

Perttu Salonen

MEMS-testauksen ulkoistamisen toteutus sekä siihen liittyvät riskit ja hyödyt

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 25.7.2011.

Työn valvoja:

Prof. Raimo Sepponen

Työn ohjaaja:

DI Harri Viljakainen /
VTI Technologies Oy

| | | |
|---|--------------|----------------|
| Tekijä: Perttu Salonen | | |
| Työn nimi: MEMS-testauksen ulkoistamisen toteutus sekä siihen liittyvät riskit ja hyödyt | | |
| Päivämäärä: 25.7.2011 | Kieli: Suomi | Sivumäärä:7+53 |
| Elektroniikan laitos | | |
| Professori: Elektroniikka ja mittaustekniikka | | Koodi: S-66 |
| Valvoja: Prof. Raimo Sepponen Ohjaaja: DI Harri Viljakainen / VTI Technologies Oy | | |
| <p>Tämä diplomityö käsittelee MEMS-testauksen ulkoistamista projektin avulla, jossa kulmanopeusanturin tuotanto siirretään alihankkijoiden tuotettavaksi. Työssä tutkitaan mitä vaikutteita MEMS-testauksen ulkoistamisella on ulkoistavan yrityksen toimintaan.</p> <p>Teoriaosuudessa käydään läpi ulkoistamista käsitteenä sekä kerrotaan mitä hyötyjä ulkoistamisella haetaan ja mitä riskejä siihen liittyy. Lisäksi kerrotaan lyhyesti MEMS-teknologiasta sekä -antureista ja siitä, mihin testausta tarvitaan.</p> <p>Ulkoistamisprojekti käydään läpi vaihe kerrallaan testauskehittäjän näkökulmasta. Ulkoistamistarve perustellaan tuotantoketjun osaprosessina ja tehdään valinta tarvittavasta yhteistyökumppanista. Yhteistyömallin avulla yksityiskohtainen testausjärjestelmä integroidaan päähankkijan tarpeiden ja alihankkijan tehdasvaatimusten mukaisesti. Lopuksi siirretyn mittausjärjestelmän toiminta ja laatu varmistetaan.</p> <p>Tulosten perusteella voidaan todeta MEMS-testauksen ulkoistamisen onnistuneen vaatimusten mukaisesti eikä ulkoistamisella ollut vaikutusta mittausjärjestelmän toimintaan. Ulkoistamisella saavutettavat hyödyt ovat siihen liittyvien riskien arvoisia. Testausjärjestelmää tulee jatkossa kehittää nopeammaksi tuotantokustannusten laskemiseksi.</p> | | |
| Avainsanat: MEMS, testausjärjestelmä, ulkoistaminen, kulmanopeusanturi, MSA | | |

Author: Perttu Salonen

Title: Implementation of outsourcing of MEMS testing and its risks and benefits

Date: 25.7.2011

Language: Finnish

Number of pages:7+53

Department of Electronics

Professorship: Electronics and Measuring Technology

Code: S-66

Supervisor: Prof. Raimo Sepponen

Instructor: M.Sc. (Tech.) Harri Viljakainen / VTI Technologies Oy

This thesis introduces an implementation of outsourcing of MEMS testing. A project, where production of three axis angular rate sensor is outsourced to subcontractors, is introduced and MEMS testing is explained as a part of the production line. Impact of the outsourcing on the company is researched.

In the theory section, it's discussed what are the benefits and risks regarding outsourcing. MEMS technology and working principles of an angular rate sensor are introduced and the idea of MEMS testing is explained.

The project is gone through step by step from a perspective of a test design engineer. After justifying the reasons, a suitable subcontractor is chosen to fit outsourcer's needs. In co-operation of the two companies, a productional test system is designed and integrated to match the subcontractor's facilities and to correspond the outsourcer's prerequisites. In the end, methods for defining the functionality and reliability of the tester are introduced.

On the basis of results, outsourcing of MEMS testing has been a success for both of the partners. The benefits obtained by outsourcing overcome the risks associated with it. As a future development, the test system should be developed faster as it has such a great influence on the production costs.

Keywords: MEMS, test system, outsourcing, angular rate sensor, MSA

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty osittain sekä VTI Technologies Oy:n tiloissa Suomessa että yhteistyökumppanin tiloissa Taiwanissa osana kolmiakselisen kulmanopeusanturin tuotannon ulkoistamisprojektia.

Haluan kiittää työni valvojaa professori Raimo Sepposta sekä työni ohjaajaa DI Harri Viljakaista neuvokkaasta ja avuliaasta opastuksesta kaiken kiireen keskellä. Kiitokset kuuluvat myös työkollegoilleni, jotka olivat aina valmiina auttamaan työssäni ja ovat antaneet vuosien varrella arvokasta opastusta.

VTI on tarjonnut mielenkiintoisen ja haasteellisen projektin diplomityöni tekemiseen, minkä aikana olen oppinut paljon niin työtehtävistäni, kuin myös eri kulttuureista. Projektin ansiosta olen nähnyt maailmasta uuden paikan, mikä on motivoinut minua paljon.

Kiitän myös ystäviäni, perhettäni ja tyttöystävääni tärkeästä tuesta. Teidän ansiosta jaksoin kantaa työni taakan.

Vantaa, 25.7.2011

Perttu S. Salonen

Sisältö

| | |
|---|------------|
| Tiivistelmä | ii |
| Tiivistelmä (englanniksi) | iii |
| Esipuhe | iv |
| Sisällysluettelo | v |
| Lyhenteet | vii |
| 1 Johdanto | 1 |
| 2 Mitä on ulkoistaminen | 3 |
| 2.1 Ulkoistaminen käsitteenä | 3 |
| 2.2 Ulkoistamispäätöksen syntyminen | 4 |
| 2.3 Syitä ulkoistamiselle ja sillä haettavat edut | 5 |
| 2.3.1 Strategia | 5 |
| 2.3.2 Kustannukset | 6 |
| 2.3.3 Alihankkija | 8 |
| 2.3.4 Toiminta ja henkilöstö | 9 |
| 2.4 Ulkoistamiseen liittyvät riskit ja ongelmat | 10 |
| 2.4.1 Strategia | 10 |
| 2.4.2 Kustannukset | 11 |
| 2.4.3 Alihankkija | 12 |
| 2.4.4 Toiminta ja henkilöstö | 13 |
| 3 MEMS-anturit ja niiden testaus | 15 |
| 3.1 MEMS-teknologia ja sen hyödyntämien kulmanopeusantureissa | 15 |
| 3.1.1 Anturielementin rakenne ja toimintaperiaate | 15 |
| 3.1.2 Anturielementin valmistusprosessi | 16 |
| 3.2 Kulmanopeusanturielementin testaus | 18 |
| 3.2.1 Ominaisarvojen mittaaminen | 18 |
| 3.2.2 Epäideaalisuuksien mittaaminen | 19 |
| 3.3 Testausjärjestelmän esittely | 19 |
| 4 MEMS-testauksen ulkoistaminen | 21 |
| 4.1 Ulkoistamistarpeen perustelu | 21 |
| 4.2 Ulkoistettavat prosessit | 22 |
| 4.3 Yhteistyökumppaneiden valinta | 23 |
| 4.4 Yhteistyömalli | 23 |
| 4.5 Testausjärjestelmän integraatio | 25 |
| 4.5.1 Testilaitteisto | 25 |
| 4.5.2 Testausohjelmisto ja -prosessi | 26 |
| 4.6 Mittausjärjestelmän analyysi ja laadun varmistaminen | 31 |
| 4.6.1 SPC-menetelmä | 31 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.6.2 | Gage R&R -menetelmä | 33 |
| 4.6.3 | Muutosten hallinta ja korrelaatiotutkimus | 35 |
| 4.6.4 | Laadun hallinta | 36 |
| 5 | Ulkoistamisprojektin lopputulos ja jatkokehitys | 38 |
| 5.1 | Yhteistyön kuvaus | 38 |
| 5.2 | Mittaustulokset | 39 |
| 5.2.1 | Testausaika | 39 |
| 5.2.2 | Gage R&R -tulokset | 40 |
| 5.3 | Saavutettu hyöty | 43 |
| 5.4 | Havaitut riskit ja ongelmat | 44 |
| 5.4.1 | Strategia ja kustannukset | 44 |
| 5.4.2 | Alihankkija | 44 |
| 5.4.3 | Toiminta ja henkilöstö | 45 |
| 5.5 | Jatkokehitys | 46 |
| 6 | Yhteenveto | 47 |
| | Viitteet | 50 |

Lyhenteet

| | |
|---------|--|
| ANOVA | Analysis of Variance |
| ASIC | Application Specific Integrated Circuit |
| BHF | Buffered Hydrogen Fluoride |
| C-SOI | Cavity Silicon-on-Insulator |
| CL | Control Limit |
| CoM | Chip-on-MEMS |
| DAQ | Data acquisition |
| DOE | Design of Experiments |
| DRIE | Deep Reactive Ion Etching |
| DSP | Digital Signal Processing |
| ECN | Engineering Change Notice |
| FPGA | Field-Programmable Gate Array |
| GRR | Gage R&R, ANOVA gauge repeatability and reproducibility |
| GETS | General Element Test Software |
| GPIB | General Purpose Interface Bus |
| IC | Intergrated Circuit |
| ISO | International Organization for Standardization |
| JEDEC | Joint Electron Devices Engineering Council |
| JOT | Juuri Oikeaan Tarpeeseen |
| KOH | Kaliumhydroksidi |
| LabVIEW | Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench |
| MEMS | Micro-Electro-Mechanical Systems |
| MES | Manufacturing Execution Systems |
| MSA | Measurement System Analysis |
| NDC | Number of Distinct Categories |
| PCB | Printed Circuit Board |
| PID | Proportional-integral-derivative |
| RDL | Redistribution Layer |
| SEMI | Semiconductor Equipment and Materials International |
| SPC | Statistical process control |
| USL/LSL | Upper/Lower Specification Limit |
| UCL/LCL | Upper/Lower Control Limit |
| VI | Virtual Instrument |

1 Johdanto

Mobiililaitteiden räjähdysmäinen myynti on aiheuttanut suuria kasvupaineita anturivalmistajille, kuten myös muille komponenttivalmistajille [1]. Esimerkiksi Applen iPhoneen kaltaisiin tuotteisiin halutaan sisällyttää yhä enemmän toiminnallisuuksia pienikokoisten MEMS-gyroskooppien (engl. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) ja kiihtyvyyssantureiden avulla. Muiden mobiililaittevalmistajien täytyy pysyä mukana kilpailussa, mikä tarkoittaa sitä, että heidän tuotteissaan tulee olla vähintäänkin samat ominaisuudet. Gyroskooppien suuri kysyntä ei kohdistu pelkästään kännyköihin, vaan jatkossa sen ennustetaan olevan vakiokomponentti myös tablettitietokoneissa, peliohjaimissa, pelikonsoleissa ja kaukosäätimissä [2].

Jotta mobiililaittevalmistajille ja muille kysyjille pystyttäisiin toimittamaan tarvittava määrä MEMS-antureita, täytyy valmistuskapasiteettia nostaa radikaalisti. VTI Technologies Oy on lanseerannut vuoden 2010 syksyllä maailman pienimmän ja vähävirtaisimman kolmiakselisen kulmanopeusanturin eli 3D-gyroskoopin. Tuotteella on tällä hetkellä vain kaksi muuta kilpailijaa: STMicroelectronics ja InvenSense. Jotta VTI:n kaltainen keski-suuri yritys pystyisi kilpailemaan suurten kilpailijoiden kanssa, täytyy tuotantoa ulkoistaa. Näin pystytään vastaamaan suureen ja vaihtelevaan kulutuselektronikan kysyntään ilman valtavia investointikustannuksia. Samalla pyritään asettamaan tuotteen hinta mahdollisimman houkuttelevaksi, mikä on kulutuselektronikan tärkeimpiä piirteitä. Aikataulullisesti ripeällä ulkoistamisprojektilla pyritään nopeuttamaan markkinoille pääsyä ja mahdollistamaan riittävä toimitusvarmuus.

VTI on tämän hetken markkinajohtaja autoteollisuuden pienkiihtyvyyssantureiden valmistajana, mikä kattaa yrityksen nykyisestä liikevaihdosta 80 prosenttia. Vuoden 2008 tyrehtynyt autokauppa kuitenkin osoitti sen, että riippuvuutta autoteollisuudesta halutaan vähentää laajentamalla toimintaa kuluttajamarkkinoille ja lääketieteellisiin sovelluksiin. Vuoden 2009 aikana myydyissä matkapuhelimissa oli lähes joka kolmannessa MEMS-kiihtyvyyssanturi, mikä viittaa siihen, että taantumalla ei ollut suurta vaikutusta MEMS-kuluttajaelektronikkaan [3]. Kulutuselektronikan ennustetaan nousevan maailmalla antureiden päämarkkinaksi [4]. Koska kulutuselektronikkatuotteilla on tyypillisesti lyhyt elinkaari, ei tällaisia antureita kannata valmistaa itse. Sen sijaan VTI käyttää niiden tuottamiseen aasialaisia sopimusvalmistajia, jotta suurilta tuotantoinvestoinneilta ja valmistuskustannuksilta vältyttäisiin. [2]

Kolmiakselinen MEMS-gyroskooppi on mikromekaaninen anturi, jolla pystytään tarkasti mittaamaan kulmanopeutta eli käytännön sovelluksissa esimerkiksi kännykän kaltevuutta kaikissa kolmessa suunnassa. Sen toiminta perustuu Coriolis-ilmiöön. Mikromekaaninen gyroskooppi on niin tarkka, että sillä voidaan jopa mitata maapallon pyörimisnopeutta [5]. Mikromekaanisen anturin sydämenä toimivan elementin havaitseva mekaaninen liike muutetaan sähköiseksi signaaliksi, joka edelleen käsitellään ASIC-piirillä (engl. *Application Specific Integrated Circuit*). Pieniä mikrometriä kokoisia rakenteita voidaan valmistaa MEMS-teknologialle tyypillisin tavoin. Pienen kokonsa ansiosta antureita voidaan valmistaa tuhansia kappaleita samanaikaisesti ja niiden mahdollinen sovelluskohde on lähes rajoittamaton pienen

virran kulutuksensa ansiosta.

Kuten muidenkin MEMS-antureiden, myös gyroskoopin tuotanto on monivaiheinen ja haastava prosessi, minkä takia tuotannon ulkoistamiseen liittyy paljon riskejä. Monimutkaisen ulkoistamisprojektin läpivienti edellyttää siihen liittyvien riskien tuntemista ja keinoja niiden välttämiseen. Tavoiteltavat edut täytyy olla selkeät ja menetelmät, joilla tavoiteltava hyöty pystytään maksimoimaan tulee olla selvillä. Projektin toteuttaminen ja tuotannon ylläpitäminen vaatii erityistä johtamista ja valvontaa.

Tämän diplomityön tavoitteena on paneutua gyron MEMS-testauksen ulkoistamisprosessiin, siihen liittyviin riskeihin ja ulkoistamisella tavoiteltaviin hyötyihin. Työn tarkoitus ei ole kattaa tuotteen koko tuotannon ulkoistamista vaan käsitellä MEMS-testausta sen osaprosessina, vaikkakin muihin tuotannon osaprosesseihin pätee hyvin pitkälti samat riskit, hyödyt ja menettelytavat. Työssä käydään ensin läpi yleistä teoriaa yrityksen toiminnan ulkoistamisesta sekä kerrotaan lyhyesti MEMS-teknologiasta ja -antureista. Tämän jälkeen esitellään käytännön esimerkkiprojekti MEMS-testauksen ulkoistamisesta vaihe kerrallaan. Lopuksi esitellään ulkoistamisprojektin saavutukset ja pohditaan miten potentiaaliset riskit ilmenivät ja odotetut hyödyt toteutuivat. Pohditaan myös mitä olisi pitänyt tehdä eri tavalla, jotta projekti olisi sujunut paremmin.

2 Mitä on ulkoistaminen

Tässä luvussa käydään läpi ulkoistamista käsitteenä ja kerrotaan syitä ulkoistamis päätökselle. Ulkoistamisella haettavat edut sekä siihen liittyvät riskit ja ongelmat selvitetään lähdeaineistoon nojaten.

2.1 Ulkoistaminen käsitteenä

Ulkoistamisella tarkoitetaan organisaation purkamista pienempiin yksiköihin ja verkostomaisiin yhteistyösuhteisiin. Näin vältetään jäykiltä tuotantoteknologioilta ja pystytään paremmin adaptoitumaan yhä vaihtelevaan markkinakysyntään. Tällä tavoin suuret prosessikohtaiset investointikustannukset pystytään jyvittämään alihankkijoille. [6]

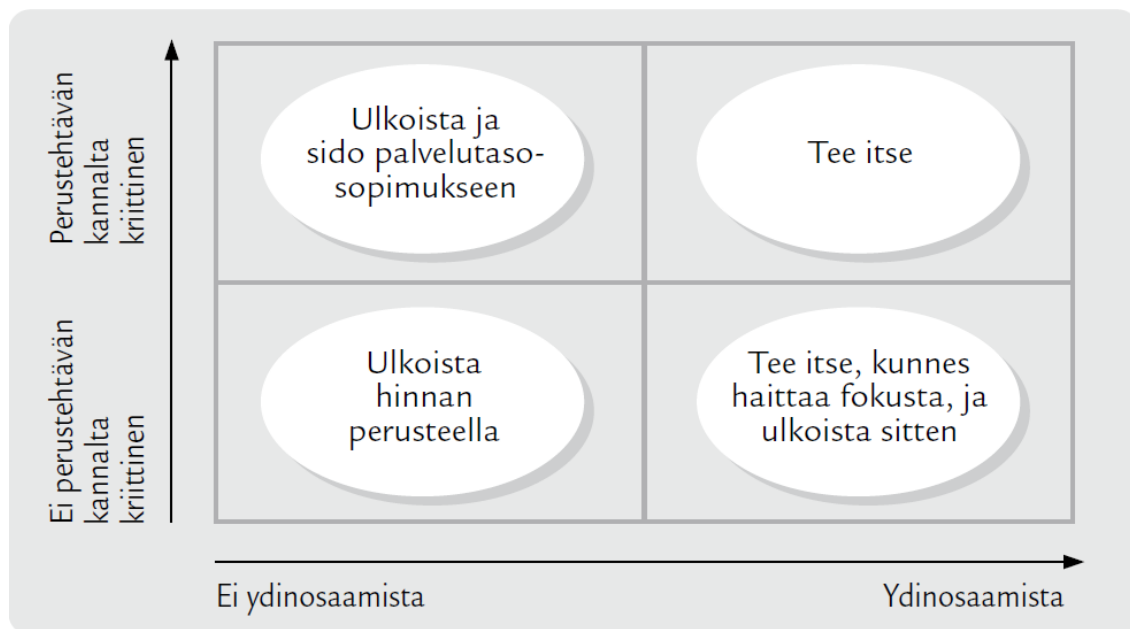
Ulkoistava yritys siirtää aiemmin itse hoitamansa toiminnon ulkopuolisen yrityksen eli *alihankkijan* tuotettavaksi. Alihankinta puolestaan määritellään yritysten väliseksi yhteistoiminnaksi, jossa päähankkija ostaa alihankkijalta tuotteita tai palveluita. Suomen lainsäädännössä ei ole määritelty ulkoistamista ja alihankintaa. Kuitenkin voidaan sanoa, että ulkoistaminen on alihankinnan laji, jolle on kaksi tunnusomaista elementtiä: toiminnon suorittaminen lopetetaan ulkoistavassa yrityksessä ja sopimussuhde alihankkijan vastaavan toiminnon suorittamisesta muodostetaan. [6]

Alla on lueteltuna ulkoistaminen neljä eri tyyppiä. Yhteistä näille kaikille on sopimuksen syntyminen mutta kaikissa omaisuus ei vaihda omistajaa. [6] Tässä työssä tullaan keskittymään 1b-tyypin ulkoistamisprosessiin erityisesti elektroniikkateollisuutta ajatellen.

- 1a) Sopimusulkoistaminen, jonka yhteydessä siirtyy omaisuutta (*transfer outsourcing*). Tämä on ulkoistamisen perustyyppi. Yritys myy liiketoimintayksikkönsä alihankkijalle ja solmii tämän kanssa sopimuksen toiminnon suorittamisesta.
- 1b) Sopimusulkoistaminen ilman omaisuuden siirtymistä (*simple outsourcing*). Ulkoistamiseen ei liity liikeomaisuuden myyntiä, vaan yritys yksinkertaisesti lopettaa tietyn toiminnon suorittamisen sisäisesti ja hankkii saman toiminnon markkinoilta.
- 2) Ulkoistaminen yhteisesti omistetulle yritykselle (*joint venture outsourcing*). On mahdollista, että yritys haluaa säilyttää osittaisen omistuksen ulkoistettuun liiketoimintayksikköön. Tästä muodostetaan silloin uusi yhtiö, jonka omistus jakaantuu ulkoistajan ja tämän sopimuskumppanin kesken.
- 3) Ulkoistaminen konsernin sisällä (*group outsourcing*). Konsernin sisällä muodostetaan liiketoimintayksikkö tai tytäryhtiö, joka ryhtyy keskitetysti hoitamaan aiemmin konserniin kuuluvien yritysten itsenäisesti suorittaman toiminnon.

2.2 Ulkoistamispäätöksen syntyminen

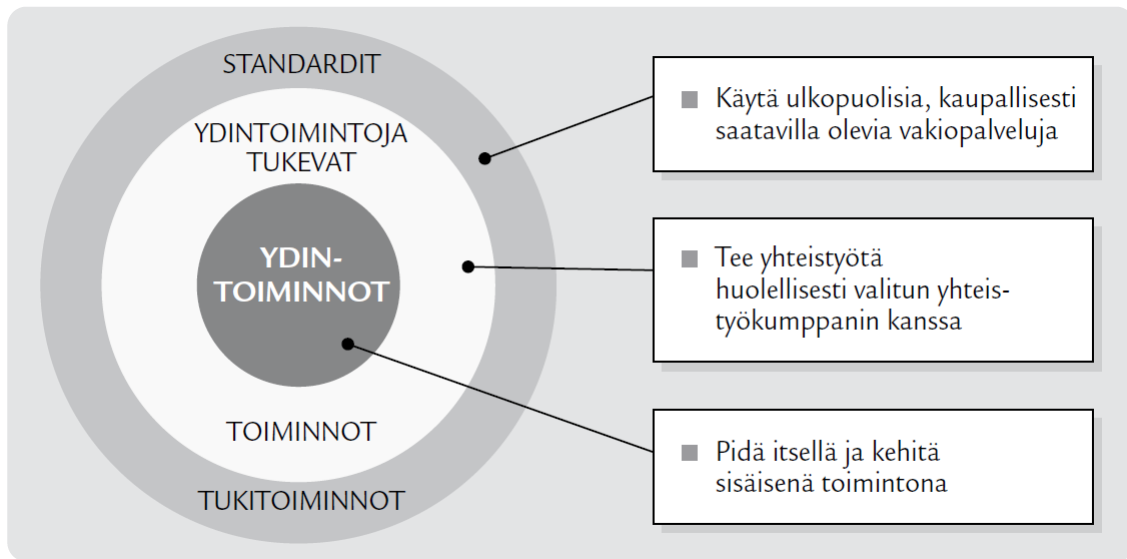
Yrityksen mahdollisuuksia järjestää toimintonsa käsitellään “Osta – Valmista” tai “Tee itse – Ulkoista” -päätöksenä. On mahdollista joko suunnitella ja valmistaa tuote yrityksen sisällä tai hankkia se markkinoilta kokonaisuudessaan. On myös mahdollista hankkia ulkoisia palveluita sen osittaiseen valmistamiseen tai suunnitteluun. Kun markkinat ovat ulkoistuspalvelulle kypsät eli yritys voi helposti ostaa valmiita kilpailukykyisiä palvelupaketteja, voi ulkoistaminen olla hyvä vaihtoehto. Päätöksenteossa voi käyttää apuna kuvassa 1 näkyvää päätöksentekomatriisia, joka käsittelee palvelun kriittisyyttä organisaation perustehtävän kannalta. Toinen tarkastelunäkökulma perustuu ydinosaamisen tunnistamiseen. [7], [8], [9]



Kuva 1: Ulkoistuksesta päättäminen. [9]

Kuten kuvasta 2 käy ilmi, päätöstä tehtäessä yrityksen tulee tarkkaan tiedostaa omat perustehtävänsä ja tunnistaa ydinosaamisensa, koska yrityksen ydintoimintaa ei yleensä kannata ulkoistaa. Ydintoimintaa tukevaa yhteistyötä voi puolestaan harjoittaa tarkkaan valittujen yhteistyökumppaneiden kanssa. Muiden toimintojen ulkoistamista tulisi harkita pääasiassa hinnan perusteella. [9] Yrityksen strategian ja kustannusten vaikutusta on käsitelty tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

Syntyvää tuotantoyhteistyötä voidaan hyvin mallintaa esim. JOT (Juuri Oikeaan Tarpeeseen) -tuotantomallilla, jossa korostuu logististen toimintojen tärkeys. Sen tarkempi mallintaminen auttaa selvittämään koko ulkoistetun tuotantoketjun tärkeimpiä elementtejä. [6] Nykyinen informaatio- ja kommunikaatioteknologian kehitys on puolestaan mahdollistanut yhteistoiminnan tehokkaan ja välittömän koordinaation, mikä alentaa kynnyksiä myönteiselle ulkoistamispäätökselle.



Kuva 2: Ydintoimintojen ja muiden toimintojen johtaminen. [9]

2.3 Syitä ulkoistamiselle ja sillä haettavat edut

Ennen ulkoistamispäätöksen tekoa on arvioitava mitä etuja sillä tavoitellaan ja mitä vaikutuksia päätös tulee aiheuttamaan. Ulkoistamista perustelevat syyt voidaan jakaa neljään osaan, joita alla on käsitelty elektroniikkateollisuuden näkökulmasta.

2.3.1 Strategia

Strategisilla ulkoistamisperusteilla pyritään tavoittelemaan kilpailuetua yrityksen nykytilanteeseen verrattuna. Ulkoistamalla toimintoja yritys pystyy parantamaan teknologista osaamistaan ja laajentamaan yrityksen liiketoiminnallista verkostoa. Kuitenkin yritykselle strategisesti tärkeät osat tulee valmistaa itse. Yritysstrategian näkökulmasta riskejä pyritään siirtämään sinne, missä niitä parhaiten pystytään ennustamaan, ehkäisemään ja hallinnoimaan. Riskit voivat olla fyysisiä, taloudellisia tai oikeudellisia. Ulkoistamisella pyritään hakemaan joustavuutta ja parantamaan reagoitiherkkyyttä vähentämällä sitoutumista kiinteisiin laitoksiin, ratkaisuihin, henkilöryhmiin ja omaisuuseriin. [9]

Yleinen peruste ulkoistamiselle on yrityksen tavoite keskittää toimintaa *ydinosaamiseen* eli toimintoihin, jotka välittömästi liittyvät yrityksen keskeiseen lopputuotteen valmistukseen. Aitoa ydinosaaamista on sellaiset osaamisalueet, joissa yritys erottuu kilpailijoitaan paremmaksi. Tämä on tavoiteltu kokemuksen ja oppimisen avulla eikä kilpailija pysty sitä helposti kopioimaan. Esimerkkinä ydinosaaamisesta voisi olla jonkun erikoistuotteen valmistaminen, asiakkaiden tarpeiden ymmärtäminen ja siihen reagoiminen tai korkean laatutason ylläpitäminen. Tällaisen taloudellisen kilpailuedun kannalta olevan toiminnan ulkoistaminen ei yleensä ole kannattavaa. Sen sijaan volyymituotteen valmistus, millä on jatkuvasti vaihteleva kysyntä ja lyhyt elinkaari, voisi olla kannattavaa ulkoistaa. [6], [7], [9]

Korkean volyymin omaavan tuotteen ennustettu kysyntä voi olla niin suurta, ettei ilman tuotannon ulkoistamista sitä pystyittäisi tarjoamaan. Tällöin kasvun resursoiminen ulkoistamalla on ainut vaihtoehto kilpailuedun säilyttämiseksi. On syytä kuitenkin pitää mielessä yrityksen pitkäaikainen strategia, joka saattaa olla ristiriidassa lyhytaikaisen taloudellisen tavoittelun ja kannattavuuden kanssa. Volyymituotannon ulkoistaminen vapauttaa sisäisiä resursseja ja ulkoistavan yrityksen henkilöstön henkistä taakkaa. Vaikka materiaalikapasiteettia löytyisikin talon sisältä, henkilöstöresurssit eivät välttämättä riitä tuotannon ylläpitämiseen. Uuden henkilöstön kouluttaminen puolestaan kuluttaa sisäisiä resursseja entuudestaan ja saattaa viedä niin paljon aikaa, että kilpailuetu ehditään jo menettää. Etenkin kulutuselektronikan tuotesykli ja sitä mukaan myös tuotekehityssykli voivat olla hyvinkin nopeita, jolloin on järkevämpää keskittyä resursoimaan osaava henkilöstö kehitystyöhön ja siirtää valmistaminen siihen erikoistuneelle alihankkijalle. Alihankkija suorittaa toiminnon tehokkaammin edellyttäen, että heiltä löytyy tarvittava mittakaavaetu, toiminnan joustavuus ja asiantuntemus. [7], [9]

Toimintojen toteuttaminen yrityksen sisällä voi johtaa teknologiaan sitoutumiseen ja joustavuuden vähenemiseen. Nykyaikaisen tuotantoyrityksen tärkeitä ominaispiirteitä ovat juuri joustavuus ja verkostomaisuus, jotka hämärtävät yrityksen rajoja. Tämä on puolestaan johtanut valmistuksen ulkoistamiseen ja pitkäaikaisten yhteistyösopimusten luomiseen. Yrityksen keskittyminen ydinosaamiseen ulkoistamalla mahdollistaa nopean reagoinnin teknologiassa ja toimintaympäristössä tapahtuviin muutoksiin. Alihankkija pysyy paremmin mukana muuttuvissa olosuhteissa, koska se on heidän ydinosaamistaan. Toisaalta, jos ulkoistaja ei ole tyytyväinen alihankkijaan, voi hän aina valita toisen alihankkijan olettaen, että markkinoilta sellainen löytyy. [7]

Ulkoistamisella voidaan pyrkiä yhä laajempaan tai alueellisempaan verkostoitumiskehitykseen. Näin päästään lähemmäksi loppuasiakasta ja asiakaskuntaa saadaan laajennettua. Sen lisäksi yhteistyösopimukset mahdollistavat uudenlaisen yhteistyömarkkinoinnin ja vastaostot. Jos alihankkijalla on hyvä maine markkinoilla, ulkoistava yritys saa yhteistyön avulla hyödynnettyä maineen myös itselleen. Ulkoistamis päätökseen voi myös vaikuttaa yrityksen halu imagonsa uudistamiselle tai säilyttämislle. [7], [9]

2.3.2 Kustannukset

Kannattavuuden ja kustannustehokkuuden parantaminen on osakkeiden ja yrityksen omistajien kannalta tärkeintä yritystoiminnassa. Ulkoistaminen usein tarjoaa potentiaalisen keinon kustannusten laskemiseksi. Ulkoistaminen vaikuttaa positiivisesti kannattavuuteen olettaen, että ulkoistettavien osien valmistuskustannukset ovat pienemmät kuin sisäisesti valmistetut. Laskelmia tehdessä pitää kuitenkin ottaa monta tekijää huomioon; pelkän hankintahinnan vertailu johtaa epätarkkoihin laskelmiin. Ulkoistamisprosessista syntyviä kokonaiskustannuksia on verrattava sisäisesti tuotettuihin kustannuksiin. Jos ongelmia esiintyy jo päähankkijalla, on epätodennäköistä olettaa, että alihankkija suoriutuisi tästä paremmin. [7]

Jos tuotteen valmistusmäärät ovat niin suuret, että yrityksen tuotantokapasiteet-

ti ylittyy tai sen tuottaminen häiritsee yritykselle keskeisten tuotteiden valmistusta, on luontevaa etsiä markkinoilta alihankkija, jolta löytyy tarvittava kapasiteetti. Resurssien käyttöasteen ollessa suuri päästään parempaan kustannustehokkuuteen. Näin pystytään samalla vapauttamaan päähankkijan sisäisiä resursseja yrityksen ydintoimintojen kannalta tärkeimmille tuotteille. Tuotteen valmistus muuttuu tehokkaammaksi ja lisäkokemusta kertyy kun samanlaista valmistusteknologiaa hyödyntävän tuotteen valmistusmäärä kasvaa, jolloin tuotteen yksikkökustannus saadaan minimoitua. [7], [9]

Suuret valmistusmäärät tai erikoistuotteen valmistaminen saattaa vaatia kalliita laitteistoja, joihin investoiminen saattaa olla kynnykskysymys ulkoistamis päätöstä tehtäessä. Valmistuskapasiteetin hankinta ja sen ylläpito saattaa tulla yritykselle niin kalliiksi, että on järkevämpää ulkoistaa valmistus alihankkijalle, jolta laitteisto ja ammattitaito löytyvät jo valmiiksi. Näin yritys säästyy suurilta investointikuluilta, siihen liittyviltä riskeiltä ja laitehuoltokustannuksilta. Pienivolyymin tuotteen valmistuksen ulkoistaminen ei välttämättä ole hyvä kustannusperusteinen syy, koska on epätodennäköistä, että alihankkija pääsisi kustannuksissa päähankkijaa alemmaksi. [7], [9]

Ulkoistaminen tuo usein myös logistiikkaan ja varastointiin liittyviä kustannuksellisia etuja. Materiaalin hankinnan ja hallinnan vastuu siirretään alihankkijalle, jolloin siihen liittyvä työn määrä vähenee. Kuitenkin on pidettävä mielessä, että tähän liittyy omat riskinsä ja uusien toimittajasuhteiden luominen aiheuttaa myös kuluja. [7]

Ulkoistaminen saattaa olla yritykselle kannattavaa, vaikka kustannuslaskelmat eivät tätä suoraan osoittaisikaan. Yrityksellä on rajallinen pääoma ja riskinsietokyky, mikä pitää ottaa huomioon etenkin suuria investointihankkeita tehtäessä. Pääomalle voi olla tuottavampia käyttökohteita, joihin liittyy pienemmät riskit. Tuotteen valmistusmääriin liittyvien ennusteiden ollessa epävarmoja, pääomaa ei kannata sitoa kalliiseen valmistuslaitteistoon, jonka käyttöaste saattaa olla pieni. Tässä on otettava huomioon laitteiston dynaamisuus, eli sopivuus muille tuotteille, ja laitteiston jälleenmyyntiarvo. Jos laitteisto on jo ehditty hankkimaan, voidaan yhteistyösopimuksessa sopia laitteiston tai jopa koko tehtaan myynnistä alihankkijalle. [7], [9]

Kustannuslaskelmat saattavat vääristyä tai ne eivät ole vertailukelpoisia ulkoistamiseen verrattaessa jos laskelmat ovat tehty vajaakäyttökapasiteetin vallitessa. Voi hyvinkin olla, että alihankkijan laitteiston käyttöaste on päähankkijaa suurempi jos heidän tuotanto vastaa paremmin sarjatuotantoa ja tuotannonohjaus on järjestetty tehokkaammin. [7]

Erityisesti kuluttajatuotteiden kausittaisvaihtelu aiheuttaa valmistajayrityksen laitteiston ja henkilöstön kuormitusvaihtelua, mikä helposti aiheuttaa yritykselle tarpeettomia kustannuksia. Kausittaisen kysynnän vaihtelun aiheuttamat kustannukset voidaan muuttaa muuttuviksi kustannuksiksi ulkoistamalla toimintaa, jolloin joustavuuden lisääntyessä aallonpohjat ja -harjat pyörivät pois. Sopimuksesta riippuen kustannuksia tulee periaatteessa vain kun kysyntää on ja tuotantoa tarvitsee pyörittää. Päähankkijan ei tarvitse huolehtia henkilöstön vaihtelevasta resursoinnista, mikä yrityksen sisällä saattaisi aiheuttaa laatu- ja motivaatio-ongelmia. Organisaation keventyminen tuo suoria kustannussäästöjä yritykselle. Hyvä henki-

löstöpolitiikka ja korkea tyytyväisyys houkuttelee osaavaa henkilöstöä päähankkijalle. [6], [7], [9]

Jos alihankkija ei pysty vastaamaan kausivaihteluun tarpeeksi luotettavasti tai on olemassa kriittisiä osaprosesseja, joiden viivästyminen aiheuttaisi toimitusvaikeuksia, voidaan osa tuotannosta rinnakkaistaa päähankkijalla. Näin pystytään välttämään kalliimpien jatkoprosessien seisonta-ajat ja takaamaan jatkuvat toimitukset asiakkaalle. [7]

2.3.3 Alihankkija

Alihankkijaa valittaessa tulee ottaa huomioon muutakin kuin heidän tarjoaman palvelun hintataso vaikka monesti tämä on ratkaisevin tekijä. Erityisen hyvän alihankkijasta tekee sen, että se pystyy täydentämään päähankkijan teknologista osaamista sekä tuntee päähankkijan toimintatavat ja on valmis joustamaan niiden mukaisesti. Muita huomioon otettavia seikkoja on maantieteellinen sijainti, kieli, kulttuuri ja yrityksen arvot. Päähankkijan ja alihankkijan välillä voi myös olla vaikuttavia henkilösuhteita ja psykologisia vaikutteita. [7]

Tarpeeksi hyvän alihankkijan olemassaolo voi olla jo riittävä peruste ulkoistamiselle ja toisaalta myös sellaisen puuttuminen on riittävä syy valmistaa tuotteet itse. Alihankkija, joka tarjoaa palveluna ydinosaamistaan ja suoriutuu päähankkijan tehtävistä paremmin, on varsin houkutteleva vaihtoehto ulkoistavalle yritykselle. Tämän mahdollistaa oppimisen ja kokemuksen kautta kertynyt osaaminen, jota hyödyntämällä pystytään hyödyntämään resurssit ja kasvattamaan volyymia yksittäistä päähankkijaa paremmin. Mitä enemmän päähankkijoita alihankkija saa, sitä enemmän se pystyy kasvattamaan volyymiaan ja investoimaan laitehankkeisiin. Näin saavutetaan entistä tehokkaampi valmistusteknologia. Alihankkijalla voi myös olla esimerkiksi erityinen patentti tai muu ylivoimainen valmistusmenetelmä, jonka kopioiminen ei olisi mahdollista. Päähankkija ei välttämättä ole edes tietoinen kaikista alihankkijoiden tarjoamista mahdollisuuksista. [7]

Jos päähankkija odottaa alihankkijan kehittävän tuotetta edelleen, tulee heidän kyvyistään ja halukkuudesta varmistua. Kuitenkin sopimuksesta riippumatta alihankkijan tulisi olla valmis tarjoamaan laadun, toimitusvarmuuden, tuottavuuden ja kustannustehokkuuden kehittymistä. Jopa syvemmän tuotekehitysyhteistyön luominen voi olla molemmin puolin kannattavaa, näin yritykset oppivat toisiltaan uutta ja yritysten välinen suhde kehittyy. Alihankkijan kehitysinto kasvaa mikäli päähankkijan tuote soveltuu hyvin heidän muuhun valikoimaansa ja päähankkijaa pidetään lupaavana asiakkaana. Pienivolyyminen erikoistuotteen tapauksessa kiinnostunutta alihankkijaa tuskin löytyy. [7]

Yrityksen ydintoiminnan tulisi olla sellaista, että sille löytyy vain muutama kilpailukykyinen alihankkija samalla osaamisalueella. Voi hyvinkin olla, että vaikka tällaista toimintaa haluttaisiinkin ulkoistaa, sille ei löydy toista osaavaa tekijää. Luotettavan alihankkijan löytyminen on hankalaa uusilla tai suljetuilla liiketoimintalueilla, missä korostuvat pienet markkinat, tarve pitkälle erikoistuneeseen tuotantolaitteistoon tai uuden teknologisen osaamisen kehittyminen harvoille. Kun alihankkijoita on vähän, on todennäköistä, että kilpailija käyttää samaa alihankkijaa. Vaikka

kyseinen liiketoiminta-alue ei olisikaan tärkeä yritykselle, luotettavan alihankkijan puute aiheuttaa sen, että on syytä turvautua omaan valmistukseen ulkoistamisen sijaan. [7]

Yleensä alihankkijan tulisi sijaita maantieteellisesti lähellä ulkoistavaa yritystä, muuta toimitusketjua ja lopullista asiakasta. Näin varmistutaan toimivasta tiedonvälityksestä ja kommunikoinnista. Kuitenkin nykytekniikka mahdollistaa tehokkaan kommunikoinnin esimerkiksi internetin tai puhelinkonferenssien avulla, jolloin yritysten sijainnilla ei ole enää suurta merkitystä. Toisaalta alueellisella etäisyydellä voidaan alentaa valmistuskustannuksia esimerkiksi ulkoistamalla koko valmistus maahan, josta löytyy halvempi työvoima ja laitteisto. Tämä mahdollistaa myös tietynlaisen veronkierron, jossa tuloja siirretään matalamman verotason maihin siirtohinnoittelun avulla [10]. Kustannussyistä ja nopeasti kasvavien markkinoiden perässä monet Eurooppalaiset teknologiayritykset ovat ulkoistaneet tuotantonsa ja jopa siirtäneet ydintoimintaa Aasiaan tai Itä-Eurooppaan [11]. Kuitenkin yhteistyössä olevien yritysten sijaitessa eri mantereilla on syytä pitää mielessä aikaerot ja kulttuurilliset erot. Myös toimivan logistiikan merkitys kasvaa etäisyyden ollessa suuri. Euroopan sisällä ulkoistamisen etuna on läheisyys asiakkaisiin ja kulttuuriset yhteydet.

Alihankkijan valintaa perustellaan usein sen maineella ja markkinamenestyksellä. On hyvä tietää ovatko yrityksen kilpailijat käyttäneet myös kyseistä alihankkijaa ja jos heillä on ollut hyviä kokemuksia alihankkijasta, voidaan olettaa, että suuria ongelmia ei synny. Kuitenkin on varauduttava kausittaisvaihtelun aiheuttamaan toimituskyvyn vaihteluun jos alihankkijalla on monta samankaltaista päähankkijaa.

2.3.4 Toiminta ja henkilöstö

Ulkoistamisella voidaan hakea myös toiminnallisia eli operatiivisia etuja. Jos yritys ei ole tyytyväinen nykyiseen valmistukseen tai laatuun, voidaan tätä pyrkiä parantamaan siirtämällä valmistus kokeneelle alihankkijalle. Toiminnalliset perusteet eivät yleensä ole painava peruste ulkoistamispäätökselle mutta ne voivat heijastua strategiaan perusteisiin. Usein myös henkilöstön tyytymättömyys toimintaan ja laadun heikentyminen näkyy suoraan kustannusvertailussa. Ulkoistamista perustellessa tulee vertailla laadun lisäksi myös toimituskykyä ja muita tehokkuuden mittareita. Alihankkijan toimintoja tarkastellessa tulee keskittyä esimerkiksi ISO-standardien ja muiden ohjesääntöjen noudattamiseen. [7], [9]

Luotettavan alihankkijan nopeus, täsmällisyys, virheettömyys ja tuottavuus ovat yleensä parempia kuin itse valmistetun. Heidän menestys omassa liiketoiminnassaan edellyttää erinomaista osaamista ja suorituskykyä kapealla toiminta-alallaan. Tästä syystä heidän tulee jatkuvasti rekrytoida ja motivoida osaavaa henkilöstöä. Usein heillä on myös käytössään ajanmukaiset menetelmät ja teknologiat, joiden avulla palveluntuotanto on optimoitu. [9]

Yrityksen oma henkilöstö ei välttämättä ole yhtään sen epäpätevämpää eikä teknologiassakaan välttämättä ole varsinaista vikaa. Kehittämispäätökset ja pätevin henkilöstö ovat kuitenkin suunnattu valtaosin ydintoimintoihin ja sitä vastaaviin osaamistehtäviin. Ulkoistamalla toimintoja, jotka sisältävät esimerkiksi paljon me-

kaanista työtä ja eivät ole yrityksen kannalta keskeistä toimintaa, voidaan keskittää ja hyödyntää paremmin yrityksen sisäistä erityisosaamista. Näin henkilöstö pysyy motivoituneena ja heidän työuriaan voidaan kehittää eteenpäin, jolloin he kokevat työnsä tärkeäksi. Muiden toimintojen osalta on vaikeaa tarjota avainhenkilöille haastavia ja kannustavia kehityspolkuja. Pätevät ja lupaavat yksilöt hakeutuvat töihin yrityksiin, joissa heidän kykyjään arvostetaan ja kehitetään. Tällainen vaihtuvuus saattaa tulla yritykselle kalliiksi, koska tuottavuus ja laatu vaarantuvat sekä uutta henkilöstöä pitää kouluttaa. [9]

Erityisesti teknologiateollisuuden kehitys on nopeaa ja tiedot vanhenevat pian ja menestyvän yrityksen tulee pysyä kehityksen aallonharjalla. Jotta kehityksessä pysyttäisiin pysymään mukana, täytyy henkilöstön pystyä keskittymään ilman, että resursseja tuhlaata vähemmän olennaisiin asioihin. Tästä hyvänä esimerkkinä on tuotekehitys, jossa helposti kehittäjät imeytyvät mukaan tuotannon ylösajamiseen ja sen ylläpitämiseen, vaikka heidän tulisi keskittyä jo seuraaviin tuotekehityshaasteisiin. Ulkoistamalla voidaan siirtää vastuuta ja henkistä taakkaa alihankkijoille, jolloin yrityksen sisäisen henkilöstön paineet laskevat ja heidän vapaa-aikaa voidaan lisätä. Ylitöiden teettäminen ei ole pitkällä aikavälillä kannattavaa yrityksen eikä sen henkilöstön tyytyväisyyden kannalta. Työmatkailun tarve saattaa lisääntyä ulkoistamisen myötä, mikä on hyvä tapa motivoida henkilöstöä yhä kansainvälisempään yrityskulttuuriin.

2.4 Ulkoistamiseen liittyvät riskit ja ongelmat

Ulkoistamiseen liittyy usein negatiivisia olettamuksia, osin ihan syystäkin. Vaikka ulkoistamisella haetaan yrityksen kannalta positiivisia muutoksia ja riskit pyritään minimoimaan, saattaa ikäviä hättäväikutteita esiintyä ennakoitua enemmän. [12] Ulkoistaminen pyritään toteuttamaan siten, että se ei vaikuta yrityksen strategiaan, muuhun toimintaan tai laatuun. Tässä kappaleessa käsitellään niitä tekijöitä, jotka yleensä vaarantavat etujen tavoittelun tai tuottavat muita ongelmia. Jos riskit todetaan liian suuriksi tai ongelmia odotetaan esiintyvän paljon, kannattaa ulkoistamis päätös hylätä. Sopimusriskit ja teollisuus oikeudelliset ongelmat yhdessä monimutkaistavat ulkoistamis päätöstä entuudestaan ja ovat laajuudeltaan niin suuria, ettei niitä tässä yhteydessä käsitellä.

2.4.1 Strategia

Yrityksen selkeän ulkoistamisstrategian puuttuessa ydinosaamiseen ei osata keskittyä ja ulkoistamis päätökset saattavat sotia yrityksen muun strategian kanssa. Ulkoistaminen vaatii paljon suunnittelua ja jos sitä ei ole tehty huolella, ongelmat kasvavat suuremmiksi kuin saavutettu hyöty [13]. Toisaalta ulkoistaminen voi epäonnistua vain sen takia, ettei siitä ole aiempaa käytännön kokemusta. Kokonaispalvelu täytyy osata hahmottaa jo suunnitteluvaiheessa, jotta ulkoistamisprojekti saa vietyä onnistuneesti läpi [9].

Vaikka ulkoistamisella voidaan hakea yritykselle parempaa imagoa, näin kuitenkin harvoin käy. Ulkoistamis päätöksiä pidetään monesti negatiivisena asiana,

koska pelko työpaikkojen laajemmasta karkaamisesta ulkomaille vallitsee palkansaajien keskuudessa. Ulkoistamista ei välttämättä nähdä yrityksen kannattavuuden paranemisena, vaan työpaikkojen vähenemisenä. Tämän lisäksi usein paheksutaan verorahojen karkaamista ja harmaan talouden kasvamista. [14]

Verkostoitumiskehitys tuo tullessaan omat riskinsä. Kun toimintaa siirretään lähemmäksi muuta toimitusketjua, voi olla että etäännyttään omista asiakkaista. Alihankkijoiden huonontuva maine markkinoilla saattaa leimata myös päähankkijan toiminnan. Vaikka ulkoistamispäätökselle saataisiin yleinen hyväksyntä, eivät välttämättä päähankkijan omat asiakkaat tätä hyväksy, varsinkin jos on kyse heille kriittisistä osista. He pelkäävät laadun huononevan tai toimitusten varmuuden heikenevän. Suurten asiakkaiden menetys saattaa tuoda merkittäviä tappioita yritykselle ja sen riski voi jo itsessään poissulkea ulkoistamisen.

Tuotteeseen tai sen valmistamiseen liittyvät erityiset liiketoiminnalliset salaisuudet on turvallisempaa pitää talon sisällä. Näin välttytään tietoturvariskeiltä ja välttytään uusien kilpailijoiden luomiselta, etenkin jos on kyse patentoimattomasta ratkaisusta.

2.4.2 Kustannukset

Vaikka yleensä ulkoistamista perustellaan pääasiassa kustannusten laskemisella, voivat kustannukset jopa nousta ulkoistamisen myötä [7]. Kustannuslaskelmia tehtäessä ei välttämättä osata ottaa huomioon epäsuoria kustannustekijöitä. Tästä esimerkkinä on se, että markkinoita ei tunneta tarpeeksi hyvin, jotta osattaisiin määritellä ja neuvotella yritykselle kilpailukykyiset ehdot. Jos hankittava palvelu pysyy samanlaisena, pitäisi hankintakustannusten laskea oppimisen, tehokkaiden työkalujen ja kilpailun kiristymisen myötä. Sen sijaan tyydytään kiinteään hankintahintaan tai saatetaan jopa sallia kustannusten nousut. Toisena esimerkkinä epäsuorista kustannuksista ovat toiminnon siirron aiheuttamat kertaluonteiset ja toiminnon hallintaan liittyvät toistuvat kustannukset, joita ei osata ennakoida riittävän hyvin. Myös ulkoistamisen aiheuttamat kytkennät yrityksen sisäisessä organisaatiossa ja vaikutukset muihin toimintoihin saatetaan jättää vahingossa huomioimatta. Vaikka toimintaa siirretään alihankkijalle, se ei välttämättä lakkauta toimintoja ulkoistavassa yrityksessä, jolloin päädytään tekemään asioita kahteen kertaan. Tämä ei varmasti laske kustannuksia ja tiedon säilyttäminen ja analysointi kahdessa eri paikassa tuo mukanaan oikeellisuusriskin. Tieto voidaan kyllä hallinnoida ja synkronoida hyvin teknisillä ratkaisuilla mutta uusien teknologioiden implementointi tuo jälleen lisäkustannuksia. [9]

Ulkoistaminen ei ole välttämättä kustannuksellisesti kannattavaa jos yritys on jo investoinut suuria määriä rahaa omiin laitteisiin ja valmistusmenetelmiin. Vaikka nämä voitaisiinkin myydä alihankkijalle, niiden todellinen myyntiarvo voi olla suurempi kuin mitä alihankkija on valmis maksamaan. Ulkoistaminen on vähiten houkuttelevaa jos on juuri panostettu uusiin laitteisiin. Tuotteiden valmistukseen investoitua henkistä pääomaa ei voi myydä, ellei ulkoistamiseen liity kokonaisen tehtaan myynti henkilöstöineen. Vajaakäyttöisen kapasiteetin vallitessa kannattaa harkita sen tehokkaampaa hyödyntämistä ulkoistamisen sijaan. [7]

Yleiseksi syyksi ulkoistamiseen todettiin olevan kausittaisvaihtelulla haettavat kustannukselliset säästöt. Joissakin tapauksissa kausittaisvaihtelun aiheuttama riski vain siirretään alihankkijalle, jolloin riski ei varsinaisesti poistu, vaan toimitusvaikeuksien aiheuttamat kustannukset pyritään ottamaan huomioon sopimusta laatiessa. Jos alihankkijalla on monta samankaltaista päähankkijaa, korostuu riski entuudestaan. Tällöin suurimmat ja tärkeimmät päähankkijat tulevat saamaan toimituksensa pieniä päähankkijoita todennäköisemmin, koska alihankkija ei pysty vastaamaan kaikkien vaatimuksiin samanaikaisesti. Alihankkijan toimiessa puskurina monelle päähankkijalle toimitusvarmuus heikkenee jos valmistukseen käytettävien osien saatavuus on heikko. Pienille, harvoista päähankkijoista riippuville alihankkijoille kysynnän vaihtelut ovat yleensä suurempi ongelma kuin suurille alihankkijoille. [7]

2.4.3 Alihankkija

Ulkoistaminen saattaa johtaa liialliseen riippuvuuteen alihankkijasta, minkä myötä yrityksen muutosvalmius heikkenee ja kyky hyödyntää uusia mahdollisuuksia alenee. Alihankkija pyrkii kasvattamaan omaa liiketoimintaansa kasvattamalla palveluiden volyyymiä. Nykyisiä palveluita pyritään syventämään, käyttäjäpintaa kasvattamaan tai tarjoamaan uusia laajempia palvelukokonaisuuksia. Tällaisiin paketteihin on päähankkijan helppoa ja turvallista sitoutua mutta päätös saatetaan tehdä intuition perusteella. Sen sijaan päätös tulisi aina perustua kokonaislinjauksiin ja yleisiin valintakriteereihin, muuten yksittäisen alihankkijan asema ja neuvotteluvoima voi kasvaa liian suureksi. Kaikki palvelusopimukset tulisi analysoida, hyväksyttää ja punnita mahdollisimman objektiivisesti. [9]

Palvelutoimitussuhde saattaa muuttua liiankin syvälliseksi, jossa alihankkija kahlitsee päähankkijan. Tällöin toiminta muuttuu joustamattomaksi eikä alihankkijan tarvitse enää vastata muuttuviin liiketoiminnan tarpeisiin, koska sillä on vahva neuvotteluasema. Alihankkijalla on hyvä tietämys päähankkijan toiminnoista ja kriittisistä tarpeista sekä johtava asema palvelumarkkinoilla. Päähankkija ei kykene vaikuttamaan alihankkijan toimintamalliin tai palvelusisältöön, mikä vaikeuttaa sopeutumista omien asiakkaiden ja prosessien muuttuviin tarpeisiin. Samalla uusien kehitys- ja liiketoimintamahdollisuuksien muodostuminen vaarantuu. Mikäli palvelun kysyntä kasvaa ennakoimattomasti, päähankkijalle ei välttämättä ole enää vaihtoehtoja valita toista alihankkijaa, mikä näkyy palveluntasossa ja kustannuksissa. Tällaiset riskit tulee ennakoida jo siinä vaiheessa kun palvelusopimuksia laaditaan varautumalla muutoksiin ja laajennuksiin, jotta mahdollisuudet ja edut säilyvät turvattuina. [9]

Liiallinen tukeutuminen alihankkijaan saattaa vähentää yrityksen innovaatiokykyä ja johtaa sen kilpailukyvyyn heikkenemiseen. Jos ulkoistetaan liian monia toimintoja, voidaan menettää kyky seurata teknologian kehitystä eikä sen tuomia mahdollisuuksia osata käyttää hyväksi liiketoimintaprosessien kehittämisessä. Alihankkijan laadun varmistaminen ja valvonta tuovat ongelmia ja kustannuksia. [6]

Alihankkijan sopeutuminen ulkoistajan tuotantoprosesseihin saattaa muodostua ongelmaksi monimutkaisen tuotannon tapauksessa, etenkin jos alihankkija ei ole

tarpeeksi pätevä. Sitä vastaan myös päähankkijalla saattaa olla sopeutumisvaikeuksia alihankkijan toimintaan. Tässä yhteydessä korostuvat kulttuuriset ja kielelliset erot. Kielimuuri saattaa tehdä yhteistyöstä ja kommunikoinnista hyvin hankalaa. Etenkin Pohjoismaissa on totuttu hyvään englannin kielen tasoon mutta esimerkiksi Aasiassa englannin kielen osaaminen ei ole itsestäänselvyys. Jopa korkeassa asemassa olevilla virkamiehillä on usein ongelmia erityisesti lausumisessa ja mitä alemmas yrityksen hierarkiassa mennään, sitä enemmän kieli-ongelmat korostuvat.

Alihankkijan sijaitessa kaukana päähankkijasta korostuvat myös aikaerot ja matkustamisen tarve. Vierailu alihankkijan luona monen tuhannen kilometrin päässä vie aikaa ja rahaa. Sijainnin merkitys korostuu erityisesti jos on kyse sodille tai luonnonkatastrofeille alttiista alueesta, jossa tuotanto saatetaan joutua keskeyttämään aivan odottamatta. Tästä hyvänä esimerkkinä on Japanissa Sendaissa vuonna 2011 tapahtunut maanjäristys, joka edelleen aiheutti tsunamin, jonka takia monta elektroniikkateollisuuden tehdasta jouduttiin sulkemaan pitkäksi ajaksi tai purkamaan kokonaan [15].

Suuri aikaero puolestaan vaikeuttaa reaaliaikaista kommunikointia, koska yhteistä virka-aikaa saattaa olla vain muutama tunti päivässä. Tuotannon muutosten läpivieminen saattaa kestää monta kertaa normaalia kauemmin, koska niihin reagoiminen tapahtuu viiveellä. Aikataulullisia ongelmia aiheutuu myös jos osapuolien pyhät tai loma-ajat osuvat eri ajankohdille. Itämaiden ja Länsimaiden tapauksessa näin usein käykin, josta esimerkkinä kiinalainen uusivuosi ja länsimaiden joulupyhät.

2.4.4 Toiminta ja henkilöstö

Epävarmuus alihankkijan toimituskyvystä ja pelko aiheutuvista toimitushäiriöistä on yksi suurimmista ulkoistamiseen liittyvistä ongelmista [7]. Lakot, onnettomuudet tai konerikot ovat häiriöitä, joita myös omassa valmistuksessa voi esiintyä mutta alihankkijan tapauksessa näitä ei voida ennakoida tai kontrolloida. Omassa valmistuksessa saatetaan nähdä indikaatioita tällaisista tekijöistä, jonka mukaan häiriöitä voidaan ennaltaehkäistä. Vaikka alihankkija olisi kuinka luotettava, voi toimitushäiriöitä aina esiintyä. Oma valmistusta pidetään aina luotettavampana.

Ulkoistamisen myötä tuotannossa on havaittu esiintyvän paljon laatuongelmia [7]. Jos tuotteen valmistusta tarvitsee valvoa, esimerkiksi jos on kyse asiakkaalle tärkeistä tuotteista, on se helpompi toteuttaa omassa valmistuksessa. Alihankkijan tuotannon valvominen reaaliaikaisesti on hankalaa. Etenkin jos alihankkija ei ole valmis nopeisiin tuotannon muutoksiin ja päähankkijan toimitusaikavaatimuksiin, on syytä valmistaa osat itse.

Ulkoistamisen aiheuttamat henkilöstömuutokset ja -järjestelyt voivat johtaa työpaikan ilmapiirin ja henkilöstön motivaation laskuun. Pahimmissa tapauksissa muutostavastarinta on niin suurta, että se aiheuttaa työnseisauksia etenkin jos ulkoistaminen aiheuttaa henkilöstön vähennyksiä. Työtehtävien muuttumista yrityksen sisällä ei välttämättä koeta positiivisena asiana ja epävarmuus työpaikan säilymisestä saattaa aiheuttaa sen, että osaava henkilöstö hakeutuu muualle töihin. [7]

Logistiikassa saattaa esiintyä ongelmia erityisesti kun toimintaa on ulkoistettu monelle alihankkijalle ja he ovat keskenään riippuvaisia toimituksista ilman väli-

varastointia. Tiedonsiirto, kuljetus ja varastointi yhdessä täytyy olla toimivaa tuotantoprosessin joka vaiheessa, jotta toimitukset pysyvät ajallaan ja osakomponentit ovat oikeassa paikassa oikeaan aikaan. Kysynnän vaihdellessa kaikkien alihankkijoiden tulee olla valmiita sopeutumaan tuotantoprosessien vaihteluun. [6] Pitkät kuljetusetäisyydet ja kuljetustapoihin liittyvät vaatimukset tuovat mukanaan ongelmia ja lisäävät kustannuksia [7].

Tuotannon ongelmatilanteiden selvittäminen voi osoittautua hyvinkin haastavaksi laitehuollon ja tuen sijaitessa päähankkijalla. Tuotantolaitteiden etähallinta on mahdollista vain ohjelmallisesti ja vaarantaa niin alihankkijan kuin päähankkijan tietoturvan. Fyysisten vikojen korjaaminen saattaa täten kestää monta päivää, mikä vaarantaa koko toimitusketjun saumattoman toiminnan ja lisää tietenkin kokonaiskustannuksia.

3 MEMS-anturit ja niiden testaus

Tässä luvussa käydään läpi mitä MEMS:llä tarkoitetaan ja miten se liittyy erityisesti kulmanopeusantureihin eli gyroihin. Kerrotaan myös miten antureita valmistetaan sekä miksi niitä testataan ja mistä testausjärjestelmä koostuu.

3.1 MEMS-teknologia ja sen hyödyntämien kulmanopeusantureissa

MEMS eli mikromekaaniset systeemit ovat pienikokoisia laitteita, joilla pystytään esimerkiksi muuttamaan jokin mekaaninen liike sähköiseksi signaaliksi, jolloin puhutaan antureista. Kulmanopeusanturin tapauksessa havaittava mekaaninen liike on Coriolisvoiman aiheuttava liikeradan muutos anturielementin resonaattorirakenteessa, mikä voidaan mitata kapasitanssin muutoksena. Mitattu analogiasignaali edelleen syötetään ASIC-piirille, joka suodattaa ja prosessoi datan ja muuttaa sen digitaaliseen muotoon. [16]

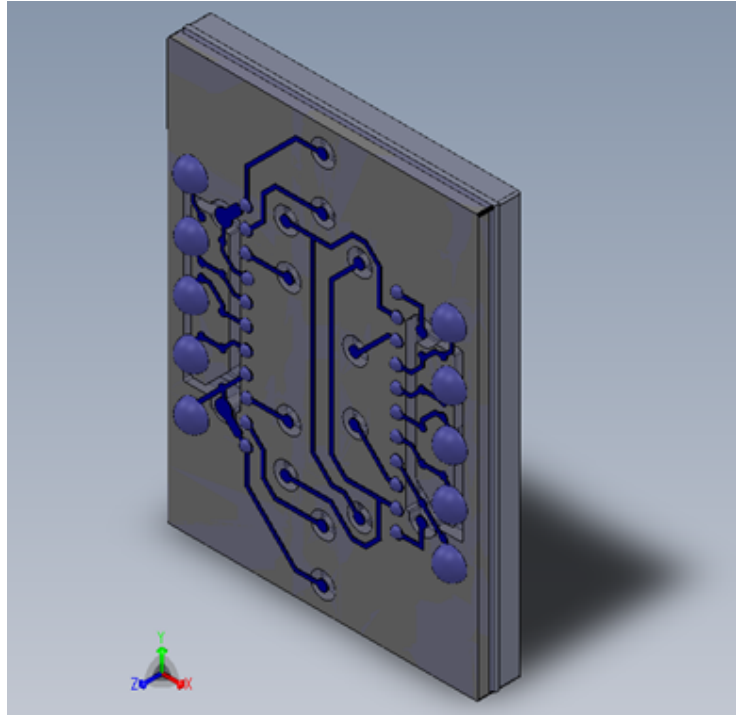
Anturielementti valmistetaan kolmesta päällekkäin olevasta piikiekosta, joita ensin prosessoidaan MEMS-tekniikalla muodostamalla muun muassa kaviteetteja ja resonoivia rakenteita. Lopuksi kiekot liitetään yhteen yhdeksi kiekoksi. Ennen jatko-prosessointia kiekolla olevat elementit testataan sähköisillä karsintamittauksilla, joita käsitellään seuraavassa kappaleessa. RDL-käsittelyn (engl. *Redistribution Layer*) jälkeen toimivien anturielementtien päälle ladotaan ASIC-piirit CoM-konseptin mukaisesti (engl. *Chip-on-MEMS*). Kiekon sahaus, lopputestauksen ja kalibroinnin jälkeen yksittäiset anturit ovat valmiita juotettavaksi piirilevyille. [17]

3.1.1 Anturielementin rakenne ja toimintaperiaate

Kuvassa 3 näkyy kulmanopeusanturin elementtirakenne, johon on lisätty isot juotepallot piirilevyille kiinnittämistä varten. Pienet juotepallot ovat ASIC:n kiinnittämistä varten, joka tehdään Flip-Chip -tekniikalla. Elementin pinnalla näkyy myös reititykset sähköisiä signaaleja varten, joiden avulla pystytään kontrolloimaan ja havainnoimaan elementin sisällä syntyviä resonansseja. MEMS-testauksessa juotepalloja ei vielä ole, jolloin kontaktoituminen tapahtuu metallikontakteille.

Elementin sisällä resonoiva rakenne ja sen toiminnan kannalta keskeiset moodit ovat esitettyinä kuvassa 4, jonka vasemmasta alalaidasta käy ilmi anturin mitaussuunnat. A-kohdan ensimmäinen moodi on primäärimoodi, joka saadaan aikaan elektrostaattisesti syöttämällä jännite kamparakenteen elektrodeille, minkä seurauksena koko rakenne alkaa resonoida x-y -tasossa kiinnikkeiden varassa. Kun anturielementtiä kallistetaan, sen kulmanopeus muuttuu. Y-akselin suuntainen kulmanopeus ja primaariliike kytkevät yhdessä elementille Coriolisvoiman mukaisen z-akselin suuntaisen vääntömomentin, joka nähdään sekundääri liikkeenä x-akselin ympäri. Kuvan C-kohta vastaa kyseistä tilannetta. Vastaavasti B- ja D-kohdissa havaitaan x- ja z-akseleiden suuntaiset kulmanopeudet sekundääri liikkeenä.

Massan ympärillä oleva kapasitiivinen lineaarikamparakenne herättää ja havainnoi vastavaiheisen tasossa tapahtuvan ajoliikkeen. Elementin pyörimisliikkeen ai-



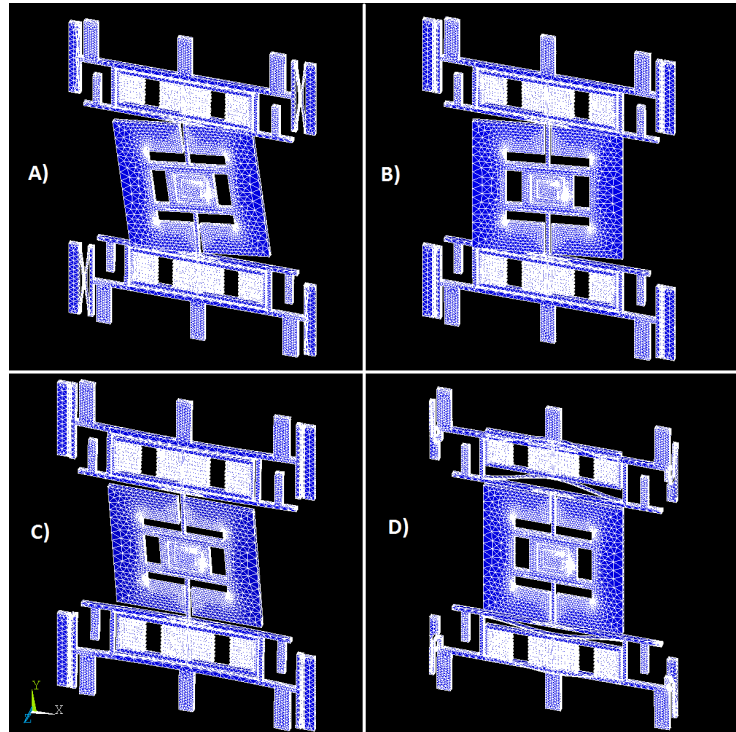
Kuva 3: Kulmanopeusanturielementti.

heuttava tasoa vastaan oleva differentiaalinen liike havaitaan kapasitiivisesti massan päälle olevien elektrodien avulla. Primääriliikkeen resonanssi siis mahdollistaa kulmanopeudesta syntyvän Coriolisvoiman kytkeytymisen sekundääriresonaattorille. Sen resonanssitaajuus ja -amplitudi ovat suoraan verrannollisia kulmanopeuteen. Kulmanopeusanturin toimintaa ja testausta on esitelty tarkemmin useissa eri diplomitoissa. [18], [19], [20]

3.1.2 Anturielementin valmistusprosessi

Kulmanopeusanturi on vain noin kymmenen neliömillimetrin kokoinen, minkä ansiosta anturielementtejä voidaan valmistaa noin tuhat yhdelle 6" :n piikiekolle. Valmistusprosessi perustuu 3D MEMS- teknologiaan, jonka tärkein raaka-aine on Czochralski-menetelmällä valmistettu yksikiteinen pii. Elementti valmistetaan kolmesta erillisestä piikiekosta, joista alimmaisena on paksu pohjakieppo, joka toimii yksinkertaisesti vain eristekerroksena ja alustana. Toinen ohuempi kiekko muodostaa varsinaisen resonoivan rakennekerroksen, jota kutsutaan rakennekiekoksi. Prosessointiajan lyhentämiseksi valmistuksessa käytetään C-SOI -kiekkoja (engl. *Cavity Silicon-on-Insulator*), jossa pohja- ja rakennekiekko ovat jo valmiiksi fuusiobondattuina yhteen. Päälimmäisenä on paksu kansikieppo, joka toimii nimensä mukaisesti kantana kiekkopakettile.

Kiekkojen valmistus koostuu useasta eri työvaiheesta ja niitä järjestelmällisesti toistamalla saadaan aikaiseksi kiteisiä kolmiulotteisia rakenteita. Kiekon päälle kasvatetaan ensin suojaava oksidikalvo, jota kuvioidaan litografia-vaiheessa valotta-



Kuva 4: Elementtirakenteen resonanssimoodit: A) primäärimoodi sekä B) x-akselin, C) y-akselin ja D) z-akselin havainnointimoodit.

malla resistin ja maskien avulla. Oksidi poistetaan kuvioimattomilta alueilta. Näin saadaan aikaan haluttu kuvio, jota edelleen etsataan DRIE- tekniikalla (engl. *Deep Reactive Ion Etching*) tai KOH-liuoksella (Kaliumhydroksidi). Sen seurauksena pii syöpyy pois suojaamattomilta kohdilta. Ylimääräinen oksidi saadaan syövytettyä pois esimerkiksi BHF-liuoksella (engl. *Buffered Hydrogen Fluoride*). Vaiheita toistetaan järjestelmällisesti kunnes kiekot ovat valmiita metallointia varten, jossa muodostetaan elektrodit sähköisiä signaaleja varten. Viimeisenä valmistusvaiheena kiekot liitetään toisiinsa anodisesti bondaamalla, minkä ansiosta kiekot liimaantuvat hermeettisesti toisiinsa. Bondaus tapahtuu alipaineessa, jotta kiekon sisälle saadaan sopiva vaimennus resonanssia varten. Kiekkojen välissä käytetään lasia eristeenä, minkä avulla kiekkojen välille saadaan muodostettua haluttu kapasitanssi. [16]

Vaikka kiekot valmistetaan puhdashuoneessa ja sen tuotantoprosessit ovat hyvin tarkasti valvottuja, ei lopputuloksena ole kuitenkaan koskaan sataprosenttisen hyvää materiaalia. Kiekkojen laadussa saattaa olla valmistuserien välistä ja sisäistä vaihtelua. Laadun valvominen vaatii niin tilastollista, kuin kappalekohtaista kontrollointia. Seuraavassa kappaleessa kerrotaan miten yksittäisiä anturielementtejä kritisoidaan. Tilastollista laadunvalvontaa käydään läpi seuraavassa luvussa.

3.2 Kulmanopeusanturielementin testaus

Anturielementtejä testataan karsintamittauksilla, jotta turhalta jatkoprosessoinnilta vältyttäisiin kritisoidulla huonoja elementtejä tai jopa kokonaisia kiekkoja. Karsintamittauksessa mitattuja parametreja vertaillaan sille määriteltyihin testispesifikaatioarvoihin. Testauksella pystytään myös lisäämään lopputuotteen toimintavarmuutta esimerkiksi mittaamalla kompensointiparametreja, jotka otetaan huomioon ASIC-piirillä. Koska testaus tapahtuu ilman ASIC-piiriä, täytyy sen toimintaa pystyä simuloimaan erillisellä mittauselektronikalla, joka yleensä toteutetaan painetulla PCB-elektronikalla (engl. *Printed Circuit Board*).

Jotta huonot ja hyvät anturielementit voitaisiin erotella toisistaan, täytyy testauksen olla tarpeeksi luotettavaa. Koska kulmanopeusanturi on suuren volyymin omaava tuote, täytyy testaus olla myös nopeaa ja tehokasta. Nopea testaus mahdollistaa alhaisemmat tuotantokustannukset ja myös investointikustannuksissa säästetään, koska kapasiteettia ei tarvitse nostaa useilla testilaitteistoilla. Testausjärjestelmän tulee toimia lähes täysin automatisoidusti, jotta sen testauskustannus pysyy alhaisena ja miljoonia elementtejä pystytään testaamaan taukoamatta. Järjestelmän tulee kuitenkin olla dynaaminen, jotta muutoksia mittausmenetelmään voidaan tarvittaessa tehdä teknologian ja tuotteen kehittyessä.

Kulmanopeusanturielementin karsintamittauksessa tulee selvittää resonaattorin ominaisuuksia kapasitiivisella mittaustavalla. Myös anturin epäideaalisuuksia pitää pystyä mittaamaan, jotta anturin suorituskyky pysyy riittävällä tasolla. Karsintamittaukseen on olemassa useita eri mittausmenetelmiä, joista kullakin on omat hyvät ja huonot puolensa. Kyseiselle tuotteelle tärkeää on testauksen tuotannollisuus ja sen suorituskyky. Nopeuden lisäksi tärkeää on tarkkuus ja toistettavuus, joita käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

3.2.1 Ominaisarvojen mittaaminen

Yksinkertaisin menetelmä resonaattorin kapasitiiviseen karsintamittaukseen on impulssivasteeseen perustuva mittaaminen, jossa rakenne herätetään värähtelemään sähköisellä impulssilla. Signaalin vaimenemisesta voidaan laskea resonaattorin ominaistajuus ja Q -arvo eli hyvyysluku mutta useampien moodien analysointi on hankalaa impulssin epäideaalisuuksien takia. [19]

Toisena vaihtoehtona on taajuuspyyhkäisyn tekeminen diskreetillä herätesignaallilla, jonka vasteesta voidaan jälleen määrittää taajuus ja Q -arvo mutta ei kovin tarkasti. Tämä menetelmä on kuitenkin todettu riittäväksi kulmanopeusanturin sekundaariresonanssien mittaukseen. [19]

Kolmas tapa on käyttää resonanssin herättämiseen takaisinkytkentäsilmukkaa, jolloin resonaattori herää takaisinkytkennän taajuuskaistan mukaiselle ominaistajuudelleen. Tämä tapa on todettu sopivan vaihtoehtoista hyvin kulmanopeusanturin primääriresonanssin määrittämiselle, koska sillä pystytään mittaamaan elementin ominaisarvot hyvin tarkasti. Mittausmenetelmän monimutkaisuus tuo omat riskinsä etenkin ulkoistamisen yhteydessä, koska sen kehittäminen ja soveltaminen vaatii paljon tuntemusta. [19]

Mittauselektronikka voidaan korvata erillisellä FPGA-piirillä (engl. *Field-programmable gate array*). Sen avulla primääriliike herätetään varauspumppu-tyylisellä digitaalisella vaihelukitulla silmukalla lukitseamalla generoitava signaali elementin ominaistajuudelle. Amplitudia säädetään ohjelmoidulla PID-säätimellä (engl. *Proportional-integral-derivative*). FPGA-piirin soveltuvuus erilaisiin mittauksiin on hyvä sen dynaamisuutensa ansiosta. Sen toimintaa voidaan muuttaa ohjelmoimalla sen sijaan, että koko piirilevy suunniteltaisiin ja valmistettaisiin kokonaan uusiksi. Heikkona puolena on ohjelmoinnin monimutkaisuus ja vaativuus, mikä edellyttää laajaa tuntemusta digitaalisesta signaalinkäsittelystä (DSP, engl. *Digital Signal Processing*). [20]

Mekaanisella kulmanopeuserähteellä mittaaminen sen sijaan ei ole tuotannollista sen hitauden ja heikon toistettavuuden takia.

3.2.2 Epäideaalisuuksien mittaaminen

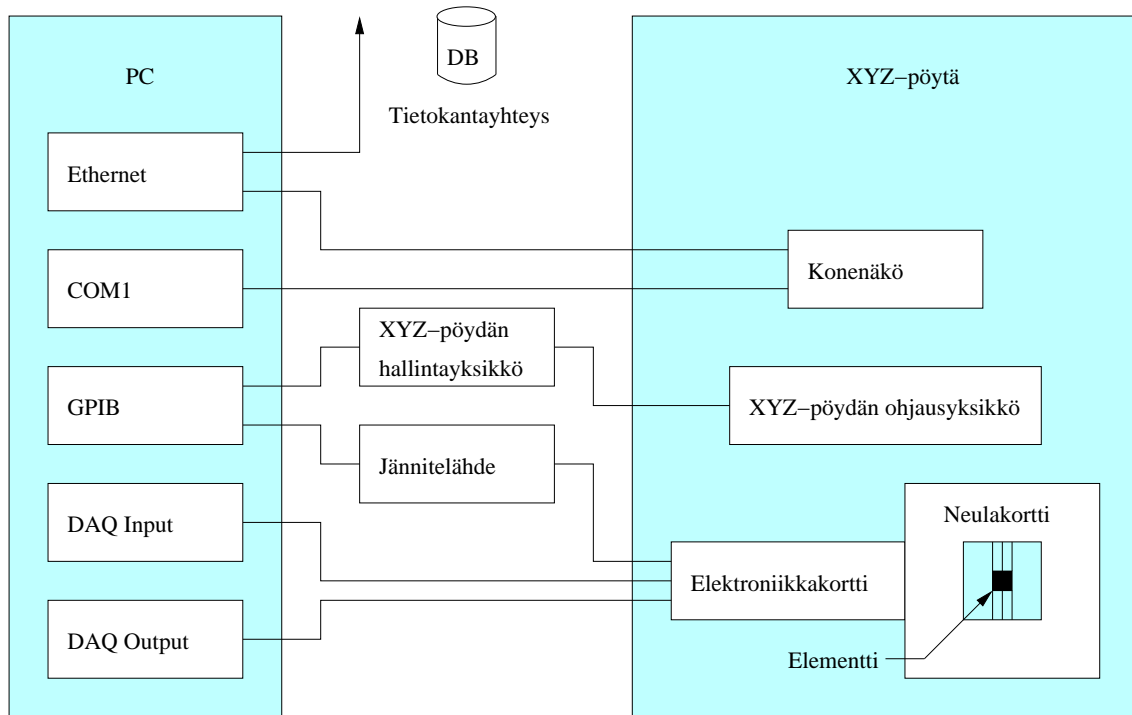
Elementin rakenteen epäideaalisuuksista johtuva kvadratuurisignaalin mittaaminen on myös oleellista karsintamittauksessa. Kvadratuurisignaalin synnyttää primääriresonanssin osittainen kytketyminen sekundääriresonaattorille ilman kulmanopeuserähtettä. Sen mittaaminen on tärkeää, koska siitä voidaan päätellä myös valmistusprosessin hyvyys. Kvadratuurisignaalin vaikutusta ei kompensoida erillisillä elektrodeilla, vaan sen vaikutus otetaan huomioon vasta ASIC-piirillä.

Valmistusprosessin hyvyttä voidaan myös mitata erillisellä vuotovastusmittauksella, joka kertoo anturielementin rakenteiden välisen vuotovastuksen. Suuret vuotovirrat eli pienet vuotovastukset heikentävät anturin suorituskykyä ja kasvattavat sen virran- ja tehonkulutusta. [19] Anturin pieni virrankulutus on oleellista, koska se on suunnattu mobiililaitteisiin, joissa on hyvin rajallinen määrä virtaa käytettävänä. Vastuksen tarkka mittaus monimutkaistaa mittausjärjestelmää, koska se vaatii erillisen kytkennän. Vuotovastuksen on kuitenkin havaittu olevan verrannollinen mittauselektronikan kuuntelujännitteiden tasoon primääriresonaattorin mittauksessa, mikä on todettu riittäväksi kritisointimenetelmäksi kyseiselle tuotteelle.

3.3 Testausjärjestelmän esittely

VTI on kehittänyt konseptin kolmiakselisen kulmanopeusanturin sähköiseen testaukseen. Testausjärjestelmä jäljittelee kulmanopeusanturin ASIC:n toimintaa sähköisiltä ominaisuuksiltaan, minkä avulla karsintamittaukset suoritetaan. Kuvassa 5 on esimerkki tyypillisestä yksinkertaistetusta testausjärjestelmästä, jossa sähköisiä signaaleja syötetään ja luetaan PC:n DAQ-korteilta (engl. *Data acquisition*) elektroniikkakortille. Elektroniikkakortti on edelleen kytketty neulakortin kanssa, jonka avulla yksittäisen anturielementin metallikontakteille kontaktoidutaan. IEEE-488 -standardin mukaisen GPIB-kortin (engl. *General Purpose Interface Bus*) avulla ohjataan jännitelähdettä, ja XYZ-pöytää. Jännitelähde tarjoaa käyttöjännitteet elektroniikkakortille. Hyvin tarkalla X, Y, ja Z-suunnassa liikkuvalla pöydällä liikutellaan piikiekolla olevia anturielementtejä neulakortin alla kunkin mittauksen välillä. Konekölaitteisto varmistaa kohdistuksen säilymisen ja parantaa näin testauksen luo-

tettavuutta [21]. Konenäköä voidaan ohjata joko COM-portin tai Ethernet-väylän avulla. Testilaitteisto on edelleen kytkettynä yrityksen sisäverkkoon ja edelleen tietokantaan, johon testitulokset lähetetään testin päätyttyä. Näitä tuloksia voidaan hyödyntää tulevissa prosesseissa. [19]



Kuva 5: Kaavakuva tyypillisestä testausjärjestelmästä.

4 MEMS-testauksen ulkoistaminen

Tässä luvussa esitellään käytännön esimerkki MEMS-testauksen ulkoistamisesta, jossa kolmiakselisen kulmanopeusanturin tuotannon osaprosessi siirretään alihankkijan vastuulle. Ensin perustellaan ulkoistamisen tarve ja sillä haettavat edut, minkä jälkeen esitellään testausjärjestelmän rakenne. Sen perusteella tehdään valinta alihankkijasta, jonka kanssa yhteistyö on aloitettu ja kerrotaan miten tuotantoa tullaan ylläpitämään siten että tunnetuilta ongelmilta vältyttäisiin.

4.1 Ulkoistamistarpeen perustelu

Kuluttajamarkkinoille levittäytyminen vaatii suuria tuotannollisia muutoksia lähinnä kapasiteetin kasvattamisen ja tuotantokustannuksien laskemisen kannalta. VTI on toimittanut pääasiassa autoteollisuudelle hyvin tarkkoja ja laadukkaita antureita jo lähes 20 vuotta. Sen tuotantolaitos ja teknologia on optimoitu vastaamaan markkinoita, joille tyypillistä on tuhansien tai muutamien miljoonien komponenttien vuosierät ja muutaman miljoonasosan laatutarkkuus, minkä takia myyntihinta on tavallista anturia korkeampi. Vastaavasti kuluttajamarkkinoiden vuosierissä puhutaan kymmenistä tai sadoista miljoonista osista, heikommista laatuvaatimuksista ja pienestä myyntihinnasta. Tämän lisäksi kyseessä on usein kausituote, jonka kysyntä saattaa loppua yhtäkkiä markkinoiden ja teknologioiden kehittyessä nopeaan tahtiin.

Suomessa sijaitsevan tehtaan tuotantokapasiteetin kasvattaminen vaatisi paljon aikaa ja valtavia investointeja. Lisäksi yrityksen ydintoiminnan ja strategian kannalta tärkeiden tuotteiden tuotanto saattaisi häiriintyä. Olisi myös epätodennäköistä, että tuotantokustannukset saataisiin poljettua tarpeeksi alas kalliin työvoiman takia. Tästä syystä yritykselle on kannattavampaa etsiä yhteistyökumppaneita, jotka pystyvät toteuttamaan tuotannon heidän vaatimallaan tavalla ja kustannustehokkaasti ilman, että yrityksen sisäisiä resursseja kuluu muuhun kuin kehitykseen.

Kulutuselektroniikan tarjoaminen autoteollisuustuotteiden lisäksi on siis ennen kaikkea yrityksen strateginen päätös. Ominaisuuksiltaan ylivoimaisen ja hinnaltaan kilpailukelpoisen kulmanopeusanturin tarjoaminen tuo kyseisille markkinoille lisää näkyvyyttä ja toimii läpimurtajana tuleville yrityksen kuluttajamarkkinatuotteille.

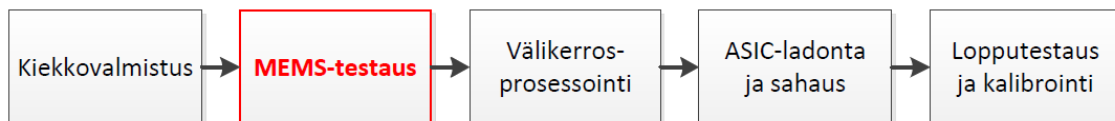
Kulmanopeusanturin MEMS-testauksen ulkoistaminen tuotannon osaprosessina on pääosin kustannusperusteinen mutta myös strateginen, koska näin yritys voi rauhassa keskittyä ydintoiminnan kannalta tärkeään autoteollisuuden ja lääketieteellisuuden tuotantoon. Näille markkinoille on ominaispiirteistä korkeammat katteet ja vaativat asiakaskohtaiset tuotespesifikaatiot. Tuotannon ollessa paikallista vaativien asiakkaiden vaatimuksiin pystytään vastaamaan välittömästi ja tuotantoparametreja päästään säätämään ilman välikäsiä. Ulkoistamalla puolestaan voidaan säännöstellä tuotantokapasiteettia markkinoiden mukaan ja halpa työvoima mahdollistaa tuotteelle kovan kustannuskilpailun.

Koska tuotantoketjun osaprosesseille löytyy paljon varteenotettavia alihankkijoita Aasiasta, liittyy valintaan myös maantieteellisiä perusteita. On järkevää sijoittaa MEMS-testaus lähelle kiekkovalmistajaa ja jatkoprosesseja, mikä mahdollis-

taa logistiikan tehokkaan toimivuuden. Valinnoilla voidaan vaikuttaa toimitusketjun toimivuuteen ja tehokkuuteen. Verkostoitumiskehitys laajentaa myös markkinoiden kokoa.

4.2 Ulkoistettavat prosessit

Kuvassa 6 on esitetty tuotantoketjun muodostamat pääprosessit CoM- tuotannossa, joista keskitytään toisena olevaan MEMS-testaukseen. Näistä jokainen yksittäinen prosessi on päätetty ulkoistaa alihankkijoiden tehtäväksi. Ensimmäinen alihankkija valmistaa kiekkopaketin, joka lähettää sen testattavaksi 25 kiekon erinä. MEMS-testauksen hoitava alihankkija suorittaa karsintamittauksen ja välittää hyväksi todetut kiekot kolmannelle alihankkijalle välikerrosprosessoitavaksi. Se sisältää RDL-käsittelyn ja juotepallojen nystyttämisen. ASIC-ladonnassa piirit asetetaan MEMS-testauksessa todettujen toimivien elementtien päälle, jonka jälkeen kiekot sahataan yksittäisiksi antureiksi. Antureiden toiminta varmistetaan tuotantoketjun viimeisellä alihankkijalla ja samalla antureiden muistiin tallennetaan MEMS-testaksessa mitatut ominaisparametrit. Näitä parametreja hyödynnetään kalibroitivaiheessa, jossa anturin sisäiset epäideaalisuudet kompensoidaan esimerkiksi jännitekertoimilla. Näin antureista saadaan keskenään mahdollisimman yhdenmukaiset ja tuotespesifikaatio voidaan määritellä tarkasti, mikä on tärkeää anturin markkinoinnissa.



Kuva 6: CoM-prosessit, jossa mukana testaus ja kalibrointi.

Nykytilanteessa lähes koko tuotanto ja sen osaprosessit tehdään putkessa pääosin yhdessä tehtaassa mutta jokainen yksittäinen prosessi voidaan ulkoistaa alihankkijalle suoritettavaksi. Jotta valmistusprosessit voitaisiin ulkoistaa, pitää niistä olla hyvä tuntemus ja kokonaiskuva. Ulkoistaminen helpottuu jos prosessille löytyy tarkat määritelmät ja standardit, joiden avulla tuotanto säilyy yhdenmukaisena. MEMS-teknologia on kuitenkin suhteellisen tuore teollisuuden alana jos sitä verrataan esimerkiksi IC-teknologiaan (engl. *Intergrated Circuit*), jolle löytyy jo valmiita standardeja testausta myöten, joista ehkä tunnetuin on JEDEC (engl. *Joint Electron Devices Engineering Council*) [22]. MEMS-valmistus ja siinä käytettävä laitteisto usein noudattaa SEMI-standardeja (engl. *Semiconductor Equipment and Materials International*) [23] mutta itse testaukselle ei ole olemassa kattavia standardeja, koska sovellusalueet ja toimintaperiaatteet voivat vaihdella hyvin laajalti. Joitain standarditestejä on olemassa lähinnä MEMS:in eliniän testaukselle ja laadun varmistamiselle mutta itse sähköiset karsintamittaukset kehitetään lähes aina tuotekohtaisesti. On siis hankalaa tarjota yleistä testauksen palvelupakettia alihankkijana, koska testauslaitteiston rakentaminen vaatii paljon räätälöintiä ja tuntemusta tässä tapauksessa kulmanopeusanturista ja sen fysikaalisesta toimintaperiaatteesta.

4.3 Yhteistyökumppaneiden valinta

Tuotannon osaprosesseille on olemassa suuri määrä mahdollisia alihankkijoita ympäri maailman mutta kaikista kattavin valikoima ja kustannuksellisesti houkuttelevimmat vaihtoehdot löytyvät Aasiasta. Alihankkijaa ei kannata kuitenkaan valita pelkästään yksittäisen prosessin näkökulmasta, vaan pyrkiä löytämään lähellä olevia toimijoita, jotka ovat jo valmiiksi hyvässä yhteistyössä keskenään ja kattavat yhdessä koko tuotantoketjun. Näin varmistutaan toimivasta toimitusketjusta ja vältytään logistisilta ongelmilta.

Alihankkijan valintaa liittyy paljon perusteita ja huomioon otettavia seikkoja, joita käsiteltiin luvussa kaksi. Yksi tärkeimmistä perusteista on kuitenkin kustannuksien laskeminen ja jotta tästä voitaisiin varmistua, täytyy määrittellä sen muodostavat tekijät. Näiden avulla voidaan määrittää tarkka tavoiteltava hinta palvelulle. Testauskustannuksia syntyy muun muassa laitteiston investointikustannuksista ja kullekin laitteelle on olemassa oma kuoletusaikansa, joka pitää myös ottaa huomioon. Testauksen kehitys ja siihen liittyvän henkilöstön palkat tuovat omat testauskustannuksensa. Varsinaiset tuotantokustannukset määräytyvät pääasiassa operaattoriajan sekä tuotantohenkilöstön palkkojen ja resurssien mukaisesti. Testauskustannuksia lisää myös puhdistilan käyttötarve, joka luo omat rajoitteensa testilaitteistolle.

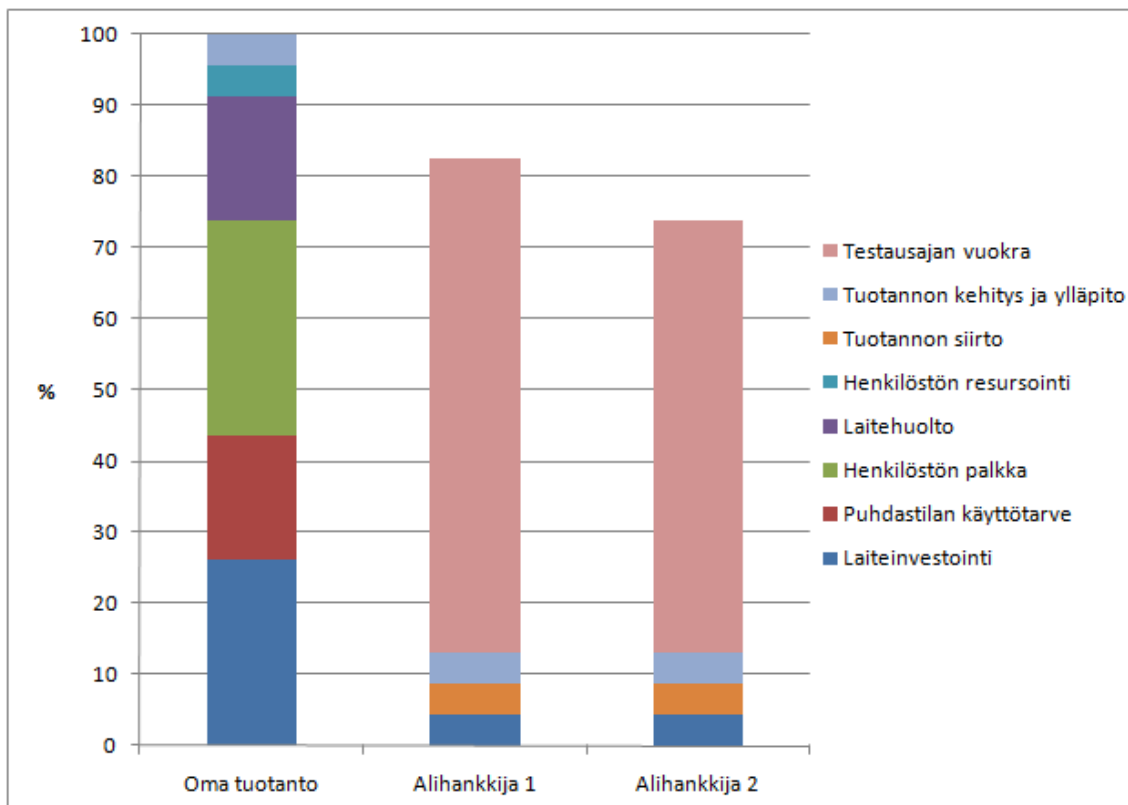
Vaihtoehtoja kartoittaessa etsittiin potentiaalisia alihankkijoita, jotka suoriutuisivat edellisessä luvussa esitellyn testausjärjestelmän käytöstä. Monet toimitsijoista tarjosivat IC- teollisuuden testauspalveluja mutta eivät tarjonneet palveluja MEMS-testaukselle. Kuitenkin muutamat alihankkijat halusivat laajentaa toimialaansa tarjoamalla palveluna myös MEMS-testausta.

Kuvassa 7 on esitettyä suuntaa antava kustannusrakenne yrityksen omalle MEMS-testauksen tuotannolle ja vastaavasti mahdollisille sen suorittaville alihankkijoille. Kuvasta nähdään, että ulkoistamalla testaus päästäisiin parhaimmillaan lähes 30 prosentin kustannussäästöihin, kun tuotantokustannukset lasketaan yksittäiselle kielelle ottaen huomioon laskennalliset kapasiteetti- ja tuotemääräoletukset. Investointi- ja siirtokustannukset ovat jyvitettyinä viidelle vuodelle.

Ulkoistettaessa MEMS-testausta kustannukset muodostuvat pääosin testausajasta, jolle on määrätty tietty tuntihinta. Tämä asettaa suuria haasteita testilaitteistolle ja -ohjelmistolle, koska sen nopeuttaminen ja optimointi on vaikeaa mutta kriittisen tärkeää. Järjestelmän kehitysvastuu kannattaa säilyttää ulkoistavalla yrityksellä, jolla on parempi tuntemus tuotteesta ja testausjärjestelmästä. Tästä aiheutuvat kulut tulee myös ottaa huomioon laskelmia ja yhteistyökumppanin valintaa tehtäessä.

4.4 Yhteistyömalli

Ulkoistamistarpeen ollessa selkeä, valinta alihankkijasta tehtiin. Vaihtoehtoista päätettiin toiseen alihankkijaan, jolla testauskustannus oli matalin. Kustannusten lisäksi vertailtiin alihankkijoiden mainetta markkinoilla, joita arvioitiin yhdessä muiden yhteistyökumppaneiden kanssa. Alihankkijalla todettiin olevan riittävät resurssit ja



Kuva 7: Suuntaa antavat MEMS-testauksen suhteelliset tuotantokustannukset.

suuri tuotantokapasiteetti, mikä mahdollistaa myös muiden tuotteiden testauksen ulkoistamisen samalle alihankkijalle. Kyseisellä alihankkijalla ei kuitenkaan ollut aiempaa kokemusta MEMS-testauksesta mutta se osoitti halukkuutensa laajentaa toimintaansa kyseiselle toimialalle. Heidän kyvyistään ja yhteistyön toimivuudesta varmistuttiin kouluttamalla edellisessä luvussa esitettyjä anturin toimintaperiaatteita ja käymällä läpi yritysten nykyisiä testausrutiineja, minkä perusteella kehitysideoita vaihdettiin.

Kyseinen alihankkija valittiin myös, koska heillä on paljon tuntemusta testauksessa käytettävästä automatisoidusta laitteistosta. Alihankkija on investoinut suuria määriä rahaa hyvin tuotannollisiin XYZ-pöytiin, joita testauksessa käytetään anturielementtien liikuttamiseen. Kyseessä on siis erityinen teknologia, jota ulkoistavalla yrityksellä ei ole itsellä käytössään. Jotta kyseinen teknologia pystyttäisiin valjastamaan ulkoistavan yrityksen käyttöön, täytyy heidän toimia tiiviissä yhteistyössä laitteiston integroinnissa. Tämän helpottamiseksi päädyttiin yhteistyömalliin, jossa pää- ja alihankkija yhdessä määrittelevät XYZ-pöydän tarvittavat ominaisuudet. Erityisvaatimuksena laitteelle oli, että sen tulisi soveltua myös anturin lopputestaukseen, joka pystyttäisiin samalla kehittämään.

Sovittiin, että alihankkija tilaa laitteen, joka edelleen toimitetaan päähankkijalle kehitettäväksi itse testausjärjestelmälle. Malliin päädyttiin, koska alihankkija sijaitsee kaukana päähankkijasta ja integrointi vaatii satoja miestyötunteja. Sen suo-

rittaminen alihankkijan tiloissa olisi ollut henkilöstön kannalta epämiellyttävää ja kehitettävän laitteiston saatavuuden kannalta hankalaa. Koska tuotannon ylösajamisella oli tiukka aikataulu, pyrittiin nopeimpaan mahdolliseen menetelmään. Sen sijaan järjestelmän kehittäminen pelkkien spesifikaatioiden avulla saattaisi vaarantaa nopean pääsyn markkinoille.

4.5 Testausjärjestelmän integraatio

Ennen testausjärjestelmän integrointia täytyy alihankkijan laitteistoon perehtyä tarkasti, jotta järjestelmän kehittäminen tuotannolliseksi olisi mahdollista. Koska testausjärjestelmä ei ole enää paikallinen ulkoistamisen myötä, täytyy sen toimintaan tehdä alihankkijan vaatimia muutoksia. Esimerkiksi testitulosten käsittely ja kaikki muu tietokannan kanssa kommunikointi täytyy toteuttaa itsenäiseksi. Alihankkijan oman laitteiston käyttö aiheuttaa erityisen paljon lisätyötä testausohjelmiston kehittämisessä. Testausohjelmiston tulee kaiken lisäksi olla tarpeeksi selkeä ja helppokäyttöinen, jotta alihankkijan operaattorit osaavat sitä käyttää luotettavasti.

Integrointi koostuu siis kahden eri yrityksen toimintamallien ja rutiinien yhdistämisestä, mikä käytännössä tarkoittaa laitteiston yhteensovittamista ja testausohjelmiston kehittämistä. Lopussa korostuu järjestelmän toimivuudesta varmistuminen, henkilöstön kouluttaminen ja kattava dokumentointi.

4.5.1 Testilaitteisto

Kuvassa 8 on alihankkijan käyttämä automaattinen XYZ-pöytä eli proberi, jolle mittauselektroniikka ja muu laitteisto integroidaan. Kiekkoja ladataan proberille oikealla puolella olevalla hissillä 25 kiekon erissä. Laite lukee kiekolta eräkoodin ja lataa sen vasemmalla puolella olevalle XYZ-tasolle tekemällä automaattikohdistuksen konenäön avulla. Sitä ohjataan isolta kosketusnäytöltä, joka näyttää operaattorille testattaessa kiekkokartan toimivista elementeistä. Laite voidaan ohjelmoida tuotekohtaisesti ja ohjelmat ovat yhteensopivia muiden valmistajan mallien kanssa, minkä ansiosta kehitystyö säilyy hyvin geneerisenä. Proberi osaa käsitellä sekä 6":n että 8":n sahaamattomia kiekkoja. Myös sahattujen kiekkojen käsittely on mahdollista 8":n teippikehyksen avulla. Sahattuja kiekkoja käytetään kulmanopeusanturin lopputestauksessa, mikä mahdollistaa saman laitteen ja ohjelmien hyödyntämisen kuin MEMS-testauksessa. Tällöin on tärkeää, että sahatun kiekon aiheuttamat teippivenymät ja kohdistusvirheet otetaan huomioon testauksen luotettavuuden parantamiseksi. Proberin älykäs konenäkö osaa tunnistaa elementtien tai antureiden muodostamat dislokaatiot ja korreloida tämän XYZ-tasossa liikuttaessa. [24]

Kiekkoa liikutetaan hyvin tarkasti elementti kerrallaan alle mikrometrin tarkkuudella [24]. Tason päällä kuvassa 9 näkyvällä neulakortilla kontaktoidutaan elementille kun pöydän taso nostetaan yläasentoon. Ohuet neulat ovat edelleen yhteydessä SMB-liittimille, joista signaali kulkee kuvassa 10 näkyvälle elektroniikkakortille. Elektroniikkakortin tehtävä on ohjata sekä käsitellä tietokoneen ja elementin välillä liikkuvia mittaussignaaleja. Kortilla tehdään signaalin ilmaisu, vahvistaminen, suodattaminen ja signaalireittien muuttaminen releiden ja kytkimien avulla



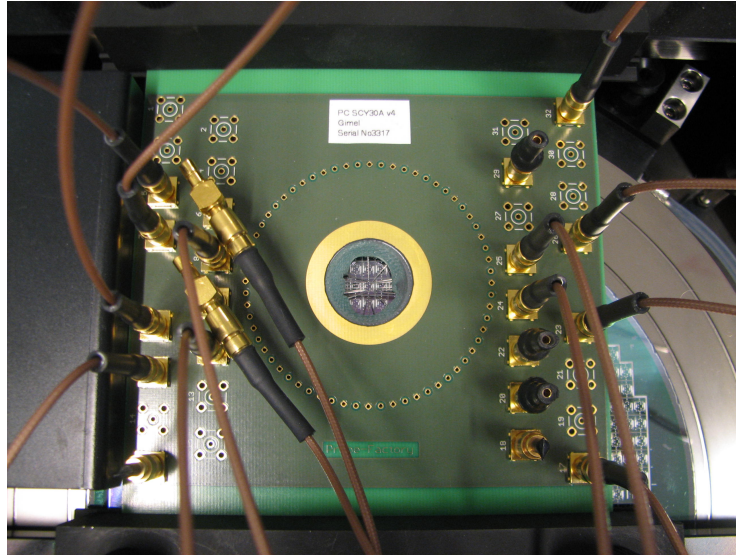
Kuva 8: Alihankkijan käyttämä täysin automatisoitu XYZ-pöytä.

kanavamäärän kasvattamiseksi.

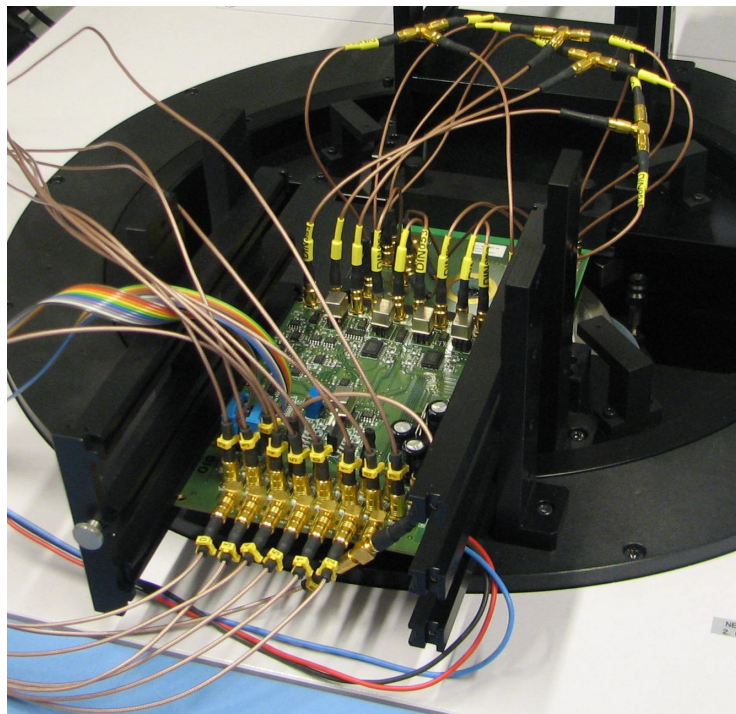
Analogisen signaalin syöttäminen elementille tapahtuu teollisuus-PC:llä olevalla National Instrumentsin NI 6733 DAQ-mittakortilla. Mitattu signaali ja edelleen elektroniikkakortin avulla käsitelty signaali luetaan vastaavasti takaisin tietokoneelle NI 6123 -kortilla. Mittakorttien toiminta-alue on ± 10 V ja resoluutio 16 bittiä. [25], [26] Korttien digitaalikanavien avulla ohjataan elektroniikkakortin releitä ja kytkimiä. PC:llä olevalla GPIB-kortilla ohjataan proberia ja jännitelähdettä, joka tarjoaa käyttöjännitteet elektroniikkakortille.

4.5.2 Testausohjelmisto ja -prosessi

Laitteiston ohjausta ja anturin testausprosessia varten VTI:llä on kehitetty GETS-testausohjelmisto (engl. *General Element Test Software*), jolla ohjataan muun muassa DAQ- mittauskortteja sekä GPIB-väylän toimintaa ja välitetään tietoa operaattorille. Ohjelmisto on suunniteltu National Instrumentsin graafisella LabVIEW-ohjelmointikielellä. Koska alihankkijan laitteisto eroaa päähankkijan laitteistosta, täytyy testusohjelmistoon tehdä sen vaatimat muutokset. Erityisiä vaatimuksia aset-



Kuva 9: Neulakortti, jonka alla näkyy liikutettava kiekko ja anturieleментit.



Kuva 10: Testauksessa käytettävä elektroniikkakortti.

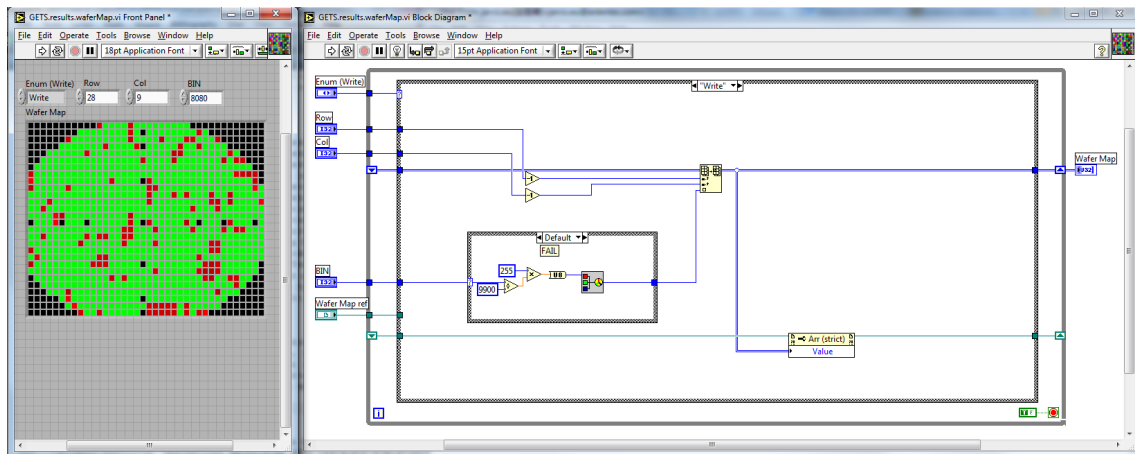
taa myös se, että omaa tietokantaa ei voida enää hyödyntää, mistä testiohjelmat haetaan ja jonne testitulokset lopuksi lähetetään. Tietokannan toiminta korvataan luomalla rajapinta alihankkijan käyttämään MES-tietojärjestelmään (engl. *Manufacturing Execution Systems*), joka toimii alihankkijan materiaalinhallintajärjestel-

mänä. Se sisältää tiedon muun muassa testattavista kiekkoeristä, testausjärjestelmistä ja testiohjelmista. Testiohjelma määrittelee tuotekohtaisesti elementiltä mitattavat parametrit ja kunkin parametrin kritisointirajan. Näiden tietojen avulla voidaan määrittää mitattu elementti hyväksi tai huonoksi.

LabVIEW

LabVIEW-ohjelmointiympäristö (engl. *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) National Instrumentsin kehittämä laajalti teollisuudessa käytettävä työkalu, jonka avulla esimerkiksi mittalaitteiden instrumentointi on pyritty tekemään helpoksi ja nopeaksi. LabVIEWin graafinen ohjelmointikieli on tavalliseen tekstipohjaiseen kieleen verrattuna helpompi oppia, koska käyttäjän ei tarvitse tuntea koodin syntaksia eikä muistaa ulkoa käytettävissä olevia funktioita.

Kuvassa 11 on esitettyä esimerkki LabVIEW-ohjelmoinnista, jossa vasemmalla on ohjelman käyttäjälle näkyvä etupaneeli ja oikealla ohjelmitava lohkokaavio. Lohkokaavio muodostuu muun muassa käytettävistä funktioista, aliohjelmista ja niitä yhdistävistä johdotuksista. Koko ohjelmiston toiminta on hajautettu yksittäisiksi ohjelmiksi, joita kutsutaan VI:ksi (engl. *Virtual Instrument*). Kuvassa näkyvää kiekkokartta-ohjelmaa kutsutaan ylempään tason hierarkiasta jokaisen mittauksen jälkeen siten, että hylätyt elementit näkyvät operaattorille punaisena ja hyväksytyt vihreinä. Mustat pisteet edustavat tyhjiä paikkoja. Kiekkokartan avulla operaattori voi esimerkiksi tunnistaa hylättyjä aluekokonaisuuksia, jotka puolestaan viittaa huonoon kontaktiin tai mittaussitteiston vikaantumiseen.



Kuva 11: Esimerkki LabVIEW-ohjelmoinnista. Ohjelman avulla kiekkokartta näytetään operaattorille.

GETS ja MES

Integroidun testausohjelmiston toimintaa on kuvattu kuvan 12 mukaisella prosessikaaviolla. Operaattori käynnistää GETS-testausohjelmiston, joka hakee MES-järjestelmältä erän testaukseen tarvittavan testiohjelman. Oikeiden testausparametrien

vahvistamisen jälkeen hän asettaa testattavan erän proberiin ja sen ensimmäinen kiekko ladataan testiohjelman avulla mukaisesti. Proberi lukee kiekon tunnusteen ja tekee tarvittavat kohdistukset automaattisesti. Mittalaitteiston initialisoinnin jälkeen testaus alkaa ja tunnusteen mukainen tieto välitetään MES-järjestelmälle. Elementtejä mitataan yksitellen kunnes kaikki on mitattu kerran, minkä jälkeen tulokset lähetetään MES-järjestelmään ja proberille ladataan seuraava kiekko. Testaussekvenssiä jatketaan kunnes kaikki kiekot ovat mitattu. Lopuksi MES-järjestelmälle välitetään tieto erän lopetuksesta, jolloin testausjärjestelmä vapautuu seuraavan erän testaukselle.

Operaattori, MES ja proberi ovat siis alihankkijan vastuulla tuotantoympäristössä. GETS-ohjelmisto, mittalaitteisto ja kokonaisjärjestelmän kehitys ovat päähankkijan vastuulla. Jotta integraation vaatimaa ohjelmistokehitystä voidaan tehdä, täytyy alihankkijan tuotannollisista toimintaperiaatteista olla tarkat spesifikaatiot ja kehitystä tulee tehdä tiiviissä yhteistyössä alihankkijan kanssa. Alihankkijalla voi olla erityisvaatimuksia graafiselle käyttöliittymälle ja sen käytettävyydelle, jotta testausjärjestelmä vastaa kokonaisuutena heidän malliaan.

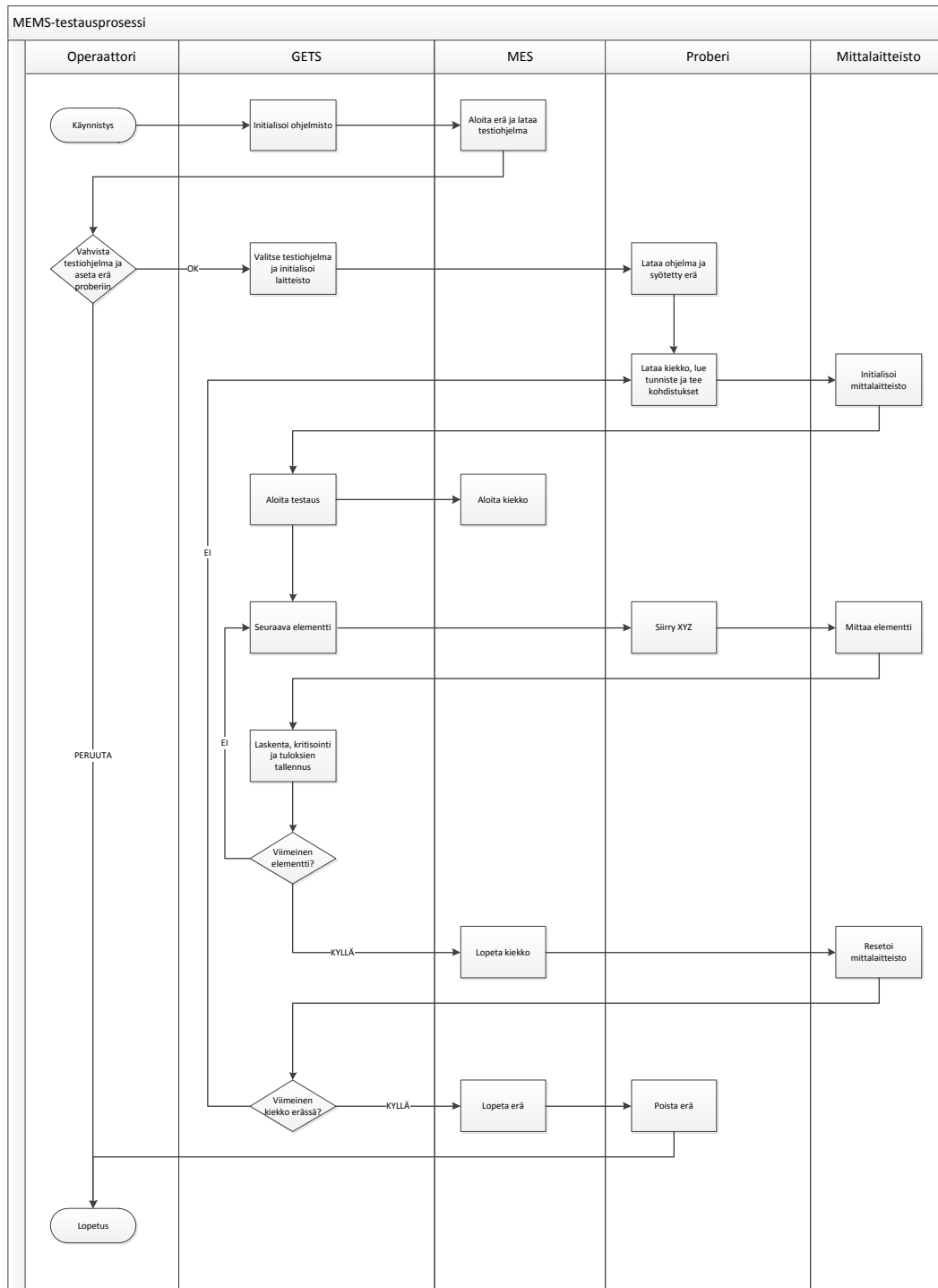
Erityistä huomiota tulee kiinnittää virheiden minimointiin ja niiden käsittelyyn, koska testauksen suorittavalla operaattorilla ei yleensä ole teknillistä koulutusta ja syntyvät virheet eivät ole ulkoistamisen myötä enää hallittavissa. Testauksen aikana syntyviä häiriötilanteita tulisi välttää ja järjestelmän tulisi selviytyä niistä itsenäisesti ilman tulkinnanvaraisuuksia tai kehoitteita käyttäjälle. Tämä asettaa korkean älykkyysvaatimuksen testausohjelmistolle.

Ohjelmiston on syytä olla mahdollisimman hyvin parametrisoitavissa, jotta alihankkija voi tehdä sen toimintaan tarvittavia muutoksia ilman varsinaista ohjelmistokehitystä. GETS-testausohjelmiston kehittäminen vaatii paljon tuntemusta sen toimintaperiaatteista, -rutiineista ja itse LabVIEW-ohjelmoinnista. Alihankkijalla ei ole kompetenssia tähän eikä lähdekoodia kannata jakaa liiketoimintasalaisuuksien ja tietoturvan vaarantumisen takia.

Vikakoodit

Vikojen tunnistamista varten testausohjelmistoon on implementoitu vikakoodi-algoritmi, joka pyrkii luokittelemaan hylätyt elementit kategorioihin. Vikakoodista voidaan suoraan päätellä miksi elementti ei toiminut ja tätä tietoa voidaan hyödyntää aiempien tuotantoprosessien kehityksessä. Tietyt vikakoodit voivat myös viitata mittausjärjestelmän sisäisiin ongelmiin, minkä perusteella operaattori voi päätellä esimerkiksi huonon neulakontaktin ja suorittaa sitä vaativan korjaustoimenpiteen, jotta kiekkosaanto pysyy hyvänä.

Esiintyneitä vikakoodeja voidaan havainnollistaa eri väreillä edellä esitetyssä kiekkokartassa ja Pareto-taulukon avulla. Pareto-taulukko näyttää elementeissä yleisimmin esiintyneet vikakoodit, niiden lukumäärän ja prosenttiosuuden.



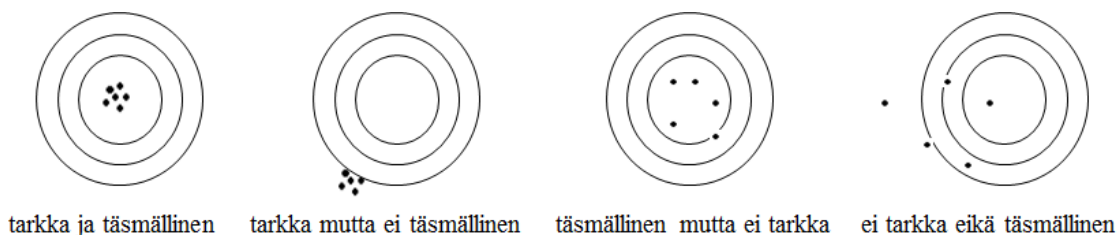
Kuva 12: Testausohjelmiston toiminta.

4.6 Mittausjärjestelmän analyysi ja laadun varmistaminen

Testausjärjestelmän integraation ja tuotantolaitteiden asennuksen jälkeen tulee varmistua järjestelmän toimivuudesta ja toistettavuudesta, jossa osoitetaan, ettei järjestelmän siirto tai ympäristötekijät ole vaikuttaneet sen toimintaan. Alihankkijan tiloihin siirretyn järjestelmän tulee siis olla yhtä kyvykäs kuin aiemmin päähankkijan tiloissa olleen järjestelmän. Myös pitkällä aikavälillä tulee varmistua järjestelmän stabiilisuudesta etenkin, koska se ei ole päähankkijan hallittavissa.

Mittausjärjestelmän analyysi eli MSA (engl. *Measurement System Analysis*) tutkii mittaussysteemin ja datan laatua useilla eri tavoilla. Se sisältää mittalaitteiden karakterisoinnin, mittausten kyvykkyyden selvittämisen sekä mittausjärjestelmän pitkän aikavälin stabiilisuuden tarkkailun. Se on osa teollisuudessa laajalti käytettävää Six Sigma -laadunjohtamistyökalua, jonka avulla etsitään prosessin virheitä mittaamalla ja selvitetään systemaattisesti kuinka niitä voidaan poistaa [27]. MSA kertoo kuinka paljon mittauksessa on vaihtelua ja kuinka paljon mittaus näyttää väärin. Se on erinomainen työkalu kun halutaan verrata kahta tai useampaa mittalaitetta tai mittaajaa toisiinsa. Sitä tulee käyttää osana kriteeriä, jolla hyväksytään uusi mittalaitteisto tuotantoon.

Mittausjärjestelmän aiheuttama virhe voidaan jakaa kahteen eri luokkaan: tarkkuus (engl. *Accuracy*) ja täsmällisyys (engl. *Precision*), jota on havainnollistettu kuvassa 13. Tarkkuus kertoo mitatun tuloksen ja osan todellisen arvon erotuksen, jota mitataan lineaarisuuden, stabiilisuuden ja bias-virheen eli poikkeaman avulla. Bias-virhe on todellisen ja mitatun arvon keskimääräinen erotus, joka saadaan mittaamalla jotain tunnettua referenssiä ja se tutkitaan yleensä kalibroinnilla. Lineaarisuus määritellään bias-virheen muutoksella koko mittaalueella. Stabiilisuudesta kertoo tilastollinen kontrolli ja siinä näkyvät poikkeamat, jotka ovat bias-virheen muutosta ajan kuluessa.

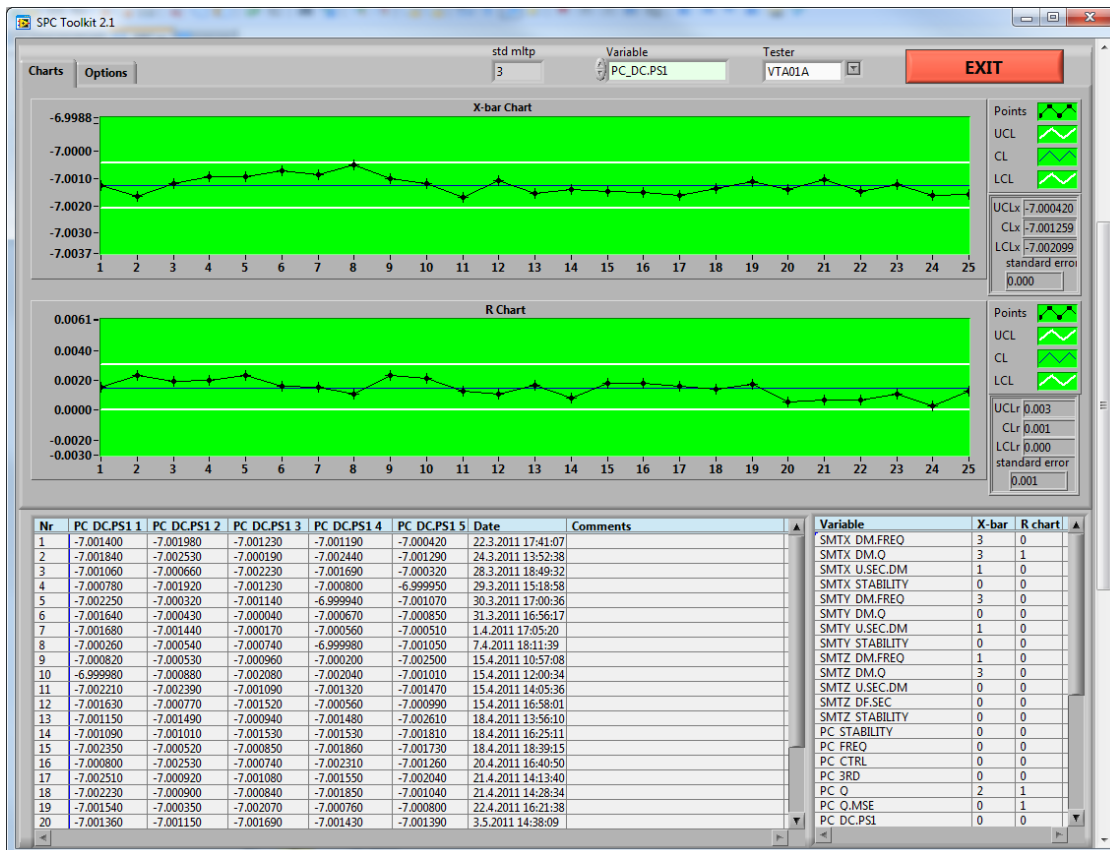


Kuva 13: Mittausjärjestelmän aiheuttama virhe.

4.6.1 SPC-menetelmä

Yleinen tapa stabiilisuuden määrittämiseen on tehdä SPC:n (engl. *Statistical process control*) mukainen kontrollimitaus, jossa mitataan referenssiosaa 3 – 5 kertaa säännöllisin väliajoin, esimerkiksi päivittäin. Tilastollista vaihtelua voidaan tutkia esimerkiksi $\bar{x} - R$ -kuvaajan avulla, josta esimerkki kuvassa 14. Sen ylempi kuvaaja näyttää tuloksen keskiarvon hajonnan ajan funktiona ja alempi kuvaaja mittauksen

sisäisen vaihtelun ajan funktiona. Ohut sininen viiva kuvaa koko näytejoukon keskiarvoa (CL, engl. *Control Limit*) ja valkoiset viivat kuvaavat $\pm 3\sigma$ kontrollirajoja (UCL/LCL, engl. *Upper/Lower Control Limit*). Kuten kuvasta näkee, esimerkkiprosessi on hyvin kontrollissa, koska kontrollirajan ylityksiä ole esiintynyt viimeisten 25 mittauksen aikana. SPC siis hälyttää esiintyvistä ylityksistä ja niihin tulee reagoida välittömästi. Esiintyneille poikkeamille on löydettävä aiheuttamat syyt ja eliminoitava ne, jotta tuotantoa voidaan jatkaa normaalisti. Menetelmää soveltaen SPC-työkalun avulla tuotantoon on luotu ns. Poka Yoke, joka estää testauksen viallisella laitteistolla [27].

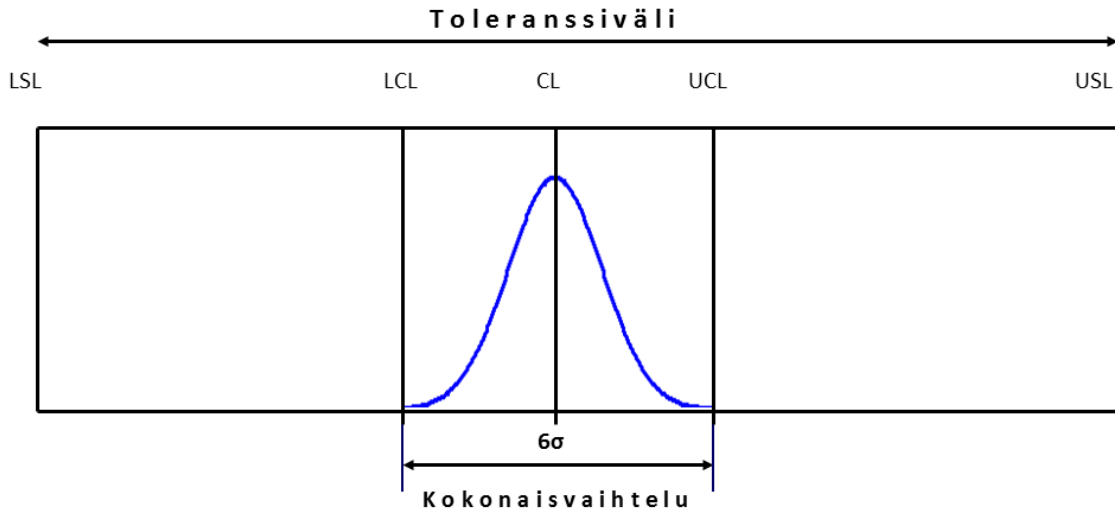


Kuva 14: LabVIEW:llä ohjelmoitu tuotannon SPC-työkalu, jossa $\bar{x} - R$ -kuvaaja.

Prosessivaihtelun aiheuttamaa satunnaisvaihtelua voidaan kuvata normaalija-kaumalla niin kauan kunnes vaihtelun aiheuttavat satunnaiset syyt. Tällöin tulokset ovat tilastollisesti ennustettavissa ja yksittäiset mittaustulokset osuvat 99.73 % varmuudella ± 3 sigman rajojen sisäpuolelle. Jos tulos osuu ulkopuolelle, oletetaan, että jokin erityinen, ei-normaali tekijä on vaikuttanut asiaan, jolloin prosessi ei ole enää hallinnassa. SPC perustuu kyseisen vaihtelun seurantaan eli se tutkii erityyppisiä, joiden tilastollinen todennäköisyys on pieni.

Kontrollirajoja ei tule sekoittaa asiakkaan tuotespesifikaation asettamiin hylkäysrajoihin (USL/LSL, engl Upper/Lower Specification Limit). Kontrollirajat kertovat

vain prosessin ja mittalaitteen vaihtelusta, joka pyritään asettamaan toleranssivälin keskelle, kuten kuvasta 15 käy ilmi. Parametrien vaihteluun voidaan vaikuttaa tuotantoprosessia säätämällä, mikä edellyttää Six Sigman mukaisia kattavia koesuunnitteluja (DOE, engl. *Design of Experiments*).



Kuva 15: Testattavien parametrien toleranssiväli ja kokonaisvaihtelu.

4.6.2 Gage R&R -menetelmä

Täsmällisyys kertoo mittaustuloksen vaihtelun, joka voidaan erotella mittalaitteesta aiheutuvaksi vaihteluksi eli toistettavuudeksi (engl. *Repeatability*) ja mittaajasta aiheutuvaksi vaihteluksi eli uusittavuudeksi (engl. *Reproducibility*). Tällaista lyhyellä aikavälillä tapahtuvaa muutosta voidaan tutkia Gage R&R:n avulla, joka kertoo mitausjärjestelmän kyvykkyyden. Gage R&R -analyysiä varten mitataan vähintään 15 toimivaa ja stabiilia osaa, joiden vaihteluväli peittää mittaussparametrien toleranssivälin. [27] Mittaustuloksien perusteella voidaan päätellä parametrikohtaiset varianssikomponentit, jotka edelleen analysoidaan esimerkiksi ANOVA-menetelmällä (engl. *Analysis of variance*).

ANOVA-menetelmä

ANOVA-menetelmässä mitattavien osien varianssi jaetaan neljään kategoriaan, joita ovat mittalaitteiston varianssi τ^2 , arvioijien varianssi ω^2 , osien ja arvioijien välisen vuorovaikutuksen varianssi γ^2 sekä osien välinen varianssi σ^2 . Mittaustulosten komponenttikohtaisten vapausasteiden määrällä laskettujen neliökeskiarvojen MS_P , MS_A , MS_{AP} ja MS_E perusteella muodostetut varianssikomponenttien estimaatit on esitetty yhtälöissä 1–4, jossa n on osien määrä, k arvioijien määrä ja r toistojen määrä.

$$\tau^2 = MS_E \quad (1)$$

$$\gamma^2 = \frac{MS_{AP} - MS_E}{r} \quad (2)$$

$$\omega^2 = \frac{MS_A - MS_{AP}}{nr} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{MS_P - MS_{AP}}{kr} \quad (4)$$

Mitattavan kohteen kokonaisvaihtelu on tällöin muotoa

$$GRR = k\sqrt{\tau^2 + \gamma^2 + \omega^2}, \quad (5)$$

missä k on mittaukselta edellytetyn luottamustason määräämä standardipoikkeaman kerroin. ANOVA-menetelmä on perinteisempiä Gage R&R -menetelmiä tarkempi ja sen avulla on mahdollista saada mitattavasta kohteesta enemmän tietoa kuten osien ja arvioijien välinen vuorovaikutus. ANOVA-menetelmä on laskennallisesti työläs, mutta se on helppo suorittaa tietokoneella esimerkiksi MiniTab[®] -ohjelmalla [27].

Gage R&R -tulosten tulkinta

Gage R&R -menetelmällä mitattujen varianssikomponenttien avulla voidaan määrittää NDC-luku (engl. *Number of Distinct Categories*), joka kertoo mittauksella tilastollisesti toisistaan erotettavien alaluokkien lukumäärän. Kun luottamustasoksi valitaan 97 % saadaan NDC kaavasta 6, jonka tulos pyöristetään aina pienimpään kokonaislukuun.

$$NDC = 1,41 \frac{\sigma}{GRR} \quad (6)$$

Mittausten kyvykkyys jaetaan GRR-lukeman ja kuvassa 15 havainnollistetun toleranssivälin TOL perusteella tavallisesti kolmeen luokkaan, jotka on esitelty taulukossa 1. Lisäksi NDC-luvun pitää olla vähintään 5, jotta mittauksen kyvykkyys voidaan todeta riittäväksi [27].

Taulukko 1: Gage R&R -tulosten luokittelu.

| $\frac{GRR}{TOL}$ | Määritelmä |
|-------------------|--|
| < 10 % | Mittaus on kelvollinen |
| 10 % - 30 % | Mittaus on hyväksyttävissä tapauskohtaisesti |
| > 30 % | Mittaus ei ole kelvollinen |

4.6.3 Muutosten hallinta ja korrelaatiotutkimus

Alihankkijan tulee selvittää mahdollisimman itsenäisesti ongelmatilanteista, jotta tuotanto pysyy jatkuvana ja koska kalliiden laitteiden seisottaminen pitkään kasvattaa kustannuksia. Tätä varten alihankkijalla tulee olla tarvittavat keinot ja ohjeistus tilanteesta riippumatta. Edellä mainittu SPC-menetelmä soveltuu tuotannon jatkuvan laadun varmistamiseen. Gage R&R -menetelmä puolestaan sopii hyvin päähankkijan tutkimusten tekemiseen esimerkiksi testausjärjestelmän päivitysten yhteydessä mutta se ei ole tuotannollinen menetelmä, jota alihankkijan tulisi käyttää.

Koska alihankkija tarjoaa testauspalvelua usealle eri päähankkijalle, sen tulee adaptoitua tuotantovaatimuksiin, mikä tarkoittaa käytännössä testausjärjestelmän jatkuvaa vaihtelua. Voi hyvinkin olla mahdollista, että tiettyä tuotetta tarvitsee testata vain viikon ajan, minkä jälkeen tuotantolinjaan täytyy jälleen tehdä muutos.

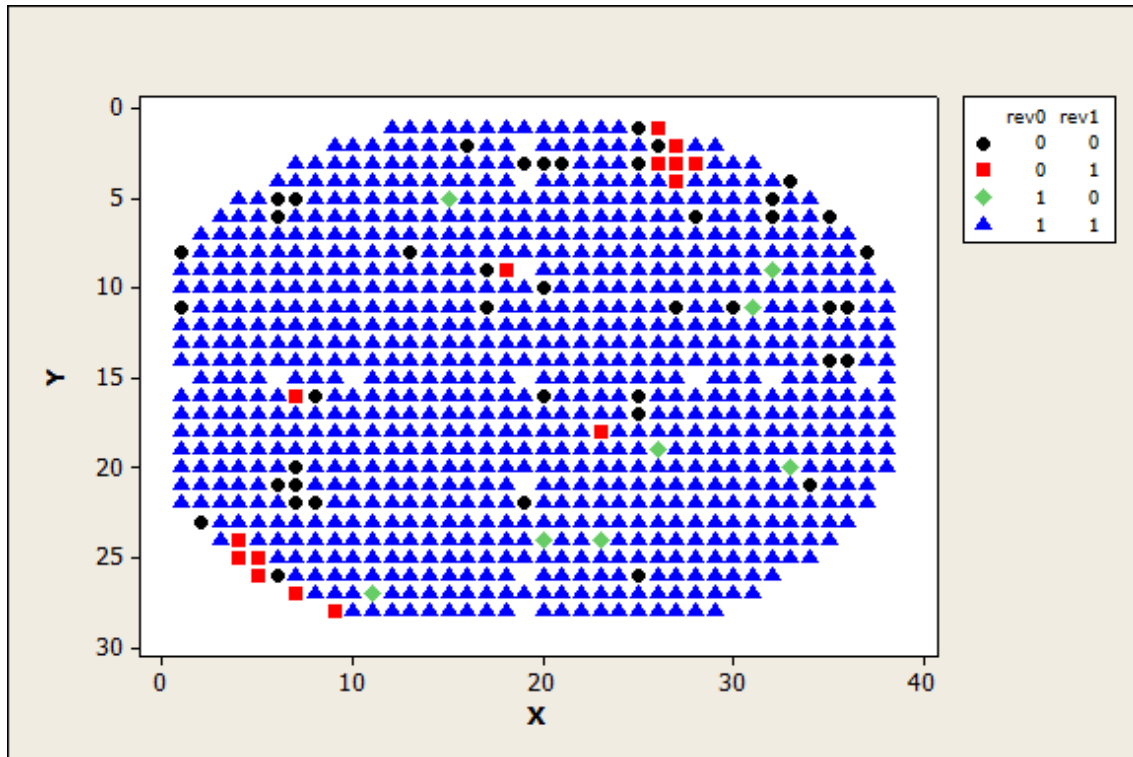
Päähankkija voi myös haluta tehdä järjestelmään ECN:n (engl. *Engineering Change Notice*) mukaisia muutoksia, minkä jälkeen täytyy varmistua monimutkaisen laitteiston toimivuudesta ilman kattavaa mittausjärjestelmän analyysiä. Tätä varten alihankkijan voi tehdä itsenäisesti korrelaatiotutkimuksen, jossa se yksinkertaisesti vertaa testattavan kiekon saantoa muutosta edeltävään tilanteeseen. Jos kiekon saanto pysyy esimerkiksi 99 prosenttisesti samana, voidaan tilastollisesti todeta, että järjestelmä toimii samalla tavalla kuin ennen muutosta. Odotetun korrelaatio-prosentin määrää järjestelmän kokonaisykyvykkyys.

Korrelaatiotuloksissa ei kuitenkaan riitä pelkän saannon tutkiminen, koska voi hyvinkin olla että osa elementeistä on muuttunut testien välillä hyvästä huonoksi ja huonosta hyväksi. Alihankkijan tulee siis myös tutkia kiekon yksittäisten elementtien vikakoodeja, josta esimerkki kuvassa 16. Kuvan punaiset alueet kuvaavat tilanteita, joissa huonot elementit ovat muuttuneet hyväksi testien rev0 ja rev1 välillä kun taas vihreät yksittäiset elementit ovat satunnaissyiden takia muuttuneet hyvistä huonoiksi. Sen sijaan mustat elementit ovat pysyneet huonoina ja siniset hyvinä. Kuva vastaa tilannetta, jossa mittausohjelmistoon on tehty parannus, jolloin punaisten elementtien määrän tulee olla isompi kuin vihreiden.

Korrelaatiotuloksiin vaikuttaa järjestelmän kyvykkyys, joka tutkittiin mittausjärjestelmän analyysillä. Mitä parempi mittauskyvykkyys järjestelmällä on, sitä paremmin tuloksien tulisi korreloida keskenään. Tuloksien erot selittyvät satunnaishäiriöillä ja ulkoisilla häiriöillä. Elementin parametriarvojen ollessa lähellä hylkäysrajaa, voi hyvä/huono -tulos riippua mittauskerrasta hyvinkin paljon.

Korrelaatiotuloksella on myös mahdollista tunnistaa vikakoodien muuttumisen muodostamia trendejä kiekon yli. Jos esimerkiksi kiekon oikealla laidalla hyvät elementit ovat muuttuneet huonoiksi, tiedetään että toisella mittauskerralla neulakontakti on todennäköisesti ollut huono. Tämän tiedon avulla laitteiston toiminnasta tulee varmistua ennen kuin tuotantoa voidaan jatkaa.

Korrelaatiotutkimusta voidaan myös hyödyntää uusien testausjärjestelmien asennuksessa. Kun päähankkija haluaa kasvattaa testauskapasiteettia, toimittaa hän alihankkijalle tarvittavan laitteiston asennettavaksi. Korrelaatiotutkimuksen avulla nähdään toimiiko järjestelmä kuten aiemmat vai pitääkö sille suorittaa kattavampi analyysi eroavaisuuksien selittämiseksi.



Kuva 16: Elementtien vikakoodien korrelaatio kiekon yli, jossa 0=huono ja 1=hyvä.

4.6.4 Laadun hallinta

Alihankkijan tuotannon häiriötilanteessa tiedon täytyy välittyä päähankkijalle ilman viiveitä, jotta ongelma saadaan korjattua nopeasti. Tätä varten päähankkijan tulee pystyä seuraamaan informaatio- ja materiaalivirtaa lähes reaaliaikaisesti esimerkiksi Internet-sivun avulla, johon välittyy tietoa suoraan alihankkijan tietokannasta. On hyvin tärkeää, että päähankkija pystyy seuraamaan esimerkiksi kiekkosantoja ja -karttoja sekä niiden yleisimpiä vikakoodeja, koska poikkeavat trendit viittaavat suoraan tuotannon aiempien osaprosessien laadun vaihteluun. On tärkeää, että alihankkija raportoi SPC- ja korrelaatiotuloksista suoraan päähankkijalle säännöllisin välein. Jos tiedonkulkuun tuhlataan liikaa aikaa voi olla mahdollista, että aiemmista osaprosesseista ehtii mennä läpi hukkatavaraa, mikä aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia ja vaarantaa tuotteen saatavuuden.

Erityisesti järjestelmän päivityksiä ja muutoksia tehdessä on tärkeää, että järjestelmän mittauseräparametrit ja asennustiedostot sijaitsevat keskitetysti yhdessä paikassa. Tiedon kahdentuessa sen eheys ja samalla tuotannon laatu vaarantuu. Tätä varten alihankkijan ja päähankkijan välille on luotu kehitystyötä tukeva yhteinen Internet-portaali, josta löytyvät viralliset dokumentit, parametrit, ohjelmistot ja muut yhteistyötä tukevat tiedot.

Laatujärjestelmävaatimuksia ja yhteisten sopimuksien täyttymistä voidaan arvioida auditoinnin avulla. Auditointi on objektiivinen arviointi sen havaitsemiseksi

onko kohteelle asetetut vaatimukset täytetty. Se koostuu kenttäkynneistä, haastatteluista ja tutustumisesta alihankkijan tuotantoprosesseihin ja työohjeisiin. Auditoinnin avulla voidaan kehittää tuotannon laatua paneutumalla yhdessä todettuihin epäkohtiin tai puutteisiin. [27]

5 Ulkoistamisprojektin lopputulos ja jatkokehitys

Testausjärjestelmä siirrettiin onnistuneesti alihankkijan tiloihin ja integroitiin heidän tietojärjestelmäänsä siten, että järjestelmä vastaa heidän muita testauslaitteistoja. Vastuu testauksesta siirrettiin alihankkijalle, minkä lisäksi toiminta linkitettiin muista alihankkijoista koostuvaan tuotantoverkostoon. Testaushenkilöstö koulutettiin ohjelmiston käyttöön ja laitehuollolle kerrottiin kuinka ongelmatilanteista tulisi selviytyä. Mittausjärjestelmä analysoitiin ja mittaustuloksia verrattiin ulkoistavan yrityksen omiin tuloksiin. Näin varmistuttiin, että järjestelmä toimii tilastollisesti samankaltaisesti ja tarpeeksi luotettavasti ulkoistamisesta huolimatta. Tämän jälkeen varsinainen ulkoistamisprojekti saatiin päätökseen ja ulkoistavan yrityksen henkilöstö siirtyi tuotannon jatkuvaan kehittämiseen ja tukemiseen.

Koska projekti on hyvin tuore ja tuotanto on vielä ylösajo-vaiheessa, tulokset eivät ole täysin kattavia ja on mahdoton ennustaa miten ulkoistamisprojektin todelliset riskit ja hyödyt tulevat toteutumaan. Tähänastiset tulokset kuitenkin antavat suuntaa tuleville ulkoistamisprojekteille.

5.1 Yhteistyön kuvaus

Kuten edellisessä luvussa jo lyhyesti kerrottiin, aasialainen alihankkija toimitti heidän käyttämänsä XYZ-pöydän päähankkijalle kehitettäväksi, mikä osoittautui hyväksi ratkaisuksi. Näin kehittäjä pystyi tutustumaan täysin automatisoidun XYZ-pöydän toimintaan ja kokonaisjärjestelmä voitiin kehittää mahdollisimman tuotannolliseksi. Koska kyseistä laitetta tultiin käyttämään myös lopputestauksen osaprosessissa, voitiin kyseistä ulkoistettavaa prosessia kehittää MEMS-testauksen rinnalla.

Koska laite oli kehittäjälle uusi, sen toimintaan liittyi paljon haasteita. Tässä korostui laitetoimittajan maailmanlaajuisen teknisen tuen tärkeys ja toimivuus, mikä onneksi toimi hyvin. Kehitystyötä olisi todennäköisesti nopeuttanut paljon alihankkijan kehitysapu, joka olisi vaatinut heidän läsnäolon Suomessa. Tämä olisi vaatinut heiltä henkilöstöresursseja ja olisi nostanut kehityskustannuksia mutta näin järjestelmä olisi saatu todennäköisesti nopeammin valmiiksi. MEMS-testaus ei kuitenkaan ollut kokonaisprojektin kriittisellä polulla, joten pidentynyt kehitysaika ei viivästyttänyt tuotteen markkinoille pääsyä.

Jotta järjestelmä pystyttiin kehittämään lopullisen tuotannon tarpeita vastaavaksi, alihankkija toimitti sen toiminnan kannalta oleelliset spesifikaatiot lähinnä heidän tietojärjestelmäänsä liittyen, mikä osoittautui riittämättömäksi. Tarkempien ohjelmistospesifikaatioiden lisäksi Suomessa tapahtunut kehitystyö olisi vaatinut tiiviimmän yhteistyön alihankkijan kanssa, jotta testausohjelmisto olisi saatu heti alusta vastaamaan lopullista toimintaa. Laitteiston Aasiaan siirron jälkeen ohjelmiston toiminnassa kävi ilmi monta puutetta ja väärin toteutettua toimintaa. Tästä syystä päähankkijan kehityshenkilöstön resursseja jouduttiin lisäämään siirron yhteydessä. Ongelma olisi todennäköisesti voitu jälleen välttää alihankkijan läsnäololla kehityksen alkuvaiheessa Suomessa. Kuitenkin ottaen huomioon jälleen kokonaisprojektin aikataulu, ei tästä olisi välttämättä ollut hyötyä. Kehittäjällä oli myös hyvin

niukasti aikaa ohjelmiston kehitykseen laitteen uutuuden ja ongelmien takia, joten alihankkijan läsnäolosta tässä vaiheessa ei olisi välttämättä ollut oleellista hyötyä.

MEMS-testauksen ulkoistaminen vaati myös johtajien tiukkalinjaista koordinaointia, jotta yhteistyökumppanit pysyivät projektin yhteisymmärryksessä ja samoissa tavoitteissa. Käytetyn yhteistyömallin ja tiiviin yhteistyön avulla mahdollistettiin tuotannon nopea ylösaajo.

5.2 Mittaustulokset

5.2.1 Testausaika

MEMS-testauksen ulkoistamisella pystyttiin laskemaan anturielementin testausaika alihankkijan täysin automatisoidun XYZ-pöydän ansiosta. Laitteeseen pystytään lataamaan yhteensä 25 kiekkoa kerrallaan. Sen lisäksi laite tekee kiekkojen latauksen, kiekon tunnusteen lukemisen ja kohdistamisen itsenäisesti. Ulkoistavalla yrityksellä ei ole käytössään vastaavaa automatisoitua laitteistoa, vaan sen sijaan jokainen kiekko pitää ladata yksitellen käsin. Pelkkä kiekon manuaalinen lataaminen kestää noin 10 minuuttia. Lisäksi viiveitä syntyy seuraavan kiekon latauksen yhteydessä, koska harvoin operaattori on heti valmiina kun edellisen kiekon testaus on päättynyt. Operaattorin reagointiajaksi voidaan arvioida noin 10 minuuttia. Päähankkijalla reagointiaika joudutaan ottamaan huomioon joka kiekon latauksen yhteydessä mutta alihankkijalla tämä tapahtuu vain 25 kiekon välein. Automatisoidulla laitteistolla kiekon lataus kestää noin puoli minuuttia. Konenäön avulla automatisoitu kohdistus parantaa myös testauksen luotettavuutta, koska käsin tehdyssä kohdistuksessa voi tapahtua operaattorivirheitä, jotka saattavat aiheuttaa heikon kontaktin kiekon ja neulakortin välille.

Taulukossa 2 on esitettyä yhden kiekon testaukseen kulutettu aika ja niiden suhteellinen osuus pää- ja alihankkijalla. Automaattilaitteiston ansiosta testauksessa säästetään noin 10 % ajassa verrattuna päähankkijan laitteistoon, mikä tuo huomattavia säästöjä testauksessa etenkin testausvolyymien ollessa suuri. Jatkokehityksenä mittaukseen käytettävää aikaa on tarkoitus pienentää moninkertaisesti, jolloin lataukseen ja reagointiin käytettävän ajan merkitys kasvaa edelleen.

Taulukko 2: Yhden kiekon testaukseen käytettävät ajat ja niiden suhteet pää- ja alihankkijalla

| | VTI | Alihankkija |
|----------------------------------|-----|-------------|
| Latausaika (min) | 10 | 0.5 |
| Reagointiaika (min) | 10 | 0.4 |
| Mittausaika (min) | 180 | 180 |
| Yhteenlaskettu testausaika (min) | 200 | 180.9 |
| Suhteellinen testausaika (%) | 100 | 90.45 |

5.2.2 Gage R&R -tulokset

Siirretyn testausjärjestelmä toistettavuus ja uusittavuus varmistettiin Gage R&R -menetelmällä, jossa verrattiin mittaustuloksia ennen ja jälkeen siirron. Analyysiä varten valittiin 25 stabiilia osaa, joiden vaihteluvälillä pyrittiin peittämään mittaustulosten parametrisoitamat varianssikomponentit analysoitiin ANOVA-menetelmällä. Mittaukset tehtiin samalla kokoonpanolla elektroniikka- ja neulakortit mukaan lukien.

Taulukossa 3 on esitetty Gage R&R -menetelmän tulokset mittauksen olennaisimmille parametreille. Mittausjärjestelmän kokonaisvaihtelu $\frac{GRR}{TOL}$ on kaikkien parametrien osalta riittävän pientä. Erityisen pientä vaihtelua esiintyy primääri- (PC.FREQ) ja sekundääriresonanssien taajuuden (SMTX.FREQ, SMTY.FREQ ja SMTZ.FREQ) mittauksessa. Vaihtelu on myös pientä primääri- (PC.Q) ja sekundääriresonanssien Q-arvon (SMTX.Q ja SMTY.Q) mittauksessa Z-kanavaa (SMTZ.Q) lukuun ottamatta. Sen mittauksessa tiedetään olevan ongelma sovituskäyrän muodostamisessa, mikä aiheuttaa Q-arvon vaihtelun. Tämä nähdään myös osien ja arvioijien välisen vuorovaikutuksen korkeana varianssina $\frac{\gamma}{TOL}$. Mittaukseen on jo kehitetty paranneltu algoritmi, joka korjaa havaitun ongelman.

Kvadratuurisignaalit lasketaan usean parametrin avulla, jolloin laskentaparametrien varianssi kumuloiduu parametreille CALC-QS-X, CALC-QS-Y ja CALC-QS-Z. Tämä nähdään mittalaitteen heikentyneenä toistettavuutena ja uusittavuutena, jotka silti ovat sallitulla tasolla.

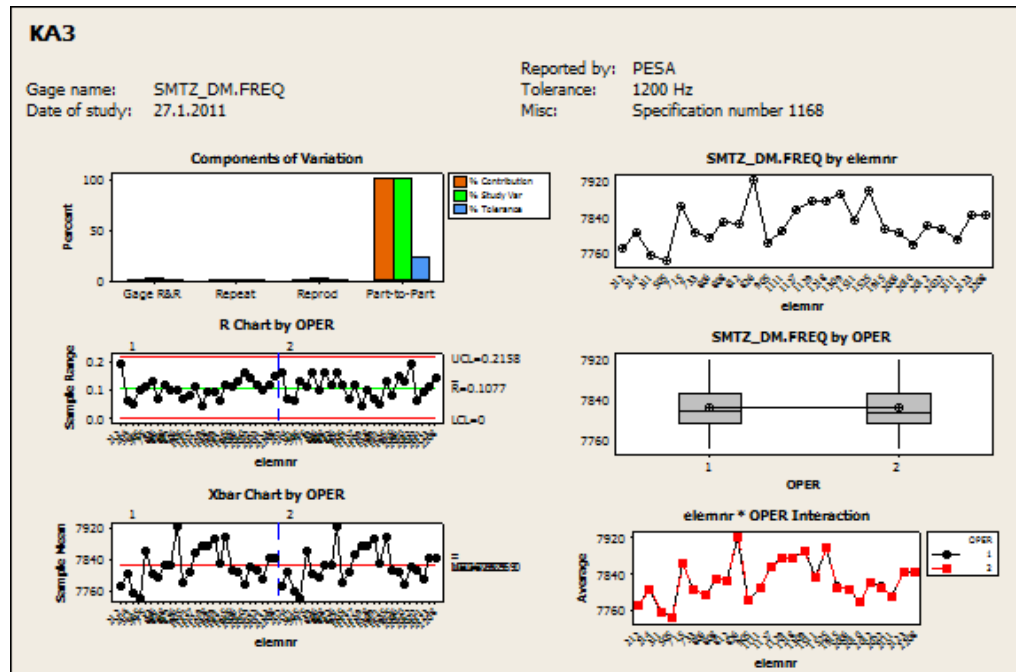
Tuloksista nähdään myös että arvioijien varianssi $\frac{\omega}{TOL}$ on kvadratuurisignaalin laskentaa lukuunottamatta lähes olematonta, mikä tarkoittaa että mittausjärjestelmän siirto itsessään ei ole aiheuttanut lisää hajontaa. Sen sijaan uusittavuutta heikentää osien ja arvioijien välisen vuorovaikutuksen varianssi. Kokonaisvaihteluun vaikuttaa myös mittalaitteiston aiheuttama varianssi eli toistettavuus.

NDC-luvuista nähdään, että kaikki parametrit pystytään mittaamaan hyvin kyvykkäästi, erityisesti Z-akselin sekundääriiliikkeen resonanssitaajuus (SMTZ.FREQ).

Taulukko 3: Oleelliset Gage R&R -tulokset.

| Parametri | TOL | $\frac{GRR}{TOL}$ (%) | $\frac{\tau}{TOL}$ (%) | $\frac{\omega}{TOL}$ (%) | $\frac{\gamma}{TOL}$ (%) | NDC |
|-----------|---------|-----------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----|
| SMTX.FREQ | 2000 Hz | 1.68 | 0.07 | 0.00 | 1.68 | 11 |
| SMTY.FREQ | 1500 Hz | 1.65 | 0.08 | 0.00 | 1.43 | 10 |
| SMTZ.FREQ | 1200 Hz | 0.21 | 0.02 | 0.00 | 0.21 | 148 |
| PC.FREQ | 800 Hz | 2.24 | 0.90 | 0.00 | 2.05 | 18 |
| SMTX.Q | 225 | 2.02 | 1.14 | 0.45 | 1.61 | 19 |
| SMTY.Q | 225 | 2.93 | 1.14 | 0.00 | 2.70 | 22 |
| SMTZ.Q | 1800 | 9.92 | 2.05 | 0.00 | 9.70 | 10 |
| PC.Q | 10000 | 4.36 | 4.36 | 0.00 | 0.00 | 18 |
| CALC-QS-X | 6000 | 10.30 | 5.26 | 5.31 | 7.09 | 12 |
| CALC-QS-Y | 6000 | 8.20 | 4.70 | 4.17 | 5.28 | 16 |
| CALC-QS-Z | 6000 | 5.75 | 2.64 | 3.95 | 3.23 | 10 |

Esimerkkinä erityisen hyvästä Gage R&R -tuloksesta kuvassa 17 on Z-akselin sekundääriliikkeen resonanssitaajuuden tarkempi Gage R&R -analyysi, josta myös voidaan todeta hyvin pieni Hertzin kymmenesosan vaihtelu. Mittauskertojen keskiarvon välillä ei ole myöskään poikkeamaa eli biasta.

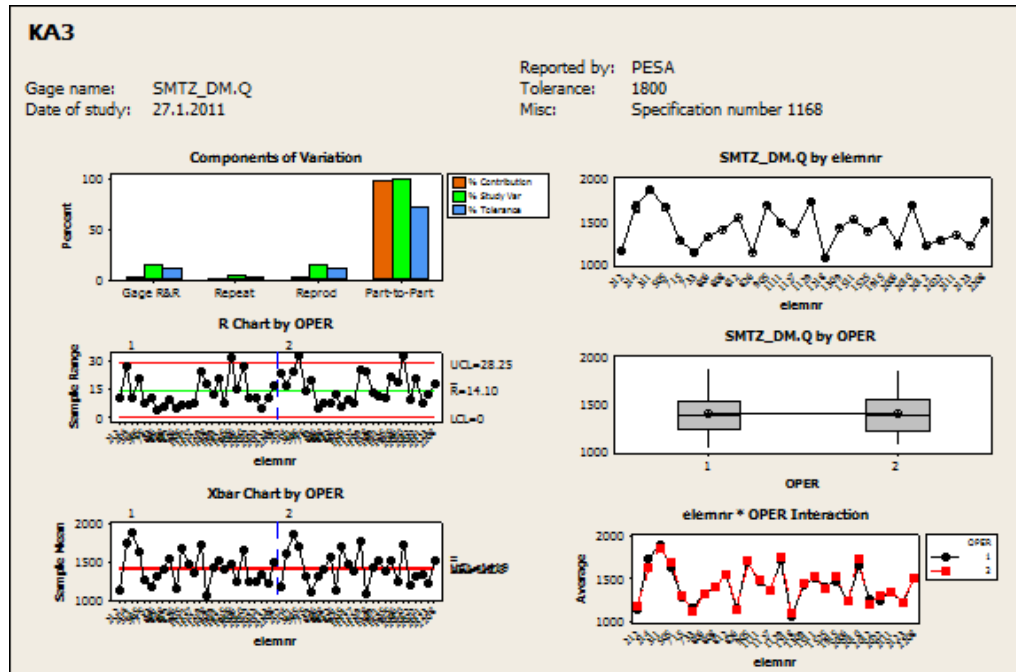


Kuva 17: Z-akselin sekundääriliikkeen resonanssitaajuuden (SMTZ.FREQ) Gage R&R -analyysi.

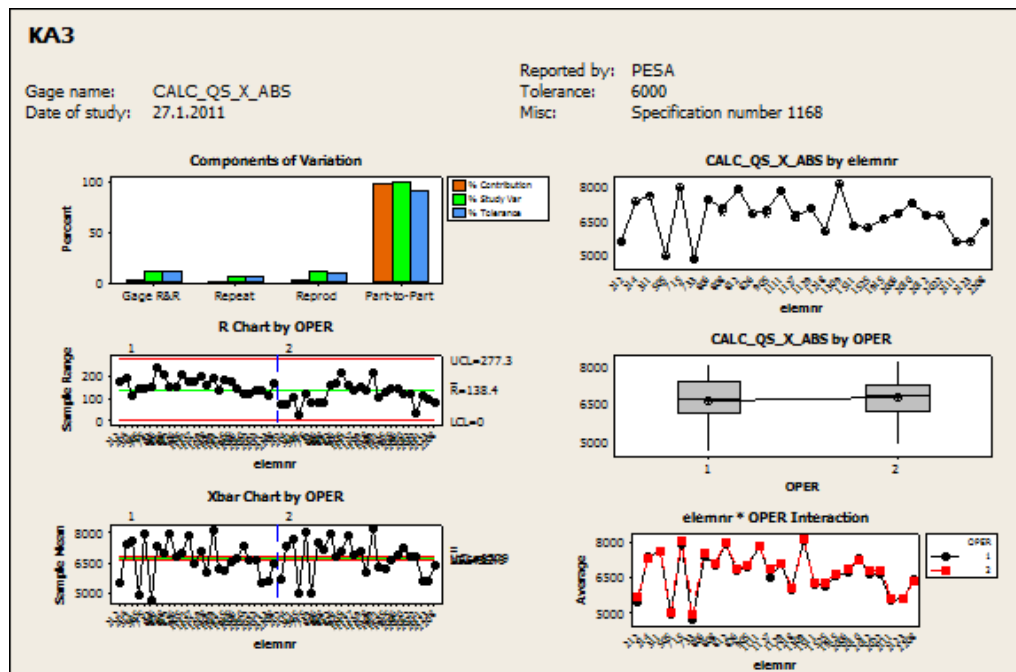
Mittauskerrat ovat jaettuna kahteen, josta kuvaajissa käytetään termiä OPER. Numero 1 viittaa päähankkijalla mitattuun arvoon ja numero 2 alihankkijalla mitattuun arvoon. Elemnr puolestaan kertoo näytteen eli osan. Mittauksen toistettavuus nähdään kuvaajasta R Chart by OPER, jossa kaikkien arvojen tulee olla ohjausrajojen sisällä. Uusittavuus, eli tässä tapauksessa eri sijaintien aiheuttama mittauksen keskiarvojen erosta johtuva vaihtelu, nähdään kuvaajasta Xbar Chart by OPER, jonka ohjausrajat ovat laskettu R Chartin vaihtelusta, ei näytteistä. Ohjausrajojen välin suuruus kuvaa mittalaitteen vaihtelun määrää, jossa tulokset voivat olla satunnaisia eikä niihin voi luottaa.

Kuvassa 18 on esimerkki huonommasta Gage R&R -tuloksesta. Siitä nähdään aiemmin todettu Z-akselin sekundääriliikkeen Q-arvon vaihtelu, joka muodostuu osien ja sijainnin välisestä vuorovaikutuksen varianssista. Mittauskertojen keskiarvon välillä ei kuitenkaan esiinny biasta.

Kuvassa 19 on toinen esimerkki huonosta Gage R&R -tuloksesta. Siitä nähdään, että X-akselin kvadratuurisignaalin toistomittauksen vaihtelu on melko suurta molemmilla mittauskerroilla, jonka lisäksi niiden keskiarvojen välillä esiintyy pieni bias, koska toisella mittauskerralla saadaan hieman suurempia arvoja. Vaihtelu on kuitenkin riittävän pientä verrattuna parametrin toleranssiarvoon.



Kuva 18: Z-akselin sekundääriiliikkeen Q-arvon (SMTZ.Q) Gage R&R -analyysi.



Kuva 19: X-akselin kvadratuurisignaalin (CALC-QS-X) absoluuttiarvon Gage R&R -analyysi.

5.3 Saavutettu hyöty

Mittaustulokset osoittivat, että MEMS-testauksen ulkoistamisen hyötynä oli testauksen nopeutus ilman, että alihankkijan testauksen kyvykkyys tilastollisesti erosi päähankkijan prosessista. Alihankkijan raportoimat SPC-tulokset ovat osoittaneet järjestelmän stabiilisuuden pidemmällä aikavälillä. Testauksen luotettavuuden voidaan myös olettaa paranevan käytettävän automaattilaitteiston ansiosta, mikä vähentää operaattorivirheen aiheuttamaa riskiä. Koska alihankkijalla on suuri tuotantokapasiteetti, voidaan tuotemäärän volyyymiä kasvattaa ja vähentää sen kysyntää vastaavalle tasolle. Tämän lisäksi tuotannon kustannusrakenne muuttui päähankkijalle sopivammaksi, jolloin kiinteät kustannukset muuttuivat muuttuviksi kustannuksiksi. Näin taloudelliset ja muut tuotantoon liittyvät riskit pystyttiin jyvittämään alihankkijalle. Päähankkija säästy myös suurilta investointikustannuksilta ja siihen liittyviltä riskeiltä.

Kulmanopeusanturin MEMS-testaus ja muu tuotanto onnistuttiin siirtämään tuotantoverkoston muodostaville alihankkijoille, jonka ansiosta yrityksen ydintoiminta ei häiriintynyt. Edullisten tuotantokustannusten ansiosta tuotteen myyntihinta pystyttiin määrittelemään mahdollisimman houkuttelevaksi. Alihankkijoiden keskinäisen toiminnan ansiosta vastuu tuotteeseen liittyvästä logistiikasta voitiin siirtää alihankkijoille, minkä avulla tuotteelle pystyttiin luomaan hyvä saatavuus markkinoille. Tuotannon nopea ylösajo mahdollisti kilpailuedun säilyttämisen markkinoilla.

Kolmiakselisen kulmanopeusanturin avulla pystyttiin kasvattamaan jalansijaa kuluttajamarkkinoiden liiketoiminnassa, minkä avulla yritys pystyy jatkossa yhä laajentamaan markkinoitaan tulevien tuotteiden avulla. Tällöin kynnyksen muiden volyymituotteiden valmistukseen on yhä matalampi, koska toimiva yhteistyömalli on jo syntynyt. Markkinoiden laajentamista auttaa ulkoistamisen luoma verkostoitumiskehitys. Ulkoistaminen ei luo pelkästään hyötyjä päähankkijalle, vaan näin myös alihankkija pystyy tarjoamaan vastaavia palveluita muille yrityksille. Alihankkijan kyvystä ollessa konkreettista näyttöä muodostuu ulkoistamis päätös helpommaksi. MEMS-testauksessa käytettävän alihankkijan pyrkimys laajentaa toimialaansa onnistui, minkä ansiosta se pystyy luomaan uusia yhteistyösopimuksia jatkossakin.

Päähankkijan ei tarvinnut tehdä valtavia muutoksia tuotannon henkilöstöresursseihin tai lisätä heidän työtaakkansa, minkä ansiosta henkilöstö pysyy jatkossakin tyytyväisenä ja resursseja voidaan vapauttaa muihin tehtäviin. Ulkoistamisprojektiin henkilöstö puolestaan sai arvokasta kokemusta ja pystyy jatkossa hyödyntämään oppimiaan asioita työtehtävissään. Lisääntynyt matkustamistarve ja laajentuneet kulttuurinäkemykset lisäävät heidän työmotivaatiotaan. Pätevälle alihankkijalle voi myös ulkoistaa muita rutiininomaisia toimintoja, mikä edelleen vapauttaa omia resursseja esimerkiksi ydinosoitukseen liittyviin tehtäviin.

Alihankkija osoittautui olevansa riittävän pätevä vaadittuun yhteistyöhön. Sen toimituskyky vaikuttaa myös lupaavalta mutta todellinen tilanne selviää vasta tuotantovolyymin noustessa lopulliselle tasolle.

5.4 Havaitut riskit ja ongelmat

5.4.1 Strategia ja kustannukset

Ulkoistamisprojektin yhteydessä huomattiin, että osa toisessa luvussa käsitellyistä riskeistä toteutuivat ja muitakin ongelmia ilmeni. Projektin tuoreuden takia on kuitenkin mahdoton vielä sanoa miten pidemmän aikavälin esimerkiksi strategiset riskit tulevat toteutumaan. Tuotantokustannuksien toteutumisesta ei ole vielä tarkkaa tietoa, sillä toistaiseksi tuotanto pyörii pienellä kapasiteetilla. On vaikea sanoa pystytäänkö kustannuslaskelmia tehtäessä kaikki tekijät ottaa huomioon. Myös yrityksen asiakkaiden reaktiota on vaikea ennustaa.

5.4.2 Alihankkija

Koska tuotannon siirtäminen vie lopulta kuukausia, täytyi tuotantoa ajaa osittain rinnakkain sekä pää- että alihankkijalla. Ongelmaksi tässä osoittautui se, että asioita päädyttiin tekemään kahteen kertaan. Prosessit eivät kuitenkaan tuottaneet aivan identtistä ulostuloa lähinnä alihankkijan tuotantoprosessin vaatimusten takia. Tämä teki järjestelmien tulostietojen vertailusta hyvin haastavaa ja aikaavievää. Alihankkijan tuotantoprosessiin tuottaman datan analysointiin ei voitu enää käyttää päähankkijan omaan tietojärjestelmään integroitua työkaluja, vaan oli sopeutettava alihankkijan tarjoamaan palveluun. Oli pyrittävä kehittämään yhdessä uusia esimerkiksi tilastollisia työkaluja, mikä aiheutti riippuvuuden alihankkijaan ja teki palvelutoimitussuhteesta ehkä liiankin syvällisen. Tämä riski tiedostettiin jo projektin alkuvaiheessa, minkä takia spesifikaatioita pyrittiin tekemään mahdollisimman pitkälti päähankkijan ehdoilla.

Erityisesti projektin alkuvaiheessa haastavaa oli tiiviin yhteistyön luominen, aikaeron ja etäisyyden takia. Eri kulttuurista johtuvat eri loma-ajat ja pyhien ajankohdat hankaloittivat aikataulutusta entisestään. Etäisyys aiheutti viivettä yhteistyökumppaneiden kommunikointiin, minkä takia esimerkiksi ongelmatilanteiden selvittämiseen meni suhteellisen paljon aikaa. Koska yhteistä työaikaa tiedettiin olevan vain muutama tunti päivässä, alihankkija oli valmis joustamaan siirtämällä osan henkilöstön työaikaa vastaamaan paremmin päähankkijan tarpeita.

Yhteistyötä heikensi merkittävästi kumppaneiden välinen kielimuuri. Yhteisenä kielenä käytettiin englantia, jonka taidot alihankkijalla osoittautuivat välttäväksi etenkin alemmassa virassa olevilla työntekijöillä.

Koska alihankkija sijaitsee kaukana päähankkijasta, kului laitteiston lähetyksiin paljon aikaa ja rahaa. Yllättäviä logistisia viiveitä aiheutti myös tulliviranomaisten puuttuminen lähetyksiin. Sen lisäksi logistiikkaan liittyy aina omat riskinsä, koska päähankkija ei itse vastaa kuljetuksesta. Herkkä mittauselektronikka ja -mekaniikka saattaa kuljetuksen aikana altistua esimerkiksi kosteudelle tai tärinälle, mikä saattaa vaikuttaa sen toimintaan. Esimerkkinä tästä yhden neulakorteista huomattiin vuotavan virtaa kuljetuksen jälkeen, minkä todennäköiseksi syyksi epäillään väärää pakkausmenetelmää.

5.4.3 Toiminta ja henkilöstö

Periaatteessa jokaiselle alihankkijalle tulisi olla varatoimittaja, sillä yksittäisen alihankkijan toimitusvarmuus ei ole koskaan sataprosenttisen varmaa. Koko toimitusketju saattaa katketa yksittäisen osaprosessin takia, ellei toimitusvarmuuden aiheuttamiin riskeihin ole valmistauduttu. Tästä hyvänä esimerkkinä Japanin Sendaissa vuoden 2011 maaliskuussa sattunut maanjäristys, joka ei onneksi vaikuttanut kyseisen alihankkijan toimintaan mutta vaikutti toiseen tuotannon osaprosessiin. MEMS-testauksen tapauksessa varatoimittajana toimii itse ulkoistava yritys ja riskin toteutuessa testauksen tuotantokapasiteetti tulee muodostamaan pullonkaulan koko tuotteen toimitusketjussa.

Tuotannon ylläpitäminen ja kehittäminen vaatii resursseja niin ali- kuin päähankkijalta, minkä tarve korostui ylösajo-vaiheessa. Ongelmien ratkominen ja päivitysten tekeminen etänä osoittautui luultua vaikeammaksi, mikä johtui osittain järjestelmän epäkypsyydestä. Ohjelmisto- tai laitteistomuutosten jälkeen järjestelmän toiminta tulee varmistaa testaamalla, mikä ei onnistu ilman kokonaisjärjestelmää. Pitkän välimatkan takia itse kehittäjän ei ole mahdollista matkustaa paikan päälle varmistamaan tehdyt muutokset, vaan testaus ja varmistaminen täytyi tehdä alihankkijan avulla. Koska alihankkija ei tunne järjestelmää yhtä hyvin kuin päähankkija, on mahdollista että testausvaiheessa jää huomaamatta oleellisia asioita, mikä saattaa heikentää järjestelmän luotettavuutta ja toimivuutta. Järjestelmän suuremmista muutoksista tulee varmistua yhdessä alihankkijan kanssa matkustamalla paikanpäälle. Jos muutoksia tulee paljon, saattaa matkustamisen tarve lisääntyä huomattavasti, mikä puolestaan on pidemmän päälle raskasta ja kuluttaa paljon resursseja.

Ongelmien ratkomisen vaikeuden osoitti jo aiemmin mainittu ongelma neulakortin vuotamisen kanssa, minkä selvittämiseen aikaa kului noin viikko. Tyypillisesti vastaavan ongelman selvittäminen on kohtalaisen suoraviivaista ja nopeaa mutta etäisyyden, aikaeron, kielimuurin ja alihankkijan epäpätevyyden muodostamat haasteet hidastivat työtä radikaalisti. Vastaavista tilanteista selviytyminen voi muodostua vielä suureksi haasteeksi tulevaisuudessa, minkä takia on hyvin tärkeää, että alihankkijalta löytyy tarvittava varalaitteisto. Varalaitteiston säilyttäminen puolestaan luo lisää investointikustannuksia mutta on elintärkeää jatkuvan tuotannon takaamiseksi. Päähankkijalla on silti vastuussa itse mittauslaitteiston huollosta ja siihen liittyvistä riskeistä vaikka ne ovat siirrettynä alihankkijan tiloihin.

Sujuvan yhteistyön takaamiseksi alihankkijan henkilöstö koulutettiin mahdollisimman perusteellisesti, jotta he osaisivat käyttää ja ylläpitää järjestelmää riittävän itsenäisesti tai jopa kehittää sitä. Syvällisen tuntemuksen järjestelmästä saa kuitenkin vain sitä kehittämällä ja ylläpitämällä, minkä takia on lähes mahdotonta kouluttaa alihankkijaa monimutkaisten toimintojen suorittamiseen pelkän dokumentoinnin ja keskustelun avulla. Kokonaisjärjestelmän tunteminen on pitkällä aikavälillä tapahtuva oppimisprosessi, minkä takia alihankkijan henkilöstön vaihtuminen luo oman riskinsä tuotannon toimivuudelle ja kehitystyölle.

Ulkoistavan yrityksen oman henkilöstön reaktio ulkoistamisen aiheuttamista järjestelyistä jää nähtäväksi.

5.5 Jatkokehitys

Kun projekti saatiin päätökseen, siirtyi siitä vastaava henkilöstö osittain tuotannon tukemiseen ja jatkuvaan kehittämiseen. Järjestelmän epäkypsyyden takia kehitettävää riittää vielä paljon mutta sen tulokset tulevat tukemaan yrityksen muita projekteja.

Ulkoistamisprojektin jatkokehityksenä tuotantovolyymiä tullaan kasvattamaan ja testausaikaa pyritään lyhentämään, koska sillä on suurin vaikutus testauskustannuksiin. Tuotteen vaatima volyymin kasvatus MEMS-testauksen osalta onnistuu yksinkertaisesti monistamalla nykyistä kokoonpanoa useaksi testeriksi ja jatkokehittämällä mittaustapaa nopeammaksi ja rinnakkaiseksi. Nykyinen järjestelmä mittaa vain yhden elementin kerrallaan mutta varsinaisia esteitä rinnakkaismittauksen kehitykselle ei ole.

Mittauksen nopeutus saadaan puolestaan aikaiseksi joko nykyistä mittaushjelmistoa optimoimalla, tai kehittämällä aiemmin mainitun FPGA-moduulilla toimivaa menetelmää, jossa elementin primääriliike herätetään varauspumppu-tyylisellä digitaalisella vaihelukitulla silmukalla lukitsemalla generoitava signaali elementin ominaistaajuudelle.

Kulmanopeusantureiden testausta voidaan tuotannollistaa tuomalla koko mitauselektroniikka ja signaalien käsittely mahdollisimman lähelle mitattavaa elementtiä, jolloin mittauksessa esiintyvät häiriöt saadaan minimoitua. Tällöin testauksessa voidaan hyödyntää nopeampaa avoimen silmukan vahvistusta, millä varsinainen testausaika on mahdollista tiputtaa lähes kymmenesosaan. Tämä vaatii kuitenkin koko systeemin uudelleensuunnittelua ja yhteistyötä muiden kehittäjien kanssa.

Jotta testausta voidaan tehokkaasti kehittää päähankkijalla, tulee järjestelmän laitteisto virtualisoida. Tämä nopeuttaa kehityssykliä ja parantaa luotettavuutta, koska kehittäjä voi itse varmistua sen toiminnasta.

Tulevina projekteina voidaan aloittaa myös muiden suurivolyymisten kuluttajatuotteiden ulkoistaminen, koska tämän työn lopputulokset ovat osoittaneet ulkoistamisen kannattavuuden. Projekteissa kannattaa kuitenkin ottaa huomioon työssä havaitut riskit sekä ongelmat ja ulkoistamisen vaikutus yrityksen liiketoimintaan.

6 Yhteenveto

Tämän diplomityön aiheena oli MEMS-testauksen ulkoistamisen toteutus sekä siihen liittyvien riskien ja hyötyjen tutkiminen. Työ tehtiin yhteistyössä VTI Technologies Oy:n ja tarkkaan valitun alihankkijan kanssa. Työ aloitettiin perehtymällä ulkoistamiseen liittyvään teoriaan, koska vastaavaa ulkoistamisprojektia ei oltu aiemmin VTI:llä tehty, vaan kaikki MEMS-testaus suoritettiin samassa tehtaassa Suomessa.

Ulkoistamis päätöstä ennen yrityksen tuli tunnistaa oma ydinosaamisensa ja perustehtävänsä, jotta päätös olisi samassa linjassa yrityksen strategian kanssa. Ulkoistamis päätöksen täytyi olla hyvin perusteltu ja tarkasti suunniteltu. Yrityksen tuli varmistua ulkoistamisella tavoiteltavista hyödyistä erityisesti kustannuksia ajatellen. Samalla tunnistettiin myös alihankkijaan, toimintaan ja henkilöstöön liittyvät hyödyt.

Teorian nojalla pyrittiin tunnistamaan projektiin liittyvät riskit ja valmistautumaan niihin työssä esiteltyjä menetelmiä käyttäen. Riskit ja odotettavissa olevat ongelmat todettiin riittävän pieniksi mahdollisesti saavutettaviin hyötyihin nähden. Tärkeintä oli riskien ennustaminen, jotta niiden toteutumista voitaisiin ehkäistä.

Ulkoistamisen motivaationa oli kuluttajamarkkinoille laajempi levittäytyminen, jonka aallonsärkijänä lanseerattu kilpailukykyinen kolmiakselinen kulmanopeusanturi tulisi toimimaan. Markkinoiden vaatimat volyymit edellyttivät yrityksen tuotantokapasiteetin radikaalia kasvattamista ja tuotantokustannusten laskemista. Tuotesyklit tulisivat myös olemaan tavallista lyhyempiä, minkä takia tuotantolaitoksen olisi syytä olla optimoitu vastaamaan sen tarpeita. Kuluttajatuotteen laatuvaatimusten ollessa paljon pienemmät auto- ja lääketeollisuuden verrattuna, voitiin vastuu tuotannosta siirtää sopimusvalmistajille.

Tuotannollisen testausjärjestelmän kehittämiseksi täytyi MEMS-tekniologiasta ja kulmanopeusanturielementin toimintaperiaatteesta muodostua selkeä kuva kehittäjälle. Anturin testauksessa käytettäviin menetelmiin tuli tutustua tarkasti, jotta perinteinen järjestelmä voitaisiin muuntaa alihankkijan tarpeita vastaavaksi. Järjestelmän jatkokehityksestä tulisi myös muodostua kehittäjälle selkeä näkemys. Järjestelmän epäkypsyyden takia sen kehittäminen tulee vaatimaan vielä paljon työtä.

Valinta MEMS-testauksen suorittavasta alihankkijasta tehtiin ottaen huomioon koko tuotantoketju siten, että eri prosesseja suorittavat yhteistyökumppanit tulisivat toimimaan mahdollisimman tehokkaasti ja sulavasti yhdessä. Erityisen haastavaa ulkoistamisesta tuli tekemään se, että MEMS- tekniologia on suhteellisen tuore teollisuuden ala, minkä myötä sen testausta ei ole tarkasti standardisoitu. Kustannuslaskelmia tehtäessä todettiin tuotannon kustannusrakenteen muuttuvan päähankkijalle houkuttelevammaksi ja potentiaalisia säästötavoitteita pystyttiin tunnistamaan.

Ulkoistettavien toimintojen tulisi olla hyvin määritellyjä kokonaisuuksia. MEMS-testauksen tapauksessa kokonaisuus koostuu tuotantopalvelusta, jonka päähankkija on ennalta määritellyt ja kehittänyt yhdessä alihankkijan kanssa. Osaa toiminnoista joudutaan tekemään rinnakkain sekä ali- että päähankkijalla, mikäli tuotantoa halutaan pitää yllä projektin aikana. Ulkoistettuun palveluun siirtyessä tulee kuitenkin olla varma sen toimivuudesta, minkä jälkeen oma toiminto lakkautetaan.

Valitun yhteistyömallin mukaisesti testausjärjestelmä integroitiin alihankkijan

käyttämän laitteiston kanssa, mikä muodostui laitteistoon perehtymisestä sekä testausohjelmiston ja -prosessin kehityksestä. Integraatio pyrittiin tekemään tiiviissä yhteistyössä alihankkijan kanssa, jotta heidän tehdasvaatimuksensa pystyttäisiin ottamaan tarpeeksi tarkasti huomioon.

Järjestelmän siirron jälkeen varmistuttiin sen kyvykkyydestä Gage R&R -menetelmän avulla. Stabiilisuuden määrittelemiseksi kehitettiin SPC-työkalu, joka integroitiin testausohjelmistoon. SPC:n avulla päähankkija ja alihankkija pystyvät varmistumaan järjestelmän luotettavuudesta pitkällä aikavälillä. Muutosten hallinta ja laadun varmistaminen hoidetaan nykyaikaisilla informaatioteknologian työkaluilla.

Ulkoistamisprojektin lopputuloksena valittu alihankkija onnistuttiin linkittämään muuhun kulmanopeusanturin tuotantoverkoston sekä siirtämään vastuu MEMS-testauksesta ja logistiikasta heille. Alihankkijan käyttämän automaattilaitteiston ansiosta testaus nopeutui noin 10 %. Periaatteessa sama nopeutus oltaisiin voitu saavuttaa päähankkijalla itsellään hankkimalla kallis laitteisto mutta investoinnin aiheuttamat riskit katsottiin olevan järkevämpää siirtää alihankkijalle. Gage R&R -tulokset osoittivat, että järjestelmän integraatio ja siirto eivät aiheuttaneet vaihtelua sen toimintaan.

Työn tavoitteissa onnistuttiin hyvin, vaikkakin lopulliset tulokset selviävät vasta tuotannon määrien kasvaessa aiotulle tasolle. Kattavan analyysin edellytyksenä on ottaa huomioon myös muut tuotannon osaprosessit, koska pelkän MEMS-testauksen ulkoistaminen ei luultavasti tuo merkittäviä hyötyjä päähankkijalle. Tärkeämpää olisi vertailla mahdollisimman objektiivisesti kokonaista ulkoistettua tuotantoketjua omaan valmistukseen.

Ulkoistaminen osoittautui hyödylliseksi erityisesti kapasiteetin kasvattamista ajatellen. Tuotantovolyyymiä voidaan säädellä kysynnän mukaan ilman ylimääräisiä kustannuksia. Myös tulevien kuluttajatuotteiden ulkoistaminen helpottuu kun toimiva yhteistyöverkosto on saatu rakennettua ja valmiiksi.

Ulkoistamisprojektin ongelmat liittyivät lähinnä tiiviin yhteistyön luomiseen, minkä haasteena oli pitkä etäisyys ja kielimuuri. Vaikka nykyaikainen viestintäteknologia helpottaa kommunikointia, ei sen avulla pystytä luomaan tarpeeksi tehokasta menetelmää, joka korvaisi perinteisen fyysisen yhteistyön. Järjestelmän muutoksien tekeminen siirron jälkeen osoittautui haasteelliseksi ja niiden tekemiseen tuli varata tavallista enemmän aikaa. Lisäksi jatkuva työn delegoiminen kuormitti päähankkijaa mutta tehtävien muuttuessa rutiininomaisiksi molemmat osapuolet selviytyivät työtehtävistään sujuvasti. Tuotannon ylösajossa haasteet korostuivat mutta yhteistyön kehittyessä yhä tiiviimmäksi, päästään yhä helpommin lopputuloksiin.

Potentiaaliset riskit liittyvät yrityksen strategiaan ja kustannusten todelliseen toteutumiseen, mitä on projektin tässä vaiheessa vielä vaikea ennustaa. Kustannussäästöt syntyvät todennäköisesti vasta pidemmällä tähtäimellä oppimiskäyrän ollessa jyrkkä. Myöskin alihankkijan toimitusvarmuus ja laadun säilyminen jää nähtäväksi. Laadun seurantaan on kehitetty kuitenkin tehokkaat menetelmät, joiden avulla riskiä pystytään hyvin kontrolloimaan. Koska kyseessä on kuluttajatuote, ei laadunhallinta ole yritykselle yhtä kriittistä kuin auto- tai lääketeollisuustuotteissa. Laaturiskin vuoksi auto- tai lääketeollisuustuotteiden tuotannon ulkoistaminen ei

välttämättä ole kannattavaa.

Jatkokehitys tulee keskittymään kapasiteetin kasvattamiseen järjestelmiä monistamalla. Erityisen tärkeää on kuitenkin mittausmenetelmän kehittäminen nopeamaksi ja rinnakkaiseksi, sillä mittausnopeuden merkitys tuotantokustannuksiin on dramaattinen. Kaikki kehitystyö tehdään pitäen mielessä tulevat ulkoistettavat kuluttajatuotteet.

Viitteet

- [1] Bouchaud, J. *Winners Emerge in Consumer Electronics and Cell Phone MEMS Segments in 2010*. Verkkodokumentti, iSuppli, Päivitetty 21.2.2011, Viitattu 16.4.2011. Saatavissa: <http://www.isuppli.com/MEMS-and-Sensors/MarketWatch/Pages/Winners-Emerge-in-Consumer-Electronics-and-Cell-Phone-MEMS-Segments-in-2010.aspx>
- [2] Lukkari, J. *Anturit ylös*. Verkko-lehti, Tekniikka & Talous, 2011, maaliskuu, nro 9, s. 2–3. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/lehti/tekniikkaamptalous+92011/a591276>
- [3] Bouchaud, J. *Consumer MEMS: Crisis? What Crisis?* Verkkodokumentti, iSuppli, Päivitetty 29.12.2009, Viitattu 8.7.2011. Saatavissa: http://www.isuppli.com/Abstract/P12058_20110106133010.pdf
- [4] Bouchaud, J. *Consumer and Cell Phone MEMS to Generate \$2 Billion in 2011*. Verkkodokumentti, iSuppli, Päivitetty 31.1.2011, Viitattu 16.4.2011. Saatavissa: [http://www.isuppli.com/MEMS-and-Sensors/MarketWatch/Pages/Consumer-and-Cell-Phone-MEMS-to-Generate-\\$2-Billion-in-2011.aspx](http://www.isuppli.com/MEMS-and-Sensors/MarketWatch/Pages/Consumer-and-Cell-Phone-MEMS-to-Generate-$2-Billion-in-2011.aspx)
- [5] Leino, R. *Mikrosähkömekaaninen gyroskooppi pystyy mittaamaan maapallon pyörimistä*. Verkkodokumentti, Tekniikka & Talous, Päivitetty 13.4.2011, Viitattu 7.5.2011. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/ict/articlide610371.ece>
- [6] Kiiha, J. *Yritystoiminnan ulkoistaminen ja sopimusvastuu*. Helsinki, Lakimiesliiton kustannus, 2002. ISBN 952-14-0643-7
- [7] Karjalainen, J., Maijala, M., Lindgren, M. *Tuotannollinen ulkoistaminen*. Helsinki, MET, 1999. ISBN 951-817-716-3
- [8] Yliherva, J. *Tuottavuus, innovaatiokyky ja innovatiiviset hankinnat, Sitran raportteja 64*. Helsinki, Sitra, 2006. ISBN 951-563-525-X
- [9] Kiiskinen, S., Linkoaho, A., Santala, R. *Prosessien johtaminen ja ulkoistaminen*. Helsinki, WSOY, 2002. ISBN 951-0-27418-6
- [10] STT-Uusi Suomi *Suomi menettää verorahaa - porsaanreiässä tungos*. Verkkodokumentti, Päivitetty 12.8.2010, Viitattu 16.4.2011. Saatavissa: <http://www.uusisuomi.fi/raha/99008-suomi-menettaa-verorahaa-%E2%80%93porsaanreiassa-tungos>
- [11] Rikama, S. *Yli puolet yrityksistä saanut mitä hakenut Kilpailukykyä ulkomailta*. Verkkodokumentti, Tilastokeskus, Päivitetty 13.12.2006, Viitattu 16.4.2011. Saatavissa: http://www.stat.fi/artikkelit/2008/art_2008-05-30_002.html

- [12] Berggren, C. *Tuotannon ulkoistaminen ei ole niin kannattavaa kuin luullaan*. Verkkodokumentti, Tilastokeskus, Päivitetty 19.9.2007, Viitattu 16.4.2011. Saatavissa: http://www.tilastokeskus.fi/tup/tietotrendit/tt_04_06_ulkoistaminen.html
- [13] Hallikainen, R. *Ulkoistaminen ei ole säästökeino*. Verkkodokumentti, Tekniikka & Talous, Päivitetty 26.3.2009, Viitattu 19.4.2011. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/tyo/article262324.ece>
- [14] Eloranta, J. *Julkinen työ pidettävä kunnon työnä - ulkoistaminen uhkaa lisätä harmaata taloutta*. Verkkodokumentti, Julkisten ja hyvinvointialojen liitto, Päivitetty 11.3.2011, Viitattu 10.7.2011. Saatavissa: <http://www.jhl.fi/portaal/fi/ajankohtaista/uutisarkisto/?bid=939>
- [15] Leung, I. *How Japan's 2011 earthquake will impact electronics industry*. Verkkodokumentti, Electronics news, Päivitetty 14.3.2011, Viitattu 23.4.2011. Saatavissa: <http://www.electronicnews.com.au/news/how-japans-2011-earthquake-will-impact-electronic>
- [16] Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M., White, N. *MEMS Mechanical Sensors*. Boston, Artech House Inc, 2004. ISBN 1-58053-536-4
- [17] VTI Technologies *Chip-on-MEMS- heterogeneous integration of MEMS and circuits*. Verkkodokumentti, Päivitetty 19.8.2008, Viitattu 10.7.2011. Saatavissa: <http://www.vti.fi/en/products/technology/com/>
- [18] Klemetti, P. *Kulmanopeusanturielementin lämpötilariippuvuus ja kohina*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2004.
- [19] Partanen, M. *Mikromekaanisen kulmanopeusanturielementin tuotannollisen testauksen kehittäminen*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2007.
- [20] Kemppainen, K. *Mikromekaanisen resonaattorirakenteen ohjaus ohjelmoitavaan logiikkapiiriin perustuvalla järjestelmällä*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto, 2009.
- [21] Salonen, P. *MEMS-testauksen luotettavuuden parantaminen konenäkölaitteistoa käyttäen*. Kandidaatintyö, Aalto-yliopisto, Teknillinen korkeakoulu, Elektroniiikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta, 2010.
- [22] JEDEC, *Technology Focus Areas.*, Verkkodokumentti, Päivitetty 11.7.2011, Viitattu 11.7.2011. Saatavissa: <http://www.jedec.org/standards-documents/about-jedec-standards>
- [23] Semi, *SEMI - MEMS.*, Verkkodokumentti, Päivitetty 11.7.2011, Viitattu 11.7.2011. Saatavissa: <http://www.semi.org/en/Industries/MEMS>

- [24] Tokyo Seimitsu Co., Ltd, *Fully Automatic Prober Frame Transfer Type FP200A Specification.*, 2003
- [25] National Instruments, *NI DAQ 6733 Specifications.*, 2007. Saatavissa: http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc362-365_372-373_368.pdf
- [26] National Instruments, *NI DAQ 6123 Specifications.*, 2007. Saatavissa: <http://www.ni.com/pdf/products/us/043918301101dlr.pdf>
- [27] General Motors Company, *Measurement System Analysis.* McGraw-Hill Companies, 2002.