TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Lauri Kuusisto

GAGE R&R –MENETELMÄN SOVELTAMINEN TAAJUUSMUUTTAJAN OHJAUSKORTIN FUNKTIONAALISESSA TESTAUKSESSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 22.10.2007

Työn valvoja Professori Raimo Sepponen

Työn ohjaaja DI Panu Virolainen

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty ABB Oy Drives:in tuoteylläpito-osastolle Helsingin Pitäjänmäellä. Työn valvojana on toiminut professori Raimo Sepponen Sovelletun elektroniikan laboratoriosta. Haluan osoittaa hänelle kiitokseni kannustavasta toiminnasta opintojani ja valmistumistani kohtaan. Haluan myös kiittää työni ohjaajaa DI Panu Virolaista erinomaisten työskentelyolosuhteiden järjestämisestä sekä ansiokkaasta ohjeistuksesta ja perehdyttämisestä työhöni, sekä Ins. Tuomo Höysniemeä oivallisesta ja merkittävästä tuesta työni kokeellisen osuuden suorittamiseksi.

Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita työkavereitani, jotka mahdollistivat työni sujuvan etenemisen mukavassa ympäristössä, sekä koulukavereitani, ystäviäni ja avopuolisoani Marjaanaa, jotka kaikki omalta osaltaan kannustivat ja auttoivat minua suoriutumaan opinnoistani mainiosti ja suunniteltua nopeammassa tahdissa.

Lopuksi haluan kiittää vanhempiani Sirkkua ja Jyrkiä, joiden taloudellinen tuki sekä jatkuva valmius auttaa minua läpi opiskelujeni mahdollistivat valmistumiseni.

Helsingissä 31.7.2007

Lauri Kuusisto

TEKNILLINEN KORKEAKOULU **DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ**

Tekijä: Lauri Kuusisto
Työn nimi: Gage R&R –menetelmän soveltaminen taajuusmuuttajan ohjauskortin funktionaalisessa testauksessa
Päivämäärä: 31.7.2007 Sivumäärä: 96 sivua, 16 liitesivua

Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Professuuri: S-66 Sovellettu elektroniikka

Työn valvoja: Professori Raimo Sepponen
Työn ohjaaja: DI Panu Virolainen

Tilastollisilla menetelmillä on mahdollista tarkkailla ja kehittää erilaisia prosesseja. Jos mittausprosessin aiheuttamaa virhettä sen antamissa tuotteiden mittaustuloksissa ei tunneta, tuotantoprosessin luotettava säätö ei ole mahdollista.

Tässä työssä tutkitaan taajuusmuuttajan ohjauselektroniikan sisältävän ohjauskortin tuotannon funktionaalisen testausjärjestelmän antamien tuloksien luotettavuutta. Tutkimus suoritetaan mittalaitteen toistettavuus- ja uusittavuusmittauksien (Gage repeatability and reproducibility, Gage R&R) avulla. Menetelmän avulla selvitetään, kuinka mittauslaite kykenee toistamaan mittaukset (repeatability), sekä miten tulokset riippuvat mittalaitetta käyttävästä operaattorista (reproducibility). Vaihtelun laskeminen suoritetaan varianssianalyysin avulla, jolloin saadaan mahdollisimman kattava kuva eri variaatiokomponenteista sekä niiden välisistä interaktioista.

Työssä esitettyä teoriaa ja mainittuja menetelmiä sovelletaan kahden ABB Oy:n ohjauskorttitoimittajan tuotantotestausjärjestelmissä. Molempien toimittajien kohdalla testeihin valitaan kaksi järjestelmää, joiden antamien mittaustuloksien hajontaa ja keskittymistä verrataan myös toisiinsa. Kaikkia testausjärjestelmän suorittamia mittausvaiheita ei pyritä analysoimaan, vaan tutkimukseen valitaan mitatun tuotteen laadun kannalta tärkeimmät testit. Esimerkkitapauksien valossa pyritään selvittämään vaatimukset ja huomioitavat seikat elektroniikkatuotteelle tehtävien toistettavuus- ja uusittavuusmittauksien suorittamiseksi ja mittauksista saadun hajonnan analysoimiseksi.

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että vaihtelun analysointi pitkälle automatisoidussa piirikorttitestauksessa vaatii tuntemaan tarkasti mahdolliset virhelähteet. Tutkittavan testausjärjestelmän ohella tulee lisäksi mitattava tuote tuntea niin fyysisellä kuin ohjelmistotasolla. Mitattujen näytteiden sisäistä vaihtelua ei voi välttämättä poistaa ilman erityismenettelyjä, jolloin testausjärjestelmän aiheuttaman vaikutuksen erottelu hajonnasta hankaloituu. Samaa suuretta mittaavia mittausvaiheita ei voi välttämättä suoraan verrata toisiinsa, eikä yleispäteviä johtopäätöksiä usealle mittausvaiheelle voi tällöin tehdä. Käytetyillä menetelmillä on kuitenkin mahdollista saada hyödyllisiä estimaatteja hajonnasta mittausvaiheiden tarkempia jatkoanalysointeja ajatellen.

Avainsanat: toistettavuus, uusittavuus, Gage R&R, funktionaalinen testaus

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY **ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS**

Author: Lauri Kuusisto
Name of the Thesis: Application of the Gage R&R Method for Functional Testing of an AC Drive Control Board
Date: October 31, 2007 Number of pages: 96 pages, 16 appendix pages

Department: Department of Electrical and Communications Engineering
Professorship: S-66 Applied Electronics

Supervisor: Dr. Sc.(Tech.) Raimo Sepponen
Instructor: M. Sc. (Tech.) Panu Virolainen

Statistical methods allow the monitoring and improvement of many processes. However, reliable control of the manufacturing process can be impossible if the error derived from the measurement process can not be separated from the results given by the testing system.

The purpose of this thesis is to study the reliability of measurement data given by a functional tester of an AC drive control board. The study uses a gage repeatability and reproducibility method (Gage R&R) to determine how well the measurement system can repeat the measurements (the repeatability) and how dependant the results are on the person operating the measurement system (reproducibilty). The variation in the measurement process is calculated by implementing a variance analysis method that gives extensive results concerning different variation components as well as the interaction between them.

The theory and methods illustrated in this thesis are applied to two different production testing systems used by ABB's control board suppliers. Two testing systems are chosen from both suppliers, and the variation and concentration of the measurement data are compared between the systems. Rather than analyze all the measurement steps performed by the system; only the most important steps are chosen in terms of the quality of the product. These steps are then used as examples to determine the requirements and most notable features contributing to the repeatability and reproducibility when performing a Gage R&R test and analyzing the variation in the measurement data.

The results of the study indicate that analyzing the variation in a highly-automated circuit board testing requires precise knowledge of the sources of systematic errors. In addition to the testing system, the hardware and the software of the product being tested should also be known. Separating the variation between the samples from the testing results requires special methods, which would further complicate the analysis. Measurement steps that measure the same magnitude can not automatically be compared with each other, thus preventing any universal conclusions from being drawn. Nevertheless, the methods demonstrated in this study can be utilized to gather useful estimates for further analysis of the variation between measurement steps.

Keywords: repeatability, reproducibility, Gage R&R, functional testing

Sisällysluettelo

Nimilehti

Alkusanat

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Symbolit ja lyhenteet

1 JOHDANTO ... 10

2 TYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET ... 11

3 TILASTOLLINEN LAATUKÄSITYS ... 12
3.1 Laadun parantaminen ... 12
3.2 Tilastollinen prosessinohjaus ... 14
3.3 Valvontakortit ... 17
3.4 Prosessin suorituskyky ... 22

4 GAGE R&R ... 24
4.1 Menetelmät toistettavuuden ja uusittavuuden laskemiseksi ... 26
4.2 Gage R&R -tutkimuksen suunnittelu ... 32
4.3 Mittausmenetelmän suorituskyvyn arviointi ... 33
4.4 Mittausepävarmuus ja mittausten jäljitettävyys ... 38

5 PIIRIKORTIN TESTAAMINEN ... 41
5.1 Piirikorttien vikaantuminen ja yleisimmät vikatyypit ... 41
5.2 Testausprosessi ja yleisimmät testausmenetelmät ... 44

6 TUTKIMUSKOHTEET JA -MENETELMÄT ... 51
6.1 Lähtökohta ja tavoitteet ... 51
6.2 Taajuusmuuttajan ohjauskortti ... 52
6.3 Nykyinen ohjauskortin tuotanto- ja testausprosessi ... 54
6.4 Ohjauskortin funktionaalinen testausjärjestelmä ... 55
6.5 Funktionaalisen testausjärjestelmän suorittamat mittaukset ... 57
6.6 Gage R&R -tutkimuksen määrittely tutkimuskohteille ... 61

7 TULOKSET JA ANALYSOINTI ... 66
7.1 Toimittaja A ... 67
7.2 Toimittaja B ... 77
7.3 Toimittajien A ja B välinen vertailu ... 87

8 YHTEENVETO JA SUOSITUKSET 90

LÄHDELUETTELO 94

LIITTEET

Liite A: Standardipoikkeamia normaalijakautuneelle aineistolle

Liite B: d_2* -Taulukko

Liite C: Varianssianalyysin tulokset tutkimuksen mittauskohteille

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

C_P	prosessin kyvykkyysindeksi
C_{Pk}	prosessin kyvykkyysindeksi
d_2	riippuvuuskerroin
F	testisuure
k	operaattoreiden lukumäärä
K	luottamuskerroin
μ	jakauman keskiarvo
n	näytteiden lukumäärä
r	mittaustoistojen lukumäärä
R	vaihteluväli
$\overline{R}$	näyte-erien vaihteluvälien yhdistetty vaihteluväli
$\overline{\overline{R}}$	kaikkien vaihteluvälien yhdistetty vaihteluväli
σ	keskihajonta, standardipoikkeama
σ^2	varianssi
x	satunnaismuuttuja
x_i	näytteestä i mitattu ominaisuus

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri
AC	alternate current, vaihtovirta
A/D	analogia/digitaali (muunnos)
AIAG	Automotive Industrial Action Group
ANOVA	analysis of variance, varianssianalyysi
AOI	automated optical inspection, automaattinen optinen tarkastusmenetelmä
ASIC	application-specific integrated circuit
ASTM	American Society for Testing and Materials
AXI	automated X-ray inspection, automaattinen röntgenkuvaustarkastus
BIST	built-in self test, sisäänrakennettu itsetesti
BGA	ball grid array, tinapalloihin perustuva komponentin kiinnitystekniikka
CL	control limit, ohjausraja
DC	direct current, tasavirta
DF	degrees of freedom, vapausasteiden lukumäärä
DFT	design for testability, testattavuussuunnittelu
EMC	electromagnetic compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
ESD	electrostatic discharge, elektrostaattinen purkaus
FCT	functional test, funktionaalinen testi
R&R	repeatability and reproducibility, toistettavuus ja uusittavuus
GND	ground, (sähkölaitteen) maa
GRR	Gage repeatability and reproducibility, mittalaitteelle suoritettava toistettavuus- ja uusittavuustesti
HASS	highly accelerated stress screen
HAST	highly accelerated stress test
IC	integrated circuit, integroitu piiri
ICT	in-circuit test, sähköpiirin sisäinen testi
ID	identification, identifikaatio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	insulated gate bipolar transistor
I/O	input/output, tulo/lähtö
ISO	International Organization for Standardization

JTAG	Joint Test Action Group
LCL	lower control limit, alempi ohjausraja
McBSP	Multi-channel Buffered Serial Port
MCI	measurement capability index, mittauksen kyvykkyysindeksi
MS	mean square, keskineliö, varianssi
MVI	manual visual inspection, manuaalinen visuaalinen tarkastusmenetelmä
ndc	number of distinct categories, eri kategorioiden määrä
PWM	pulse-width modulation, pulssinleveysmodulaatio
REF	reference, referenssi
RoHS	Restriction of Hazardous Substances
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SI	Système International d'Unités, kansainvälinen yksikköjärjestelmä
SP	Standardipoikkeama
SS	Sum of Squares, neliösumma
SMT	surface mount technology, pintaliitosteknologia
UCL	upper control limit, ylempi ohjausraja

1 JOHDANTO

Nykypäivänä laatu, kustannukset, toimitusnopeus sekä -varmuus määrittelevät pitkälti elektroniikkatuotteen menestyksen kilpailluilla, globaaleilla markkinoilla. Kompleksisten tuotteiden, kuten piirikorttien, valmistuksen tulee olla tuottajalleen taloudellisesti tehokasta, mutta näkyä myös loppukäyttäjälle laadukkaana, toimivana tuotteena. Panostus laadun parantamiseen on saanut yrityksissä vuosi vuodelta enemmän painoarvoa. Erilaiset prosesseissa sovellettavat, tilastolliset mittausmenetelmät ovat yhä useammin sekä yhä useammalla tavalla käytössä, sillä muutokset tuotannon valmistusprosesseissa pohjautuvat pääsääntöisesti prosesseista kerättyyn mittausdataan. [1]

Elektroniikkalaitteen testauksen merkitystä varhaisessa vaiheessa koko tuotteen elinkaarta ajatellen kuvaa hyvin ajatusmalli ”The Rule of Ten”. Sen mukaan viallinen tuote, joka pääsee läpi testausjärjestelmästä, aiheuttaa aina kymmenkertaiset kustannukset edetessään seuraavaan kokoonpanovaiheeseen, jossa vika vasta mahdollisesti havaitaan. Vian aiheuttamat kustannukset kertautuvat sitä dramaattisemmin, mitä pidemmälle tuotantoprosessia viallinen komponentti tai yksikkö etenee. [2]

Huonosti laaditut spesifikaatiot, suunnitteluvirheet, epävarmat ja epätarkat mittausvälineet, inhimilliset virheet sekä ylipäätään mittauksia ajatellen huono prosessiympäristö saattavat aiheuttaa tilanteita joissa oikeasti virheetön tuote hylätään tai loppuasiakkaan kannalta vielä haitallisemmin, virheellinen tuote tulkitaan hyväksi. Mittausjärjestelmien ja -olosuhteiden monimutkaisen luonteen vuoksi vikaantumisen oikean syyn hahmottaminen voi olla hankalaa, ellei peräti mahdotonta ilman analyyttistä mittausdatan tulkintaa. Tilastollisilla menetelmillä mittausjärjestelmän ja mitattavan tuotteen aiheuttama vaihtelu mittaustuloksissa voidaan erottaa toisistaan. Tällöin päästään käsiksi todellisiin ongelmakohtiin tuotantoprosessissa ja kyetään mahdollisiin ratkaisuihin sen parantamiseksi. Vaihtelua pystytään vähentämään ja prosessien säätö helpottuu. Tuotteen spesifikaatiorajojen toteutuminen pystytään havainnollistamaan ja rajoja kyetään mahdollisesti optimoimaan.

Tilastollinen prosessinohjaus on saanut jatkuvasti yhä suurempaa merkitystä teollisuudessa. Se mahdollistaa prosesseissa esiintyvän, ei-luonnollisen vaihtelun, eli erityissyyvaihtelun havaitsemisen tilastollisten menetelmien avulla. Toistettavuus- ja uusittavuusmittauksilla voidaan selvittää tilastollisia menetelmiä hyväksikäyttäen mittausjärjestelmän, sitä käyttävän henkilön ja esimerkiksi mittausympäristön vaikutusta mittaustulosten vaihteluun. Mittaustulosten perusteella on tärkeää tehdä prosessivariaatiota vähentäviä toimenpiteitä ja parantaa prosesseja. Ymmärtääkseen mittaustulosten todellisen vaihtelun syyt, tulee mittausjärjestelmä identifioida ja erottaa omaksi osaksi prosessia. Kyseinen ajattelutapa on toiminut myös tämän diplomityön kantavana ideana. [3] [5]

2 TYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET

Tämän työn tarkoituksena on suorittaa mittausprosessin toistettavuus- ja uusittavuustesti (Gage repeatability and reproducibility, Gage R&R, GRR) kahdelle testausjärjestelmälle, jotka mittaavat ABB Oy:n eräässä taajuusmuuttajassa käytetyn piirikortin toiminnallisuutta. Toistettavuus (engl. repeatability) kuvaa mittaustulosten hajonnan määrää, kun sama mittaaja mittaa tiettyä kappaletta samalla mittalaitteella useita kertoja. Tällöin saadaan selvitettyä käytetystä mittalaitteesta aiheutuva vaihtelu. Uusittavuudella (engl. reproducibility) kuvataan perinteisesti hajontaa, joka ilmenee, kun eri mittaaja mittaa kyseistä kappaletta käyttäen samaa mittalaitetta, eli kuinka paljon mittaustulosten vaihtelusta aiheutuu mittalaitteen käyttäjästä. Toisaalta nykypäivän prosessiteollisuudessa toistettavuutta ja uusittavuutta voidaan tarkastella kokonaan eri mittausympäristöjen tai samaa ominaisuutta mittaavien mittalaitteiden välillä ilmenevinä eroina. Tässä työssä pyritään ottamaan kaikki kyseiset näkökulmat huomioon.

Aluksi työssä käsitellään laatutekniikkaa ja tilastollista prosessinohjausta. Tämä toimii johdatuksena varsinaiseen toistettavuuden ja uusittavuuden mittaukseen, josta käydään läpi menetelmien vaatimukset, mahdollisuudet ja toimintaperiaatteet. Tämän jälkeen luodaan katsaus piirikorttien yleisiin vikoihin ja niitä etsiviin testausjärjestelmiin sekä tunnettuihin mittaussysteemeihin. Tutkimussuunnitelmassa käsitellään varsinaisia tutkimuskohteita, testattavaa piirikorttia, sen testausjärjestelmää ja -ympäristöä, ja laaditaan kahden alihankkijan käyttämälle testausjärjestelmälle tutkimusspesifikaatio tilastollista mittausanalyysiä varten nojautuen tunnettuihin teorioihin ja tietoihin. Toistettavuus- ja uusittavuusmittaukset suoritetaan molemmille valmistajille, ja mittauksista saatuja tuloksia pyritään analysoimaan. Myös tehtaiden mittaussysteemien välisiä eroavaisuuksia pyritään selvittämään. Tutkimussuunnitelmassa tulee ottaa huomioon tutkittavan mittausjärjestelmän ominaisuudet ja kompleksisuus; analyysiä varten tulee selvittää, mitä halutaan mitata ja miksi. Kaikkia systeemin ominaisuuksia ei välttämättä pystytä mittaamaan. Tutkimuksessa tulee osoittaa prosessin kannalta kriittisimmät muuttujat helpottamaan mahdollista fokusointia tiettyyn ongelma-alueeseen. Tutkimusspesifikaation laatimisen ja sen avulla kerätyn informaation toivotaan auttavan tiedostamaan toistettavuus- ja uusittavuusmenetelmien mahdollisuudet samankaltaisille selvityksille tulevaisuudessa.

Työssä on tarkoituksena selvittää, mihin toistettavuus- ja uusittavuusmittaukset kykenevät, ja löytyykö nykyisistä testaustavoista menetelmän avulla ongelmakohtia, joita voidaan mahdollisesti korjata. Myös muita testausprosessissa mahdollisesti löytyviä ongelmia pyritään analysoimaan, jos niitä työn edetessä ilmenee. Työn toivotaan herättävän ajatuksia ja ideoita liittyen laatuteknisiin menetelmiin, etenkin tilastolliseen prosessinohjaukseen. On tärkeää selvittää, kuinka paljon ja millä tavoin tuotantoprosessia on yleensäkin tarkkailtava, jos laatua halutaan parantaa. Elektroniikkateollisuudessa tuotantomäärät ovat suuria, jolloin järjestelmien erinomainen toimintavarmuus on avainasemassa. Täydellistä testausjärjestelmää ei ole olemassa, mutta jatkuva parantaminen on aina mahdollista.

3 TILASTOLLINEN LAATUKÄSITYS

3.1 Laadun parantaminen

Laatu on käsite, jolle on vaikea antaa täsmällistä, objektiivista määritelmää. Sana *laatu* on määritelty vuosikymmenien saatossa monella eri tavalla. Yritysmaailmassa laatu voidaan nähdä joko asiakkaan, yrityksen tai molempien näkökulmasta. Asiakkaat haluavat virheettömiä, hinnaltaan kilpailukykyisiä ja toimitusvarmuudeltaan erinomaisia tuotteita. Tuotetta valmistava yritys pyrkii puolestaan alhaisiin kustannuksiin ja reklamaatiomääriin, pieniin investointeihin ja tehokkaaseen logistiikkaan tuotantoketjuissa. Yhteinen tekijä kaikille laadun määritelmille on tuotteen tai palvelun sopivuus tarkoituksenmukaiseen käyttöön. Taulukossa 1. on listattu tunnettuja laatua kuvaavia määritelmiä asiakkaan näkökulmasta eri vuosikymmeniltä. [3] [6]

Taulukko 1. Laadun määritelmiä eri vuosikymmeniltä [6]

Deming (1940)	asiakkaan nykyisten ja tulevien tarpeiden täyttäminen laadun avulla
Total Quality Management (1950)	asiakkaan odotusten täyttäminen
Edwards (1968)	kyky tyydyttää asiakkaan tarpeet
Juran (1989)	sopivuus käyttöön tai tarkoitukseen
Akyama (1991)	se, mikä toteuttaa ostajan tarpeet
Lillrank (1998)	vaihdannassa eli transaktiossa näkyvä ominaisuus, joka vaikuttaa asiakkaan arviointeihin ja päätöksiin

Vaikka monet laatuasiantuntijat, kuten Deming ja Akyama, peilaavat laatua usein asiakkaan näkökulmasta, tai käsittelevät sitä lopputuotteen laatuna, voidaan tuotelaadun lisäksi puhua toiminnan laadusta. Laatu käsitteenä onkin laajentunut vuosien varrella. Tri M. J. Harryn esittämän määritelmän mukaan laatu voidaan tulkita tuotteen tai palvelun kyvyksi täyttää asiakkaan tarpeet sekä odotukset ja samalla tuottaa valmistajalleen voittoa. Laatua ja tuotteen hintaa ei kuitenkaan pidä sekoittaa keskenään. Tuotteen valmistamisen korkeat kustannukset eivät tarkoita automaattisesti korkeaa laatua, eikä laadukkaan tuotteen valmistaminen välttämättä vaadi suuria investointeja. Kärjistetyin suhtautuminen laadun hintaan on mahdollisesti laadun parantamisesta useita teoksia kirjoittaneen P. Crosbylin filosofia, jonka mukaan laatu on ilmaista.

Ajattelutapaan täytyy suhtautua kuitenkin kriittisesti, sillä panostaminen laatuun maksaa lähes aina. Se on kuitenkin hyvin usein kannattava investointi. [31] [32]

Laadun kehittämistä varten on valjastettu monia keinoja. Laatufilosofia on systemaattista ajatustyötä, jonka lähtökohtana yksinkertaisuudessaan on ongelmien tunnistaminen ja diagnosointi. Laatuongelmia havaitessa tulee vaihtoehtoisia ratkaisuja kehittää ja toteuttaa iteratiivisen prosessin muodossa. Toiminnan kehittäminen tulee aloittaa mahdollisimman ylhäältä organisaatiotasolla. Kehitys vaatii uusia ajattelumalleja, johtamista, periaatteita, ohjeita ja yhteistyötä. Yksi henkilö ei voi vastata yksin laadun kehittämisestä, niin kuin se olisi jokin ”suoritettava” toimenpide. Yhteistyön on oltava vertikaalista ja horisontaalista yrityksessä ja laadun kehittäminen tulee integroida osaksi sen normaalia toimintaa. Laadun kehittäminen ei saa kuitenkaan johtaa väkisin täysin yhdenmukaisiin toimintatapoihin yrityksen sisällä, vaan maksimaalinen laaduntuotto vaatii myös improvisointia ja tapauskohtaista ongelmanratkaisukykyä eri yksiköiden sisällä. [6] [10]

Laatutekniikka on useista menetelmistä koostuva tapa ratkaista laatuongelmia. Sen avulla pyritään analysoimaan laadun nykytilaa ja täyttämään asetettuja laatutavoitteita. Laatutekniikka nojautuu tilastollisiin ja tieteellisiin menetelmiin ja käsittelee asioita analyyttisesti. Laatuteknisten toimintatapojen standardointi auttaa järjestelmien rakentamisessa, sillä standardien avulla prosessien ennustettavuus kasvaa. Syy-seuraus -suhteen hahmottaminen helpottuu, kun tiedetään miten muutokset vaikuttavat prosessien ulostuloihin. Standardien käytössäkin on omat riskinsä, sillä ne vanhenevat. Jos samoja menettelytapoja toistetaan jatkuvasti ilman niiden tarkastamista ja parantelua, ne voivat kääntyä haitallisiksi. Lillrankin [6, s.129-130] mukaan liika standardointi ainoastaan vaikeuttaa työprosessia; systeemin monimutkaisuus tekee siitä hankalasti lähestyttävän ja kontrolloitavan asian. [6]

Yritysten tavoitellessa maksimaalisia ja nopeita voittoja voi laatuajattelu helposti unohtua. Myös laadun kehittäminen ilman selkeää laatustrategiaa voi hämmentää koko toimintaa. Jos laadun vaatimuksia ei määritellä, ei niitä myöskään pystytä mittaamaan, jolloin kehityksen kartoittaminen on hyvin hankalaa. Suhtautumistavalla laadun parantamiseen vaikutetaan oleellisesti siihen, kuinka hyvin laatuhankkeet toteutuvat. Laatutekniikka vaatii koko organisaation pitkäjänteistä sitoutumista hankkeisiin, yrityksen johtoa myöten. Laadun johtaminen on käsite, joka tarkoittaa toimia, joilla yrityksessä levitetään laatutekniikkaa, jotta se omaksutaan ja otetaan jatkuvaan käyttöön. Laadun johtamisella varmistetaan toimivimpien menettelytapojen käyttö ja pysyvyys. [6]

Tämän tutkimuksen teettäminen on osoitus siitä, että laatujohtaminen ja laatutekniikka ovat merkittäviä tekijöitä yrityksille. Yrityksen ja sen toimittajien toiminnalta edellytetään tiettyä laatutasoa tilattaessa tuotteita, mutta myös laadun pysyvyyttä halutaan tarkkailla. Laatuteknisen tutkimuksen suorittaminen, dokumentointi ja siitä oppiminen voivat auttaa yritystä kehittymään jatkossakin ja pysymään mukana alati tiukentuvassa kilpailussa.

3.2 Tilastollinen prosessinohjaus

Tilastollinen prosessinohjaus (engl. statistical process control, SPC) pyrkii selvittämään, eliminoimaan ja hallitsemaan tuotantoprosesseissa ilmenevää hajontaa. Se on laadun kehittämistä ja tuotantoprosessin taloudellista ohjaamista varten kehitetty työkalu, jonka lähtökohtana on tietoisuus siitä, että kaikissa prosesseissa esiintyy vaihtelua, jota ei voida täysin poistaa. Toisin kuin eksaktit luonnontieteet, se ei pyri asettamaan täsmällisiä rajoja tuotteille ja niiden laatuominaisuuksille, vaan hyväksyy vaihtelun normaaliksi osaksi prosesseja. W.A. Shewhart esitti [22] ensimmäisenä ajatuksen, että kaikkea vaihtelua prosesseissa ei kyetä mitenkään poistamaan. Kaikissa prosesseissa vaihtelua aiheuttavat satunnaiset syyt (kohina) sekä erityissyyt. Näiden syiden erottaminen toisistaan ja erityissyiden poistaminen prosesseista on Shewhartin ratkaisumallin keino laadun kehittämiseen.

Shewhartin mukaan prosessi on hallinnassa, jos sen ulostulon käyttäytymistä voidaan ennustaa prosessin aiemman käyttäytymisen perusteella. Jos prosessi on hallinnassa, on sen ulostulo normaalisti jakautunutta, eikä siinä vaikuta siten erityissyitä. Shewhart kehitti hajontaa selvittävä mallin, jonka avulla voidaan määritellä onko prosessi tilastollisessa hallinnassa vai ei. Operatiivinen määritelmä (”operation of statistical control”) koostuu viidestä vaiheesta:

1. Määritellään yleisellä tasolla menettelytapa, jolla mitatusta tiedosta erotellaan selvitettävissä olevat erityissyyt satunnaissyistä.
2. Määritellään, kuinka näytteet prosessista kerätään ja kuinka data jaetaan alaryhmiin, eli minkä muutoksien halutaan edustavan alaryhmien sisäistä satunnaisvaihtelua ja minkä niiden välistä, erityissyitä indikoivaa vaihtelua.
3. Määritellään ohjauskriteerit, joilla erityissyyt todetaan.
4. Määritellään menettelytavat, kuinka toimia kun tarkkailtu ominaisuus sijoittuu valvontarajojen ulkopuolelle, eli kun prosessissa havaitaan erityissyy.
5. Määritellään tarvittavan datan määrä, minkä avulla voidaan todeta prosessin saavuttaneen tilastollisen hallinnan.

Shewhartin mukaan tuotteen laatuominaisuuksia ei siis voida hallita koskaan täydellisesti. Yleistä vaihtelua aiheuttavat syyt ovat prosesseissa jatkuvasti läsnä, ja niiden yhteisvaikutus näkyy koko joukon vaihteluna, vaikka ne olisivat yksittäin eriteltyinä hyvin vähäisiä. Yleiset syyt aiheuttavat normaalia, luonnollista kohinaa mittaustuloksissa prosesseissa, jotka ovat käytännössä stabiileita, kun niihin ei tehdä olennaisia muutoksia. Erityissyyt ovat puolestaan lähtöisin prosessin ulkopuolelta, ja ilmaantuvat siinä ajoittain. Erityissyyt aiheuttavat yleensä enemmän vaihtelua kuin mikään yksittäisistä yleisistä syistä. Erityissyyt vaativat siten yleensä niiden löytämistä ja poistamista prosessista. Niiden poistaminen tuo taloudellisia etuja. Jos satunnaissyiden pohjalta tehdään korjaavia toimenpiteitä, prosessi saattaa ajautua yhä enemmän pois ohjauksesta. Satunnaissyyn arvon seuraaminen ja käyttäminen hyväksi

päätöksenteossa johtaa yleensä vain lisääntyvään vaihteluun ja virheellisiin päätelmiin. [6] [11] [26]

Tilastollinen laadun kehittäminen toistuvissa operaatioissa tai jatkuvassa prosessissa alkaa tavoitteiden määrittelystä. Ongelmaan pyritään löytämään ratkaisu, joka implementoidaan suorittamalla joukko tarpeelliseksi todettuja muutoksia ja lopuksi mittaamalla prosessin ulostulo. Tuloksista voidaan oppia, ollaanko työ tehty oikein ja pystytäänkö suoritus toistamaan. Tämän jälkeen voidaan arvioida, mikä on prosessin suorituskyky suhteessa sallittuihin toleransseihin. Tilastollinen prosessinohjaus perustuu nimensä mukaisesti tilastolliseen, pitkäjänteiseen analysointiin eikä niinkään yksittäisiin mittauksiin. Shewhartin mallin mukaan prosessista kerätyn datan tulee olla normaalijakautunutta keskiarvon μ ympärille asetettujen rajojen sisässä, jotta voidaan sanoa, että prosessi on tilastollisessa hallinnassa. Satunnaismuuttuja x noudattaa normaalijakaumaa parametrein (μ, σ^2), jos sen tiheysfunktio on muotoa

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{ -\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right\}, \tag{1}$$

jossa

σ on tietyn äärellisen populaation keskihajonta eli standardipoikkeama
μ jakauman keskiarvo
σ^2 varianssi

Jakauman keskiarvo $\mu \in \Re$ saadaan yhtälöstä

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \tag{2}$$

jossa

x_i on näytteestä *i* mitattu ominaisuus
n näytteiden lukumäärä

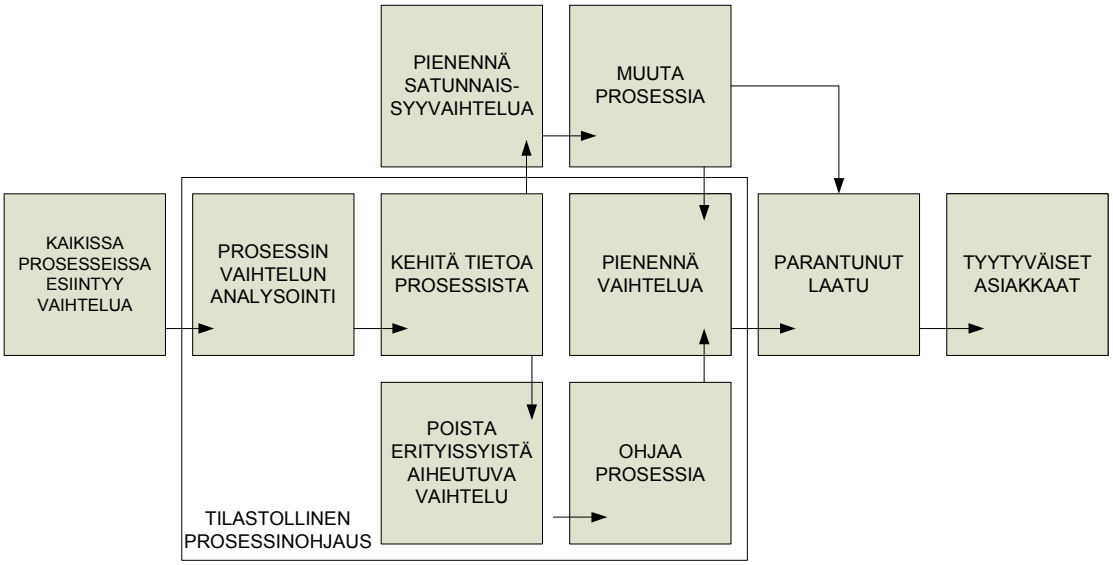
Keskihajonta eli standardipoikkeama kuvaa havaintoarvojen poikkeamaa keskiarvosta. Äärellisen populaation standardipoikkeama σ voidaan estimoida yhtälöllä

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2} \tag{3}$$

Varianssi on odotusarvo satunnaismuuttujan ja sen odotusarvon poikkeaman neliöstä, joka saadaan korottamalla standardipoikkeama σ toiseen potenssiin.

Normaalijakauma on yleisin jakauma, ja useimmat luonnolliset tapahtumat pyrkivät jakautumaan normaalisti. Jos keskiarvo poikkeaa tavoitearvoista, on prosessi huonosti säädetty. Jos data ei ole normaalijakautunutta, on aineisto tällöin epähomogeenista tai prosessiin vaikuttaa joitain erityisiä syitä. Jos jakauma ei mahdu toleransseihin, ei prosessi ole suorituskykyinen verrattuna tuoterakenteen määrittelemiin vaatimuksiin. [6] [26]

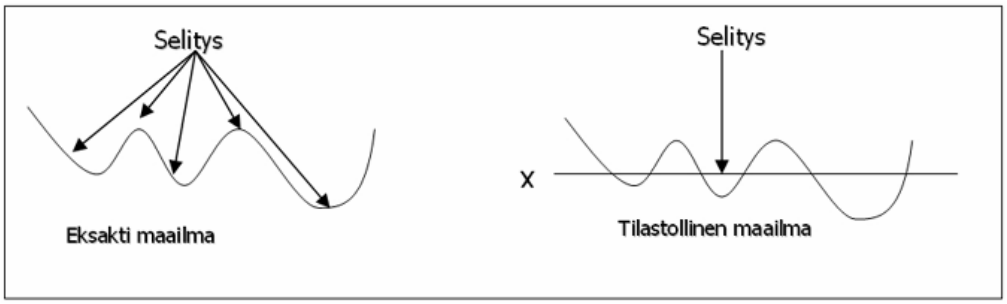
Tilastollisella tarkkailulla voidaan havaita, jos prosessi on poissa ohjauksesta. Erityissyiden lähteitä tarkkailu ei kuitenkaan paljasta. Kyseiset tekijät joudutaan selvittämään erikseen muilla menetelmillä. Käytännössä tilastollista tarkkailua tehdään valvontakorteilla (control card), joihin kerätään näytteitä prosessi- ja tuoteparametreista ajan suhteen, ja saatuja arvoja verrataan asetettuihin toleransseihin. Tilastollisen prosessinohjauksen tarkoitus on auttaa ymmärtämään ja vähentämään vaihtelua, ja aikaansaada vakaa, ennustettava prosessi. Kuva 1 havainnollistaa tilastollisen prosessinohjauksen toimintaperiaatetta tuotantoprosesseissa. [3]



Kuva 1. Tilastollisen ajattelun osa-alueet prosessin parannuksessa. [3]

3.3 Valvontakortit

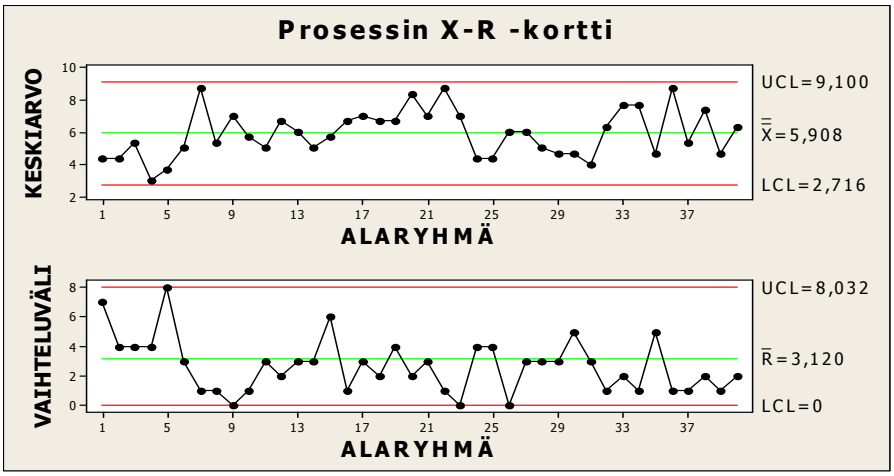
Valvontakortti (control card) on menetelmä erottaa prosessin erityissyyt ja satunnaissyyt toisistaan. Se on työkalu tilastollista prosessinhallintaa ja laadunparannusta varten. Shewhart esitteli ensimmäisen valvontakortin vuonna 1924. Yksittäisten tuotteiden ominaisuuksien sijaan selityksiä prosessien ja tuotteiden variaatioon alettiin etsiä tilastollisin menetelmin suuremman joukon käyttäytymisen perusteella (kuva 2). Muutoksen ansiosta prosessien käyttäytymistä kyettiin ennustamaan ja niissä esiintyviä poikkeamia hallitsemaan. [3] [4]



Kuva 2. Eksaktin ja tilastollisen ajattelutavan erot. [4]

Valvontakortin avulla pyritään ennustamaan prosessissa mitattavien ominaisuuksien jakaumaa ja sitä kautta pyrkiä laatua parantavien toimintojen suorittamiseen. Sen tarkoituksena on havainnollistaa mitattujen ominaisuuksien käyttäytyminen ajan funktiona, ja osoittaa, onko prosessi hallinnassa. Jos prosessi ei käyttäydy stabiilisti, ei sille annettujen syötteiden vaikutusta prosessin ulostuloihin voida ennustaa. Jos prosessin parametrien muutosten vaikutusta ei tunneta, ei koko tapahtumaketjua voida ohjata.

Jokaisella prosessilla on valvontarajat, joihin mitattuja ominaisuuksia verrataan. Rajojen ylittäminen indikoi erityissyiden ilmenemistä ja auttaa havaitsemaan, vaatiiko prosessi muutoksia. Prosessin ulostuloon vaikuttavat monet muuttujat: henkilöstö, materiaalit, käytetyt laitteet ja käyttömenetelmät, mukaan lukien mittausmenetelmät. Korttiin merkitään arvoja, jotka edustavat mitatun ominaisuuden sen hetkistä tilaa. Jos pisteitä jää valvontarajojen ulkopuolelle tai ne osoittavat pyrkimystä sijoittua ei-toivottuun suuntaan, voidaan olettaa, että prosessi ei ole hallinnassa. Kuvassa 3 on esimerkki $\bar{x} - R$-kortista, joka esittää mitatun prosessimuuttujan alaryhmien (subgroup) keskiarvot ($\bar{x}$) ja vaihteluvälin (R, range) ajan funktiona. Tämä oli ensimmäinen Shewhartin esittelemä valvontakorttityyppi. Se kuvaa alaryhmien keskiarvojen sijaintia koko prosessin keskiarvoon nähden sekä alaryhmien vaihteluvälejä vaihteluvälien keskiarvoon nähden. Alaryhmä on tietyn kokoinen joukko näytteitä, jotka mittaavat tuotteista tiettyä ominaisuutta. Vaihteluvälillä tarkoitetaan alaryhmän isoimman ja pienimmän arvon erotusta. [3] [12]



Kuva 3. *Esimerkki $\bar{x} - R$ –ohjauskortista. UCL = upper control limi (ylempi ohjausraja), LCL = lower control limit (alempi ohjausraja).*

Mitattava data voidaan luokitella sen tyypin mukaan kahteen luokkaan, variaabelidataan ja attribuuttidataan. Sekä variaabeli- että attribuuttidatalle on omat valvontakorttityyppinsä. Tässä työssä käytetään mittausdatan ja työn luonteesta johtuen vain variaabelidatan käsittelyyn tarkoitettuja menetelmiä. Variaabelidatalla tarkoitetaan mitattavissa olevaa muuttujaa, kuten pituutta, painoa tai jännitettä. Variaabelidata on kvantitatiivista dataa, joka voidaan jakaa kahteen eri luokkaan, diskreettiin (rajallinen määrä arvoja) ja jatkuvaan dataan (rajaton määrä arvoja). Attribuuttidata on kvalitatiivista dataa, eli sitä ei voi mitata liukuvalla asteikolla. Se voidaan jakaa kahteen luokkaan sen mukaan, onko tieto luokittelevaa (kyllä/ei, hyväksytty/hylätty) vai lukumääräistä, kuten virheiden lukumäärä. Prosessin testausjärjestelmä saattaa käsitellä ja tehdä päätöksiä pohjautuen variaabelidataan, mutta antaa tulokset ulos attribuuttidatana. Tilastollisessa prosessinohjauksessa käytetyt menetelmät riippuvat mittadatan tyypistä. [3]

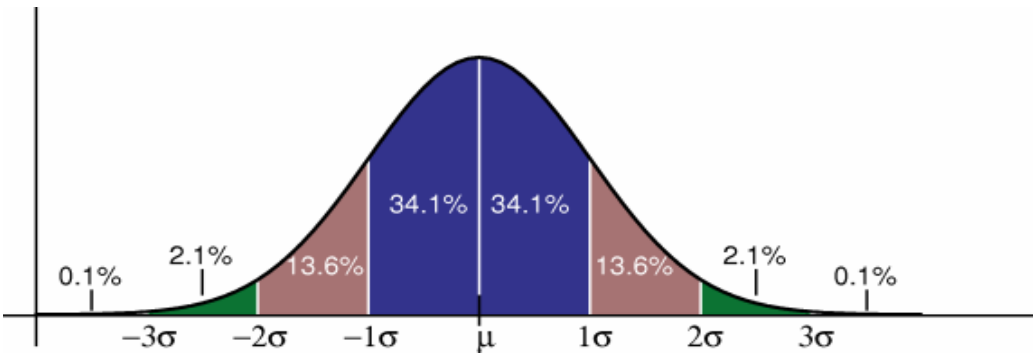
Valvontakorttien käyttö perustuu näytteisiin, joita prosessista otetaan. Koska hyvin harvoin on mahdollista mitata jokaista tuotetta, näytteistä ja niiden muodostamista alaryhmistä voidaan estimoida suuremman populaation vastaavien arvojen käyttäytymistä. Muutokset näytteiden keskiarvossa tai hajonnassa indikoivat, että myös prosessissa on tapahtunut muutoksia. Näytteiden ottamisen suunnittelu on merkittävä tekijä valvontakorttien käytössä. Mahdollisimman homogeenistä olosuhdealuetta edustavat näytteet mahdollistavat olosuhteiden muutoksen havaitsemisen prosesseissa. Kun näytteet edustavat mahdollisimman homogeenistä aluetta, näytteiden valitsemisen kriteeriksi muodostuvat valitut tarkkailua vaativat ominaisuudet. Siten tulee harkita, minkä tekijöiden vaikutuksia valvontakortin avulla halutaan tutkia, ja mitkä tekijät puolestaan muodostavat alaryhmien sisäisen satunnaisvaihtelun, johon ei voida löytää syitä. Jos tiettyä attribuuttia ja sen muutoksia prosessissa halutaan tarkkailla, eivät näytteet voi kyseisen muuttujan osalta edustaa epähomogeenista otosta. Muutoin erityissyyt eivät erotu satunnaissyiden seasta, koska näytteiden välinen vaihtelu on liian suurta. Tämän takia näytteet valitaankin yleensä peräkkäisistä tuotteista. Alaryhmien

koko ja näytteenottotiheys vaikuttavat myös siihen, mitä vaihtelutekijöitä prosessissa kyetään havaitsemaan. Tarkkailun kohteena voi olla esimerkiksi työvuorojen, käytettyjen materiaalien tai eri toimittajilta tulevien osien käytön vaikutus prosessiin ja sitä kautta tuotteen laatuominaisuuksiin.

Jotta valvontakortteja, ja sitä kautta tilastollista prosessinhallintaa voidaan hyödyntää, täytyy prosessin toimintarajat tuntea. Shewhartin esittämän prosessin tilastollisen hallinnan operatiivinen määritelmä olettaa, että tutkitut laatuominaisuudet ovat symmetrisesti ja toisistaan riippumattomasti normaalijakautuneita prosessin keskiarvon ympärille yhtälön 1 mukaisesti. Määritelmän kolmannelle vaiheelle, eli erityissyiden ja satunnaissyiden erottelukriteereille on Shewhartin mukaan olemassa optimaaliset rajat, joilla kyetään optimaalisesti erittelemään eritys- ja satunnaissyyt toisistaan: [12] [22] [26]

$$CL = \mu \pm 3\sigma \tag{4}$$

Kuva 4 havainnollistaa +/- 3 sigman standardipoikkeaman rajoja. Shewhart [3] tulkitsi, että stabiilien systeemien ohjaus tai säätö pienemmistä kuin 3σ-rajoista johtaa helposti ulostulon ajautumiseen kaoottiseen tilaan. Tämän alueen ulkopuolelle asettuvat tulokset tulkitaan kyseisessä tapauksessa erityissyiksi.



Kuva 4. 1, 2, ja 3 sigman standardipoikkeamien rajat normaalijakautuneelle datalle. Liitteessä (A) on listattu standardipoikkeamat +/- 7 sigmaan asti.

Rajojen ongelmana on, että jos ne ovat liian tiukat, osuu osa normaalijakautuneesta aineistosta aina väkisinkin niiden ulkopuolelle. Tällöin ne ennustavat erityissyitä, joita ei välttämättä prosessissa esiinny. Liian väljät rajat eivät puolestaan välttämättä paljasta olemassa olevia erityissyitä. Optimiraja, eli raja erityissyyn ja satunnaissyyn välillä, voidaankin mieltää optimiksi taloudellisessa mielessä, eli missä pisteessä erikoissyiden etsiminen tulee taloudellisesti kannattamattomaksi niiden löytämisestä saavutettaviin hyötyihin nähden. Rajat eivät siten ole yksiselitteisiä ja täsmällisen oikeita, vaan enemmänkin tapauskohtaisesti sovellettavia. Joissain tilanteissa virheiden sietokyky

prosessissa voi olla alhaisempi, jolloin rajat joudutaan asettamaan tiukemmiksi. Lisäksi tuotannon mittausten jakauma ei käytännössä koskaan vastaa täysin oletettua jakaumaa. Juranin mukaan [25, s. 24.9] prosessi, joka ei ole tilastollisessa hallinnassa, mutta tuottaa vaatimusten mukaisia tuotteita, ei välttämättä edes vaadi muutoksia, toisin kuin tilastollisessa ohjauksessa oleva prosessi, jonka tuotteet eivät täytä niille asetettuja spesifikaatiorajoja. [9]

Erityisen tärkeää on huomioida erot prosessin valvontarajojen ja tuotteen spesifikaatiorajojen välillä. Spesifikaatiorajat määrittävät tarkat rajat, jotka jokaisen tuotteen täytyy täyttää. Valvontarajat puolestaan kertovat ainoastaan, onko prosessi stabiili vai ei. Spesifikaatiorajoja ei siis huomioida mitenkään laskettaessa valvontarajoja. Tilanne, jossa prosessi ei ole stabiili, mutta tuottaa silti tuotteita spesifikaatiorajojen sisässä, on siten mahdollinen. Valvontarajojen tehtävä on siis ainoastaan auttaa ymmärtämään prosessin käyttäytymistä ja sen ennustettavuutta, joka on tärkeää säädettäessä siihen vaikuttavia parametreja. Valvontarajojen lisäksi valvontakortin avulla voidaan tarkkailla muita epäedullisia tapahtumia, kuten alaryhmien keskiarvojen epäsatunnaisia ilmiöitä, esimerkiksi niiden jatkuvaa nousemista tai laskemista, toistuvia kuvioita tai painottumista toleranssirajan lähelle. [12]

Lähes kaikissa prosesseissa esiintyy epävakautta, joka ei välttämättä esiinny lyhyen ajan tarkkailussa. Ilmiötä kutsutaan prosessin keskiarvosiirtymäksi (engl. process shift) tai 1.5 sigman siirtymäksi; prosessin keskiarvo pyrkii siirtymään keskimäärin noin 1.5 sigman verran, joko positiiviseen tai negatiiviseen suuntaan. Siirtymä johtuu luonnollisista muutoksista prosesseissa. Esimerkiksi fysikaalisista, mekaanisista tai teknisistä muutoksista voi syntyä sattumanvaraisia yhdistelmiä, jolloin prosessin lopputulos varioi ajan funktiona. Lyhyen aikavälin otoksella ei siirtymää todennäköisesti havaita, kun otokset ovat pieniä, mutta tarkasteltaessa useita peräkkäisiä lyhyen ajan suorituskykymittauksia kyetään se havaitsemaan. Nämä prosessin odotusarvon siirtymät tulee ottaa huomioon spesifikaatiorajoissa, eli keskiarvolle tulisi jättää varaa liikkua. Ilmiöt siirtymän takana voidaan myös luokitella johtuvan erityissyistä. Keskiarvosiirtymä on epäedullinen ilmiö, sillä todennäköisyyksien myötä optimiraja erityissyiden ja satunnaissyiden välillä liikkuu. Valvontakorttien avulla siirtymä voidaan kuitenkin havaita ja ongelma pystytään mahdollisesti ennaltaehkäisemään. [8]

Valvontarajojen laskeminen vaati tuntemaan prosessin keskiarvon ja –hajonnan. Koska yleensä ei ole taloudellisesti tai tuotannollisesti mahdollista mitata prosessin jokaista kappaletta, voidaan prosessin parametrit, keskiarvo ja odotusarvo estimoida pienemmistä alaryhmistä valvontakorttien avulla. Alaryhmiä tulee Bothen mukaan [12, s. 10] olla vähintään 20 kappaletta. Alaryhmien riittäväksi kooksi Juran [25, s. 24.6] määrittää 4-10 näytettä. Jos jakauman keskiarvo ei ole tunnettu, tulee sekin estimoida. Stabiilin prosessin alaryhmien keskiarvo vastaa kaikkien alaryhmien keskiarvoa, eli

$$\mu \cong \bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i}{n} . \qquad (5)$$

Koska prosessin todellista hajontaa ei yleensä tunneta, voidaan sitä arvioida näytteiden hajontavälin ja sitä edustavan jakauman keskihajonnan riippuvuutena yhtälöllä

$$\sigma \cong \frac{\overline{R}}{d_2}, \tag{6}$$

jossa $\overline{R}$ on alaryhmien vaihteluvälien R_i keskiarvo

$$\overline{R} = \frac{\sum_{i=1}^{n} R_i}{n} \tag{7}$$

ja d_2 riippuvuuskerroin hajontavälin ja keskihajonnan välillä äärettömällä alueiden lukumäärällä. Se riippuu testikappaleelle tehtyjen toistojen, operaattoreiden ja testikappaleiden määrästä (liite *B*). Jos prosessi on tilastollisesti hallinnassa ja sen jakauman keskiarvo on tunnettu, alaryhmien standardipoikkeamat $\sigma_{\overline{X}}$ suhtautuvat koko prosessin standardipoikkeamaan σ ja alaryhmien kokoon *n* noudattaen yhtälöä

$$\sigma_{\overline{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{8}$$

Tällöin yhtälöistä (4) ja (8) voidaan johtaa

$$CL = \mu \pm \frac{K\sigma}{\sqrt{n}} \tag{9}$$

jolla voidaan laskea valvontarajat prosessille, jonka keskiarvo μ tunnetaan. *K* on käytetty luottamuskerroin (esimerkiksi Shewhartin määrittelemä optimi *K* = 3). Ylä- ja alavalvontarajat voidaan arvioida siten kaikkien näytteiden vaihteluvälin keskiarvon avulla yhdistämällä yhtälöt (5), (6), (8) ja (9), jolloin [12]

$$CL = \overline{\overline{x}} \pm \frac{K\overline{R}}{d_2\sqrt{n}} \tag{10}$$

3.4 Prosessin suorituskyky

Prosessin suorituskyky kuvaa prosessin hajontaa suhteessa määriteltyyn spesifikaatioon. Se on yleisesti käytetty menetelmä mitata prosessin kykeneväisyyttä täyttää asiakkaan asettamat vaatimukset. Prosessin vaihtelun pieneneminen parantaa prosessin kyvykkyyttä. Käytettyjä suorituskykyindeksejä on useita. C_P kuvaa prosessin toleranssien USL (upper specification limit, ylempi spesifikaatioraja) ja LSL (lower specification limit, alempi spesifikaatioraja) välistä suhdetta prosessin kuuden sigman hajontaväliin. [3]

$$C_P = \frac{USL - LSL}{6\sigma} \tag{11}$$

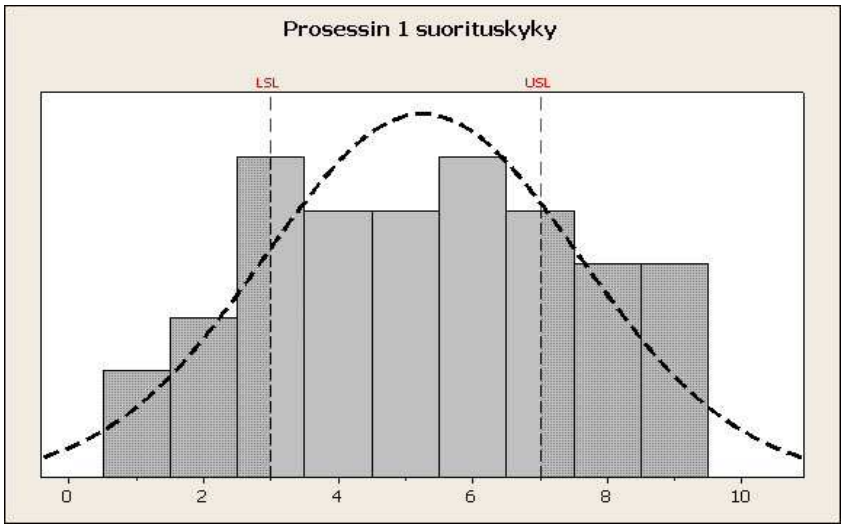
C_P ei ota huomioon prosessin keskiarvoa tai tavoitearvoa, vaan olettaa, että prosessi on keskittynyt spesifikaatiorajojen sisäpuolelle. Tämän takia C_P kertoo aina teoreettisesti parhaan prosessin suorituskyvyn. Esimerkiksi suorituskykyindeksi 1 tarkoittaa, että noin 0,27% $(100\% - 6\sigma = 100\% - 99{,}73\%)$ testatuista tuotteista ei täytä spesifikaatiovaatimuksia. C_{Pk}-indeksi ottaa huomioon myös prosessin keskiarvon ja alaryhmien sisäisen standardipoikkeaman. C_{Pk} määritellään keskiarvon ja sitä lähempänä olevan spesifikaatiorajan etäisyyden suhteena prosessin hajontaan. Keskittyneelle prosessille C_P ja C_{Pk} antavat siten saman tuloksen. [3] [5]

$$C_{Pk} = \min\left(\frac{USL - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LSL}{3\sigma}\right) \tag{12}$$

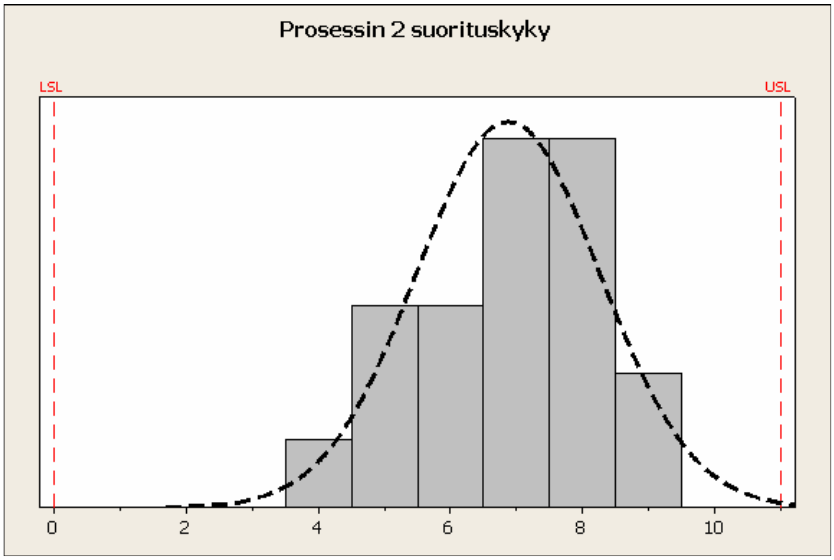
Riittäväksi prosessin suorituskyvyksi tulkitaan Barrentinen mukaan [5, s.24] $C_P > 1.33$. Suorituskyky joka on välillä $1.0 \leq C_P \leq 1.33$ voi olla hänen mukaan haavoittuvainen pienillekin muutoksille prosessissa. Jos $C_P < 1.0$, voidaan tulos tulkita riittämättömäksi, jolloin sekä mittaus- että tuotantoprosessia tulee arvioida uudelleen ongelmien poistamiseksi.

Prosessin suorituskykyanalyysi kertoo määriteltyjen spesifikaatioiden toteutumisen; onko prosessista mitattu data keskellä määriteltyjä spesifikaatioita ja onko prosessin vaihtelu suurempaa kuin sallittu spesifikaatio. Erilaisia tilanteita on havainnollistettu kuvitteellisilla mittatuloksilla seuraavassa kolmessa kuvassa. Kuvassa 5 on nähtävillä huono prosessin suorituskyky; tulokset ylittävät sallitut rajat. Kuvassa 6 on suorituskyvyltään hyvä prosessi, mutta tulosten keskittyminen spesifikaatiorajan läheisyyteen voi aiheuttaa ongelmia, jos se liukuu pitkän ajan tarkkailussa sen yli

(keskiarvosiirtymä). Graafinen tulkinta tarjoaa havainnollisen tavan ymmärtää prosessin suorituskyky ja sen alttius prosessin muutoksille. Toisaalta suorituskykylukujen tai sen graafisen esitysmuodon seuraaminen ei ole välttämättä täysin luotettava tapa seurata prosessin käyttäytymistä. Spesifikaatiorajat saattavat olla jo alun perin heikosti asetettuja, tai mittausprosessin erottelu- tai päätöksentekokyky riittämätöntä. Näiden seikkojen takia suorituskykyanalyysiä laadittaessa tulee kukin mittaus käsitellä tapauskohtaisesti.



Kuva 5. *Huono prosessin suorituskyky; mittaustulokset eivät mahdu spesifikaatiorajojen sisäpuolelle.*

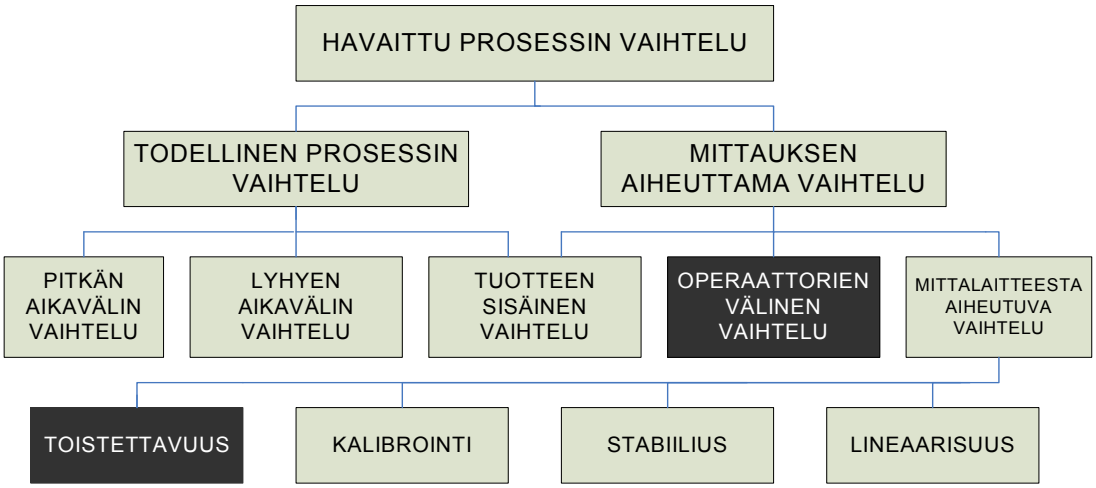


Kuva 6. *Prosessi, jonka lyhyen ajan suorituskyky on hyvä, mutta tulokset ovat keskittyneet lähelle ylempää spesifikaatiorajaa.*

4 GAGE R&R

Prosessinohjauksen tarkoitus on vähentää prosesseissa esiintyvää vaihtelua ja sitä kautta tehostaa toimintaa. Prosessin tuottamista tuotteista mitattu vaihtelu voidaan jakaa kahteen osaan, tuotteen varsinaisiin, valmistuksesta aiheutuviin laatuominaisuuksien vaihteluun sekä näiden ominaisuuksien mittaamisessa käytettyjen mittalaitteiden aiheuttamaan virheeseen. Jotta todelliseen, tuotteesta tai sen tuotantoprosessista aiheutuvaan vaihteluun voidaan päästä käsiksi, täytyy prosessista pystyä erottamaan käytetyn mittalaitteen tai –menetelmän aiheuttama vaikutus. Mittausjärjestelmä, jonka vaikutusta ja osuutta tuloksissa ei tunneta, on usein hyödytön.

Mittausprosessin aiheuttama lyhyen ajan vaihtelu voidaan jakaa kahteen osaan. Toistettavuus on yhden operaattorin tarkkailemaa variaatiota, kun samaa testattavaa kappaletta mitataan useita kertoja samalla mittalaitteella. Toistettavuus siis kertoo, kuinka paljon satunnaista lyhyen aikavälin hajontaa mittaustapahtumassa esiintyy, kun yksi mittaaja mittaa samaa kappaletta samalla mittalaitteella useita kertoja. Uusittavuus puolestaan on variaatiota, joka aiheutuu kun useat eri operaattorit mittaavat kyseistä testikappaletta käyttäen myös samaa mittalaitetta. Gage R&R -testi[1] muodostuu siis näiden kahden termin yhteisvaikutuksen selvittämisestä. Termillä *gage* kuvataan mitä tahansa laitetta, jolla voidaan mitata jotain valmistettavan tuotteen tai menetelmän ominaisuutta. Kuva 7 havainnollistaa, mitkä tekijät aiheuttavat vaihtelua prosesseissa, ja mihin näistä tekijöistä Gage R&R -testillä päästään käsiksi.



Kuva 7. Prosessin variaatiotekijät. Tummanharmaat laatikot kuvaavat Gage R&R -testin kattamia alueita. [5]

[1] Gage R&R –menetelmälle (myös Gauge R&R) ei ole selvää, vakiintunutta suomenkielistä vastinetta, vaan englanninkielinen termi on muodostunut käytännössä erisnimeksi.

Kuten kuvasta 7 nähdään, Gage R&R –menetelmällä ei pyritä selvittämään mittalaitteen pitkän ajan variaatiolähteitä, kuten sen lineaarisuutta tai stabiiliutta. Myöskään laitteelle tehtävän kalibroinnin vaikutusta hajontaan ei selvitetä menetelmällä. Näitä tekijöitä ei kuitenkaan tule jättää huomioimatta arvioitaessa koko mittausjärjestelmän laatua. Toistettavuuden ja uusittavuuden selvittäminen on Barrentinen [5, s. 2] mukaan kuitenkin ensisijaisesti selvitettävä alue mittauksen laatua selvitettäessä, sillä kyseiset tekijät aiheuttavat yleensä eniten prosesseissa havaitusta vaihtelusta. Mittauksien aiheuttaman vaihtelun lähteiden selvittämisen tulee lopulta johtaa itse prosesseista aiheutuvan todellisen vaihtelun vähentämiseen.

Barrentine suosittelee [5, s. 3] ympäristöolosuhteiden stabilointia ennen toistettavuus- ja uusittavuusmittauksia. Tällöin voidaan jättää huomiotta mittaustapahtuman ulkopuoliset vaihtelukomponentit ja keskittyä tarkkailemaan niin kutsuttua systeemin sisäistä vaihtelua (engl. within-system variation). AIAG:n (Automotive Industry Action Group) mukaan [1, s. 52-53] tilanteesta riippuen toistettavuuteen voidaan kuitenkin sisällyttää useita eri tekijöitä kuten

- mitatun näytekappaleen sisäinen vaihtelu (muoto, asento, tasalaatuisuus)
- mittalaitteen sisäinen vaihtelu (kuluminen, viat, huono laatu tai huolto)
- käytetyn referenssin tai standardin sisäinen vaihtelu (kuluminen, luokitus, laatu)
- käytetyn menetelmän sisäinen vaihtelu (tekniikka, mittausjärjestely, kiinnitys)
- mittaajasta aiheutuva henkilökohtainen vaihtelu (tekniikka, asento, käyttötaidot)
- ympäristöolosuhteiden vaihtelu (lyhyen ajan vaihtelut lämpötilassa, kosteudessa, mekaanisessa rasituksessa, puhtaudessa).

On siis tapauskohtaisesti ratkaistava, mitkä vaihtelua aiheuttavat tekijät halutaan pitää vakaina. Tällöin voidaan erotella halutut vaihtelun lähteet tarkemmin. Tässä työssä toistettavuuteen tullaan sisällyttämään kaikki AIAG:n esittämät vaihtelun lähteet, eikä mittausprosessiin tai –ympäristöön tulla tekemään mittausten ajaksi muutoksia. Tällöin saadaan selvitettyä koko mittausjärjestelmän ja –ympäristön vaikutus tuloksiin, kun mitään tekijää ei rajata selvityksen ulkopuolelle. Elektronisia laitteita mitatessa esimerkiksi ympäristöolosuhteiden äkillisillä muutoksilla voi olla merkittävää vaikutusta lopulliseen vaihteluun, joten minkään toistettavuutta heikentävän tekijän poissulkeminen ei ole perusteltua.

Nykyinen, pitkälle automatisoitu tuotantotekniikka on vähentänyt operaattoreiden vaikutusta mittaustuloksiin. Aiemmin uusittavuusvirheen ilmeneminen, eli eri mittaajien mittaustulosten välinen variaatio, on ollut merkittävämpää, kuten esimerkiksi manuaalisia mittauksia suoritettaessa. Yhä automatisoidumpien työympäristöjen ja työmenetelmien johdosta uusittavuudella kuvataankin nykyään AIAG:n mukaan [1, s. 53] usein *mittaussysteemien* tai *mittausolosuhteiden* välistä vaihtelua. Mahdollista uusittavuusvirhettä voi tällöin aiheuttaa esimerkiksi

- mitattujen kappaleiden välinen vaihtelu
- mittalaitteiden välinen vaihtelu
- mittastandardien välinen vaihtelu
- käytettyjen menetelmien välinen vaihtelu
- mittaajien välinen vaihtelu
- ympäristöjen välinen vaihtelu.

ASTM (American Society for Testing and Materials) määrittelee [1, s. 53] uusittavuuden myös laajasti, sisällyttäen siihen operaattorista aiheutuvan vaihtelun lisäksi eri mittalaitteiden, laboratorioiden sekä ympäristöjen välisen variaation, sekä sisällyttämällä toistettavuuden laskelmiin. Tässä työssä yksi mielenkiinnon kohteista on kahden eri toimittajan testausjärjestelmän välisen uusittavuuden vertailu ja mahdollisten erojen analysointi. Uusittavuutta voidaan käsitellä siten edellä mainituista määrittelytavoista riippuen kolmesta eri näkökulmasta: yhden testauslaitteen, saman toimittajan kahden eri testauslaitteen, tai kahden eri toimittajan testausjärjestelmien ja -ympäristöjen välisenä vaihteluna. Jos halutaan mitata kahden tai useamman testausjärjestelmän kykyä antaa yhteneviä tuloksia, tulee Gage R&R –testi suorittaa kyseisille järjestelmille jokaiselle erikseen ja verrata tuloksien keskittymistä ja hajontaa toisiinsa.

4.1 Menetelmät toistettavuuden ja uusittavuuden laskemiseksi

Gage R&R –tutkimuksen suorittamistapa riippuu prosessista, jolle se tehdään. Yleinen tapa [5, s. 5-10] on ollut seurata General Motorsin kehittämää niin sanottua pitkää menetelmää (General Motors long form), jossa käytetään vähintään kahta operaattoria ja kymmentä näytekappaletta. Menetelmässä käytetään pohjaa, johon kirjataan muun muassa mittaustulokset, niistä lasketut vaihteluvälit, keskiarvot sekä toistettavuus- ja uusittavuuslukemat. Nykyään useat tietokoneohjelmat tekevät valmiiksi laadituista laskentapohjista melko tarpeettomia. On olemassa myös erikoistapauksia, jolloin General Motorsin menetelmää ei voida suoraan käyttää. Esimerkiksi merkittävä testattavan tuotteen sisäinen vaihtelu, operaattorin vaikutuksen puuttuminen tai mittauksen kertaluontoisuus, kuten pudotus- tai räjäytyskokeissa, vaativat muutoksia verrattuna perinteiseen menetelmään, joka ei pysty ottamaan kyseisiä tekijöitä huomioon. Tämän takia tutkimus tulee suunnitella ja määrittää tarkasti ennen varsinaisten mittausten ja laskelmien suorittamista. Tässä työssä seurataan pitkälti Barrentinen [5, s. 5-21] ohjeistusta Gage R&R -testin suorittamiseksi. Varsinainen mittaustulosten analysointi suoritetaan kuitenkin ohjelmallisesti käyttäen MINITAB-ohjelmistoa (Minitab Incorporated, Yhdysvallat). Erillisten pohjien ja manuaalisen laskennan käyttö tutkimuksen kaltaisessa tilanteessa, jossa datan määrä tulee olemaan suurta, ei ole perusteltua. Myöskään mittausten rajoittaminen tiettyyn lukumäärään ei ole perusteltua, sillä niiden määrän kasvattaminen kasvattaa tulosten luotettavuutta.

Gage R&R -testi antaa uusittavuuden ja toistettavuuden vaihtelukomponenttien yhteisvaikutuksen, eli mitattujen tulosten hajontavälin. Hajontaväli määritellään usein määrätyn luottamuskertoimen avulla. Useasti käytetään 99.73% luottamusväliä, joka vastaa 6σ hajontaväliä (teoreettisella normaalijakaumalla). Myös muita luottamusvälejä, kuten 5.15σ (99%), käytetään monesti. Tässä työssä tullaan käyttämään 6σ hajontaväliä. Mitattujen tulosten avulla pyritään selvittämään mittausprosessissa ilmenevää hajontaa. Variaabeli Gage R&R -testistä saatavien mittaustulosten hajonnan analysoimiseksi AIAG [1, s. 97-123] listaa kolme menetelmää:

- Vaihteluvälimenetelmä (engl. range method).
- Keskiarvo- ja vaihteluvälimenetelmä (engl. average and range method).
- Varianssianalyysi (engl. analysis of variance).

Näistä vaihteluvälimenetelmä sopii ainoastaan antamaan kokonaiskuvan toistettavuuden ja uusittavuuden tilanteesta, sillä sen avulla ei kyetä erittelemään uusittavuutta ja toistettavuutta erillisiksi komponenteiksi. Menetelmän käyttöä suositellaan käytettäväksi tarkastettaessa, onko mittausprosessista peräisin oleva vaihtelun määrä muuttunut oleellisesti. Keskiarvoon ja vaihteluväliin perustuvalla menetelmällä sekä varianssianalyysillä voidaan laskea erikseen toistettavuuden ja uusittavuuden osuudet mittaussysteemin hajonnassa. Varianssianalyysi hyödyntää mittaustuloksia enemmän kuin vaihteluväliin perustuva menetelmä, sekä antaa tarkempia tuloksia, mutta pienillä näytemäärillä ($n < 10$) menetelmät antavat hyvin samankaltaisia tuloksia. Varianssianalyysin etuina on sen mahdollistama näytteen ja operaattorin välisen interaktion sekä näytteen sisäisen vaihtelun erottelu. Näyte-operaattori -interaktiolla tarkoitetaan operaattorin mittauksen riippuvuutta mitatusta näytekappaleesta. Tässä työssä käytetään varianssianalyysiä sen tietyissä tilanteissa tarkempien tulosten takia. [1] [12]

Varianssianalyysi on tilastollinen menetelmä, jonka avulla voidaan tutkia, poikkeavatko tiettyjen ryhmien keskiarvot toisistaan jonkun kvantitatiivisen muuttujan suhteen. Muuttujaa, jonka suhteen ryhmiä vertaillaan, kutsutaan riippuvaksi tai selitettäväksi muuttujaksi. Edellä mainitut ryhmät taas ovat selittävän muuttujan luokkia. Varianssianalyysillä tutkitaan sitä, ovatko selitettävän muuttujan keskiarvot tilastollisesti merkitsevästi erisuuruisia selittävän muuttujan eri luokissa. Analyysin lähtöoletus eli nollahypoteesi on, että tutkittujen luokkien keskiarvot ovat yhtä suuret. Jos varianssianalyysin tulos osoittaa että nollahypoteesi ei päde, on selitettävän muuttujan keskiarvojen välillä eroja selittävän muuttujan eri luokissa.[27]

Toistettavuuden ja uusittavuuden laskemiseksi varianssianalyysissä suoritetaan neliösummien, vapausasteiden, keskineliöiden eli varianssien sekä F-testisuureiden laskeminen. Sum of Squares (SS) eli neliösumma muodostetaan laskemalla yhteen jokaisen havainnon arvon erotus kaikkien havaintojen keskiarvosta ja korottamalla tämä erotus toiseen potenssiin. Näytteiden välinen vaihtelu lasketaan siten yhtälöllä [1, s. 189]

$$SS_{näyte} = \sum_{i=1}^{n} (\frac{x_i^2}{kr}) - \frac{x^2}{nkr} \tag{13}$$

jossa

n	on näytteiden lukumäärä
k	operaattoreiden lukumäärä
r	kullekin näytteelle suoritettujen mittausten lukumäärä
x_i	on näytteen i mittausten keskiarvo
x	on kaikkien näytteiden muodostama keskiarvo

Operaattoreiden välinen vaihtelu lasketaan puolestaan yhtälöllä

$$SS_{operaattori} = \sum_{j=1}^{k} (\frac{x_j^2}{nr}) - \frac{x^2}{nkr}, \tag{14}$$

jossa x_j on operaattorin j suorittamien mittausten keskiarvo. Näyte-operaattori – interaktio saadaan laskettua kaavalla

$$SS_{näyte*operaattori} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k}\left(\frac{x_{ij}^2}{r}\right) - \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i^2}{kr}\right) - \sum_{j=1}^{k}\left(\frac{x_j^2}{nr}\right) + \frac{x^2}{nkr}. \tag{15}$$

Kokonaisvaihtelu SS_{kaikki} saadaan puolestaan yhtälöstä

$$SS_{kaikki} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{k}\sum_{m=1}^{r}(x_{ijm}^2) - \frac{x^2}{nkr}. \tag{16}$$

Toistettavuus, eli käytetystä mittalaitteesta aiheutuva vaihtelu saadaan vähentämällä kokonaisvaihtelusta operaattori-, näyte- ja näyte-operaattori -interaktiotermit

$$SS_{toistettavuus} = SS_{kaikki} - SS_{operaattori} - SS_{näyte} - SS_{näyte*operaattori} \tag{17}$$

Neliösummista voidaan johtaa edelleen keskineliö (varianssi), eli ryhmien välinen vaihtelu (engl. mean square) jakamalla neliösummat vapausasteiden määrällä (engl.

degree of freedom). Vapausasteiden lukumäärä kuvaa tietyn lukujoukon sisällä olevan luvun riippumattomuutta muista joukon arvoista. Vapausasteet näytteille, operaattoreille, näyte-operaattori –interaktiolle, toistettavuudelle sekä koko mittaukselle ovat

$$DF_{näyte} = n - 1 \tag{18}$$

$$DF_{operaattori} = k - 1 \tag{19}$$

$$DF_{näyte*operaattori} = (n-1)(k-1) \tag{20}$$

$$DF_{toistettavuus} = nk(r-1) \tag{21}$$

$$DF_{kaikki} = nkr - 1 \tag{22}$$

Tällöin vastaaviksi keskineliöiksi saadaan

$$MS_{näyte} = \frac{SS_{näyte}}{DF_{näyte}} \tag{23}$$

$$MS_{operaattori} = \frac{SS_{operaattori}}{DF_{operaattori}} \tag{24}$$

$$MS_{näyte*operaattori} = \frac{SS_{näyte*operaattori}}{DF_{näyte*operaattori}} \tag{25}$$

$$MS_{toistettavuus} = \frac{SS_{toistettavuus}}{DF_{toistettavuus}} \tag{26}$$

Merkitsevyyttä mittaava F-testisuure saadaan varianssianalyysissä vertaamalla keskineliöitä, kuten esimerkiksi selittävän muuttujan keskineliötä, jäännöstermin keskineliöön. Selittävän muuttujan F-arvo saadaan siis jakamalla sen keskineliö

jäännöstermin keskineliöllä. F-testisuureen avulla voidaan siten tässä työssä määrittää näytteen, operaattorin tai näyte-operaattori –interaktion vaikutus mittauksiin,

$$F_{näyte} = \frac{MS_{näyte}}{MS_{näyte*operaattori}} \tag{27}$$

$$F_{operaattori} = \frac{MS_{operaattori}}{MS_{näyte*operaattori}} \tag{28}$$

$$F_{näyte*operaattori} = \frac{MS_{näyte*operaattori}}{MS_{toistettavuus}} \tag{29}$$

F-testisuureen merkitsevyys saadaan vertaamalla testisuuretta sen vapausasteiden mukaan f- eli normaalijakaumaan, jolloin saadaan arvio siitä, kuinka suurella merkitsevyyden tasolla voidaan hylätä nollahypoteesi siitä, että kahden eri normaalisti jakautuneen populaation keskiarvot ovat yhtä suuret. F-testillä siis mitataan, pystyykö muuttuja x selittämään muuttujan y vaihtelua tilastollisesti merkittävästi, eli esimerkiksi vaikuttaako näytteen ja operaattorin välinen interaktio kokonaistoistettavuuteen. Jos F-testisuure on nolla, voidaan sanoa, että x selittää hyvin y:n vaihtelua, eli interaktio on merkittävää. Mitä suurempi F-testisuure on, sitä suuremmalla todennäköisyydellä voidaan hylätä hypoteesi ryhmäkeskiarvojen yhtäläisyydestä.

Lopuksi kaavoilla (23), (24), (25) ja (26) laskettujen varianssikomponenttien avulla saadaan laskettua edelleen koko prosessin kokonaisvarianssi, mittausprosessin aiheuttama varianssi sekä jokaisen varianssikomponentin eli näytteiden välinen, operaattorien, mittalaitteen sekä näyte-operaattori -interaktion osuus mittauksessa havaitusta kokonaisvarianssista. Näytteen ja operaattorin välinen interaktio ottaa huomioon esimerkiksi tilanteen, jossa operaattorin mittausten varianssi riippuu mitatun näytteen jostain ominaisuudesta, kuten esimerkiksi sen koosta. Toistettavuus on suoraan laskettu keskineliö eli varianssi

$$\sigma^2_{toistettavuus} = MS_{toistettavuus} \tag{30}$$

Operaattorista aiheutuva varianssi saadaan yhtälöstä

$$\sigma^2_{operaattori} = \frac{MS_{operaattori} - MS_{operaattori*näyte}}{rn} \tag{31}$$

Varianssianalyysillä saadaan laskettua operaattorin ja näytteen välinen interaktiotermi, eli kuinka paljon operaattori vaikuttaa itse näytteestä mitattavaan ominaisuuteen:

$$\sigma^2_{operaattori*näyte} = \frac{MS_{näyte*operaattori} - MS_{toistettavuus}}{n} \tag{32}$$

Näytteiden välinen varianssi, eli tuotteen valmistuksessa aiheutuva varianssi, saadaan laskettua yhtälöllä

$$\sigma^2_{näyte*näyte} = \frac{MS_{näyte} - MS_{operaattori*näyte}}{kn} \tag{33}$$

Uusittavuus saadaan summaamalla operaattorin havaitsema varianssi operaattori-näyte – interaktiotermin kanssa.

$$\sigma^2_{uusittavuus} = \sigma^2_{operaattori} + \sigma^2_{operaattori*näyte} \tag{34}$$

Lopullinen toistettavuus- ja uusittavuustulos saadaan summaamalla termejä vastaavat varianssikomponentit yhteen:

$$\sigma^2_{R\&R} = \sigma^2_{toistettavuus} + \sigma^2_{uusittavuus} \tag{35}$$

Koko prosessissa havaittu varianssi muodostuu mittausprosessin ja näytteiden välisen varianssin summana.

$$\sigma^2_{kaikki} = \sigma^2_{R\&R} + \sigma^2_{näyte*näyte} \tag{36}$$

4.2 Gage R&R -tutkimuksen suunnittelu

Ennen toistettavuus ja uusittavuustestin suoritusta tulee laatia tarkka toimenpidelista mittauksia varten ja määritellä tarpeelliset avainluvut. Laitteen kalibrointi, operaattoreiden ja näytteiden määrä ja niiden valinta, testikertojen määrä, mitattavan kappaleen sisäinen vaihtelu ja tuloksien analysointimenetelmä vaikuttavat kukin lopullisiin tuloksiin ja analyysin luotettavuuteen. Ideaalitilanteessa laite tulee kalibroida tutkimuksen alussa. Jos kalibrointia ei ole mahdollista suorittaa, voi sen puute näkyä mittaustulosten vaihtelussa. Mittausympäristö ja –tapahtuma tulee myös eristää tekijöiltä, joiden vaikutusta ei haluta sisällyttää toistettavuus- ja uusittavuusmittauksiin. Tällaisia tekijöitä voivat olla esimerkiksi tunnetut, poikkeavat erityistilanteet mittausympäristössä. [5]

Mittauksissa on tärkeää käyttää samoja operaattoreita, jotka normaalistikin työskentelevät kyseisten mittalaitteiden parissa. Operaattoreiden, näytteiden ja toistojen (mittauksien määrä näytettä kohti) määrä riippuu mittaustilanteesta. Yleensä tapana on käyttää 2-4 henkilöä, kymmentä näytekappaletta sekä 2-3 mittauskertaa näytettä kohti. Jotta tuloksista saadaan riittävän luotettavia, tulisi vaihteluvälejä olla Barrentinen mukaan [5, s. 18] yli 15. Näytteiden ja operaattoreiden määrän tulon tulisi siis olla 16 tai enemmän. Jos kyseistä suositusta ei ole mahdollista toteuttaa, voidaan tuloksien luotettavuutta nostaa mittausten toistojen määrää kasvattamalla. Operaattoreiden, näytteiden tai mittausten toistojen määrälle ei ole ylärajaa, sillä suurempi määrä mittausdataa nostaa tuloksien luotettavuutta. [5]

Testattavat näytekappaleet tulee valita niin, että ne edustavat ennakoitua mittaustulosten vaihteluväliä. Näytteiden sisäisen variaation aiheuttaman vaihtelun eliminoimiseksi näytteet tulee valita mahdollisimman homogeenisestä ja tavoitearvoa edustavan mallikappaleen lähellä olevasta joukosta. Tällöin mittausprosessissa esiintyvä vaihtelu on mahdollisimman vähän peräisin varsinaisesta tuotantoprosessista. Joissain tilanteissa vaihtelua saattaa esiintyä testatussa kappaleessa itsessään. Mittaustulos voi siis vaihdella mittapisteen tai mittausajankohdan funktiona. Tällaisessa tilanteessa mittaukset tulee pyrkiä suorittamaan siten, ettei mitatun tuotteen sisäinen variaatio pääse vaikuttamaan lopputuloksiin. On tärkeää havaita tämän tyyppisen variaation mahdollisuus ja yrittää minimoida tai estää sen vaikutus toistettavuus- ja uusittavuustutkimukseen aina kun mahdollista. Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi jonkin arvon mittaamista aina samasta pisteestä, tai testikappaleiden valitsemista sellaisten yksilöiden joukosta, joiden sisäisen vaihtelun tiedetään olevan mahdollisimman vähäistä. Näytteen sisäisen variaation vaikutusta toistettavuus- ja uusittavuustuloksissa voidaan vähentää esimerkiksi käyttämällä mittauksissa näytekappaleita, joiden vaihtelun tiedetään olevan vähäistä, tai mittaamalla kappaleet joka mittauksella tarkasti samasta pisteestä. [5]

Mittalaitteiden riittäväksi erottelukyvyksi määritetään yleensä vähintään kymmenesosa mitatun ominaisuuden prosessin toleransseista, eli jos toleranssiväli näytteiden tietylle ominaisuudelle on 0.1 yksikköä, tulisi mittalaitteen kyetä 0.01 yksikön tarkkuuteen. Riittämätön tarkkuus vääristää todellista tilannetta ja voi johtaa vääriin johtopäätöksiin

prosessia säädettäessä. Parhaiten riittämättömän tarkkuuden aiheuttamat ongelmat näkyvät valvontakorttien käytössä, joissa liiaksi pyöristetyt tulokset eivät mahdu valvontarajojen sisälle, vaikka tulokset olisivatkin spesifikaatiorajojen sisässä. Tällaisessa tilanteessa prosessin ohjaus on erittäin vaikeaa, ja mittaustarkkuutta tulisi nostaa. [1] [5]

4.3 Mittausmenetelmän suorituskyvyn arviointi

Gage R&R –testin antamat vaihtelukomponentit eivät suoraan kerro mittausmenetelmän hyvyyttä, sillä ne kuvaavat vain mittausprosessiin liittyvää absoluuttista tulosten hajontaa eivätkä kunkin hajontakomponentin osuutta kokonaisvaihteluun nähden. Koska pelkistä lukuarvoista ei voida saada kattavaa kuvaa mittausjärjestelmän kyvykkyydestä, tulee tuloksissa ilmenevää vaihtelua verrata suhteessa prosessin kokonaisvariaatioon tai asetettuihin vaatimusrajoihin. Tällöin saadaan tarkempi käsitys itse mittausprosessin variaatiosta suhteessa prosessissa ilmenevään hajontaan tai hyväksyttyyn vaihteluun nähden. Tämä on oleellinen tieto pyrittäessä parantamaan tuotantoprosesseja ja tuotteiden laatutasoa. Vain havaitsemalla prosessin epäluotettavat mittaustapahtumat voidaan todellisia korjauksia tehdä. Toistettavuus- ja uusittavuustutkimuksen tuloksien arviointiin tarvitaan siten suoritusmittareita havainnollistamaan mittausjärjestelmän riittävyyttä ja suorituskykyä. Mittausten suorituskykyindeksien (engl. measurement capability index, MCI) avulla voidaan arvioida, kuinka suorituskykyinen mittaus on ja laskea kuinka hyvin se täyttää määritellyt vaatimukset. [7]

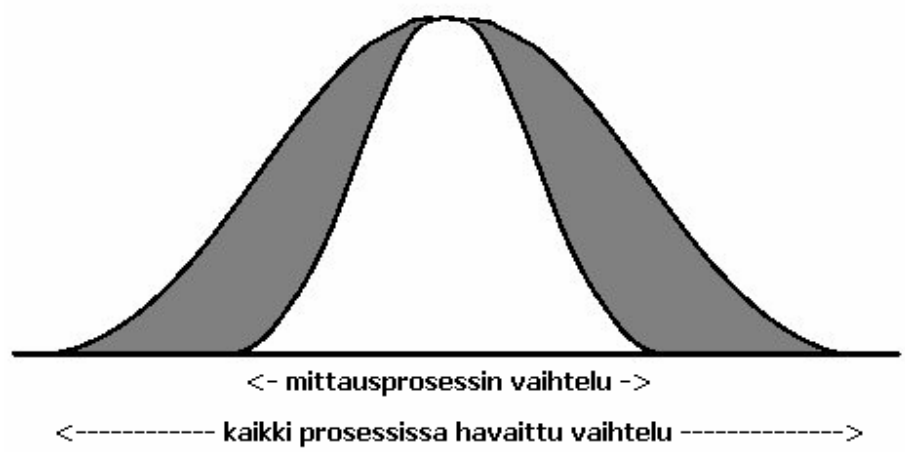
Konkreettiset indeksit helpottavat prosessin suorituskykyjen hahmottamista ja vertailua. Yleisesti käytössä on kaksi erityyppistä indeksiä. Yksi tapa määritellä prosessin mittauskyvykkyys on verrata toistettavuus- ja uusittavuustestin tulosta koko prosessin hajontaan. Tällöin voidaan arvioida, kuinka paljon käytetty mittausmenetelmä vääristää tuloksia. [5]

$$MCI_P = 100\frac{\sigma_{R\&R}}{\sigma_P}, \tag{38}$$

jossa σ_P kuvaa prosessin kokonaishajontaa, joka voidaan estimoida stabiilin prosessin ohjausrajatilastoista:

$$\sigma_P = \frac{\overline{\overline{R}}}{d_2} \tag{39}$$

missä $\overline{\overline{R}}$ on prosessissa mitatun ominaisuuden kokonaisvaihteluväli (kaikkien operaattoreiden mittausten vaihteluväli). Näytteiden suositellaan edustavan normaalia prosessihajontaa, eikä toistettavuus- ja uusittavuustestissä käytettyjä näytteitä [5, s. 11]. MCI_P on yleisimmin käytetty indeksi, koska sen avulla saadaan vertailukelpoinen tulos mittaussysteemin aiheuttamalle vaihtelulle suhteessa koko prosessin vaihteluun. Kuva 8 havainnollistaa näiden kahden muuttujan välistä suhdetta. [5]



Kuva 8. Toistettavuus- ja uusittavuus suhteessa koko prosessin vaihteluun [1]

MCI_P on käyttökelpoinen indeksi yksipuolisille spesifikaatioille (spesifikaatiot määrittävät vain ylä- tai alarajan mitattavalle ominaisuudelle), sillä sen laskeminen ei vaadi keinotekoista spesifikaation toista rajaa. Indeksin antamien tulosten hyvyyden mittana käytetään mittausmenetelmän varianssin, eli toistettavuuden ja uusittavuuden suhdetta prosessin kokonaisvaihteluun. Yleisesti käytetyt rajat ovat [5, s. 14]

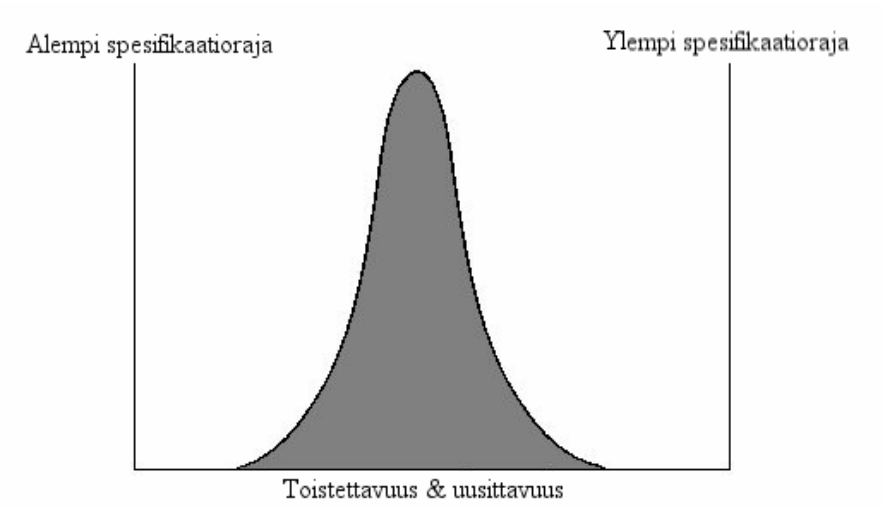
$\leq 20\%$	hyvä
$> 20\%, \leq 30\%$	riittävyys tulkittava tapauskohtaisesti
$> 30\%$	huono, riittämätön suorituskyky

Käytännössä tuloksia voidaan tulkita niin, että huonon indeksituloksen omaava prosessi hyötyy tehokkaammin parantuneesta mittausproseduurista, kun taas jo hyvän indeksin omaavalle prosessille isoa parannusta on enää vaikea tehdä. MCI_P-indeksi on suositeltu indeksi, koska se ei riipu määritellyistä spesifikaatioista ja sen kriteerit voidaan aina määritellä tilastollisesti.

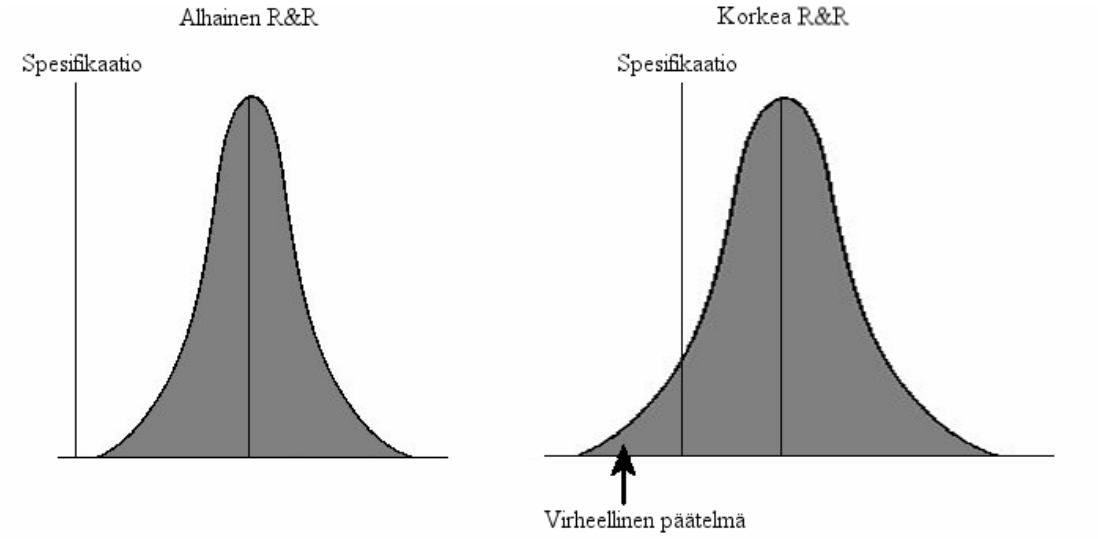
Toinen tunnettu tapa määritellä prosessin suorituskykyindeksi on verrata hajontaa prosessin spesifikaatiorajoihin: [5]

$$MCI_S = 100 \frac{K\sigma_{R\&R}}{USL - LSL}, \tag{40}$$

missä USL on ylempi ohjausraja ja LSL alempi ohjausraja. MCI_S on helposti hahmotettavissa oleva indeksi, joka osoittaa toistettavuuden ja uusittavuuden yhteisvaikutuksen suhteessa prosessin spesifikaatioihin. Kuva 9 havainnollistaa tätä suhdetta. Indeksin heikko puoli on prosessin spesifikaatioiden mahdollinen virheellinen tai liian tiukka asettelu joka saattaa johtaa väärään johtopäätökseen luokitellessa virheiden alkuperäisiä syitä. Kuva X havainnollistaa prosessin spesifikaatiorajojen ja toistettavuus- ja uusittavuustulosten välisiä suhteita. Jos asetetut rajat ovat tiukat ja systeemin toistettavuus ja uusittavuus huonolla tasolla, voi tilanne johtaa virheelliseen päätelmään, että mitattu tuote ei täytä vaatimuksia, ja se hylätään. [5]



Kuva 9. Mittausten muodostama hajonta suhteessa toleranssirajoihin. [1]



Kuva 10. Huono toistettavuus ja uusittavuus (oikeanpuoleinen kuvaaja) aiheuttavat spesifikaatiorajan ylittymisen, ja sitä kautta virheellisen päätelmän, että tuote ei täytä vaatimuksia, vaikka itse mitattu tuote ja sen spesifikaatiot pysyisivät muuttumattomina. [1]

Yleiset kriteerit arvioitaessa indeksin hyvyyttä ovat vastaavat kuin MCI_P-indeksillä. Huomioitava asia MCI_S-indeksin käytössä on, että se ei sovellu käytettäväksi prosesseissa, joilla on vain yksipuolinen spesifikaatioraja. Indeksin käytössä on tärkeää huomioida, mitä toleransseja sen syötteinä käytetään. Jos toleranssit ovat laitteen omat spesifikaatiot, ei yleisesti käytetty 0-30% hyväksymisalue päde, vaan tällöin 100% tarkoittaa, että laite täyttää juuri asetetut vaatimukset, yli 100% on alle tavoitteiden ja alle 100% on parempi kuin asetetut spesifikaatiot. Toisin sanoen, jos tulosten hajonta mahtuu täsmälleen prosessille asetettuihin toleransseihin, hajonnalla ei ole varaa kasvaa. [5]

Mittausten erottelukykyä kuvaava *ndc*-luku (number of distinct categories) kuvaa, kuinka moneen eri luokkaan järjestelmä pystyy mittaustulokset luokittelemaan. Jos mittaussysteemi ei kykene erottelemaan osia toisistaan, eivät tulokset ole luotettavia, sillä mittauksissa tapahtuva pyöristysvirhe peittää alleen todellisen hajonnan. Tällöin prosessin parantaminen mittaustulosten perusteella vaikeutuu huomattavasti. Luokkien määrä, joihin mittaussysteemi pystyy tulokset jaottelemaan, lasketaan yhtälöllä

$$ndc = 1.41 \frac{\sigma_P}{\sigma_{R\&R}} \tag{41}$$

Indeksi kuvaa luottamusvälien määrää, joka mahtuu mittaushajonnan sisälle. *ndc* pyöristetään kokonaisluvuksi, ja yleinen hyväksymisraja tulokselle on vähintään viisi eri

luokkaa. Pienempi luku tulkitaan siten, että mittausjärjestelmän aiheuttama hajonta muodostaa liian suuren osan koko prosessin vaihtelusta, eikä tuloksista voida tehdä johtopäätöksiä prosessin parantamiseksi. Joissain tapauksissa 2-4 luokan erottelukykyä voidaan käyttää, vaikkakin tulokset ovat yleensä karkeita. [1]

Mittausdatan pohjalta laadittujen keskiarvo- ja vaihteluvälikorttien ($\bar{x} - R$-kortti) perusteella voidaan analysoida mittaussysteemin kyvykkyyttä. Pieni vaihtelu alaryhmien vaihteluväleissä indikoi, että mittaussysteemi kykenee toistamaan mittaukset identtisesti. Keskiarvokortin valvontarajojen sisäpuolinen alue kuvaa mittauksien herkkyyttä. Koska testissä käytetyt näytteet edustavat prosessin variaatiota, noin puolet tai yli puolet alaryhmien keskiarvoista tulisi jäädä valvontarajojen ulkopuolelle. Mitä useampi pisteistä sijoittuu ohjausrajojen ulkopuolelle, sitä erottelevampi, eli parempi mittaussysteemi on. Prosessin stabiiliutta selvitettäessä keskiarvojen sijoittuminen valvontarajojen ulkopuolelle tulkitaan siten eri tavalla kuin toistettavuus- ja uusittavuusmittauksissa. Stabiilille prosessille mittausten tulee sijoittua keskiarvokortissa valvontarajojen sisäpuolelle. [1]

Lopullisten toistettavuus- ja uusittavuuslukujen tulosten pohjalta on tehtävä prosessia korjaavia toimenpiteitä. Jos luvut ovat huonoja, tulee mittausten taustalla vaikuttaneiden haitallisten ilmiöiden syitä kartoittaa ja poistaa systemaattisesti. Uusittavuusvirhettä voidaan vähentää esimerkiksi kouluttamalla mittalaitetta operoivia henkilöitä tai uusittavuuden määrittelytavasta riippuen esimerkiksi mittauskalustoa yhtenäistämällä. Toistettavuutta voidaan yrittää parantaa tekemällä mittalaitteisiin korjaavia toimenpiteitä. Mittausjärjestelmien ja –ympäristöjen yhtenäistäminen voi auttaa tilanteissa, joissa pyritään minimoimaan esimerkiksi eri tuotantolaitosten käytön vaikutusta tuotteiden laatuominaisuuksiin.

Mittalaitteen tarkkuuden ja erottelukyvyn riittävyys tulee asettaa kyseenalaiseksi. Jos mittaus kykenee erottelemaan tulokset vain yhteen tai muutamaan eri luokkaan, ei tuloksien perusteella voi tehdä johtopäätöksiä tai korjaavia toimenpiteitä tuotantoprosessin suhteen. Tällöin luokittelukykyä tulee kasvattaa esimerkiksi tarkemmilla mittalaitteilla. Jos tämä ei ole mahdollista, tulee luokittelukyvyn heikkouden vaikutusta mitattuun ominaisuuteen analysoida tapauskohtaisesti. [1]

Jos toistettavuus- eli mittalaitevaihtelua ei yksinkertaisesti pystytä vähentämään, voidaan miettiä, ovatko spesifikaatiorajat tarpeettoman tiukat tai epärealistisesti asetetut. Lisäksi on tärkeää tietää, johtuvatko heikot tulokset testikappaleiden sisäisestä vaihtelusta tai mittalaitteen huonosta kalibroinnista tai kalibroinnin puutteesta. Jos näin on, tulee kyseiset tekijät korjata, jotta todellinen toistettavuus ja uusittavuustaso voidaan selvittää. Korjaavien toimenpiteiden jälkeen Gage R&R -testi tulee suorittaa uudelleen. Tällöin voidaan varmistaa, ovatko muutokset olleet hyödyksi. Testi ei siis ole kertakäyttöinen, vaan se tulisi uusia säännöllisesti, jotta voidaan varmistua laadun riittävyydestä ja havaita mahdolliset muutokset mittausprosessissa. [5]

4.4 Mittausepävarmuus ja mittausten jäljitettävyys

Mittausepävarmuus on tekijä, jota esiintyy jokaisessa mittauksessa. Se kertoo, millä tarkkuudella saadut tulokset vastaavat mitatun ominaisuuden todellista arvoa. Mittaustulos ei ole koskaan täysin oikea, vaan arvio mitattavasta arvosta. Mittausprosessissa on monta vaihetta ja tekijää, jotka kasvattavat sen tuloksien epävarmuutta. Mittanormaalin muutos, ympäristövaikutukset, mittalaitteen ja sen käyttäjän epävarmuus, kalibroinnin luotettavuus ja mitattavien osien ominaisuudet aiheuttavat kukin omalta osaltaan virhettä kokonaistulokseen. Taulukossa 2 on listattu tyypillisiä mittauksissa esiintyviä epävarmuuskomponentteja, joihin tutkimusta tehdessä tulee kiinnittää huomiota. Gage R&R -testi mittaa juuri näitä komponentteja, mutta myös sen antamat tulokset sisältävät aina epävarmuustekijöitä. Testillä on kuitenkin mahdollista saada hyviä estimaatteja käyttäjästä ja käytetystä mittalaitteesta johtuvista virheistä.

Taulukko 2. Tyypillisiä epävarmuuskomponentteja mittauksia suoritettaessa [13]

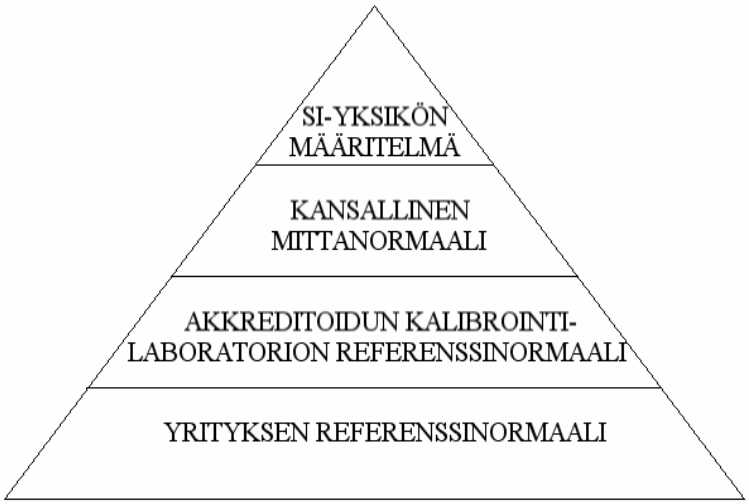
Mittalaitteesta aiheutuvat	**Käyttäjästä johtuvat**
-kalibrointi -aika kalibroinnista -lineaarisuus -stabiilius -taajuusriippuvuus -resoluutio	-mittarin asento -lukematarkkuus -alkuasetukset
Käyttöedellytykset	**Mittauskohteesta aiheutuvat**
-lämpötila, kosteus, paine -sähköiset häiriöt -verkkojännite -edellä mainittujen tekijöiden vaihtelu mittauksen aikana	-mittarin vaikutus mittauskohteeseen -kuormitus -maasilmukat, vuotovirrat, mittajohdot, epäsovitukset -mitattavan ilmiön stabiilius

Tilastolliset ominaisuudet, joita käytetään yleisesti määritettäessä mitatun datan laatua, ovat deviaatio ja variaatio. Deviaatio (bias) kuvaa prosessin siirtymistä ajan funktiona, ja variaatio hajontaa keskiarvon ympärillä. Yleisin syy datan huonoon laatuun eli mittausepävarmuuteen aiheutuu variaatiosta, johon vaikuttaa moni tekijä. Luotettava mittausjärjestelmä edellyttää tuntemaan vaihtelun lähteet ja vaikutukset. Ongelmia ei välttämättä korjaa mittalaitteen kalibrointi, sillä se saattaa vähentää deviaatiovirhettä, eli mittaustulosten keskiarvon liikkumista ajan funktiona, muttei takaa variaatiovirheen poistumista. Jos mittausprosessissa esiintyy mittauksia häiritseviä tekijöitä, tulee niiden mahdolliset lähteet kartoittaa ja mahdollisuuksien mukaan eliminoida.

Tämän tutkimuksen kannalta mielenkiintoisimpia ja oleellisimpia mittauksia häiritseviä tekijöitä ovat mitattujen piirikorttien ja käytettyjen mittalaitteiden käsittely, ympäristön puhtaus, lämpötilojen ja kosteuden vaihtelu, sähköiset häiriöt, sekä esimerkiksi käytettyjen mittapäiden galvaanisen kontaktin vaihtelu. Tutkimuksessa pyritään kiinnittämään huomiota myös testauslaitteiden sijoitteluun, sillä yksi mahdollinen häiriötekijä voi olla testauslaitteissa tai muissa samassa tilassa olevien elektronisten tai mekaanisten laitteiden toiminnasta aiheutuva hetkittäinen häiriö, joka voi kytkeytyä myös vierekkäisten laitteiden välillä.

Sähköisistä häiriötekijöistä on oleellista tunnistaa mahdolliset johdinten muodostamat silmukat, jotka voivat olla alttiita induktiiviselle kytkeytymiselle. Verkkovirran tai muiden johtimien häiriöt voivat puolestaan siirtyä mittausjohtimiin ja sitä kautta mittauslaitteistoon kapasitiivisesti, jos johtimet ovat riittävän lähellä toisiaan ja mittalaitteen maadoitus on toteutettu huonosti. Myös matkapuhelimien ja muiden radiolähettimien aiheuttamat häiriöt voivat lisätä mittausepävarmuutta sähkömagneettisen kytkeytymisen kautta. Vaikka voidaan olettaa, että mahdollisiin häiriötekijöihin on kiinnitetty huomiota jo mittauslaitteistoa suunnitellessa, tulee edellä mainittujen haittojen mahdollisuudet kuitenkin kartoittaa.

Ymmärtääkseen mittausepävarmuutta, tulee prosessin jokainen virhettä aiheuttava tekijä tuntea. Mittauksen jäljitettävyydellä tarkoitetaan kunkin mittaustuloksen yhteyttä ilmoitettuihin referensseihin tai mittanormaaleihin. Jäljitettävyydellä saadaan selville mittauksien eri vaiheiden epävarmuudet aukotonta vertailuketjua seuraten, eli pystytään osoittamaan että mittaukset ovat vertailukelpoisia ja luotettavia. Jäljitettävyys on siten mittausten laadunvarmistusta ja luotettavuuden lisäämistä. Kuva 11 havainnollistaa tällaisen vertailuketjun periaatetta. Tutkimuksen kannalta on hyvä tietää, kuinka jäljitettävissä mittaustapahtuma on, eli kuinka mittaukset voidaan tarvittaessa toistaa.



Kuva 11. Vertailuketju mittausten jäljitettävyydeksi. [13]

Mittausten luotettavuuden kannalta mittalaitteen kalibrointi on tärkeä tekijä. Kansainväliset standardit, kuten ISO 9000 –sarjan standardit, käsittelevät kalibrointia koskevia vaatimuksia. SFS-ISO 9000 –standardin asettamat vaatimukset kalibroinnille ovat [23]:

- Tarvittavat mittaukset ja niiltä vaaditut tarkkuudet on yksilöitävä sekä valittava tarkastuksiin, mittauksiin ja testaukseen asianmukaiset välineet.
- Tuotteen laatuun vaikuttavat tarkastus-, mittaus- ja testauslaitteet on kalibroitava määrävälein jäljitettävästi.
- Kalibrointimenetelmät, kalibrointiväli, kalibrointitulokset ja hyväksymiskriteerit on dokumentoitava.
- On arvioitava ja dokumentoitava tulokset, jotka on saatu laitteella, jonka kalibrointi todetaan virheelliseksi.
- Ympäristöolot on oltava kalibrointiin soveltuvat
- Välineitä on käsiteltävä ja säilytettävä asiallisesti.
- Välineet on suojattava epäasialliselta käytöltä.
- Mittaus- ja kalibrointilaitteiden kalibrointitila on osoitettava.

Vitikaisen mukaan [23, s. 13] kalibrointi on usein taloudellisesti kannattavinta teettää yrityksen ulkopuolella. Tällöin kalibrointi suoritetaan usein kattavammin ja sen jäljitettävyydestä ei tarvitse huolehtia yrityksen sisällä. Suurin riskitekijä ulkopuolisen teettämässä kalibroinnissa on mittalaitteiden kuljetuksen aikana mahdollisesti aiheutuva mekaaninen rasitus tai joissain tapauksissa kosteus- tai lämpötilamuutoksista aiheutuvat ongelmat. Sähköisten suureiden mittaamiseen tarkoitettujen aktiivisten laitteiden kalibrointiväli on yleensä 12 kuukautta. Passiivisilla laitteilla se voi olla pidempi, 24…60 kuukautta. Mittausten jäljitettävyyden varmistaminen edellyttää Vitikainen mukaan [23, s. 17] myös laitteissa mahdollisesti olevien sisäisten kalibrointirutiinien säännöllistä tarkastamista. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi tietyt digitaaliset yleismittarit.

5 PIIRIKORTIN TESTAAMINEN

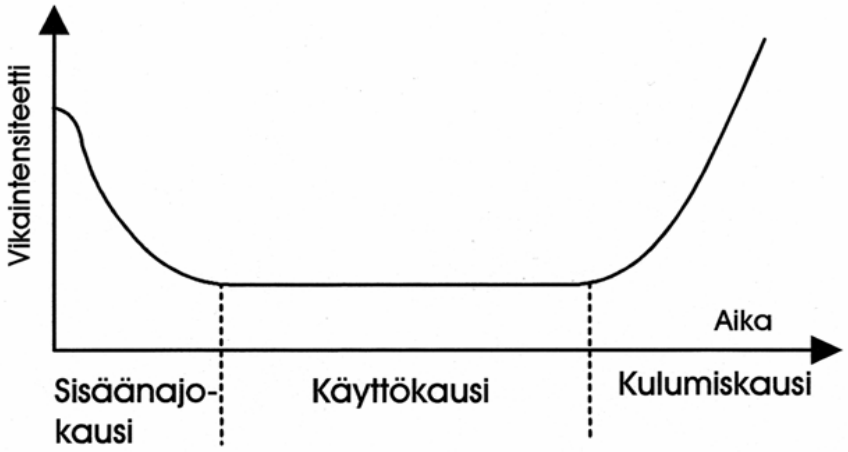
Piirikortin tulee täyttää sille annetut vaatimukset ja läpäistä laaditut testit ennen kuin se voidaan toimittaa tuotteen loppukäyttäjälle. Testaamaton piirikortti voi olla taloudellinen tai turvallisuuteen liittyvä riski. Asiakkaalle asti päätyvä epäluotettava tai toimimaton tuote voi myös heikentää valmistajan tai jälleenmyyjän imagoa. Tässä kappaleessa kartoitetaan yleistä piirikorttien mittaus- ja testausprosessia, jonka pohjalta voidaan esittää mahdollisia parannustoimenpiteitä tutkimuksen kohteina oleville testausjärjestelmille.

Tärkeää toimivan testauksen ohella on saatujen tuloksien hyväksikäyttäminen prosessien, ja sitä kautta tuotteiden, eli piirikorttien parantamiseksi. Suunnittelun, testauksen ja tuotannon tulee toimia saumattomasti yhteen niin, että tarpeellinen palaute ja informaatio kulkevat kaikkiin suuntiin. Testaaminen on hyödytöntä, jos testauslaitteet eivät toimi odotetulla tavalla, antavat epäluotettavia tuloksia, tai niitä ei käytetä asianmukaisesti. Vaikka testaus on nykyään hyvin pitkälle automatisoitua, voi inhimillisiä virheitä edelleen ilmetä esimerkiksi testausjärjestelmien suunnittelussa, ylläpidossa, ohjelmoinnissa tai niistä saatavien tulosten analysoinnissa.

Piirikorttien testaus on yleensä monimutkainen prosessi johtuen monista hallittavista muuttujista ja parametreista, joten testausjärjestelmän ja mitattavan piirikortin ominaisuuksien ja spesifikaatioiden tuntemus on tärkeää. Elektroniikkateollisuus on ollut ensimmäisten teollisten alojen joukossa implementoimassa toimintatapoihinsa kattavia vika-analysointimenetelmiä heti tuotteen valmistusketjun alkupäästä alkaen. Alalla on ymmärretty, että vikojen etsimisestä ja analysoinnista syntyy huomattavia säästöjä, jos niitä suoritetaan varhaisessa vaiheessa tuotteen elinkaarta. Yleensä myös tuotteen luotettavuus ja laatu parantuvat samalla. [28]

5.1 Piirikorttien vikaantuminen ja yleisimmät vikatyypit

Jotta tarpeeksi kattava piirikorttien testausjärjestelmä pystytään suunnittelemaan, tulee tietää, minkälaisia ongelmia ja vikoja niissä voi esiintyä, ja kuinka todennäköistä kyseisten vikojen esiintyminen on. Jos vikoja ei pystytä jaottelemaan ja luokittelemaan, on syiden poistaminen ja ennaltaehkäiseminen vähintäänkin hankalaa. Tuotteissa ilmenevät viat voidaan jakaa niiden tapahtumahetken mukaan kolmeen eri kategoriaan: yleensä tuotannossa ilmeneviin varhaisvaihevikoihin (*early-life, infant mortalities*), käytön aikana esiintyviin vikoihin (*event-related*) tai luonnollisiin, tuotteen ikääntymisestä aiheutuviin vikoihin (*wearout*). Yleensä laitepopulaation vikataajuus on alussa korkea, ja kun heikot ja vialliset tuotteet karsiutuvat, vikataajuus pienenee. Laitteen ikääntyessä sen vikaantumisen todennäköisyys alkaa jälleen kasvaa riippuen sen käyttötavoista ja –ympäristöstä. Tietyn elektroniikkatuotteen populaation luotettavuutta sen elinkaaren aikana kuvataan yleensä niin kutsutulla kylpyammekäyrällä (kuva X). [28]



Kuva 12. Laitepopulaation vikaantumistiheyden vaiheet tuotteen elinkaaren aikana. [29]

Varhaisessa vaiheessa havaitut viat aiheutuvat yleensä

- huonosta laadun kontrolloinnista
- huonosti kontrolloidusta tuotantoprosessista
- huonoista komponenteista ja testausspesifikaatioista
- komponenttien ja järjestelmien suunnitteluvirheistä
- materiaalien virheistä
- tuotteiden huonosta käsittelystä ja pakkaamisesta
- tuotteen huonosta asennuksesta ja käyttötavoista
- epätäydellisestä testauksesta.

Tuotteen käytönaikaiset viat puolestaan aiheutuvat yleensä epäsäännöllisistä, vaihtelevista tekijöistä (*random failures*), kuten

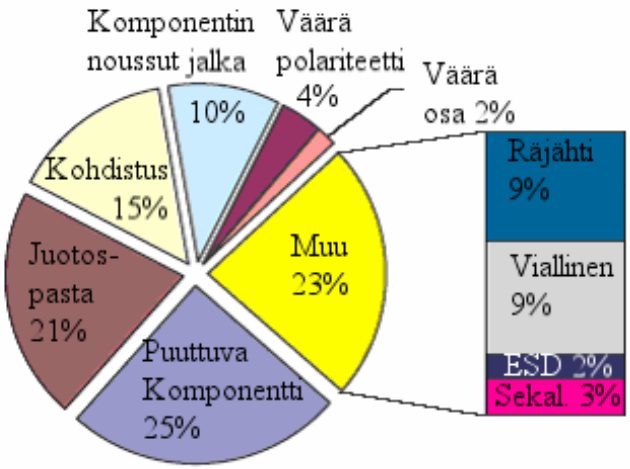
- riittämättömistä komponentti- tai systeemitason toleransseista
- tuotteen väärinkäytöstä
- piilevistä komponentti- ja systeemivioista
- liiallisesta sähköisestä, termisestä tai fyysisestä kuormituksesta.

Tuotteen vanheneminen nostaa sen vikaantumisprosenttia jyrkästi sitä aikaisemmin mitä rasittavammassa ympäristössä tuotetta käytetään. Selittäviä tekijöitä laitteen vikaantumiselle voivat tällöin olla

- korroosio tai hapettuminen
- eristeiden ja materiaalien kuluminen, hajoaminen ja väsyminen
- muovimateriaalien kutistuminen ja halkeilu
- metallien migraatio.

Varhaisvaiheen vikojen havaitseminen on erittäin tärkeää tuotantoprosessien kannalta. Vikoja voidaan vähentää monitoroimalla ja ohjaamalla prosessia. Tämän takia on tärkeää tietää, minkälaisia testausjärjestelmiä piirikortin valmistuksessa tulee soveltaa, ja minkälaisilla järjestelmillä vikojen havaitsemiskyky saadaan kattamaan mahdollisimman suuri alue potentiaalisista vioista. [28]

Kuvassa 13 on Radevin ja Shirvaikarin [19, s. 368] laatima lohkokaavio, joka kuvaa piirikorttien valmistuksessa esiintyvien vikojen jakaumaa. He jakavat piirikorttien tuotannossa aiheutuvat viat kolmeen kategoriaan niiden tapahtumahetken mukaan: kokoonpano-, testaus- sekä muut viat. Vioista syntyy kokoonpanon aikana noin 77% (puuttuva komponentti, juotospastaongelma, kohdistusvirhe, komponentin noussut tai taipunut jalka, väärä polariteetti, väärä komponentti), ja kokoonpanon jälkeiset viat, kuten testauksen aikana vikaantuvat komponentit, muodostavat noin 20% osuuden (räjähtänyt laite tai komponentti, viallinen komponentti, elektrostaattinen purkaus). Noin 3% vioista syntyy sekalaisista, muista kuin edellä mainituista tekijöistä.



Kuva 13. Vikajakauma PCBA-valmistuksessa [19]

Watanaben keräämien tietojen mukaan [24, s. 584] SMT-prosesseissa (surface mounted technology, pintaliitostekniikka) kokoonpanossa esiintyvät viat jakautuvat edelleen seuraavasti:

- 10% väärä komponentti.
- 15% väärä polariteetti.
- 20% puuttuva komponentti.
- 55% huono juotos.

Vaikka kuvan 13 jakauma ja edellä mainitut osuudet ovat vain suuntaa-antavia lukuja, eivätkä täysin vastaa toisiaan, voidaan niiden avulla kuitenkin karkeasti arvioida ja resursoida tarvittavia testausprosessin vaiheita. Komponentin asetteluun ja juotoksiin liittyvät viat muodostavat usein yli puolet vioista. Toisin sanoen, rakenteellisilla ja visuaalisilla testeillä voidaan löytää jo merkittävä osa vioista ja siten ehkäistä viallisen piirikortin eteneminen testauksessa pidemmälle, mikä on puolestaan taloudellisesti kannattavaa.

Komponenttien asettelu ja juottaminen piirilevyille on elektroniikan kokoonpanon kallein ja aikaa vievin vaihe. Tarve tuotantovaiheen tehokkaalle toiminnalle on ilmeinen. Haasteena prosessin nopeuttamiselle on komponenttien ja juotospisteiden jatkuva pieneneminen, joka hankaloittaa osien sijoittamista oikeaan paikkaan ja asentoon. Liika tai liian vähäinen juotostina tai –pasta, komponenttien huono sijoittelu tai niiden jalkojen vääntyminen aiheuttavat helposti virheitä piirikorttien valmistuksessa. Lisäksi 1.7.2006 lähtien voimassa ollut RoHS (Restriction of Hazardous Substances) –direktiivi saattaa vaikeuttaa tiettyjä juotosprosesseja, sillä se kieltää lyijyä sisältävän tinan käytön juotteena. [20]

Komponentit voivat myös vaurioitua elinkaarensa aikana monessa eri vaiheessa. Ne voivat olla viallisia heti kortille asennettaessa, mutta myös sopimaton käsittely, epäonnistunut juottaminen tai elektrostaattiset purkaukset voivat aiheuttaa niiden rikkoutumista. Piirilevyt voivat myös sisältää epäpuhtauksia tai kosteutta joko valmistusprosessin tai varastoinnin puutteiden johdosta. Nämä tekijät voivat aiheuttaa esimerkiksi korroosiota ja sitä kautta kontaktien heikkenemistä. Näin ollen piirikortissa ilmenevien vikojen ehkäisemiseksi pelkkä valmistus- tai mittausprosessin tarkkailu ei ole täysin riittävää; koko tuotantoketju yksittäisten komponenttien hankkimisesta aina lopullisen tuotteen pakkaukseen, varastointiin ja loppukäyttäjälle toimittamiseen asti on hyvä tuntea.

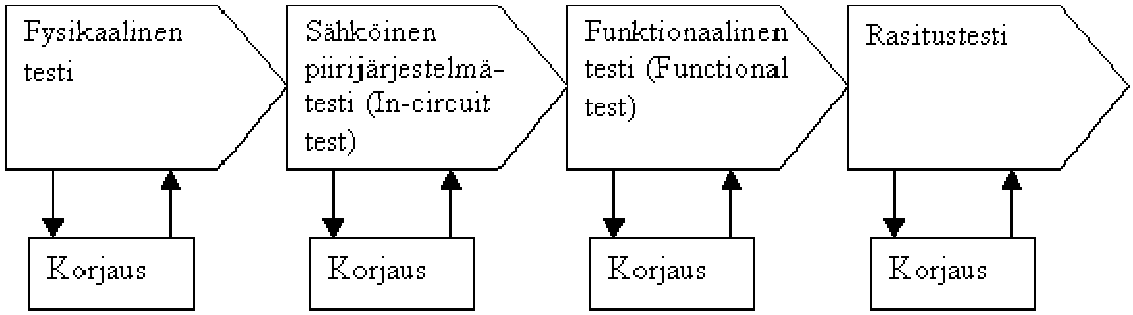
5.2 Testausprosessi ja yleisimmät testausmenetelmät

Yleensä piirikortin tuotekehitysvaiheessa testit tapahtuvat simuloimalla, prototyyppien tyyppitestimittauksilla ja pilottituotteilla. Tuotantovaiheeseen siirtyvän piirikortin testausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti rakenteellista (fysikaalista), toiminnallista (functional test, FCT), sähköistä (in-circuit test, ICT) ja kokonaisen laitteen toiminnallisuutta ja rasituksen sietokykyä mittaaviin testeihin. Edellä mainitut testit voidaan jakaa edelleen tarkempiin alalajeihinsa, kuten esimerkiksi rakenteellinen

testaus, johon lasketaan muun muassa visuaaliset, akustiset ja röntgensäteilyyn perustuvat testausmenetelmät. Kokoonpannun laitteen odotettua elinikää pyritään ennustamaan erityyppisillä rasitustesteillä. Yleensä jokainen piirikortti käy jollain tasolla jokaisen edellä mainituista päätestityypeistä läpi.

Piirikortin tulee täyttää sille määritellyt spesifikaatiot, jotka on laadittu tuotetta suunnitellessa - kuitenkin niin, että taloudelliset kustannukset pysyvät alhaisina. Myös tuotannon läpimenoajat tulee huomioida, sillä testaus ei saa häiritä tai hidastaa tuotteen valmistusta kohtuuttomasti. Valmistuslaadun tarkkailumenetelmät voivat myös vaihdella sen mukaan, testataanko jokainen valmistettu piirikortti, vai otetaanko prosessista vain näytteitä, joiden mukaan sen hetkistä tuotantolaatua tarkkaillaan. Kaikkia mahdollisia tuotantovikoja ei välttämättä tarvitse tarkastaa jokaisen kortin kohdalla, vaan tietyn välein tuotannosta poimitun kortin tarkastus voi auttaa havaitsemaan häiriöt prosessissa tarpeeksi tehokkaasti.

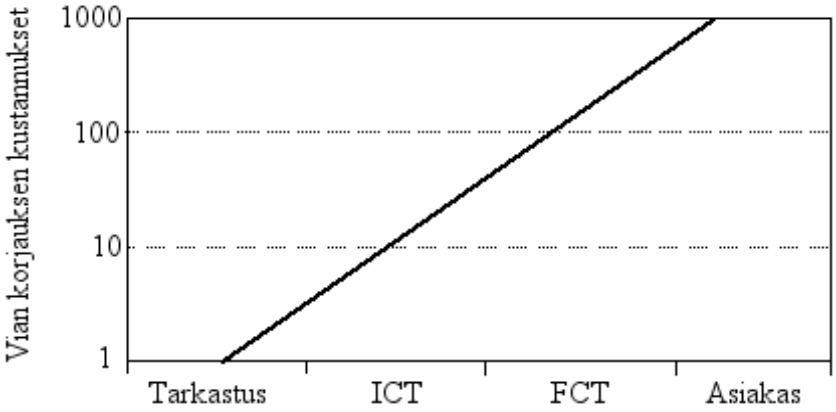
Erityyppisiä testejä voidaan yhdistellä, mutta yleensä kukin testi joudutaan suorittamaan erillisenä. Tekniset, fyysiset ja joskus taloudellisetkin rajoitukset vaikeuttavat usein testien samanaikaista suorittamista. Useampaan osaan jaettu tuotannon testausjärjestelmä saattaa lisäksi vähentää läpimenoaikaa, kun useampaa tuotetta pystytään testaamaan samanaikaisesti ilman merkittäviä prosessin pullonkauloja. Koska tuotannon täytyy olla tehokasta ja sitä kautta testien mahdollisimman nopeita, joudutaan tiettyjä testejä yleensä suorittamaan kiihdytettyinä. Kiihdytetyssä testissä laitetta tai piirikorttia kuormitetaan normaaliolosuhteita rankemmin. Kuva 14 havainnollistaa yksinkertaistettuna perinteisiä tuotantotestausjärjestelmän testausvaiheita sekä testausjärjestystä.



Kuva 14. Perinteinen tuotantoprosessin testausjärjestys.

Yksi lähtökohta testauksessa on suunnitella koko testausprosessi tuotteen ensimmäisistä suunnitteluhetkistä lähtien. Testattavuussuunnittelu (engl. design for testability, DFT) on testausfilosofia, joka pyrkii ottamaan testattavuuden huomioon jo tuotteen varhaisissa suunnitteluvaiheissa. Sen tarkoituksena on auttaa hahmottamaan tuotteen vaatima testausprosessi mahdollisimman aikaisessa vaiheessa, jotta ongelmien löytämiseltä vasta tuotantovaiheessa vältyttäisiin. Vian löytäminen mahdollisimman varhaisessa vaiheessa tuotteen elinkaaren aikana on lähes aina taloudellisesti kannattavinta. Kuva 15

havainnollistaa tuotantotestauksessa löydetyn vian kustannuksia suhteessa vian löytymisen ajankohtaan. Kustannukset voivat nousta jopa kymmenkertaisiksi, jos viallinen tuote etenee seuraavaan testausvaiheeseen saakka, jossa vika vasta mahdollisesti havaitaan. Taloudellisten menetysten lisäksi asiakkaalle päätyvä viallinen tai vika-altis tuote voi heikentää merkittävästi tuotteen tai sen valmistajan yrityskuvaa. [18]

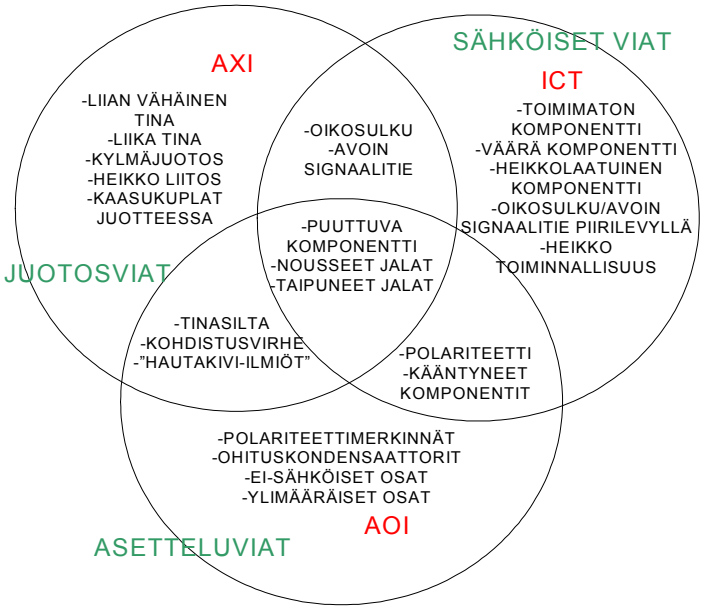


Kuva 15. Havaitun vian korjauskustannusten nousu tuoteprosessin eri vaiheissa. [17]

Testattavuussuunnittelun keskeiset käsitteet ovat testauksen ohjattavuus ja tarkkailtavuus. Ohjattavuudella kuvataan testausjärjestelmän mahdollisuutta ohjata testattavaa piiriä sen normaalikäytöstä poikkeaviin tiloihin. Tarkkailtavuus kertoo, kuinka hyvin testattavan tuotteen lähtöjen käyttäytymistä voidaan ennustaa tulojen funktiona. Myös vikakattavuus on yleisesti käytetty mitta, joka kertoo, kuinka suuri osa odotettavissa olevista vioista on mahdollista havaita kyseisellä testauslaitteella. Käytännössä testattavuussuunnittelu voi näkyä testauksen suunnittelussa siten, että komponentit ja testipisteet on sijoiteltu helpottamaan testausta, ja testausohjelmisto on optimoitu testaamaan tuote kannattavimmalla mahdollisemmalla tavalla. Testattavuuden suunnittelun päämääriksi voidaan lukea esimerkiksi vikojen lisääntynyt kiinnisaanti, tarkempi vika-analyysi, tehtävien yksinkertaistuminen ja automatisointi, suunnittelun ja testauksen nopeutuminen, sekä ennustettavuus tiedolle, kuinka pian asetetut laatutavoitteet täyttyvät. [18]

Yleinen tavoite monilla toimialoilla on optimoida prosessit niin, että ne eivät vaadi lainkaan testausta. Tavoite on kuitenkin hyvin haastavaa elektroniikkateollisuudessa, jossa tuotteita kehitetään jatkuvasti. Yksi tärkeistä testauksesta aiheutuvia kuluja vähentävistä toimenpiteistä onkin testauksen optimointi. Yksi tehostamiskeinoista on karsia testauksessa esiintyviä päällekkäisyyksiä. Perinteisessä testausketjussa eri testausvaiheet saattavat mitata keskenään samoja ominaisuuksia, jolloin testauksen tehokkuus kärsii.

Kuva 16 havainnollistaa, kuinka komponenttien sijoittelua, sähköisiä ja funktionaalisia toimintoja sekä juotosten laatua mittaavat testausjärjestelmät saattavat sisältää päällekkäisiä testausvaiheita. Toisaalta tehostamisen riskinä on, että jokin alue testattavasta tuotteesta jääkin kokonaan testaamatta. [17]



Kuva 16. Mahdollisia päällekkäisiä testausvaiheita piirikortin testausprosessissa. [17]

5.2.1 Fysikaalinen testaus

Fysikaalisilla testausmenetelmillä, kuten näkyvään valoon, röntgensäteilyyn, infrapunavaloon tai akustiseen vasteeseen perustuvilla mittauksilla varmistetaan, että sekä tuotteen ulkoinen että sisäinen rakenne toteuttavat niille annetut vaatimukset. Rakenteellisella testauksella voidaan viitata esimerkiksi komponenttien juotoslaatua tarkastaviin tai jonkin osan fyysisten mittojen oikeellisuutta suorittaviin mittauksiin.

Visuaalinen testaus voidaan jakaa karkeasti kahteen suoritustapaan, ihmissilmän suorittamaan MVI- (manual visual inspection) ja koneen suorittamaan AOI- (automated optical inspection) tarkastukseen. Silmämääräinen tarkastaminen tapahtuu yleensä varhaisessa vaiheessa tuotteen valmistusprosessissa, kuten varmistettaessa, että käytetyt komponenttierät ovat oikeaa tyyppiä. Yleisellä tasolla tapahtuvan silmämääräisen tarkastamisen lisäksi tuotteiden päälle voidaan asettaa maski, jonka läpi näkee vain tarkastusta vaativat kohteet. Tämä helpottaa vaadittujen komponenttien tarkastamista karsimalla tarkastuksesta ylimääräistä informaatiota. Tuotantoprosessin aikana tapahtuu monesti myös epäsuoraa tarkastamista. Jatkuvasti pienenevät komponenttien pakkauskoot ja juotokset sekä komponenttien määrän kasvaminen ovat johtaneet

tiettyjen tuotteiden valmistuksessa silmämääräisen tarkastamisen hyödyn vähenemiseen ja luotettavuuden heikkenemiseen. Visuaalisen tarkastamisen yksi yleisistä käyttökohteista onkin nykyään tarkastaa lopputuotteen toimintaan vaikuttamattomia seikkoja, kuten antaako tuote itsestään ulkoisesti laadukkaan vaikutelman. [21]

Yhä useampiin käyttökohteisiin sovellettava automaattinen konenäkö vertaa kuvaamaansa aineistoa johonkin ennalta määritettyyn referenssidataan. Konenäöllä voidaan esimerkiksi havaita puuttuvat, väärät tai väärin asetellut komponentit, virheelliset juotokset tai kokonaan puuttuvat komponentit. AOI:n yksi suurimpia haasteita on sen ohjelmointi prosesseja varten niin, ettei se päästä tuotetta testistä läpi liian helposti, tai päinvastoin, ettei se hylkää oikeasti virheetöntä tuotetta. Lisäksi pienentyneet pakkauskoot ja etenkin pakkauskoteloiden alapuoliset juotokset voivat tuottaa ongelmia menetelmän käytössä elektroniikkateollisuudessa. Menetelmää käytetäänkin yleensä esimerkiksi tarkastettaessa tuotannon ensimmäisiä eriä tai prototyyppejä. [21]

Automaattisen, röntgensäteilyn käyttöön perustuvan AXI (automated X-ray inspection) -menetelmän etuna on mahdollisuus tutkia näkyvän valon aallonpituuksiin perustuvalta tekniikalta piilossa olevia vikoja, kuten piirilevyn katkenneita vetoja tai esimerkiksi BGA- (ball grid array) komponenttien koteloiden alapuolisia huonoja juotoksia, kun signaaleihin ei pystytä saamaan yhteyttä fyysisesti. Menetelmän eduiksi voidaan lukea sen suhteellisen korkea vikojen löytämiskyky, mutta laitteiden yleistymistä tuotantoprosesseissa hidastaa niiden korkea hinta, röntgensäteilyn vaatima suojaus ja vaadittu osaamistaso. Laitteet saattavat olla lisäksi massatuotannossa hitaita käyttää. Menetelmän käytössä on kuitenkin huomattavia etuja esimerkiksi tarkastettaessa tuotannon ensimmäisiä eriä tai prototyyppejä.

5.2.2 Sähköinen testaus

Piirikortin sähköisellä testauksella pyritään löytämään tutkittavasta piirikortista oikosulkuja ja signaaliteiden katkoksia, mittaamaan komponenttien arvoja ja esimerkiksi ohjelmoimaan passiivisia muisteja. Yleisin käytetty sähköinen testi on in-circuit –testi (ICT). Testi voidaan jakaa analogiseen ja digitaaliseen osaan. Analogisella testillä voidaan testata passiivisia komponentteja ja yksinkertaisia puolijohdekomponentteja, kuten vastuksia, keloja ja kondensaattoreita, sekä paikallistaa oikosulkuja. Analogiakomponenttien testaus tapahtuu syöttämättä tehoa kortille tai komponenteille. Digitaalikomponenttien testaus vaatii puolestaan tehoa, jotta komponentit saadaan aktivoitua. In-circuit -testin avulla voidaan mitata yksittäisten komponenttien arvoja, jolloin usean eri komponentin toleranssin muodostaman ”toleranssikertymän” syy voidaan paikallistaa, toisin kuin funktionaalisella testillä, joka mittaa kortin toiminnallisuutta lohkotasolla. Testauslaitteessa voi olla myös kortin funktionalisuutta mittaavia ominaisuuksia, jolloin puhutaan kombinatorisesta testauslaitteesta.

In-circuit -testi suoritetaan yleensä neulapetitekniikalla, jossa testauslaitteen mittaneulat ohjautuvat piirikortin testipisteisiin. In-circuit -testauksen yhdeksi haasteeksi onkin

tekniikan kehittyessä muodostunut komponenttien määrän ja tiheyden kasvu yhdistettynä komponenttien pakkauskokojen kutistumiseen. Tämä vaatii piirikortilta yhä enemmän ja yhä pienempiä mittauspisteitä testipinnejä varten. Luotettavan, tiheäneulaisen järjestelmän valmistus hankaloituu elektroniikan kutistuessa. Suuren volyymin tuotannossa neulapetitesti voi olla vielä pitkään taloudellisesti kannattava vaihtoehto, mutta pieniä piirikorttieriä varten rakennetut tuotekohtaiset ja usein kalliit laitteet saattavat muodostaa suhteettoman suuren osan kuluista. Lisäksi koko testausjärjestelmän suunnittelu vie paljon aikaa. Tällöin voi olla järkevämpää käyttää esimerkiksi flying probe –menetelmää, jossa mittaukset suoritetaan ohjelmoitavien, liikkuvien mittapäiden avulla. Flying probe –menetelmät ovat kuitenkin yleensä suhteellisen hitaita, joten ne soveltuvat usein paremmin käytettäväksi pienten piirikorttierien testaamiseen. [14]

1980-luvulla perustetun Joint Test Action Groupin (JTAG) kehittämä Boundary scan (boundary = rajapinta) on standardoitu (IEEE 1149.1) testausmenetelmä digitaalipiirille. Sen tarkoituksena on toimia vaihtoehtoisena menetelmänä in-circuit -testille. Boundary scan on suunniteltu käytettäväksi tuotteen elinkaaren kaikkiin vaiheisiin; prototyyppi- ja tuotantotestaukseen sekä kenttäongelmien ratkomiseen. Testi ei asianmukaisesti laadittuna vaikuta mitattavaan, standardia tukevaan piiriin kortin ollessa normaalissa toiminnassa. Menetelmää voidaan käyttää muun muassa ladonta-, asennus ja juotosvirheiden löytämiseen, monimutkaisten komponenttien sisäisen toiminnan tutkimiseen, muistien sisältöjen lukemiseen, piirissä kulkevien signaalien kaappaamiseen sekä logiikkapiirien ja mikro-ohjaimien emulointiin ja ohjelmointiin. Myös BGA-komponenttien tutkiminen helpottuu perinteiseen in-circuit –testiin verrattuna. Boundary scan mahdollistaa useita testaustapoja, mutta vaatii piirin, joka tukee sitä. Nykyään useat piirit kuten ohjelmoitavat logiikkapiirit, ASIC-piirit ja prosessorit tukevat menetelmää. Haittapuolena järjestelmälle on sitä tukevien piirien korkeampi hinta sekä testausohjelmistot. Etuina ovat testaussuunnittelun ja testauksen nopeutuminen, testipisteiden väheneminen tai poistuminen, sekä testialustojen ja piirikorttien yksinkertaistuminen. Analogialohkojen ja -piirien mittausmahdollisuuden sisältävä Digital Boundary scan –standardi (IEEE 1149.4) hyväksyttiin vuonna 1999. Sen tarkoituksena on mahdollistaa oikosulkujen, avoimien yhteyksien ja diskreettien analogikomponenttien mittaus. Niin kutsuttu sekasignaali eli mixed signal -toteutus on kuitenkin kahden eri tekniikan samanaikaisesta käytöstä aiheutuvien häiriöiden, vääristymien ja viiveiden takia haasteellista, ja vaatii paljon suunnittelutyötä. [15]

5.2.3 Funktionaalinen testaus

Funktionaalisella testauksella pyritään varmistamaan, että mitattava laite tai piirikortti täyttää sille laaditut toiminnalliset vaatimukset. Testauslaitteen toiminta perustuu normaalisti simulaattoriin, joka generoi laitteelle herätteitä, ja tarkastaa sen ulostuloista saatujen vasteiden avulla toimintojen toimivuuden. Tällöin voidaan selvittää tietyn toimintalohkon toimivuus kokonaisuudessaan. Testauslaitteen mittausrajapintana voi toimia testattavan piirikortin normaalit ulkoiset kaapeliliitännät, neulapetikontakti, tai niiden yhdistelmä. Testijärjestelmä koostuu yleensä teholähteistä, mittainstrumenteista,

signaalimuuntimista sekä PC:stä, joka generoi ja vastaanottaa testidataa. Testauksella voidaan esimerkiksi tarkastaa, antaako laite spesifikaatiorajojen mukaisen ulostulojännitteen tai -virran, tai aiheuttaako tietynarvoisten parametrien syöttäminen toivotunmukaisen vasteen. Funktionaalinen testausjärjestelmä on usein uniikki tiettyä piirikorttia varten. Eri kiinnitysalustojen (niin kutsuttujen fikstuurien) avulla voidaan kuitenkin tarvittaessa testata samantyyppisten korttien eri versioita yhdellä testauslaitteella, jos esimerkiksi testipisteiden paikka tai määrä on muuttunut edellisestä.

Funktionaalisten testausjärjestelmien heikkouksiksi voidaan yleensä lukea niiden vaatima suunnittelu, rakentaminen ja ohjelmointi. Järjestelmät ovat yleensä suhteellisen monimutkaisia, jolloin niiden hinta muodostuu helposti korkeaksi. Lisäksi testauslaitteet eivät yleensä anna täsmällisen tarkkaa tietoa vian sijainnista. Tämän takia testauksessa käytetäänkin perinteisesti myös in-circuit -testiä, jonka avulla yksittäiset komponenttiviat voidaan paikallistaa.

5.2.4 Rasitustestaus

Yleensä prosessin loppuvaiheille sijoittuvan rasitustestauksen ideana on poistaa valmiista laitteesta sinänsä toimivat, mutta herkästi vikaantuvat ja lyhytikäiset kappaleet. Kokoonpannun laitteen tietyssä piirissä saattaa olla esimerkiksi komponentti tai juotos, joka voi vikaantua altistuessaan tärinälle tai lämpötilan muutoksille. Rasitustestaus voi sisältää tärinän ja lämpöshokkien lisäksi altistusta paineelle, kosteudelle, sähköiselle ja mekaaniselle rasitukselle. HAST (Highly accelerated stress test) yhdistää näistä korkean paineen, lämpötilan ja ilmankosteuden vaikutukset samanaikaisesti, ja lyhentää siten tuotekehityksessä testaukseen kuluvaa aikaa. HASS (Highly accelerated stress screen) on HAST:ia vastaava tuotannossa suoritettava testi, johon kuuluu lisäksi tärinä-, jännite-, teho- ja taajuussyklaustesti. Testatusta laitteesta ja tuotantoprosessista riippuu, suoritetaanko rasitustestit tai osa niistä kiihdytettyinä, tai käyvätkö laitteet HAST- tai HASS-testin läpi. [16]

5.2.5 Itsetestirakenteet

Laitteen piireihin sisäänrakennetuilla testeillä (engl. built-in selft test, BIST) pyritään korvaamaan testauksessa tarvittavia ulkoisia mittausmenetelmiä. Menetelmän ideana on suunnitella ja implementoida testauksessa tarvittavia signaaligeneraattoreita ja analysaattoreita suoraan piirikortille. Tällöin mittausten vaatimia signaalireittejä pystytään lyhentämään ja sitä kautta toteuttamaan testit reaalinopeudella ilman mittauslaitteista johtuvaa testinopeuden pudotusta. BIST-rakenteen suunnittelu on haasteellista, mutta hyvin toteutettu ratkaisu voi alentaa tuotantokustannuksia lyhentämällä testauksen tarvitsemaa aikaa sekä vähentämällä ulkoisen testauslaitteiston ominaisuuksien tarvetta. Lisäksi laitteen omavaraisella testauksella voidaan löytää jo loppuasiakkaalla käytössä olevan vikaantuneen laitteen ongelman syy ja siten vähentää huoltotoimenpiteisiin kulunutta aikaa.

6 TUTKIMUSKOHTEET JA -MENETELMÄT

6.1 Lähtökohta ja tavoitteet

Tutkimuksen lähtökohtana oli tutkia ABB Oy:n eräässä taajuusmuuttajassa käytetyn piirikortin funktionaalisen testausjärjestelmän nykytilaa, eli sen luotettavuutta ja kykyä antaa odotetun mukaisia testituloksia vaaditulla tarkkuudella annetuissa olosuhteissa. Tarkoituksena oli suorittaa Gage R&R -testi piirikortin toiminnallisuutta mittaavalle testausjärjestelmälle, eli laskea mittalaitteiden, mittausympäristön ja operaattoreiden vaikutus mittaustuloksissa esiintyvään vaihteluun. Näin voitiin selvittää itse mittausprosessin aiheuttaman virheen osuutta piirikorttien valmistusprosessin kokonaisvaihtelusta.

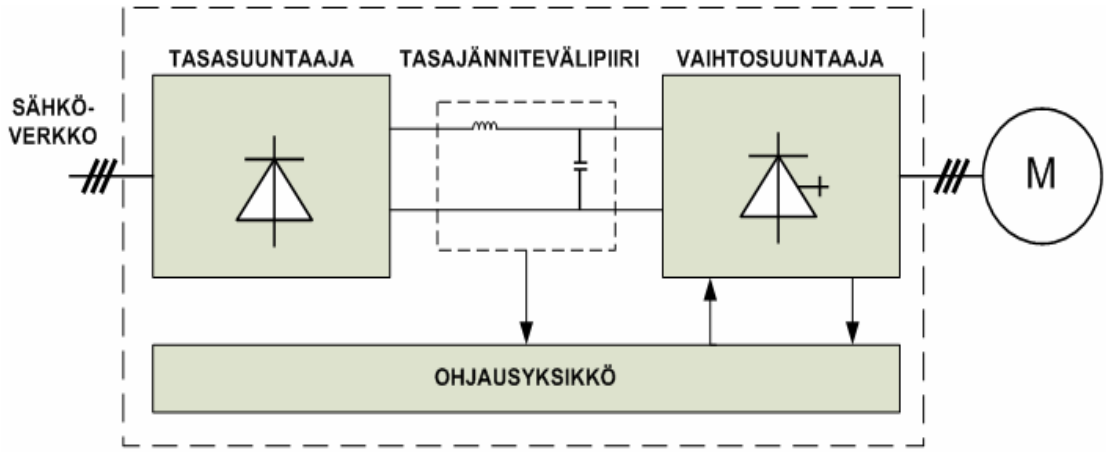
ABB on määritellyt piirikortin toiminnallisuudelle spesifikaatiorajat, joiden mukaan kortit valmistetaan ja testataan. Testausjärjestelmien suunnittelu ja rakennus on teetetty alihankintana kyseisten spesifikaatioiden pohjalta kahden yrityksen toimesta. Samat toimittajat hoitavat myös varsinaisen piirikortin testaamisen kyseisillä laitteilla. Kahden eri toimittajan käytöstä johtuen järjestelmien rakentamisessa on päädytty joiltain osin eroaviin ratkaisuihin. Myöskään saman alihankkijan kaikki testauslaitteet eivät ole keskenään täysin identtisiä. Niiden toiminnallisuuden on kuitenkin oletettu vastaavan toisiaan.

Ennen tutkimuksen teettämistä piirikorttien testauksen lähtökohtana oli ollut, että mahdolliset poikkeamat mitatun piirikortin ominaisuuksissa johtuvat pääsääntöisesti piirikorttien välisistä eroista, ja että itse testausjärjestelmä antaa teoriassa virheettömiä tuloksia. Tämänkaltainen ajatusmalli on puutteellinen, sillä jos rakennetun testausjärjestelmän antamien tulosten hajontaa ei ole analysoitu, piirikortin valmistusprosessi ja sen säätäminen eivät voi todellisuudessa olla täysin hallinnassa. Jos mittausten luotettavuutta ei tunneta, on tuloksien pohjalta hyvin vaikea tehdä johtopäätöksiä järjestelmän ja prosessien parantamiseksi. Tutkimukselle oli siis tarvetta ja sen toivottiin auttavan ymmärtämään testaus- ja tuotantoprosessia paremmin ja mahdollisesti auttamaan sen optimoinnissa ja kehittämisessä. Toisaalta koko testausjärjestelmän kattava analyysi ei ollut tämän työn tavoitteena, sillä Gage R&R –testillä voidaan havaita vain lyhyen ajan vaihtelua eikä esimerkiksi tuloksiin mahdollisesti vaikuttavaa systemaattista virhettä.

Jos toistettavuus- ja uusittavuustestin lopputulokset osoittavat, että mittausjärjestelmän vaikutus prosessissa esiintyvään vaihteluun on liian suurta, tulee näiden syiden lähteitä kartoittaa. Etsimällä ja tunnistamalla mahdollisia ongelmakohtia voidaan niiden poistamiseksi esittää korjaavia toimenpiteitä. Tutkimuksen toivottiin hyödyttävän molempia osapuolia; kortin toimittajia sekä sen tilaajaa eli ABB:tä. Mielenkiintoista oli myös selvittää, vastaavatko samojen, valmiiksi laadittujen spesifikaatioiden pohjalta laaditut mittausjärjestelmät toisiaan niiden antamien tulosten suhteen.

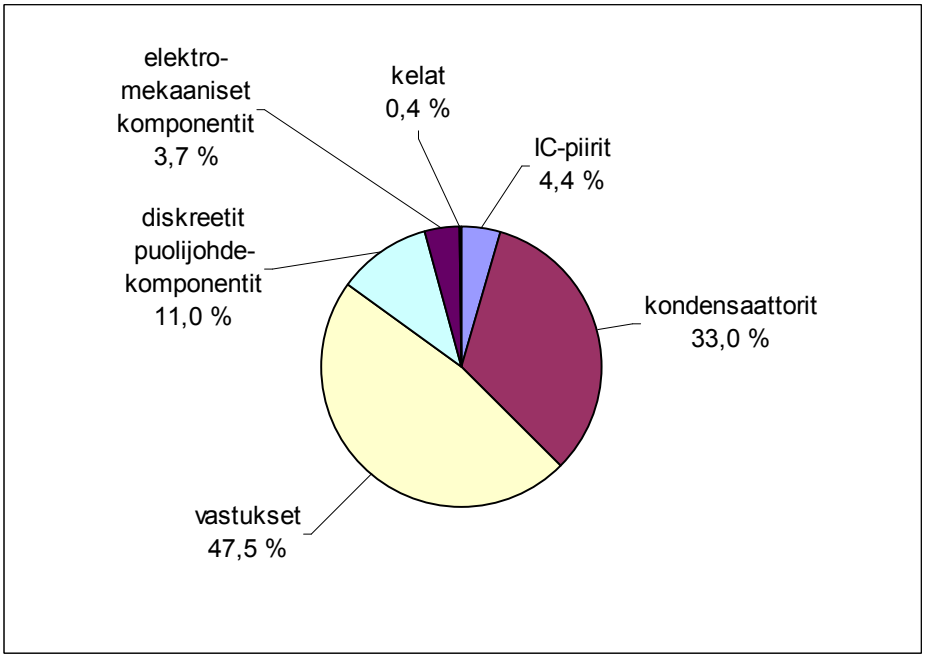
6.2 Taajuusmuuttajan ohjauskortti

Funktionaalisella testausjärjestelmällä mitattu piirikortti toimii ABB:n taajuusmuuttajassa ohjauskorttina. Kuva 17 esittää jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa lohkotasolla. Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, tasajännitevälipiiristä, vaihtosuuntaajasta sekä ohjausyksiköstä, eli ohjauskortista. Pääpiirikortin tehtävänä on muuttaa laitteelle sähköverkosta syötetty vaihtojännite tasajännitteeksi yleensä yksi- tai kolmivaiheisella diodisillalla. Välipiirin tehtävänä on varastoida kyseinen energia välipiirikondensaattoreihin, joista ohjauskortilta saatujen PWM (pulse width modulation, pulssinleveysmodulaatio) –signaalien perusteella jännitettä vaihtosuunnataan IGBT (Insulated gate bipolar transistor) –moduulin avulla. Syntynyt vaihtojännite määrää taajuusmuuttajan ohjaaman vaihtosähkömoottorin pyörimisnopeuden ja jännitteen moottorikäämityksessä synnyttämän virran tehollisarvon vaihtosähkömoottorin vääntömomentin toimiessa vakiovuoalueella.



Kuva 17. Jännitevälipiiritaajuusmuuttajan lohkokaavio.

Ohjauskortti toimii laitteen sisäisessä kommunikaatiossa, sekä osana asiakasrajapintaa, eli sisältää signaalien tulo- ja lähtöliitäntöjä. Ohjauskortissa on sekä analogisia että digitaalisia lähtö- ja tuloliitäntöjä sekä tiedonsiirtoväyliä. Lisäksi kortilla on omat liittimet kahdelle lisäoptiokortille, pääpiiriltä tuleville käyttöjännitteille, pääpiirin ja ohjauskortin välisille ohjaus- ja datasignaaleille sekä liitin ulkoiselle tuulettimelle. Kuvassa 18 näkyy karkea jaottelu ohjauskortin komponenteista komponenttityypeittäin. Ohjauskortti sisältää (kortin revisiosta riippuen) noin 24 digitaalista sekä analogista IC (integrated circuit) -piiriä, 180 kondensaattoria, 260 vastusta, 60 diskreettiä puolijohdekomponenttia (esimerkiksi transistorit, diodit, optiset komponentit), 20 elektromekaanista komponenttia (esimerkiksi releet, kytkimet, liittimet) sekä muutaman kuristinkelan. Kaiken kaikkiaan piirilevylle liitetään, juotetaan tai kiinnitetään noin 540 eri nimikettä.



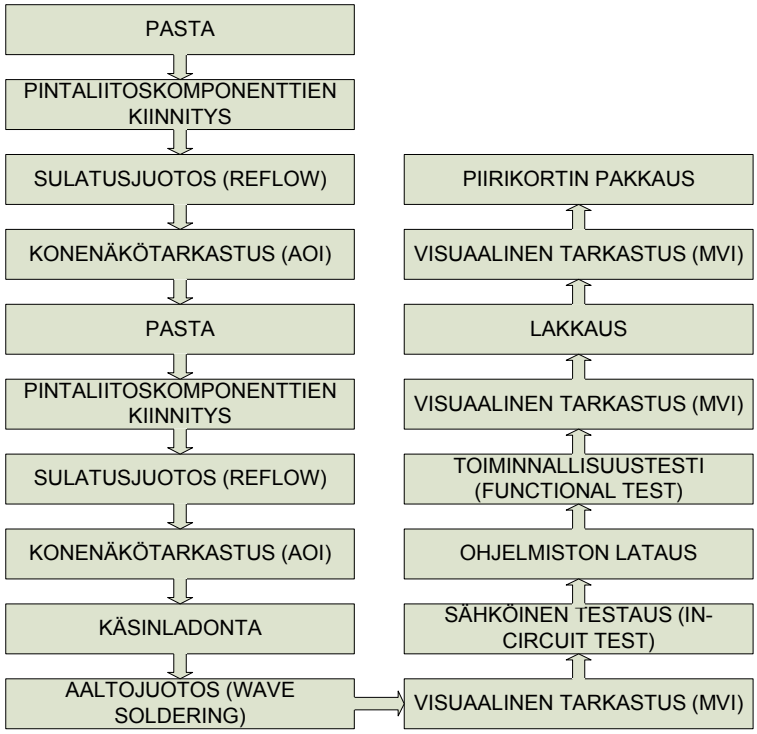
Kuva 18. Ohjauskortin komponenttien jakauma komponenttityypeittäin.

Ohjauskortti sisältää laitteen ohjelmiston sekä parametrit. Taajuusmuuttajan toimintaa voidaan ohjata ja säätää ohjauspaneelilla, joka toimii käyttöliittymänä laitteen käyttäjälle. Paneelin kautta ohjauskortin parametrisointia, eli laitteen – ja sitä kautta taajuusmuuttajaan kytketyn moottorin toimintaa voidaan muuttaa ja säätää halutunlaiseksi. Esimerkiksi moottorille syötetyn vaihtojännitteen taajuutta, moottorin pyörimissuuntaa tai analogia- ja digitaalilähtöjen tiloja voidaan ohjata ohjauspaneelin kautta.

Työn kannalta kortin käyttötarkoitus ja funktionaalisuus eivät ole kuitenkaan erityisen keskeisiä asioita, sillä ne eivät käytännössä vaikuta suoritettavaan Gage R&R -testiin. Teoriassa tämän työn kohteena olisi voinut teoriassa olla minkä tahansa elektronisen piirikortin testausjärjestelmän analysointi. Tämän seikan johdosta mitattavan piirikortin ominaisuudet käydään tässä kappaleessa melko pintapuolisesti läpi. Suurimman painoarvon mittauksissa saivat mittausprosessin toistettavuuden ja uusittavuuden selvittäminen sekä mahdollista vaihtelua aiheuttavien ilmiöiden analysointi. Itse kortin ominaisuuksiin ei tässä työssä siis otettu kantaa, vaan sitä testaavan funktionaalisen mittausjärjestelmän luotettavuutta pyrittiin tutkimaan mahdollisimman objektiivisesti. Tavoitteena oli siis mitata, kuinka luotettavasti ohjauskorttia mittaavat testausjärjestelmät suoriutuvat tehtävästään annettuja spesifikaatioita vasten. Tarkempi kuvaus taajuusmuuttajasta ja sen ohjauksesta löytyy esimerkiksi kirjasta *Jouko Niiranen: Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus* (Helsinki: Otatieto, 2000).

6.3 Nykyinen ohjauskortin tuotanto- ja testausprosessi

Toimittajan A nykyinen ohjauskortin valmistus- ja testausprosessi on esitetty kuvassa 19. Aluksi piirikortin toiselle puolelle kiinnitetään juotospastan (engl. paste) avulla pintaliitoskomponentteja (SMT, surface mount technology) sulatusjuotostekniikalla (engl. reflow), jonka jälkeen kortti tarkastetaan automaattisella konenäköjärjestelmällä (AOI) läpi. Tämän jälkeen kortille suoritetaan uusi komponenttien kiinnitysvaihe, jonka jälkeen se testataan uudelleen konenäön avulla. Seuraavaksi kortille kalustetaan käsin komponentit, jotka juotetaan kiinni aaltojuotoskoneella (engl. wave solder). Aaltojuotoksen jälkeen korttien ulkoinen laatu tarkastetaan silmämääräisesti (MVI), jonka jälkeen niille suoritetaan in-circuit –testi, jonka jälkeen kortille ladataan ohjelmisto ja suoritetaan funktionaalinen testi (FCT). Kortti tarkastetaan tämän jälkeen vielä kertaalleen silmämääräisesti läpi, minkä jälkeen kortin pintaan suihkutetaan korttia suojaava lakkakerros. Lopuksi kortille suoritetaan vielä viimeinen visuaalinen tarkastus ennen sen pakkausta. Toimittajan B tuotanto- ja testausprosessi on hyvin samankaltainen. Suurimpina eroina toimittajaan A toimittaja B ei käytä ohjauskortin testausprosessissaan konenäköön perustuvaa optista tarkastusta (AOI). Lisäksi juotosprosessi on kaksi- eikä kolmivaiheinen. Molemmilla toimittajilla on käytössään myös AXI-laitteisto, mutta ohjauskortin testauksessa sitä ei tarvita. Laite on käytössä yleensä pienten komponentti- tai piirikorttierien tai prototyyppien tarkastuksessa.



Kuva 19. Toimittajan A ohjauskortin tuotanto- ja testausprosessi.

6.4 Ohjauskortin funktionaalinen testausjärjestelmä

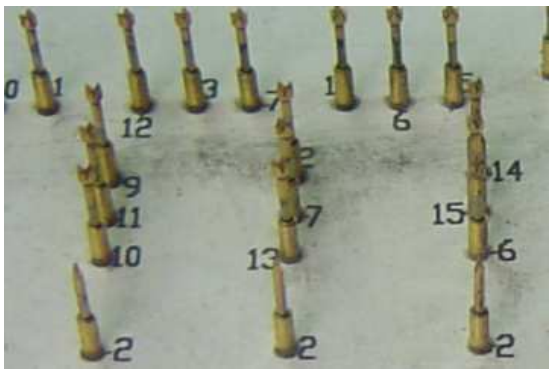
In-circuit -testauksen ja ohjelmiston latauksen jälkeen piirikortille suoritetaan funktionaalinen testi. Piirikortin toiminnallisuutta testaava mittausjärjestelmä toimii neulapetitekniikalla, jossa testattava kortti asetellaan vaihdettavissa olevaan testialustaan, jonka jälkeen kytkintä painamalla paineilmalla toimiva mekaniikka puristaa kortin vasten testineuloja. Testialusta toimii maskina, johon tehdyt reiät päästävät halutut neulapedin neulat kontaktiin ohjauskortin testipisteiden kanssa.

Testausjärjestelmässä on tutkimuksessa käsiteltyä ohjauskorttia varten kaksi eri alustaa, joista toinen on ohjauskortin vanhemmalle tyypille. Tässä työssä kyseistä alustaa ei käytetty, sillä kaikki testit suoritettiin käyttäen uudempaa korttityyppiä. Tietyissä funktionaalisissa testauslaitteissa voitaisiin testata myös muiden taajuusmuuttajien käyttämiä ohjauskortteja. Näidenkään korttien testaukseen tutkimuksessa ei otettu kantaa. Toisaalta, jos testijärjestelmästä löytyy vikoja, auttaa niiden havaitseminen myös muiden piirikorttien testauksen tehostamisessa, sillä tärkeimmät testausjärjestelmän osista, kuten teholähteet ja digitaaliyleismittarit, ovat eri korttityypeille yhteisiä.

Kahden eri tehtaan testauslaitteet eivät ole ratkaisuiltaan identtisiä. Mittauslaitteiden mekaanisissa ja sähköisissä ratkaisuissa sekä niiden ohjelmoinnissa on eroja. Ne on kuitenkin laadittu samojen testispesifikaatioiden mukaan, joten ne suorittavat samat mittaukset samojen rajojen mukaan. Molemmilla alihankkijoilla on käytössään useampia kappaleita testausjärjestelmiä, tehtaalla A viisi ja tehtaalla B kaksi. Kaikissa testausjärjestelmissä on kuitenkin käytössä samanlaiset Agilentin (Agilent technologies, Yhdysvallat) valmistamat multiplekserit (AGILENT 34901A) ja digitaaliyleismittarit (AGILENT 34970A). Myös virtalähteet ovat Agilentin valmistamia (AGILENT E3631A, AGILENT E3647A), lukuun ottamatta toimittajan B toista testausjärjestelmää, jossa on käytössä GW Instrumentsin (GW Instruments, Yhdysvallat) valmistamat teholähteet (GW PPT-1830, GW PPT-3615).

Tällä hetkellä toimittajan A funktionaalinen testi kestää hieman vajaat 7 minuuttia ja toimittajan B hieman vajaat 5 minuuttia. Toimittajan A testijärjestelmää pyritään jatkuvasti optimoimaan testausajan lyhentämiseksi ja tuotannon tehostamiseksi. Testien kestojen erot johtuvat pääosin testivaiheiden mittausviiveiden ja -ajoitusten eroista. Testausaikojen ero näkyy osaltaan toimittajan A suurempana testausjärjestelmien määränä.

Testauslaitteiden neuloissa on eroja eri testauslaitteiden väleillä. Osassa testausjärjestelmistä on käytetty kruununeuloja, joissa kontakti testipisteeseen saadaan useammasta kohdasta. Lisäksi esimerkiksi riviliittimien jalkoihin voidaan tällöin saada varmempi kontakti. Normaaleissa testipisteissä suorien neulojen voidaan olettaa toimivan vähintäänkin yhtä luotettavasti kuin kruununeulojen, sillä suorat neulat ohjautuvat hyvin testipisteisiin. Kuvassa 20 näkyy toimittajan B testausjärjestelmässä käytettyjä suoria neuloja sekä kruununeuloja.



Kuva 20. Toimittajan B testausjärjestelmän neuloja. Kuvan etualalla näkyy tavallisia piikkimallisia neuloja, takana kruununneuloja.

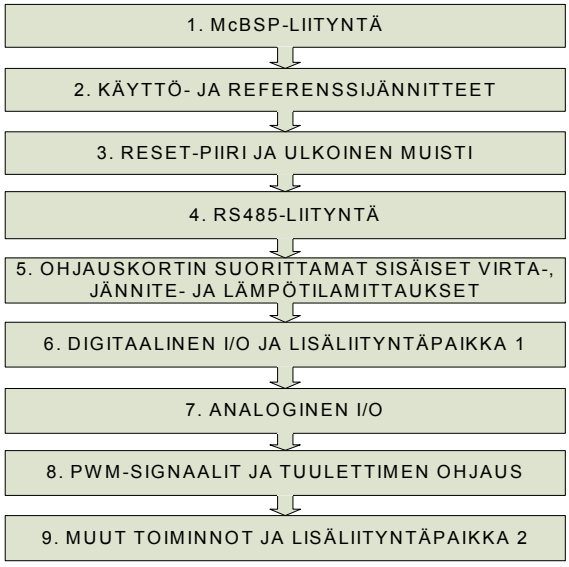
Toimittajan B toinen testausjärjestelmä koostuu kahdesta osasta, jossa ensimmäisessä syötetään ohjauskortille testausta varten tarvittavat parametrit ja toisessa suoritetaan varsinainen funktionaalinen testi. Ensimmäinen vaihe kestää noin 2 minuuttia, toinen noin 3 minuuttia. Hajauttamalla testi kahteen osaan testausvaiheen aiheuttamaa pullonkaulaa on saatu pienennettyä ja kapasiteettia nostettua. Tämä puolestaan on nostanut ainakin teoriassa koko tuotannon kapasiteettia. Lisäksi testausvaiheen hajauttamisesta on saatu kustannussäästöjä, sillä kaksi erillistä testausjärjestelmää ovat tulleet kustannuksiltaan edullisemmiksi kuin järjestelmä, joka suorittaisi kaikki vaiheet yhdellä kertaa.

Testausjärjestelmä mittaa tulokset kolmen desimaalin tarkkuudella, josta ohjelmisto pyöristää ne mittausraporttiin kahden desimaalin tarkkuuteen. Useampidesimaalista mittadataa kyettäisiin saamaan ulos, mutta tämä vaatisi testausjärjestelmän ohjelmiston uudelleenohjelmointia. Nykyinen tilanne on tutkittu ja hyväksytty ratkaisu, sillä mittaustapahtumassa ilmenevät epäideaalisuudet peittäisivät todennäköisesti alleen tarkemmat tulokset. Toimittaja B on teettänyt toistettavuusmittauksia funktionaalisille testausjärjestelmilleen, mutta uusittavuutta tai testausjärjestelmien välisiä eroja ei ole selvitetty. Tiedostetut virheet ovat pääasiassa järjestelmällisiä, eli tuloksissa vaikuttaa esimerkiksi systemaattisesti kiinteä kaapelointien pituudesta johtuva jännitteenpudotus tai kaapeleiden liitoskohdista aiheutuva heijastuminen. Mittalaitteiden kalibrointi teetetään alihankkijoiden ulkopuolella kahdentoista kuukauden välein. Kalibrointiin sisältyy digitaaliyleismittarin sekä teholähteiden kalibrointi.

Toimittajien A ja B testausympäristöt ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Molemmilla toimittajilla tuotantoympäristöön on sijoittunut testauksen lisäksi useita piirikortin tuotanto- sekä testausvaiheita, kuten ladonta- ja juotosasemia sekä muiden piirikorttien testausjärjestelmiä. Ilman lämpötilaa kontrolloidaan ilmastointilaitteilla, jotka pitävät lämpötilan tasaisena. Molemmissa tehtaissa tutkimusta tehdessä tilan lämpötila oli noin 22-23 celsiusastetta ilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 50%. Nämä luvut pysyivät käytännössä vakiintuneina mittausten ajan, joten niiden vaikutus mittausten vaihteluun voidaan olettaa hyvin vähäiseksi.

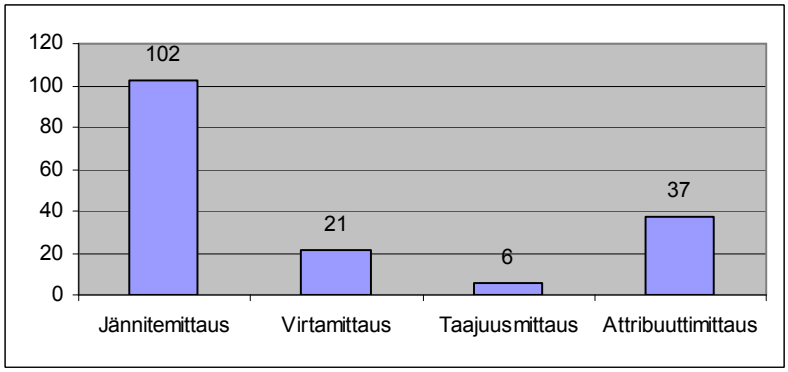
6.5 Funktionaalisen testausjärjestelmän suorittamat mittaukset

Kuva 21 esittää ohjauskortille laaditun testausspesifikaation yhdeksää erillistä vaihetta, joihin kortin testaaminen on jaettu.



Kuva 21. Ohjauskortin testausspesifikaation mukaiset päätestivaiheet.

Testausjärjestelmän ohjelmisto suoritti tutkimusta tehtäessä 166 eri lukutoimintoa ohjauskortilta. Kuva 22 kuvaa eri mittaustyyppien määriä. Mittauksista 102 oli jännite-, 21 virta- ja 6 taajuusmittauksia joko neulojen kautta suoraan kortin pinnasta mittaamalla tai lukemalla arvot sarjaväylää pitkin ohjauskortin muistista.



Kuva 22. Funktionaalisen testausjärjestelmän suorittamien mittauksien määrät mittaustyypeittäin.

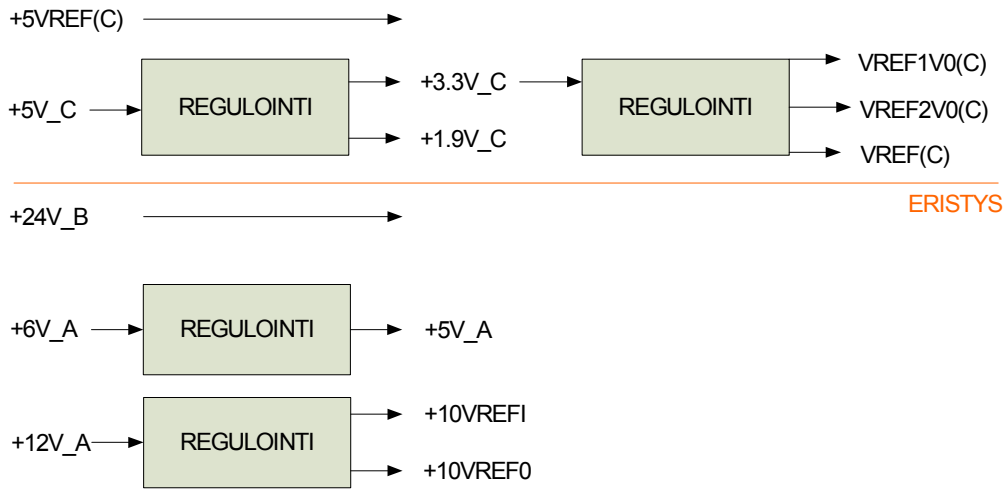
Loput 37 mittaustulosta ovat ohjauskortin kautta luettavia parametreja, jotka ovat attribuuttimuotoista dataa. Näitä mittauksia ei käsitelty tutkimuksessa, sillä variaabelimuotoisen datan mittaus ja analysointi koettiin oleellisemmaksi tutkimuskohteeksi. Jokaiselle mittaustapahtumalle on määritelty ylä- ja alarajat, joihin tuloksia verrataan. Jos mittaustulos ei ole spesifikaatiorajojen sisällä, testi hylkää kortin. Tämän jälkeen kortti voidaan tapauksesta riippuen testata uudelleen, mikäli vian syy saadaan selvitettyä ja ongelma korjattua.

6.5.1 McBSP

McBSP (Multi-channel Buffered Serial Port, monikanavainen puskuroitu sarjaportti) on yksi kortilla olevista sarjaliikenneväylistä. Sen toiminta testataan kytkemällä siihen käyttöjännitteet ja suorittamalla luku- ja kirjoitusoperaatioita tietyille parametreille.

6.5.2 Käyttö- ja referenssijännitteet

Piirikortille syötetään viittä eri käyttö- ja referenssijännitettä, +12V_A, +6V_A, +5V_C, +24V_B ja +5VREF(C). Kortti tekee itse vielä näiden jännitteiden avulla käyttöjännitteet +5V_A, +3.3V_C ja +1.9V_C, sekä referenssijännitteet +10VREFI(A), +10VREFO(A), VREF1V0(C), VREF2V0(C) ja VREF(C). Kirjaimet jännitteiden perässä kuvaavat potentiaaleja, joita vasten jännitteitä mitataan. Kuva 23 havainnollistaa käyttö- ja referenssijännitteiden syöttöä ja muodostamista ohjauskortille.



Kuva 23. Ohjauskortin käyttö- ja referenssijännitteiden muodostus syötetyistä jännitteistä.

Sisäisesti generoidut käyttö- ja referenssijännitteet testataan kolmessa eri vaiheessa: minimijännitesyötöllä maksimikuormituksella (+5V_A 500mA, +10VREFO 10mA), nimellisjännitteellä ilman ulkoista kuormaa, sekä maksimijännitesyötöllä ilman ulkoista kuormaa. Edellä mainitulla kolmiosaisella testillä pystytään siis käymään läpi käyttö- ja referenssijännitteiden toimintaolosuhteiden ääripäät. Jokaisessa vaiheessa mitataan lisäksi jännitteiden +24V_B, +12V_A, +6V_A, +5V_C ja +5VREF(C) virrankulutus.

6.5.3 Reset-piiri ja ulkoinen muisti

Laitteen reset- eli nollauspiiri testataan mittaamalla nollausta edeltävä, sen aikainen, sekä sen jälkeinen jännite. Ulkoinen muisti, joka sisältää pääosin laitteen tarvitsemia ohjelmaparametreja, testataan kirjoittamalla siihen tiettyjä parametriarvoja, katkaisemalla virrat kortilta ja tarkastamalla virtojen kytkemisen jälkeen, ovatko parametriasetukset pysyneet muistissa. Itse laitteen ohjelmakoodi sijaitsee varsinaisen prosessorin omassa muistissa.

6.5.2 RS485-liityntä

Piirikortin RS485-väylä, eli differentiaalinen sarjaväylä testataan sen alustamisen jälkeen muuttamalla tietyn parametrin arvoa ja lukemalla se ohjelmamuistista. RS232-protokollan mukaista väylää puolestaan käytetään hyväksi kaikissa muissa luku- ja kirjoitustapahtumissa koko funktionaalisen testin ajan, eli käytännössä väylän toiminnan vahvistus tulee suoritetuksi useaan kertaan implisiittisesti, eikä sitä siten testata erikseen.

6.5.4 Ohjauskortin suorittamat mittaukset

Piirikortin virranmittauspiirin toiminta testataan syöttämällä jännitteet +1.5V, +7.5V ja +13.0V vaihesignaaleihin IAIN, -IBIN ja ICIN ja lukemalla RS232-väylän kautta ohjauskortin näkemiä jännitearvoja sekä FLT_N-parametrin tilaa. Ylivirran suodatuksen tila mitataan aktivoimalla se parametrimuutoksella ja lukemalla tämän jälkeen parametrin tila. Laitteen tarvitseman DC-jännitteen mittaus tehdään syöttämällä +2.6V signaaliin UC+ ja mittaamalla piirikortin näkemä jännite sarjaväylää pitkin. DC-jännitteen puoliväli UC+/2 mitataan käyttämällä samasta syöttöjännitteestä vastusjaolla johdettua jännitettä 0.69*UC+.

Maasulkumittauksen toiminta perustuu GNDFAULT_N-signaalin aktivoimiseen ja aktivoitumisen todentamiseen. Signaali saadaan ylös syöttämällä ECM-signaalille +2.6 voltin jännite, ja vastaavasti alas syöttämällä siihen 0 voltin jännite. Oikosulkuvikaa tarkkailevan FLT_N-parametrin toiminta testataan syöttämällä 0 ja +2.6 voltin jännitteitä SC_N-signaalille, jolloin vikaa indikoiva parametri aktivoituu ja sammuu vastaavasti.

Sarjaväylää pitkin luetaan useita parametreja, jotka kertovat esimerkiksi laitteeseen kuvattujen optiokorttien kytkemisestä, laitteen koosta tai pääpiirikortin lämpötilasta. Vaihesignaalien lähdössä mahdollisesti tapahtuneen väärinkytkemisen havaitseva UASTAT-, UBSTAT- ja UCSTAT-signaalien toiminta testataan myös sarjaväylän avulla, syöttämällä kortille 0V (sammutus) ja +3.3VAC (aktivointi) jännitteet ja lukemalla muutokset parametrimuistista.

6.5.5 Digitaalinen I/O

Kortin digitaalitulot ja –lähdöt testataan kytkemällä niitä vastaavat liittimet niin, että digitaalilähtöön asetetut arvot voidaan lukea digitaalitulojen kautta.

6.5.6 Analoginen I/O

Analogiatulot testataan sekä virta- että jännitemoodissa. Syötetyt jännitearvot ovat 0V, 5V ja 10V. Vastaavasti syötetyt virta-arvot ovat 0mA, 10mA ja 20mA. Syötetyt jännitteet ja virrat luetaan sarjaväylän kautta. Analogialähdöt testataan pakottamalla niiden arvoiksi 0 mA, 10 mA ja 20mA ja mittaamalla digitaalimittarilla ulostulojen virrat. Virta-arvot 0 mA ja 20 mA ovat ohjauskortille määritellyt minimi- ja maksimiarvot.

6.5.6 PWM-signaalit

Moottorin ohjauksessa tarvittavien pulssinleveysmodulaatiosignaalien oikeellisuus mitataan vaihtovirtamittauksella jokaisen ohjaussignaalin vaiheen, CWL, CWU, CVU, CVL, CUL ja CUU, ylä- ja alahaarasta. Jännitteen takaisinkytkentäsignaalit UASTAT, UBSTAT ja UCSTAT testataan syöttämällä takaisinkytkentäjännitteisiin +3.3V ja tarkastamalla, että ohjauskortti näkee nämä arvot oikein.

6.5.7 Muut toiminnot

Funktionaalinen testi sisältää edellä mainittujen testien lisäksi useita yksittäisiä kohtia, kuten laajennuskorttipaikkojen toimivuuden tarkastuksen. Näitä testejä ei ole työn yhteydessä tarpeellista esitellä tarkemmin.

6.6 Gage R&R -tutkimuksen määrittely tutkimuskohteille

Johtuen testauslaitteiden suuresta määrästä tutkimuksessa jouduttiin valitsemaan tietyt laitteet edustamaan testausjärjestelmän nykytilaa. Työn kannalta mielenkiintoinen asia oli vertailla eri toimittajien testausjärjestelmien aiheuttaman vaihtelun osuutta prosessien kokonaisvariaatioihin. Lisäksi tavoitteena oli selvittää yhden toimittajan sisällä kahden eri testauslaitteen keskinäisiä eroja. Tutkittavien funktionaalisten testausjärjestelmien määräksi muodostui siten neljä. Toimittajalta A tutkimukseen valittiin testauslaitteet numerot 3 ja 4. Testauslaitteista numerot 1 ja 3 ovat keskenään identtisiä, samoin kuin 4 ja 5. Laitteet 1 ja 3 ovat vanhempaa mallia, 4 ja 5 uudempaa. Lisäksi tuotannossa on käytössä testauslaite numero 2, joka on modifikaatio vanhemman sukupolven ohjauskortin funktionaalisesta testauslaitteesta. Tätä testausjärjestelmää ei tutkittu työssä. Valitsemalla tutkimukseen kahta ratkaisuiltaan joiltain osin eroavaa testijärjestelmää voitiin havaittujen erojen olettaa olevan suurempia kuin kahdella identtisellä järjestelmällä. Toimittajalla B testausjärjestelmiä on 2 kappaletta, joten kyseiset kappaleet, 1 ja 2, valittiin automaattisesti tutkimukseen. Toimittajan A testausjärjestelmät 3 ja 4 näkyvät kuvassa 24, toimittajan B testausjärjestelmä 1 kuvassa 25.

Kuva 24. Toimittajan A funktionaaliset testausjärjestelmät 3 ja 4. Ohjauskortti sijoitetaan kuvien alalaidassa näkyvään neulapetiin (harmaan kehikon alla), jonka neulat painautuvat kortin testipisteisiin paineilman avulla kytkintä painamalla.

Kuva 25. Toimittajan B funktionaalinen testausjärjestelmä.

Työn alusta asti oli oletettu, että operaattorin vaikutus mittaustuloksiin, johtuen mittalaitteiston luonteesta, on suhteellisen pientä. Tämä olettamus haluttiin selvittää, joten testiin tarvittiin kaksi operaattoria. Jos operaattorin on mahdollista sijoittaa piirikortti ratkaisevasti eri tavalla testialustaan, voi signaalikontaktin vaihtelu aiheuttaa vaihtelua. Toisaalta AIAG-ryhmän esittämän, automatisoiduille testausjärjestelmille sopivamman määritelmän mukaan [1, s. 53] uusittavuudella voidaan tarkoittaa myös kahden eri mittalaitteen, tai kokonaisen mittausympäristön välistä vaihtelua. Tässä työssä mittausten uusittavuutta käsiteltiin siten kolmella eri tasolla:

- Yhden testausjärjestelmän uusittavuutena, eli mittaamalla ainoastaan operaattorin vaikutusta, kun testauslaite ja –ympäristö pysyvät stabiileina.
- Kahden saman alihankkijan testausjärjestelmän välisenä uusittavuutena, eli mittaamalla kuinka kaksi toteutukseltaan eroavaa testauslaitetta suoriutuvat mittauksista, mutta samassa ympäristössä.
- Kahden eri alihankkijan testausjärjestelmän välisenä uusittavuutena, eli kuinka kaksi eri käyttöolosuhteissa sijaitsevaa ja toteutukseltaan toisistaan eroavaa testauslaitetta suoriutuvat mittauksista.

Uusittavuuden selvittämisen useammalla tasolla toivottiin antavan tietoa siitä, kuinka paljon piirikortilta mitatusta vaihtelusta aiheutuu eri käyttöolosuhteista, ja minkälaisia uusittavuusarvoja eri valmistajien valmistamien laitteiden välillä esiintyy samojen spesifikaatioiden pohjalta. Testausjärjestelmien antamien testaustulosten välinen vertailu suoritettiin vertaamalla kahden järjestelmän mittaustulosten keskiarvoa ja hajontaa

toisiinsa. Tällöin saatiin havainnollistettua, onko eri järjestelmien välillä mahdollista systemaattista eroa ilmoitettujen tulosten suhteen, sekä ovatko tulokset yhtä tarkkoja. Vertailu suoritettiin mittausprosessien kokonaishajontojen välillä, ja jos tuloksissa ilmeni merkittäviä eroja, tutkittiin kyseisen testausvaiheen tuloksia käsittelemällä vaihtelutekijöitä, eli toistettavuutta ja uusittavuutta erillisinä komponentteina.

Mittaukset suorittavat operaattorit valittiin toimittajakohtaisesti laitteita rutiininomaisesti mittaavasta käyttöhenkilökunnasta. Useamman kuin kahden operaattorin käyttö ei ollut tarpeellista, sillä sen ei uskottu tuovan lisäarvoa mittauksiin. Lisäksi tuotannollisten aikataulujen ja resurssien johdosta mittausten määrää jouduttiin rajoittamaan. Jokainen mittauskerta tallentui testausjärjestelmän tietokantaan automaattisesti. Operaattorilla ei siis ollut osuutta lopullisten testitulosten ilmoittamiseen.

Piirikortit valittiin tuotannon testit läpäisseistä korteista niin, että ne edustivat mahdollisimman hyvin odotettuja mittaustuloksia ja hajontaa ohjeiden mukaisesti. Toisaalta näytteiden valinta tutkimuskohteen kaltaiselle tuotteelle ei ole ongelmatonta. Koska taajuusmuuttajan ohjauskortista mitataan useita ominaisuuksia, on näytteen valintaperusteita vaikea esittää. Jos halutaan useita ominaisuuksia, voi sopiva näytekappale olla erottelukykyä ajatellen jossain mittauksessa hyvä, jossain taas huono. Tämä seikka tulee huomioida laskettaessa mittausvaiheiden erottelukykyjä.

Molemmilla toimittajilla käytettiin vain toisen toimittajan valmistamia kortteja, jolloin eri tuotantoprosesseista johtuvat erot eivät vaikuttaneet tuloksiin. Tällöin pystyttiin tarkkailemaan ainoastaan mittausprosessin vaikutusta vaihteluun. Työssä päätettiin käyttää 12 näytettä, sillä piirikorttien kuljetuksen ja käsittelyn aikana tapahtuvaan niiden mahdolliseen vaurioitumiseen haluttiin varautua. Mittauksia ei ollut nykyisten resurssien ja aikataulujen puitteissa mahdollista uusia, joten ne haluttiin suorittaa yhdellä kerralla. Toisaalta mittaukset olisi voitu suorittaa useammallekin ohjauskortille, jos se olisi resurssien puolesta ollut mahdollista. Tällöin tulosten luotettavuutta olisi saatu parannettua.

Näytteiden sisäinen vaihtelu oletettiin tutkimuksessa lähtökohtaisesti merkityksettömäksi. Mittauksista saatujen mittaustulosten mahdollisen vaihtelun ei siis oletettu johtuvan piirikortin sisäisestä vaihtelusta vaan mittaustapahtumassa ilmenevästä vaihtelusta. Oletuksessa on kuitenkin tietoinen virhe, sillä myös ohjauskortti sisältää monia mittausvaiheita ja piiriratkaisuja, jotka voivat aiheuttaa vaihtelua monen muuttujan funktiona. Näytteiden eli ohjauskorttien sisäisen vaihtelun mahdollisuus on kuitenkin vain hyväksyttävä, sillä käytännössä on mahdotonta löytää tuotannosta ideaaleja piirikortteja toistettavuus- ja uusittavuustestiin, joissa sisäisen vaihtelun tiedettäisiin olevan olematonta. Elektronisten tuotteiden mittauksessa on siis omat haasteensa verrattuna perinteisiin, mekaanisiin mittauksiin. Mekaanisissa mittauksissa tuotteen mittaus voidaan yleensä helposti suorittaa tietystä pisteestä, jolloin sen sisäinen vaihtelu voidaan poistaa tuloksista. Sähköisissä mittauksissa tällaisen vaihtelun erittely on vähintäänkin hankalaa. Lisäksi perinteisessä Gage R&R –testissä kohteena on jokin tietty muuttuja, eikä näyte, jossa on kymmeniä tai satoja osittain toisistaan riippuvia mitattavia ominaisuuksia. Gage R&R –testin suorittamista näytteiden sisäinen vaihtelu ei estä, mutta tulokset muuttuvat helposti epäluotettavammiksi ja todellisten

vaihtelusyiden erottaminen hankaloituu. Työssä kuitenkin oletettiin, että testattavan ohjauskortin sisäinen vaihtelu oli suhteessa testausjärjestelmän ja –ympäristön aiheuttamaan vaihteluun verrattuna vähäistä.

Mahdolliset ympäristöolosuhteiden muutokset pyrittiin myös kartoittamaan, jotta esimerkiksi pitkän aikavälin prosessin keskiarvon siirtymän mahdollisuudet voitiin tunnistaa. Eri toimittajien välisten testausjärjestelmien eroihin voivat usein lukeutua varsinkin erilaiset ympäristöolosuhteet [1, s. 54].

Mittalaitteiden kalibrointia ei voitu suorittaa ennen toistettavuus- ja uusittavuusmittauksia, sillä ulkopuolinen yritys hoitaa kalibroinnin 12 kuukauden välein. Kalibroinnin puutteesta johtuva virhe on kuitenkin usein systemaattista virhettä, joten sen vaikutuksen ei uskottu näkyvän merkittävästi lyhyen ajan vaihtelua.

Barrentine määrittää [5, s. 18] sopivaksi mittauskertojen määräksi näytekappaletta kohti kaksi mittausta. 12 näytteen ja kahden operaattorin käyttö täytti siten suosituksen, jonka mukaan näytteiden ja operaattoreiden muodostamien vaihteluvälien määrän tulisi olla 15 tai enemmän. Mittausten luotettavuutta olisi voitu nostaa edelleen suorittamalla jokaiselle kortille useampi mittaus. Luottamusvälinä käytettiin yleisesti käytettyä 99,73% tasoa, eli 6 sigman standardipoikkeamia. Lopullisten mittaustulosten pohjalta analysoitiin mittausprosessissa ilmenevää vaihtelua. Vaihtelukomponentit laskettiin varianssianalyysin avulla käyttäen Minitab-ohjelmaa. Prosessin kokonaisvaihtelua pyrittiin arvioimaan keräämällä normaalista tuotantotestauksesta saatavaa dataa. Data pyrittiin saamaan mahdollisimman lähellä mittausten suorittamista, jolloin pitkän ajan vaihtelun vaikutus kyettiin eliminoimaan mahdollisimman tehokkaasti. Dataa kerättiin kahdelta viikolta ennen mittausten suorittamista.

Mittausprosessin suorituskykyindeksit saatiin mittausdatan ja mittausvaiheiden spesifikaatiorajojen avulla. Pelkkien absoluuttisten toistettavuus- ja uusittavuustulosten kautta mittausprosessien laatua on käytännössä mahdotonta arvioida, koska paljaat hajontaluvut eivät sellaisenaan anna vertailukelpoista informaatiota. Tämän takia työssä verrattiin mittausprosessissa esiintyvää hajontaa prosessin kokonaishajontaan, sekä mittausprosessin hajontaa tuotteelle asetettuja spesifikaatiorajoja vasten. Menetelmillä saatiin tällöin selvitettyä mittausprosessin vaihtelun osuus koko tuotantoprosessista sekä kuva siitä, kuinka suuren osan mittausvaiheen spesifikaatiorajoista mittausprosessista aiheutuva vaihtelua muodostaa.

Jokaista testausjärjestelmän suorittamasta mittauksesta saatua dataa ei analysoitu tässä työssä. Attribuuttidataa antavia testivaiheita ei analysoitu, sillä ne vaativat suuremman määrän mittauskertoja tai eivät olleet muuten mielenkiintoisia tutkimuksen kannalta. Lisäksi tietyt variaabelidataa antavat testivaiheet voitiin jättää analysoimatta, jos niiden merkitys havaittiin vähäiseksi testijärjestelmän tai sen optimoinnin kannalta. Testivaiheet voitiin jakaa niistä saatujen toistettavuus- ja uusittavuuslukujen mukaan neljään eri luokkaan:

1. Toistettavuuden ja uusittavuuden merkitys mittausten kokonaisvaiheluun on siedettävällä tasolla, hyvin vähäistä tai olematonta; mahdollinen vaihtelu on täysin tai lähes täysin näytekappaleiden välistä. Testivaihe ei vaadi tarkempaa analyysiä tai parannuksia.
2. Toistettavuus- tai uusittavuusluvut ovat heikkoja tai huonoja, mutta niiden merkitys itse funktionaalisessa testauksessa on vähäistä tai merkityksetöntä. Testivaihetta voidaan tilanteesta riippuen analysoida ja sille voidaan tarvittaessa osoittaa korjaavia toimenpiteitä.
3. Toistettavuus- tai uusittavuusarvot ovat heikkoja tai huonoja, ja testivaiheet ovat merkityksellisiä. Ongelman lähde tulee kartoittaa ja analysoida mahdollisia jatkotoimenpiteitä varten.
4. Riippumatta toistettavuus- ja uusittavuustuloksista, *ndc*-luku, eli kategorioiden määrä johon testausjärjestelmä pystyy mittaukset jaottelemaan, on alle vaatimusmääritysten. Tällöin mittaustulosten kvantisointivirhe peittää alleen mahdollisen todellisen hajonnan, eikä mittausten perusteella voi tehdä korjaavia toimenpiteitä tuotantoprosessille. Tietyissä tilanteissa heikko *ndc*-arvo voi olla siedettävää, mutta sen hyväksymisestä aiheutuvat riskitekijät on hyvä tiedostaa. Jos *ndc* on vaatimusmääreisiin nähden liian alhainen, tulee mittausvaiheelle esittää korjaavia toimenpiteitä.

Toistettavuus- ja uusittavuustestiin valitut funktionaalisen testin suorittamat variaabelidatamittaukset valittiin kappaleessa 6.5 esitetyn testausspesifikaation vaiheista. Kaikkia mittausvaiheita ei pyritty kuitenkaan käsittelemään niiden laajan lukumäärän takia. Esimerkiksi kaikkien referenssijännitemittauksien toistettavuus- ja uusittavuuslaskelmia ei ollut tarpeellista analysoida niiden samankaltaisuuden takia, vaan testauksesta aiheutuvasta vaihtelusta pyrittiin saamaan kuva esimerkkitapauksien avulla. Ryhmien sisällä esiintyvää variaatiota tosin tarkkailtiin mahdollisien merkittävien eroavuuksien takia. Lisäksi jokaisesta eri mittaustyyppistä, eli jännite-, virta- ja taajuusmittauksesta pyrittiin ottamaan esimerkkejä tutkimukseen. Lisäksi tutkittiin myös ohjauskortilta sarjaväylää pitkin luettavia arvoja, jolloin tuloksien vaihteluun sisältyy osittain myös ohjauskortin itse suorittamien mittausten ja signaalimuunnosten vaihtelua.

Vaikka tutkimuksessa mainittujen toimittajien ohjauskortin funktionaalisten testausjärjestelmien antamaa dataa käytetään harvoin suoraan valmistusprosessien säätöön, on tuloksissa testausjärjestelmästä aiheutuva vaihtelu ja sen suuruus syytä erottaa omaksi tekijäkseen. Funktionaalisen testausjärjestelmän testien mittaustuloksia käytetään lähinnä ensimmäisenä indikaationa mahdollisesta prosessissa tai tuotesuunnittelussa peräisin olevasta ongelmasta. Tämän indikaation jälkeen tehdään yleensä tarkempia, erillisiä mittauksia ja tarvittaessa korjaavia toimenpiteitä. Jos testausjärjestelmä antaa epäluotettavia, eli vääriä tuloksia, niistä aiheutuvat tarkastus-, mittaus- ja korjaustoimenpiteet aiheuttavat helposti ylimääräisiä kuluja. Tämän takia testausjärjestelmien tekemien väärien johtopäätösten määrä tulisi ehdottomasti minimoida analysoimalla niissä esiintyvää vaihtelua.

7 TULOKSET JA ANALYSOINTI

Molemmilta toimittajilta valittiin kaksi testausjärjestelmää toistettavuus- ja uusittavuusmittauksia varten. Toimittajalta A tutkimukseen valittiin testausjärjestelmät numero 3 ja numero 4, toimittajalta B testausjärjestelmät numero 1 ja numero 2. Tässä kappaleessa käsitellään pääosin yhtä testausjärjestelmää molemmilta toimittajilta. Lisäksi molempien toimittajien toisesta järjestelmästä mainitaan tekijöitä, joiden tuloksissa oli havaittavissa eroja tai yhdenmukaisuutta toiseen järjestelmään verrattuna. Molempia toimittajia käsittelevien kappaleiden lopuksi vertailtiin vielä valittujen mittausten hajontaa kahden järjestelmän välillä, eli havainnoitiin kahden eri järjestelmän kykyä toistaa mittaukset identtisellä tavalla. Kappale 7.3 käsittelee lopuksi kahden eri toimittajan järjestelmien välistä hajontaa. Tällöin saadaan kuva siitä, kuinka paljon eroja eri alihankkijoiden testausprosessien antamien tuloksien välillä voi mahdollisesti olla.

Koska kaikkia eri testausvaiheita oli resurssien puitteissa hankala analysoida, valittiin funktionaalisesta testistä esimerkkitapauksia, joille suoritettiin tarkempia analyysejä. Tutkimukseen valittiin sekä tilaajan että loppuasiakkaan kannalta tärkeiden toiminnallisten ominaisuuksien mittauksia sekä vähintään yksi mittaus jokaisesta eri mittaustyypistä (virta-, jännite- ja taajuusmittaukset sekä sarjaväylää pitkin suoritettavat mittaukset). Tutkituiksi mittausvaiheiksi valittiin siten

- sisäisten käyttöjännitteiden mittaus
- sisäisten referenssijännitteiden mittaus
- vaihesignaalien jännitemuotoinen mittaus
- analogiatulo (jännite- sekä virtamittaus sarjaväylää pitkin)
- analogialähtö (virtamittaus)
- PWM-signaalien mittaus (vaihtojännite sekä taajuusmittaus).

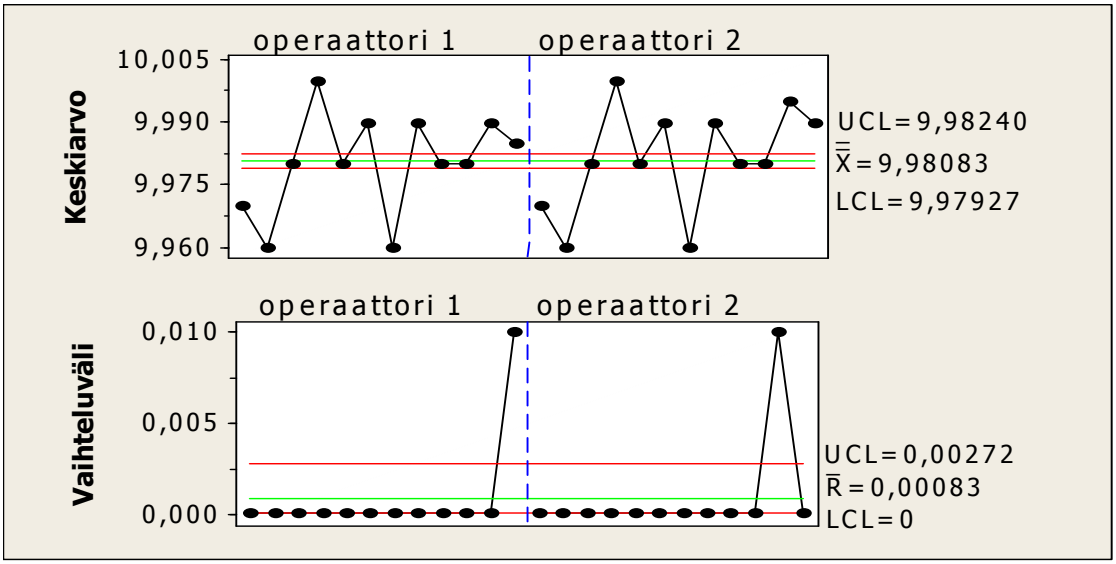
Edellä mainituista mittausvaiheista loppukäyttäjän eli asiakkaan kannalta tärkeimmät mittaukset ovat etenkin analogialähtöjen ja –tulojen tarkkuus, sillä niitä käytetään monissa sovelluksissa prosessien säädössä, ja niiden odotetaan täyttävän luvatut spesifikaatiot. Eräät virta- ja jännitemittaukset jätettiin kokonaan tutkimatta, sillä kyseisille ominaisuuksille sallittiin spesifikaatioissa suhteellisen suuri vaihtelu, tai niiden mittaukset tapahtuivat aina samasta mittauspisteestä saman testin aikana, jolloin vaihtelussa ei odotettu tapahtuvan merkittäviä muutoksia. Suuri vaihtelu sallitaan esimerkiksi testausjärjestelmän syöttövirroille, sillä ohjauskortin regulaattoripiirit tasaavat kuitenkin syötettyä tehoa. Ylivirtamittauksissa puolestaan luetaan samoja signaaleja kuin normaalissa virtamittauksessa, eli mittaukset ovat keskenään hyvin identtisiä. Myös signaalien syöttö tapahtuu molemmissa testeissä samoja testipisteitä käyttäen.

Tekstissä mainittujen mittausvaiheiden tarkemmat numeeriset tulokset ovat liitteessä X.

7.1 Toimittaja A

Toimittajan A Testausjärjestelmän 3 jännitteenmittauksen toistettavuutta ja uusittavuutta tarkasteltiin tutkimalla ohjauskortin sisäisten käyttö- ja referenssijännitteiden mittausta. Syöttöjännitteistä reguloitujen sisäisten jännitteiden mittauksissa esiintyi huomattavia eroja toistettavuusvirheen suhteen. 3,3 ja 1,9 voltin mittausvaiheissa toistettavuuden osuus kokonaisvaihtelusta oli merkittävää. 3,3 voltin jännitteellä mittausprosessista aiheutunut vaihtelu muodosti noin 22% kokonaisvaihtelusta, 1,9 voltin mittauksessa noin 38%. Molemmissa tapauksissa kaikki vaihtelu oli peräisin toistettavuusvirheestä, eli mittauksien uusittavuus oli erinomaisella tasolla. Prosessien toleransseihin suhteutettuna mittausten toistettavuus- ja uusittavuusvirhe ei ole kuitenkaan merkittävää eikä siten muodosta ongelmia.

Näytteiden vaihteluvälit olivat muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta nollia ja näytteiden keskiarvot samoja. Toisin sanoen, vaihtelua suuremmaksi ongelmaksi osoittautui mittausvaiheen erottelukyky. Mikään edellä mainituista testausvaiheista ei kyennyt erottelemaan näytteitä useampaan kuin kahteen kategoriaan. Erottelukyvyn riittämättömyys tuli esille useissa muissakin mittauksissa, *ndc*-arvon ollessa yleensä välillä 1-4. Tällöin mittaustulosten perusteella ei voida säätää varsinaista tuotantoprosessia. Toisaalta esimerkiksi sisäinen 10 voltin referenssijännitemittaus kykeni puolestaan erottelemaan tulokset kymmeneen eri luokkaan, mikä riittää täyttämään erottelukykyvaatimuksen. Kuvasta 26 nähdään, että keskiarvokortin ohjausrajaväli on kapea, mutta useat pisteet ovat sen ulkopuolella, mikä kertoo erottelukyvyn olevan riittävällä tasolla. Lisäksi vaihteluvälit ovat pääsääntöisesti nollia, joten voidaan todeta, että operaattorilla ei ole vaikutusta kyseiseen mittaukseen.



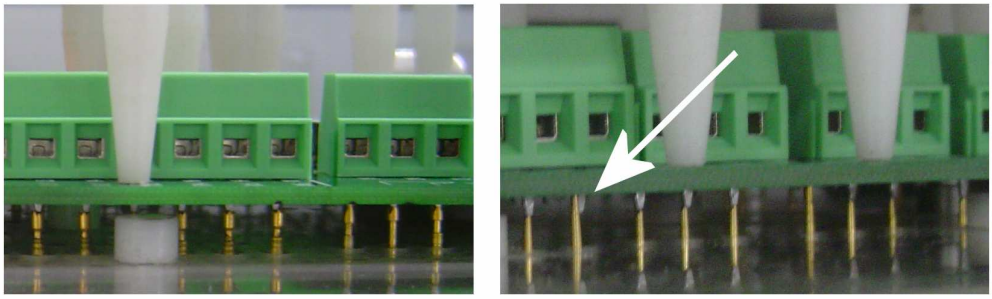
Kuva 26. Ohjauskortin sisäisen 10 voltin referenssijännitteen (+10VREFI(A)) mittaustulokset testausjärjestelmällä 3.

Kahden voltin sisäisen referenssin mittaus antoi *ndc*-arvoksi kuitenkin ainoastaan kolme, mitä puolestaan ei voida pitää riittävänä. Haasteelliseksi ongelmaksi tutkimuksen kaltaisella kohteella muodostuukin juuri mittalaitteiden erottelukyvyn parantaminen. Todellista mittaustarkkuutta on vaikea nostaa, sillä varsinkin sähköiset häiriöt mittausympäristössä peittävät helposti alleen useampidesimaalisen datan todellisen tarkkuuden. Pyöristetympiä tuloksia käytettäessä erottelukyky puolestaan heikkenee. Näin ollen luokittelukyvyn epätarkkuus on monesti vain hyväksyttävä, ja prosessien säätö on tehtävä epäluotettavampien tulosten valossa tai erillisillä laboratorio-olosuhteissa suoritettavilla mahdollisesti häiriöttömämmillä ja tarkemmilla testeillä.

Myös uusittavuusvirhettä esiintyi osassa mittauksista. Esimerkiksi sisäisten yhden ja kahden voltin referenssijännitteiden (VREF1V0(C) ja VREF2V0(C)) mittauksissa uusittavuus muodosti noin 20-30% kokonaisvaihtelusta. Ilmiötä on vaikea selittää tarkasti, sillä suurin osa muiden testausvaiheiden vaihtelusta oli joko näytteiden välistä virhettä tai toistettavuusvirhettä. Mittauksia suoritettaessa operaattorin piirikorttien käsittely oli hyvin identtistä eri operaattoreiden välillä, eikä operaattori käytännössä edes voi vaikuttaa pneumaattisesti toimivan neulapedin toimintaan. Ajatus uusittavuusvirheen johtumisesta ainoastaan testausjärjestelmää käyttäneestä henkilöstä voidaan siten pitkälti hylätä. Mahdollisia uusittavuutta heikentäviä tekijöitä voivat puolestaan olla esimerkiksi

- testauslaitteiston ja ohjauskorttien lämpötilojen muutokset operaattoreiden suorittamien mittausten välillä
- testausympäristöstä peräisin olevien häiriösignaalien vaihteleva kytkeytyminen mittausjohtimiin
- mittaneulojen asentojen muutos mittausten välillä.

Mittausten aikana havaittiin, että toimittajan A testausjärjestelmän 4 suorien mittaneulojen kontakti läpiladottuihin komponentteihin oli vaihtelevaa, kuten kuva 27 osoittaa. Suositeltavaa olisi, että kontakti läpiladottuihin komponentteihin suoritettaisiin kruunumallisilla neuloilla suorien neulojen sijaan.

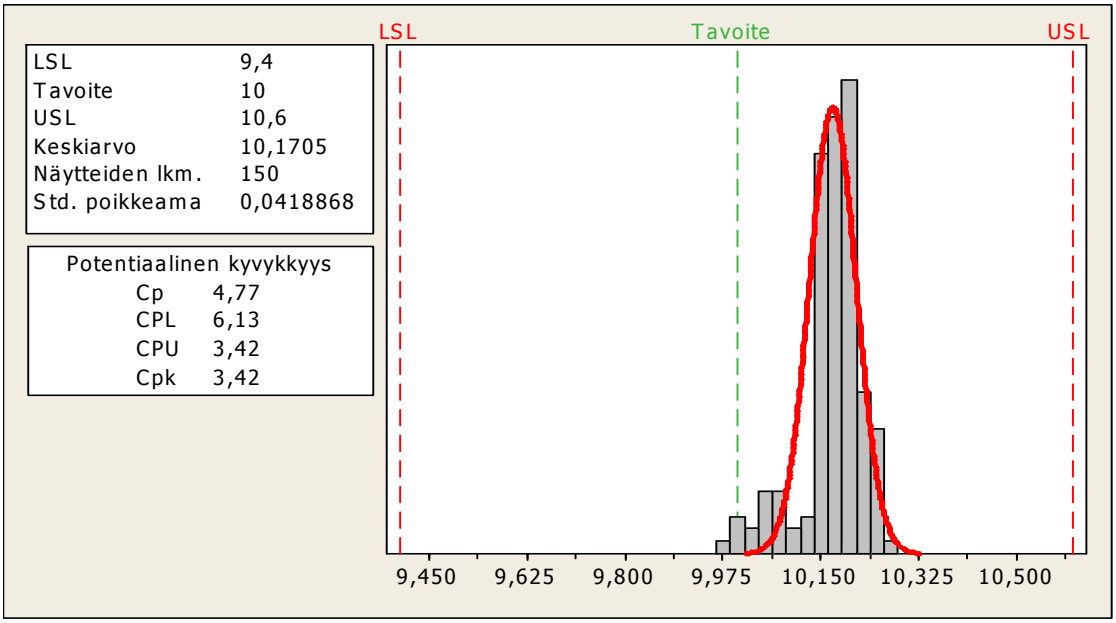


Kuva 27. Vasemmanpuoleisen kuvan kruununeulat kohdistuvat hyvin läpiladottujen komponenttien jalkoihin, suorat neulat taipuvat välillä hieman ohi jalan kärjen (nuolen osoittama kohta).

Neulojen kontakti kuvassa näkyvän liittimen jalkaan saattaa myös ajan kuluessa heikentyä, jos neula taipuu jatkuvalla testauksella rasitettaessa. Staattisen sähkön purkautuminen operaattorista piirikortille on hoidettu maadoitusrannekkeiden ja eristävien muovihansikkaiden käytöllä. Neulojen asentojen muutos voitaisiin tulkita myös operaattorista aiheutuvaksi, mutta käytännössä neulojen asentojen kontrollointi testauksen aikana havaittiin mahdottomaksi.

Virranmittauksessa esiintyvää vaihtelua tarkasteltiin analogialähtöjen mittauksen avulla. Analogialähtöjen tarkkuus on taajuusmuuttajien loppuasiakkaidenkin kannalta tärkeä tekijä, joten lähtöjä mittaavien testausvaiheiden toivotaan olevan mahdollisimman tarkkoja. Mittaukset osoittivat, että käytännössä kaikki analogialähdöissä havaittu vaihtelu aiheutui itse näytteistä, eikä toistettavuus- tai uusittavuusvirhettä esiintynyt kuin marginaalisesti. Näytteiden välinen vaihtelu ei ollut myöskään merkittävää. Normaalista tuotannon testausdatasta muodostettiin histogrammi ja laskettiin prosessin kyvykkyysluvut.

Kuten kuva 28 osoittaa, analogialähtöjen tarkkuus on toleranssien sisällä, vaikkakin keskittynyt hieman enemmän spesifikaation ylärajan (USL) suuntaan. Prosessin kyvykkyys (C_P = 4,77, C_{Pk} = 3,42) on erinomaisella tasolla, joten voidaan todeta, että analogialähtöjen tarkkuus ja niitä mittaavan testausjärjestelmän tarkkuus ovat hyvällä tasolla, eikä testausvaiheen pitäisi tuottaa vääriä johtopäätöksiä. On kuitenkin hyvä huomioida, että kuvan kaltainen kyvykkyysanalyysi tulisi suorittaa tietyin väliajoin mahdollisen prosessin keskiarvosiirtymän havaitsemiseksi ja ongelmien ennaltaehkäisemiseksi.



Kuva 28. Analogiaulostulon 2 kyvykkyys testausjärjestelmällä 3 tilaajan eli ABB:n spesifikaatiota vasten.

Vaikka testausjärjestelmän ohjauskortilta lukemat tietyt arvot saadaan digitaalisessa muodossa ohjauskortin sarjaväylää pitkin, on testausjärjestelmällä silti vaikutus tulosten tarkkuuteen. Testausjärjestelmän syöttämien testaukseen tarvittavien jännitteiden ja virtojen tarkkuus vaikuttaa tuloksiin, kuten esimerkiksi virranmittauksessa, jossa testausjärjestelmä syöttää jännitetasoja vaihesignaaleihin, joita ohjauskortti mittaa.

Ohjauskortin suorittamassa virranmittauksessa ilmenevä vaihtelu osoittautui lähes olemattomaksi. Vaihtelu oli lähes täysin näytteiden välistä. Voidaan siis olettaa, että suurin vaihtelutekijä kyseisissä mittauksissa on ohjauskortissa käytettyjen komponenttien eroissa, eikä testausjärjestelmän syöttämien arvojen tarkkuuksissa.

Analogiatulojen (AI) vaihtelu vaikutti varianssianalyysin tulosten mukaan riippuvan pitkälti syöttöjännitteen tai –virran suuruudesta. Molemmat analogiatulot testataan kahdessa vaiheessa:

- Virtamuodossa syöttämällä tuloliittimeen 0mA, 10mA sekä 20mA virrat ja mittaamalla ohjauskortin havaitsemat arvot sarjaväylää pitkin.
- Jännitemuodossa syöttämällä tuloliittimeen 0V, 5V ja 10V jännitteet ja mittaamalla ohjauskortin havaitsemat arvot sarjaväylää pitkin.

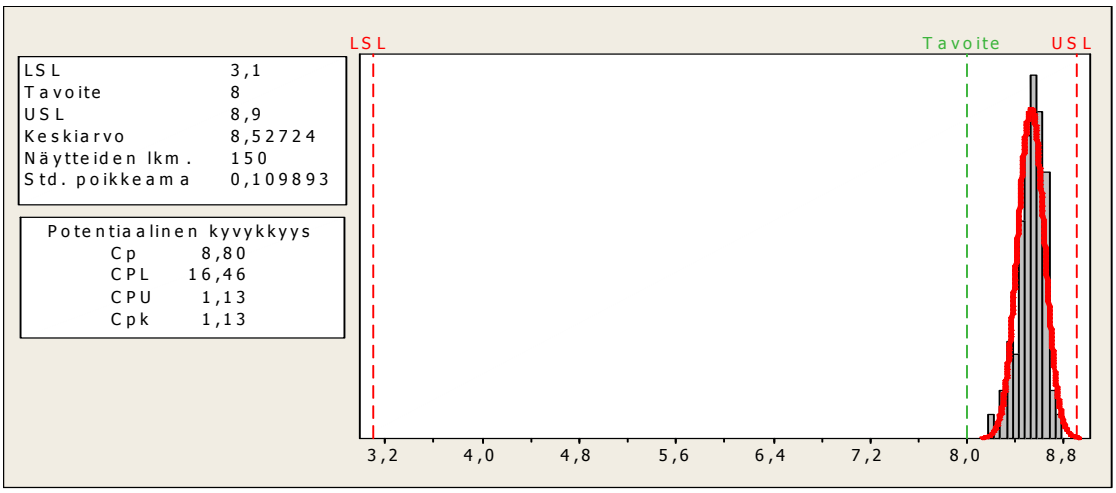
Syöttämällä tuloon sekä 0mA virta että 0V jännite vaihtelua ei esiintynyt lainkaan, mutta 10mA/20mA sekä 5V/10V syötöillä vaihtelua esiintyi sekä mittaustapahtumaan että toleranssiväleihin suhteutettuna erittäin runsaasti. Tuloksien eroavaisuuksien voidaan arvioida selittyvän nollajännitteestä tai -virrasta poikkeavien virtojen ja jännitteiden syötön epätasaisuudella. Tulokset ovat tuskin sattumaa, sillä molemmat toimittajan A testausjärjestelmistä antoivat hyvin samankaltaisia tuloksia. Syy vaihtelun suureen määrään aiheutuu todennäköisesti myös osin käytetystä mittaustarkkuudesta. Testausjärjestelmä mittaa tulokset lukemalla arvot ohjauskortin prosessorilta kokonaislukuina. Tämä johtaa erittäin heikkoon testausvaiheen erottelukykyyn, sekä aiheuttaa todennäköisesti todellista suuremman vaihtelun ilmenemistä testaustuloksissa pyöristysvirheen takia. Ohjauskortilla analogiatulo on esitetty yhden desimaalin tarkkuudella, joten tämän luvun mittaaminen olisi suositeltavaa kyseisessä testausvaiheessa.

Testauslokitiedostoja tutkittiin analogiatulojen mittausten osalta, jotta voitiin selvittää voisiko mittausvaiheessa ilmenevä hajonta aiheuttaa virheellisiä päätelmiä tuloksissa. Lokitiedostoissa kyseisissä vaiheissa vialliseksi todetut kortit eivät olleet kuitenkaan ylittäneet tai alittaneet spesifikaatiorajoja nimellisesti, vaan viat johtuivat enimmäkseen jännite/virta -valintakytkimen väärästä asennosta, eli mittaustulokset olivat selkeästi vääriä (erityissyitä) eivätkä vaihtelusta aiheutuneita.

Taajuusmuuttajan pääpiirikortille syötettävien pulssinleveysmodulaatiosignaalien (PWM-signaalien) AC-muodossa mitattujen jännitteiden mittausvaiheissa esiintyi erisuuruista vaihtelua. Tietyissä mittauksissa lähes kaikki havaittu vaihtelu aiheutui

näytteiden välisistä eroista, mutta taas toisissa toistettavuusvirhe muodosti merkittävän osan variaatiosta. Kuuden vaihtojännitemuodossa mitatun signaalin mittausvaiheiden tulosten erottelukyky oli kuitenkin vain kaksi, joten mittaustulosten luotettavuus tulee kyseenalaistaa. Voi olla, että mittaustuloksissa ilmenevä kvantisointivirhe aiheuttaa ”keinotekoista” vaihtelua tuloksiin, kun mittalaite ei kykene havaitsemaan nykyistä pienempiä muutoksia. Prosessin toleransseihin suhteutettuna vaihtelu on kuitenkin marginaalista (alle 5% spesifikaatiorajoista), joten vaihtelu ei sinänsä aiheuta vääriä johtopäätöksiä ohjauskorttien laadun suhteen. Prosessin säätäminen suoraan testausjärjestelmän tulosten avulla on teoriassa kuitenkin hyvin epäluotettavaa.

PWM-signaalien kytkentätaajuuden mittaus osoitti, että toimittajan A käyttämän toleranssivälin, 3.1 kHz…8.9, kHz alarajaa olisi teoriassa varaa tiukentaa, kuten kuvan 29 kyvykkyyskuva näyttää. Prosessi on keskittynyt ylärajan tuntumaan. Alhainen spesifikaation alaraja johtuu 60 hertsin jänniteverkkoja käyttäville maille tarkoitetusta ohjelmistosta, joka käyttää laajempialaisesti toleranssiväliä. Testauksessa on siis päädytty yhdistämään eri markkina-alueiden ohjelmistojen vaatimukset, jolloin 50 hertsin jänniteverkoille tarkoitetulla ohjauskortin ohjelmistolla toleranssit ovat väljemmät. Funktionaalisen testausjärjestelmän suorittamilta PWM-signaalin kytkentätaajuuden mittauksilta ei kuitenkaan odoteta erityisen tarkkoja tuloksia, vaan testillä enemmänkin tarkoitetaan, että signaalin taajuus on oikeaa kertaluokkaa. Ideaalisesti keskittyneelle prosessille laskettu kyvykkyysindeksi (C_P) on erinomaisella tasolla, eli hajonta on vähäistä suhteutettuna toleranssiväliin, jos jakauma oletetaan keskittyneeksi kyseiselle välille. Toisaalta, jos jakauman sijainti spesifikaatiorajoihin nähden otetaan huomioon (C_{Pk}), kyvykkyyslukema putoaa alle suositellun 1.33 rajan, vaikkei tosin merkittävästi. Suurimmaksi ongelmaksi muodostuu mittausvaiheen toistettavuuden korkea vaihtelu. Mittausjärjestelmän aiheuttaman virheen takia joissain tapauksissa vialliseksi luokiteltu ohjauskortti saattaa todellisuudessa olla toimiva. Virheellisen päätelmän todennäköisyys on pieni, mutta se kannattaa ottaa huomioon testauksessa.

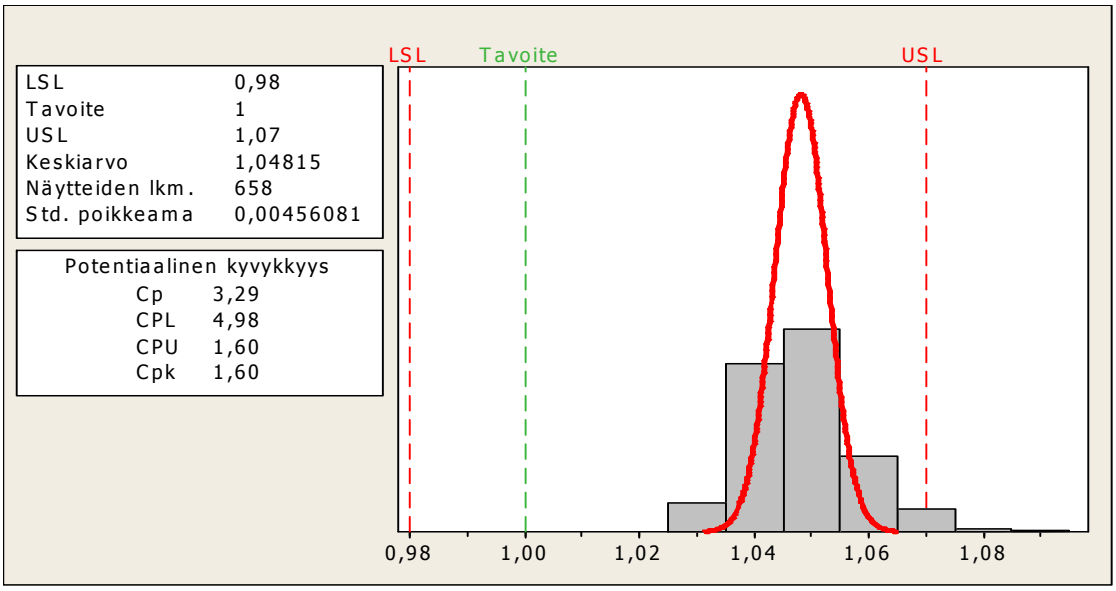


Kuva 29. PWM-signaalin kyvykkyys testausjärjestelmällä 3.

Ohjauskorttien testaustuloksia sisältäviä lokitiedostoja tutkittiin sekä toistettavuus- ja uusittavuusmittauksien aikaiselta että sitä edeltävältä viikolta. Testausdatasta etsittiin mittauksia, joissa vialliseksi havaitut piirikortit ovat ylittäneet tai alittaneet määritellyt spesifikaatiorajat lievästi. Tutkitut lokitiedostot sisälsivät yhteensä 658 testattua korttia, joista yhteensä 27 ei läpäissyt testiä ensimmäisellä testauskerralla.

Lokitiedostot osoittivat, että testausjärjestelmässä 3 viisi ohjauskorttia oli ylittänyt joko yhden tai kahden voltin sisäisen referenssijännitteen (VREF1V0(C) ja VREF2V0(C)) mittauksen spesifikaatiorajat. Kyseiset referenssijännitteiden mittausvaiheet olivat tutkitusta testausdatasta ainoat, joissa spesifikaatiorajojen ylitys oli lievää, eli kyseessä voisi mahdollisesti olla testausjärjestelmän aiheuttamasta vaihtelusta johtuva, virheellinen päätelmä.

Kuva 30 esittää VREF1V0(C)-jännitteen mittausten histogrammia ja sille sovitettua normaalijakaumakuvaajaa. Ottaen huomioon, että mittausvaiheen vaihtelu on sekä prosessin kokonaisvaihtelusta että spesifikaatiorajojen välisestä alueesta noin 20-35% luokkaa, voidaan epäillä, että ainakin osa kyseisessä testausvaiheessa vialliseksi luokitelluista korteista saattaa olla todellisuudessa spesifikaatioiden mukaisia. Myös testausjärjestelmässä 4 kyseisten mittausvaiheiden tulokset olivat painottuneet ylemmän spesifikaatiorajan tuntumaan, mutta testausjärjestelmän puutteellisen ohjelmakoodin takia kyseisessä vaiheessa vikaantuneiden korttien testaustuloksia ei saatu esille, sillä järjestelmä ei tallentanut niitä lokitiedostoon ennen testin keskeytymistä.



Kuva 30. Referenssijännitteen (VREF1V0(C)) kyvykkyys testausjärjestelmällä 3.

Toimittajan A testausjärjestelmälle 4 suoritettiin analyysit samoille mittausvaiheille kuin järjestelmälle 3, jotta järjestelmiä pystyttiin myös vertailemaan toisiinsa. Suoritetut

toistettavuus- ja uusittavuusmittaukset osoittivat sekä hajonnan määrän että hajonnan suhteessa määriteltyihin toleranssiväleihin olevan lähellä testausjärjestelmän 3 tasoa. Vaihtelua hajontojen välillä kuitenkin esiintyi. Suurimpia eroja oli toistettavuuden ja uusittavuuden erilainen painottuminen, mutta kokonaisvaihtelu pysyi kuitenkin yleisesti hyvin identtisellä tasolla. Esimerkiksi analogialähtöjen, PWM-signaalien ja jännitemuotoisten vaihesignaalien mittausvaiheet aiheuttivat keskimäärin lähes saman verran hajontaa tuloksissa. Myös erottelukyky mittausvaiheissa oli hyvin identtistä testausjärjestelmien välillä. Useissa mittauksissa luokittelukyky oli hyvin alhainen. Erottelukyvyn alhaisuus voi selittää myös osin toistettavuus- ja uusittavuuskomponenttien erilaista painottumista.

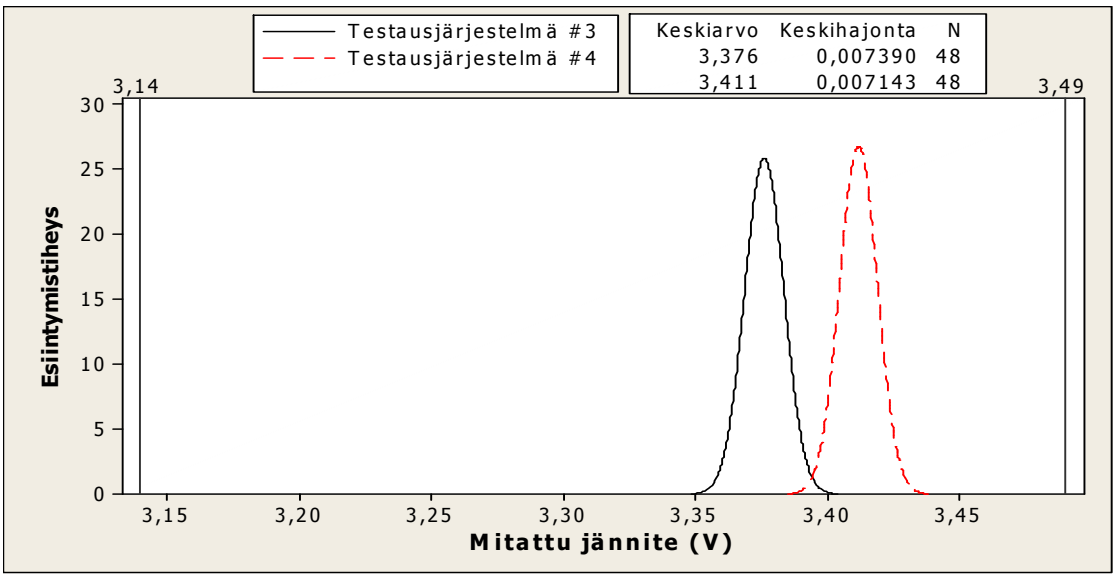
Yksi mielenkiintoinen havainto molempia toimittajan A testausjärjestelmiä analysoidessa oli välipiirijännitteen mittaus. UC+ -jännitteen mittauksessa molemmilla testausjärjestelmillä noin 11-13% havaitusta vaihtelusta liittyi laitteiden toistettavuuteen, ja loput näytteiden väliseen vaihteluun. Kuitenkin DC-jännitteen puolivälin, eli sarjaan kytkettyjen kondensaattoreiden välipisteen (UC+/2) jännitteenmittauksessa luvut olivat päinvastaisia, mittausprosessista aiheutuvan vaihtelun muodostaessa lähes kaiken havaitun vaihtelun. Mittausprosessin variaation osuus muodosti myös suhteellisen suuren, noin 35-41% osuuden toleranssivälistä. Kyseisessä mittausvaihteessa ilmenevä vaihtelu on siis erittäin suurta suhteessa spesifikaatiorajoihin ja näytteiden väliseen luonnolliseen vaihteluun verrattuna. Molemmissa mittausvaiheissa (UC+ ja UC+/2) on samat spesifikaatiorajat.

Välipiirijännitteiden mittausten tulokset vaikuttaisivat siis indikoivan, että testausjärjestelmät mittaavat ainakin kyseisessä kohdassa ohjauskorttia hyvin samalla tavalla. Näytteiden välisen vaihtelun eron muutos kahden mittausvaiheen välillä voi puolestaan tarkoittaa, että ohjauskortti ei kykene itse sisäisesti mittaamaan testausjärjestelmän kahteen eri pisteeseen syöttämää jännitettä yhtä tarkasti. Tämä on pitkälti selitettävissä piiritason ratkaisuilla kyseisten jännitemittausten kohdalla. Välipiirijännitteen UC+ -mittaaminen tapahtuu eri tavalla kuin sarjassa olevien välipiirikondensaattoreiden keskeltä (UC+/2) tapahtuva mittaus niin laite- kuin ohjelmistotasolla jännitetietojen eri käyttökohteiden takia. UC+ -jännitemittausta käytetään moottorin pyörimisnopeuden säätöön, kun taas UC+/2 –jännitteellä tarkkaillaan ainoastaan kondensaattoreiden välistä tasapainoa taajuusmuuttajan tuotantovaiheessa. Erot vaikuttavat suoraan siihen, kuinka ison osuuden koko mittausprosessissa havaitusta vaihtelusta näytteiden välinen vaihtelu muodostaa.

Yksi tutkimuskohteista oli yhden toimittajan eri testausjärjestelmien välisen uusittavuuden selvittäminen. Tällöin vertailukohteena on kahden eri järjestelmän antamien tulosten jakauman paikka (systemaattinen ero) ja hajonta. Näin voidaan havainnoida eroja, joita syntyy kun samojen spesifikaatioiden pohjalta laaditaan useita testausjärjestelmiä osittain eri ratkaisuin. Pahimmillaan erot järjestelmien välillä voivat näkyä niin, että valmistettu piirikortti läpäisee testit tietyllä testauslaitteella, mutta tietyllä laitteella ei. Vaihtelun määrä eri mittauslaitteissa yhdistettynä piirikorttiin, jonka tietty ominaisuus on esimerkiksi tuotantoprosessista johtuen spesifikaatiorajojen toisessa ääripäässä, voi aiheuttaa virheellisiä päätelmiä kortin laadun suhteen.

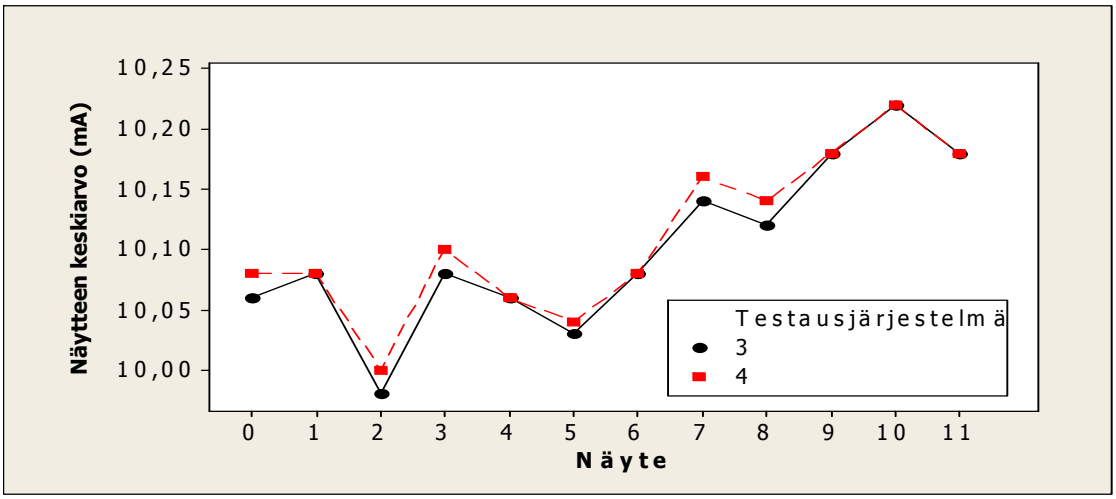
Toimittajan A testausjärjestelmien 3 ja 4 välistä uusittavuutta tarkkailtiin aiemmin mainittujen mittausvaiheiden avulla. Yksi operaattori suoritti mittaukset molemmilla testausjärjestelmillä, jolloin operaattorista aiheutuvan vaihtelun voidaan olettaa olevan molemmissa tuloksissa käytännössä samansuuruista. Jos voidaan olettaa, että operaattorilla ei ole todellista vaikutusta mittauksiin, tulosten hajonta muodostuu käytännössä kokonaan testausjärjestelmien aiheuttamasta ja näytteiden välisestä vaihtelusta. Ympäristöolosuhteet olivat käytännössä identtiset, sillä järjestelmät sijaitsivat samassa tilassa, ja ohjauskortteille tehdyt funktionaaliset testit suoritettiin vuorotellen testausjärjestelmillä niin, että tulokset saatiin lyhyen aikavälin aikana.

Kuva 31 havainnollistaa, kuinka sisäisen +3.3 voltin jännitteen mittauksen hajonta on hyvin samansuuruista testausjärjestelmien tulosten välillä, mutta järjestelmä 4 antaa systemaattisesti hieman suurempia tuloksia. Molemmat jakaumat ovat myös keskittyneet hieman ylemmän toleranssirajan (+3.49V) suuntaan. Absoluuttiset erot tuloksissa ovat kuitenkin hyvin vähäisiä.



Kuva 31. Testausjärjestelmien 3 ja 4 hajonnat sisäisen +3.3V jännitteen mittauksessa

Analogialähtöjen mittauksessa vaihtelu kahden eri testausjärjestelmän välillä oli lähes olematonta. Kuva 32 havainnollistaa testausjärjestelmän ja näytteiden välistä interaktiota mitattaessa analogialähdön 1 ulostulovirtoja. Kuten kuvasta voi nähdä, testausjärjestelmät antavat järjestelmällisesti hyvin yhdenmukaisia tuloksia mitatuille kahdelletoista näytteelle. Interaktiolla kuvataan tässä tapauksessa mitatun tuloksen riippuvuutta käytetystä testausjärjestelmästä. Jos tulokset kulkevat kuvaajassa päällekkäin, voidaan todeta, että käytetyllä testauslaitteella ei ole vaikutusta tuloksiin.



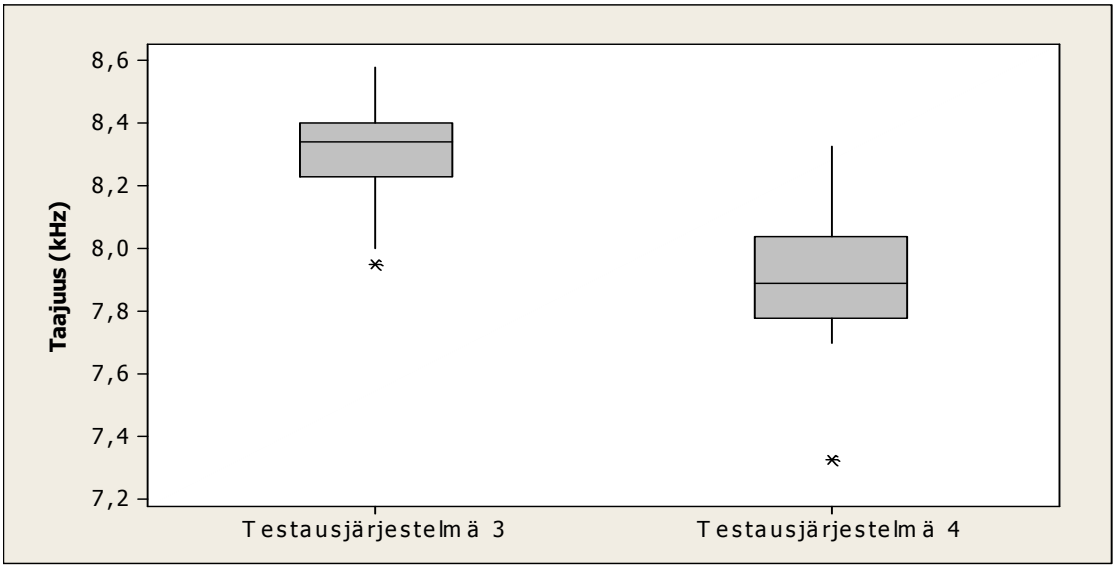
Kuva 32. Analogialähdön 1 ulostulovirtojen mittauksen interaktio tutkittujen testausjärjestelmien ja näytteiden välillä. Interaktiota ei ole, eli tulos ei riipu käytetystä testausjärjestelmästä, jos kuvaajat kulkevat päällekkäin.

Kuten aiemmin mainittiin, analogiatulojen mittausvaiheissa havaittu vaihtelu puolestaan riippui molemmissa testausjärjestelmissä pitkälti käytetystä syöttöjännitteestä ja -virrasta. Testausjärjestelmien 3 ja 4 välinen uusittavuus oli pientä, eli järjestelmät antoivat hyvin samankaltaisia tuloksia samalla hajontamäärällä.

PWM-signaalien AC-muotoisten jännitteiden mittaus oli testausjärjestelmien välillä käytännössä identtistä. Kummassakin järjestelmässä vaihtelu oli viidessä vaihtojännitemittauksessa täysin näytteiden välistä, ainoastaan yhdessä mittauksessa molemmat testausjärjestelmät muodostivat 21-24% osuuden kokonaisvaihtelusta. Ero muiden mittausten välillä johtuu kummankin testausjärjestelmän kohdalla hyvin pienestä 0,010 voltin erosta yhden näytteen mittauksien välillä. Tämä ero saikin suhteettoman suuren painoarvon toistettavuus- ja uusittavuustuloksissa, sillä muut näytteiden mittaustulokset toistuivat täsmällisesti. Mittauksessa tuleekin kiinnittää huomiota mittausvirheen osuuteen toleranssirajoista. Rajoihin suhteutettuna lievä toistettavuusvirhe on hyvin vähäistä (noin viisi prosenttia toleranssivälistä). Kokonaisuutena PWM-signaalien jännitemuotoisen mittauksen uusittavuus kahden toimittaja A:n testausjärjestelmän välillä on hyvällä tasolla. Kuitenkin myös kyseisessä mittausvaiheessa suurimmaksi ongelmaksi prosessin kehitystä ajatellen muodostuu alhainen ndc-arvo, sillä kyseisten mittaustulosten valossa järjestelmä ei osaa erotella tuloksia toisistaan toivotulla tarkkuudella.

PWM-signaalien kytkentätaajuusmittaukset osoittivat, että molemmat testausjärjestelmät ovat hyvin kykenemättömiä uusimaan mittauksia yhtenevällä tavalla. Tuloksien mukaan lähes kaikki havaittu vaihtelu oli peräisin järjestelmien sisäisestä toistettavuusvirheestä, osin myös uusittavuusvirheestä. Näytteiden välinen vaihtelu oli mittausprosessissa siten suhteessa vähäistä. Testausjärjestelmien mittaamien tulosten hajontaa ja keskittymistä kuvaava boxplot-graafi on nähtävillä kuvassa 33. Boxplot-graafi havainnollistaa, kuinka

tietty lukujoukko on keskittynyt. Harmaan laatikon poikki kulkeva viiva kuvaa mediaania (50. prosenttipiste, eli järjestykseen asetetuista havainnoista keskimmäinen). Viivan molemmille puolille jatkuvat laatikot ovat puolestaan yläkvartaali (75. prosenttipiste, mediaanin yläpuolisten lukujen mediaani) sekä alakvartaali (25. prosenttipiste, mediaanin alapuolisten lukujen mediaani). Viivat jotka jatkuvat harmaan laatikon ulkopuolelle kuvaavat lukujoukon minimiä ja maksimia. Mahdolliset tähdellä merkityt arvot viivojen ulkopuolella ovat niin sanottuja ulkopuolisia lukuja (engl. *outliers*) eli lukuarvoja joita ei oteta laskelmiin mukaan niiden jakaumaan sopimattomuuden takia. Ne siis poikkeavat muusta aineistosta merkittävästi. Graafista voi havaita, että kahden eri testausjärjestelmän väliset tulokset poikkeavat keskimäärin noin 0,4 kilohertsin verran. Molempien testausjärjestelmien mittaamissa tuloksissa esiintyi myös arvoja, jotka poikkesivat merkittävästi muusta aineistosta, eli ne tulkittiin ulkopuolisiksi arvoiksi ja jätettiin laskelmien ulkopuolelle. [34]



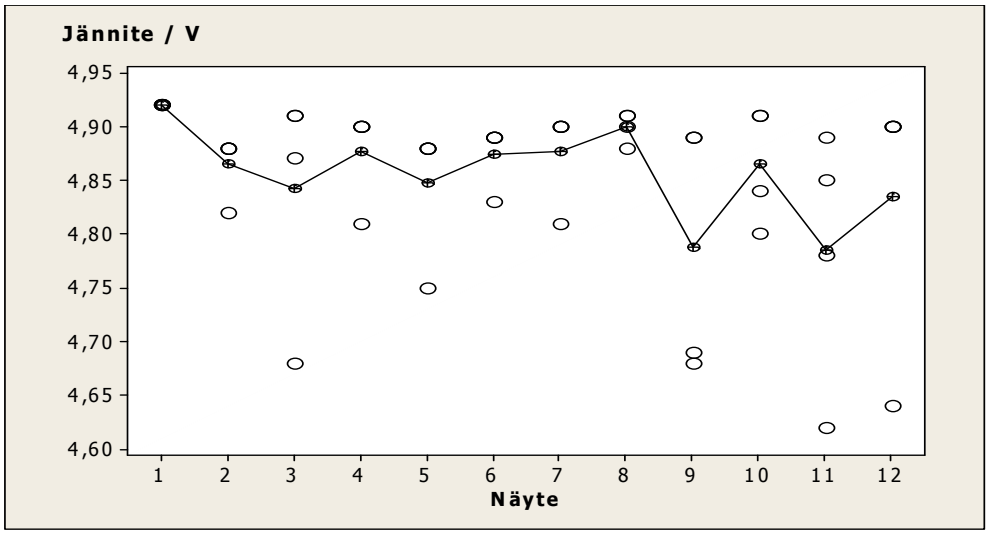
Kuva 33. Boxplot-kuvaaja testausjärjestelmien 3 ja 4 tuloksien hajonnasta sekä keskittymisestä yhdessä PWM-signaalin kytkentätaajuuden mittausvaiheessa. Kuvasta voi päätellä, että testausjärjestelmien antamien tulosten välillä on systemaattista eroa, eivätkä tulokset ole kummallakaan järjestelmällä täysin normaalijakautuneita. Tähdellä kuvatut arvot poikkeavat aineistosta merkittävästi.

Toleranssiväleihin suhteutettuna PWM-signaalin taajuusmuotoiset mittaustulokset eivät olleet kuitenkaan huonoja. Tulosten valossa voidaan sanoa, että taajuusmittaukset ovat testausjärjestelmille vaikeimpia mittauksia toistaa. Ottaen huomioon myös jo aiemmin testausjärjestelmän 3 yhteydessä mainitun tulosten painottumisen ylemmän spesifikaatiorajan tuntumaan voi olla, että kyseisissä mittausvaiheissa vialliseksi todettu ohjauskortti saattaa todellisuudessa olla toimiva. Tutkimuksen aikana kerättyjen lokitiedostojen mukaan kaikki testatut ohjauskortit kuitenkin läpäisivät kyseiset testausvaiheet, eivätkä tulokset siis ylittäneet ylempää 8,9 kilohertsin spesifikaatiorajaa.

7.2 Toimittaja B

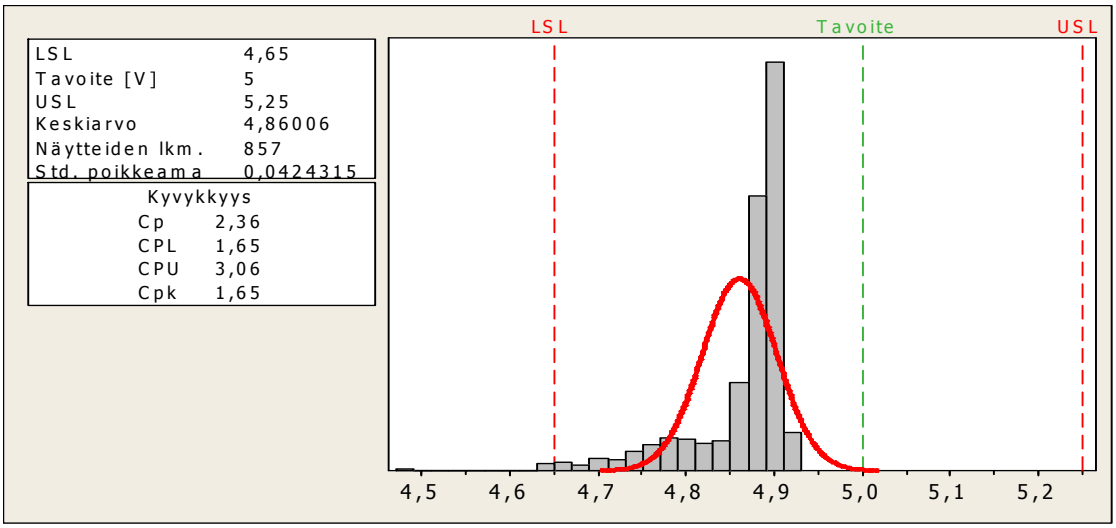
Toimittajan B testausjärjestelmän 1 sisäisten jännitteiden mittausten hajontaa tutkittiin selvittämällä ohjauskortin +5 voltin käyttöjännitteen vaihtelua minimi-, nimellis- sekä maksimisyöttöjännitteillä. Tällöin viiden voltin jännitteen muodostavaan regulaattoripiiriin syötetään +5.4, +6.0 ja +6.6 voltin jännitteet. Mittauksissa esiintyi vain hyvin vähän vaihtelua nimellis- ja maksimisyötöillä, mutta minimisyöttöjännitettä käytettäessä vaihtelua esiintyi mittauksessa merkittävästi enemmän. Varianssianalyysin mukaan tällöin kaikki mittaustapahtumassa havaittu vaihtelu oli peräisin toistettavuus- ja uusittavuusvaihtelusta, eikä näytteiden välistä vaihtelua ollut suhteessa näihin tekijöihin lainkaan. Vaihtelu oli suurelta osin toistettavuusvirhettä (72% ilmenneestä hajonnasta), ja loppu vaihtelu (28%) aiheutui heikosta uusittavuudesta. Myös toleranssirajoihin suhteutettuna vaihtelu oli merkittävää (65% toleranssivälistä). Uusittavuusvirhe voidaan toisaalta yhdistää toimittajan B kohdalla toimittajan A tavoin toistettavuuteen, sillä operaattorin on mittausten aikana käytännössä mahdoton vaikuttaa paineilmalla toimivan neulapedin toimintaan.

Kuva 34 havainnollistaa kullekin näytteelle suoritetun neljän mittauksen hajontaa +5V sisäisen jännitteen mittauksessa. Kuten kuvasta nähdään, tuloksista muodostettu kuvaaja ei ole säännöllinen, vaan osa tuloksista on huomattavasti spesifikaation tavoitejännitteen alapuolella. Tämä havainto voi indikoida, että ohjauskortin regulaattoripiiri osaa rajoittaa suuret jännitteet suhteellisen oikealle tasolle, muttei pysty saavuttamaan minimijännitesyötöllä haluttua tasoa, tai ettei minimijännite ole todellisuudessa vaaditulla tasolla.



Kuva 34. +5V sisäisen jännitteen mittaustulosten hajonta minimijännitesyötöllä.

Tutkimalla normaalia tuotantotestausdataa havaittiin että osa kyseisessä testausvaiheessa viallisiksi todetuista (7 kappaletta 164 vialliseksi todetusta) piirikorteista oli mahdollisesti todellisuudessa toimivia ja spesifikaatiot täyttäviä. Kaikissa tapauksissa jännitearvo oli alittanut alemman spesifikaatiorajan hyvin marginaalisesti, joten mittausvaiheen aiheuttaman hajonnan voidaan epäillä luokittelevan vaatimukset täyttäviä tuotteita joissain tapauksissa virheellisiksi. Kuva 35 kuvaa +5 voltin sisäisen jännitteen kyvykkyyttä tuotannossa testatun 857 ohjauskortin testitulosten perusteella. Kuten kuvasta näkyy, tulokset eivät ole täysin normaalijakautuneita eivätkä keskittyneitä tavoitearvon ympärille, vaan jakauma on painottunut alempaa spesifikaatiorajaa kohti. Hajonta vastaa siten pitkälti toistettavuus- ja uusittavuusmittausten tuloksia. Tuloksien perusteella voidaan siis arvioida, että minimisyöttöjännitteellä (+5,4V) syöttöjännite ei joko ole todellisuudessa oikealla tasolla, tai sitten ohjauskortti ei kykene reguloimaan syötetystä jännitteestä vaadittua jännitetasoa. Tämä on myös ymmärrettävää, sillä 5,4 voltin syöttöjännite on lineaariregulaattoripiirin toiminta-alueen alarajalla [33]. 500 milliampeerin kuormavirralla regulaattorin aiheuttama jännitteenpudotus on 0,7 volttia, joten syöttääkseen 5 volttia ulos piirin tulisi saada minimissään 5,7 voltin syöttöjännite. Mittausvaiheen parantamiseksi voisi suorittaa jatkotoimenpiteitä, kuten esimerkiksi analysoida tarkemmin syöttöjännitteen todellista tasoa. Esimerkiksi syöttökaapeleiden jännitehäviöt saattavat vaikuttaa osaltaan tuloksiin ja sitä kautta päätöksentekoon kortin toiminnallisuuden oikeellisuudesta.



Kuva 35. +5V sisäisen jännitteen kyvykkyys.

Sisäisen +10V referenssijännitteen mittaustarkkuutta selvitettiin kahdella eri regulaattorille syötettävällä jännitetasolla, nimellisjännitteellä (+12.0V) ja maksimisyöttöjännitteellä (+14.4V). Vaihtelu osoittautui muodostuvan täysin näytteiden välisistä eroista, joten kumpikaan edellä mainituista jännitemittauksista ei tuota ongelmia testattaessa ohjauskortteja. Tämä oli odotettu tulos, sillä referenssijännitepiirit on rakennettu hyvin stabiileiksi.

Ohjauskortin suorittaman DC-jännitteen mittauksen vaihtelu ja testausjärjestelmän 1 kyky syöttää piirikortille tasaista testijännitettä muodostivat vain vähäisen tai kohtalaisen (alle 25%) osuuden koko mittaustapahtumassa havaitusta vaihtelusta. Uusittavuus muodosti vain pienen osuuden tästä vaihtelusta, toisin sanoen mittaustapahtumasta aiheutuvasta vaihtelusta suurin osa oli peräisin testausjärjestelmän sisäisestä variaatiosta. Samankaltaisia tuloksia antoivat myös vaiheiden virranmittauspiirin antamat tulokset. Vaihtelu oli sarjaväylän kautta saatujen mittaustuloksien mukaan suurimmaksi osin ohjauskorttien välistä eikä testausjärjestelmästä aiheutuvaa.

Analogiatuloissa vaihtelua, pääosin toistettavuudesta aiheutuvaa, esiintyi merkittävästi ainoastaan kolmessa mittausvaiheessa: yhdessä jännitemuotoisessa mittauksessa (0V jännitesyötöllä) sekä kahdessa virtamuotoisessa mittauksessa (0mA virtasyötöllä). Kussakin mittauksista vaihtelua aiheuttivat tosin mittaukset, joissa tulos erosi nollasta yhdellä kymmenyksellä. Koska toleranssivälit 0mA ja 0V mittauksissa ovat tiukemmat kuin 10mA, 20mA, 5V sekä 10V mittauksissa, muodostaa absoluuttisesti samansuuruinen vaihtelu suhteellisesti enemmän vaihtelua. Kaikissa analogiatulojen mittausvaiheissa vaihtelua esiintyi kuitenkin absoluuttisesti nimenomaan saman verran. Spesifikaatiorajoihin verrattuna hajonta oli kuitenkin vähäistä, paitsi juuri 0mA sekä 0V syötöillä, jolloin yhden kymmenyksen ero nollatuloksista aiheuttaa pahimmillaan peräti 25% osuuden vaihtelusta. Mittausvaiheeseen on kuitenkin hyvin vaikea tehdä erottelukykyä nostavia ja hajontaa vähentäviä korjauksia, sillä analogiatulon arvot mitataan ohjauskortilta, jonka sisäisten piirien tarkkuuden nosto vaatisi muutoksia itse tuotteeseen. Testausvaiheessa ei ilmennyt toisaalta tutkimuksen ajalta tutkituissa lokitiedostoissa tapauksia, joissa analogiatulojen arvot olisivat ylittäneet tai alittaneet toleranssit lievästi, vaan kaikissa tapauksissa vian aiheuttajaksi voitiin epäillä väärää tilaa kytkimissä, joilla valitaan syötetäänkö tuloon jännite- vai virtasignaalia.

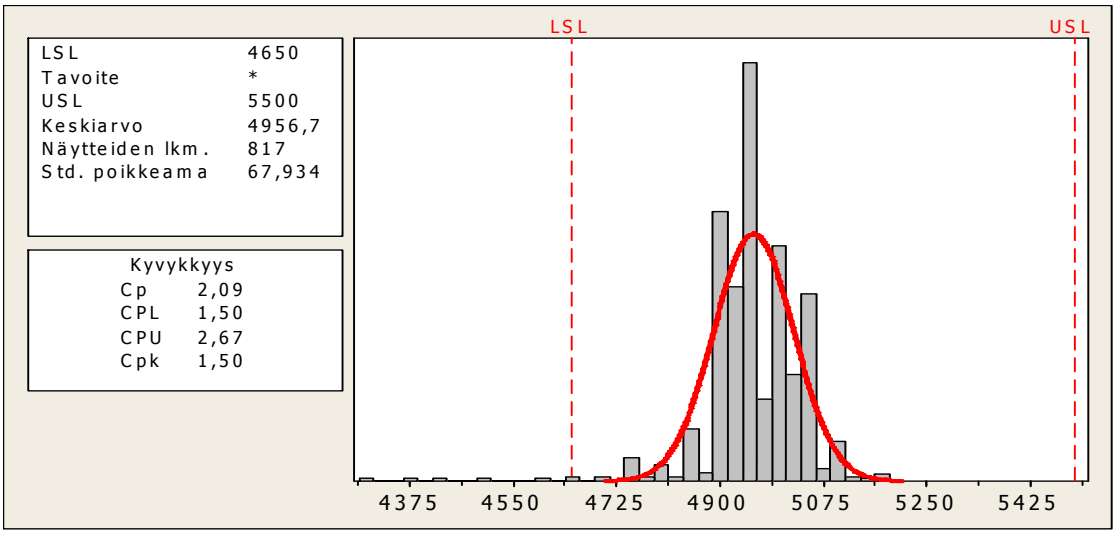
Analogialähtöjen vaihtelu oli erittäin vähäistä, ja käytännössä kaikki vaihtelu oli peräisin näytteiden välisistä luonnollisista eroista. Mittauksesta aiheutuneen varianssikomponentin osuus yhteenlasketusta varianssista oli noin 4-6% luokkaa. Kyseinen vaihtelu oli täysin toistettavuusvirheestä aiheutuvaa. Mittauksen erottelukyky vaihteli hieman mittausvaiheesta riippuen, mutta ongelma on todennäköisesti lähtöisin näytteiden samankaltaisuudesta. Testiä varten olisi siis ollut suositeltavaa mitata ohjauskortteja, joiden odotettavissa olleiden tulosten hajontaväli olisi ollut nykyistä suurempi. Tällöin näytteen kahdesta mittauksesta muodostettujen keskiarvojen välinen vaihtelu olisi ollut suurempaa, eli erottelukyky olisi kasvanut. Tällaisten näytteiden valitseminen on kuitenkin käytännössä hyvin vaikeaa, joten erottelukyvyn puutetta voi selittää osittain sillä, että näytteiden ominaisuudet yksinkertaisesti ovat hyvin samankaltaisia. Koska testausvaiheen tarkkuus on kaksi desimaalia, ja sen toistettavuus ja uusittavuus erinomaisella tasolla, voidaan todeta, että mittausvaiheelle ei ole tarvetta tehdä muutoksia.

PWM-signaalien vaihtojännitemuotoisessa mittauksessa ei myöskään esiintynyt merkittävää vaihtelua testausjärjestelmällä 1. Mittaukset toistuivat erinomaisesti. Tulokset olivat hyvin erilaisia signaalin taajuusmuotoisissa mittauksissa, joissa hajontaa

esiintyi toleranssiväliin suhteutettuna merkittävästi, noin 41-51% riippuen mittausvaiheesta.

Tutkimuksen aikana tutkitut testausjärjestelmän 1 testauslokitiedostot osoittivat, että testatuista 975 ohjauskortista 164 kappaletta eivät olleet päässeet funktionaalista testiä läpi ensimmäisellä yrityksellä. Kyseisistä vialliseksi luokitelluista korteista 8 ohjauskorttia ei ollut täyttänyt pulssinleveysmodulaatiosignaalin kytkentätaajuuden spesifikaatiovaatimuksia, vaan kussakin tapauksessa taajuusmittauksen tulos oli ollut hieman alemman toleranssirajan alapuolella. Kuva 36 havainnollistaa lokitiedoston yhden ohjaushaaran kytkentätaajuuden mittauksen läpikäyneen 817 ohjauskortin mittaustulosten jakaumaa. Kuten kuvasta nähdään, osa mittauksista on selkeästi alle spesifikaatiorajojen. On vaikea arvioida, ovatko jotkin huonoista mittaustuloksista aiheutuneet tietyistä erityissyistä, mutta voidaan epäillä, että ainakin osa huonoista mittaustukoksista johtuu testausjärjestelmästä aiheutuvasta hajonnasta. Vaikka prosessin kyvykkyys on hyväksyttävällä tasolla, on hajonta niin laajaa (enimmillään 51% toleranssivälistä) ja keskittynyttä vasemman spesifikaatiorajan tuntumaan, että mittausvaihe saattaa tuottaa vääriä johtopäätöksiä kortin laatuominaisuuksien suhteen. Jos ohjauskortin pulssinleveysmodulaatiosignaalin taajuus on luontaisesti hieman alhaisempi tavoitearvoon verrattuna, voi testausjärjestelmän aiheuttama hajonta aiheuttaa kelvollisen tuotteen hylkäämisen testausvaiheessa.

Yksi mahdollinen toimenpide voisi jatkossa olla testauksen toistaminen testivaihetta läpäisemättömille korteille vian havaitsemisen jälkeen välittömästi uudelleen samalla testausjärjestelmällä, jolloin pystyttäisiin mahdollisesti selvittämään, onko todellinen ongelma tuotteessa vai testausjärjestelmässä. Ongelman alkuperäistä aiheuttajaa voi kuitenkin olla hyvin vaikea löytää. Esimerkiksi taajuuslaskurin tarkkuuden nosto saattaisi auttaa tilanteen korjaamisessa.



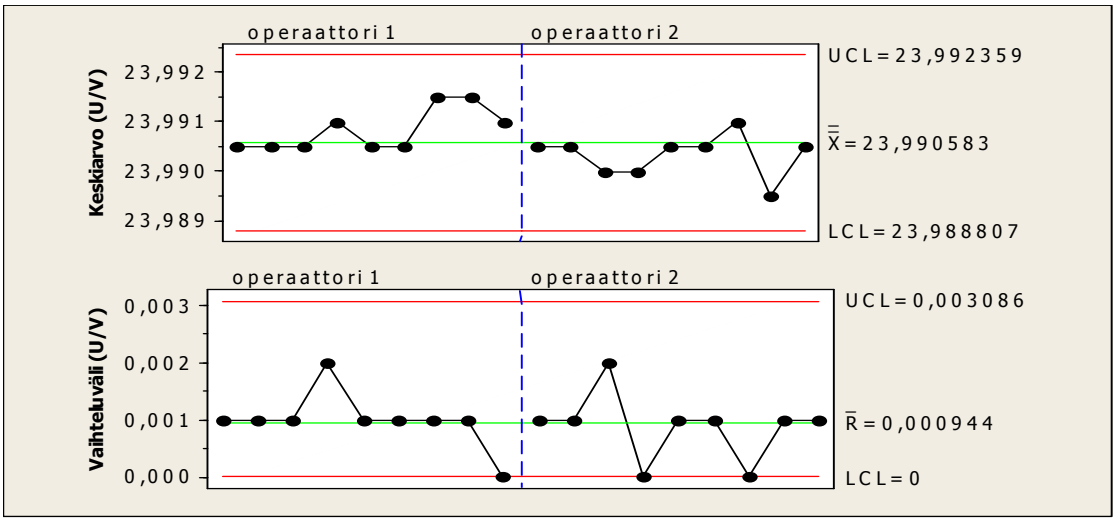
Kuva 36. PWM-signaalin kytkentätaajuuden kyvykkyys testausjärjestelmällä 1.

Toimittajan B testausjärjestelmän 2 Gage R&R –mittaukset eivät sujuneet täysin ongelmitta. Useat kortit eivät selvinneet funktionaalisesta testistä ensimmäisellä testauskerralla, vaan vaativat enemmän kuin kaksi mittauskertaa. Tutkimukseen haluttiin kuitenkin vain kaikki testit täysin läpäisseitä kortteja, jolloin kaikkien testivaiheiden analysointi onnistuisi. Osa ongelmista havaittiin johtuneen erityissyistä, joten kyseisiä mittauksia ei voitu ottaa huomioon lopullisessa hajonnan estimoinnissa. Varianssianalyysiin hyväksyttiin siten lopulta vain yhdeksän kappaletta ohjauskortteja, sillä loput kolme ohjauskorttia eivät läpäisseet funktionaalista testiä kahta kertaa molempien operaattoreiden toimesta. Kaikkien korttien testausdata kuitenkin säilytettiin, jotta nähtiin, mitä testausvaiheita kortit eivät läpäisseet, ja oliko kyseessä mahdollisesti nimellinen spesifikaatiorajan ylitys tai alitus. Tällöin vian syytä voitaisiin mahdollisesti selittää testausjärjestelmän huonolla toistettavuudella tai uusittavuudella. Yhdeksän näytteen määrä riitti kuitenkin riittävän luotettavan toistettavuus- ja uusittavuusanalyysin laatimiseen.

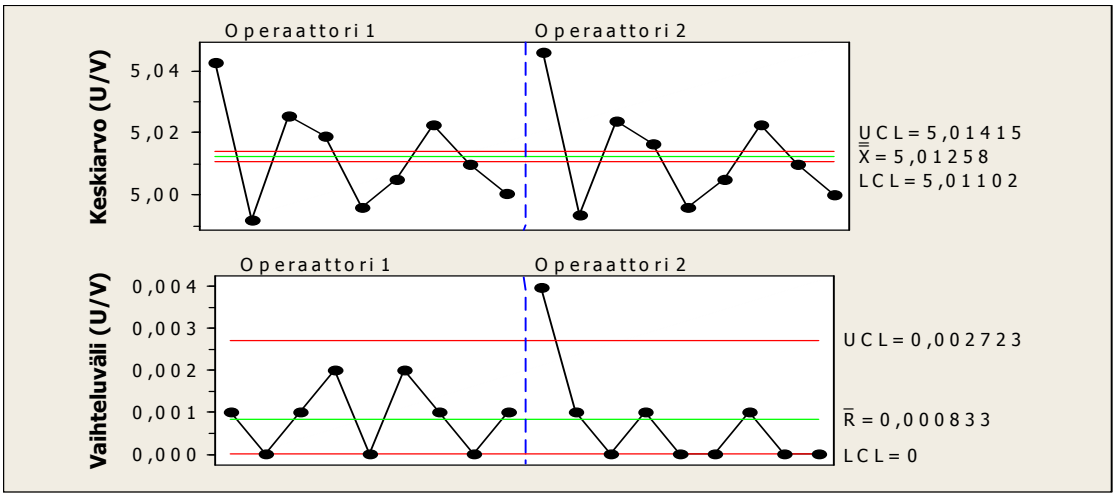
Esimerkiksi ohjauskortin ID-arvon mittausvaiheessa peräti 17 testauskertaa keskeytyi kyseisen mittauksen kohdalla. Jokaisessa tapauksessa mitattu jännitearvo ylitti sallitun ylemmän spesifikaation rajan muutamalla prosentilla. Vika ei kuitenkaan ollut entuudestaan tuttu, eikä tavallisesta tuotannon testauslokitiedostosta löytynyt viitteitä siitä, että ongelma olisi yleinen. Mittauksen aikana pääteltiin, että syy saattaisi olla ohjauskortin epätavallista tiheämmän testaamisen aiheuttamassa lämpötilannousussa. Ohjauskorttien testaus suoritettiin nimittäin välittömästi testausjärjestelmän 1 suorittamien kahden testin jälkeen, jolloin kortin lämpötila oli mahdollisesti tavallista korkeampi. Kortteja päädyttiinkin jäähdyttämään kylmäspraylla eri testausjärjestelmien testien välillä, jonka jälkeen ongelma katosi. Normaalista testauksesta poikkeava, saman kortin useampi testaus ilmeisesti vaikutti tarpeeksi vastusketjun tuottamaan jännitearvoon, jota ohjauskortti käyttää ID-tiedon päättelyyn. Toisaalta lämpötilan vaikutus juuri kyseiseen testausvaiheeseen jäi epäselväksi. Testausvaiheelle voisi suorittaa lisäanalyysejä kortin lämpötilaa nostamalla ja tarkkailemalla, mutta koska edellä mainittu testausmenettely on normaalista poikkeavaa toimintaa, on lisäselvitysten tarpeellisuus kyseenalaista. Lisäksi jatkossa samankaltaisia selvityksiä ajatellen olisi hyvä, että näytteille suoritettujen testien välissä olisi jokin tauko, jolloin normaalista testauksesta poikkeavat toimenpiteet suodattuisivat mahdollisimman hyvin. Nyt saman kortin testaaminen neljä kertaa lyhyen aikavälin aikana saattoi osaltaan vaikuttaa tuloksiin.

Testausjärjestelmän 2 suorittamien ohjauskortin sisäisten käyttö- ja referenssijännitteiden mittausten tarkkuutta havainnoitiin jännitteiden +5V_A, +12V_A, +24V_B, sekä +10VREFI mittausvaiheiden avulla. Jännitteiden +5V_A sekä +10VREFI mittauksessa vaihtelu muodostui käytännössä täysin näytteiden välisistä eroista, eli mittaukset toistuivat hyvin, eivätkä myöskään riippuneet käytetystä operaattorista. Jännitteitä +12V_A sekä +24V_B mitattaessa havaittu vaihtelu muodostui puolestaan täysin mittausprosessista. Toleransseihin suhteutettuna hajonta kyseisissä mittauksissa oli kuitenkin hyvin vähäistä, eli mittausvaiheen ei pitäisi aiheuttaa tuloksissa hajontaa, joka vääristäisi todellisia arvoja.

Kuten kuvasta 37 nähdään, jännitteen +24V_B mittauksessa havaittu vaihtelu saman näytteen mittausten sisällä sekä näytteiden keskiarvojen välillä on erittäin vähäistä, jolloin näytteiden mittausten jännitekeskiarvot jäävät keskiarvokortin ohjausrajojen sisälle. Tällöin erottelukyky jää alhaiseksi, toisin kuin esimerkiksi jännitteen +5V_A mittauksessa (kuva 38), jossa keskiarvot ovat ohjausrajojen ulkopuolella, mikä puolestaan osoittaa, että erottelukyky on riittävällä tasolla.



Kuva 37. +24V_B mittausten jännitteen keskiarvo- ja vaihteluvälikortit.

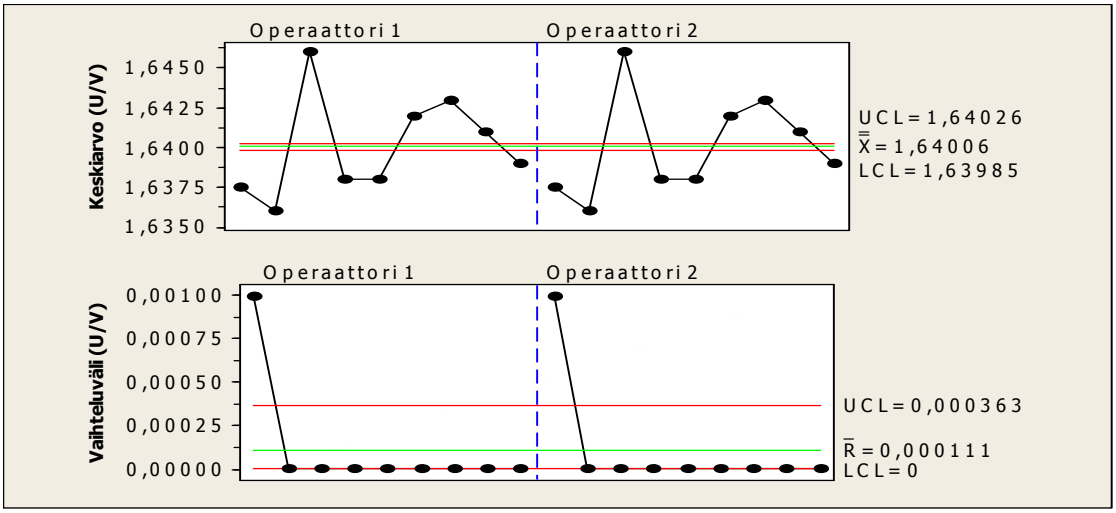


Kuva 38. +5V_A jännitteen mittausten keskiarvo- ja vaihteluvälikortit.

Kuten testausjärjestelmällä 1, testausjärjestelmän 2 suorittamissa kolmessa eri vaihesignaalin virranmittauksessa havaittu vaihtelu oli vähäistä. Mittausvaiheen erottelukyky oli kohtalaisella tai riittävällä tasolla (3-6 luokkaa). Myös

testausjärjestelmän 2 analogiatuloissa vaihtelun määrä oli kaikissa virta- ja jännitemuotoisissa syötteissä vähäistä lukuun ottamatta tilannetta, jossa tuloon 2 syötettiin nollajännitettä tai virtaa samaan aikaan kuin tuloon 1 syötettiin täyttä 10 voltin tai 20 milliampeerin virtaa. Tällöinkin suhteellisesti suurempi vaihtelun määrä aiheutuu kapeammista toleranssiväleistä kuin 10mA, 20 mA, 5V ja 10V syötöillä, absoluuttisten erojen ollessa kussakin mittauksessa korkeintaan 0,1%-yksikköä. Analogialähdöissä havaittu virta-arvojen vaihtelu oli käytännössä täysin peräisin näytteiden välisistä eroista. Testausjärjestelmästä aiheutuvaa vaihtelua esiintyi enimmillään 2% koko havaittuun vaihteluun suhteutettuna.

PWM-signaalien AC-muotoisessa mittauksessa ei havaittu juuri lainkaan vaihtelua. Mittaukset toistuivat erinomaisesti, ja testausjärjestelmä kykeni luokittelemaan tulokset riittävällä erottelukyvyllä. Kuva 39 esittää yhden PWM-signaalin vaihtojännitemuotoisen mittauksen keskiarvo- ja vaihteluvälikorttia. Kummankin operaattorin mittaukset toistuivat yhtä mittausta lukuun ottamatta täsmällisesti, ja näytteiden keskiarvot olivat identtisiä. Keskiarvokuvaajan suuret poikkeamat ohjausrajoista indikoivat, että mittaus kykenee erottelemaan tulokset erinomaisesti toisistaan.

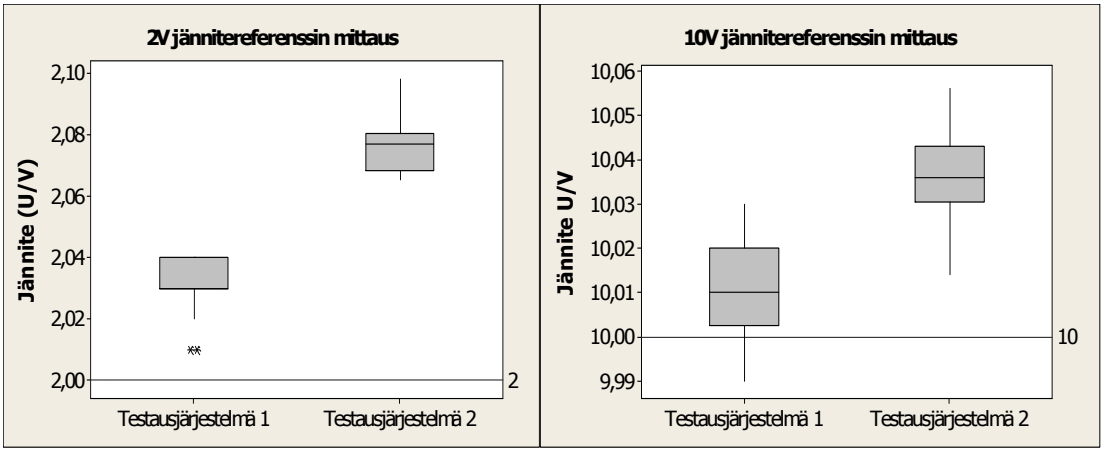


Kuva 39. PWM-signaalin jännitemuotoisen mittauksen mittausten vaihteluvälit sekä keskiarvot. Toistettavuus, uusittavuus sekä mittausvaiheen erottelukyky ovat hyvällä tasolla.

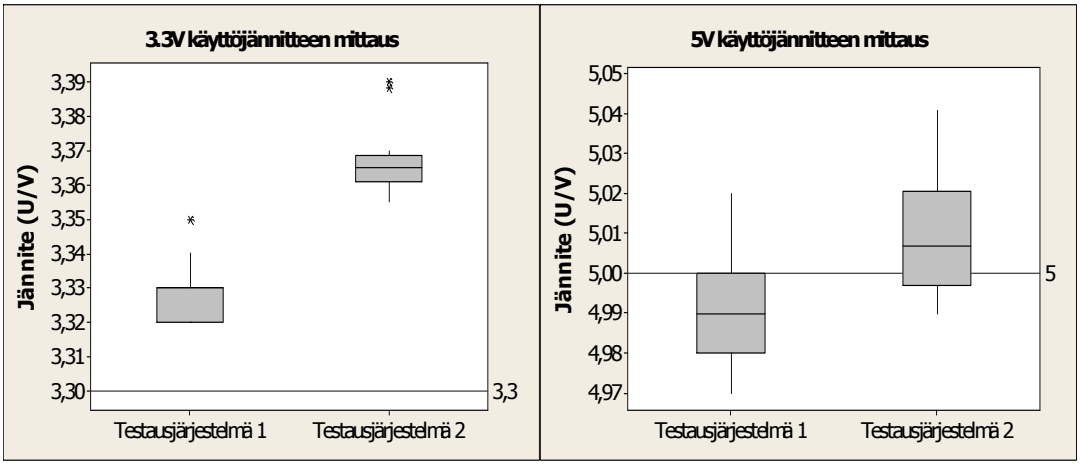
Kuten toimittajan A kohdalla, myös toimittajan B kahden testausjärjestelmän antamia tuloksia ja niiden hajontaa verrattiin keskenään. Tällöin voitiin tarkkailla eroja kahden eri aikaan suunnitellun ja rakennetun testausjärjestelmän välillä.

Käyttö- ja referenssijännitteiden hajontaa ja keskittymistä vertailtiin 2 ja 10 voltin referenssijännitteiden sekä 3,3 ja 5 voltin käyttöjännitteiden välillä käyttäen testausjärjestelmien nimellissyöttöjännitteitä. Kuvat 40 ja 41 havainnollistavat, että

testausjärjestelmän 1 antamat kyseisten jännitteiden tulokset ovat säännöllisesti hieman testausjärjestelmän 2 antamia tuloksia pienempiä. Erot ovat kuitenkin absoluuttisina lukuina hyvin vähäisiä. Jakaumat ovat keskittyneet testausjärjestelmän 1 viiden voltin käyttöjännitemittausta lukuun ottamatta tavoitearvojen yläpuolelle. Hajonta on hyvin samankaltaista järjestelmien välillä, ja jo toistettavuus- ja uusittavuusmittauksissa käytetyllä näytemäärällä ne jakautuvat hyvin pitkälti normaalijakauman mukaisesti. Systemaattinen ero jännitemittausten välillä voi johtua esimerkiksi yleismittareiden kalibroinnista tai mittausjohtimien eri pituuksista, jolloin jännitehäviöitä syntyy eri määrä. Koska hajonnat kuvissa on laskettu samojen ohjauskorttien antamien tulosten avulla, voidaan arvioida, että näytteiden sisäisen vaihtelun vaikutus tuloksissa on vähäinen.



Kuva 40. 2V ja 10V jännitereferenssien mittaustulosten jakaumien keskittyminen ja hajonta.

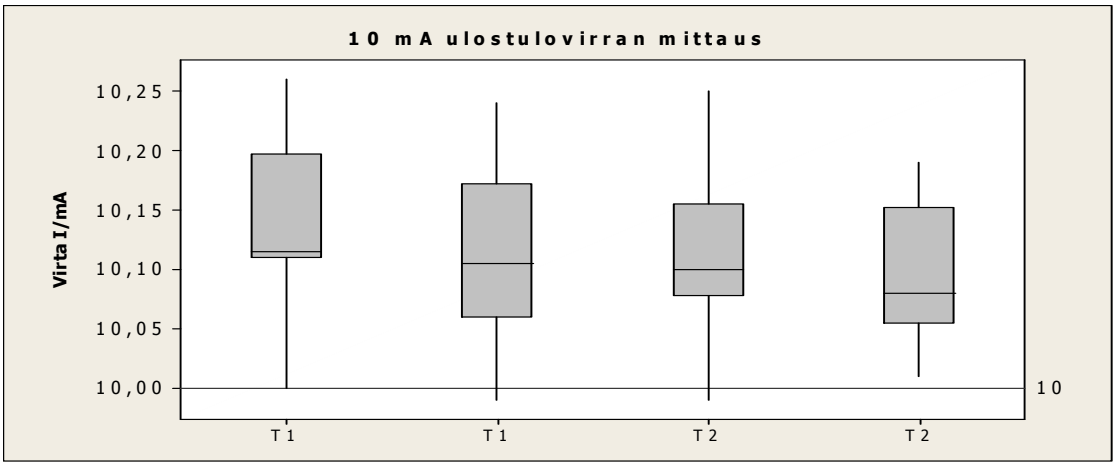


Kuva 41. +3.3V ja +5V käyttöjännitteiden mittaustulosten jakaumien keskittyminen ja hajonta.

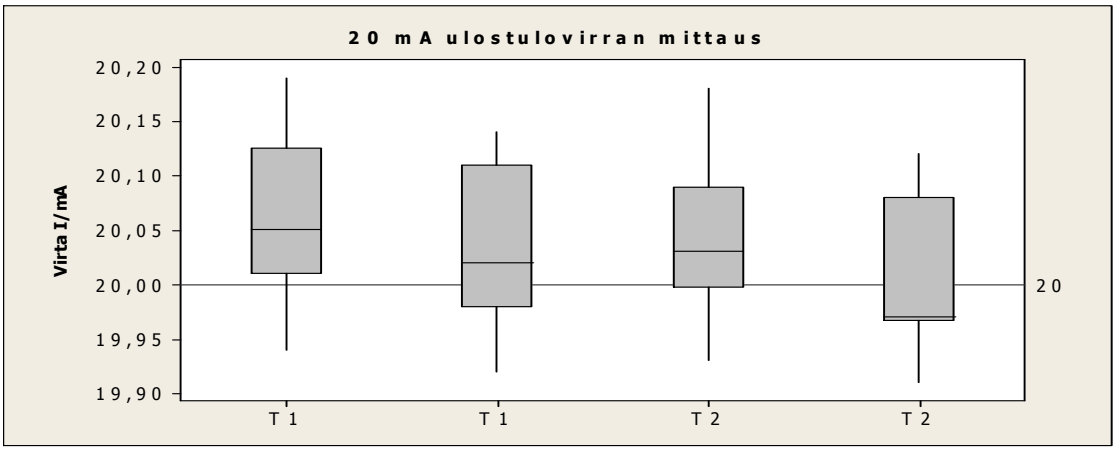
Virtamuotoisten mittausten tulosten hajontaa ja keskittymistä tarkkailtiin ohjauskortin analogiaulostuloille suoritettavien testivaiheiden avulla. Hajontaa vertailtiin viiden eri mittausvaiheen; 0mA:n, kahden 10mA:n sekä kahden 20mA:n tulosten välillä.

0mA ulostulolla hajontaa ei esiintynyt lainkaan. 10mA:n sekä 20mA:n ulostulon mittauksen hajonnat on esitetty kuvissa 42 sekä 43. Kuten kuvista käy ilmi, testausjärjestelmä 1 (kuvassa T1) antaa 10 milliampeerin mittauksissa järjestelmällisesti hieman korkeampia tuloksia kuin testausjärjestelmä 2 (kuvassa T2). 20 milliampeerin mittauksissa tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan. Mediaanit ovat kaikissa mittauksissa kuitenkin lähes samalla tasolla. Kaikki hajonnat ovat myös keskittyneet tavoitearvon yläpuolelle lukuun ottamatta yhtä testausjärjestelmän 2 suorittamien 20mA mittausten jakaumista. Hajonnat ovat myös suurusluokaltaan lähellä toisiaan. Jakaumat eivät ole täysin symmetrisiä, mitä voidaan selittää havaintoaineiston vähyydellä. Vertailussa haluttiin kuitenkin käyttää kullekin testausjärjestelmälle samoja ohjauskortteja niiden sisäisen vaihtelun vaikutuksen minimoimiseksi.

Jatkossa vastaavankaltaisten vertailujen suorittamiseen olisi suositeltavaa tehdä enemmän toistoja näytteitä kohti. Mittaukset olisi ehkä parasta suorittaa käyttäen yhtä näytettä, jolloin näytteen sisäisen vaihtelun vaikutus minimoituisi. Tutkimuksen painopiste oli kuitenkin yksittäisten testausprosessien aiheuttaman hajonnan analysointi, joten tarkempia jatkotutkimuksia järjestelmien välisistä eroista ei tässä työssä suoritettu.

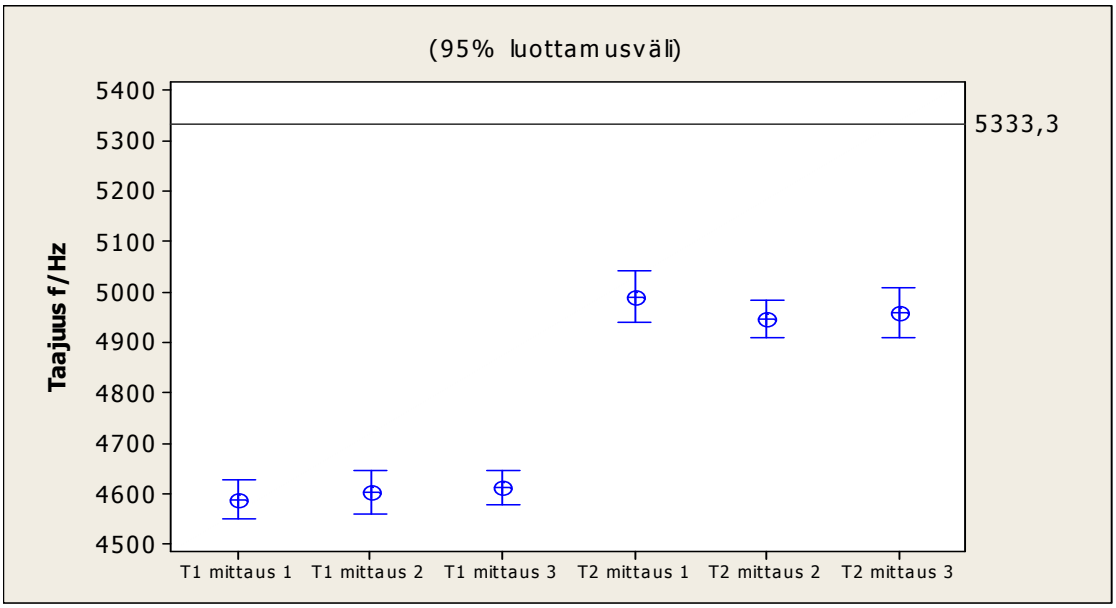


Kuva 42. Analogiaulostulon 10 mA ulostulovirran mittausten hajonnat kahdella eri testausjärjestelmällä.



Kuva 43. Analogiaulostulon 20 mA ulostulovirran mittausten hajonnat kahdella eri testausjärjestelmällä.

Kytkentätaajuuksien mittauksissa oli havaittavissa systemaattista eroa testausjärjestelmien välillä. Kuva 44 havainnollistaa, kuinka testausjärjestelmä 1 (T1) antaa järjestelmällisesti hieman alhaisempia tuloksia kuin testausjärjestelmä 2 (T2). Erot johtuvat todennäköisesti taajuuslaskurien kalibroinnista, sillä kumpikin testausjärjestelmä antoi sisäisesti hyvin samansuuruisia tuloksia tasaisella hajonnalla.



Kuva 44. Kytkentätaajuuden mittausten jakaumat ja hajonnat kahdella testausjärjestelmällä.

7.3 Toimittajien A ja B välinen vertailu

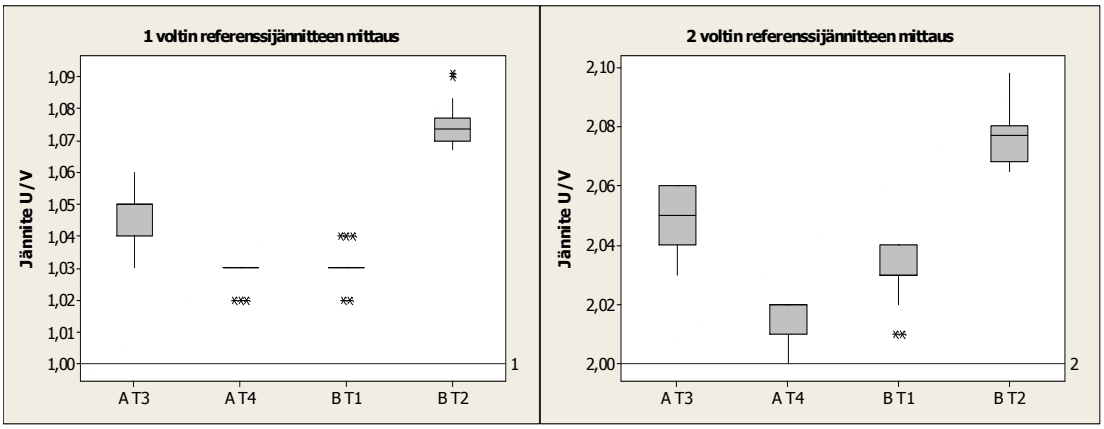
Eri toimittajien testausjärjestelmien antamia tuloksia verrattiin toisiinsa, jotta mahdolliset systemaattiset erot tuloksissa, tai tulosten erilainen hajonta saataisiin selvitettyä. Tämän kaltaisella vertailulla voidaan saada arvokasta tietoa siitä, kuinka paljon eroa voi esiintyä täysin eri testausympäristöissä ja erilaisin ratkaisuin toteutettujen testausjärjestelmien välillä. Systemaattinen ero tai erilainen hajonnan määrä mittaustuloksissa voi käytännössä näkyä esimerkiksi siten, että tietyllä toimittajalla esiintyy jokin ongelma testauksessa tiheämmin kuin toisella toimittajalla, vaikka tuotantoprosessi itsessään olisi hyvin identtisesti säädetty.

Vertailu eri toimittajien testausjärjestelmien välillä suoritettiin suurelta osin samalla tavalla kuin yhden toimittajan kahden eri testausjärjestelmän välillä. Toimittajien väliseen vertailuun sisältyvät tällöin laitteiden ja operaattoreiden lisäksi erot testausympäristöjen välillä. Ympäristöjen lämpötilat ja kosteusprosentit olivat toisaalta hyvin lähellä toisiaan, joten kyseisten tekijöiden vaikutuksen tuloksissa voitiin olettaa olevan vähäistä. Saatujen tuloksien avulla verrattiin kaikkia neljää tutkimuksessa käsiteltyä testausjärjestelmää, jolloin saatiin kuva siitä, onko tietyn toimittajan valinnalla järjestelmällistä eroa tuloksissa. Vertailuun valittiin samoja testausvaiheita, joita käsiteltiin yksittäisten testausjärjestelmien kohdalla. Operaattorit olivat eri toimittajilla eri henkilöitä. Koska tutkimuksessa päädyttiin lopputulokseen, että operaattori ei käytännössä voi vaikuttaa mittauksiin, voitiin tekijä jättää kuitenkin pois tarkkailuista. Vertailuun valittiin

- 1 ja 2 voltin referenssijännitteiden mittaus
- 1,9 ja 5 voltin käyttöjännitteiden mittaus
- kahden vaihesignaalin jännitemittaus sarjaväylää pitkin
- 10 mA ja 20 mA analogiaulostulovirtojen mittaus.

PWM-signaalien taajuuksia mitanneet testausvaiheet eivät olleet vertailukelpoisia, sillä niiden ohjelmakoodit ovat erilaisia toimittajien testausjärjestelmien välillä. Siten taajuuslaskurien mittaamien arvojen jakaumaa eri toimittajien testausjärjestelmien välillä ei tutkittu.

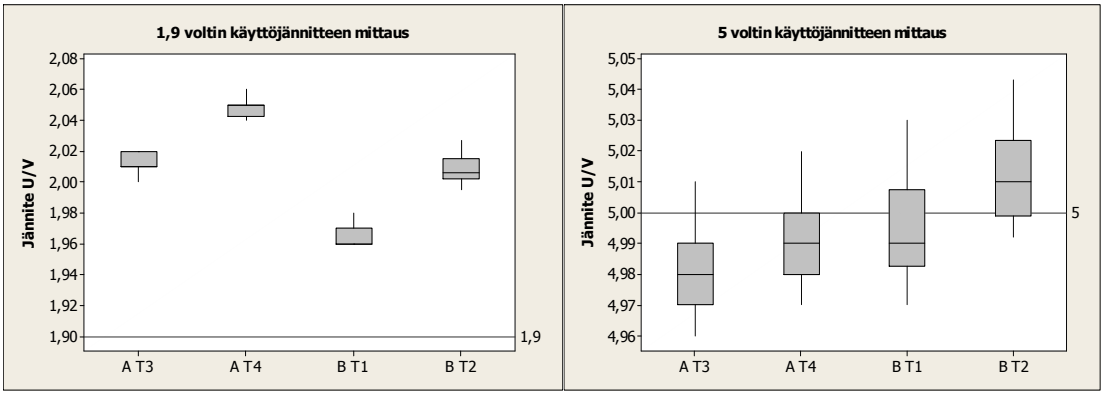
Kuva 45 esittää 1 ja 2 voltin referenssijännitemittausten tuloksia molempien toimittajien tutkituilla testausjärjestelmillä. Kuvista erottuu melko selkeästi systemaattista eroa testausjärjestelmien välillä, mutta toimittajasta riippuvaa eroa ei ole havaittavissa, sillä esimerkiksi testausjärjestelmät 4 (T4) ja 1 (T1) antavat hyvin samankaltaisia tuloksia. Myös hajonnan määrä on hyvin samansuuruista, vaikkakin toimittajan A testausjärjestelmässä 3 (T3) sitä ilmenee hieman enemmän. Pieniä eroja voidaan tosin selittää havaintoaineiston vähäisellä määrällä.



Kuva 45. *1 ja 2 voltin referenssijännitteiden mittaustulosten hajonta ja keskittyminen molempien toimittajien testausjärjestelmillä. Tulokset ovat keskittyneet tiiviisti 1 voltin mittauksissa, jolloin pienetkin erot keskiarvosta tulkitaan aineistoon kuulumattomiksi arvoiksi.*

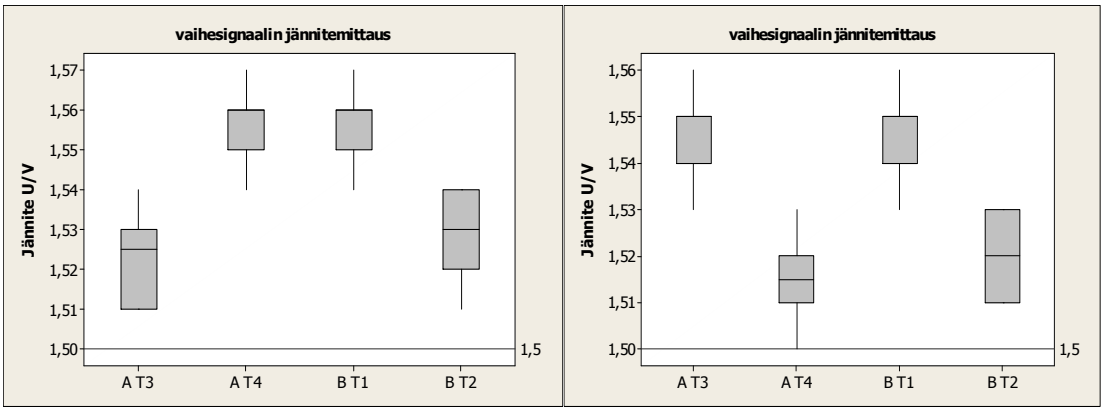
1,9 ja 5 voltin jännitemittauksissa ei esiintynyt järjestelmällistä eroa toimittajien välillä (kuva 46). 1,9 voltin mittauksissa toimittajan A tulokset olivat lievästi suurempia, mutta toisaalta 5 voltin mittausvaiheessa hieman alhaisempia. Erot tulosten välillä olivat enimmillään muutaman prosentin luokkaa. Tulosten selkeää riippuvuutta toimittajasta tai edes käytetystä testausjärjestelmästä ei siis havaittu kyseisten mittausvaiheiden kohdalla. Eroja tulosten välillä voivat aiheuttaa esimerkiksi

- järjestelmien (mittalaitteet, teholähteet) erilaisesta kalibroinnista aiheutuvat erot
- mittalaitteiden mittausjohtimista aiheutuvat erot
- ohjelmakoodissa olevat erot, kuten mittausten eri viiveet ja ajoitukset.



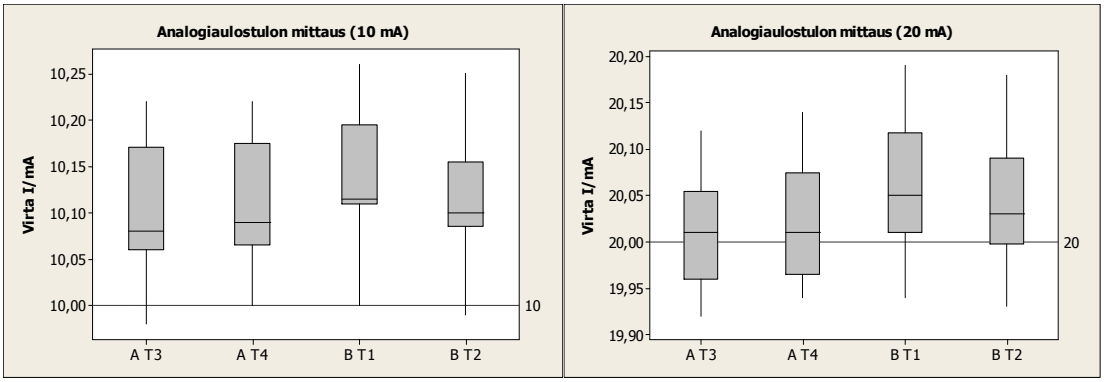
Kuva 46. *1,9 ja 5 voltin käyttöjännitteiden mittaustulosten hajonnat ja keskittyminen neljällä testausjärjestelmällä.*

Moottorinohjauksessa käytetyn PWM-signaalin jännitemuotoisessa mittauksessa ei esiintynyt selkeitä eroja kyseisten toimittajien välillä, mutta toimittajan B testausjärjestelmien tulosten hajonta ja keskittyminen pysyi samankaltaisena eri mittauksien välillä (kuva 47). Absoluuttiset erot kyseisissä mittauksissa olivat kuitenkin pieniä.



Kuva 47. PWM-signaalin jännitemuotoisten mittaustulosten keskittyminen ja hajonta kahdessa eri vaiheen mittauksessa.

Analogiaulostulon mittaustulosten avulla tutkittiin toimittajan vaikutusta virranmittauksessa esiintyvään hajontaan. Kuva 48 esittää 10 ja 20 milliampeerin ulostulojen mittausten hajontaa ja jakauman painottumista. Hajonnan määrä eri toimittajien välillä on suhteellisen identtistä, mutta toimittajan B testausjärjestelmä 1 antaa lievästi suurempia tuloksia muihin testausjärjestelmiin verrattuna. Koska toimittajan B testausjärjestelmän 2 tulokset ovat kuitenkin lähellä toimittajan A järjestelmien tuloksia, voidaan todeta, että erot johtuvat enemmän yksittäisten testausjärjestelmien kuin toimittajien välisistä eroista.



Kuva 48. Analogiaulostulon virtamuotoisen signaalin mittaustulosten hajonta ja keskittyminen 10mA ja 20mA ulostulosignaaleilla.

8 YHTEENVETO JA SUOSITUKSET

Neljälle eri ohjauskortin toiminnallisuutta mittaavalle testausjärjestelmälle suoritettiin Gage R&R –testi, jolla mitattiin sekä yksittäisten testausjärjestelmien, että eri testausjärjestelmien sekä –ympäristöjen välillä esiintyvää vaihtelua. Toistettavuus- ja uusittavuusmittauksilla pyrittiin selvittämään, kuinka paljon tuotannon testauksessa havaitusta vaihtelusta on peräisin piirikorttia testaavasta järjestelmästä, sekä kuinka paljon hajonta riippuu testausjärjestelmää operoivasta henkilöstä. Myös eri testausjärjestelmien antamia tuloksia vertailtiin toisiinsa. Gage R&R –testin ohessa tarkkailtiin myös ohjauskortin tuotantoprosessia sekä funktionaalisen testin lisäksi muita testausvaiheita laadunkehitysmielessä.

Gage R&R –testin laatiminen tutkimuksen kaltaiselle kohteelle, eli useita eri mittauksia suorittavalle testausjärjestelmälle, vaati suuren määrän datan käsittelyä, ja oli siten suhteellisen hidas toimenpide. Jatkossa vastaavankaltaisissa selvityksissä olisi selkeää, jos mittausten tulosformaatti olisi yhteneväinen eri toimittajien sekä testausjärjestelmien välillä. Tällöin tilastollinen analysointi ja yleinen lokitiedostojen pohjalta tehty havainnointi helpottuisivat huomattavasti. Perinteiseen Gage R&R –testiin verrattuna useita eri mittausmenetelmiä sekä –vaiheita yhdistelevien testausjärjestelmien sisäistä ja toistensa välistä vaihtelua analysoitiin datan suuren määrän takia esimerkkitapausten valossa.

Työn tärkeimpänä päämääränä ei ollut selvittää jokaisen mahdollisen mittausvaiheen vaihtelua, vaan selvittää myös, kuinka hyvin Gage R&R –menetelmä soveltuu tutkimuskohteiden kaltaisiin olosuhteisiin, ja mitä tutkimussuunnitelmaa laatiessa tulee ottaa huomioon. Analyysiin otettiin ainoastaan variaabelidataa tuloksinaan antavia mittausvaiheita, sillä attribuuttidata olisi vaatinut huomattavasti enemmän mittauskertoja, eikä ollut muutenkaan ABB:n kannalta tärkein selvitystä vaatinut asia.

Gage R&R -testin tulokset olivat osaltaan odotetun mukaisia, mutta osittain epäjohdonmukaisia tai vaikeasti tulkittavia. Tutkimuksen alkuvaiheessa ollut olettamus operaattorin vaikuttamattomuudesta mittaustuloksiin oli havaintojen perusteella oikea, mutta varianssianalyysi paljasti, että operaattorin vaihto aiheutti kuitenkin erillisen hajontakomponentin tuloksissa. Tämän hajonnan on vaikea todistaa johtuvan aidosti eri operaattorin käytöstä, sillä piirikortin asettelu ja testauksen aloittaminen olivat hyvin mekaanisia suorituksia. Lisäksi operaattorivaikutuksen olemassaolon todistamista vaikeuttaa tuloksissa esiintynyt erilainen toistettavuus- ja uusittavuuskomponenttien painottuminen. Muista tutkimusraporteista löytyykin mainintoja [35] tutkimuksen kaltaisista tilanteista, joissa automatisoidun testausjärjestelmän uusittavuuden määrittely ei ole yksiselitteistä. Käytännöllisempää tämänkaltaisessa tutkimuksessa, joka suoritetaan hyvin pitkälle automatisoidulle testausjärjestelmälle, saattaisi olla yhdistää kaikki vaihtelutekijät, eikä erotella operaattorin vaikutusta erilliseksi komponentikseen. Mittausjärjestelmästä ja -prosessista aiheutuva kokonaisvaihtelu on kuitenkin ensimmäinen ja tärkein asia, joka tutkimuksen avulla halutaan selvittää. Yhdistämällä

yhtä testausjärjestelmää analysoitaessa uusittavuudesta aiheutuva vaihtelu järjestelmän sisäiseen vaihteluun, vaihtelusta voitaisiin saada helpommin tulkittavissa oleva yleiskuva, jonka perusteella mittausvaiheita voitaisiin tarvittaessa analysoida tarkemmin.

Tutkimuksessa vertailtiin toimittajien testausjärjestelmien antamien tuloksien hajontoja. Toimittajakohtaisessa vertailussa havaittiin joissain mittauksissa lievää systemaattista, toistuvaa eroa tuloksissa kahden järjestelmän välillä. Tämä on ymmärrettävä havainto, sillä mikään järjestelmistä ei ollut täysin identtinen muiden järjestelmien kanssa. Toimittajien välisessä vertailussa havaittiin myös tietyissä mittauksissa lieviä järjestelmällisiä eroja, mutta yleisesti ottaen tulokset liikkuivat hyvin lähellä toisiaan. Kummankaan toimittajan tuloksien ei voida siis väittää sisältävän virhettä merkittävästi enemmän kuin toisen.

Yhdeksi käytännöllisimmistä sovelluskohteista Gage R&R –testille todettiin mittausvaiheet, joiden antamat tulokset olivat lähellä mitatun ominaisuuden ylempää tai alempaa spesifikaatiorajaa. Tällöin on hyvä tutkia, kuinka paljon kyseisen mittausvaiheen tulokset varioivat, sillä hajonta saattaa aiheuttaa vääriä tulkintoja mitattujen ominaisuuksien suhteen. Tutkimuksessa löydettiin mittausvaiheita, joissa testausprosessista aiheutunut hajonta saattoi aiheuttaa vääriä tulkintoja ohjauskorttien toimivuuden suhteen. Toisaalta ongelman aiheuttaja saattaa olla myös hajonnasta riippumaton tekijä. Primääritoimenpiteiksi edellä mainittujen kaltaisissa tilanteissa voidaan määrittää ohjauskortin suunnittelun läpikäyminen (*design-virheet*), sekä mittausjärjestelmästä aiheutuvien systemaattisten virheiden poistaminen tai kompensointi (*bias-virheet)*. Lisäksi kyseisissä testausvaiheissa ilmenneen hajonnan tarkempi jatkoanalysointi ja mahdolliset korjaavat toimenpiteet voisivat parhaimmillaan nostaa tuotannon ensisaantoa ja säästää kustannuksia pidemmällä aikavälillä.

Piirikortin sisäisen vaihtelun havaitseminen ja eliminoiminen osoittautui haasteelliseksi. Esimerkiksi ohjauskortin sisäisen A/D-muuntimen, jonka suorittaman muunnoksen pohjalta kortin sisäinen kalibrointi suoritetaan, epätarkkuus aiheuttaa tuloksissa väistämättä hajontaa. Gage R&R –analyysissä on siis hyvin tärkeää tuntea testausjärjestelmän ja sen ohjelmistokoodin lisäksi myös testattava piirikortti. Mittausvaiheissa on esimerkiksi sekä tulo- että lähtöpuolen jännitteiden käsittelyissä piiri- ja ohjelmistotason eroja. Kaikkia jännitemittausvaiheita ei voi tällöin suoraan verrata toisiinsa, vaan kutakin mittausvaihetta tulee käsitellä erillisenä tapauksena. Tulosten pohjalta ei voida siis välttämättä tehdä suoraan korjaavia toimenpiteitä, sillä hajontaa aiheuttavat tekijät voivat samankaltaisissa mittauksissa olla täysin erilaisia.

Kirjallisuudessa mainitaan [5, s. 60-63], että näytteen sisäisen vaihtelun minimoimiseksi tulisi tutkittu ominaisuus mitata esimerkiksi aina fyysisesti samasta pisteestä. Tämä ei kuitenkaan ole piirikortille mahdollista, sillä hajontaa aiheutuu monessa eri osassa piiriä, eivätkä mittaukset siten ole pelkästään mekaanisia suorituksia. Tutkimuksessa saaduissa tuloksissa esiintyi siis väistämättä virhettä, joka aiheutui ohjauskortin sisäisestä vaihtelusta. Tämän vaihtelun osuutta kokonaisvaihtelusta voitaisiin jatkossa yrittää selvittää esimerkiksi seuraavanlaisella testausproseduurilla:

1. Ohjauskortille ja funktionaalisen testin spesifikaatioiden mukaisiin syöttöpisteisiin jännitteet syöttävän teholähteen kytkeminen päälle.
2. Ohjauskortin virtojen kytkeminen päälle.
3. Tarkkaillun parametriarvon lukeminen ohjauskortilta.
4. Ohjauskortin virtojen kytkeminen pois päältä.
5. Kohtien 2-4 toistaminen niin, että tarkkailtu parametri tulee luetuksi esimerkiksi kymmenen kertaa.
6. Hajonnan laskeminen saatujen tulosten perusteella.

Edellä mainitulla menettelyllä voitaisiin selvittää ohjauskortin aiheuttamaa hajontaa tietyissä mittauksissa, sillä jos testisignaaleja syöttävä lähde pysyy koko ajan päällä, voidaan syöttöjännitteen tai –virran olettaa pysyvän melko stabiilina, kun kytkettävä kuorma pysyy identtisenä. Ohjauskortin itse suorittaman kalibroinnin vaikutus tuloksissa korostuu tällöin ja hajontaa voidaan verrata koko mittausprosessin kokonaishajontaan, joka saadaan, kun tarkkaillut arvot mitataan testausjärjestelmää käyttäen normaaliolosuhteissa.

Edellä mainittujen seikkojen takia olisi jatkossa todennäköisesti helpointa keskittyä tietyn testausjärjestelmän tiettyyn ongelmaan kerrallaan virheiden korjaamiseksi ja ongelmien poistamiseksi. Yhdessä mittauksessa on useita muuttujia, jotka tulisi ottaa huomioon suunniteltaessa toistettavuus- ja uusittavuustestiä, sekä laadittaessa lopullisia parannusehdotuksia vaihtelun pienentämiseksi. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi

- EMC-häiriöt (mittausympäristön häiriöt testausjärjestelmään sekä mitattavaan piirikorttiin sekä näiden kahden keskenäisvaikutukset)
- mittakaapeleiden jännitehäviöt
- neulapedin neulojen tyyppi ja kontakti kortin mittapisteeseen
- lämpötilan vaikutus mittauksiin
- ohjauskortin sisäisen vaihtelun osuus kokonaisvaihtelusta
- ohjelmakoodin tarkoituksenmukaisuus ja vaikutus mittauksessa
- teholähteiden tarkkuus
- yleismittarin tarkkuus.

Spesifikaatio- eli toleranssiväleihin suhteutettuna suurimmassa osassa ohjauskortin mittausvaiheista havaittu vaihtelu ei ollut merkittävää. Joissain mittausvaiheissa toleranssivälejä olisi teoriassa varaa tiukentaa, mutta muutoksille ei löydetty välitöntä tarvetta. Tulosten jakaumia olisi kuitenkin hyvä havainnoida aika ajoin, sillä väljien toleranssien sisällä hajonta saattaakin kasvaa tai keskittyä eri tavalla ilman, että

muutoksia havaitaan. Muutokset hajonnassa indikoivat herkästi muutoksista tuotantoprosessissa, kun mittausprosessi pysyy stabiilina.

Mittausprosessin erottelukyky, eli kyky luokitella tuloksia eri ryhmiin osoittautui useissa mittausvaiheissa huonoksi tai heikoksi. Ongelmaan ei kuitenkaan ole yksinkertaista ratkaisua, sillä Gage R&R -mittauksissa käytettyjen näytteiden valinta niin, että mitatut ominaisuudet edustaisivat koko hajontaväliä, on käytännössä mahdotonta. Moni ominaisuus saattaa luonnollisesti olla korttien välillä hyvin identtistä, jolloin eri luokkien määrä jää oletetusti vähäiseksi. Lisäksi mittausvaiheen merkitsevien numeroiden määrän lisääminen ei auta, sillä todellinen mittaustarkkuus peittyy helposti häiriökohinan alle varsinkin tuotantoympäristössä. Taloudellisesti optimaalisinta on todennäköisesti käyttää kahta merkitsevää numeroa. Lisäksi esimerkiksi toimittajan A tulojännitteiden ja –virtojen mittauksessa olisi suotavaa käyttää ohjauskortilta saatavaa yhden merkitsevän numeron tarkkuutta, eikä pyöristää tulosta ohjelmallisesti kokonaisluvuksi. Analogiatuloa käytetään monesti vaativissa asiakassovelluksissa moottorinohjauksessa, joten sen todellinen tarkkuus on tärkeä asia tuntea.

Taajuus-, jännite- sekä virtamittausten välillä havaittiin tietynlaista säännöllisyyttä hajontojen suhteen. Taajuusmittaukset toistuivat kaikista mittauksista heikoimmin, mutta koska niiden ainoa tarkoitus on tarkastaa PWM-signaalin kytkentätaajuuden kertaluokka eikä mitata erityisesti sen tarkkaa arvoa, ei mittausvaiheiden muuttamiselle ole suurta tarvetta. Toisaalta toimittajan B testausjärjestelmän 1 kohdalla havaittu laajan vaihtelun syy tuloksissa olisi tarpeen selvittää. Luultavasti mittauksissa on vaikuttanut jokin erityissyy, mutta uudella toistettavuusmittauksella voitaisiin päästä asiasta varmuuteen. Virtamittauksissa havaittiin vaihtelua yleisesti vähemmän kuin jännitemittauksissa, mikä oli oletettua, sillä jännitesignaaleihin kytkeytyvien häiriöiden oletettiin olevan tuotantoympäristössä virtasignaaleihin kytkeytyviä häiriöitä suurempia.

Gage R&R –analysointimenetelmää voi soveltaa useiden erilaisten mittausmenetelmien hajonnan arvioimiseksi. Automatisoidulle elektroniikkatuotetta mittaavalle järjestelmälle analyysiä laadittaessa tulee menetelmää soveltaa kuitenkin tietyin varauksin. Itse mittausjärjestelmän lisäksi tulee mitattava tuote tuntea monella tasolla varsin hyvin. Mahdollisia vaihtelua aiheuttavia tekijöitä on useita, ja ne tulee kartoittaa tarkasti. Mitä monimutkaisemmaksi mittausjärjestelmä, mitattava tuote tai mittausympäristö tulevat, sitä haastavammaksi hajontakomponenttien aiheuttajien arviointi muuttuu. Tilastollisesta analysoinnista on elektroniikkatuotteenkin tapauksessa hyötyä, sillä se tuo suhteellisen helposti esiin mahdollisia ongelmalähteitä niin tuotanto- kuin mittausprosesseissa. Tulosten luotettavuuteen on kuitenkin suhtauduttava kriittisesti.

LÄHDELUETTELO

[1] *Automotive Industry Action Group. Measurement Systems Analysis MSA, Third Edition. DaimlerChrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2003. 225 s.*

[2] *Grout, I. A. Integrated Circuit Test Engineering, Modern Techniques. Springer-Verlag London Limited, 2006. 361 s. ISBN 978-1-84628-023-8.*

[3] *Piirainen, A., 2006. Laatutekniikan perusteet (kurssimateriaali). Quality Knowhow Karjalainen Oy. 131 s. Ei yleisesti saatavilla.*

[4] *Karjalainen, E. & Piirainen, A. Mitä laatu tarkoittaa ja kuinka on saavuttu tämän päivän laatuun?*
http://www.qk-karjalainen.fi/?sivu=Artikkelit&id=61 [viitattu 28.02.2007]

[5] *Barrentine, L. B. Concepts for R&R Studies, Second Edition. Milwaukee, WI: Quality Press, 2003. 76 s. ISBN 0-87389-557-6*

[6] *Lillrank, P.M. Laatuajattelu: laadun filosofia, tekniikka ja johtaminen tietoyhteiskunnassa. Otava, 1998. 203 s. ISBN 951-1-15812-0.*

[7] *Mullenix, P. The Capability of Capability Indices with an Application to Guardbanding in a Test Environment, IEEE International Test Conference, Paper 40.1, 1990, s. 907 – 915.*

[8] *Bothe, D. R. Statistical reason for the 1.5 σ shift, Quality Engineering Vol. 14, Number 3 / 2002, s. 479 – 487.*

[9] *Loukkola J. Six Sigma –laatuajattelu, 2003.*
http://www.tkk.fi/Yksikot/Konepaja/Opinnot/Kurssiesitteet/Seminaari/kevat2001/Sixsigma/sixsigma.html#luku1 [viitattu 22.02.2007]

[10] *Vuori, M. Laatu pähkinänkuoressa. 2002.*
http://www.kotiposti.net/xmvuori/kehittaminen/laatu-pahkinankuoressa/index.htm [viitattu 2.03.2007]

[11] *Latzko, W. J. & Saunders, D.M. Four days with Dr. Deming: a strategy for modern methods of management. Reading, Massachusettes: Addison-Wesley Publishing Company, 1996. 228 s. ISBN 0-201-63366-3.*

[12] *Bothe, D. R. Measuring Process Capability. McGraw-Hill, USA, 1997. 899 s. ISBN 0-07-006652-3.*

[13] *Kärhä, P. Mittaustekniikan perusteet / luento 7: Mittausepävarmuus, TKK, 2006. http://metrology.hut.fi/courses/S-108.1010/Luento7_2006.pdf [viitattu 7.03.2007]*

[14] *Mrowiec T. et al. Economic tradeoffs of in-circuit and functional testing. International Automatic Testing Conference, IEEE, 1978, s. 128-133.*

[15] *Parker, K. P. The boundary-scan handbook. Boston, Massachusettes: Kluwer Academic, 2003. 373 s. ISBN 1-4020-7496-4.*

[16] *Misra, R. B. & Vyas, B.M. Cost Effective Accelerated Testing. 2003 proceedings annual reliability and maintainability symposium, IEEE, 2003, s. 106-110.*

[17] *Scheiber, S. Pursuing perfection and other pipe dreams. Electronic packaging & production, Vol. 12, no. February 2000, s. 18-23.*

[18] *Robinson, G. D. DFT, Test Lifecycles and the Product Lifecycle. ITC International Test Conference. IEEE Proceedings, 1999, s. 705-713.*

[19] *Radev, P. & Shirvaikar, M. Enhancement of Flying Probe Tester Systems with Automated Optical Inspection. IEEE Proceedings of the 38th Southeastern Symposium on System Theory, 2006, s. 367-371.*

[20] *Bard, J. F. Machine setup and component placement in printed circuit board assembly. International Journal of Flexible Manufacturing systems, vol. 6, 1994, s. 5-31.*

[21] *Coombs, C. F.: Coombs' printed circuits handbook, 5th edition. New York: McGraw-Hill, 2001. n. 1400 s. ISBN 0-07-135016-0.*

[22] *Shewhart, W. A. Economic Control of Quality of Manufactured Product. New York: D. Van Nostrand Company, Inc, 1931. 501 s.*

[23] *Vitikainen, E. Mittalaitteiden kalibrointi – Ohjeita järjestelmän rakentamiseen. Tampere: Tammer-Paino Oy, 1993. 46 s. ISBN 951-817-577-2.*

[24] *Watanabe, Y. Automated optical inspection of surface mount components using 2D machine vision. Industrial Electronics Society, 1989. IECON '89, 15th Annual Conference of IEEE. s. 584-589.*

[25] *Juran, J. M. Juran's Quality Control Handbook, 4th ed. McGraw-Hill, USA, 1988. n. 1000 s. ISBN 0-07-033176-6.*

[26] *Shewhart, W. A. Statistical Method from the viewpoint of Quality Control. Dover Publications, New York, 1986. 155 s. ISBN 0-486-65232-7, alkuperäinen pianos 1938.*

[27] *Saarinen et al. Menetelmäopetuksen valtakunnallinen tietovaranto. Tampereen Yliopisto. http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/intro.html [viitattu 4.6.2007]*

[28] *Martin, P. L. Electronic Failure Analysis Handbook. McGraw-Hill, USA, 1999. n. 740 s. ISBN 0-07-041044-5.*

[29] *Alastalo et al. Johdanto luotettavuustekniikkaan. Opetushallitus. http://www.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/perusteet_6-2_johdanto_luotettavuustekniikkaan.html [viitattu 5.6.2007]*

[30] *Duncan, A. J. Quality Control and Industrial Statistics, 4th ed. Homewood, IL: Irwin, 1986. 1123 s. ISBN 0-256-03535-0.*

[31] *Harry, M. J. The Vision of Six Sigma: A Roadmap for Breakthrough, Volume 1, 5th ed. Tri Star Publishing, USA, 1997. n. 200 s. ISBN 0-9643555-7-4.*

[32] *Crosby, P. B. Laatu on ilmaista. Laatuyhdistys, Helsinki, 1985. 316 s. ISBN 0-9643555-7-4.*

[33] *Linear Technology. LT1129/LT1129-3.3/LT1129-5 lineaariregulaattorin datalehti. http://www.linear.com/pc/downloadDocument.do?navId=H0,C1,C1003,C1040,C1055,P1372,D2235 [viitattu 24.7.2007]*

[34] Burdick et al. Comparing Variability of Two Measurement Processes Using R&R Studies. 2002 ASQ Journal of Quality Technology, vol. 34, No. 1. s. 97-105.

[35] *Sematech. Alternative Models for Gauge Studies. Technology Transfer, February 24, 1994. http://ismi.sematech.org/docubase/document/1755atr.pdf [viitattu 26.6.2007]*

Liitteet

LIITE A Standardipoikkeamia normaalijakautuneelle aineistolle

+/- σ	68.26894921371%
+/- 2σ	95.44997361036%
+/- 3σ	99.73002039367%
+/- 4σ	99.99366575163%
+/- 5σ	99.99994266969%
+/- 6σ	99.99999980268%
+/- 7σ	99.99999999974%

LIITE B d_2 * -Taulukko

Values associated with the Distribution of the Average Range

Number of Subgroups (g)	Subgroup Size (m) 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1.0 1.41421	2.0 1.91155	2.9 2.23887	3.8 2.48124	4.7 2.67253	5.5 2.82981	6.3 2.96288	7.0 3.07794	7.7 3.17905	8.3 3.26909	9.0 3.35016	9.6 3.42378	10.2 3.49116	10.8 3.55333	11.3 3.61071	11.9 3.66422	12.4 3.71424	12.9 3.76118	13.4 3.80537
2	1.9 1.27931	3.8 1.80538	5.7 2.15069	7.5 2.40484	9.2 2.60438	10.8 2.76779	12.3 2.90562	13.8 3.02446	15.1 3.12869	16.5 3.22134	17.8 3.30463	19.0 3.38017	20.2 3.44922	21.3 3.51287	22.4 3.57156	23.5 3.62625	24.5 3.67734	25.5 3.72524	26.5 3.77032
3	2.8 1.23105	5.7 1.76858	8.4 2.12049	11.1 2.37883	13.6 2.58127	16.0 2.74681	18.3 2.88628	20.5 3.00643	22.6 3.11173	24.6 3.20526	26.5 3.28931	28.4 3.36550	30.1 3.43512	31.9 3.49927	33.5 3.55842	35.1 3.61351	36.7 3.66495	38.2 3.71319	39.7 3.75857
4	3.7 1.20621	7.5 1.74989	11.2 2.10522	14.7 2.36571	18.1 2.56964	21.3 2.73626	24.4 2.87656	27.3 2.99737	30.1 3.10321	32.7 3.19720	35.3 3.28163	37.7 3.35815	40.1 3.42805	42.4 3.49246	44.6 3.55183	46.7 3.60712	48.8 3.65875	50.8 3.70715	52.8 3.75268
5	4.6 1.19105	9.3 1.73857	13.9 2.09601	18.4 2.35781	22.6 2.56263	26.6 2.72991	30.4 2.87071	34.0 2.99192	37.5 3.09808	40.8 3.19235	44.0 3.27701	47.1 3.35372	50.1 3.42381	52.9 3.48836	55.7 3.54787	58.4 3.60328	61.0 3.65502	63.5 3.70352	65.9 3.74914
6	5.5 1.18083	11.1 1.73099	16.7 2.08985	22.0 2.35253	27.0 2.55795	31.8 2.72567	36.4 2.86680	40.8 2.98829	45.0 3.09467	49.0 3.18911	52.8 3.27392	56.5 3.35077	60.1 3.42097	63.5 3.48563	66.8 3.54522	70.0 3.60072	73.1 3.65253	76.1 3.70109	79.1 3.74678
7	6.4 1.17348	12.9 1.72555	19.4 2.08543	25.6 2.34875	31.5 2.55460	37.1 2.72263	42.5 2.86401	47.6 2.98568	52.4 3.09222	57.1 3.18679	61.6 3.27172	65.9 3.34866	70.0 3.41894	74.0 3.48368	77.9 3.54333	81.6 3.59888	85.3 3.65075	88.8 3.69936	92.2 3.74509
8	7.2 1.16794	14.8 1.72147	22.1 2.08212	29.2 2.34591	36.0 2.55208	42.4 2.72036	48.5 2.86192	54.3 2.98373	59.9 3.09039	65.2 3.18506	70.3 3.27006	75.2 3.34708	80.0 3.41742	84.6 3.48221	89.0 3.54192	93.3 3.59751	97.4 3.64941	101.4 3.69806	105.3 3.74382
9	8.1 1.16361	16.6 1.71828	24.9 2.07953	32.9 2.34370	40.4 2.55013	47.7 2.71858	54.5 2.86028	61.1 2.98221	67.3 3.08896	73.3 3.18370	79.1 3.26878	84.6 3.34585	90.0 3.41624	95.1 3.48107	100.1 3.54081	104.9 3.59644	109.5 3.64838	114.1 3.69705	118.5 3.74284
10	9.0 1.16014	18.4 1.71573	27.6 2.07746	36.5 2.34192	44.9 2.54856	52.9 2.71717	60.6 2.85898	67.8 2.98100	74.8 3.08781	81.5 3.18262	87.9 3.26775	94.0 3.34486	99.9 3.41529	105.6 3.48016	111.2 3.53993	116.5 3.59559	121.7 3.64755	126.7 3.69625	131.6 3.74205
11	9.9 1.15729	20.2 1.71363	30.4 2.07577	40.1 2.34048	49.4 2.54728	58.2 2.71600	66.6 2.85791	74.6 2.98000	82.2 3.08688	89.6 3.18174	96.6 3.26690	103.4 3.34406	109.9 3.41452	116.2 3.47941	122.3 3.53921	128.1 3.59489	133.8 3.64687	139.4 3.69558	144.7 3.74141
12	10.7 1.15490	22.0 1.71189	33.1 2.07436	43.7 2.33927	53.8 2.54621	63.5 2.71504	72.6 2.85702	81.3 2.97917	89.7 3.08610	97.7 3.18100	105.4 3.26620	112.7 3.34339	119.9 3.41387	126.7 3.47879	133.3 3.53861	139.8 3.59430	146.0 3.64630	152.0 3.69503	157.9 3.74087
13	11.6 1.15289	23.8 1.71041	35.8 2.07316	47.3 2.33824	58.3 2.54530	68.7 2.71422	78.6 2.85627	88.1 2.97847	97.1 3.08544	105.8 3.18037	114.1 3.26561	122.1 3.34282	129.8 3.41333	137.3 3.47826	144.4 3.53810	151.4 3.59381	158.1 3.64582	164.7 3.69457	171.0 3.74041
14	12.5 1.15115	25.7 1.70914	38.6 2.07213	51.0 2.33737	62.8 2.54452	74.0 2.71351	84.7 2.85562	94.9 2.97787	104.6 3.08487	113.9 3.17984	122.9 3.26510	131.5 3.34233	139.8 3.41286	147.8 3.47781	155.5 3.53766	163.0 3.59339	170.3 3.64541	177.3 3.69417	184.2 3.74002
15	13.4 1.14965	27.5 1.70804	41.3 2.07125	54.6 2.33661	67.2 2.54385	79.3 2.71290	90.7 2.85506	101.6 2.97735	112.1 3.08438	122.1 3.17938	131.7 3.26465	140.9 3.34191	149.8 3.41245	158.3 3.47742	166.6 3.53728	174.6 3.59302	182.4 3.64505	190.0 3.69382	197.3 3.73969
16	14.3 1.14833	29.3 1.70708	44.1 2.07047	58.2 2.33594	71.7 2.54326	84.5 2.71237	96.7 2.85457	108.4 2.97689	119.5 3.08395	130.2 3.17897	140.4 3.26427	150.2 3.34154	159.7 3.41210	168.9 3.47707	177.7 3.53695	186.3 3.59270	194.6 3.64474	202.6 3.69351	210.4 3.73939
17	15.1 1.14717	31.1 1.70623	46.8 2.06978	61.8 2.33535	76.2 2.54274	89.8 2.71190	102.8 2.85413	115.1 2.97649	127.0 3.08358	138.3 3.17861	149.2 3.26393	159.6 3.34121	169.7 3.41178	179.4 3.47677	188.8 3.53666	197.9 3.59242	206.7 3.64447	215.2 3.69325	223.6 3.73913
18	16.0 1.14613	32.9 1.70547	49.5 2.06917	65.5 2.33483	80.6 2.54228	95.1 2.71148	108.8 2.85375	121.9 2.97613	134.4 3.08324	146.4 3.17829	157.9 3.26362	169.0 3.34092	179.7 3.41150	190.0 3.47650	199.9 3.53640	209.5 3.59216	218.8 3.64422	227.9 3.69301	236.7 3.73890
19	16.9 1.14520	34.7 1.70480	52.3 2.06862	69.1 2.33436	85.1 2.54187	100.3 2.71111	114.8 2.85341	128.7 2.97581	141.9 3.08294	154.5 3.17801	166.7 3.26335	178.4 3.34066	189.6 3.41125	200.5 3.47626	211.0 3.53617	221.1 3.59194	231.0 3.64400	240.5 3.69280	249.8 3.73869
20	17.8 1.14437	36.5 1.70419	55.0 2.06813	72.7 2.33394	89.6 2.54149	105.6 2.71077	120.9 2.85310	135.4 2.97552	149.3 3.08267	162.7 3.17775	175.5 3.26311	187.8 3.34042	199.6 3.41103	211.0 3.47605	222.1 3.53596	232.8 3.59174	243.1 3.64380	253.2 3.69260	263.0 3.73850
d_2 cd	1.12838 0.876	1.69257 1.815	2.05875 2.7378	2.32593 3.623	2.53441 4.4658	2.70436 5.2673	2.8472 6.0305	2.97003 6.7582	3.07751 7.4539	3.17287 8.1207	3.25846 8.7602	3.33598 9.3751	3.40676 9.9679	3.47193 10.5396	3.53198 11.0913	3.58788 11.6259	3.64006 12.144	3.68896 12.6468	3.735 13.1362

Table entries: 1st line of each cell is the degrees of freedom (ν) and the 2nd line of each cell is d_2^*; d_2 is the infinity value of d_2^*: additional values of ν can be built up from the constant difference, *cd*.

Note: The notation used in this table follows that of Acheson Duncan, *Quality Control and Industrial Statistics*, 5th edition, McGraw-Hill, 1986.

$\nu\left(\overline{R}/d_2^*\right)^2/\sigma^{r2}$ is distributed approximately as a χ^2 distribution with ν degrees of freedom where $\overline{R}$ is the average range of *g* subgroups of size *m*

LIITE C Varianssianalyysin tulokset tutkimuksen mittauskohteille

Taulukossa käytettyjen termien selitykset:

SP = standardipoikkeama
Historiallinen std. poik. = tuotantotestausdatasta laskettu pitkän aikavälin standardipoikkeama
Ndc = number of distinct categories (erottelukyky)
GR&R yh. = Mittausprosessista aiheutunut vaihtelu
Toistett. = toistettavuus
Uusitt. = uusittavuus
Näyt. väl = näytteiden välinen vaihtelu
Operaatt. = operaattorista aiheutuva vaihtelu
Näyt*oper = näyte-operaattori –interaktiosta aiheutuva vaihtelu
%Vaihtelu = vaihtelulähteen osuus kokonaisvaihtelusta
%Toler. = vaihtelulähteen osuus toleranssivälistä
%Proses. = vaihtelulähteen osuus prosessissa havaitusta kokonaisvaihtelusta
* = lukuarvoa ei voi laskea aineiston perusteella

LIITE C1 Gage R&R –tulokset toimittajan A testausjärjestelmälle 3

+3,3V käyttöjännite, Prosessin toleranssiväli = 0,35, Ndc = 2
Historiallinen std. poik. = 0,012298

Lähde	Std.poik.	(6 * SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0035857	0,0215141	47,18	6,15	29,16	0,0000129	22,26
Toistett.	0,0035857	0,0215141	47,18	6,15	29,16	0,0000129	22,26
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaat.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0067001	0,0402008	88,17	11,49	54,48	0,0000449	77,74
Yhteensä	0,0075993	0,0455956	100,00	13,03	61,79	0,0000577	100,00

+1,9V käyttöjännite, Prosessin toleranssiväli = 0,4, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,01095

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0038653	0,0231917	61,90	5,80	35,30	0,0000149	38,31
Toistett.	0,0038653	0,0231917	61,90	5,80	35,30	0,0000149	38,31
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0049049	0,0294296	78,54	7,36	44,79	0,0000241	61,69
Yhteensä	0,0062449	0,0374695	100,00	9,37	57,03	0,0000390	100,00

+10V referenssijännite, Prosessin toleranssiväli = 0,33, Ndc = 10
Historiallinen std. poik. = 0,01479

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0014434	0,0086603	13,37	2,62	9,76	0,0000021	1,79
Toistett.	0,0014434	0,0086603	13,37	2,62	9,76	0,0000021	1,79
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0106955	0,0641731	99,10	19,45	72,32	0,0001144	98,21
Yhteensä	0,0107925	0,0647548	100,00	19,62	72,97	0,0001165	100,00

+2V referenssijännite, Prosessin toleranssiväli = 0,12, Ndc = 3
Historiallinen std. poik. = 0,0137

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0036670	0,0220021	36,19	18,34	26,77	0,0000134	13,10
Toistett.	0,0020412	0,0122474	20,15	10,21	14,90	0,0000042	4,06
Uusitt.	0,0030464	0,0182782	30,07	15,23	22,24	0,0000093	9,04
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0030464	0,0182782	30,07	15,23	22,24	0,0000093	9,04
Näyt. väl.	0,0094448	0,0566689	93,22	47,22	68,94	0,0000892	86,90
Yhteensä	0,0101317	0,0607903	100,00	50,66	73,95	0,0001027	100,00

+1V referenssijännite, Prosessin toleranssiväli = 0,09, Ndc = 2
Historiallinen std. poik. = 0,01144

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0038681	0,0232085	48,85	25,79	33,81	0,0000150	23,87
Toistett.	0,0035355	0,0212132	44,65	23,57	30,91	0,0000125	19,94
Uusitt.	0,0015691	0,0094147	19,82	10,46	13,72	0,0000025	3,93
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0015691	0,0094147	19,82	10,46	13,72	0,0000025	3,93
Näyt. väl.	0,0069085	0,0414510	87,25	46,06	60,39	0,0000477	76,13
Yhteensä	0,0079177	0,0475060	100,00	52,78	69,21	0,0000627	100,00

Virranmittaus, 1. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 4
Historiallinen std. poik. = 0,0115440

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0025237	0,0151422	27,77	9,46	21,86	0,0000064	7,71
Toistett.	0,0025237	0,0151422	27,77	9,46	21,86	0,0000064	7,71
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0087293	0,0523760	96,07	32,74	75,62	0,0000762	92,29
Yhteensä	0,0090868	0,0545209	100,00	34,08	78,72	0,0000826	100,00

Virranmittaus, 2. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 2
Historiallinen std. poik. = 0,0109222

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0035857	0,0215141	47,18	13,45	32,83	0,0000129	22,26
Toistett.	0,0035857	0,0215141	47,18	13,45	32,83	0,0000129	22,26
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0067001	0,0402008	88,17	25,13	61,34	0,0000449	77,74
Yhteensä	0,0075993	0,0455956	100,00	28,50	69,58	0,0000577	100,00

Virranmittaus, 3. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 6
Historiallinen std. poik. = 0,0105496

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0022227	0,0133363	22,65	8,34	21,07	0,0000049	5,13
Toistett.	0,0022227	0,0133363	22,65	8,34	21,07	0,0000049	5,13
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0095567	0,0573404	97,40	35,84	90,59	0,0000913	94,87
Yhteensä	0,0098118	0,0588709	100,00	36,79	93,01	0,0000963	100,00

Analogiatulo 1, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 1, 5V syötöllä,
Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,357738	2,14643	70,01	53,66	0,127976	49,02
Toistett.	0,345033	2,07020	67,52	51,75	0,119048	45,60
Uusitt.	0,094491	0,56695	18,49	14,17	0,008929	3,42
Operaatt.	0,094491	0,56695	18,49	14,17	0,008929	3,42
Näyt. väl.	0,364852	2,18911	71,40	54,73	0,133117	50,98
Yhteensä	0,510973	3,06584	100,00	76,65	0,261093	100,00

Analogiatulo 1, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 1, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 1, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1,
Historiallinen std. poik. = 0,732410

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,889757	5,33854	100,00	133,46	121,48	0,791667	100,00
Toistett.	0,288675	1,73205	32,44	43,30	39,41	0,083333	10,53
Uusitt.	0,841625	5,04975	94,59	126,24	114,91	0,708333	89,47
Operaatt.	0,557320	3,34392	62,64	83,60	76,09	0,310606	39,23
näyt*oper	0,630656	3,78394	70,88	94,60	86,11	0,397727	50,24
Näyt. väl.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00
Yhteensä	0,889757	5,33854	100,00	133,46	121,48	0,791667	100,00

Analogiatulo 1, 20mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,300110

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,222272	1,33363	89,85	33,34	74,06	0,0494048	80,73
Toistett.	0,222272	1,33363	89,85	33,34	74,06	0,0494048	80,73
Uusitt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,108612	0,65167	43,90	16,29	36,19	0,0117965	19,27
Yhteensä	0,247389	1,48433	100,00	37,11	82,43	0,0612013	100,00

Analogiatulo 2, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,224739

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,205577	1,23346	100,00	123,35	91,47	0,0422619	100,00
Toistett.	0,201187	1,20712	97,86	120,71	89,52	0,0404762	95,77
Uusitt.	0,042258	0,25355	20,56	25,35	18,80	0,0017857	4,23
Operaatt.	0,042258	0,25355	20,56	25,35	18,80	0,0017857	4,23
Näyt. väl.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,205577	1,23346	100,00	123,35	91,47	0,0422619	100,00

Analogiatulo 2, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,721845

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	1,10868	6,65207	100,00	166,30	153,59	1,22917	100,00
Toistett.	0,82916	4,97494	74,79	124,37	114,87	0,68750	55,93
Uusitt.	0,73598	4,41588	66,38	110,40	101,96	0,54167	44,07
Operaatt.	0,51124	3,06742	46,11	76,69	70,82	0,26136	21,26
näyt*oper	0,52944	3,17662	47,75	79,42	73,34	0,28030	22,80
Näyt. väl.	0,00000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,00000	0,00
Yhteensä	1,10868	6,65207	100,00	166,30	153,59	1,22917	100,00

Analogiatulo 2, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 20mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Välipiirijännite UC+, Prosessin toleranssiväli = 0,18, Ndc = 3
Historiallinen std. poik. = 0,0109294

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0029277	0,0175662	33,77	9,76	26,79	0,0000086	11,40
Toistett.	0,0029277	0,0175662	33,77	9,76	26,79	0,0000086	11,40
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0081613	0,0489679	94,13	27,20	74,67	0,0000666	88,60
Yhteensä	0,0086706	0,0520233	100,00	28,90	79,33	0,0000752	100,00

Välipiirijännitteen puoliväli, UC+/2, Prosessin toleranssiväli = 0,24, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,0154939

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0140259	0,0841555	95,51	35,06	90,53	0,0001967	91,23
Toistett.	0,0120020	0,0720119	81,73	30,00	77,46	0,0001440	66,80
Uusitt.	0,0072580	0,0435480	49,43	18,15	46,84	0,0000527	24,43
Operaatt.	0,0072580	0,0435480	49,43	18,15	46,84	0,0000527	24,43
Näyt. väl.	0,0043488	0,0260930	29,61	10,87	28,07	0,0000189	8,77
Yhteensä	0,0146846	0,0881078	100,00	36,71	94,78	0,0002156	100,00

Analogialähtö 1, 0mA mittaus, prossin toleranssiväli = 1,2, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,0158146

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0057735	0,0346410	100,00	2,89	36,51	0,0000333	100,00
Yhteensä	0,0057735	0,0346410	100,00	2,89	36,51	0,0000333	100,00

Analogialähtö 1, 10 mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 12
Historiallinen std. poik. = 0,0574591

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0072300	0,043380	10,93	3,61	12,58	0,0000523	1,19
Toistett.	0,0064550	0,038730	9,76	3,23	11,23	0,0000417	0,95
Uusitt.	0,0032567	0,019540	4,92	1,63	5,67	0,0000106	0,24
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0032567	0,019540	4,92	1,63	5,67	0,0000106	0,24
Näyt. väl.	0,0657475	0,394485	99,40	32,87	114,42	0,0043227	98,81
Yhteensä	0,0661438	0,396863	100,00	33,07	115,11	0,0043750	100,00

Analogialöhtö 1, 20 mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 28
Historiallinen std. poik. = 0,0595539

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0028868	0,017321	4,87	1,44	4,85	0,0000083	0,24
Toistett.	0,0028868	0,017321	4,87	1,44	4,85	0,0000083	0,24
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0591608	0,354965	99,88	29,58	99,34	0,0035000	99,76
Yhteensä	0,0592312	0,355387	100,00	29,62	99,46	0,0035083	100,00

Analogialähtö 2, 0 mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 14
Historiallinen std. poik. = 0,0555606

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0064550	0,038730	9,46	3,23	11,62	0,0000417	0,90
Toistett.	0,0050000	0,030000	7,33	2,50	9,00	0,0000250	0,54
Uusitt.	0,0040825	0,024495	5,98	2,04	7,35	0,0000167	0,36
Operaatt.	0,0026112	0,015667	3,83	1,31	4,70	0,0000068	0,15
näyt*oper	0,0031382	0,018829	4,60	1,57	5,65	0,0000098	0,21
Näyt. väl.	0,0679238	0,407543	99,55	33,96	122,25	0,0046136	99,10
Yhteensä	0,0682298	0,409379	100,00	34,11	122,80	0,0046553	100,00

Analogialähtö 2, 10 mA, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 17
Historiallinen std. poik. = 0,0612269

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0050709	0,030426	8,07	2,54	8,28	0,0000257	0,65
Toistett.	0,0048550	0,029130	7,73	2,43	7,93	0,0000236	0,60
Uusitt.	0,0014639	0,008783	2,33	0,73	2,39	0,0000021	0,05
Operaatt.	0,0014639	0,008783	2,33	0,73	2,39	0,0000021	0,05
Näyt. väl.	0,0626013	0,375608	99,67	31,30	102,24	0,0039189	99,35
Yhteensä	0,0628063	0,376838	100,00	31,40	102,58	0,0039446	100,00

Analogialähtö 2, 20 mA, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,0123310

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0041115	0,0246692	72,06	2,06	33,34	0,0000169	51,93
Toistett.	0,0040237	0,0241424	70,52	2,01	32,63	0,0000162	49,73
Uusitt.	0,0008452	0,0050709	14,81	0,42	6,85	0,0000007	2,19
Operaatt.	0,0008452	0,0050709	14,81	0,42	6,85	0,0000007	2,19
Näyt. väl.	0,0039559	0,0237356	69,33	1,98	32,08	0,0000156	48,07
Yhteensä	0,0057056	0,0342337	100,00	2,85	46,27	0,0000326	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. U-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 2
Historiallinen std. poik. = 0,005

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0020702	0,0124212	45,99	4,14	41,40	0,0000043	21,15
Toistett.	0,0020702	0,0124212	45,99	4,14	41,40	0,0000043	21,15
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0039968	0,0239805	88,80	7,99	79,94	0,0000160	78,85
Yhteensä	0,0045011	0,0270065	100,00	9,00	90,02	0,0000203	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. U-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00		
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
						0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. V-vaihe,Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00		
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
						0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. V-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00		
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
						0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. W-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00		
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
						0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. W-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00		
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
						0,0000152	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,107738

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,117572	0,705435	100,00	12,16	109,13	0,0138233	100,00
Toistett.	0,087524	0,525144	74,44	9,05	81,24	0,0076604	55,42
Uusitt.	0,078504	0,471023	66,77	8,12	72,87	0,0061629	44,58
Operaatt.	0,016137	0,096822	13,73	1,67	14,98	0,0002604	1,88
näyt*oper	0,076827	0,460964	65,34	7,95	71,31	0,0059025	42,70
Näyt. väl.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,117572	0,705435	100,00	12,16	109,13	0,0138233	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. U-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,191769

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,140442	0,842654	88,04	14,53	73,24		
Toistett.	0,140442	0,842654	88,04	14,53	73,24	0,0197240	77,51
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0197240	77,51
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,075651	0,453905	47,42	7,83	39,45	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,159521	0,957129	100,00	16,50	83,18	0,0057231	22,49
						0,0254471	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. V-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,196117

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,114442	0,68665	68,55	11,84	58,35	0,0130970	46,99
Toistett.	0,114442	0,68665	68,55	11,84	58,35	0,0130970	46,99
Uusitt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,121562	0,72937	72,81	12,58	61,98	0,0147773	53,01
Yhteensä	0,166956	1,00174	100,00	17,27	85,13	0,0278743	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. V-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,212239

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,140485	0,842912	91,29	14,53	66,19	0,0197361	83,34
Toistett.	0,140485	0,842912	91,29	14,53	66,19	0,0197361	83,34
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,062810	0,376862	40,82	6,50	29,59	0,0039451	16,66
Yhteensä	0,153887	0,923323	100,00	15,92	72,51	0,0236813	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. W-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,200209

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,130489	0,782931	91,38	13,50	65,18		
Toistett.	0,130489	0,782931	91,38	13,50	65,18	0,0170273	83,51
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0170273	83,51
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,057994	0,347967	40,61	6,00	28,97	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,142796	0,856774	100,00	14,77	71,32	0,0033634	16,49
						0,0203906	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. W-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,181824

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,152873	0,917240	99,39	15,81	84,08		
Toistett.	0,152873	0,917240	99,39	15,81	84,08	0,0233702	98,78
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0233702	98,78
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,017000	0,102002	11,05	1,76	9,35	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,153816	0,922894	100,00	15,91	84,60	0,0002890	1,22
						0,0236593	100,00

LIITE C2 Gage R&R –tulokset toimittajan A testausjärjestelmälle 4

+3,3V käyttöjännite, Prosessin toleranssiväli = 0,35, Ndc = 2
Historiallinen std. poik. = 0,007521

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0038188	0,0229129	51,80	6,55	50,78	0,0000146	26,83
Toistett.	0,0032275	0,0193649	43,78	5,53	42,91	0,0000104	19,16
Uusitt.	0,0020412	0,0122474	27,69	3,50	27,14	0,0000042	7,67
Operaatt.	0,0012309	0,0073855	16,70	2,11	16,37	0,0000015	2,79
näyt*oper	0,0016283	0,0097701	22,09	2,79	21,65	0,0000027	4,88
Näyt. väl.	0,0063066	0,0378394	85,54	10,81	83,85	0,0000398	73,17
Yhteensä	0,0073727	0,0442359	100,00	12,64	98,03	0,0000544	100,00

+1,9V käyttöjännite, Prosessin toleranssiväli = 0,4, Ndc = 2
Historiallinen std. poik. = 0,00598428

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0032275	0,0193649	51,80	4,84	53,93	0,0000104	26,83
Toistett.	0,0025000	0,0150000	40,12	3,75	41,78	0,0000063	16,10
Uusitt.	0,0020412	0,0122474	32,76	3,06	34,11	0,0000042	10,73
Operaatt.	0,0004352	0,0026112	6,98	0,65	7,27	0,0000002	0,49
näyt*oper	0,0019943	0,0119659	32,01	2,99	33,33	0,0000040	10,24
Näyt. väl.	0,0053300	0,0319801	85,54	8,00	89,07	0,0000284	73,17
Yhteensä	0,0062310	0,0373862	100,00	9,35	104,12	0,0000388	100,00

+10V referenssijännite, Prosessin toleranssiväli = 0,33, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,01386

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0120605	0,0723627	100,00	21,93	87,02	0,0001455	100,00
Yhteensä	0,0120605	0,0723627	100,00	21,93	87,02	0,0001455	100,00

+2V referenssijännite, Prosessin toleranssiväli = 0,12, Ndc = 3
Historiallinen std. poik. = 0,01032

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0032275	0,0193649	41,14	16,14	31,27	0,0000104	16,92
Toistett.	0,0014434	0,0086603	18,40	7,22	13,99	0,0000021	3,38
Uusitt.	0,0028868	0,0173205	36,79	14,43	27,97	0,0000083	13,54
Operaatt.	0,0012309	0,0073855	15,69	6,15	11,93	0,0000015	2,46
näyt*oper	0,0026112	0,0156670	33,28	13,06	25,30	0,0000068	11,08
Näyt. väl.	0,0071510	0,0429058	91,15	35,75	69,29	0,0000511	83,08
Yhteensä	0,0078456	0,0470734	100,00	39,23	76,02	0,0000616	100,00

+1V referenssijännite, Prosessin toleranssiväli = 0,09, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,00481371

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0038266	0,0229596	76,83	25,51	79,49	0,0000146	59,03
Toistett.	0,0038032	0,0228192	76,36	25,35	79,01	0,0000145	58,31
Uusitt.	0,0004226	0,0025355	8,48	2,82	8,78	0,0000002	0,72
Operaatt.	0,0004226	0,0025355	8,48	2,82	8,78	0,0000002	0,72
Näyt. väl.	0,0031878	0,0191271	64,01	21,25	66,22	0,0000102	40,97
Yhteensä	0,0049805	0,0298829	100,00	33,20	103,46	0,0000248	100,00

Virranmittaus, 1. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0041404	0,0248424	39,27	15,53	0,0000171	15,42
Toistett.	0,0041404	0,0248424	39,27	15,53	0,0000171	15,42
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0096959	0,0581752	91,97	36,36	0,0000940	84,58
Yhteensä	0,0105429	0,0632574	100,00	39,54	0,0001112	100,00

Virranmittaus, 2. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0028868	0,0173205	36,40	10,83	0,0000083	13,25
Toistett.	0,0020412	0,0122474	25,74	7,65	0,0000042	6,63
Uusitt.	0,0020412	0,0122474	25,74	7,65	0,0000042	6,63
Operaatt.	0,0009731	0,0058387	12,27	3,65	0,0000009	1,51
näyt*oper	0,0017944	0,0107661	22,63	6,73	0,0000032	5,12
Näyt. väl.	0,0073855	0,0443129	93,14	27,70	0,0000545	86,75
Yhteensä	0,0079296	0,0475777	100,00	29,74	0,0000629	100,00

Virranmittaus, 3. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0026390	0,0158340	33,25	9,90	0,0000070	11,05
Toistett.	0,0026277	0,0157661	33,10	9,85	0,0000069	10,96
Uusitt.	0,0002440	0,0014639	3,07	0,91	0,0000001	0,09
Operaatt.	0,0002440	0,0014639	3,07	0,91	0,0000001	0,09
Näyt. väl.	0,0074859	0,0449155	94,31	28,07	0,0000560	88,95
Yhteensä	0,0079375	0,0476248	100,00	29,77	0,0000630	100,00

Analogiatulo 1, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *, Hist. std. poik. = 0,0708282

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 1, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,494157

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,288675	1,73205	74,16	43,30	58,42	0,083333	55,00
Toistett.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00
Uusitt.	0,288675	1,73205	74,16	43,30	58,42	0,083333	55,00
Operaatt.	0,087039	0,52223	22,36	13,06	17,61	0,007576	5,00
näyt*oper	0,275241	1,65145	70,71	41,29	55,70	0,075758	50,00
Näyt. väl.	0,261116	1,56670	67,08	39,17	52,84	0,068182	45,00
Yhteensä	0,389249	2,33550	100,00	58,39	78,77	0,151515	100,00

Analogiatulo 1, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 1, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *, Hist. std. poik. = 0,375284

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 1, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,514027

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,456435	2,73861	100,00	68,47	88,80	0,208333	100,00
Toistett.	0,204124	1,22474	44,72	30,62	39,71	0,041667	20,00
Uusitt.	0,408248	2,44949	89,44	61,24	79,42	0,166667	80,00
Operaatt.	0,208712	1,25227	45,73	31,31	40,60	0,043561	20,91
näyt*oper	0,350865	2,10519	76,87	52,63	68,26	0,123106	59,09
Näyt. väl.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00
Yhteensä	0,456435	2,73861	100,00	68,47	88,80	0,208333	100,00

Analogiatulo 1, 20mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,322226

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,222272	1,33363	60,91	33,34	68,98	0,049405	37,10
Toistett.	0,222272	1,33363	60,91	33,34	68,98	0,049405	37,10
Uusitt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00
Näyt. väl.	0,289424	1,73654	79,31	43,41	89,82	0,083766	62,90
Yhteensä	0,364926	2,18956	100,00	54,74	113,25	0,133171	100,00

Analogiatulo 2, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,277460

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,322749	1,93649	74,54	193,65	116,32	0,104167	55,56
Toistett.	0,250000	1,50000	57,74	150,00	90,10	0,062500	33,33
Uusitt.	0,204124	1,22474	47,14	122,47	73,57	0,041667	22,22
Operaatt.	0,043519	0,26112	10,05	26,11	15,68	0,001894	1,01
näyt*oper	0,199431	1,19659	46,06	119,66	71,88	0,039773	21,21
Näyt. väl.	0,288675	1,73205	66,67	173,21	104,04	0,083333	44,44
Yhteensä	0,433013	2,59808	100,00	259,81	156,06	0,187500	100,00

Analogiatulo 2, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,375284

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,522233	3,13340	88,71	78,33	139,16	0,272727	78,69
Toistett.	0,408248	2,44949	69,35	61,24	108,78	0,166667	48,09
Uusitt.	0,325669	1,95402	55,32	48,85	86,78	0,106061	30,60
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,000000	0,00
näyt*oper	0,325669	1,95402	55,32	48,85	86,78	0,106061	30,60
Näyt. väl.	0,271779	1,63067	46,16	40,77	72,42	0,073864	21,31
Yhteensä	0,588720	3,53232	100,00	88,31	156,87	0,346591	100,00

Analogiatulo 2, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 20mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,107826

Vaihtelu = 0

Välipiirijännite UC+, Prosessin toleranssiväli = 0,18, Ndc = 3
Historiallinen std. poik. = 0,00726606

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0028868	0,0173205	37,02	9,62	39,73	0,0000083	13,71
Toistett.	0,0028868	0,0173205	37,02	9,62	39,73	0,0000083	13,71
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0072431	0,0434584	92,89	24,14	99,68	0,0000525	86,29
Yhteensä	0,0077971	0,0467829	100,00	25,99	107,31	0,0000608	100,00

Välipiirijänn. puoliväli UC+/2, Prosessin toleranssiväli = 0,18, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,0145099

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0123972	0,0743832	95,69	41,32	85,44	0,0001537	91,57
Toistett.	0,0082231	0,0493385	63,47	27,41	56,67	0,0000676	40,29
Uusitt.	0,0092775	0,0556648	71,61	30,92	63,94	0,0000861	51,28
Operaatt.	0,0092775	0,0556648	71,61	30,92	63,94	0,0000861	51,28
Näyt. väl.	0,0037624	0,0225746	29,04	12,54	25,93	0,0000142	8,43
Yhteensä	0,0129556	0,0777333	100,00	43,19	89,29	0,0001678	100,00

Analogialähtö 1, 0mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,0118296

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0057735	0,0346410	100,00	2,89	48,81	0,0000333	100,00
Yhteensä	0,0057735	0,0346410	100,00	2,89	48,81	0,0000333	100,00

Analogialähtö 1, 10mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 22
Historiallinen std. poik. = 0,0610265

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0044454	0,026673	6,18	2,22	7,28	0,0000198	0,38
Toistett.	0,0044454	0,026673	6,18	2,22	7,28	0,0000198	0,38
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0718280	0,430968	99,81	35,91	117,70	0,0051593	99,62
Yhteensä	0,0719654	0,431793	100,00	35,98	117,92	0,0051790	100,00

Analogialähtö 1, 20mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 20
Historiallinen std. poik. = 0,0643874

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0041404	0,024842	6,86	2,07	6,43	0,0000171	0,47
Toistett.	0,0041404	0,024842	6,86	2,07	6,43	0,0000171	0,47
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0602479	0,361487	99,76	30,12	93,57	0,0036298	99,53
Yhteensä	0,0603900	0,362340	100,00	30,19	93,79	0,0036469	100,00

Analogialähtö 2, 0mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 31, Historiallinen std. poik. = 0,0653601

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0028868	0,017321	4,41	1,44	4,42	0,0000083	0,19
Toistett.	0,0028868	0,017321	4,41	1,44	4,42	0,0000083	0,19
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0654356	0,392614	99,90	32,72	100,12	0,0042818	99,81
Yhteensä	0,0654992	0,392995	100,00	32,75	100,21	0,0042902	100,00

Analogialähtö 2, 10mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 32
Historiallinen std. poik. = 0,0658355

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
						0,0000083	0,19
						0,0000083	0,19
GR&R yht.	0,0028868	0,017321	4,37	1,44	4,38	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0028868	0,017321	4,37	1,44	4,38	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0043621	99,81
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0043705	100,00
Näyt. väl.	0,0660464	0,396278	99,90	33,02	100,32		
Yhteensä	0,0661094	0,396656	100,00	33,05	100,42		

Analogialähtö 2, 20mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,0141599

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0050474	0,0302844	80,44	2,52	35,65	0,0000255	64,71
Toistett.	0,0050474	0,0302844	80,44	2,52	35,65	0,0000255	64,71
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0037277	0,0223665	59,41	1,86	26,33	0,0000139	35,29
Yhteensä	0,0062747	0,0376484	100,00	3,14	44,31	0,0000394	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 2

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0025746	0,0154479	49,82	5,15	0,0000066	24,82
Toistett.	0,0014434	0,0086603	27,93	2,89	0,0000021	7,80
Uusitt.	0,0021320	0,0127920	41,26	4,26	0,0000045	17,02
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0021320	0,0127920	41,26	4,26	0,0000045	17,02
Näyt. väl.	0,0044806	0,0268836	86,70	8,96	0,0000201	75,18
Yhteensä	0,0051676	0,0310059	100,00	10,34	0,0000267	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	0,0000152	100,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *
Historiallinen std. poik. = 0,004

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	97,31	0,0000152	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,142957

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,126508	0,759046	100,00	13,09	88,49	0,0160042	100,00
Toistett.	0,126508	0,759046	100,00	13,09	88,49	0,0160042	100,00
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,126508	0,759046	100,00	13,09	88,49	0,0160042	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,250233

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,223121	1,33873	97,47	23,08	89,17	0,0497831	95,00
Toistett.	0,209169	1,25502	91,38	21,64	83,59	0,0437518	83,49
Uusitt.	0,077661	0,46597	33,93	8,03	31,04	0,0060312	11,51
Operaatt.	0,077661	0,46597	33,93	8,03	31,04	0,0060312	11,51
Näyt. väl.	0,051164	0,30698	22,35	5,29	20,45	0,0026177	5,00
Yhteensä	0,228912	1,37347	100,00	23,68	91,48	0,0524008	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,257958

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,161927	0,97156	80,95	16,75	62,77	0,0262202	65,53
Toistett.	0,161927	0,97156	80,95	16,75	62,77	0,0262202	65,53
Uusitt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,117448	0,70469	58,71	12,15	45,53	0,0137940	34,47
Yhteensä	0,200035	1,20021	100,00	20,69	77,55	0,0400142	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,2345

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,200712	1,20427	86,83	20,76	85,59	0,0402853	75,39
Toistett.	0,200712	1,20427	86,83	20,76	85,59	0,0402853	75,39
Uusitt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,114672	0,68803	49,61	11,86	48,90	0,0131496	24,61
Yhteensä	0,231160	1,38696	100,00	23,91	98,58	0,0534349	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,251134

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,158007	0,948044	100,00	16,35	62,92	0,0249663	100,00
Toistett.	0,158007	0,948044	100,00	16,35	62,92	0,0249663	100,00
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,158007	0,948044	100,00	16,35	62,92	0,0249663	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 5,8, Ndc = 1
Historiallinen std. poik. = 0,25488

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	(%Proses.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,190236	1,14142	77,56	19,68	74,64	0,0361898	60,16
Toistett.	0,190236	1,14142	77,56	19,68	74,64	0,0361898	60,16
Uusitt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,00000	0,00	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,154811	0,92886	63,12	16,01	60,74	0,0239663	39,84
Yhteensä	0,245268	1,47161	100,00	25,37	96,23	0,0601562	100,00

LIITE C3 Gage R&R –tulokset toimittajan B testausjärjestelmälle 1

+5V ref.jännite minimisyötöllä, Prosessin toleranssiväli = 0,5, Ndc = 15

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0014434	0,0086603	9,05	1,73	0,0000021	0,82
Toistett.	0,0014434	0,0086603	9,05	1,73	0,0000021	0,82
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0158831	0,0952986	99,59	19,06	0,0002523	99,18
Yhteensä	0,0159485	0,0956913	100,00	19,14	0,0002544	100,00

+5V ref.jännite nimellissyötöllä, Prosessin toleranssiväli = 0,6, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0813569	0,488141	100,00	81,36	0,0066189	100,00
Toistett.	0,0691466	0,414880	84,99	69,15	0,0047812	72,24
Uusitt.	0,0428683	0,257210	52,69	42,87	0,0018377	27,76
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0428683	0,257210	52,69	42,87	0,0018377	27,76
Näyt. väl.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0813569	0,488141	100,00	81,36	0,0066189	100,00

+5V ref.jännite maksimisyötöllä, Prosessin toleranssiväli = 0,5, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0155700	0,0934199	100,00	18,68	0,0002424	100,00
Yhteensä	0,0155700	0,0934199	100,00	18,68	0,0002424	100,00

+10V ref.jänn. nimellissyötöllä, Prosessin toleranssiväli = 0,33, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0111464	0,0668785	100,00	20,27	0,0001242	100,00
Yhteensä	0,0111464	0,0668785	100,00	20,27	0,0001242	100,00

+10V ref.jänn. maksimisyötöllä, Prosessin toleranssiväli = 0,33, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0120605	0,0723627	100,00	21,93	0,0001455	100,00
Yhteensä	0,0120605	0,0723627	100,00	21,93	0,0001455	100,00

Välipiirijännite UC+, Prosessin toleranssiväli = 0,18, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0036433	0,0218599	41,77	12,14	0,0000133	17,45
Toistett.	0,0036105	0,0216630	41,40	12,04	0,0000130	17,14
Uusitt.	0,0004880	0,0029277	5,59	1,63	0,0000002	0,31
Operaatt.	0,0004880	0,0029277	5,59	1,63	0,0000002	0,31
Näyt. väl.	0,0079242	0,0475449	90,86	26,41	0,0000628	82,55
Yhteensä	0,0087216	0,0523295	100,00	29,07	0,0000761	100,00

Välipiirijänn. puoliväli UC+/2, Prosessin toleranssiväli = 0,18, Ndc = 2

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0049044	0,0294263	49,85	16,35	0,0000241	24,85
Toistett.	0,0043301	0,0259808	44,02	14,43	0,0000187	19,37
Uusitt.	0,0023028	0,0138170	23,41	7,68	0,0000053	5,48
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0023028	0,0138170	23,41	7,68	0,0000053	5,48
Näyt. väl.	0,0085280	0,0511682	86,69	28,43	0,0000727	75,15
Yhteensä	0,0098377	0,0590262	100,00	32,79	0,0000968	100,00

Virranmittaus, 1. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0030375	0,0182248	30,51	11,39	0,0000092	9,31
Toistett.	0,0030375	0,0182248	30,51	11,39	0,0000092	9,31
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0094806	0,0568833	95,23	35,55	0,0000899	90,69
Yhteensä	0,0099553	0,0597315	100,00	37,33	0,0000991	100,00

Virranmittaus, 2. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0025237	0,0151422	31,83	9,46	0,0000064	10,13
Toistett.	0,0025237	0,0151422	31,83	9,46	0,0000064	10,13
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0075169	0,0451016	94,80	28,19	0,0000565	89,87
Yhteensä	0,0079293	0,0475756	100,00	29,73	0,0000629	100,00

Virranmittaus, 3. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 2

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0044594	0,0267565	46,20	16,72	0,0000199	21,34
Toistett.	0,0035355	0,0212132	36,63	13,26	0,0000125	13,41
Uusitt.	0,0027178	0,0163067	28,15	10,19	0,0000074	7,93
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0027178	0,0163067	28,15	10,19	0,0000074	7,93
Näyt. väl.	0,0085613	0,0513677	88,69	32,10	0,0000733	78,66
Yhteensä	0,0096531	0,0579184	100,00	36,20	0,0000932	100,00

Analogiatulo 1, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0324588	0,194753	37,16	4,87	0,0010536	13,81
Toistett.	0,0319039	0,191423	36,52	4,79	0,0010179	13,34
Uusitt.	0,0059761	0,035857	6,84	0,90	0,0000357	0,47
Operaatt.	0,0059761	0,035857	6,84	0,90	0,0000357	0,47
Näyt. väl.	0,0811044	0,486626	92,84	12,17	0,0065779	86,19
Yhteensä	0,0873584	0,524151	100,00	13,10	0,0076315	100,00

Analogiatulo 1, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0324588	0,194753	42,03	4,87	0,0010536	17,66
Toistett.	0,0319039	0,191423	41,31	4,79	0,0010179	17,06
Uusitt.	0,0059761	0,035857	7,74	0,90	0,0000357	0,60
Operaatt.	0,0059761	0,035857	7,74	0,90	0,0000357	0,60
Näyt. väl.	0,0700803	0,420482	90,74	10,51	0,0049113	82,34
Yhteensä	0,0772323	0,463394	100,00	11,58	0,0059648	100,00

Analogiatulo 2, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 5

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,027924	0,167545	25,17	4,19	0,0007798	6,34
Toistett.	0,027924	0,167545	25,17	4,19	0,0007798	6,34
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,107349	0,644094	96,78	16,10	0,0115238	93,66
Yhteensä	0,110921	0,665529	100,00	16,64	0,0123036	100,00

Analogiatulo 1, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 8

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,020702	0,124212	16,23	3,11	0,0004286	2,63
Toistett.	0,020702	0,124212	16,23	3,11	0,0004286	2,63
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,125856	0,755138	98,67	18,88	0,0158398	97,37
Yhteensä	0,127548	0,765286	100,00	19,13	0,0162684	100,00

Analogiatulo 2, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,134607	0,807642	99,65	80,76	0,0181190	99,29
Toistett.	0,134607	0,807642	99,65	80,76	0,0181190	99,29
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,011372	0,068234	8,42	6,82	0,0001293	0,71
Yhteensä	0,135087	0,810519	100,00	81,05	0,0182484	100,00

Analogiatulo 1, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0144338	0,0866025	100,00	8,66	0,0002083	100,00
Toistett.	0,0144338	0,0866025	100,00	8,66	0,0002083	100,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0144338	0,0866025	100,00	8,66	0,0002083	100,00

Analogiatulo 2, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0263899	0,158340	29,39	3,96	0,0006964	8,64
Toistett.	0,0262769	0,157661	29,27	3,94	0,0006905	8,56
Uusitt.	0,0024398	0,014639	2,72	0,37	0,0000060	0,07
Operaatt.	0,0024398	0,014639	2,72	0,37	0,0000060	0,07
Näyt. väl.	0,0858211	0,514927	95,58	12,87	0,0073653	91,36
Yhteensä	0,0897869	0,538721	100,00	13,47	0,0080617	100,00

Analogiatulo 1, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0207020	0,124212	32,52	3,11	0,0004286	10,58
Toistett.	0,0207020	0,124212	32,52	3,11	0,0004286	10,58
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0601990	0,361194	94,56	9,03	0,0036239	89,42
Yhteensä	0,0636592	0,381955	100,00	9,55	0,0040525	100,00

Analogiatulo 2, 20mA sytöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0263899	0,158340	32,62	3,96	0,0006964	10,64
Toistett.	0,0262769	0,157661	32,48	3,94	0,0006905	10,55
Uusitt.	0,0024398	0,014639	3,02	0,37	0,0000060	0,09
Operaatt.	0,0024398	0,014639	3,02	0,37	0,0000060	0,09
Näyt. väl.	0,0764860	0,458916	94,53	11,47	0,0058501	89,36
Yhteensä	0,0809107	0,485464	100,00	12,14	0,0065465	100,00

Analogiatulo 1, 20mA sytöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0253546	0,152128	36,35	3,80	0,0006429	13,21
Toistett.	0,0242752	0,145651	34,80	3,64	0,0005893	12,11
Uusitt.	0,0073193	0,043916	10,49	1,10	0,0000536	1,10
Operaatt.	0,0073193	0,043916	10,49	1,10	0,0000536	1,10
Näyt. väl.	0,0649842	0,389905	93,16	9,75	0,0042229	86,79
Yhteensä	0,0697553	0,418532	100,00	10,46	0,0048658	100,00

Analogiatulo 2, 0mA sytöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0478714	0,287228	95,38	28,72	0,0022917	90,98
Toistett.	0,0353553	0,212132	70,44	21,21	0,0012500	49,62
Uusitt.	0,0322749	0,193649	64,31	19,36	0,0010417	41,35
Operaatt.	0,0282038	0,169223	56,20	16,92	0,0007955	31,58
näyt*oper	0,0156911	0,094147	31,26	9,41	0,0002462	9,77
Näyt. väl.	0,0150756	0,090453	30,04	9,05	0,0002273	9,02
Yhteensä	0,0501890	0,301134	100,00	30,11	0,0025189	100,00

Analogialähtö 1, 0mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0028868	0,0173205	100,00	1,44	0,0000083	100,00
Yhteensä	0,0028868	0,0173205	100,00	1,44	0,0000083	100,00

Analogialähtö 2, 10mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 36

					Varianssi	%Osuus
					0,0000078	0,15
Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	0,0000078	0,15
GR&R yht.	0,0027924	0,016755	3,87	1,40	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0027924	0,016755	3,87	1,40	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0051861	99,85
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0051939	100,00
Näyt. väl.	0,0720144	0,432086	99,92	36,01		
Yhteensä	0,0720685	0,432411	100,00	36,03		

Analogialähtö 1, 10mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 22

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0046291	0,027775	6,28	2,31	0,0000214	0,39
Toistett.	0,0046291	0,027775	6,28	2,31	0,0000214	0,39
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0736054	0,441632	99,80	36,80	0,0054177	99,61
Yhteensä	0,0737508	0,442505	100,00	36,88	0,0054392	100,00

Analogialähtö 2, 20mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 28

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0034761	0,020857	4,86	1,74	0,0000121	0,24
Toistett.	0,0034761	0,020857	4,86	1,74	0,0000121	0,24
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0714286	0,428572	99,88	35,71	0,0051020	99,76
Yhteensä	0,0715131	0,429079	100,00	35,76	0,0051141	100,00

Analogialähtö 1, 20mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 30

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0033452	0,020071	4,57	1,67	0,0000112	0,21
Toistett.	0,0033452	0,020071	4,57	1,67	0,0000112	0,21
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0731194	0,438716	99,90	36,56	0,0053464	99,79
Yhteensä	0,0731959	0,439175	100,00	36,60	0,0053576	100,00

Analogialähtö 2, 0mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = *

Vaihtelu = 0

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	0,0000152	100,00
Yhteensä	0,0038925	0,0233550	100,00	7,78	0,0000152	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 2

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0014434	0,0086603	43,93	2,89	0,0000021	19,30
Toistett.	0,0014434	0,0086603	43,93	2,89	0,0000021	19,30
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0029516	0,0177098	89,83	5,90	0,0000087	80,70
Yhteensä	0,0032856	0,0197139	100,00	6,57	0,0000108	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. V-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0042640	0,0255841	100,00	8,53	0,0000182	100,00
Yhteensä	0,0042640	0,0255841	100,00	8,53	0,0000182	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. V-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0042640	0,0255841	100,00	8,53	0,0000182	100,00
Yhteensä	0,0042640	0,0255841	100,00	8,53	0,0000182	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. W-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0042640	0,0255841	100,00	8,53	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0042640	0,0255841	100,00	8,53	0,0000182	100,00
					0,0000182	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 850, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	72,620	435,718	70,53	51,26	5273,6	49,74
Toistett.	72,620	435,718	70,53	51,26	5273,6	49,74
Uusitt.	0,000	0,000	0,00	0,00	0,0	0,00
Operaatt.	0,000	0,000	0,00	0,00	0,0	0,00
Näyt. väl.	72,999	437,995	70,89	51,53	5328,9	50,26
Yhteensä	102,968	617,810	100,00	72,68	10602,5	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 850, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	63,3013	379,808	77,04	44,68	4007,05	59,34
Toistett.	58,2266	349,359	70,86	41,10	3390,33	50,21
Uusitt.	24,8338	149,003	30,22	17,53	616,72	9,13
Operaatt.	24,8338	149,003	30,22	17,53	616,72	9,13
Näyt. väl.	52,3939	314,363	63,76	36,98	2745,12	40,66
Yhteensä	82,1716	493,030	100,00	58,00	6752,17	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 850, Ndc = 2

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	58,506	351,038	56,51	41,30	3423,0	31,93
Toistett.	42,443	254,660	40,99	29,96	1801,4	16,81
Uusitt.	40,268	241,611	38,89	28,42	1621,5	15,13
Operaatt.	26,221	157,328	25,33	18,51	687,6	6,41
näyt*oper	30,561	183,368	29,52	21,57	934,0	8,71
Näyt. väl.	85,418	512,506	82,50	60,29	7296,2	68,07
Yhteensä	103,533	621,201	100,00	73,08	10719,2	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 850, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	67,4364	404,618	71,29	47,60	4547,67	50,82
Toistett.	67,4364	404,618	71,29	47,60	4547,67	50,82
Uusitt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Näyt. väl.	66,3333	398,000	70,13	46,82	4400,10	49,18
Yhteensä	94,5927	567,556	100,00	66,77	8947,77	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 850, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	66,4358	398,615	69,30	46,90	4413,72	48,03
Toistett.	61,1265	366,759	63,76	43,15	3736,45	40,66
Uusitt.	26,0243	156,146	27,15	18,37	677,26	7,37
Operaatt.	26,0243	156,146	27,15	18,37	677,26	7,37
Näyt. väl.	69,1084	414,650	72,09	48,78	4775,97	51,97
Yhteensä	95,8628	575,177	100,00	67,67	9189,68	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 850, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	67,9383	407,630	69,38	47,96	4615,61	48,14
Toistett.	67,9383	407,630	69,38	47,96	4615,61	48,14
Uusitt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Näyt. väl.	70,5209	423,126	72,02	49,78	4973,20	51,86
Yhteensä	97,9225	587,535	100,00	69,12	9588,81	100,00

LIITE C4 Gage R&R –tulokset toimittajan B testausjärjestelmälle 2

+5V referenssijännite minimisyötöllä,
Prosessin toleranssiväli = 0,5, Ndc = 16

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0013718	0,0082310	8,33	1,65	0,0000019	0,69
Toistett.	0,0009280	0,0055678	5,63	1,11	0,0000009	0,32
Uusitt.	0,0010104	0,0060622	6,14	1,21	0,0000010	0,38
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0010104	0,0060622	6,14	1,21	0,0000010	0,38
Näyt. väl.	0,0164115	0,0984689	99,65	19,69	0,0002693	99,31
Yhteensä	0,0164687	0,0988123	100,00	19,76	0,0002712	100,00

+5V referenssijännite nimellissyötöllä,
Prosessin toleranssiväli = 0,75, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0047140	0,0282843	86,30	3,77	0,0000222	74,48
Toistett.	0,0038550	0,0231301	70,57	3,08	0,0000149	49,81
Uusitt.	0,0027131	0,0162788	49,67	2,17	0,0000074	24,67
Operaatt.	0,0017401	0,0104403	31,86	1,39	0,0000030	10,15
näyt*oper	0,0020817	0,0124900	38,11	1,67	0,0000043	14,52
Näyt. väl.	0,0027595	0,0165567	50,52	2,21	0,0000076	25,52
Yhteensä	0,0054623	0,0327738	100,00	4,37	0,0000298	100,00

+5V referenssijännite maksimisyötöllä,
Prosessin toleranssiväli = 0,5, Ndc = 18

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0012388	0,0074330	7,54	1,49	0,0000015	0,57
Toistett.	0,0009574	0,0057446	5,83	1,15	0,0000009	0,34
Uusitt.	0,0007862	0,0047170	4,79	0,94	0,0000006	0,23
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0007862	0,0047170	4,79	0,94	0,0000006	0,23
Näyt. väl.	0,0163815	0,0982891	99,72	19,66	0,0002684	99,43
Yhteensä	0,0164283	0,0985698	100,00	19,71	0,0002699	100,00

+10V referenssijännite nimellissyötöllä,
Prosessin toleranssiväli = 0,33, Ndc = 11

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0014081	0,0084484	11,96	2,56	0,0000020	1,43
Toistett.	0,0010138	0,0060828	8,61	1,84	0,0000010	0,74
Uusitt.	0,0009772	0,0058630	8,30	1,78	0,0000010	0,69
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0009772	0,0058630	8,30	1,78	0,0000010	0,69
Näyt. väl.	0,0116847	0,0701080	99,28	21,24	0,0001365	98,57
Yhteensä	0,0117692	0,0706152	100,00	21,40	0,0001385	100,00

+10V referenssijännite maksimisyötöllä,
Prosessin toleranssiväli = 0,33, Ndc = 11

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0014252	0,0085513	12,16	2,59	0,0000020	1,48
Toistett.	0,0011785	0,0070711	10,05	2,14	0,0000014	1,01
Uusitt.	0,0008015	0,0048088	6,84	1,46	0,0000006	0,47
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0008015	0,0048088	6,84	1,46	0,0000006	0,47
Näyt. väl.	0,0116369	0,0698212	99,26	21,16	0,0001354	98,52
Yhteensä	0,0117238	0,0703429	100,00	21,32	0,0001374	100,00

Välipiirijännite UC+, Prosessin toleranssiväli = 0,18, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0052042	0,0312250	84,98	17,35	0,0000271	72,22
Toistett.	0,0037268	0,0223607	60,86	12,42	0,0000139	37,04
Uusitt.	0,0036324	0,0217945	59,32	12,11	0,0000132	35,19
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0036324	0,0217945	59,32	12,11	0,0000132	35,19
Näyt. väl.	0,0032275	0,0193649	52,70	10,76	0,0000104	27,78
Yhteensä	0,0061237	0,0367423	100,00	20,41	0,0000375	100,00

Virranmittaus, 1. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0039223	0,0235339	38,48	14,71	0,0000154	14,81
Toistett.	0,0039223	0,0235339	38,48	14,71	0,0000154	14,81
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0094082	0,0564494	92,30	35,28	0,0000885	85,19
Yhteensä	0,0101931	0,0611587	100,00	38,22	0,0001039	100,00

Virranmittaus, 2. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0023796	0,0142775	28,77	8,92	0,0000057	8,28
Toistett.	0,0023113	0,0138675	27,95	8,67	0,0000053	7,81
Uusitt.	0,0005661	0,0033968	6,85	2,12	0,0000003	0,47
Operaatt.	0,0005661	0,0033968	6,85	2,12	0,0000003	0,47
Näyt. väl.	0,0079200	0,0475202	95,77	29,70	0,0000627	91,72
Yhteensä	0,0082698	0,0496187	100,00	31,01	0,0000684	100,00

Virranmittaus, 3. vaihe, Prosessin toleranssiväli = 0,16, Ndc = 6

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0016667	0,0100000	20,31	6,25	0,0000028	4,12
Toistett.	0,0016667	0,0100000	20,31	6,25	0,0000028	4,12
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0080364	0,0482183	97,92	30,14	0,0000646	95,88
Yhteensä	0,0082074	0,0492443	100,00	30,78	0,0000674	100,00

Analogiatulo 1, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 0,2, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0237958	0,142775	29,46	3,57	0,0005662	8,68
Toistett.	0,0231125	0,138675	28,61	3,47	0,0005342	8,18
Uusitt.	0,0056614	0,033968	7,01	0,85	0,0000321	0,49
Operaatt.	0,0056614	0,033968	7,01	0,85	0,0000321	0,49
Näyt. väl.	0,0772024	0,463214	95,56	11,58	0,0059602	91,32
Yhteensä	0,0807864	0,484718	100,00	12,12	0,0065264	100,00

Analogiatulo 1, 5V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 2

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0304875	0,182925	46,72	4,57	0,0009295	21,83
Toistett.	0,0303118	0,181871	46,45	4,55	0,0009188	21,57
Uusitt.	0,0032686	0,019612	5,01	0,49	0,0000107	0,25
Operaatt.	0,0032686	0,019612	5,01	0,49	0,0000107	0,25
Näyt. väl.	0,0577003	0,346202	88,42	8,66	0,0033293	78,17
Yhteensä	0,0652596	0,391558	100,00	9,79	0,0042588	100,00

Analogiatulo 2, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 5

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,033968	0,203810	26,45	5,10	0,0011538	7,00
Toistett.	0,033968	0,203810	26,45	5,10	0,0011538	7,00
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,123841	0,743045	96,44	18,58	0,0153365	93,00
Yhteensä	0,128415	0,770489	100,00	19,26	0,0164904	100,00

Analogiatulo 1, 10V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,046913	0,281480	34,18	7,04	0,0022009	11,68
Toistett.	0,046913	0,281480	34,18	7,04	0,0022009	11,68
Uusitt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,128986	0,773914	93,98	19,35	0,0166373	88,32
Yhteensä	0,137252	0,823513	100,00	20,59	0,0188381	100,00

Analogiatulo 2, 0V syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1

					Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0518875	0,311325	100,00	31,13	0,0026923	100,00
Toistett.	0,0518875	0,311325	100,00	31,13	0,0026923	100,00
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Yhteensä	0,0518875	0,311325	100,00	31,13	0,0026923	100,00

Analogiatulo 1, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogiatulo 2, 10mA sytöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0392232	0,235339	40,05	5,88	0,0015385	16,04
Toistett.	0,0392232	0,235339	40,05	5,88	0,0015385	16,04
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0897379	0,538427	91,63	13,46	0,0080529	83,96
Yhteensä	0,0979354	0,587613	100,00	14,69	0,0095913	100,00

Analogiatulo 1, 10mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0292353	0,175412	40,65	4,39	0,0008547	16,52
Toistett.	0,0292353	0,175412	40,65	4,39	0,0008547	16,52
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0657083	0,394250	91,36	9,86	0,0043176	83,48
Yhteensä	0,0719185	0,431511	100,00	10,79	0,0051723	100,00

Analogiatulo 2, 20mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 3

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0292353	0,175412	38,40	4,39	0,0008547	14,74
Toistett.	0,0292353	0,175412	38,40	4,39	0,0008547	14,74
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0703034	0,421821	92,33	10,55	0,0049426	85,26
Yhteensä	0,0761398	0,456839	100,00	11,42	0,0057973	100,00

Analogiatulo 1, 20mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 4, Ndc = 4

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0166667	0,100000	27,74	2,50	0,0002778	7,69
Toistett.	0,0166667	0,100000	27,74	2,50	0,0002778	7,69
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0577350	0,346410	96,08	8,66	0,0033333	92,31
Yhteensä	0,0600925	0,360555	100,00	9,01	0,0036111	100,00

Analogiatulo 2, 0mA syötöllä, Prosessin toleranssiväli = 1, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0462250	0,277350	98,59	27,74	0,0021368	97,21
Toistett.	0,0459933	0,275960	98,10	27,60	0,0021154	96,23
Uusitt.	0,0046225	0,027735	9,86	2,77	0,0000214	0,97
Operaatt.	0,0046225	0,027735	9,86	2,77	0,0000214	0,97
Näyt. väl.	0,0078378	0,047027	16,72	4,70	0,0000614	2,79
Yhteensä	0,0468848	0,281309	100,00	28,13	0,0021982	100,00

Analogialähtö 1, 0mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = *

Vaihtelu = 0

Analogialähtö 2, 10mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 63

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0016667	0,010000	2,24	0,83	0,0000028	0,05
Toistett.	0,0016667	0,010000	2,24	0,83	0,0000028	0,05
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0745123	0,447074	99,97	37,26	0,0055521	99,95
Yhteensä	0,0745309	0,447186	100,00	37,27	0,0055549	100,00

Analogialähtö 1, 10mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 14

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0059512	0,035707	9,91	2,98	0,0000354	0,98
Toistett.	0,0047140	0,028284	7,85	2,36	0,0000222	0,62
Uusitt.	0,0036324	0,021794	6,05	1,82	0,0000132	0,37
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0036324	0,021794	6,05	1,82	0,0000132	0,37
Näyt. väl.	0,0597390	0,358434	99,51	29,87	0,0035687	99,02
Yhteensä	0,0600347	0,360208	100,00	30,02	0,0036042	100,00

Analogialähtö 2, 20mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 29

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0035052	0,021031	4,82	1,75	0,0000123	0,23
Toistett.	0,0033968	0,020381	4,67	1,70	0,0000115	0,22
Uusitt.	0,0008648	0,005189	1,19	0,43	0,0000007	0,01
Operaatt.	0,0008648	0,005189	1,19	0,43	0,0000007	0,01
Näyt. väl.	0,0726751	0,436050	99,88	36,34	0,0052817	99,77
Yhteensä	0,0727595	0,436557	100,00	36,38	0,0052940	100,00

Analogialähtö 1, 20mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = 62

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0016667	0,010000	2,24	0,83	0,0000028	0,05
Toistett.	0,0016667	0,010000	2,24	0,83	0,0000028	0,05
Uusitt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0744004	0,446402	99,97	37,20	0,0055354	99,95
Yhteensä	0,0744190	0,446514	100,00	37,21	0,0055382	100,00

Analogialähtö 2, 0mA mittaus, Prosessin toleranssiväli = 1,2, Ndc = *

Vaihtelu = 0

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 8

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0004903	0,0029417	15,80	0,98	0,0000002	2,50
Toistett.	0,0004623	0,0027735	14,90	0,92	0,0000002	2,22
Uusitt.	0,0001634	0,0009806	5,27	0,33	0,0000000	0,28
Operaatt.	0,0001634	0,0009806	5,27	0,33	0,0000000	0,28
Näyt. väl.	0,0030636	0,0183818	98,74	6,13	0,0000094	97,50
Yhteensä	0,0031026	0,0186157	100,00	6,21	0,0000096	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 26

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0001667	0,0010000	5,30	0,33	0,0000000	0,28
Toistett.	0,0001667	0,0010000	5,30	0,33	0,0000000	0,28
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0031391	0,0188348	99,86	6,28	0,0000099	99,72
Yhteensä	0,0031436	0,0188613	100,00	6,29	0,0000099	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 27

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0001667	0,0010000	5,18	0,33	0,0000000	0,27
Toistett.	0,0001667	0,0010000	5,18	0,33	0,0000000	0,27
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0032113	0,0192678	99,87	6,42	0,0000103	99,73
Yhteensä	0,0032156	0,0192938	100,00	6,43	0,0000103	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0032404	0,0194422	100,00	6,48	0,0000105	100,00
Yhteensä	0,0032404	0,0194422	100,00	6,48	0,0000105	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, pos. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = *

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Toistett.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
näyt*oper	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0031136	0,0186815	100,00	6,23	0,0000097	100,00
Yhteensä	0,0031136	0,0186815	100,00	6,23	0,0000097	100,00

PWM-signaalin AC-jännitemittaus, neg. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 0,3, Ndc = 22

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	0,0001961	0,0011767	6,15	0,39	0,0000000	0,38
Toistett.	0,0001961	0,0011767	6,15	0,39	0,0000000	0,38
Uusitt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Operaatt.	0,0000000	0,0000000	0,00	0,00	0,0000000	0,00
Näyt. väl.	0,0031848	0,0191090	99,81	6,37	0,0000101	99,62
Yhteensä	0,0031909	0,0191452	100,00	6,38	0,0000102	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 1700, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	57,4970	344,982	61,35	20,29	3305,90	37,63
Toistett.	46,4447	278,668	49,55	16,39	2157,11	24,56
Uusitt.	33,8939	203,363	36,16	11,96	1148,80	13,08
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
näyt*oper	33,8939	203,363	36,16	11,96	1148,80	13,08
Näyt. väl.	74,0153	444,092	78,97	26,12	5478,26	62,37
Yhteensä	93,7239	562,343	100,00	33,08	8784,16	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. U-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 1700, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	55,3188	331,913	59,94	19,52	3060,17	35,93
Toistett.	47,2095	283,257	51,15	16,66	2228,74	26,17
Uusitt.	28,8345	173,007	31,24	10,18	831,43	9,76
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
näyt*oper	28,8345	173,007	31,24	10,18	831,43	9,76
Näyt. väl.	73,8725	443,235	80,04	26,07	5457,14	64,07
Yhteensä	92,2893	553,736	100,00	32,57	8517,31	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. V-vaihe, Prosessin toleranssiväli = 1700, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	51,9169	311,501	64,20	18,32		
Toistett.	47,0333	282,200	58,16	16,60	2695,36	41,22
Uusitt.	21,9825	131,895	27,18	7,76	2212,13	33,83
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	483,23	7,39
näyt*oper	21,9825	131,895	27,18	7,76	0,00	0,00
Näyt. väl.	61,9985	371,991	76,67	21,88	483,23	7,39
Yhteensä	80,8652	485,191	100,00	28,54	3843,82	58,78
					6539,18	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. V-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 1700, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	66,9593	401,756	74,25	23,63	4483,55	55,14
Toistett.	66,9593	401,756	74,25	23,63	4483,55	55,14
Uusitt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Näyt. väl.	60,3991	362,395	66,98	21,32	3648,05	44,86
Yhteensä	90,1754	541,052	100,00	31,83	8131,60	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, pos. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 1700, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	60,6362	363,817	64,07	21,40	3676,75	41,06
Toistett.	49,2471	295,483	52,04	17,38	2425,28	27,08
Uusitt.	35,3762	212,257	37,38	12,49	1251,48	13,97
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
näyt*oper	35,3762	212,257	37,38	12,49	1251,48	13,97
Näyt. väl.	72,6550	435,930	76,78	25,64	5278,75	58,94
Yhteensä	94,6335	567,801	100,00	33,40	8955,50	100,00

PWM-signaalin kytkentätaajuus, neg. W-vaihe,
Prosessin toleranssiväli = 1700, Ndc = 1

Lähde	Std.poik.	(6*SP)	(%Vaihtelu)	(%Toler.)	Varianssi	%Osuus
GR&R yht.	60,8706	365,223	63,77	21,48	3705,22	40,67
Toistett.	60,8706	365,223	63,77	21,48	3705,22	40,67
Uusitt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Operaatt.	0,0000	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
Näyt. väl.	73,5239	441,144	77,03	25,95	5405,77	59,33
Yhteensä	95,4515	572,709	100,00	33,69	9110,99	100,00