman ympäristöön. Testiasema sijaitsee instrumenttipuolen kalibrintihuoneessa ESD-alueella, jossa halutaan välttää sähköstaattista purkausta käyttämällä ESD-takkeja ja -kenkiä. Kalibrintihuoneessa käsitellään ja testataan paljon elektroniikkatuotteita, jotka ovat äärimmäisen herkkiä ESD:lle.

Työpaikalla, kuten arkiaskareissakin, ihmiset varautuvat useita kertoja päivässä jopa monen tuhannen voltin potentiaaliin. Parhaimmillaan ihmisen kehosta on mitattu jopa 30 000 V:n potentiaaleja. Mahdollinen vaaratilanne voi aiheutua elektroniikkamateriaaliin koskettaessa, jolloin ihminen luo sähkövaraukselle purkausreitit kyseiseen laitteeseen. Esimerkiksi piirilevyjen pienimmät komponentit voivat tässä tapauksessa vaurioitua tai pahimmillaan tuhoutua.

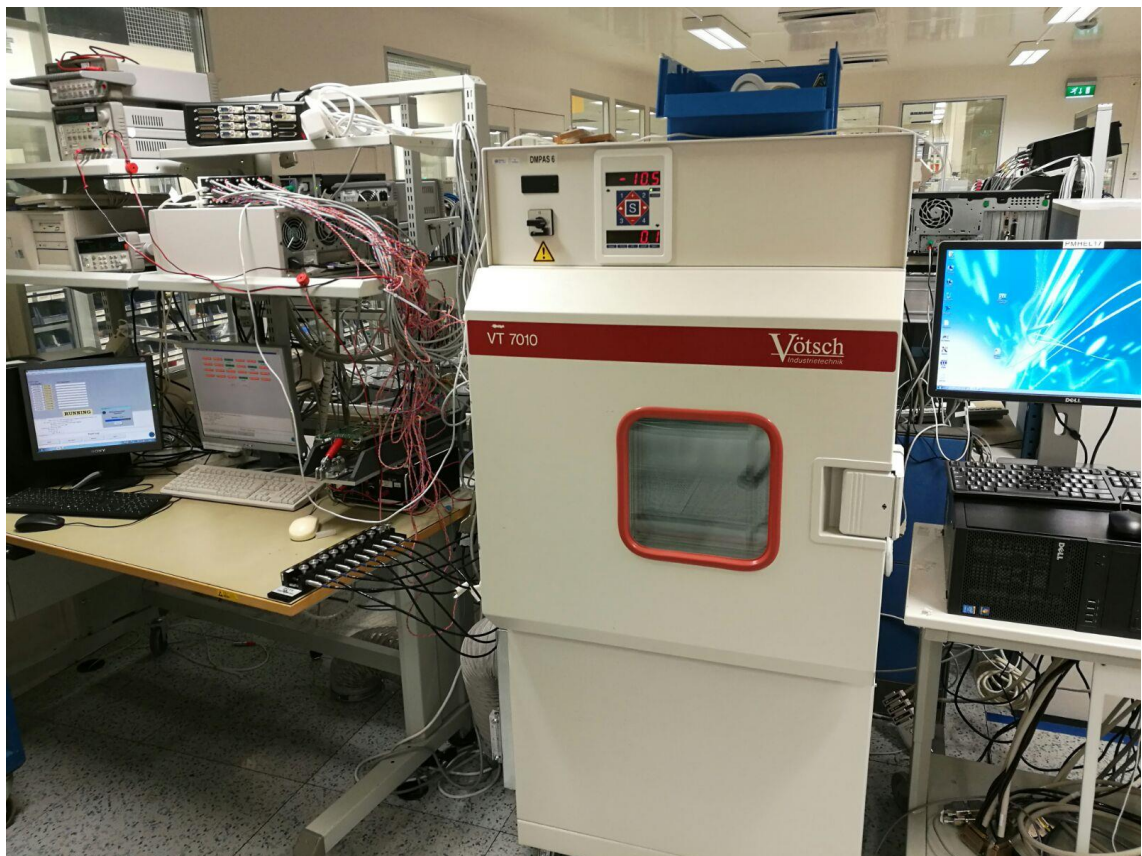
Elektroniikkatuotteiden valmistusprosessissa tai testausvaiheessa huono saanto johtavat usein yksittäistapausten ESD-vaurioanalyysiin, mutta harvemmin tehdään laajamittaisia tutkimuksia niiden kustannusten vuoksi. ESD-vikojen analysointi on tuotekohtaisia ja yleensä erittäin vaikea toteuttaa. Komponenttien tutkiminen edellyttää myös niiden perusteellista tuntemusta ja kalliita laiteinvestointeja sen lisäksi, että vaurioiden havaitseminen voi siitä huolimatta olla lähes mahdotonta. [7, s. 34.]

Jos virhe huomataan prosessin alkuvaiheessa, korjauskustannukset muodostuvat lähinnä testaus-, komponentti- ja korjauskuluista, jättäen kokonaissumman suhteellisen pieneksi. Sen sijaan loppukäyttäjän eli asiakkaan havaitseman virheen korjaaminen voi maksaa moninkertaisesti kuljetus- ym. kustannusten vuoksi. [7, s. 34.] Tämän takia testiaseman ympäristössä työskennellessä on noudatettava tietynlaista varovaisuutta ja pidettävä huoli ESD-suojauksesta.

### 3.2 Testiasema

Testiaseman välittömään läheisyyteen kuuluu kolme tietokonetta, joilla kaikilla ajetaan eri testejä. Testiympäristön kahta vanhempaa testiohjelmaa pyöritetään Windows NT Workstation -alustalla, ja puolestaan uudempaa testiä Windows 7 -alustan omaavalla testitietokoneella.

Tämä insinööri työ keskittyy ainoastaan AOUT-1-testin saannon tutkimiseen sekä testitietokoneen Windows NT Workstation -alustan päivittämiseen, eli käytännössä testiohjelma ja testiin tarvittava laitteisto siirretään uudemman Windows-alustan omaavalle tietokoneelle. Työn tavoitteena oli jättää testiympäristöön yksi tietokone, jolla kaikkia testejä voitaisiin ajaa. Windowsin päivityksestä kerrotaan lisää myöhemmin luvussa 3.6.



Kuva 3. Testiaseman yleisnäkymä.

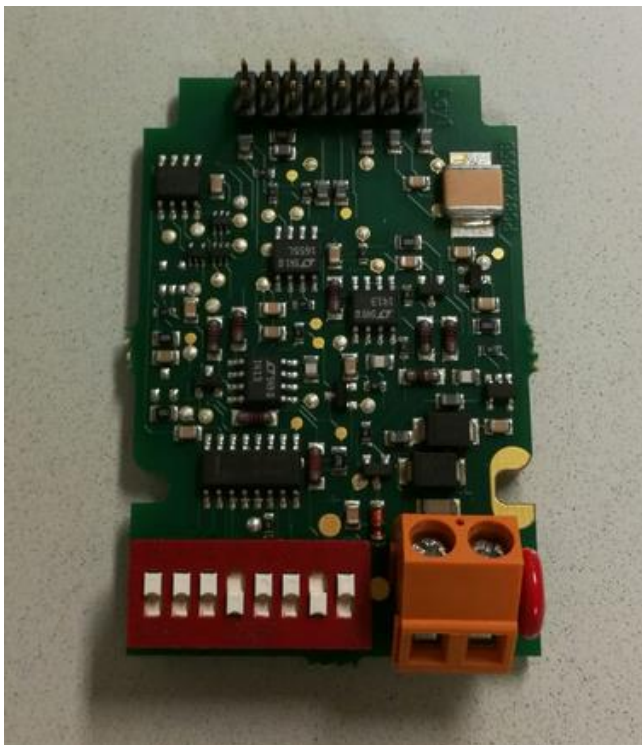
Testiaseman ympäristöön kuuluu myös kahdelle testille yhteinen VÖTCH VT7010 -lämpötilakaappi, jossa testattavat tuotteet ovat testin aikana. Lämpötilakaapissa voi-

daan lämpötilaa säätää tarkasti johonkin haluttuun testauspisteeseen. Lämpötilan asetusarvon varmistamiseksi kaapin sisälle on sijoitettu kaksi PT100-anturia. Kuvassa 3 lämpötilakaappi sijaitsee keskellä, ja AOUT-1-testin operointipiste vasemmassa reunassa.

### 3.3 AOUT-1-testi ja testattava tuote

Testiasemassa testataan piirikortteja, AOUT-1CB-moduuleita. Testauksen jälkeen piirikortit menevät ilmanpainemittareihin, jotta niihin saataisiin tarkempi analoginen ulostulo. Analoginen ulostulo voi olla joko milliampeereina tai kahtena eri jänniteulostulona riippuen asiakkaan vaatimuksista. Näiden vaatimuksien mukaan moduulissa olevat dippi-kytkimet asetetaan oikeaan asentoon määräämään lähtöön haluttua signaalia.

Analoginen ulostulo saadaan kuvan 4 piirikortin alareunassa olevasta oranssista liittimestä. Liittimen vasemmalla puolella on analoginen maa, ja puolestaan oikealla puolella analoginen plussa.

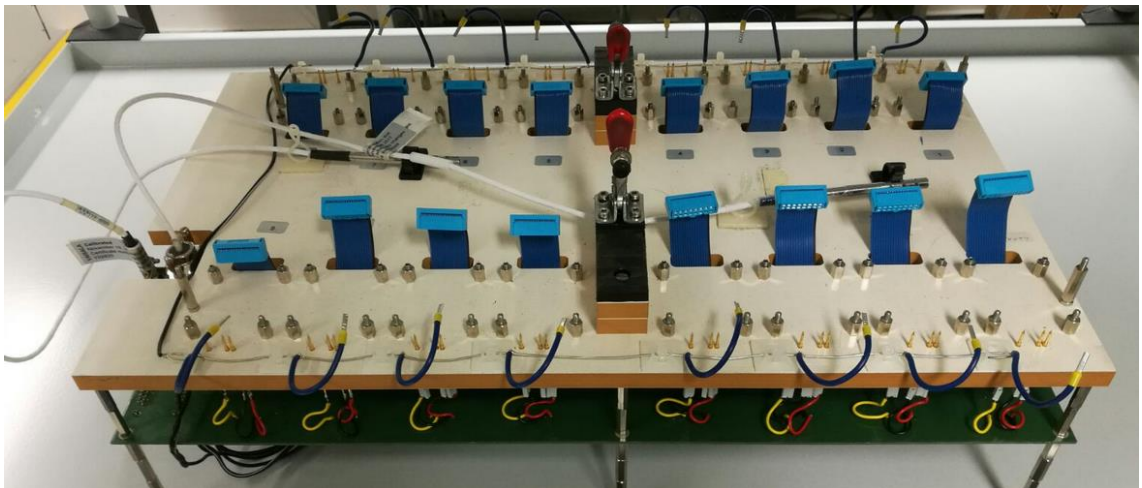


Kuva 4. AOUT-1CB-moduuli.

Testiohjelman tarkoitus on tehdä piirikorteille lämpötilakompensointi neljässä eri lämpötilassa:

- 20 °C
- 60 °C
- -5 °C
- 30 °C.

Lämpötilakompensointi tehdään lämpötilakaapissa, jonka sisällä piirikortit ovat testin aikana. Piirikortit asetetaan lämpötilakaapin sisällä olevaan testijigiin, niin sanottuun neulapetiin. Jokaiselle piirikortille on neulapedissä omat mittausneulat, jotka painautuvat piirikortin pohjaan, kun moduulit on asetettu paikalleen. Mittalaitteena testiasemassa on Agilent 34970A, joka kommunikoi tietokoneen kanssa GBIP-väylän avulla. Mittalaitte mittaa jännite- ja virtasignaaleja testijigissä olevien mittausneulojen avulla. [8.]



Kuva 5. Testijigi.

Testijigiin mahtuu 16 piirikorttia, eli testiasemassa voidaan ajaa maksimissaan 16:ta piirikorttia kerrallaan. Testattavien tuotteiden määrällä ei kuitenkaan ole muita rajoituksia. Lämpötilakompensoinnilla pyritään poistamaan lämpötilan vaikutus moduulin analogisesta ulostulosta, sillä ilmanpainemittauksissa on hyvin tarkkaa, ettei mittavirheitä synny ulkoisen lämpötilan vaikutuksesta. Kuvassa 5 testijigi on otettu pois lämpötilakaapista kuvan selventämiseksi.



### 3.4 Mittalaitteet

Agilent Technologies inc. on maailman suurin mittalaittevalmistaja, jonka tuotteita käytetään myös AOUT-1-testin mittalaitteina. Testiasemassa on Agilent 34970A -tiedonkeruuyksikkö (kuvat 6 ja 7), joka on suunniteltu nykypäivän haastaviin testaus- ja mittaustarpeisiin. Tiedonkeruuyksikköön on sisäänrakennettu digitaalinen yleismittari, asennettavissa 8-valinnainen kytkin ja ohjausmoduuleja. Yksikkö pystyy muun muassa mittaamaan ja muuntamaan 11 erilaista tulosignaalia. Testiaseman Agilent 34970A:n vapaisiin korttipaikkoihin on asennettu 34901A multiplexer-kortti, 34903A yleiskäyttöinen relekortti ja 34907A funktiokortti. [9;10.]



Kuva 6. Tiedonkeruuyksikön etupaneeli [11].



Kuva 7. Tiedonkeruuyksikön takapaneeli [11].

20-kanavaisen rele-multiplexerin avulla tiedonkeruuyksiköstä tulee tehokas dataloggeri, joka pystyy tarvittaessa vaihtamaan kanavaa 60 kertaa sekunnissa. AOUT-1-testissä moduulit yhdistetään yksitellen HMT330-emolevyyn, joka kommunikoi moduulien kans-



sa. Tietokone lähettää komentoja HTM330-emolevylle, joka pakottaa ohjelmallisesti moduulien tulopuolelle eri DAC-arvoja, jolloin lähtösignaali mitataan tiedonkeruuyksikön sisäänrakennetun yleismittarin avulla.

Mittaustarkkuus on määritelty virheprosentteina. Valmistaja lupaa mittalaitteille 0,004 % tarkkuuden tasajännitemittauksissa ja 0,05 % tarkkuuden virtamittauksissa. Mittalaitteet ovat valmistajan mukaan kalibroitava kerran vuodessa. Gage R&R -testejä varten kalibrointia ei ollut syytä tehdä, sillä edellinen kalibrointi oli voimassa. [10.]

### 3.5 Testiohjelma

Testiohjelman koodi ja käyttöliittymä on tehty Visual Basic 6.0:lla, joka on nopea tapa luoda ohjelmia Microsoft Windowsiin. Visual Basic tarjoaa suuren joukon työkaluja yksinkertaistamaan nopeaa ohjelmistokehitystä. Visual Basic on luotu vuonna 1998, ja Microsoftin tuki tälle on loppunut jo vuonna 2008, joten kyseessä ei ole kuitenkaan mikään uusi kääntäjä tai ohjelmointikieli.

Sana "Visual" viittaa menetelmään luoda graafisia käyttöliittymiä, eli sen sijaan että tarvitsisi kirjoittaa lukemattomia koodirivejä, Visual Basicissa voi yksinkertaisesti asettaa esirakennettuja olioita näytölle. Tämä onnistuu lähes samalla lailla kuin painikkeiden tai tekstikenttien piirtäminen jollain piirto-ohjelmalla, esimerkiksi Paintilla. Kaikista yksinkertaisimmillaan näin tekemällä saadaan käyttöliittymän visuaalinen puoli valmiiksi. [12, s. 3]

Jälkimmäinen osa "Basic" puolestaan viittaa BASIC (Beginners All-Purpose Symbolic Instruction Code) -kieleen, joka on kaikista yleisin ohjelmointikieli koko ohjelmoinnin tietokonehistoriassa. Useita satoja käskyjä, funktioita ja avainsanoja sisältävä Visual Basic on siis johdettu alkuperäisestä BASIC-kielestä. Useimmat edellä mainituista toiminnoista liittyvät suoraan graafiseen käyttöliittymään. Monet asiat, joihin Visual Basic pystyy, eivät välttämättä ole perusasioita ollenkaan. Visual Basic kieli on melko tehokas, ja sillä pystytään toteuttamaan haastavampiakin ohjelmointitehtäviä. [12, s. 3]

### 3.6 Windows-alustan päivitys

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli päivittää testiaseman Windows NT Workstation -käyttöjärjestelmä uudempaan Windows-alustaan. Käytännössä päivitys aloitettiin ottamalla käyttöön Windows 7:n omaava testitietokone, jolla testattiin testiohjelman yhteensopivuutta uudemmassa käyttöjärjestelmässä. Näin varmistettiin, että testiohjelma toimi Windows 7 -alustalla ennen kuin koko testiasema mittalaitteineen siirrettäisiin lopulliselle tietokoneelle.

Testitietokoneelle ladattiin "bootitikulta", eli muistitikulta uusi image. Image on tavaltaan kopio tietokoneen kovalevystä, joka sisälsi Visual Basic 6.0:n, yrityksen sisäiset ohjelmat ja muut hyödylliset ohjelmat. Uuden imagen lataamisen jälkeen Windows-asetukset oli muokattava sopivaksi testiaseman käyttöön ja siirrettävä testiaseman testitiedosto verkkolevyltä C-levylle.

Mittalaitteiden ja virtalähteen yhdistäminen uudelle tietokoneelle tehtiin ensin samaan tyyliin vanhan tietokoneen kanssa PCI-GBIP-kortin avulla, mutta myöhemmin se vaihdettiin USB-GBIP-kaapeliin. Mittalaitteet kuuluvat kaikki joko Agilent tai Keysight-valmistajan tuotteisiin, joka on Agilentin uusi nimi. Myös mittalaitteiden konfigurointi tehtiin Agilent IO -nimisen ohjelman avulla. Lämpötilakaappi yhdistettiin RS232-kaapelilla tietokoneeseen asennettuun Digin EdgePorttiin eli lisäsarjaporttiin. Tämän jälkeen COM-portit konfiguroitiin sopiviksi vastaamaan testiaseman koodissa olevia COM-portteja, jotta muun muassa yhteys lämpötilakaappiin onnistuisi.

Testiohjelman ajaminen uudemmalla Windows-alustalla herätti jo ennestään kysymyksiä koodin yhteensopivuudesta, mutta ongelmia ei kuitenkaan sen suhteen kohdattu. Sen sijaan muita ongelmia ilmeni, vaikka COM-portit oli konfiguroitu moneen kertaan täsmällisesti. Testiohjelman ottaessa yhteyttä lämpötilakaappiin, tietokoneen näyttöön ilmestyi toistamiseen blue-screen, jonka jälkeen seurasi välitön Windowsin uudelleen käynnistyminen.

Ongelmaan ei löytynyt ratkaisua, vaikka

- Digin EdgePort vaihdettiin uuteen samanlaiseen
- Digin EdgePortin ajurit päivitettiin uudestaan

- tietokoneelle ajettiin uudet ajurit valmistajan internet-sivuilta
- tietokoneelle ladattiin image uudestaan.

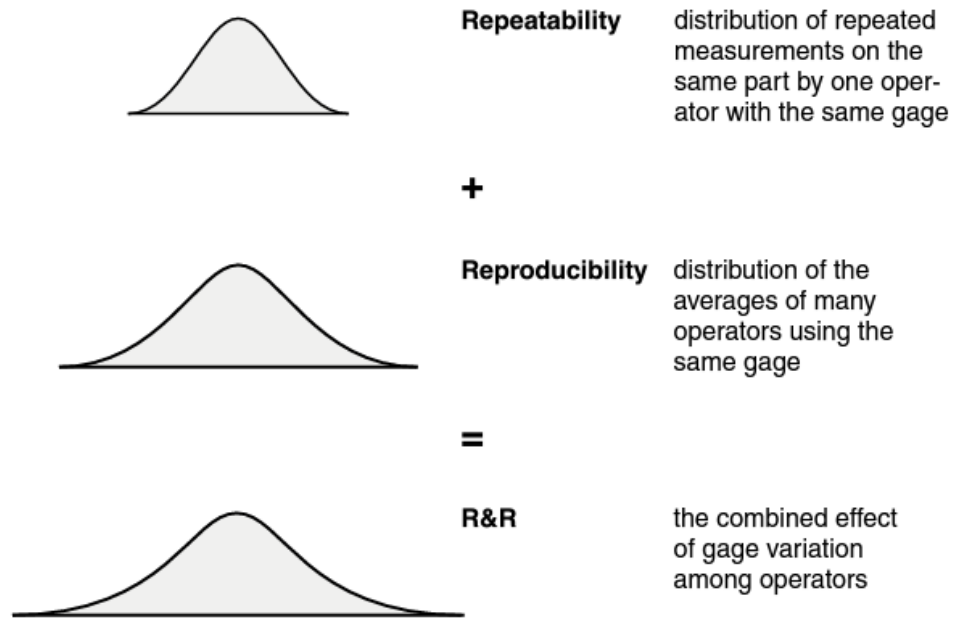
Lopulta kuitenkin selvisi, että tietokone haki automaattisesti Digin EdgePorttiin väärät ajurit, jonka takia koko Windows kaatui aina, kun lämpötilakaappiin otettiin yhteys sarjaportin kautta. Digin internet-sivuilta ladattiin oikeat ajurit ja ongelma poistui.

Windowsin päivityksen jälkeen tuotantokäyttöön otettiin Windows 7:llä varustettu testitietokone. Kun testitietokone osoittautui toimivaksi muutaman viikon ajan, alettiin perehtyä itse testiaseman saannon tutkimiseen Gage R&R -menetelmän avulla. Käytännötyön lopussa AOUT-1-testin testiohjelmat ja -laitteistot siirrettiin lopulliselle testikoneelle, ja testiaseman ympäristöön jäi vain yksi tietokone alkuperäisten suunnitelmien mukaisesti.

#### 4 Gage R&R

Prosessinohjauksen tarkoitus on selvittää prosessissa aiheutuva vaihtelu. Prosessin vaihtelu aiheuttaa vaihtelua myös tuotteissa ja sitä kautta tuotteiden laadussa. Jotta tuotteiden laatua pystytään parantamaan, on prosessista pystyttävä erottamaan mittalaitteen aiheuttama vaikutus mittaustulokseen. Gage R&R -analyysi on erinomainen menetelmä prosessin mittalaitteiden mittaustulosten analysointiin. [13.]

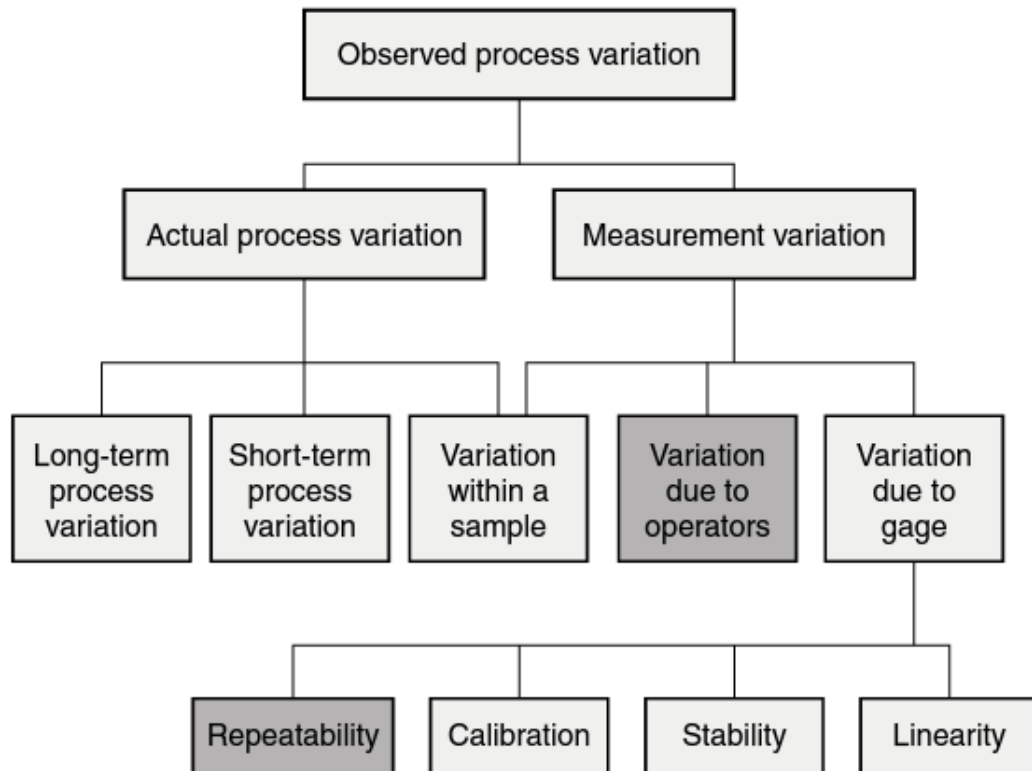
Menetelmän nimelle ei ole vastinetta suomen kielessä, vaan Gage R&R -termi on käytössä sellaisenaan myös suomalaisessa yritysmaailmassa. Lyhenne R&R tulee sanoista *repeatability* (toistettavuus) ja *reproducibility* (uusittavuus). Tässä tapauksessa *gage* tarkoittaa mittalaitetta, jolla voidaan mitata mitä tahansa valmistettavan tuotteen ominaisuutta.



Kuva 8. Toistettavuuden ja uusittavuuden yhteisvaikutus [14, s. 3].

Gage R&R -menetelmällä tutkittava vaihtelu voidaan jakaa kahteen osaan kuvan 8 mukaisesti, jolloin R&R kuvaa näiden kahden termin yhteisvaikutusta. Toistettavuutta voidaan tutkia silloin, kun operaattori mittaa samaa tuotetta samalla mittalaitteella useita kertoja. Toistettavuus siis kertoo, kuinka paljon hajontaa mittaustapahtumassa esiintyy mittalaitteiden takia. Puolestaan uusittavuutta tutkitaan silloin, kun useat operaattorit mittaavat samalla mittalaitteella samaa tuotetta useita kertoja, jolloin on siis mahdollista tutkia operaattorien aiheuttamaa vaihtelua mittaustuloksissa. [14, s. 1–6.]

Kuvassa 9 tummennetut alueet ovat Gage R&R -testin kattamia alueita prosessin vaihtelussa.



Kuva 9. Prosessin vaihtelutekijät [14, s. 2].

Kuvasta 9 huomataan, että Gage R&R -analyysi ei käsitä koko mittaussysteemiä. Kuitenkin toistettavuus ja uusittavuus ovat ensisijaisen tärkeitä silloin, kun halutaan tutkia mittauksen laatua.

#### 4.1 Toistettavuus ja uusittavuus menetelmät

Gage R&R -tutkimuksen suorittamistapa riippuu pitkälti prosessista, jolle se tehdään. Yleensä toistettavuus- ja uusittavuustesteihin valitaan 1–3 operaattoria ja vähintään 10 testikappaletta. Testikappaleet olisi hyvä valita hieman ulkonäöltään erilaisten joukosta, jolloin nähdään paremmin, pystyykö esimerkiksi mittalaite toistamaan itseään myös erilaisilla testikappaleilla. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista.

Analyysi voidaan toteuttaa käyttämällä useita eri tekniikoita, mutta kolme suosituinta niistä ovat

- vaihteluvälimenetelmä
- keskiarvo- ja vaihteluvälimenetelmä
- varianssianalyysi.

Analysoitavan datan käsittely on lähes samanlainen kahdella viimeisellä menetelmällä. Ensimmäisenä mainittu vaihteluvälimenetelmä antaa ainoastaan nopean arvion mittauksen vaihtelusta ja arvioidun kokonaiskuvan koko mittaussysteemistä, eikä sitä käyttämällä pysty erittelemään toistettavuutta ja uusittavuutta erillisiksi komponenteiksi. Tätä menetelmää suositellaan käytettäväksi silloin, kun halutaan nopeasti tarkistaa, onko GRR (Gage R&R) muuttunut merkittävästi. [15, s. 100–124.]

Keskiarvo- ja vaihteluvälimenetelmää sekä varianssianalyysia käyttämällä pystytään toistettavuus ja uusittavuus erittelemään erillisiksi komponenteiksi. Keskiarvo- ja vaihteluvälimenetelmässä ei kuitenkaan oteta huomioon operaattorin ja mittalaitteen välistä vaihtelua. Tässä insinööriyössä keskitytään pääsääntöisesti mittalaitteiden toistettavuuden tutkimiseen, mutta myös suppeasti uusittavuuden tutkimiseen. Mittaustuloksia tullaan analysoimaan varianssianalyysin (ANOVA, analyze of variances) avulla, jotta pystytään arvioimaan vaihtelu mahdollisimman tarkasti. [15, s. 100–124.]

Nykyään laskentapohjien käyttäminen analyysien laskemiseksi on jäänyt vähäiselle, sillä data pystytään analysoimaan ohjelmallisesti käyttäen esimerkiksi Minitab-ohjelmaa. Laskentaohjelman käyttö helpottaa merkittävästi datan käsittelyä, etenkin silloin, kun mittaustuloksia on valtava määrä. Mittaustulosten minimoimista ei myöskään suositella, sillä mitä enemmän mittaustuloksia on, sitä luotettavammats ovat myös mittaustulosten perusteella tehdyt päätelmät. [15, s. 100–124.]

#### 4.2 Varianssianalyysi

Varianssianalyysi on standardi tilastollinen tekniikka, jota voidaan käyttää analysoimaan mittausrvirheitä ja muita lähteitä, jotka aiheuttavat mittaustuloksissa vaihtelua. Varianssianalyysissä vaihtelu voidaan jakaa neljään ryhmään:

- tuotteen sisäinen vaihtelu
- operaattorista aiheutuva vaihtelu
- tuotteen ja operaattorin vuorovaikutuksesta aiheutuva vaihtelu
- mittalaitteesta aiheutuva vaihtelu.

Varianssianalyysi soveltuu mainiosti tilanteisiin, joissa halutaan tutkia sekä yksittäisen että usean muuttujan samanaikaista vaikutusta vasteeseen, eli miten eri tekijät vaikuttavat analysoitavaan muuttujaan. Varianssianalyysissa verrataan yhden tai usean muuttujan ryhmäkeskiarvoja. Mikäli muuttujia on vain yksi, käytetään yksisuuntaista varianssianalyysia ja jos muuttujia on kaksi, käytetään puolestaan kaksisuuntaista varianssianalyysia. Kaksisuuntaisessa varianssianalyysissa päävaikutusten lisäksi saadaan erikseen selville myös muuttujien yhdysvaikutukset. [16, s. 102–104.]

Varianssianalyysin käytössä on joitakin etuja verrattuna aiemmin mainittuihin kahteen menetelmään, ja niitä ovat muun muassa seuraavat:

- Pystytään käsittelemään mitä tahansa kokeellisia laitteistoja.
- Voidaan arvioida vaihtelu vielä tarkemmin.
- Saadaan purettua enemmän lisätietoa (esim. operaattorin ja tuotteen välisestä interaktiosta).

Varianssianalyysin haittana on puolestaan se, että numeeriset laskennat ovat monimutkaisempia ja käyttäjät tarvitsevat jonkin verran tilastollista tietoa tulosten tulkitsemiseksi. ANOVA-menetelmän käyttöä kuitenkin suositellaan, etenkin jos tuloksia on mahdollista analysoida tietokoneella erillisellä ohjelmalla. [15, s. 100–124.]

Tässä insinööriyössä Gage R&R -tuloksia tullaan analysoimaan käyttäen apuna Minitab-ohjelmaa, joten laskentakaavoihin ei perehdytä tarkemmin. Minitab-ohjelmassa on oletuksena 95 %:n luottamusväli, jota käytetään tämän työn tulosten analysoinnissa. Luottamusväliä käytetään arvioimaan mittausten luotettavuutta [17, s. 60].

## 5 Gage R&R -suunnitelma

Tarkoituksena oli tutkia mittalaitteen sekä testijigin aiheuttamaa vaihtelua mittaustuloksiin. Operaattorin vaikutusta ei haluttu tutkia, sillä testin aloittaminen ja piirilevyjen asettaminen lämpötilakaappiin ovat pitkälti mekaanisia suorituksia, eikä sen vaikutuksen tutkimista nähty tarpeellisena suunniteltaessa Gage R&R -ajoja. Testijigin kontaktihäiriöt ja huono mekaniikka olivat tiedossa jo ennestään ja ne hoidetaan erikseen, joten niiden tutkiminen tässä työssä ei ole tarpeellista.

### 5.1 Testiajot

Gage R&R -ajot suoritettiin kahdessa osassa, sillä ajojen ensisijainen tarkoitus oli keskittyä ainoastaan mittalaitteiden toistettavuuden tutkimiseen. Testiajojen jälkeen päätettiin kuitenkin tehdä lisäksi pienimuotoinen paikkariippuvuustesti testijigille, jossa tutkittiin jigipaikkojen vaikutusta mittaustuloksiin.

Toistettavuus- sekä uusittavuustesteihin kului yhteensä aikaa noin 7–14 päivää, sillä testiasema oli jatkuvassa tuotantokäytössä. Testiaseman käytettävyyteen Gage R&R -ajoissa vaikutti muun muassa AOUT–1-moduulien vaihteleva tarve tuotannossa. Joka päivä testejä ei voitu suorittaa, ja yhden testin tekemiseen meni keskimäärin työpäivän verran aikaa.

#### 5.1.1 Toistettavuustestit

Testeihin valittiin 16 kappaletta testimoduuleja, joita käytettiin koko tutkimuksen ajan. Näistä 16 moduulista otettiin talteen sarjanumerot ja testauspaikat, joihin moduulit olivat asetettu. Testeissä ajettiin kolme ajoa 16 moduulilla siten, että kaikki moduulit olivat jokaisella ajolla samoissa testipaikoissa. Testiajojen välissä moduulit otettiin irti testijigistä, ja asennettiin uudestaan samoilta paikoille ennen seuraavan testin alkua. Näin otettiin huomioon testiaseman normaali käytäntö tuotantokäytössä eli moduulien poistaminen ja uusien asettaminen tilalle.

Ennen Gage R&R -ajojen aloittamista otettiin huomioon moduulien lämpötilamallien virittyminen testin päätyttyä. Kun moduuli laitetaan uudestaan testiin, testiohjelma nolaa korjauskertoimet, eivätkä ne näin ollen aiheuta vääryyttä mittaustuloksissa.



### 5.1.2 Uusittavuustestit

Uusittavuustesteissä tutkittiin eri testipaikkojen vaikutusta mittaustulokseen. Testipaikoista valittiin testeihin paikat 1, 4, 9 ja 12. Paikat valittiin niillä perustein, että molemmista testipaikkariveistä otetaan testiin kaksi paikkaa – yksi reunasta ja yksi keskeltä. Piirikorttien asettuminen testijigiin ei ole täysin tasainen, sillä puristusrimaa puristetaan ainoastaan keskeltä, jolloin reunapaikoissa olevat piirikortit saattavat jäädä aavistuksen verran heilumaan. Myös tämä seikka huomioon ottaen paikat oli hyvä valita reunoilta ja keskeltä.

Testeihin valittiin neljä testimoduulia, joista kahta kierrätettiin vuoron perään toisen testirivin paikoilla (1 ja 4) ja vastaavasti kahta toisen testirivin paikoilla (9 ja 12). Toisin sanoen, ensimmäisen testiajon jälkeen takarivin moduulit vaihdettiin takarivin testipaikkojen kesken, ja eturivin moduulit vaihdettiin eturivin testipaikkojen kesken. Tätä toistettiin neljän ajon verran, jolloin kaikki moduulit olivat käyneet kahdessa eri testipaikassa kaksi kertaa.

### 5.2 Tutkittavat muuttujat

Toistettavuus- kuin uusittavuustesteissäkin ensisijaisiksi ulostulomuuttujiksi valittiin testiaseman mittaamat jännite- ja virtasignaalien arvot. Näiden arvojen toistettavuutta tutkittiin kolmella eri DAC-arvolla (1 000, 30 000, 65 000), molemmilla jännitealueilla (0–1 V, 0–10 V) ja virta-alueella (0–20 mA) sekä lämpötilakaapin maksimi lämpötilassa, eli 60 celsiusasteessa.

DAC-arvot ovat testiaseman syöttämiä pakotettuja tuloarvoja piirikorteille, joiden avulla katsotaan, mikä ulostuloarvo saadaan kullakin DAC-arvolla. Mitattuja ulostuloarvoja muun muassa verrataan referenssiarvoihin, eli ihanteellisiin arvoihin, joihin tietyillä DAC-arvoilla halutaan päästä. Näiden poikkeamien perusteella lasketaan testin loppuvaiheessa korjauskertoimet, jotka syötetään piirikorteille.

Virta- ja jännitesignaalien raakadatat tallentuivat verkkolevyllä omiin kansioihin testauspäivämäärien mukaan. Testitulokset olivat saatavilla tietokannasta hakemalla.

Toistettavuus- ja uusittavuustesteissä tutkittiin myös samoilla jännite- ja virta-alueilla, ja samoilla DAC-arvoilla eri lämpötilassa olevien jännite- ja virtasignaalien erotuksien

keskiarvoja. Lämpötiloja ja DAC-arvoja otettiin tässä tapauksessa ainoastaan kaksi mittaustulosten valtavan määrän ennalta ehkäisemiseksi. Jännite- ja virtasignaalien erotuksien keskiarvoja vertailtiin siis  $-5$  ja  $60$  celsiusasteen välillä ja DAC-arvoiksi valittiin  $1\,000$  ja  $65\,000$ . Nämä muuttujat laskettiin itse Excel-taulukkoa ja raakadataa apuna käyttäen.

Toistettavuustesteissä ylimääräiseksi muuttujaksi valittiin vielä  $dV/dT$ -muuttuja, jonka yksikkö on  $\text{ppm}/^\circ\text{C}$  eli parts per million per celsiusaste. Tämä muuttuja kuvaa maksimaalista lämpötilariippuvuutta ja sen laskentakaava on esitetty alapuolella.

$$\frac{dV}{dT} = \left( \frac{V_E - \bar{V}_{EH}}{V_{REF}(T - T_H)} \right) \cdot 1\,000\,000 \quad (1)$$

$v_E$  on mittauslämpötilassa mitattu virhe

$\bar{v}_{EH}$  on huoneenlämpötilassa mitattujen mittaustulosten virheiden keskiarvo

$v_{ref}$  on maksimi DAC-arvon referenssitulos

$T$  on mittauslämpötila

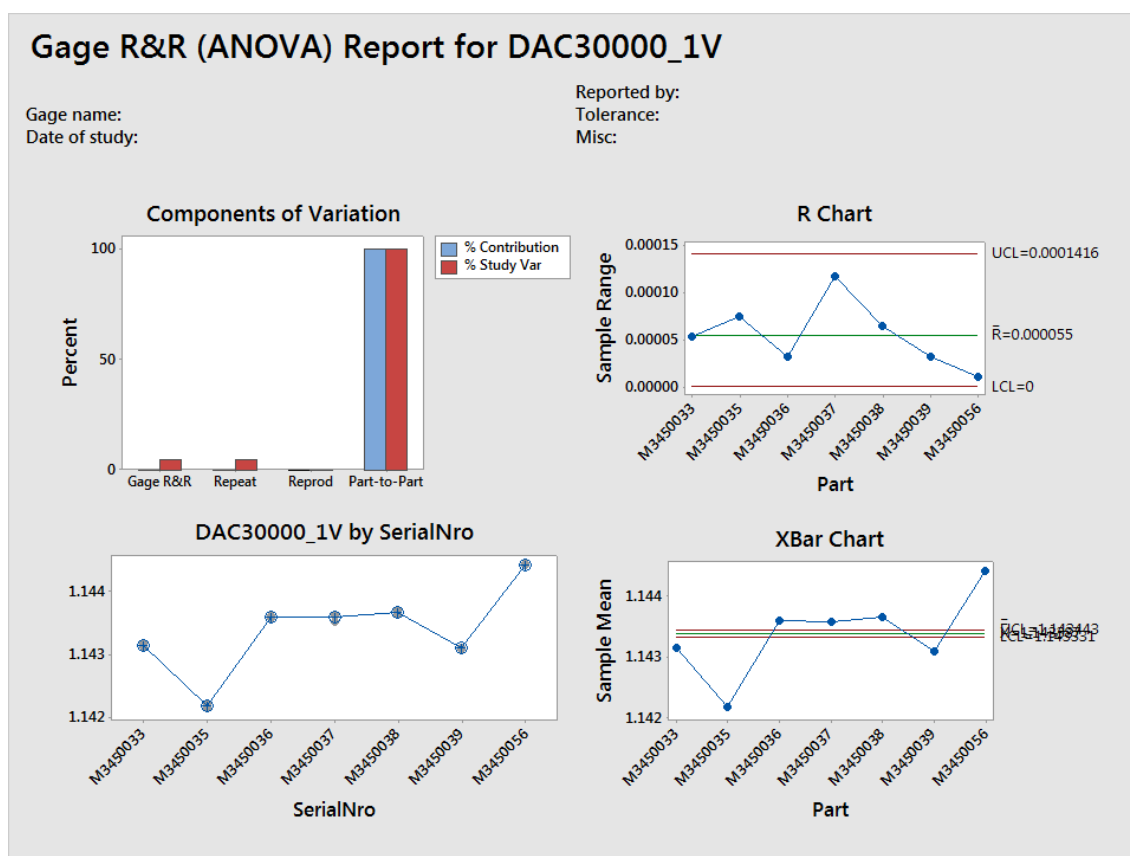
$T_H$  on huoneenlämpötilan keskiarvo.

Testiaseman laskentapohja laskee lämpötilariippuvuuden kaavan 1 mukaisesti. Ensin lasketaan huoneenlämpötilassa mitattujen mittaustulosten virheiden keskiarvo, joka miinustetaan muissa lämpötiloissa mitatuista virheistä. Sen jälkeen tulos jaetaan maksimi DAC-arvon referenssituloksella, joka on ensin kerrottu huoneenlämpötilan keskiarvon ja mittauslämpötilan erotuksella. Lopuksi vastaus kerrotaan miljoonalla, jolloin yksiköksi saadaan  $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ . [18.]

## 6 Tulokset ja päätelmät

Gage R&R -ajojen jälkeen tuloksia analysoitiin tietokoneella Minitabilla. Mittalaitteen toistettavuustesteissä testikappaleita oli 16, mutta näistä jouduttiin yhdeksän kappaletta jättämään kokonaan pois tulosten analysoinnista, sillä ne eivät päässeet testistä läpi millään kolmella testikerralla bogus-errorin takia. Gage R&R -testillä ei voida ottaa kantaa tuloksiin, jotka ovat reilusti mittausrajojen ulkopuolella tai poikkeavat reilusti muista mittaustuloksista. Toistettavuuden tutkimiseen otettiin näin ollen seitsemän testikappaletta.

Tulosten analysoinnissa hieman yllätyksenä tuli testiaseman toistettavuus, joka osoitautui Gage R&R -analyysin perusteella erinomaiseksi. Erinomaista toistettavuutta havaittiin etenkin silloin, kun verrattiin mittalaitteen mittaamia jännite- ja virtasignaalien arvoja. Tulokset vielä paranivat hieman tutkittaessa näiden erotuksien keskiarvoa, mikä puolestaan oli täysin odotettavaa.



Kuva 10. Gage R&R -tulokset yhden voltin jännitealueella, DAC-arvon ollessa 30 000 ja lämpötilan 60 °C.

Taulukko 1. Kuvan 10 numeeriset tulokset.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000344	0.0002063	4.98
Repeatability	0.0000344	0.0002063	4.98
Part-To-Part	0.0006895	0.0041370	99.88
Total Variation	0.0006904	0.0041422	100.00

Components of Variation -kaaviosta nähdään vaihtelutekijöiden osuudet mittaustuloksissa. Uusittavuutta ei ole lainkaan, sillä erillistä operaattoria ei ollut. Kokonaisvaihtelu GRR:n osalta muodostuu siis kokonaan toistettavuudesta. Toistettavuuden ollessa pienempi kuin 10 %, on testituloksia pidetty hyväksyttävänä. Yläpuolella olevasta taulukosta 1 nähdään, että toistettavuus muodostaa 4,98 %:n osuuden vaihtelusta. Tämä kertoo sen, että mittalaite pystyy toistamaan mittaukset erinomaisesti. Kokonaisvaihtelu sen sijaan muodostuu lähes kokonaan Part-to-Part-interaktiosta, mikä on merkki hyvästä mittaussysteemistä. Osien eli testattavien tuotteiden välinen vaihtelu halutaan olevan mahdollisimman suuri, jolloin tiedetään mittaussysteemin pystyvän erottelemaan moduulit. Sen sijaan toistettavuuden ja uusittavuuden yhteisvaikutuksen osuus vaihtelusta halutaan olevan mahdollisimman pieni.

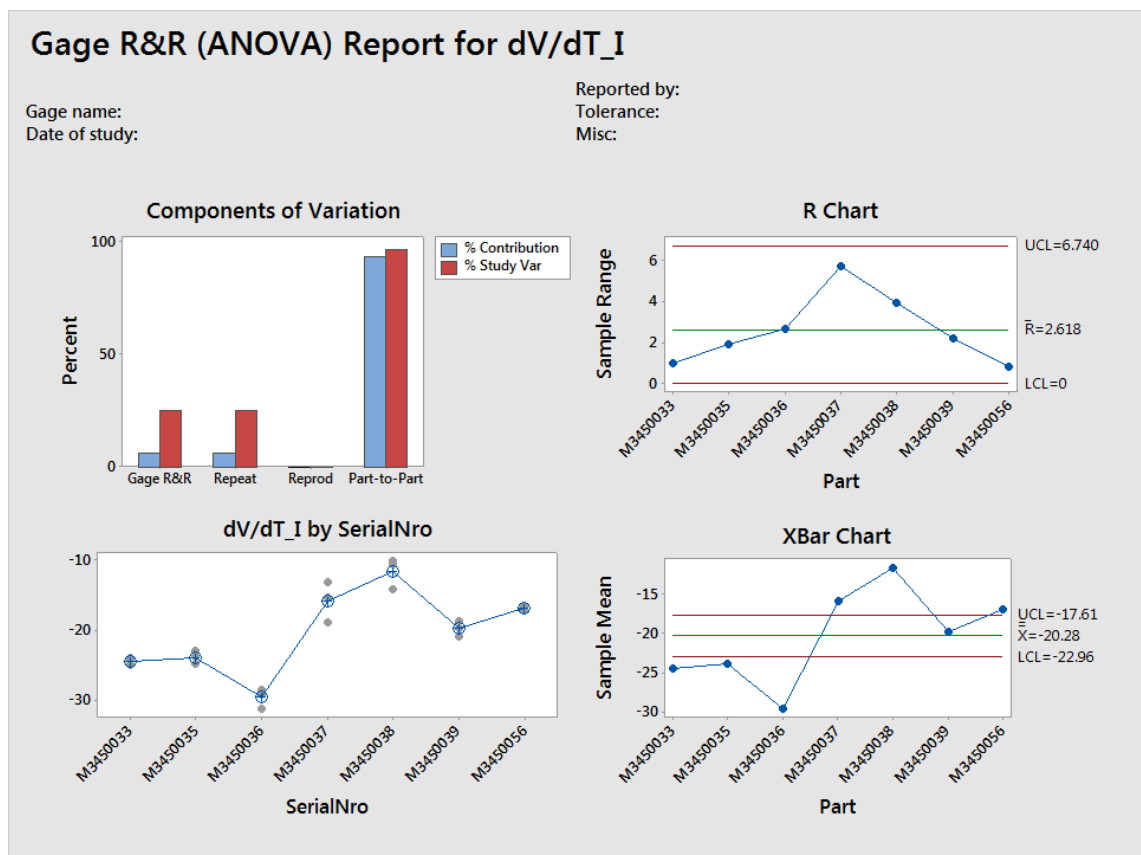
Kuvassa 10 olevasta R Chart -kaaviosta nähdään keskimääräinen vaihtelu voltteina erikseen jokaiselle moduulille. Näistä on laskettu moduulien kesken keskiarvo, joka on merkitty kuvaan vihreällä viivalla. Huomataan, että vaihtelu on todella pientä. Minitab on itse laskenut tulosten perusteella UCL- ja LCL-ohjausrajat eli ylä- ja alarajat. Jos vaihtelu pysyy näiden rajojen sisällä, kertoo se mittaustulosten hyvästä toistettavuudesta.

Kaksi alemmaa kaaviota ovat samankaltaiset. Vasemmanpuoleinen kaavio esittää kaikkia kolmea mitattua jännitearvoa jokaiselle testimoduulille. Kaaviota katsomalla näyttää kuitenkin, että jokaisen sarjanumeron kohdalla olisi vain yksi mittauspiste. Tämä johtuu siitä, että mittaustulokset ovat niin päällekkäin, ettei niitä erota toisistaan. Mittalaitteen toistettavuuden kannalta tämä on erittäin hyvä asia.

Oikeanpuoleinen XBar Chart -kaavio näyttää samat mittaustulokset kuin viereinenkin kaavio, mutta lisäksi siihen on laskettu UCL- ja LCL-ohjausrajat. Minitab laskee nämä ohjausrajat automaattisesti perustuen mittaustulosten keskiarvoon ja toistettavuusarvi-

oon. Ideaaliset mittaustulokset pysyvät tässä kaaviossa ylä- ja alarajojen ulkopuolella, sillä se kertoo siitä, että systeemi pystyy erottelmaan moduulit toisistaan.

Tulkitsemalla kuvan 10 kaavioita edellä mainituilla tavoilla voidaan huomata, että mittaustulokset ovat erittäin hyvät. Myös kaikilla tarkasteltavilla DAC-arvoilla ja eri ulostuloalueilla mittaustulosten kaaviot näyttivät hyvin pitkälti samanlaiselta, joten voidaan todeta, että jännite- ja virtasignaalien arvojen mittauksessa mittalaite on erittäin toistettava.



Kuva 11. Lämpötilariippuvuus virta-alueella.

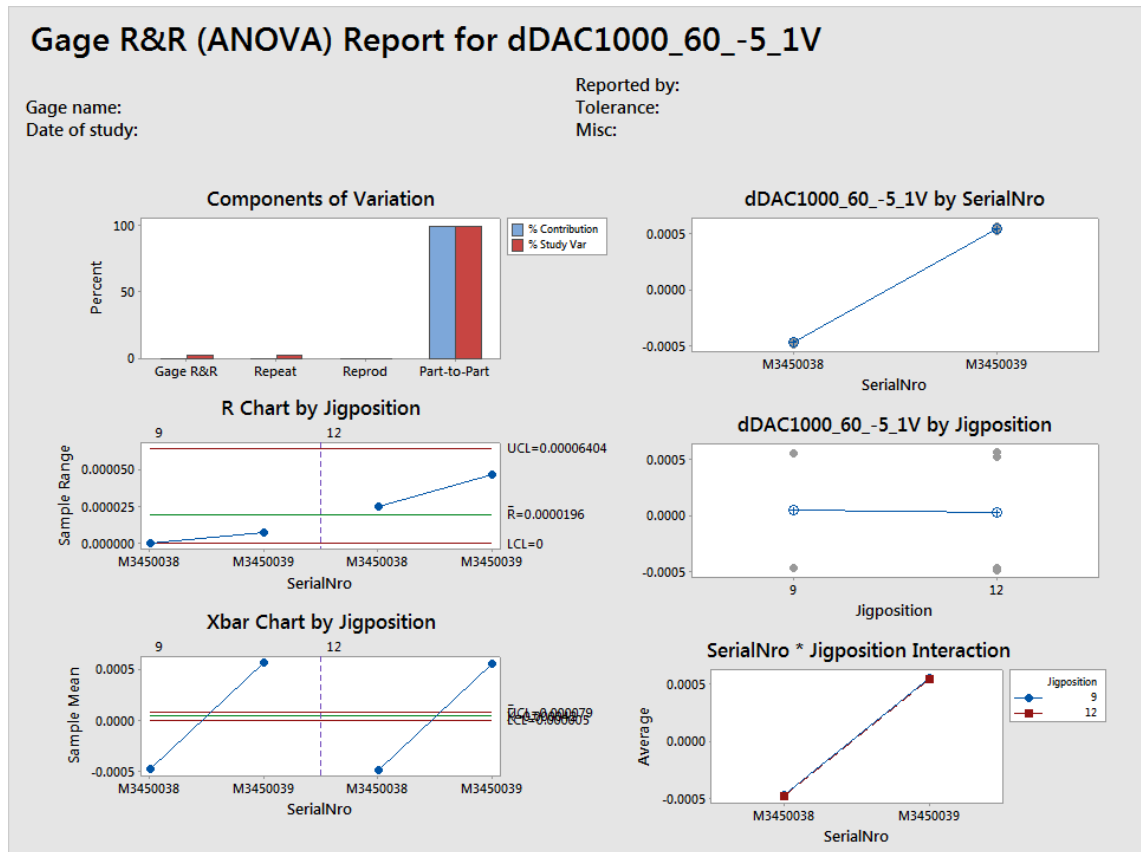
Taulukko 2. Kuvan 11 numeeriset tulokset.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1.58783	9.5270	25.41
Repeatability	1.58783	9.5270	25.41
Part-To-Part	6.04440	36.2664	96.72
Total Variation	6.24948	37.4969	100.00

Suurin vaihtelu mittalaitteen toistettavuudessa esiintyi maksimi lämpötilariippuvuudessa, kun moduulin ulostulosta mitattiin virtasignaalia. Kaavioista pystyy nyt erottamaan lämpötilariippuvuuden poikkeamat eri mittauskerroilla. Taulukkoa 2 katsomalla nähdään, että toistettavuuden osuus (25,41 %) kokonaisvaihtelusta on nyt paljon suurempi kuin aiemmassa kaaviossa, jossa tarkasteltiin suoraan mitattuja jännitearvoja. Mikäli toistettavuus on välillä 10–30 %, ovat mittaustulokset AIAG:n mukaan [15, s. 100–124] vain mahdollisesti hyväksyttäviä, riippuen muun muassa mittausten kriittisyydestä, kustannuksista ja riskeistä.

Kuvassa 11 olevasta R Chart -kaaviosta voidaan havaita, että tulokset eroavat toisistaan eri mittauskerroilla kuitenkin vaan 0–6 ppm/°C, joka on spesifikaatioihin, eli testirajoihin verrattuna todella vähän. Mittaussysteemin hyväksymisrajoihin (–100...100) suhteutettuna lämpötilariippuvuuden toistettavuusvirhe ei ole siis merkittävää, eikä siten aiheuta ongelmia. Liitteinä olevien testitulosten kuvaajista nähdään, että ulostulon ollessa kummalla tahansa jännitealueella lämpötilariippuvuuden toistettavuudet olivat parempia.

Testiaseman erinomaisen toistettavuuden vuoksi päätettiin tutkia vielä paikkariippuvuutta eli testipaikan vaikutusta mittaustuloksiin. Testeihin valittiin neljä paikkaa, joista kaksi paikkaa oli keskeltä ja kaksi reunoilta. Paikat 1 ja 4 jouduttiin kuitenkin jättämään pois analyyseista, sillä paikassa 1 olevat testimoduulit eivät päässeet millään testikeralla hyväksytysti läpi. Paikkariippuvuustesteihin valittiin näin ollen ainoastaan paikat 9 ja 12, joista toinen sijaitsee testijigin reunassa ja toinen keskellä.



Kuva 12. Paikkariippuvuustestien tulokset yhden voltin jännitealueella.

Taulukko 3. Kuvan 12 numeeriset tulokset.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000170	0.0001020	2.35
Repeatability	0.0000168	0.0001007	2.32
Reproducibility	0.0000027	0.0000162	0.37
Jigposition	0.0000027	0.0000162	0.37
Part-To-Part	0.0007233	0.0043397	99.97
Total Variation	0.0007235	0.0043409	100.00

Kuvan 12 mittaustuloksissa tarkastellaan kahdessa eri lämpötilassa (−5 °C ja 60 °C) mitattujen jännitesignaalien erotuksien keskiarvoja DAC-arvon ollessa 1 000. Näin ollen kaavioista ei siis näe varsinaisia mittaustuloksia, vaan sen sijaan tarkastellaan suoraan erilämpötilassa olevien mittaustulosten erotusten keskiarvoja ja verrataan niiden välistä vaihtelua. Paikkariippuvuustuloksissa on nyt mukana uusittavuustermi (Reproducibility), joka muodostuu kokonaisuudessaan pelkästä paikkariippuvuudesta, sillä operaattorin vaikutusta ei katsottu tarpeelliseksi tutkia.

Kaavioissa näkyy nyt edellä mainittujen asioiden lisäksi mittauspaikat eroteltuina. Kaavioista huomataan, että mittaustulosten vaihtelu on hyvin lähellä nollaa riippumatta siitä, kummassa testauspaikassa mittaukset ovat tehty. Jigposition Interaction -kaaviosta nähdään, että mittalaitteen vaihtelu molemmilla testauspaikoilla on lähes täysin samanlainen, sillä kuvaajaa katsomalla viivat ovat lineaarisesti päällekkäin.

Tässäkin tapauksessa tuotteiden välinen vaihtelu muodostaa suurimman hajonnan mittaustapahtumassa. Tarkat arvot näkyvät taulukossa 3, josta huomataan, että toistettavuuden ja uusittavuuden yhteisvaikutus vaihtelusta muodostaa keskimäärin ainoastaan 2,35 % osuuden kokonaisvaihtelusta. Testauspaikan vaihtaminen aiheutti keskimäärin 0,37 % vaihtelun mittaustulokseen, joka on täysin olematon.

Verrattaessa virta-alueen mittaustuloksia (ks. Liite 2, s. 4) lämpötilan ollessa 60 celsiusastetta ja DAC-arvon 1 000 olivat mittaustulokset lähes identtisiä molemmilla testauspaikoilla. Vaihteluvälien ja keskiarvojen ollessa todella pieniä, ei mittaussysteemi pysty erottelemaan moduuleja. Erottelukyvyyn ollessa huono, ei mittaustulosten perusteella pystytä säätämään mittausprosessia. Erottelukyvyyn huonous johtui tässä tapauksessa siitä, että mittaustulokset olivat liian samankaltaisia, eikä analyysi pystynyt erottelemaan mittaustuloksia kahdeksi eri moduulin tuloksiksi. Ongelmaan ei kuitenkaan ole tässä tapauksessa ratkaisua, sillä moduulien valinta Gage R&R -testeihin niin, että moduulit edustaisivat koko hajontaväliä, on käytännössä mahdotonta moduulien ulkonäön perusteella.

Yksinkertaisen paikkariippuvuustestin tulosten valossa kaikkien testipaikkojen paikkariippuvuuden perusteellinen tutkiminen ei ole perusteltua, sillä se veisi erittäin paljon aikaa, eikä näiden tulosten perusteella siihen nähdä tarvetta. Mikäli testiaseman ongelmana olisi suoranaisesti testijigin mittauspaikkojen erilaisuus, olisi se jo huomattu pienemmän mittakaavan paikkariippuvuustestissä. Toisaalta, myös testijigin huonot kontaktit ja epävarma mekaniikka olivat tiedossa jo ennen työn aloittamista ja ne tuliaan korjaamaan erikseen. Tuloksia voidaan pitää erinomaisina. Loput Gage R&R -testien tulokset on esitetty liitteinä työn lopussa (Liitteet 1 ja 2).



## 7 Yhteenveto

DMPAS6-testausjärjestelmälle suoritettiin Gage R&R -testi, jolla mitattiin testausjärjestelmän vaihtelua mittaustuloksissa. Toistettavuus- ja uusittavuustestien avulla pyrittiin selvittämään, kuinka suuri osa vaihtelusta on peräisin mittalaitteesta, sekä kuinka paljon testijigin paikkojen vaihtaminen aiheuttaa hajontaa mittaajärjestelmässä. Datan käsittely, tulkinta ja Gage R&R -ajojen suorittaminen vei suurimman osan ajasta, sillä testausjärjestelmän lukuisat eri mittaukset moduuleille kerryttävät suuren määrän dataa pitkien testausaikojen lisäksi.

Työn tutkiminen ja toteuttaminen onnistuivat hyvin, vaikka Gage R&R -testien tulokset olivatkin osittain yllättäviä. Testiaseman toistettavuus ja uusittavuus odotettiin huomommaksi kuin mitä tulosten käsittelyssä tuli ilmi, eikä näin ollen suoranaista parannettavaa mittalaitteisiin tai testijigiin löytynyt Gage R&R -analyysin avulla.

Jatkossa testiaseman parantamiseksi voitaisiin kuitenkin tutkia kanavien eli yhteyksien toimivuutta testiohjelman ja testattavien moduulien välillä. Testiaseman suurimpana ongelmana pidetty StartCheck aiheutuu luultavasti huonoista yhteyksistä testattavaan moduuliin. Huonoihin yhteyksiin viittaa myös melko useasti toistuvat pitkät testausajat, jolloin testiohjelma jää odottamaan pitkiksi ajoiksi vastausta testimoduulilta. Testauskanavia vaihtaa mittalaitteen 34901A multiplexer-kortti, jonka toimivuus olisi mielestäni myös syytä varmistaa. Testijigin neulapedin suorat mittausneulat on vaihdettu useaan otteeseen testiaseman elinkaaren aikana. Mittausneulojen mahdollisten kontaktihäiriöiden vähentämiseksi voitaisiin myös neulapedin suorat mittausneulat vaihtaa kruunupäisiin, jolloin kontakti piirikorttiin saattaisi parantua.

Työn tuloksena Gage R&R -testin avulla pystyttiin sulkemaan pois vaihtoehdot mittalaitteen ja testijigin vaihtelevasta toimivuudesta, joka olisi aiheuttanut epäluotettavia tuloksia mittauksissa. Työstä saatuja tuloksia voidaan käyttää pohjana mahdollisissa jatkotutkimuksissa etsittäessä StartCheck ja bogus-erroreihin johtavia syitä.

Automaattisen testausjärjestelmän mittaushäiriöiden ja -virheiden etsiminen tämän kaltaisesta järjestelmästä ei ole aina yksiselitteistä, sillä myös testausjärjestelmä voi aiheuttaa sisäistä kohinaa mittaustuloksissa, ja näin ollen tuloksiin on suhtauduttava tietyin varauksin.

## Lähteet

- 1 Vaisala Oyj. Verkkosivut. <<http://www.vaisala.fi/fi/Pages/default.aspx>>. Luettu 6.12.2016.
- 2 Andersson, Paul, H. Tikka, Heikki. 1997. Mittaus ja laatutekniikat. Porvoo: WSOY.
- 3 Härkönen, Pekka. Laatu ohjelmointityössä.pptx. <<http://slideplayer.biz/slide/1968016/>> Luettu 17.12.2016.
- 4 Talentum Media Oy & Lecklin, Olli. 2006. Laatu yrityksen menestystekijänä. Hämeenlinna: Karisto Oy.
- 5 Karjalainen, Tanja, E. Karjalainen, Eero, E. 2000. Laatujohtamisoppien (TQM) soveltaminen PK-yritykseen. Hollola: Quality Knowhow Karjalainen Oy.
- 6 Liiketoiminnan johtaminen faktoilla. Verkkootikkeli. <<http://www.sixsigma.fi/fi/artikkelit/liiketoiminnan-johtaminen-faktoilla/>>. Julkaistu: 24.11.2006. Luettu 21.12.2016.
- 7 Viheriäkoski, Toni. 2001. ESD, Staattinen sähkö elektroniikassa. Helsinki: Oy Edita Ab.
- 8 A-out module T-determination test Specification.doc. Vaisala Oyj. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 9 Agilent Technologies inc. Verkkosivut. <<http://www.agilent.com/about/companyinfo/index.html>>. Luettu 26.11.2016.
- 10 Agilent Technologies inc. Tuote-esittely. 5965-5290EN.pdf. <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5965-5290EN.pdf>>. Luettu 26.11.2016.
- 11 Test Equipment Connection. Tuote-esittely. <<http://blog.testequipmentconnection.com/agilent-34970a-data-acquisition-switch-product-review>>. Luettu 26.11.2016.
- 12 Microsoft Corporation. 1999. Microsoft Visual Basic 6.0, Ohjelmoijan käsikirja. Helsinki: IT Press.
- 13 Gage R&R.pptx. Kurssimateriaali. Vaisala Oyj. Yrityksen sisäinen materiaali.
- 14 Barrentine, Larry, B. 2002. Concepts for R&R studies, Second Edition. Milwaukee: Quality Press.

- 15 Automotive Industry Action Group. 2010. Measurement System Analysis MSA, Fourth Edition. Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation.
- 16 Tähtinen, Juha & Laakkonen, Eero & Broberg, Mari. 2011. Tilastollisen aineiston käsittelyn ja tulkinnan perusteita. Turku: Turun yliopiston kasvatustieteiden laitos ja Opettajankoulutuslaitos.
- 17 Khan, Rehman, M. 2013. Problem Solving and Data Analysis Using Minitab: A Clear and Easy Guide to Six Sigma Methodology. Wiley.
- 18 Calc\_Bottom\_AOUT-1.xls. Vaisala Oyj. Yrityksen sisäinen materiaali.

## Toistettavuustestien tulokset

### Minitab Project Report

Name: DMPAS6 AOUT-1CB, November 2016

Date: 2016-11-11 / PES, OTAPA

Reason: Improvement of the test station

UUT's: 16 pcs of AOUT-1CB, 9 out of 16 failed at the test, removed from analysis. No adjustment done.

Test plan: Three repetitions, UUT's in the same places. UUT's disconnected between runs.

Test limits:

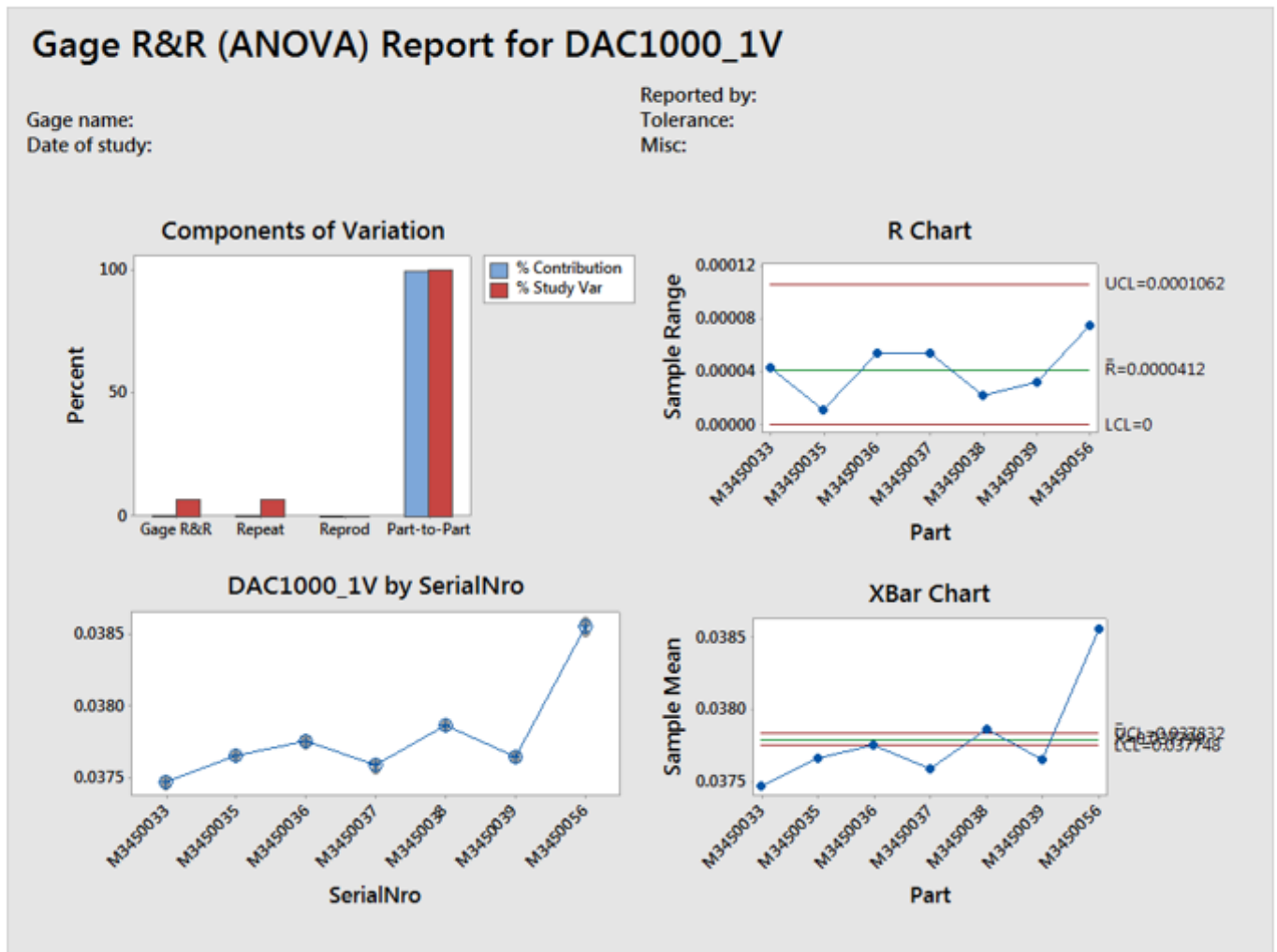
dV/dT\_1V            -100...100

1V\_dV/dT\_10V      -100...100

dV/dT\_I             -100...100

Summary: Test results are acceptable.

**Gage R&R for DAC1000\_1V (at 60degC)**



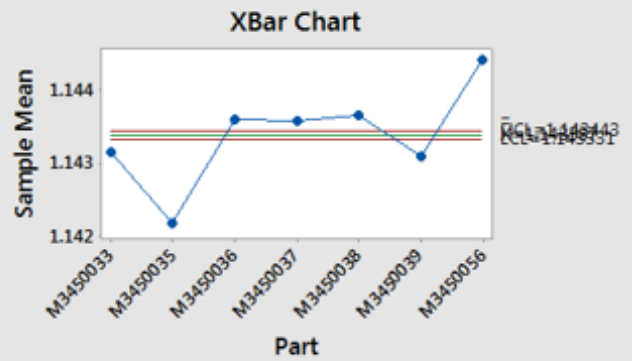
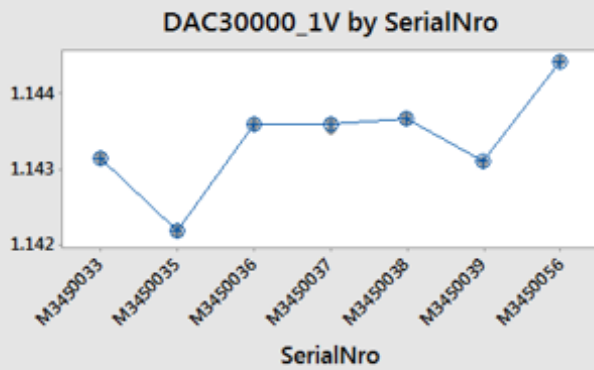
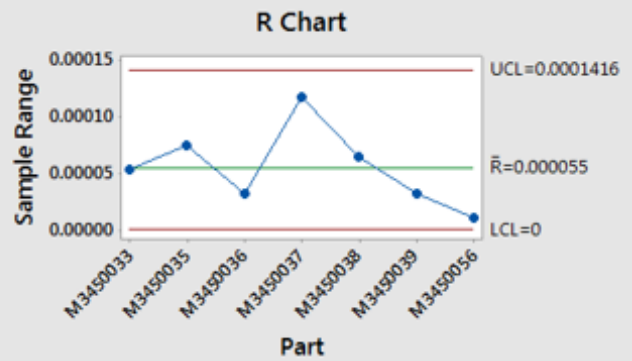
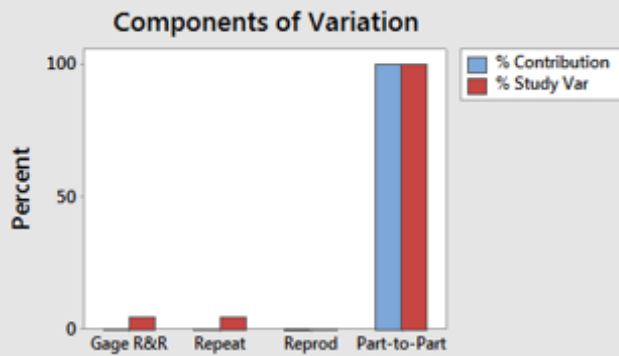
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000242	0.0001455	6.69
Repeatability	0.0000242	0.0001455	6.69
Part-To-Part	0.0003616	0.0021698	99.78
Total Variation	0.0003624	0.0021747	100.00

### Gage R&R for DAC30000\_1V (at 60degC)

## Gage R&R (ANOVA) Report for DAC30000\_1V

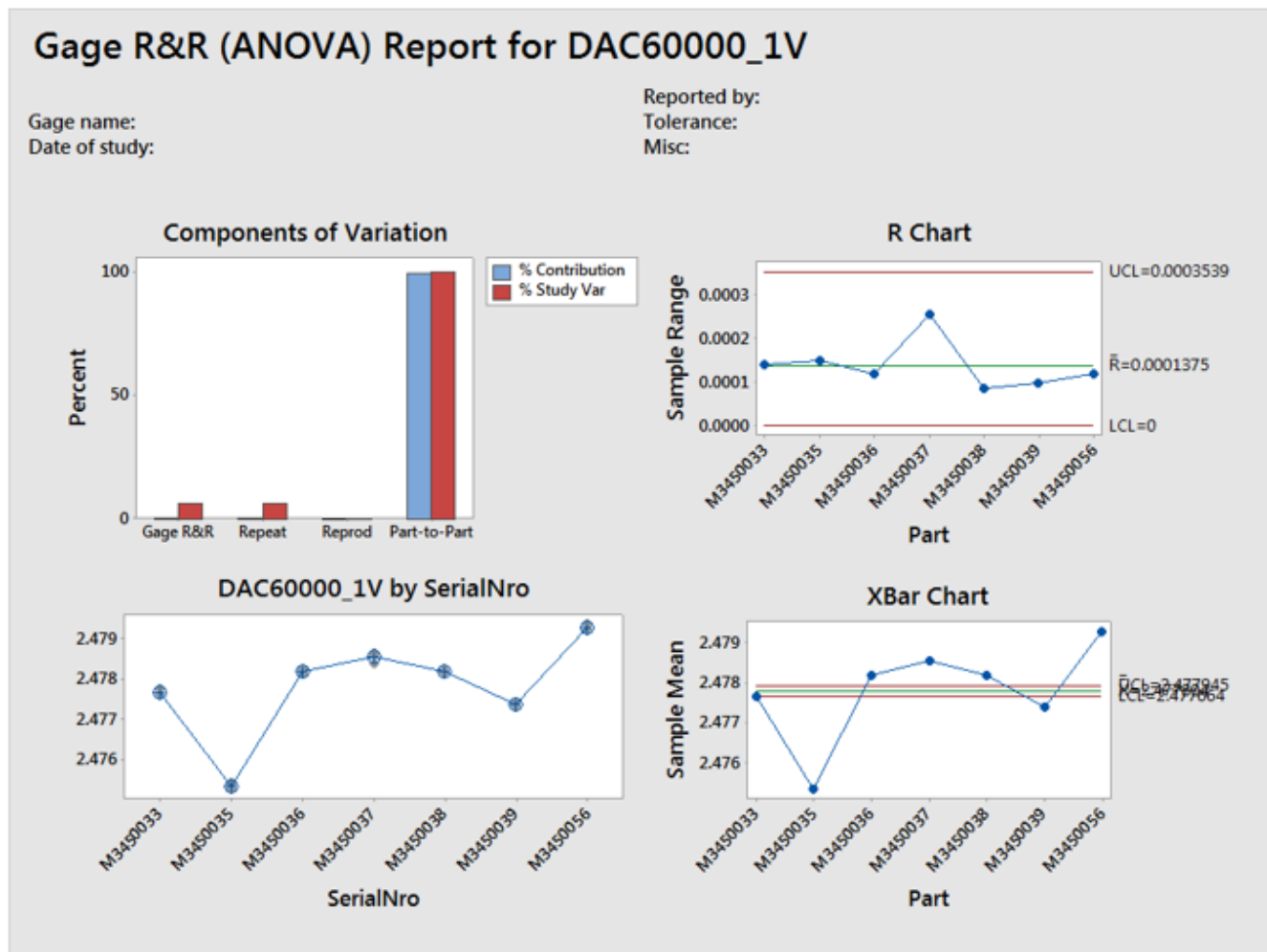
Gage name:  
Date of study:

Reported by:  
Tolerance:  
Misc:



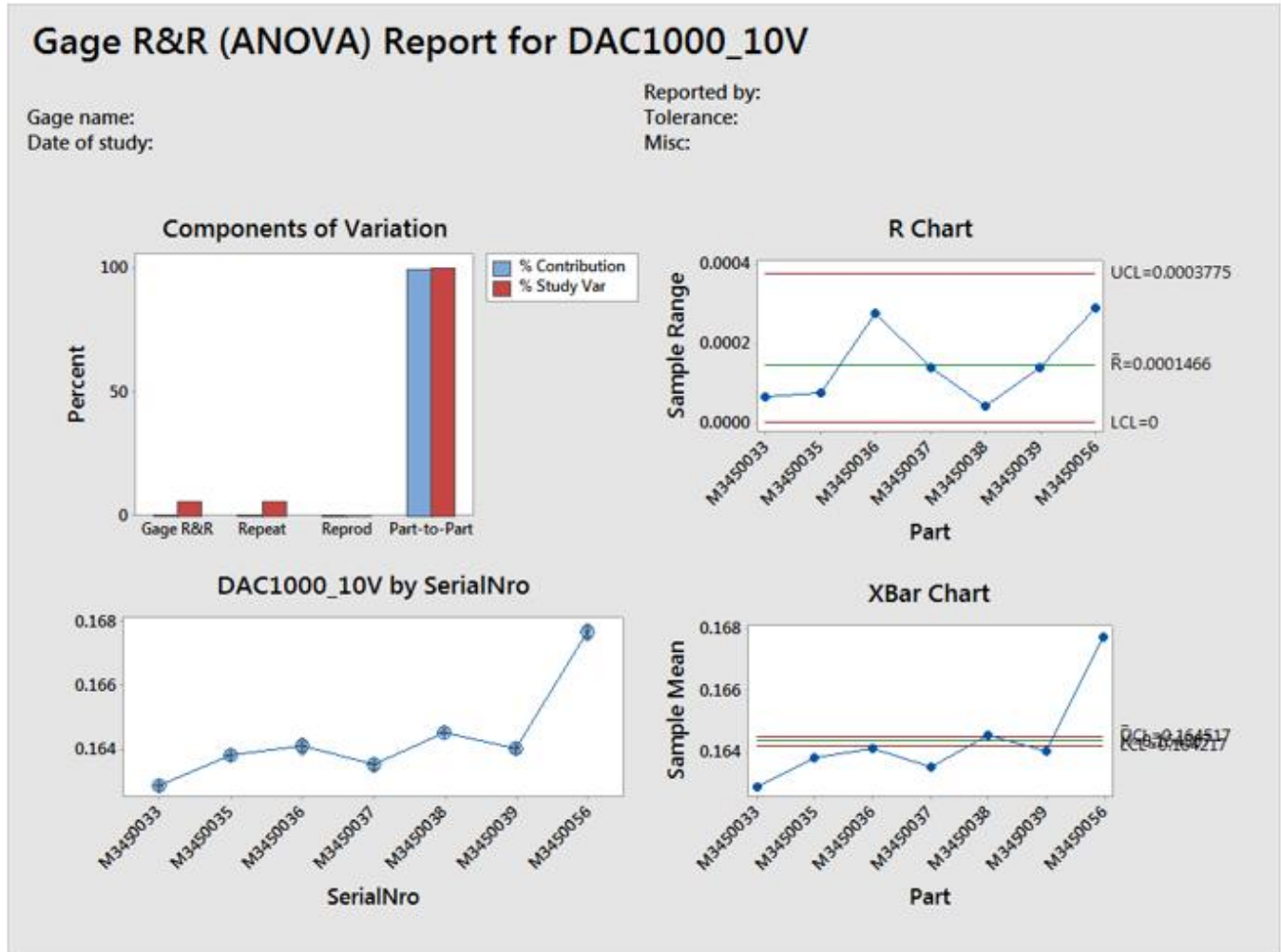
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000344	0.0002063	4.98
Repeatability	0.0000344	0.0002063	4.98
Part-To-Part	0.0006895	0.0041370	99.88
Total Variation	0.0006904	0.0041422	100.00

### Gage R&R for DAC60000\_1V (at 60degC)



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000771	0.0004628	6.18
Repeatability	0.0000771	0.0004628	6.18
Part-To-Part	0.0012458	0.0074747	99.81
Total Variation	0.0012482	0.0074890	100.00

### Gage R&R for DAC1000\_10V (at 60degC)



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000929	0.0005572	5.89
Repeatability	0.0000929	0.0005572	5.89
Part-To-Part	0.0015733	0.0094396	99.83
Total Variation	0.0015760	0.0094561	100.00

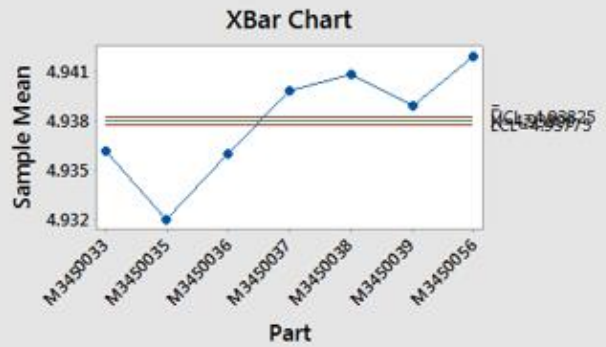
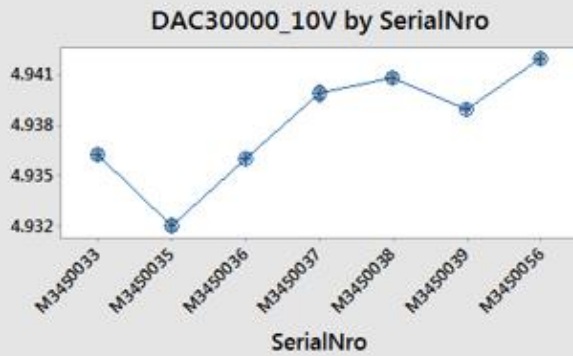
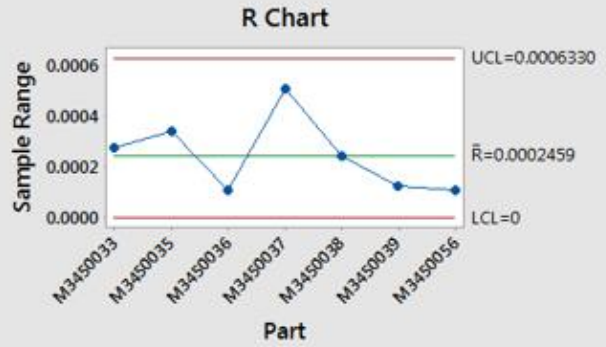
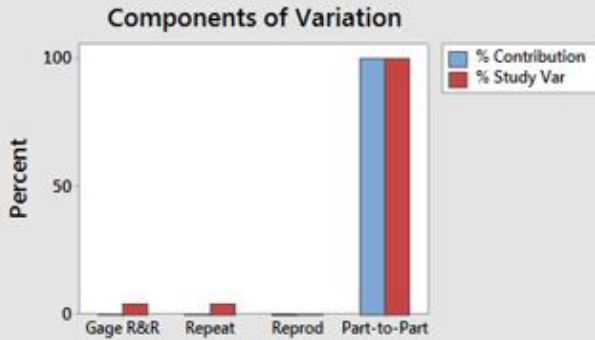


**Gage R&R for DAC30000\_10V (at 60degC)**

**Gage R&R (ANOVA) Report for DAC30000\_10V**

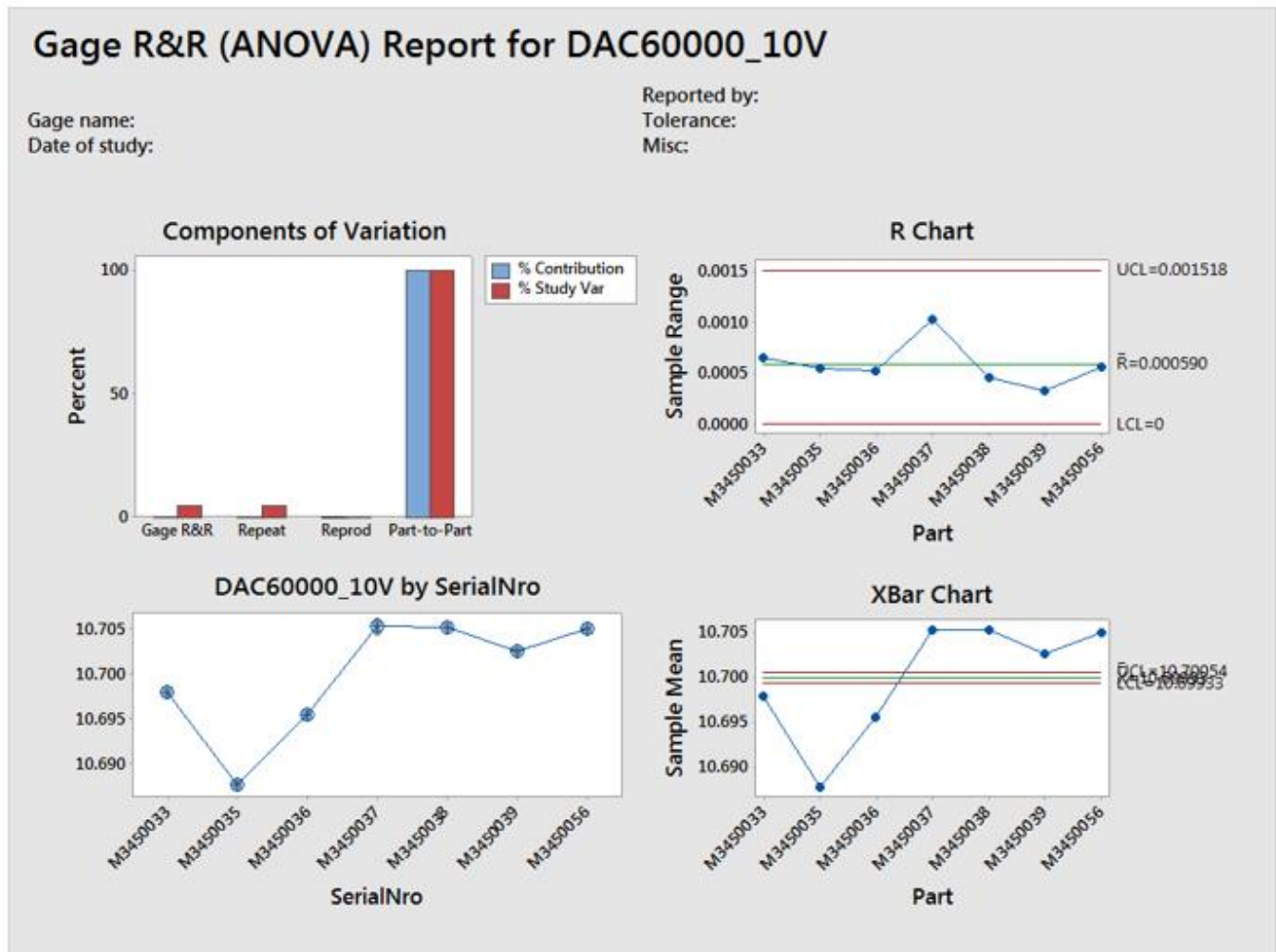
Gage name:  
Date of study:

Reported by:  
Tolerance:  
Misc:



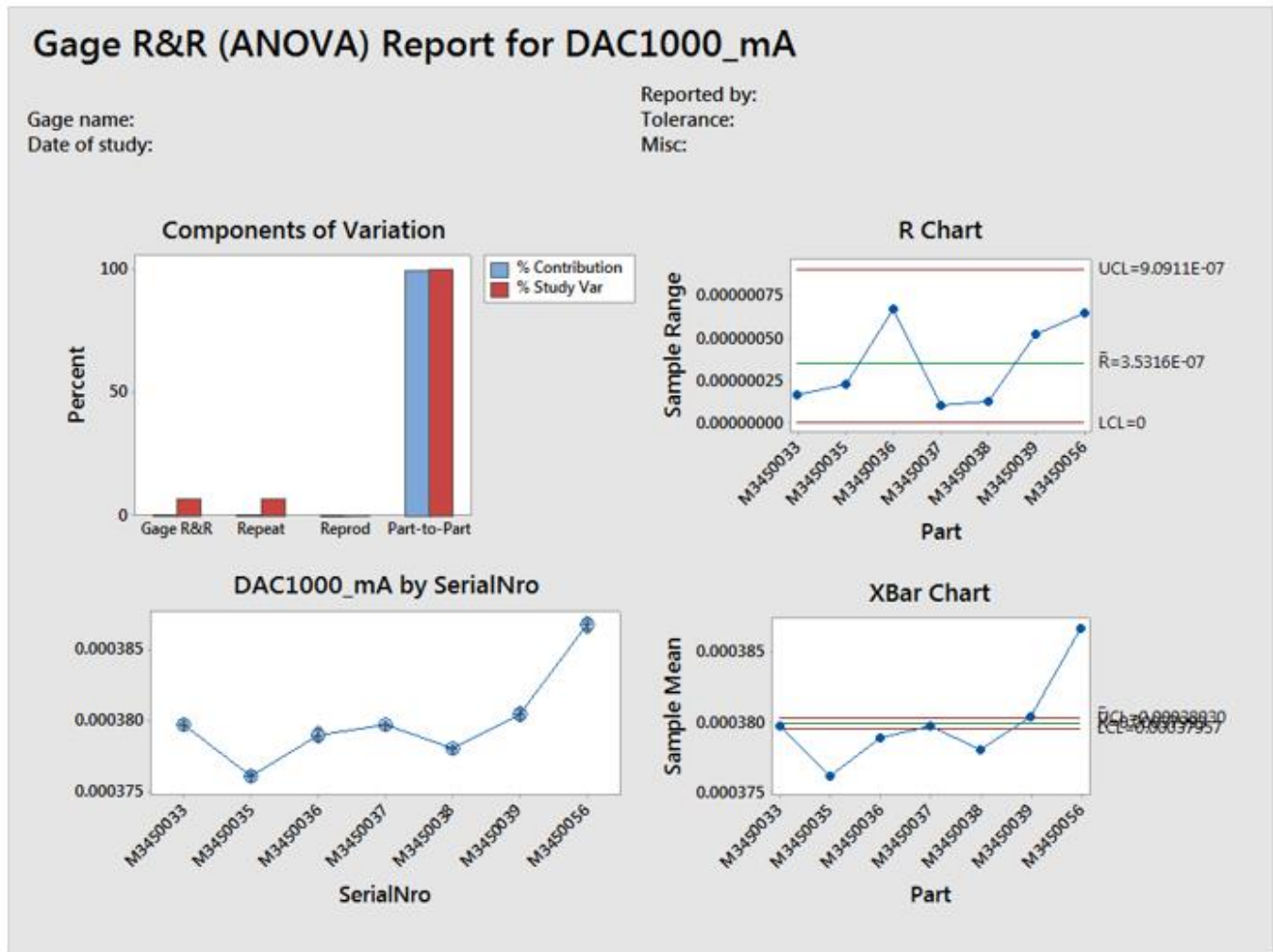
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0001488	0.0008927	4.31
Repeatability	0.0001488	0.0008927	4.31
Part-To-Part	0.0034479	0.0206877	99.91
Total Variation	0.0034512	0.0207070	100.00

### Gage R&R for DAC60000\_10V (at 60degC)



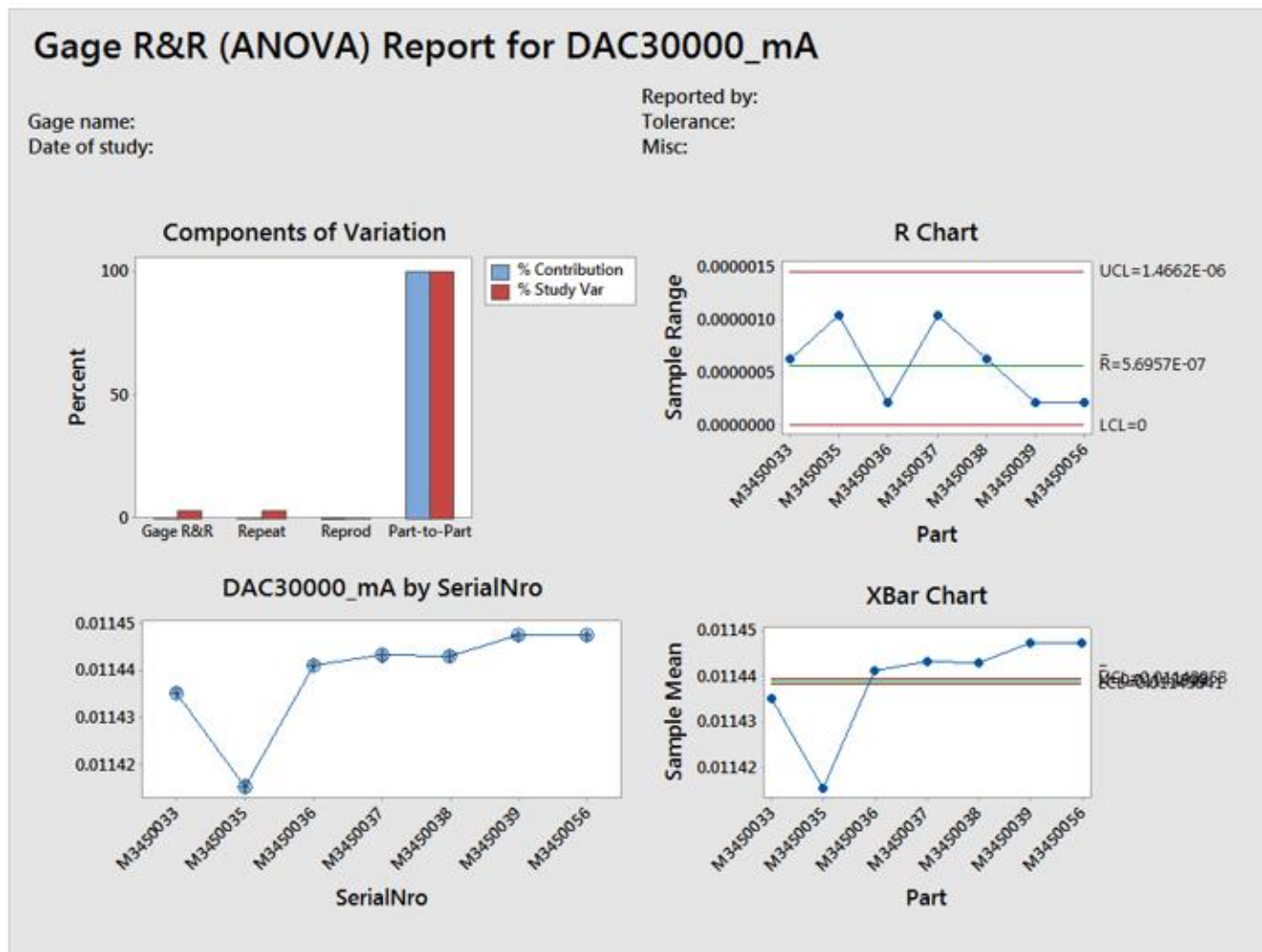
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0003255	0.0019530	4.89
Repeatability	0.0003255	0.0019530	4.89
Part-To-Part	0.0066495	0.0398971	99.88
Total Variation	0.0066575	0.0399449	100.00

### Gage R&R for DAC1000\_mA (at 60degC)



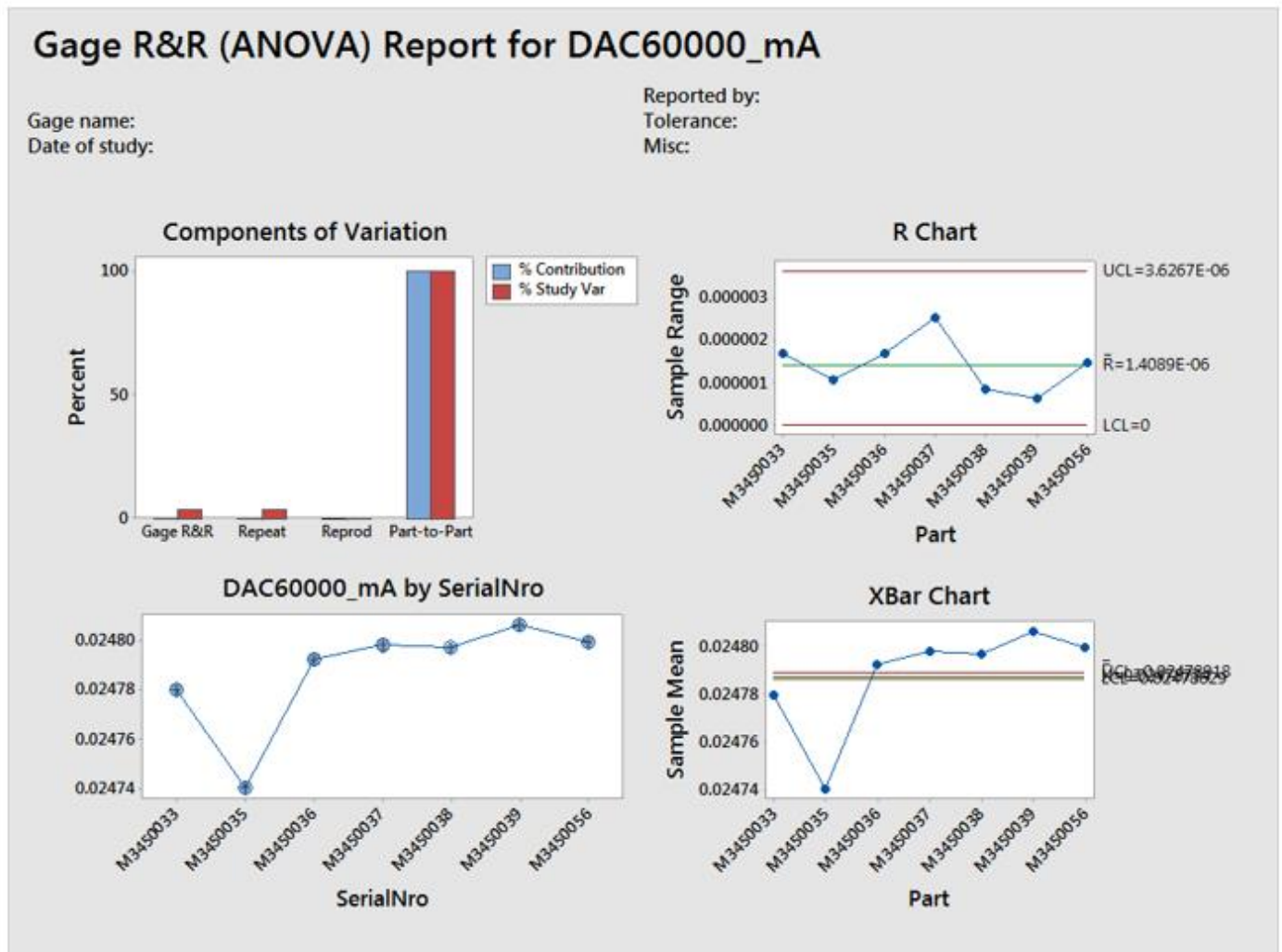
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000002	0.0000014	6.76
Repeatability	0.0000002	0.0000014	6.76
Part-To-Part	0.0000033	0.0000200	99.77
Total Variation	0.0000033	0.0000200	100.00

### Gage R&R for DAC30000\_mA (at 60degC)



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000004	0.0000022	3.27
Repeatability	0.0000004	0.0000022	3.27
Part-To-Part	0.0000113	0.0000676	99.95
Total Variation	0.0000113	0.0000677	100.00

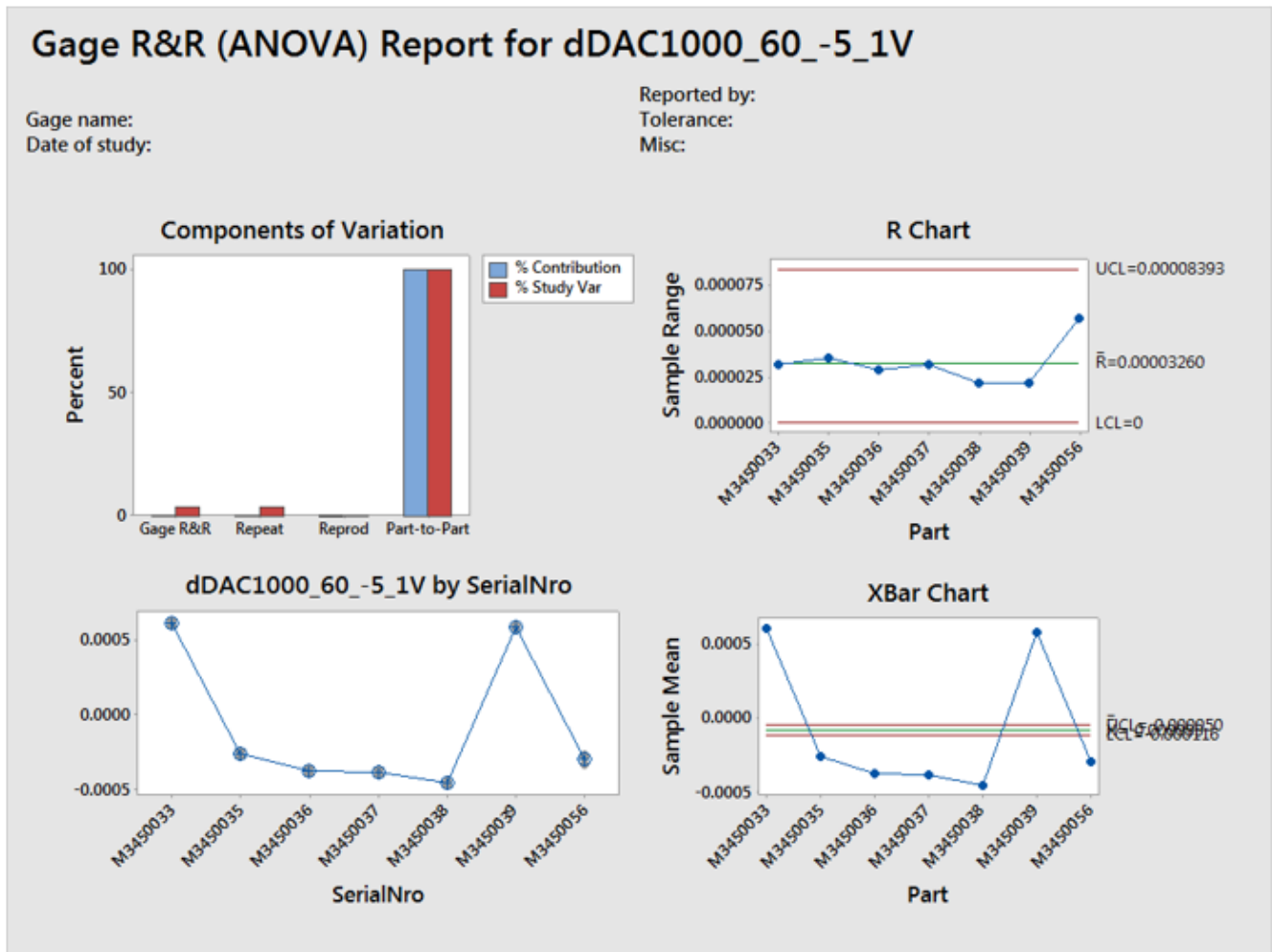
### Gage R&R for DAC60000\_mA (at 60degC)



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000008	0.0000049	3.64
Repeatability	0.0000008	0.0000049	3.64
Part-To-Part	0.0000224	0.0001344	99.93
Total Variation	0.0000224	0.0001345	100.00

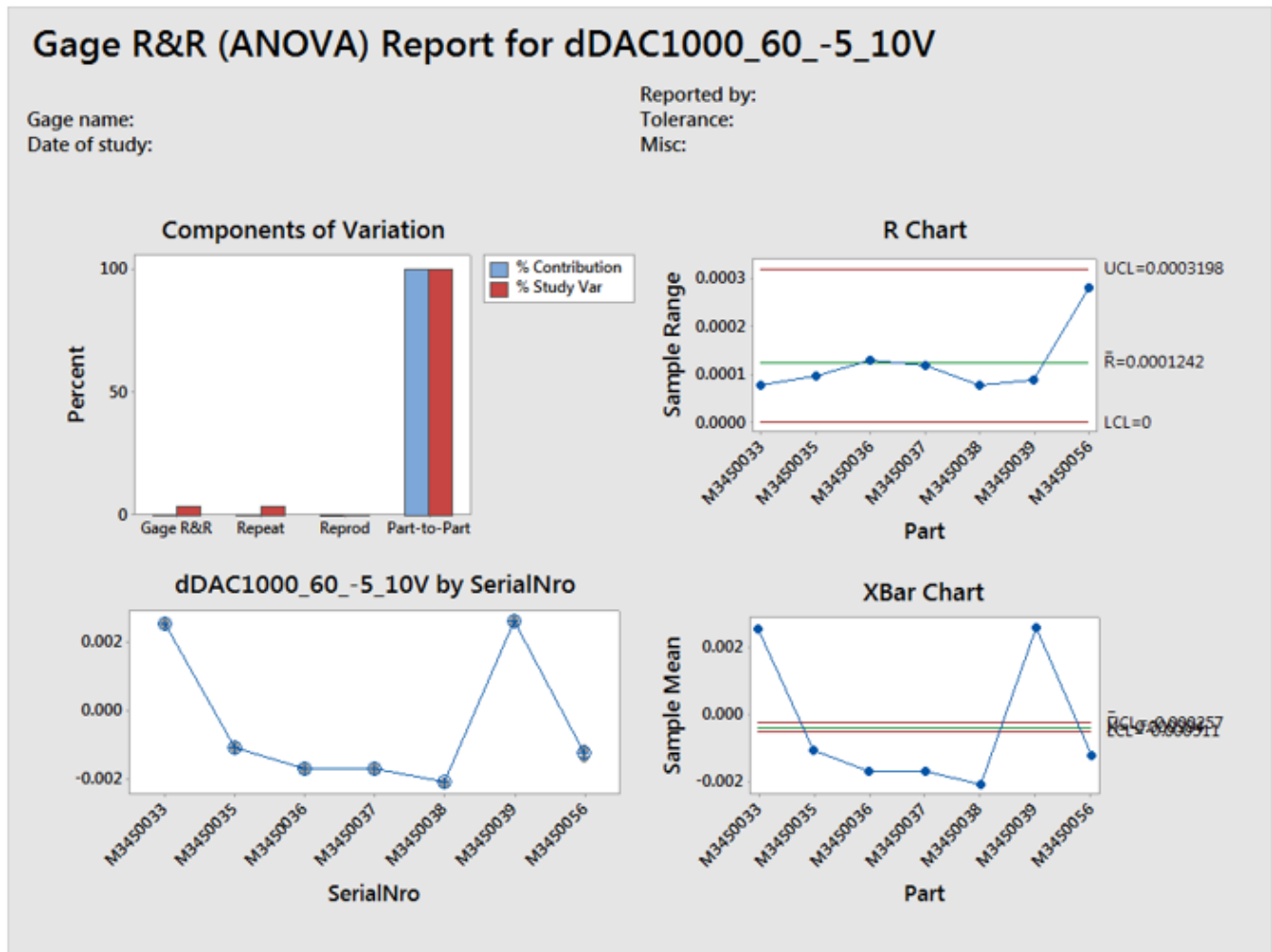


**Gage R&R for dDAC1000\_60\_-5\_1V**



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000179	0.0001076	3.82
Repeatability	0.0000179	0.0001076	3.82
Part-To-Part	0.0004696	0.0028174	99.93
Total Variation	0.0004699	0.0028194	100.00

### Gage R&R for dDAC1000\_60\_-5\_10V



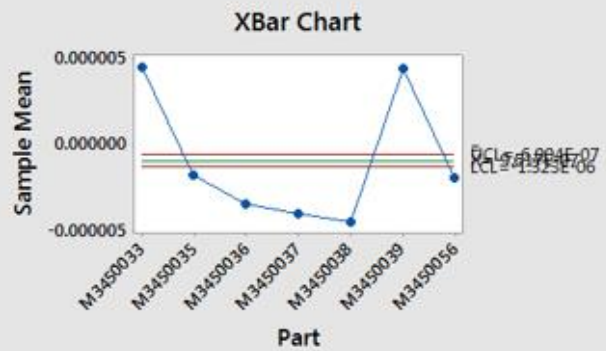
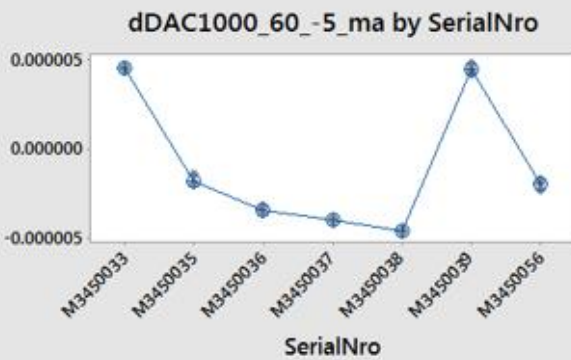
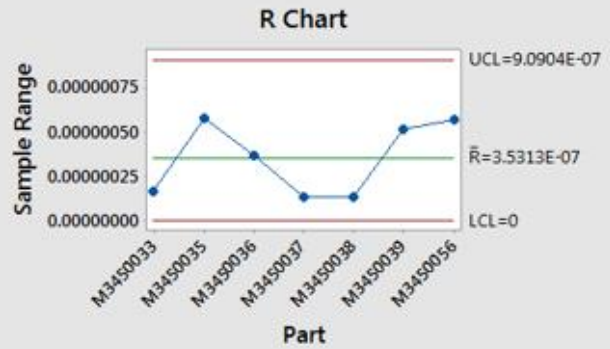
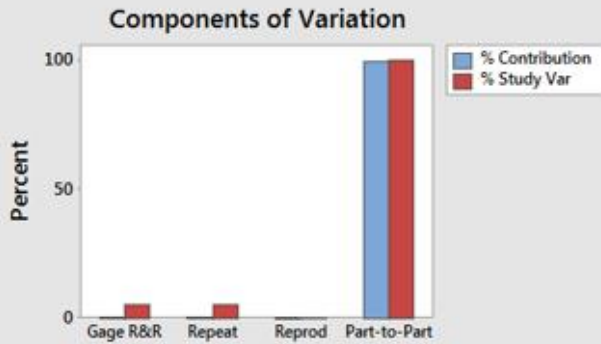
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000766	0.0004595	3.74
Repeatability	0.0000766	0.0004595	3.74
Part-To-Part	0.0020456	0.0122736	99.93
Total Variation	0.0020470	0.0122822	100.00

### Gage R&R for dDAC1000\_60\_-5\_ma

## Gage R&R (ANOVA) Report for dDAC1000\_60\_-5\_ma

Gage name:  
Date of study:

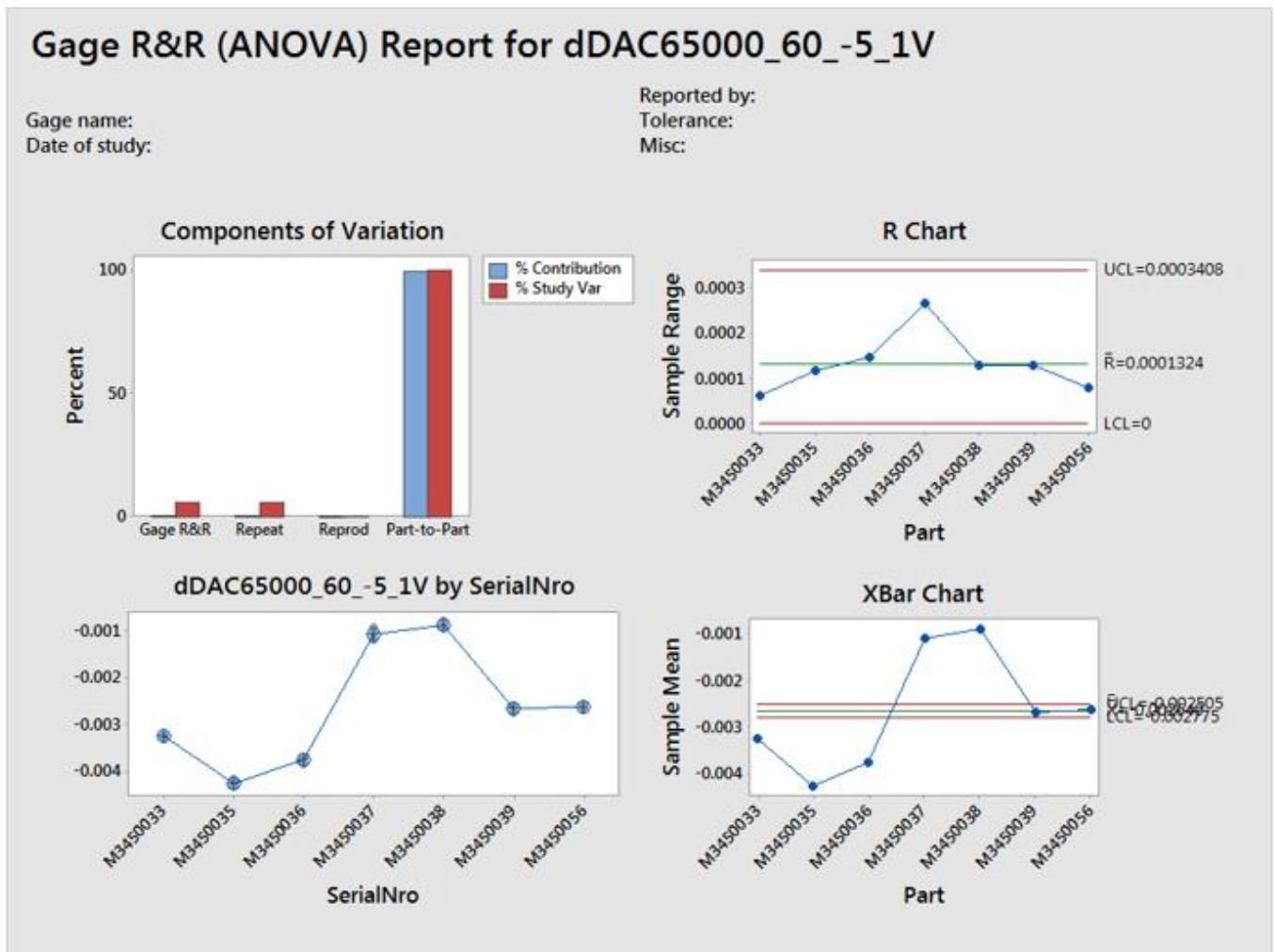
Reported by:  
Tolerance:  
Misc:



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000002	0.0000013	5.55
Repeatability	0.0000002	0.0000013	5.55
Part-To-Part	0.0000039	0.0000233	99.85
Total Variation	0.0000039	0.0000233	100.00

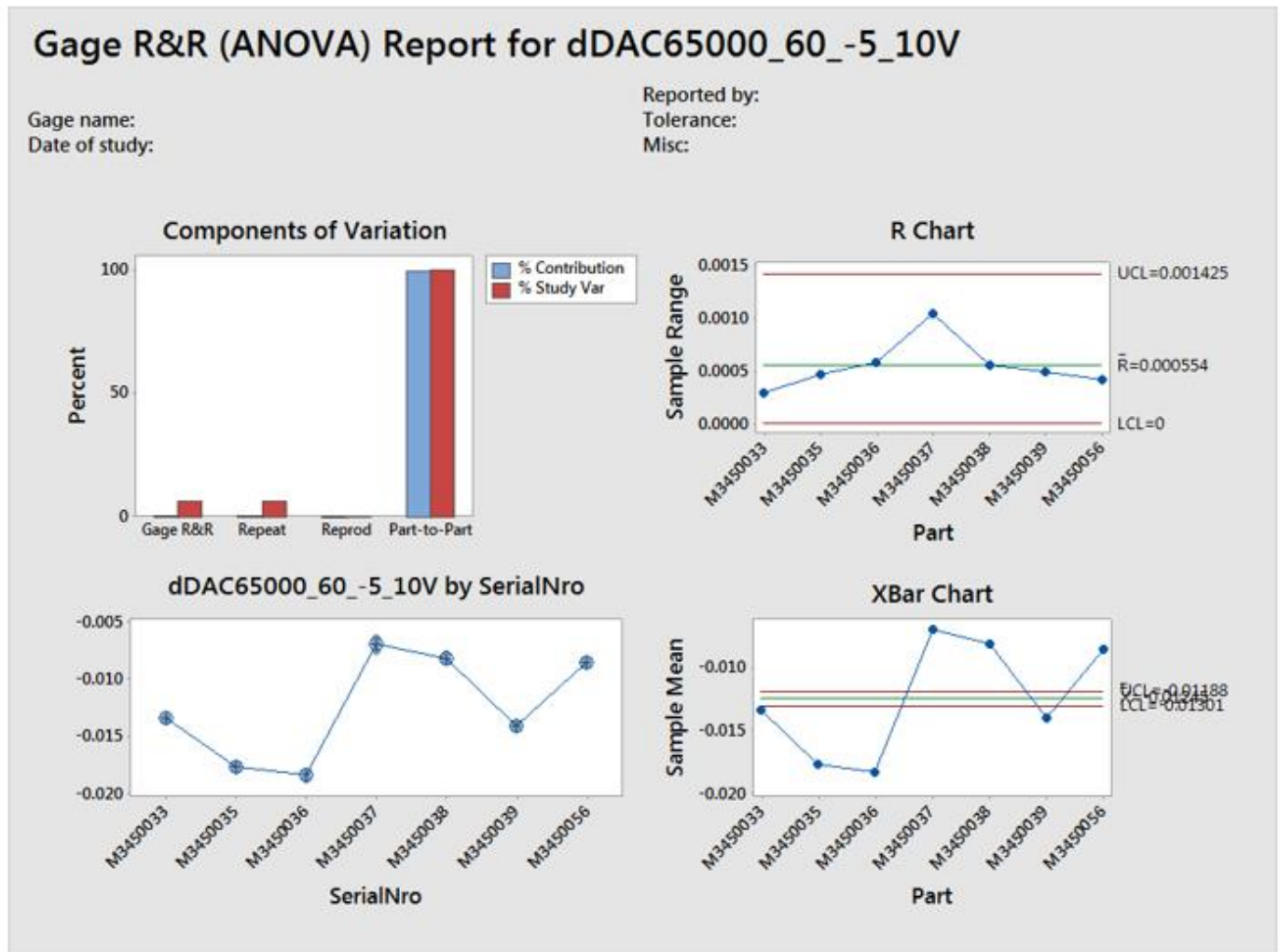


### Gage R&R for dDAC65000\_60\_-5\_1V



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000752	0.0004513	5.87
Repeatability	0.0000752	0.0004513	5.87
Part-To-Part	0.0012785	0.0076709	99.83
Total Variation	0.0012807	0.0076842	100.00

### Gage R&R for dDAC65000\_60\_-5\_10V



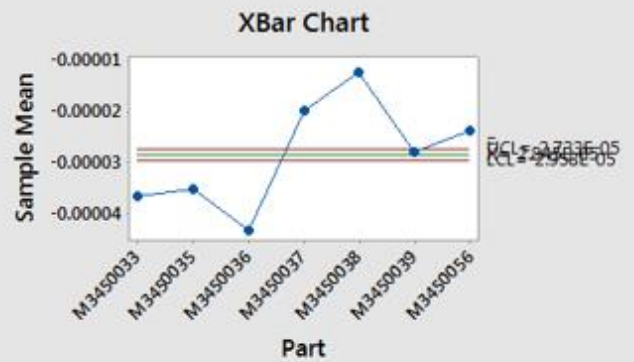
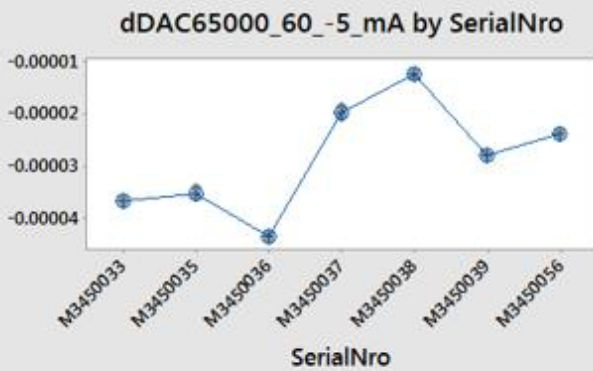
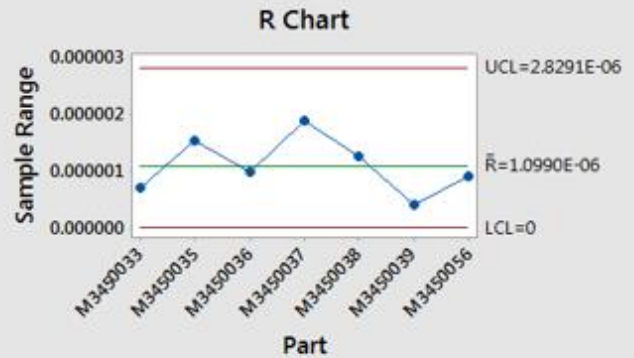
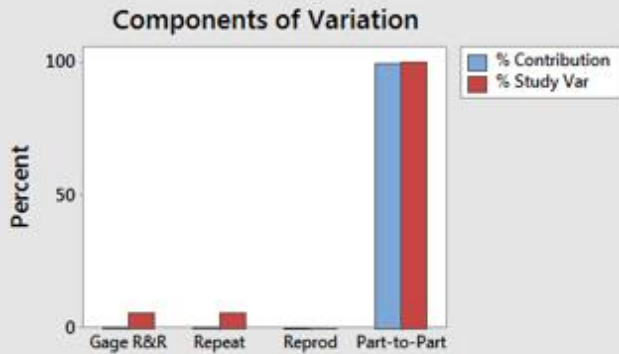
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0003054	0.0018324	6.52
Repeatability	0.0003054	0.0018324	6.52
Part-To-Part	0.0046737	0.0280424	99.79
Total Variation	0.0046837	0.0281022	100.00

### Gage R&R for dDAC65000\_60\_-5\_mA

## Gage R&R (ANOVA) Report for dDAC65000\_60\_-5\_mA

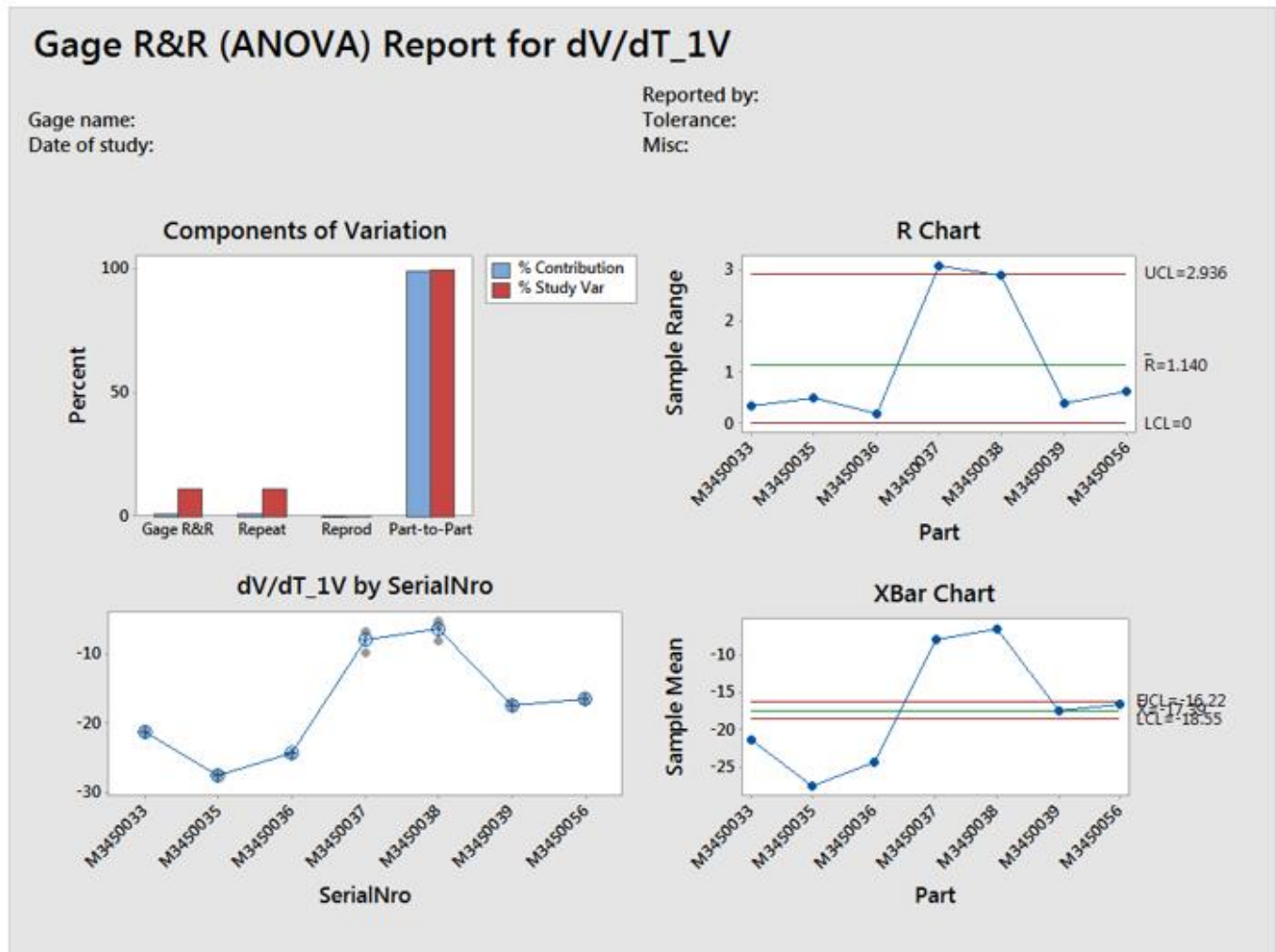
Gage name:  
Date of study:

Reported by:  
Tolerance:  
Misc:



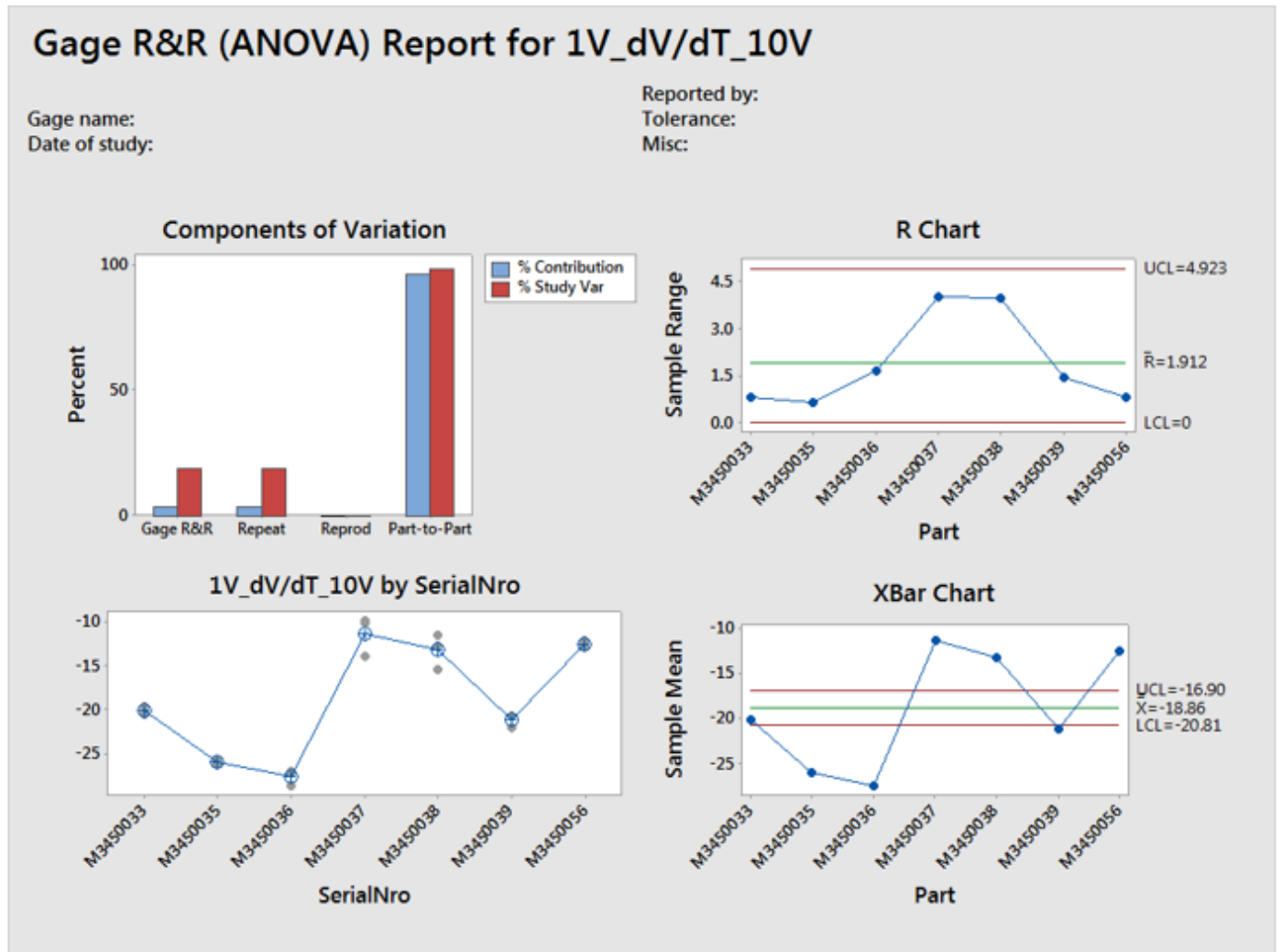
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000006	0.0000037	5.64
Repeatability	0.0000006	0.0000037	5.64
Part-To-Part	0.0000108	0.0000647	99.84
Total Variation	0.0000108	0.0000648	100.00

### Gage R&R for dV/dT\_1V



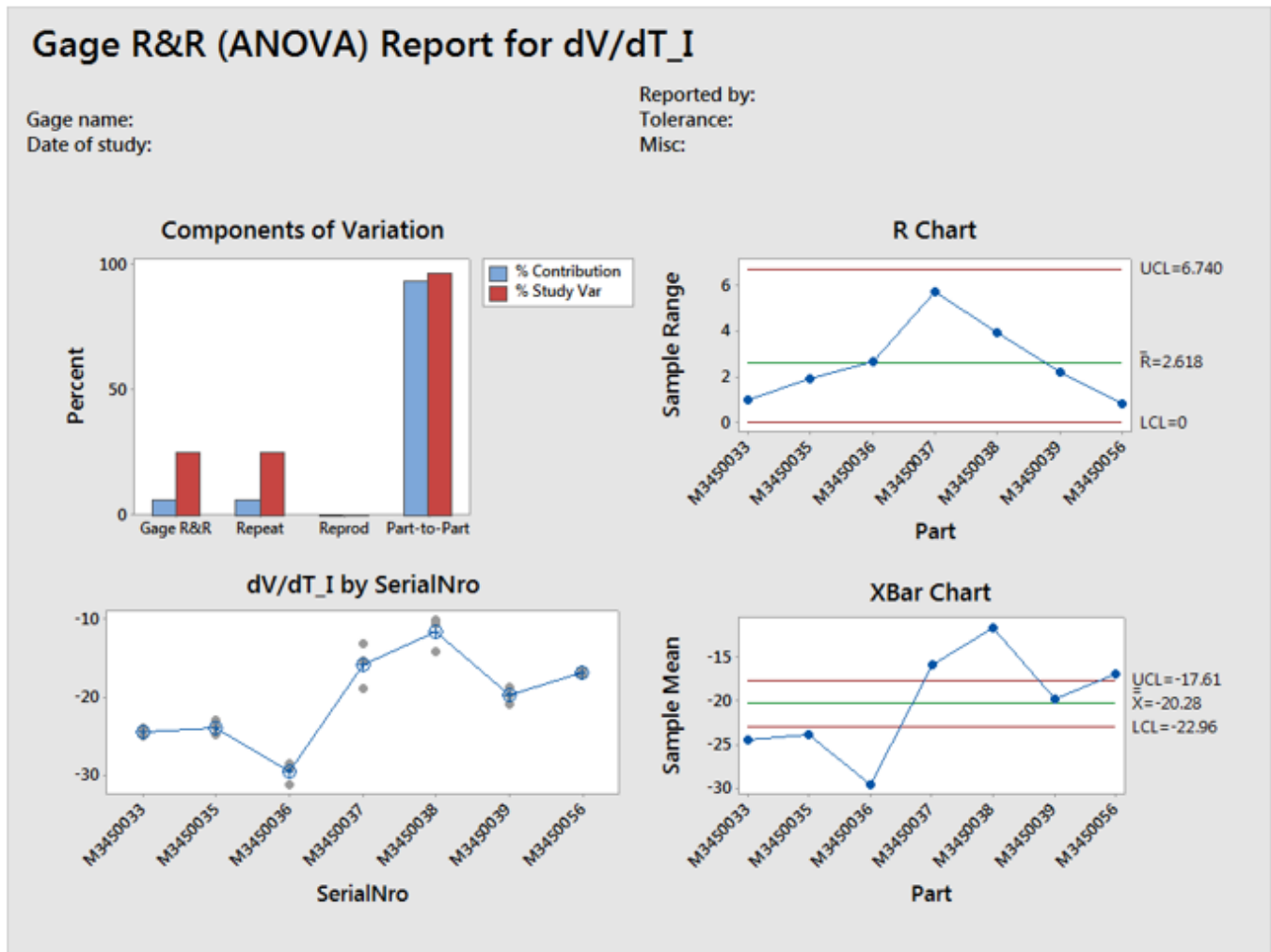
Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.88295	5.2977	11.09
Repeatability	0.88295	5.2977	11.09
Part-To-Part	7.91479	47.4888	99.38
Total Variation	7.96389	47.7833	100.00

### Gage R&R for 1V\_dV/dT\_10V



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1.27121	7.6273	18.90
Repeatability	1.27121	7.6273	18.90
Part-To-Part	6.60514	39.6308	98.20
Total Variation	6.72636	40.3581	100.00

**Gage R&R for dV/dT\_I**



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1.58783	9.5270	25.41
Repeatability	1.58783	9.5270	25.41
Part-To-Part	6.04440	36.2664	96.72
Total Variation	6.24948	37.4969	100.00

## Paikkariippuvuustestien tulokset

### Minitab Project Report

Name: DMPAS6 AOUT-1CB, jigpos dependency, November 2016

Date: 2016-11-11 / PES, OTAPA

Reason: Check for jigpos dependency

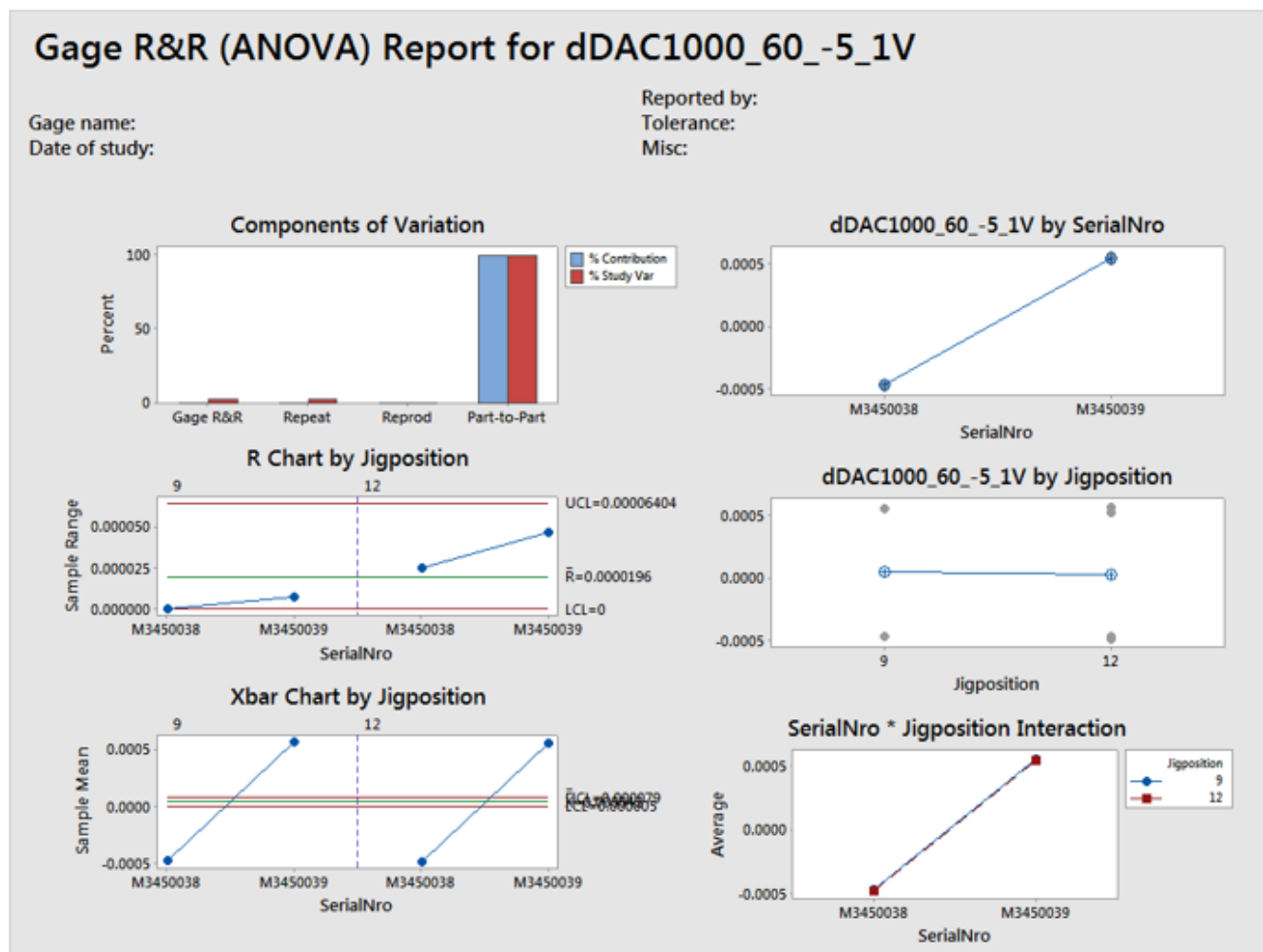
UUT's: 4 UUT's (AOUT-1CB), two of which had to be rejected (due to jigpos 1 failing constantly).

Test plan: 2 repetitions on each jigpos.

Summary: Test results are acceptable.



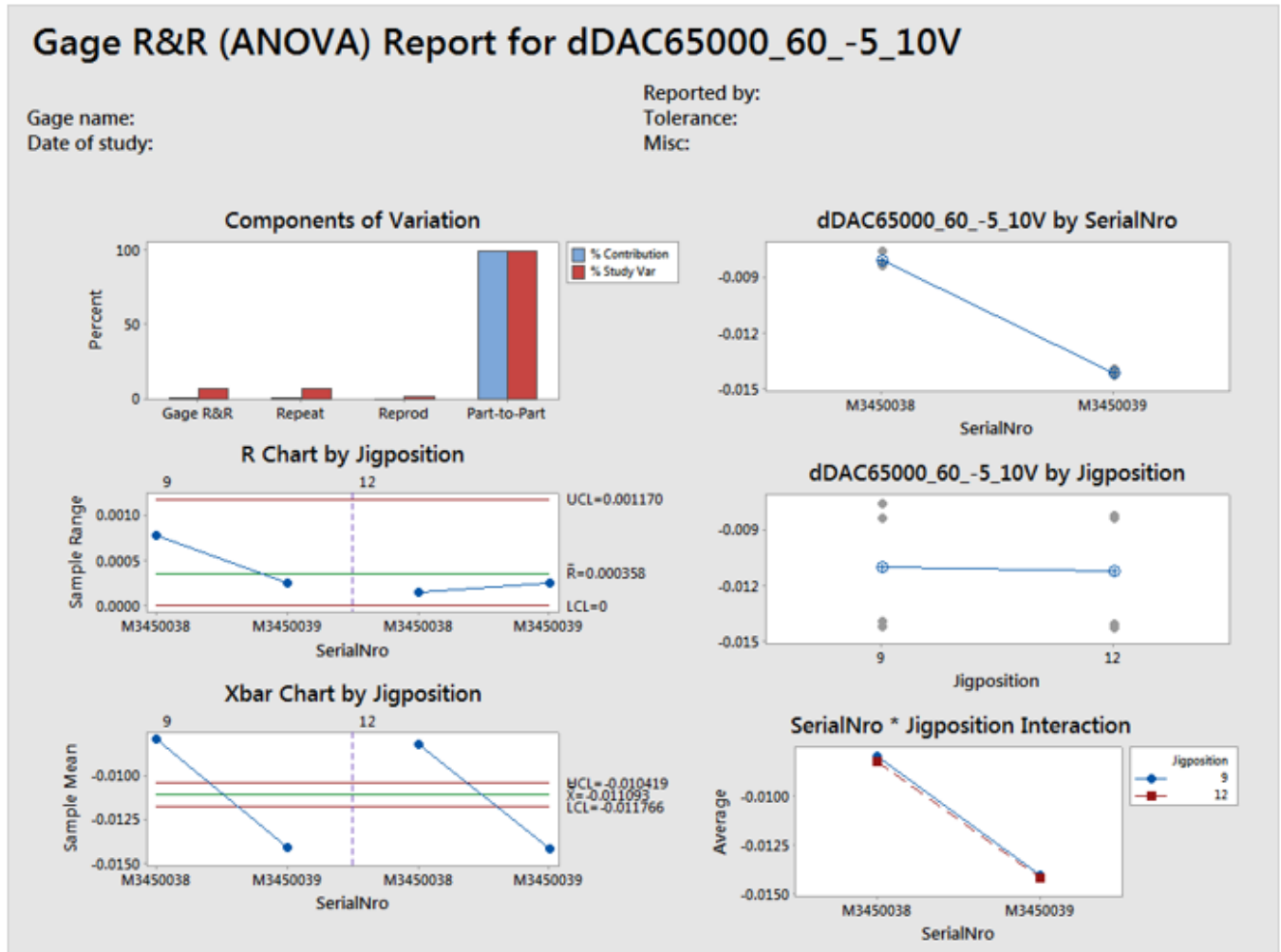
### Gage R&R for dDAC1000\_60\_-5\_1V



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000170	0.0001020	2.35
Repeatability	0.0000168	0.0001007	2.32
Reproducibility	0.0000027	0.0000162	0.37
Jigposition	0.0000027	0.0000162	0.37
Part-To-Part	0.0007233	0.0043397	99.97
Total Variation	0.0007235	0.0043409	100.00



### Gage R&R for dDAC65000\_60\_-5\_10V



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0002918	0.0017509	6.84
Repeatability	0.0002846	0.0017074	6.67
Reproducibility	0.0000646	0.0003877	1.51
Jigposition	0.0000646	0.0003877	1.51
Part-To-Part	0.0042568	0.0255406	99.77
Total Variation	0.0042668	0.0256005	100.00

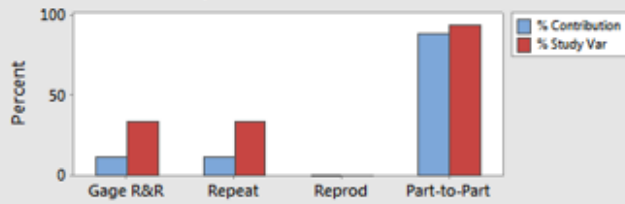
### Gage R&R for DAC1000\_mA

## Gage R&R (ANOVA) Report for DAC1000\_mA

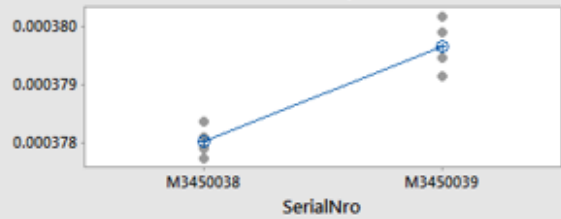
Gage name:  
Date of study:

Reported by:  
Tolerance:  
Misc:

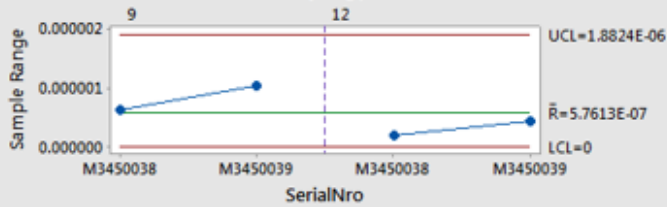
Components of Variation



DAC1000\_mA by SerialNro



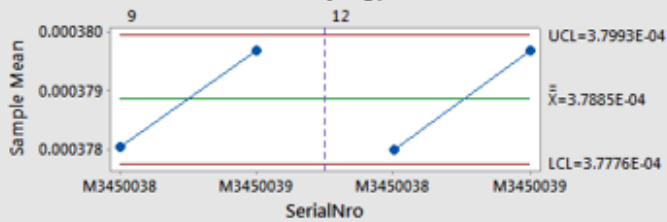
R Chart by Jigposition



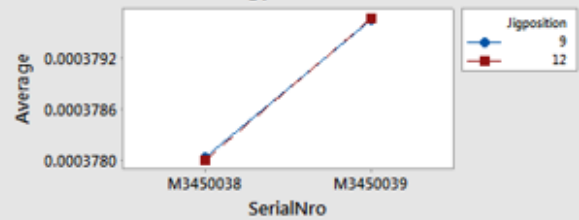
DAC1000\_mA by Jigposition



Xbar Chart by Jigposition



SerialNro \* Jigposition Interaction



Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0000004	0.0000025	33.61
Repeatability	0.0000004	0.0000025	33.61
Reproducibility	0.0000000	0.0000000	0.00
Jigposition	0.0000000	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0000012	0.0000069	94.18
Total Variation	0.0000012	0.0000073	100.00