

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

**SATELLIITTIOSKILLAATTORIN JYRSINTÄTYÖVAIHEIDEN
VALMISTUSYSTÄVÄLLISYYDEN ANALYSOINTI**
The Design for Manufacturing Analyze for a Satellite Oscillators Milling Stages

Lappeenrannassa 5.10.2012

Miika Montonen

0373811

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Miika Montonen

Satelliittioskillaattorin jrsintätyövaiheiden valmistusystävällisyyden analysointi

2012

Kandidaatintyö.
45 sivua, 25 kuvaa, 3 taulukkoa

Tarkastaja: Dosentti Harri Eskelinen

Tämän tutkimuksen aiheena on satelliittioskillaattorin jrsintätyövaiheiden valmistusystävällisyyden analysointi. Tutkimuksen viitekehyksenä on DFM (design for manufacturing), johon kaikki päätelmät ja tulokset sidotaan. Tutkimuksen päätavoite on etsiä valmistusteknisiä ratkaisuja, joilla samanaikaisesti parannetaan, sekä oskillaattorin suorituskykyä, että sen valmistettavuutta noudattamalla DFM-sääntöjä. Suorituskyvyn näkökulmasta tärkeintä on oskillaattorin hyvyysluvun maksimointi. Tutkimuksessa käsitellään lyhyesti satelliittioskillaattorin porauksia, pinnoitusta ja asennusta, mutta pääpaino tutkimuksessa on oskillaattorin rungon jrsintätyövaiheissa.

Tässä työssä toteutettiin DFM-analyysi, jonka avulla pystyttiin helpottamaan lukuisia tuotannollisia ongelmia ja onnistuttiin löytämään keinoja oskillaattorin suorituskyvyn parantamiseksi.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme in Mechanical Engineering

Miika Montonen

The Design for Manufacturing Analyze for a Satellite Oscillators Milling Stages

2012

Bachelor's Thesis.

45 pages, 25 pictures, 3 tables

Examiner: Assistant Professor Harri Eskelinen

The subject of this research is the design for manufacturing analyze for satellite oscillators milling stages. The frame of reference in this research is the DFM (design for manufacturing) to which every conclusion and finding is tied up. The main goal is to find manufacturing solutions which are simultaneously used to improve the oscillator's performance and its manufacturability by following the DFM-guidelines. From performances perspective the most important aspect is to maximize the oscillator's goodness number. Drillings, surface coating and assembly for the oscillator are briefly considered but the main focus is on the milling stages.

In this thesis the DFM-analyze was conducted. Productional problems were facilitated and means of improving the oscillator's performance were discovered throughout this thesis.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	3
1. Johdanto.....	4
1.1 Tausta	5
1.2 Viitekehys, tutkimusongelma ja tutkimuskysymys.....	5
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	7
1.4 Triangulaatio tutkimusmenetelmänä	7
1.5 Rajaukset.....	9
1.6 Tutkimuksen lähtökohdat	9
1.7 Laboratoriokokeet ja mittaukset	10
2. Tutkimusetoteutus	10
2.1 Kirjallisuuskatsaus.....	10
2.2 Kappaleen kuvaus.....	13
3. Tulokset.....	16
3.1 Poikkitekninen malli eri DFM:n näkökulmille	16
3.2 Tutkitun oskillaattorin valmistettavuuden parantaminen.....	20
3.3 Haastattelun tulokset.....	23
3.4 Simuloidut satelliittioskillaattorin koneistusvaiheet	28
3.5 Mikroaaltokomponenttien valmistuksen DFM sääntöjä	30
4. Pohdinta	31
4.1 Reliabiliteetti ja validiteetti	32
4.2 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin	32
4.3 Objektivisuus.....	34
4.4 Avaintulokset.....	34
4.5 Tulosten merkitys	34
4.6 Jatkotutkimusaiheita.....	35
5. Yhteenveto	35
Lähteet	37
Liitteet.....	42

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

C	Työkalun kappaleen pintaan tekemän naarmun suuntavaatimus. C tarkoittaa, että naarmut ovat ympyrämaisesti.
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Based Numerical Control,
DFM	Design For Manufacturing, valmistusystävällinen suunnittelu
DFMA	Design For Manufacturing And Assembly, valmistusystävällinen suunnittelu ja kokoon pano
MW	Microwave, mikroaalto
LUT	Lappeenranta University of Technology
f	taajuus, (Hz)
L_{max}	ruuvien maksimietäisyys, (mm)
Q	hyvyysluku
λ	aallonpituus, (nm)
Σ	summa
Ra	pinnankarheutta kuvaava suure, pinnan karheuden poikkeamien aritmeettinen keskiarvo, (μm)

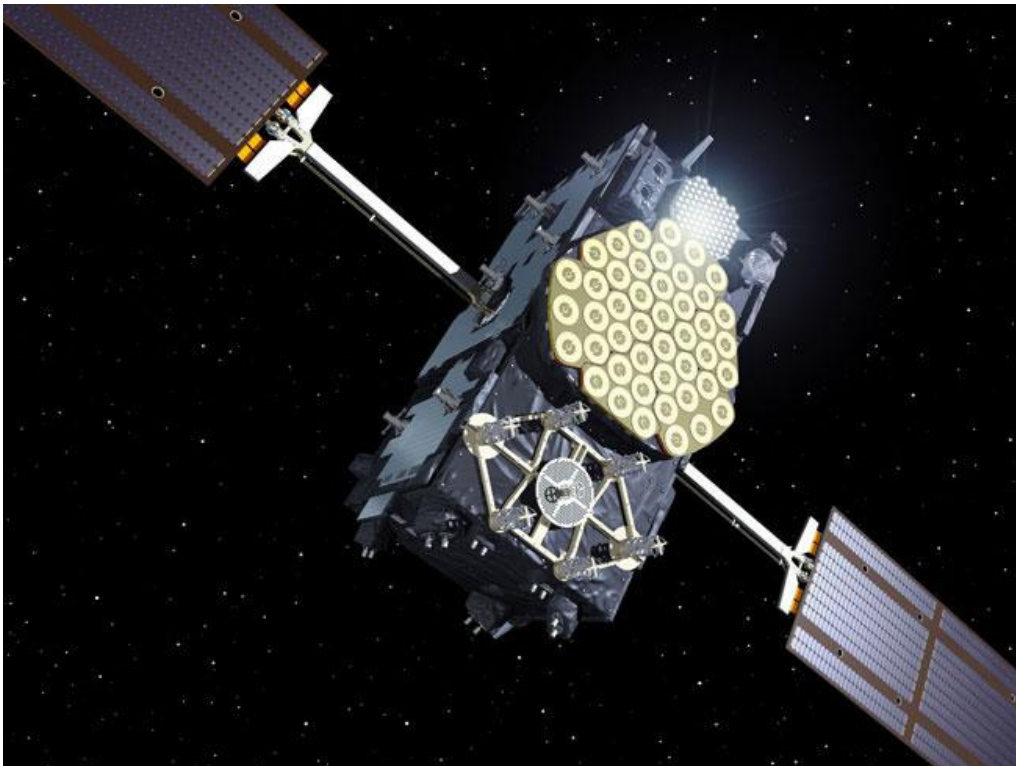
Alaindeksit

inac.	Inaccuracy, epätarkkuus
cer.mac.inac.	Ceramic Machining Inaccuracy, Keraamisten osien valmistuksen epätarkkuus
clu.inac.	Cluing Inaccuracy, liimauksen epätarkkuus
sur.inac.	Surfacing Inaccuracy, pinnoituksen epätarkkuus
mec.ass.inac.	Mechanical Assemblies Inaccuracy, mekaanisen asennuksen epätarkkuus
el.ass.inac.	Electrical Assemblies Inaccuracy, sähköisen asennuksen epätarkkuus
mac.inac.	Machining Inaccuracy, koneistuksen epätarkkuus

1 JOHDANTO

DFM (Design For Manufacturing) tarkoittaa valmistusystävällistä suunnittelua. Tällä ajattelutavalla pyritään tehostamaan suunnittelijoiden ja valmistajien yhteistyötä. Tarkoituksena on, että tuotteen valmistettavuus otetaan huomioon jo suunnittelun aikana eikä vasta sen jälkeen. Näin välttyttäisiin kalliilta uudelleen suunnittelulta. DFM:n sanotaan olevan suunnittelun ensimmäinen askel. Jo tässä vaiheessa tehdään tärkeimmät tuotteen hintaa vaikuttavat päätökset. Jopa 70 % tuotteen hinnasta määräytyy jo suunnitteluvaiheessa. DFM on lyhyesti ilmaistuna tuotteen valmistettavuuden parantamista. Pääohjeet DFM:ssa keskittyvät toiminnallisuuden, valmistuksellisten ongelmien, käsiteltävyyden ja järkevyyden suunnitteluun. Käytännössä tulisi yksinkertaistaa tuotteen valmistettavuutta ja asentamista. [1]

Tämä tutkimus keskittyy pääosin tarkastelemaan satelliittioskillaattorin jyräntätyövaiheiden valmistusystävällisyyttä. Tutkimuksessa luodaan parannuksia oskillaattorin valmistukseen ja luodaan yleistettäviä sääntöjä mikroaaltokomponenttien valmistukseen. Varsinkin kalliissa avaruusteknologiassa on tärkeää, että tuotteesta ja tuotteen valmistuksesta karsitaan ylimääräiset hintaa lisäävät tekijät. Kuvassa 1 on esitetty satelliittirakenne, johon oskillaattori voitaisiin asentaa.



Kuva 1. Satelliittirakenne, johon tutkittu oskillaattori voitaisiin asentaa. [2]

1.1 Tausta

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa (LUT) on panostettu paljon valmistusystävälliseen suunnitteluun ja kokoonpanoon (Design For Manufacturing And Assembly, DFMA). Pääpaino on ollut ohutlevytuotteissa ja mikroaaltokomponenteissa. Valmistusmenetelmien osalta LUT:n kiinnostus kohdistuu lasertyöstöön ja levyjen lävistämiseen. Keskeisimpiä LUT:n tutkimuksia esitellään myöhemmin tässä työssä. Tämä tutkimus jatkaa LUT:n tutkimusperinteitä mikroaalto- (MW) mekaniikan alueella, mutta kohdistuu nyt ensisijaisesti lastuavaan työstöön.

1.2 Viitekehys, tutkimusongelma ja tutkimuskysymys

Tässä tutkimuksessa käytettiin valmistusystävällisen suunnittelun, DFM:n (Design for Manufacturing), viitekehystä. Viitekehystä, tutkimusongelmaa ja -kysymystä selventää kuva 2.

Tutkimusongelma

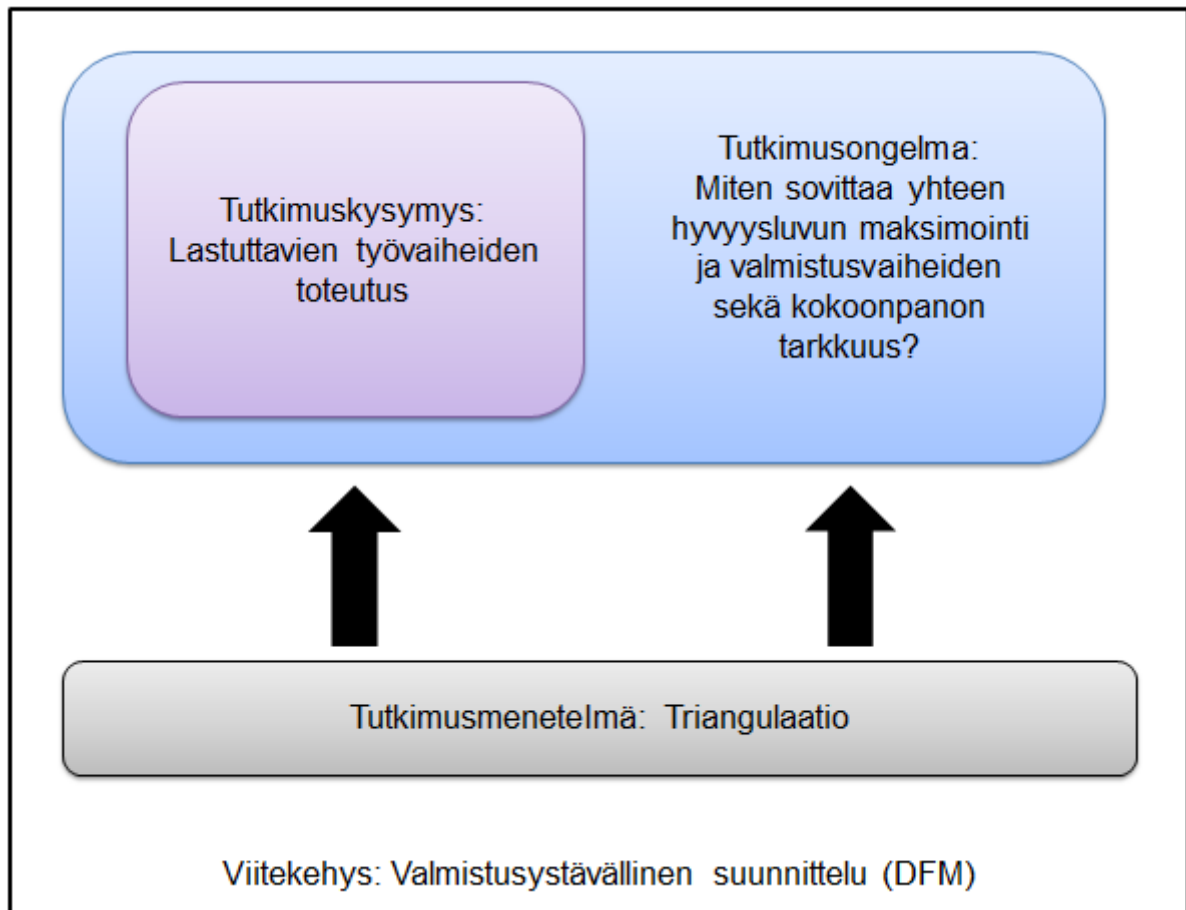
Tutkimuksen ongelman voidaan ajatella syntyvän kappaleen toiminnasta. Miten sovittaa hyvyysluvun maksimointi ja valmistusvaiheiden sekä kokoonpanon tarkkuus yhteen. Oskillaattorin tulee täyttää yhtä aikaa voimassa olevat perinteiset lastuttavia muotoja koskevat DFM-ohjeet sekä mikroaaltokomponenttien toimintaa koskevat geometriavaatimukset.

Tutkimuskysymys

Tutkimuksen pääkysymys on, miten oskillaattorin resonaattoriantelo saadaan valmistettua mahdollisimman valmistusystävällisesti toiminnalliset vaatimukset täyttäen. Toissijaiset kysymykset keskittyivät tarkempiin ja yksityiskohtaisempiin valmistuksellisiin seikkoihin, kuten kuinka monta kertaa kappale pitää kiinnittää tai kääntää eri valmistusvaiheiden aikana, ja kuinka hyvin pystytään noudattamaan jyrittäessä DFM-ohjeita. Kappaleella on toiminnallisesti tarkkoja geometriavaatimuksia ja haasteellisia valmistusvaiheita ennen ja jälkeen jyrinnän, esimerkiksi kultapinnoitus, pitkien reikien poraus sekä keraamisten osien liimaus. Tämän tyyppisen kappaleen DFM-analyysi vaati kokonaisvaltaista valmistuksen ja laitteen suorituskyvyn analyysiä.

Kappaleen jyrinnässä huomioitavat seikat:

- sivut
- päällys, pohja
- sisus
- kiinnitystapa
- minimaalinen kääntöjen määrä
- pinnanlaatu
 - kansi, pohja, sivut
- työkalunkoko
 - työstökierrosten lukumäärä
- lastuamisaika
- lastuamisnopeus



Kuva 2. Viitekehys sisältöineen.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoite on tuottaa kokonaisvaltainen DFM-analyysi satelliittioskillaattorin lastuamistyövaiheista. Tämän avulla selvitetään, kuinka hyvin valmistusystävällisyyden säännöt toteutuvat oskillaattorille ja miten niitä voisi parantaa.

1.4 Triangulaatio tutkimusmenetelmänä

Tutkimuksen tukena oli yrityshaastattelu, jonka rakenne esitellään seuraavassa kappaleessa. Yrityshaastattelu on osana käytettyä tutkimusmenetelmää, triangulaatiota.

Haastattelu

LUT:n pitkäaikainen yhteistyö MW-mekaniikan komponenttien valmistuksesta ja tuotekehityksestä Imatran Kone Oy:ssä mahdollisti tämän haastattelun toteutumisen. Haastattelu toteutettiin 19.6.2012 Imatran Kone Oy:ssä toimitusjohtaja Aimo Mauravaaran kanssa koskien satelliittioskillaattorin valmistusta. Haastattelun runkona olivat seuraavat oskillaattorin toimintaa ja valmistusta koskevat seitsemän seikkaa:

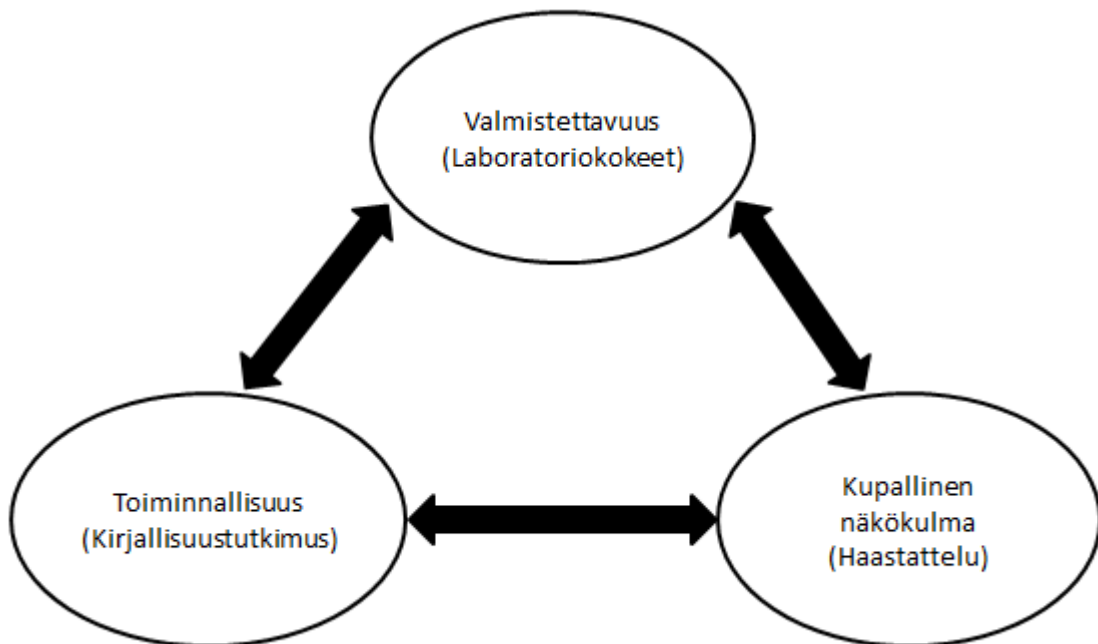
1. Saavutettava valmistustarkkuus
2. Valmistusvaiheet ja kappaleen kiinnitys
3. Valmistusdokumentteja koskevat näkökulmat
4. Materiaaliin liittyvät kysymykset
5. Lastuamisaikaan liittyvät näkökulmat
6. Valmistuskustannuksiin liittyvät näkökulmat
7. Toiminnan asettamien vaatimusten täyttyminen

Haastattelu koostui 18 kysymyksestä, jotka on esitetty liitteessä 1. Haastattelulla haluttiin saada teollisuuden näkökulma DFM-aihepiiriin. Näkökulmalla pyrittiin täsmentämään valmistusystävällisen suunnittelun teoriaa oskillaattorille. Haastattelu oli teemahaastattelu eli puolistrukturoitu haastattelu. Puolistrukturoitu haastattelu sopi kyseiseen aiheeseen parhaiten, koska tutkimuksessa oli jo olemassa valmis teema, oskillaattorin valmistettavuus. Puolistrukturoitu haastattelu nosti esille myös uusia valmistusteknisiä näkökulmia Imatran Kone Oy:n esittäminä. [3].

Triangulaatio

Triangulaatio on tutkimusmetodi, jossa verrataan kolmesta eri näkökulmasta samaa asiaa koskevia tietoja ja pyritään yhdistämään ne toisiaan tukevaksi kokonaisuudeksi. Triangulaatio valittiin tämän työn tutkimusmetodiksi, koska todettiin, että sen avulla pystytään eri näkökulmat yhdistämällä, luomaan sovellettuja ohjeita oskillaattorin valmistukseen.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin eri näkökulmia jyrstävän satelliittioskillaattorin valmistusystävällisestä suunnittelusta. Triangulaatio koostui tässä tutkimuksessa kolmesta eri lähestymistavasta, jotka olivat valmistettavuus, toiminnallisuus ja kaupallinen näkökulma. Mikäli saavutetaan sama tulos kaikilla näillä lähestymistavoilla, voidaan tutkimus todeta luotettavaksi. Haastattelun avulla saatiin kaupallinen näkökulma tähän tutkimukseen. Valmistettavuuden ja toiminnallisuuden osalta yhdisteltiin kirjallisuudesta saatua tietoa. Oskillaattorin geometriaa koskevia toiminnallisia vaatimuksia verrattiin perinteisiin DFM-sääntöihin ja -menetelmiin. Triangulaation perusajatus näkyy kuvassa 3. Kuvasta huomataan, kuinka jokainen lähestymistapa on vuorovaikutuksessa toistensa kanssa.



Kuva 3. Työssä hyödynnettävän triangulaation perusajatus.

Kirjallisuustutkimus toteutettiin ohjaavan tutkimuksen mallia hyödyntäen. Sen avulla oli tarkoitus ideoida uusia näkökulmia oskillaattorin valmistukseen. Lisäksi pyrittiin soveltamaan muiden mikroaaltokomponenttien valmistuksesta löytyvää tietoa satelliittioskillaattorin valmistuksen analysointiin.

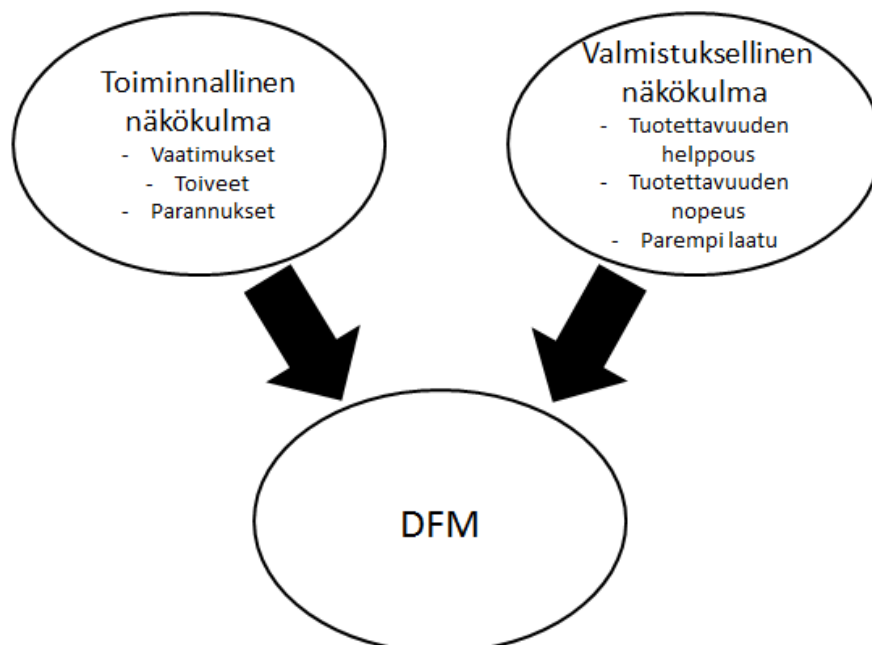
Kirjallisuustutkimuksessa esiintyvän tiedon esittämiseen käytettiin ryhmittelyä. Ryhmittely tarkoittaa tiedon kokoamista kirjallisuudesta, minkä jälkeen tieto jaotellaan pienempiin kokonaisuuksiin. Pienemmät aiheoryhmät analysoidaan tarkemmin asian ymmärtämisen helpottamiseksi [3]. Esimerkiksi tässä tutkimuksessa DFM:n perusteella etsittiin tietoa ja ryhmiteltiin sitä koskevat tiedot eri aihepiireihin.

1.5 Rajaukset

Tämän kandidaatintyön ulkopuolelle jätettiin oskillaattorin kultapinnoituksen ja porauksen yksityiskohtainen tarkastelu sekä oskillaattorin sähköisen suorituskyvyn mittaaminen.

1.6 Tutkimuksen lähtökohdat

Tutkimuksen lähtökohdaksi oli analyysin kohteena oleva osa, satelliittioskillaattori, johon sidottiin jyrkännästä ja DFM:stä saatu tieto. Tutkimuksen peruspilareina toimivat DFM:n perusohjeet sekä sovellettu valmistusystävällisyys. Oskillaattorin toiminnalliset vaatimukset ovat sellaisia, että perinteisiä valmistusystävällisyyden sääntöjä ja toimintatapoja ei aina voida suoraan noudattaa. Kuva 4 selventää DFM:n perusajatus.



Kuva 4. DFM:n perusperiaate. (Muokattu lähteestä: [43])

1.7 Laboratoriokokeet ja mittaukset

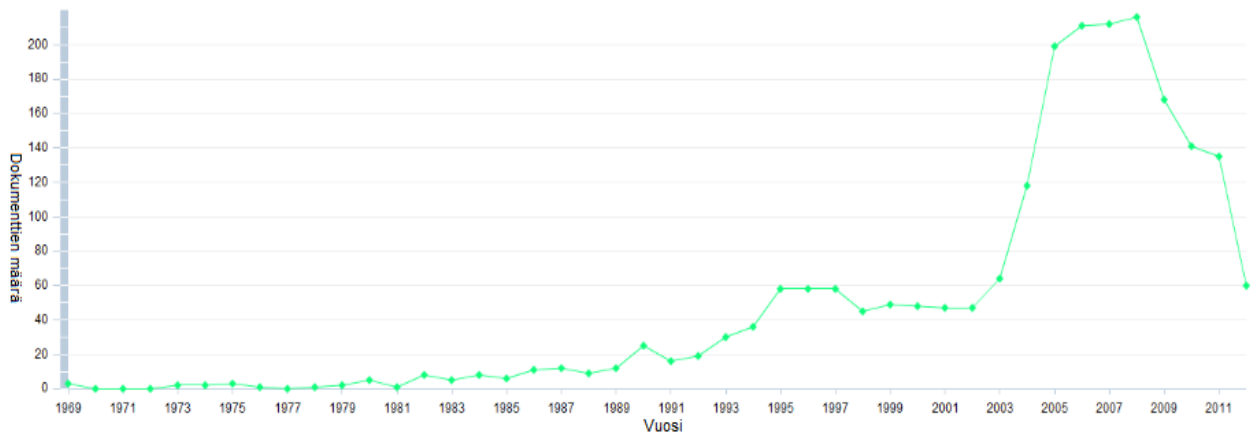
Oskillaattorille on tehty erilaisia suorituskyky- ja valmistustarkkuusmittauksia sekä -mallinnuksia, joita hyödynnettiin tässä tutkimuksessa. Mittauksilla tarkoitetaan LUT:ssa tehtyjä pinnankarheuksien sekä erilaisten toleranssien mittaustuloksia. Pinnankarheusmittauksilla tarkoitetaan erilaisia työstöratakokeita erikokoisilla työkaluilla, jonka jälkeen mitataan pinnankarheus ja etsitään paras mahdollinen työstörata ja työkalu, joilla saavutetaan pienin pinnankarheus. Toleranssimittauksiin kuuluvat ontelon korkeuden ja halkaisijan mittatoleranssit, ontelon muototoleranssi ja tehonsyöttösilmukoiden sekä säätöruuvien paikkatoleranssit. Tutkimuksessa käytetyt CAM-mallit olivat Solidworks- ja Edgecam-malleja, joista nähtiin kappaleen työstövaiheet ja -radat. Lisäksi kappaleesta tehtiin Solidworksilla valmistusvaiheita kuvaava kuvasarja, joka selventää eri valmistusvaiheita ja työstöjärjestystä. Kappaleelle kehiteltiin Solidworksilla myös vaihtoehtoinen ratkaisumalli valmistuksen helpottamiseksi.

2 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

2.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsaus koostuu kahdesta eri osiosta. Ensimmäinen osio selvittää, kuinka paljon tietoa löytyy pelkästään koskien DFM:ia hyödyntäen SCOPUS tietokantaa. Toisessa osiossa on esitelty LUT:n aikaisempia tutkimuksia liittyen DFM:iin ja mikroaaltokomponentteihin.

SCOPUS tietokannan mukaan kaiken kaikkiaan DFM:sta löytyi 2151 dokumenttia. Koneteollisuuden osalta löytyi 1467 dokumenttia, eli siis suuri osa dokumentoiduista tutkimuksista on keskittynyt koneteollisuuteen. Näistä 1467 dokumentista 847 oli konferenssijulkaisuja, 462 lehtiartikkelia ja loput olivat erilaisia arvosteluja tai lyhyitä raportteja. Aiheesta on eniten dokumentteja 2000-luvun alkupuolelta ja huomattava suosion lisääntyminen on tapahtunut 1990-luvun alkupuolella, ennen tätä dokumentteja on julkaistu vain muutamia vuosittain. Käyrä dokumenttien julkaisusta on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Vuosittain julkaistujen DFM:ta käsittelevien dokumenttien määrä vuosilta 1969-2011.

LUT:ssa on tutkittu vuodesta 1998 alkaen kymmenissä eri tutkimuksissa elektroniikan, sekä erityisesti MW- ja RF -tekniikan tarvitsemien mekaanisten rakenneosien, kuten antennien, valmistettavuutta ja erilaisten mekaanisten rakenneosien ominaisuuksien vaikutuksia elektronisten laitteiden suorituskykyyn [4]...[10].

Tärkeimpänä osana LUT:n tutkimustyötä on ollut DFMA-metodologioiden kehittäminen siten, että suunniteltavien elektronisten laitteiden suorituskykyvaatimukset voitaisiin ottaa paremmin huomioon jo mekaanisten rakenneosien suunnittelun alkuvaiheissa [11]...[20]. LUT:n kehittämiä metodologisia lähestymistapoja hyödynnetään tässä kandidaatintyössä satelliitin oskillaattorin valmistettavuusanalyysiä tehtäessä.

Materiaalinvalinta osana laitteen valmistettavuusanalyysiä ja sähköisen suorituskyvyn optimointia on ollut LUT:n tekemässä tutkimuksessa keskeisessä asemassa [20],[21]. Tässä kandidaatintyössä toteutettavan valmistettavuusanalyysin yhtenä kulmakivenä ovat tutkimustulokset, jotka on saatu LUT:ssa tehdyn onteloresonaattorin valmistettavuusanalyysistä ja resonaattorin metallisten materiaalien valinnan optimointitehtävän ratkaisusta [21].

LUT:n tutkimuksissa on viime vuosina myös tutkittu erityisen vaativiin sovelluskohteisiin tarkoitettujen elektronisten laitteiden mekaanisten rakenneosien valmistusystävällistä suunnittelua. Tutkimusaiheita on ollut mm. puolustusvälineiteollisuudesta [22],[23]. Lisäksi LUT on tutkinut värähtelyjen ja iskujen vaikutuksia oskillaattoreiden suorituskykyyn [24],[25] sekä korroosion vaikutuksia erityisesti luotettavuusteknisistä näkökulmista [26]. Tässä kandidaatintyössä voidaan osittain hyödyntää näiden tutkimuksien havaintoja, koska

suunniteltava oskillaattori on tarkoitettu satelliittisovellukseen, jolloin sen ympäristöstä johtuvat vaatimukset ovat poikkeuksellisen haastavia erityisesti värähtelyjen ja iskumaisten kuormien sekä korroosion erityislajien osalta.

LUT on panostanut DFMA-tutkimuksessa myös elektroniikkateollisuuden tarvitsemien liittämismenetelmien tutkimukseen. Tutkimukset ovat käsitelleet joko yksittäisten, eri materiaaleista valmistettavien rakenneosien liittämistä [27]...[33] tai hermeettisten koteloiden sulkemistekniikoita [34],[35]. Tässä kandidaatintyössä oskillaattorikotelon sähköinen tiiveys on yksi merkittävä suunnittelukriteeri, ja LUT:n aikaisempien tutkimusten tuloksia voidaan siten soveltaa oskillaattorikotelon ja resonaattorikotelon suljentaratkaisuja arvioitaessa. Myös tässä kandidaatintyössä joudutaan perehtymään eri materiaalien liittämisteknologioihin muunmuassa keraamisten ja metallisten rakenneosien liittämistarkkuuteen, jotta muista materiaaleista valmistettavien rakenneosien koneistukselle asetettavat vaatimukset voitaisiin asettaa yksiselitteisesti. Yksi LUT:n merkittävä tutkimushaara tässä aihekokonaisuudessa on käsitellyt lasertyöstön sovellusmahdollisuuksia MW- ja RF -tekniikassa [36]..[38].

Tämän kandidaatintyön näkökulmasta tärkeä yksittäinen LUT:ssa tehty DFMA-tutkimus on esitetty lähteessä [30], jossa on tutkittu jyrätyövaiheiden tarkkuuden ja toteutuksen vaikutuksia MW -komponentin suorituskykyyn. Toinen tärkeä yksittäinen tutkimus on lähteessä [40], jossa on tutkittu valmistustarkkuuden todennäköisyysjakaumien vaikutuksia järjestelmän suorituskykyyn.

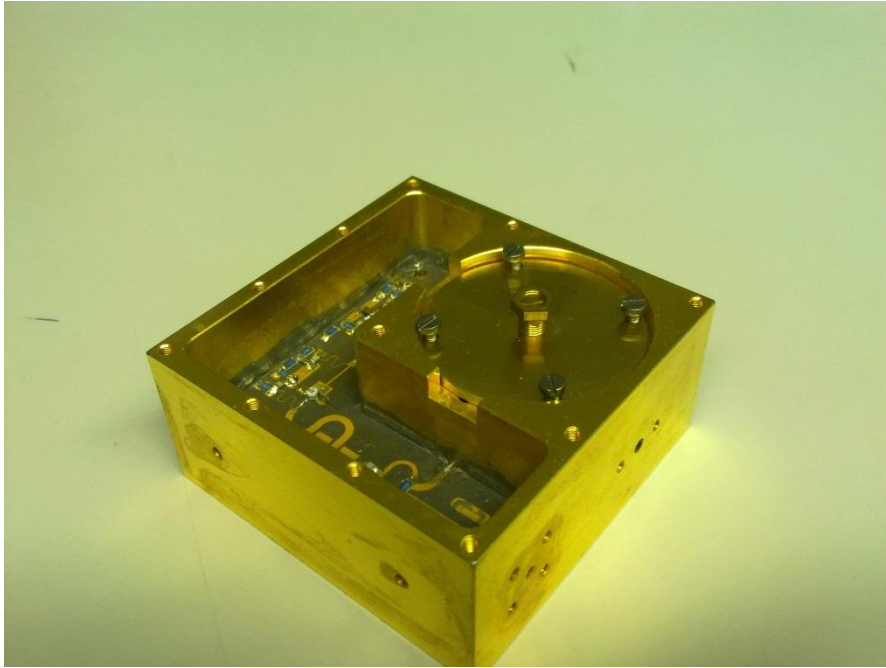
LUT on pyrkinyt hakemaan DFMA-tutkimuksessa poikkitieteellisyyttä yhdistämällä esimerkiksi kustannustehokkuuden ja valmistusystävällisyyden näkökulmia [41], tai yhdistämällä jonkin valmistusmenetelmän, esimerkiksi ohutlevyteknikoiden [42]...[44], kehitysnäkökulmat mikroaaltomekaniikan jatkuvasti tiukentuviin suorituskykyvaatimuksiin.

LUT:n tutkimusten pohjalta on syntynyt MW -mekaniikan DFMA-näkökulmia korostava suunnittelun perusteos [45], jota on hyödynnetty myös tämän kandidaatintyön teoriaosuudessa.

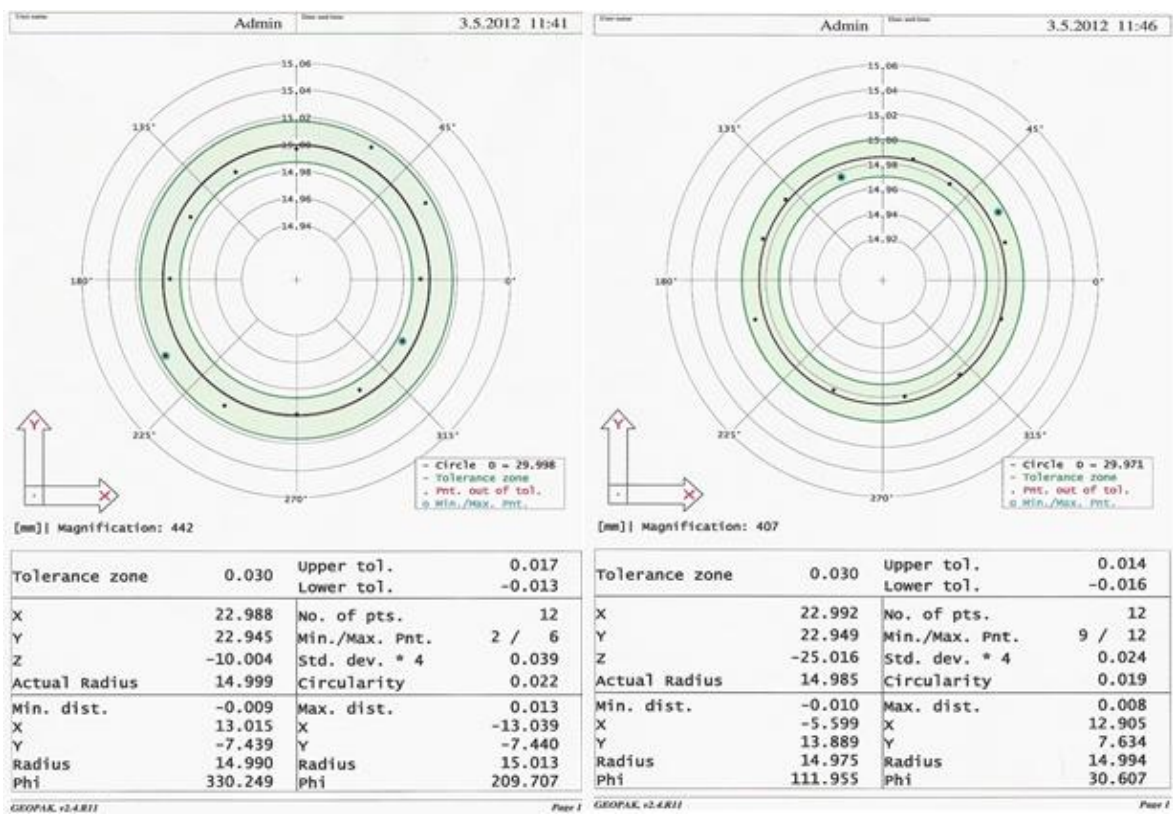
2.2 Kappaleen kuvaus

Tämän tutkimuksen kohteena on 5 GHz:n taajuudelle säädetty satelliittioskillaattori. Kappaleessa jyrinnän kannalta keskeisin kohta on resonaattoriantelo, jonka halkaisija on 30 mm ja syvyys 25 mm. Oskillaattorin materiaali on AlMg3, (EN-AW 5754), joka on pinnoitettu standardin mukaisella kultanikkeli pinnoitteella (MIL-G-45204). Resonaattoriantelon sulkee erillinen kansi, jossa on mekaaninen säätö oskillaattorin taajuudelle. Ontelon sisään asennetaan liimalla keraaminen sauva sekä kide sauvan päähän tehonsyöttösilmukoiden kohdalle. Oskillaattori on esitetty kuvassa 6, ja sen mittapiirustukset sekä räjäytyskuva ovat liitteissä 2-3. Resonaattorin taajuuden tarkkuus riippuu keskeisesti jyrittäväntä ontelon geometrian tarkkuudesta, pinnanlaadusta ja ontelon nurkan terävyydestä. Myös ontelon ja ontelon kannen välinen kulma on jätettävä teräväksi, jotta mikroaallot etenevät oikein. Tämän vuoksi tutkittavassa oskillaattorissa oli tärkeää yhdistää toiminnalliset ja DFM-vaatimukset. Kyseisessä oskillaattorissa oli lukuisia kokoonpantavuuden helpottamiseen liittyviä näkökohtia, mutta nämä DFMA:n näkökohdat ovat rajattu tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Toiminnallisista vaatimuksista johtuvat toleranssi- ja pinnankarheusvaatimukset ontelolle ovat seuraavat:

- Mittatoleranssi halkaisijalle on +/- 0,030 mm.
- Mittatoleranssi korkeudelle on + 0,003 mm.
- Ontelon ympyrämäisyystoleranssi on 0,030 mm. Ympyrämäisyys on mitattu kahdelta korkeudelta 10 mm ja 25 mm, mittaustulokset näkyvät kuvassa 7.
- Pohjassa olevan nastan sekä ontelon keskiakselin samanaskelisuus on 0,030 mm.
- Pinnankarheuden keskiarvo (Ra) on 0,4 µm ja työstönaarmujen suunta on C. C on pintamerkki, jolla tarkoitetaan, että työstönaarmut ovat ympyrämäisesti. Pinnanlaatuja on esitetty kuvassa 8. Kuvissa 9-10 on esitetty lähikuvia työkalun tekemistä naarmuista. Kuvassa 10 on työstönaarmujen suuntana C.



Kuva 6. Satelliittioskillaattori.



Kuva 7. Resonaattoriontelon ympyrämäisyystoleranssin mittaustulokset, vasemmalla on 10 mm korkeudelta mitattu tulos ja oikealla 25 mm korkeudelta mitattu tulos.



Kuva 8.

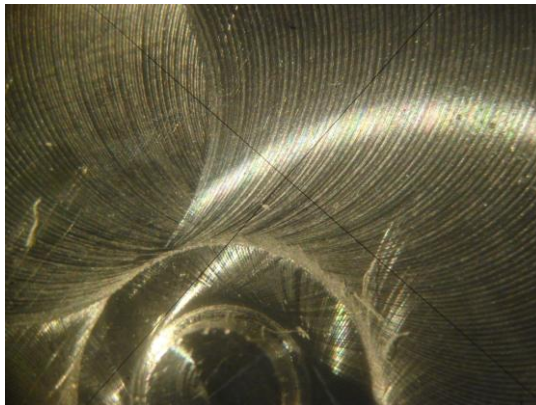
Eri kokoisilla työkaluilla tehtyjä oskillaattorin pohjan jysintäkokeita.

1: Rouhinta + viimeistely, tappi: halk. 8mm, teräkäyttöprosentti 10% Ra 0,3 μm

2: Rouhinta + viimeistely, tappi: halk. 5mm, teräkäyttöprosentti 10%

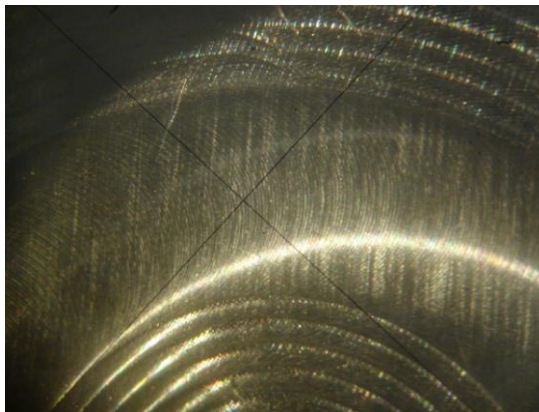
3: Rouhinta +viimeistely, tappi: halk. 5mm teräkäyttöprosentti 50%

4: Rouhinta +viimeistely, tappi: halk. 10m, teräkäyttöprosentti 50%. Paras pinnan laatu saavutettiin neljännellä jysintäkokeella. Siinä saavutettiin 0,1...0,2 μm Ra.



Kuva 9.

Makrokuva jysintäkokeesta 4. Kuvassa näkyy hyvin terän tekemät jäljet.



Kuva 10.

Makrokuva jysintäkokeesta 2. Pohjan nastan lähellä näkyvät terän tekemät uurteet pilaavat muuten hyvän pinnanlaadun.

Muita jyrittäviä muotoja oskillaattorissa ovat piirilevyjen taskut tukijalkoineen ja oskillaattorin ulkopinnat liittimien kiinnitystä varten. Lisäksi kansien kiinnityspinnat täytyy tasata. Kappaleen kiinnityksen näkökulmasta on syytä huomioida kiertetyt kiinnitysreiät kansille ja liittimille sekä poraukset tehonsyöttösilmukoille.

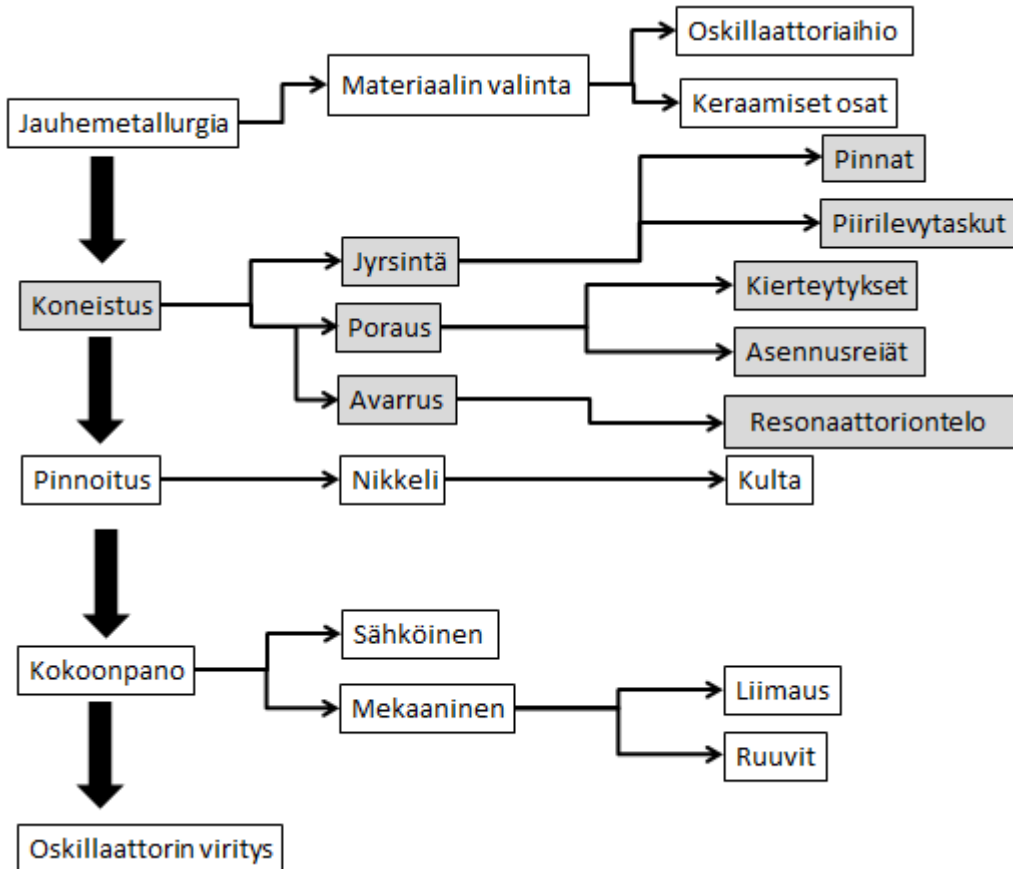
3 TULOKSET

3.1 Poikkitekkinen malli eri DFM:n näkökulmille

Tässä tutkimuksessa tuotettiin malli, jota käyttäen seuraavia yhdeksää DFM(A)-lähestymistapaa voidaan soveltaa satelliittioskillaattorin valmistettavuusanalyysiin. Analyysin runko on esitetty kuvassa 11.

1. Sovelletut säännöt ja ohjeet eri valmistusteknologioille
2. Kaavakkeiden, taulukoiden ja aikalaskelmien hyödyntäminen
3. Moduloinnin ja standardisoinnin hyödyntäminen
4. Valmistusmenetelmien kehittäminen
5. Sopivimman valmistusteknologian löytäminen hyödyntämällä analyyttisiä tai empiirisiä DFM(A) -kaavoja
6. Piirreperohjaisten tietokonejärjestelmien hyödyntäminen
7. Integroidut DFM-lähestymistavat suunnitteluprosessin sekä sen kustannusten ohjaamiseen ja johtamiseen
8. Materiaalitekniikan kehitys sekä vaihtoehtoiset materiaalit
9. Palautteen hyödyntäminen

(Muokattu lähteestä [43])



Kuva 11. Lähtökohta satelliittioskillaattorin DFM-analyysille.

Koneensuunnittelijaa varten on luotu tiettyjä sääntöjä, jotka helpottavat suunnittelua ja suunnittelun vaiheita. Säännöt koskevat pääosin tuotteen valmistettavuutta ja toiminnallisuutta. Erityisesti näitä kahta näkökulmaa tulisi vertailla koko suunnitteluprosessin ajan, jotta suunnittelun lopputulos olisi mahdollisimman valmistusystävällinen ja toiminnalliset vaatimukset täyttävä tuote. Alapuolella esitellään tärkeimpiä DFM(A)-sääntöjä

- Minimoidaan osien määrää rakenteessa
- Vältetään erillisiä kiinnitysosia tai -muotoja
- Tehdään asennusvaiheet mahdolliseksi yhdestä kokoonpanosuunnasta
- Minimoidaan valmistusmenetelmien ja -vaiheiden määrä
- Noudatetaan kullekin valmistusmenetelmälle laadittuja helpon valmistettavuuden ohjeita
- Varmistetaan, että rakenteessa on riittävästi tilaa työkaluille, asennuksille ja koneiden kiinnittimille
- Pyritään käyttämään standardisoituja muotoja, työkaluja ja teriä
- Tarkastetaan toleranssien yhteensopivuus

Oskillaattorille näitä sääntöjä pyritään hyödyntämään mahdollisimman tarkasti. Osien määrä on tässä tapauksessa jo valmiiksi pieni. Silti päästäisiin DFM:n kannalta parempaan lopputulokseen, jos esimerkiksi ruuvien määrää voisi vähentää asemointitappeja hyödyntämällä. Valmistuksen aikana tarvittavien kappaleen kiinnitysvaiheiden määrää pystyisi vähentämään alkuperäisestä LUT:n konekannan vaatimasta kuudesta vaiheesta kahteen, mikä säästäisi aikaa ja parantaisi tarkkuutta. Kuitenkin joitakin sääntöjä ei pystytä tarkasti noudattamaan, sillä esimerkiksi oskillaattorin toleranssivaatimukset ovat niin tarkat, että kaikki helpon valmistettavuuden ohjeet eivät täyty.

Jyrsinnälle laaditut helpon valmistettavuuden säännöt

Jyrsiminen on kallista, joten on tärkeää, että kappale on suunniteltu mahdollisimman valmistusystävällisesti. Jyrsittävään kappaleeseen on suotavaa käyttää standardijyrsimiä, koska erilaiset muotojyrsimet ovat kalliita. Valmistusystävällisyys on kappaleen valmistamista mahdollisimman järkevästi. Jyrsimisen kannalta tulisi siis minimoida kappaleen kääntöjen määrä työstöjen välillä. Lisäksi on mietittävä lastuttavaa ainemäärää, eli onko järkevämpää jyrsiä useasti pienellä terällä vai kerran isolla terällä. Tämä vaikuttaa työn jälkeen, minkä vuoksi tulee huomioida pinnanlaatuvaatimukset. [46]

Toinen lähestymistapa on erilaiset kaavakkeet, taulukot ja aikalaskelmat. Näiden kolmen edellä mainitun avulla pystytään arvioimaan kappaleen asennettavuutta. Kappaleelle tai osakokoonpanolle annetaan pisteitä sen mukaan, kuinka helppo se on kiinnittää, ja kuinka paljon siinä on osia. Pisteitä siis saa osan yksinkertaisuudesta, mitä yksinkertaisempi, sitä enemmän pisteitä. Oskillaattorille voidaan muodostaa kokonaan omanlainen kaavake, joka keskittyisi sitä koskeviin toiminnallisiin seikkoihin. Ideana on kerätä seikkoja, jotka hyödyntävät suunnittelua sekä toiminnallisten vaatimusten kehittämistä yhtäaikaan. Oskillaattorin tapaukseen sopii myös kysymyskaavake koneistuksesta. Tällaista kaavaketta voidaan hyödyntää valmistuksen valvontaan tarkastuslistana. Näin varmistetaan, että kaikki toiminnalliset vaatimukset on täytetty.

Kolmas lähestymistapa on moduloinnin ja standardisoinnin hyödyntäminen. Tarkoituksena on käyttää mahdollisimman paljon standardisoituja muotoja ja työkaluja. Valmistajan työtä helpottaa esimerkiksi standardiosien käyttö. Valmistajan ei tarvitse valmistaa kaikkia osia itse, vaan osat voidaan tilata valmiina tavarantoimittajalta. Valmistaja säästää näin aikaa ja kustannuksia. Moduloinnin ja standardisoinnin hyödyntämisellä pyritään etsimään erilaisia ratkaisuja kustannusten ja ajan säästämiseksi. Oskillaattorissa on paljon muotoja, joihin

voidaan hyödyntää standardityökaluja. Oskillaattorin valmistukseen voidaan hyödyntää muiden mikroaaltokomponenttien muotoja, mittoja sekä valmistusvaiheita, sillä samalla taajuusalueella toimivat laitteet ovat hyvin samankaltaisia. Lisäksi tulisi myös ajatella kutakin valmistusvaihetta moduulina toistamalla sitä.

Kappaleen suunnittelussa on syytä olla avarakatseinen. Ei ole syytä keskittyä vain itse kappaleen suunnitteluun, vaan suunnitteluprosessin tarkastelua tulisi laajentaa myös valmistusmenetelmien kehittämiseen. Kehittämällä voidaan saavuttaa muunmuassa parempia työstönopeuksia ja parempaa työstöjälkeä. Jotkin vaikeat kappaleen suunnittelun ongelmat saattavat ratketa kehittämällä tai vaihtamalla valmistusmenetelmää. Tästä hyvänä esimerkkinä voidaan pitää oskillaattorin ontelon ympyrämäisyyden muodon virhettä. Vaihtamalla ontelon jysintä avartamiseen, saadaan pyöreä geometria, ja geometrian virhe pystytään poistamaan.

Oikean valmistusteknologian löytämiseen voidaan hyödyntää erilaisia vektorimalleja. Kuvitellaan suunnittelua käyränä 3D -avaruuteen. Lasketaan käyrälle gradientti kappaleesta saaduilla tiedoilla. Gradientti voi johtaa suoraan haluttuun päämäärään samalla tavalla kuin mihin normaalilla suunnittelun kululla päästäisiin. Gradientin avulla säästettäisiin aikaa, kuitenkin gradientin laskussa voi tapahtua virheitä helposti, tästä johtuen gradientilla saavutettu päämäärä voi olla väärä.

Tietokonejärjestelmillä pystytään simuloimaan valmistuksellisia, toiminnallisia sekä asennuksellisia vaiheita. Järjestelmillä saavutetaan säästöjä, koska ei tarvitse valmistaa erillisiä prototyyppisiä. Mallintamisessa on suuri hyöty erityisesti piirre pohjaisista järjestelmistä. Ne sisältävät toiminnallisia, geometrisia ja teknologisia piirteitä. Ne helpottavat suunnittelutyötä, koska niistä saadaan suoraan esimerkiksi toleranssit. Muunmuassa poraukset saadaan oskillaattorin onteloon kohtisuoraan näiden järjestelmien ansiosta.

Suunnitteluprosessin ja kustannusten yhtäaikaisella johtamisella pyritään pitämään suunnitteluprosessi mahdollisimman tehokkaana ja kustannukset mahdollisimman pieninä. Tähän voidaan perustaa erikseen työryhmiä, jotka keskittyvät vain tarkkailemaan työn kulkua. On myös tietokoneohjelmia, joihin kirjataan kuluja erilaisiin taulukoihin.

Mikroaaltomekaniikassa materiaalin valintaan vaikuttaa moni asia. Esimekiksi oskillaattorin materiaalin valintaan vaikuttavat seuraavat seikat:

- materiaalin koneistettavuus
- paino
- yhteensopivuus pinnoitteen kanssa
- sähköiset ominaisuudet
- kestävyys eri olosuhteissa
- elinikä
- hinta

Mikroaaltokomponenttien valinta perustuu yleensä kahteen vaadittuun ominaisuuteen täyttävään vaihtoehtoon.

1. Yleinen materiaali, jossa on pinnoite. Materiaalilla on lyhyt elinikä, mutta se on halpa.
2. Erikoismateriaali, jolla on pitkä elinikä. Korjauksia ei tarvitse tehdä, mutta materiaali on erityisen kallis. [19]

DFM-analyysin kannalta olisi kannattavaa, jos nämä kaksi vaihtoehtoa pystyttäisiin yhdistämään. Materiaalivaihtoehtoja on paljon, joten tulisi löytää mahdollisimman halpa ja toiminnalliset vaatimukset täyttävä materiaali. Jos tämän kaltaista materiaalia ei löydy, on kehiteltävä lähimmästä vaihtoehtoisestä materiaalista haluttua vastaava.

Yhdeksäs lähestymistapa on hyödyntää koottua palautetta tuotteesta sen elinkaaren ajalta. Tuotteen korjauksista, vioista ja toiminnasta saadulla palautteella pyritään parantamaan jo olemassa olevaa tuotetta entisestään. Korjauksia ei oskillaattorille tehdä, koska sen toiminta sijoittuu avaruuteen. Sen sijaan laitteen toiminnan perusteella pyritään parantamaan uutta oskillaattoria uuteen satelliittiin.

3.2 Tutkitun oskillaattorin valmistettavuuden parantaminen

Tämän tutkimuksen konkreettiset tulokset jakautuvat kahteen pääosaan: 1) oskillaattorin ontelon valmistustarkkuuden ja oskillaattorin suorituskyvyn vaatimusten yhteensovittaminen DFM-näkökulmasta 2) muihin koneistusvaiheisiin liittyvät DFM-näkökulmat. Tuloksena saadaan ohjeet dokumenttien ja 3D -mallien kehittämisestä sekä tieto toiminnan näkökulmasta kriittisimmistä oskillaattorin hyvyyslukuun vaikuttavista tekijöistä.

1. Oskillaattorin suorituskyvyn maksimoimiseksi on tärkeää tehdä ontelosta mahdollisimman tarkka. Oskillaattorin suorituskykyä kuvataan hyvyysluvulla Q , joka on taajuuden ja tarkkuuden funktio (ks. yhtälö 1.1). Nyt taajuus on vakio 5 GHz. Oskillaattorin tarkkuusvaatimukset koostuvat mitta- ja muototarkkuusvaatimuksista sekä pinnanlaatuvaatimuksista ja keskinastan sijaintivaatimuksista. Oskillaattorin tapauksessa ei tyydytä vain tyypillisiin valmistustarkkuuden minimiarvoihin, vaan pyritään mahdollisimman tarkkaan valmistustarkkuuteen hyvyysluvun parantamiseksi.

$$Q(f, accuracy) \quad (1.1)$$

Missä, f = vakio oskillaattorin taajuus = 5 GHz.

Oskillaattorin taajuudella on suora vaikutus vaadittuun valmistuksen IT-tarkkuusasteeseen. Seuraava taulukko esittää, kuinka vaadittava valmistuksen IT-tarkkuusaste riippuu taajuudesta. Taulukkoa tulkitessa huomataan, että 5 GHz taajuuteen ei vaaditakaan niin pientä pinnankarheutta kuin lastuamiskokeissa saavutettiin, vaan suurempikin riittäisi. Kuitenkin oskillaattorille on olemassa monta muuta geometrista epätarkkuutta lisäävää tekijää, joita pyritään kompensoimaan erittäin tarkalla pinnanlaadulla.

Taulukko 1. Vaaditun toleranssiasteen arvio verrattuna toiminta taajuuteen. [45]

Taajuus (GHz)	Pinnankarheus	Toleranssiaste
300-600	0,8 μm	IT5
150-300	1,6 μm	IT6
75-150	3,2 μm	IT7
35-75	6,4 μm	IT8
<35	12,8 μm	IT9-10

Valmistustarkkuutta (accuracy) voidaan ajatella epätarkkuusien summana. Mitä pienempi epätarkkuus on, sen tarkempi kappale on. Voidaan ajatella, että oskillaattori on tarkimmillaan, kun epätarkkuuksien summa on nolla yhtälön 1.2 mukaisesti.

$$\Sigma_{inac.} = 0 \quad (1.2)$$

Epätarkkuudelle voidaan kirjoittaa yhtälö 1.3 seuraavasti

$$\Sigma_{\text{inac.}} = \Sigma_{\text{inac.}}^{\text{clu.}} + \Sigma_{\text{inac.}}^{\text{sur.}} + \Sigma_{\text{inac.}}^{\text{cer.mac.}} + \Sigma_{\text{inac.}}^{\text{mek.ass.}} + \Sigma_{\text{inac.}}^{\text{el.ass.}} - \Sigma_{\text{inac.}}^{\text{mac.}} \quad (1.3)$$

Ensimmäisen neljän työvaiheen tarkkuuteen on haasteellista vaikuttaa, sillä esimerkiksi liimaaminen on itsessään hyvin epätarkka valmistusvaihe. Kuitenkin yhtälön 1.3 viimeisellä epätarkkuudella, koneistuksen epätarkkuudella, pystytään vaikuttamaan muihin. Varmistamalla, että ontelon koneistuksen tarkkuus on viety äärimmilleen, voidaan kompensoida muiden työvaiheiden aiheuttamaa epätarkkuutta.

$\Sigma_{\text{inac.}}^{\text{clu.}}$ = Liimauksesta aiheutuva epätarkkuus syntyy ontelon sisään tulevan lasisauvan ja

kiteen samankselisuudesta sekä lasisauvan ja ontelon pohjassa olevan nastan samankselisuudesta. Liimauksien epätarkkuudet muodostavat kyseisen summan. Kide ja sauva ovat keraamisia, joten niiden työstö on vaikeaa.

$\Sigma_{\text{inac.}}^{\text{sur.}}$ = Ni + Au-pinnoitteesta aiheutuva epätarkkuus. Oskillaattorin muodon vaihtuessa,

pinnoituksen paksuus vaihtuu. Erityisesti ontelossa pinnoitteen muodostamat pyöristykset aiheuttavat epätarkkuuksia oskillaattorin toimintaan.

$\Sigma_{\text{inac.}}^{\text{cer.mac.}}$ = Keraamisten osien valmistuksesta syntyvä epätarkkuus. Keraamisia osia on hyvin

vaikea koneistaa ja yleensä ne tilataan alihankkijalta, jolloin osien mitoissa voi olla pientä mittavaihtelua.

$\Sigma_{\text{inac.}}^{\text{mek.ass.}}$ = Mekaanisen asennuksen epätarkkuus syntyy ontelon kannen keskellä olevan

viritystapin paikasta sekä kannen ja ontelon välisestä pinnan viisteestä.

$\Sigma_{\text{inac.}}^{\text{el.ass.}}$ = Sähköisen asennuksen epätarkkuus tulee suoraan tehonsyöttösilmukoiden paikan

muutoksesta piirilevyasennusten takia. Jos piirilevytasku on valmistettu vinoon, on todennäköistä, että myös tehonsyöttösilmukat tulevat resonaattorionteloon vinossa kulmassa.

$\Sigma_{mac.} =$ Koneistuksesta aiheutuva epätarkkuus.
 $inac.$

3.3 Haastattelun tulokset

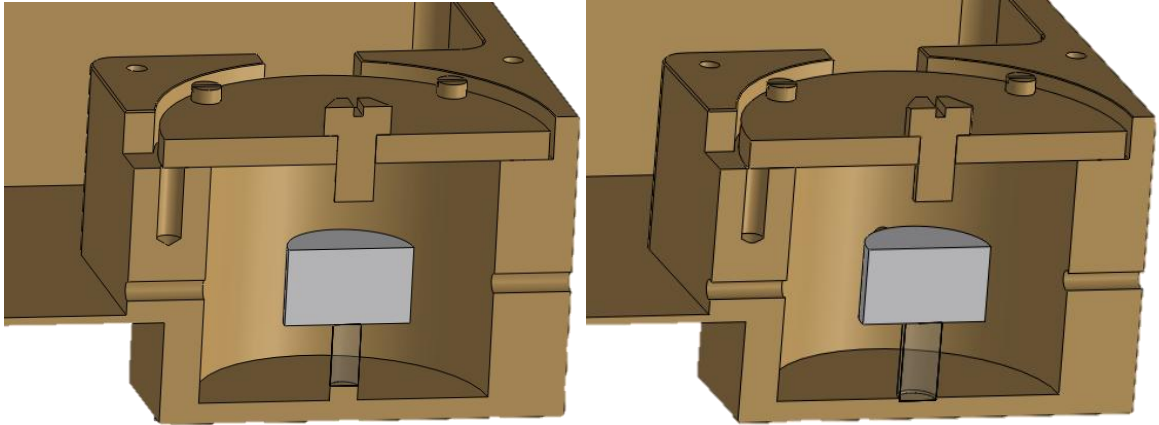
Imatran Kone Oy:n toimitusjohtaja Aimo Mauravaaraa haastateltiin tutkimusta varten 19.6.2012. Tässä kappaleessa esitellään haastattelusta saatuja tietoja sekä uusia ideoita oskillaattorin valmistukseen. Alla olevassa taulukossa vertaillaan LUT:n mittaamia valmistustarkkuuden lukuarvoja kaupallisen yrityksen antamiin, saavutettavissa oleviin valmistustarkkuuksiin. Tulokset perustuvat yritysosapuolen haastatteluun.

Taulukko 2. LUT:ssa saatuja tuloksia verrattuna Imatran Kone Oy:n arvioimiin tulosodotuksiin.

	Oskillaattorin LUT:ssa mitatut lukuarvot	Yritysosapuolen arvioimat lukuarvot
Valmistustarkkuudet (+/-mm)		
Ontelon halkaisijan mittatoleranssi	0,030/-0,030	0,007/-0,007
Ontelon korkeuden mittatoleranssi	0,003/0	0,003/0
Ontelon halkaisijan ympyrämäisyys	0,030	0,010
Nastan ja ontelon keskiakselin sama-akselisuus	0,030	0,010
Nastan korkeuden mittatoleranssi	0,003/0	0,003/0
Ontelon kannen viritysruihin paikkatoleranssi	0,100	0,010
Tehonsyöttösilmukoiden sisääntuloreikien paikkatoleranssi	0,030	0,010
Pinnanlaatu (Ra)(μm)		
Ontelon pohjan pinnankarheus (C)	0,4	0,2
Ontelon seinämän pinnankarheus	0,8	0,4
Ontelon kannen sisäpinnan pinnankarheus	0,8	0,4
Muut		
Kiinnitysten määrä	6	2
Ontelon sisänurkan pyöristyssäde (mm)	0,4	0,05

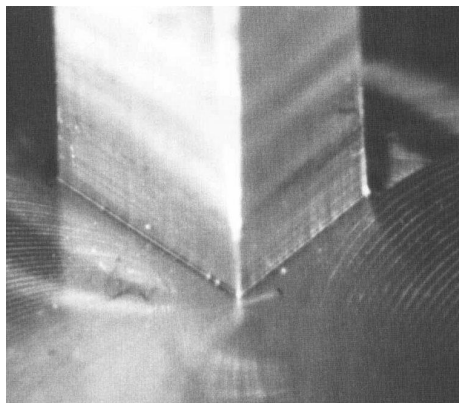
Haastattelussa tarkasteltiin keskeisimpänä aiheena resonaattoriontelon valmistusta. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, oskillaattorin toiminta paranee, mitä tarkemmaksi resonaattoriontelo on valmistettu. Ontelossa vaativimmaksi valmistaa todettiin ontelon pohjassa oleva nasta. Nastalle syntyi haastattelussa parannusvaihtoehto. Nastan sijaan ontelon pohjaan voidaan tehdä lasisauvan halkaisijan kokoinen upotus. Upotuksen ylälaita tulee jättää teräväksi, jotta MW-aaltojen etenemistä häiritseviä tarpeettomia pyöristyksiä ei synny. Upotus on esitetty

oskillaattorin leikkauksessa kuvassa 12. Tällä tavalla valmistus helpottuu sekä lasisauvan liimaamisesta pohjaan aiheutuva epätarkkuus pystytään minimoimaan.



Kuva 12. Vasemmalla puolella oskillaattorin pohja nastalla, oikealla oskillaattorin pohja upotuksella.

Oskillaattorin kannen oikealle paikalleen saamista helpottaisivat pienet asemointitapit. Tappien avulla kannen pystyisi asemoimaan ontelon keskelle, mikä helpottaisi myös säätöruuvien keskittämistä kannen keskelle. Ontelon sisäpinnan tarkkuutta parantaisi huomattavasti Ni + Au-pinnoitteen poisto ontelon sisäpinnalta. Pinnoite muodostaa tarpeettomia ja haitallisia pyöristyksiä ontelon muotoihin sekä heikentää pinnanlaatua. Pinnoite ei ole toiminnallisesti välttämätön ontelon sisäpinnalla, sillä ontelon kansi suojaa sisäpintaa ulkoisilta vaikutteilta. Pinnoitteen poistolla saavutettaisiin tarkkuutta erityisesti ontelon ylä- sekä sisänurkan terävyyteen. Tavoiteltavaa kulmanterävyyttä havainnollistava kuva saatiin eräästä toisesta mikroaaltokomponentista. Kuvassa 13 esitetään tämän mikroaaltokomponentin eräs nurkka.



Kuva 13. Nurkan terävyys saman tyyppisestä mikroaaltokomponentista. [45]

Haastattelussa ilmeni, että koneistuksen tarkkuutta voidaan parantaa mitattuun koekappaleeseen verrattuna Imatran Kone Oy:llä huomattavasti. Heidän laitteillaan on mahdollista valmistaa oskillaattori kahdella kiinnityksellä verrattuna alkuperäiseen kuuteen, sillä he käyttäisivät valmistukseen 5-akselista jyrsintä. Kuvassa 14 on esitetty 5-akselinen jyrsinkone. LUT:ssa valmistettuun oskillaattorin onteloon syntyi jyrsinnästä aiheutuvaa ympyrämuotoisuutta. Ontelon soikiomaisuus on erittäin haitallista mikroaaltojen häiriöttömän etenemisen kannalta. Haastattelussa Imatran Kone Oy:ltä löytyi tähän ongelmaan ratkaisu. Heidän mukaansa soikiomaisuus pystytään poistamaan kokonaan, jos siirrytään ontelon jyrsimisestä ontelon avartamiseen. Avartamalla saadaan aikaan täysin pyöreä geometria onteloon. Lisäksi Imatran Kone Oy:llä on lukuisia eri työkalukomponentteja, joilla lastuamisajat, pinnankarheus ja mittatarkkuus voidaan säätää halutuksi. Imatran Kone Oy ei nähnyt yhtenkään oskillaattorin rungon kohdan (Liite 1, kohta G) koneistuksen olevan heille vaikeaa. Yritysosapuolen mukaan oskillaattorin painosta noin kolmasosa voitaisiin poistaa, jos nyt käytetylle suurelle materiaalimäärälle ei ole mitään toiminnallista perustetta. Oskillaattorista voisi koneistaa ulkolaidoista sekä ontelon ulkolaidoista turhaa materiaalia pois.



Kuva 14. 5-akselinen työstökone. [47]

Haastattelussa nousi esiin mielenkiintoinen seikka tietokoneella tehtyjen mallien suorasta hyödyntämisestä valmistuksessa. Vaikka eletäänkin tietokoneiden aikakautta ja nimellimitat saadaan suoraan 3D-CAD-malleista hyödynnettyä, on toleranssien esittäminen 2D-piirroksissa edelleen välttämätöntä.

Imatran Kone Oy on erikoistunut vaikeasti valmistettaviin mittatarkkojen piensarjojen tuotantoon. Heidän näkemyksestään yleistoleroidulla kappaleella tai parhaan mahdollisen valmistustarkkuuden omaavalla kappaleella, mittaukset mukaan lukien, lastuamisaikojen ero

on 3...5-kertainen. Jyrsintään kuluvan lastuamisajan osuus oskillaattorin resonaattoriontelolle, on 40-50%, jos valmistetaan mahdollisimman tarkka kappale. LUT:ssa tehdyn kokeen mukaan jyrsintään, porauksiin ja kierteytyksiin kului noin 31 minuuttia. Jyrsimiseen kului noin 9,5 minuuttia, josta resonaattoriontelon ja piirilevytaskun jyrsimiseen kului noin 7 minuuttia. Haastattelun perusteella voidaan todeta, että 31 minuutista kuluu noin 15 minuuttia pelkästään resonaattoriontelon valmistukseen. Kappaleen kääntöjä ei huomioitu näissä mittauksissa, joten voidaan olettaa, että kappaleen valmistukseen menee vieläkin kauemmin. Kalleimpana vaiheena yrityksessä todettiin ontelon mittatarkkuuden saavutus mittauksineen. Hinta-arvio pyydettiin, jotta varmistettiin, että yrityksen antamat tarkkuudet ovat luotettavia.

Teollisesta näkökulmasta Imatran Kone Oy näki, että EN-AW 5754 (AlMg3) suositeltavampi materiaali olisi EN-AW 7075. Taulukossa 3 on vertailtu kyseisten materiaalien ominaisuuksia.

Taulukko 3. EN-AW 5754 sekä EN-AW 7075 ominaisuudet. (Muokattu lähteestä [19])

Materiaali	EN-AW 5754 AlMg3	EN-AW 7075 AlZn5,5MgCu
Sähkönjohtavuus (%IACS)	35 - 40	33
Suhteellinen permeabiliteetti	1	1
CTE (ppm)	$23.70 \cdot 10^{-6}$	$23.4 \cdot 10^{-6}$
Läpäisy syvyys 1 GHz taajuudella	3.53 μm (IACS 35%)	N/A
Läpäisy syvyys 10 GHz taajuudella	1.12 μm (IACS 35%)	N/A
Kimmomoduuli (kN/mm^2)	70	71
Tiheys (kg/dm^3)	2.66	2.80
Pintakäsittely vaatimus	ei	ei

2. Muut koneistusvaiheet sisältävät poraukset sekä kultapinnoituksen.

Poraukset

Oskillaattorin poraukset tehdään jyrshintäyövaiheiden välissä. Näin ollen poraukset tehdään samoilla kiinnityksillä kuin jyrshintä. Seuraavassa kappaleessa poraukset käsitellään vain lyhyesti.

Oskillaattorin rungossa on paljon porauksia. Siihen tulee oskillaattorin kannen, ontelon kannen, SMA-liittimien ja tehonsyöttösilmukoiden poraukset. SMA-liittimet näkyvät kuvassa 15. Ontelon kannen ja oskillaattorin kannen kiinnitysruuvien määrän määrittää sähköinen tiiveys. Ruuvien maksimietäisyys lasketaan alla olevalla yhtälöllä 1.4.

$$L_{\max} = \lambda/4 \quad (1.4)$$

missä λ on aallonpituus. Toinen vakiona pysyvä ruuvien määrä ja koko tulee standardiliittimistä. Sekä valmistuksellisesti että toiminnallisesti haasteellisempia porauksia ovat tehonsyöttösilmukoiden sisääntuloreiät sylinterin sisäpinnalla. Haasteellista on reikien poraaminen pyöreään pintaan sekä pitkän poranterän käyttö, sillä reiät joudutaan poraamaan oskillaattorin ulkopinnalta.



Kuva 15. SMA-liittimet.

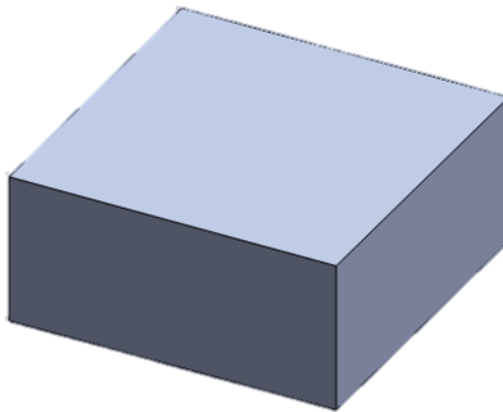
Kultapinnoitus

Kultapinnoitus on yksi avaruusteknologian vaatimus. Ympäristön luomat rasitukset voidaan jakaa neljään ryhmään, jotka ovat korroosio avaruudessa, atomisuihkun aiheuttama eroosio, lämpötilojen rasitus ja saastumisen seuraukset. Kulta ja platina suojaavat erityisen hyvin korroosiolta avaruudessa. Tämän vuoksi juuri niitä käytetään paljon pinnoitteena avaruusteknologiassa. Oskillaattori oli alunperin pelkästään kultapinnoitettu, mutta alumiinin ja kullan koskettaessa toisiaan epäjalompi syöpyy. Tämän takia käytettiin pientä kerrosta nikkeliä alumiinin ja kullan välissä. Lisäksi nikkeli auttaa kultapinnoitteen kiinnipysymisessä.

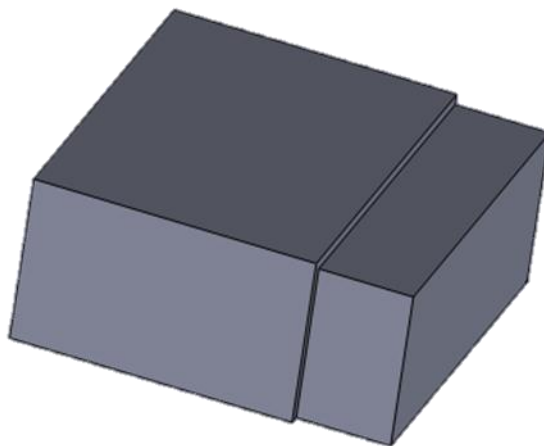
Toinen ongelma oli avaruuden aiheuttama eroosio. Kulta-nikkelipinnoite suojaa oskillaattoria atomi- ja ionisuihkulta. Avaruudessa on myös rajuja lämpötilanvaihteluja, jotka kultapinnoitteen tulee kestää.

3.4 Simuloidut satelliittioskillaattorin koneistusvaiheet

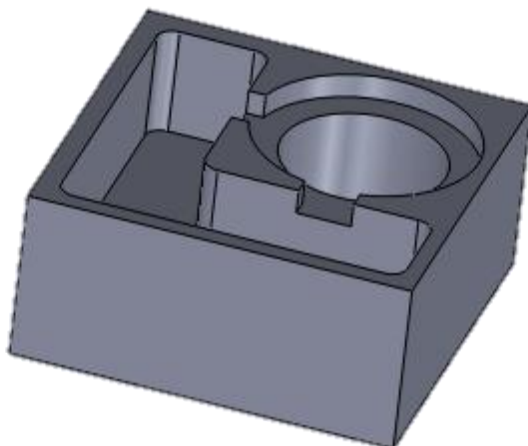
Seuraavissa kuvissa 16-21 esitellään satelliittioskillaattorin valmistusvaiheet.



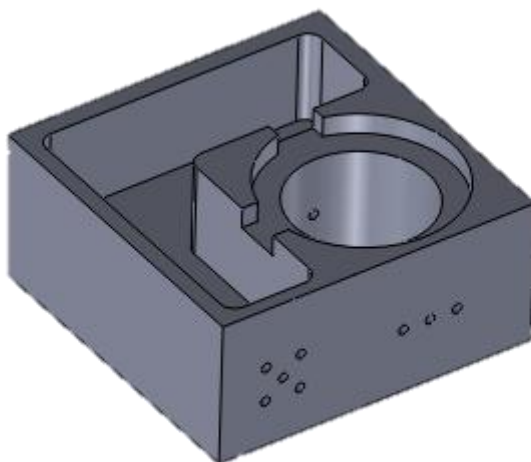
Kuva 16. Vaihe 1: Valmistetaan sopivan kokoinen aihio.



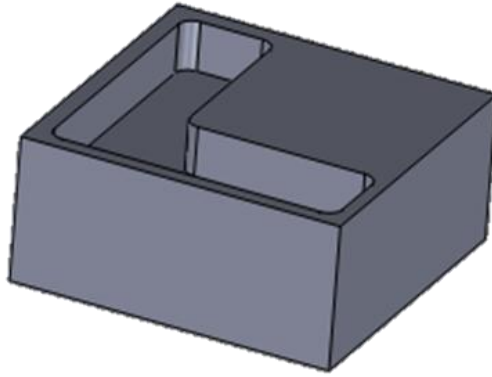
Kuva 17. Vaihe 2: Jyrsitään oskillaattorin sivut sekä tasoitetaan yläpinta.



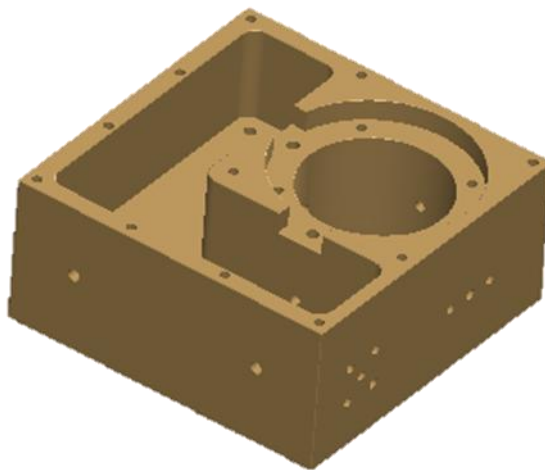
Kuva 18. Vaihe 3: Jyrsitään piirilevytasku ja resonaattoriontelo.



Kuva 19. Vaihe 4: Tehdään poraukset ja kierteytykset oskillaattorin sivuihin ja pinnalle.



Kuva 20. Vaihe 5: Käännetään kappale, ja jyrsitään pohja.



Kuva 21. Vaihe 6: Oskillaattorin nikkeli+kulta-pinnoittaminen.

3.5 Mikroaaltokomponenttien valmistuksen DFM sääntöjä

Tutkimuksen yleistettävänä tuloksina saadaan mikroaaltokomponenttien valmistuksen DFM sääntöjä.

Mikroaaltokomponenttien suunnittelussa ja valmistuksessa on kaksi tärkeää asiaa, jotka tulisi miettiä etukäteen. Ensimmäinen on valmistusmenetelmän valinta. Valmistusmenetelmä tulee valita niin, että kaikki muoto-, mitta- sekä toiminnalliset vaatimukset täytetään. Toinen tärkeä asia on valita kyseiseen valmistusmenetelmään parhaiten sopivat työkalut valmistettavan kappaleen materiaali huomioon ottaen. [45]

MW -mekaniikan komponenttien valmistukseen suositellaan käytettäväksi CNC-koneistusta (computer based numerical control) sen tarkkuuden takia. Suurimmat kappaleen laatua heikentävät tekijät aiheutuvat koneistuksessa syntyvistä lastuamisvoimista. Voimien takia on kiinnitettävä huomiota materiaalin valintaan sekä kappaleen huolelliseen kiinnittämiseen. Seuraavaksi on esitelty muutamia perussääntöjä, jotka sopivat mikroaaltokomponentin koneistuksen suunnitteluun.

- Minimoi lastuttava materiaali
- Minimoi kiinnitysten määrä
- Varaa tilaa kiinnittämistä sekä työkaluja varten
- Käytä tarvittava määrä tukia, jos kappale on ohut tai joustava
- Käytä standardigeometrioita, jotta voidaan hyödyntää standardityökaluja
- Poraaminen on helppoa kohtisuoraa pintaa vasten

[45]

Mikroaaltokomponenttien oikeanlaisen toiminnan kannalta on tärkeää, että komponentti on mahdollisimman muoto- ja mittatarkka. Mikäli näissä on poikkeamia, se saattaa johtaa mikroaaltojen epämääräiseen etenemiseen ja komponentin alentuneeseen sähköiseen suorituskykyyn. Seuraavassa on esitelty mikroaaltokomponenttien toiminnan kannalta tärkeitä sääntöjä.

- Suunnittele äärimmäisen terävät nurkat
- Tarkka SMA-liittimien paikkatoleranssi
- Suunnittele kappaleen sivut kohtisuoraksi pohjaan nähden
- Resonaattoriontelon nastalle tarkka paikka ja halkaisija
- Tee kokoonpanosta (ainakin) sähköisesti tiivis
- Käytä suurinta mahdollista kiinnitysruuvien etäisyyttä
- Mahdollisimman tarkka pinnanlaatu sisäpinnoitteelle
- Ei vinoja geometrioita runkoon

[45]

4 POHDINTA

Tutkitun oskillaattorin lastuavan työstön DFM-analyysi on ollut perusteltua, koska vain tarkalla koneistuksella pystytään kompensoimaan muista valmistusvaiheista syntyvät epätarkkuudet. Tämän tyyppinen komponentti aiheuttaa normaalisti tuotannon pullonkauloja.

Tämän tutkimuksen näkökulmasta suhteellisen tarkkoja vaiheita ovat koneistukset ja mittaukset. Lisäksi tiedetään, että suhteellisen epätarkkoja vaiheita, jotka suoritetaan itse, ovat

- liimaus
 - esikäsitteily ja asemointi
 - keraamisten osien oikea koko
 - alihankkijalta tai omalta konepajalta
- mekaaninen kokoonpano
- viritys

Eräs huomio lastuavaan työstöön on, että konetyypistä riippuen valmistuksen aikana tarvittava kappaleen kiinnityskertojen määrä muuttuu. Tämä on suoraan verrannollinen tuotannon jouhevuuteen. Huomattavan suuri osa lastuavan työstön ajasta kuluu M2,05 kierreleikien valmistukseen, eikä itse kotelon valmistukseen. Porauksiin ja kierteytyksiin kuluva kokonaisaika on noin 20 minuuttia, joka on huomattavan paljon verrattuna jyräntään kuluvaan 9,5 minuuttiin.

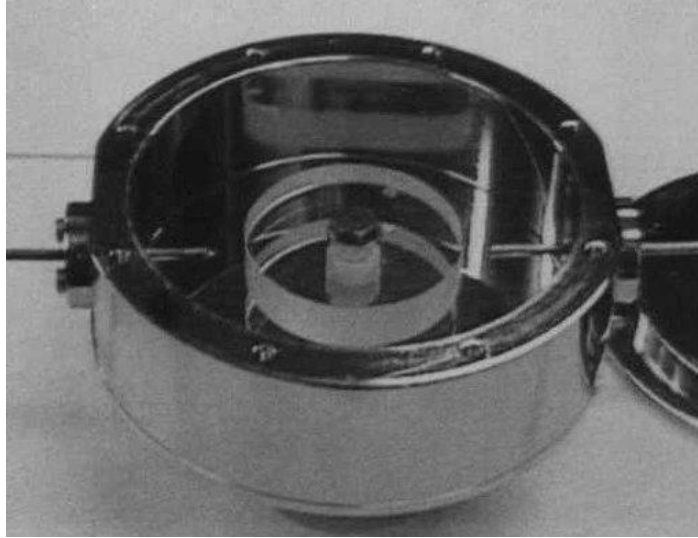
4.1 Reliabiliteetti ja validiteetti

Tutkimuksessa käytettiin tutkimusmenetelmänä triangulaatiota. Triangulaation avulla saatiin luotettavaa tietoa tarkasteltaessa samaa asiaa kolmesta eri näkökulmasta. Tutkimuksessa käytettiin todellista kappaletta, mikä todentaa kaikkien simulaatioiden luotettavuutta. Yrityshaastattelussa pyydettiin yritysosapuolelta oskillaattorin rungosta sitova tarjous, jonka avulla pystyttiin vakuuttamaan yrityksen lupaamien valmistustarkkuuden lukuarvojen realistisuudesta. Lisäksi todistusvoimaa kasvattavat LUT:ssa tehdyt noin 40 aiheeseen liittyvää tutkimusta, joihin on viitattu tässä työssä.

4.2 Vertailu aikaisempiin tutkimuksiin

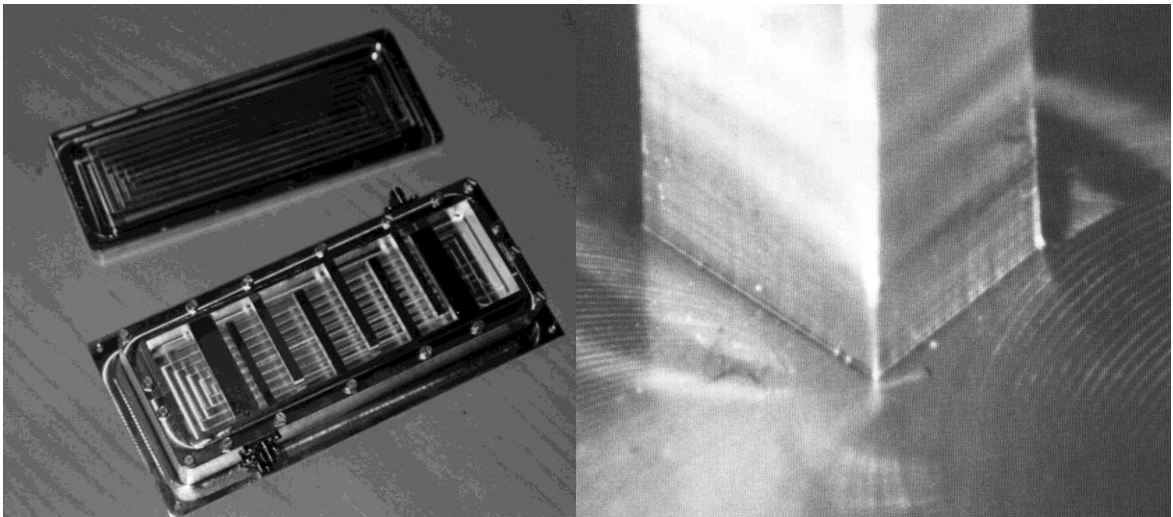
Satelliitti oskillaattorilla on lukuisia yhtymäkohtia aikaisemmin LUT:ssa tutkittuihin mikroaaltokomponentteihin. Seuraavassa niistä on esitelty muutama.

Yksi suurimmista yhtenevyyksistä löydettiin kuvan 22 mukaisesta rengasresonattorista, siinä on lähes samanlainen nasta kuin tutkitussa oskillaattorissa, tosin se on paljon isompi. Saman tyyppinen nasta vaatii samanlaisia pinnanlaatu- sekä muotovaatimuksia.



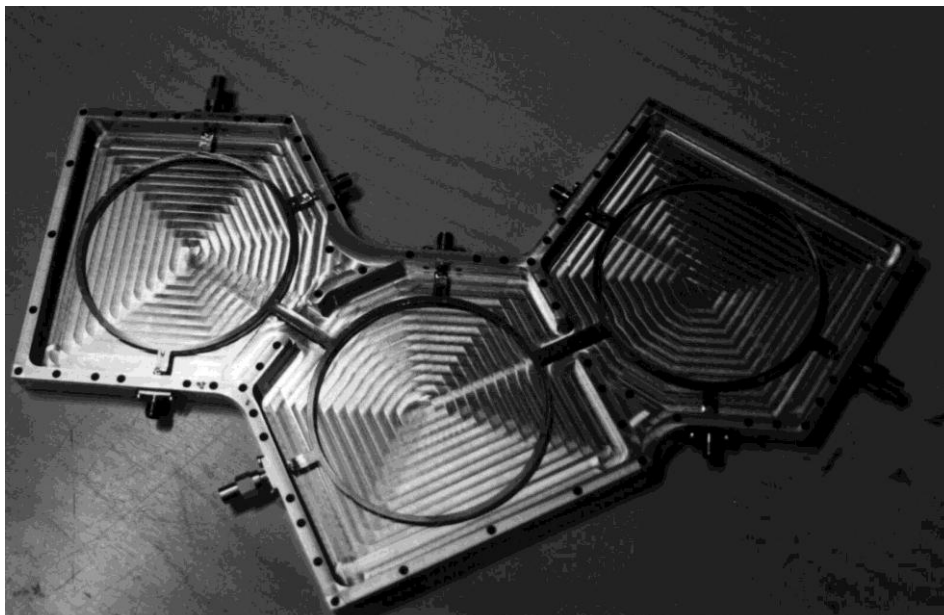
Kuva 22. Pyörähdyssymmetrinen onteloresonaattori. [45]

Seuraavana yhtenevyytenä on nurkan terävyys, jota vaaditaan mikroaallojen etenemisen häiriöttömyyden varmistamiseen. Oskillaattorissa vaadittiin hyvin terävät nurkat varsinkin ontelossa. Myös mikroaaltosuodattimen oikeanlainen toiminta vaatii terävät nurkat. Esimerkki MW-suodattimesta on nähtävissä kuvassa 23.



Kuva 23. Mikroaaltosuodatin ja sen eräs nurkka. [45]

Lähes jokaisesta mikroaaltokomponentista löytyy myös SMA-liittimet. Liittimet löytyvät molemmista edellä mainituista komponenteista, tutkitusta oskillaattorista sekä kuvassa 24 esitetystä rengashybridistä.



Kuva 24. Rengashybridi, jossa SMA-liittimiä. [45]

4.3 Objektiivisuus

Tässä tutkimuksessa sovelletun triangulaation hyvä puoli on luotettavuus tarkasteltaessa kolmesta eri suunnasta asiaa. Kuitenkin vaarana on, että uuden näkökulman sijaan toistetaan jo olemassa olevaa. Olemassa oli vain yhden valmistajan yksi satelliittioskillaattori, joten tulokset jäivät vertailun kannalta rajallisiksi. Tämän kandidaatintyön puitteissa ei päästy tekemään sähköisiä suorituskykymittauksia oskillaattorin ominaisuuksista.

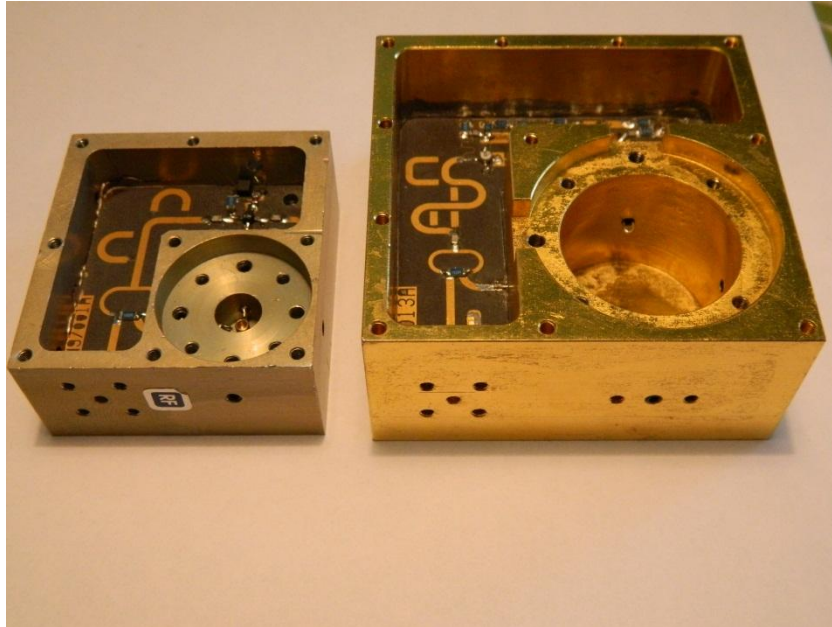
4.4 Avaintulokset

1. Oskillaattorin hyvyysluvun maksimoimiseksi oli suhteellisen helppoa parantaa koneistettavien muotojen ja mittojen valmistustarkkuutta.
2. Tämän tyyppisessä mekaniikkaa ja elektroniikkaa yhdistävässä tuotteessa tuotannon pullonkaulojen selvittämiseksi ei riitä pelkkä lastuamisen analysointi, vaan vaaditaan analyysi kaikista valmistusvaiheista.
3. Oskillaattorissa on kohteita, joiden geometriaa voisi parantaa valmistettavuuden helpottamiseksi, kuten esimerkiksi ontelon nastan vaihtaminen upotukseksi.

4.5 Tulosten merkitys

Tutkimuksen tuloksilla on uutuusarvoa. Uutena tietona voidaan pitää oskillaattorin hyvyysluvun maksimointia samalla kun pyritään pitämään teollinen tuotanto mahdollisimman tehokkaana. Lisäksi tulosten arvoa lisää se, ettei simulointia tehty pelkästään sähköisten

ominaisuuksien varmistamiseksi, vaan myös lastuavan työstön tehokkuuden analysoimiseksi. Tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää myös tuoteperheelle, eli toiselle samankaltaiselle oskillaattorille eri mittakaavassa. Pienempi oskillaattori on esitelty isomman kanssa kuvassa 25.



Kuva 25. Oskillaattorien tuoteperhettä.

4.6 Jatkotutkimusaiheita

Tämän tutkimuksen yhteydessä esille nousseita oskillaattoria koskevia jatkotutkimusaiheita ovat seuraavat:

- Kokoonpanonäkökohdat, erityisesti ruuvien määrä
- Pätevätkö saadut havainnot myös tuoteperheelle, joissa on samanlaisia rakenteita?
- Timanttipinnoite vaihtoehtona kultapinnoitteelle
- Voiko oskillaattorin ontelon toteuttaa erillisenä rakenteena?

5 YHTEENVETO

Tässä työssä tuotettiin malli, satelliittioskillaattorin DFM-analyysin toteuttamista varten. Työ painottui tarkastelemaan oskillaattorin rungon jysintävaiheita. Tutkimuksen tavoitteena oli tuottaa oskillaattorin valmistusta helpottavia ja nopeuttavia ohjeita ja säätöjä.

Johtopäätöksinä huomattiin, että oskillaattorin valmistusprosessi sisältää useita parannusvaihtoehtoja. Oskillaattorin oikean toiminnan kannalta oli tärkeää, että hyvyysluvun maksimoinissa onnistuttiin parantamalla koneistettavuutta sekä kokoonpanoa. Oskillaattorin DFM-analyysin avulla pystyttiin tarkastelemaan oskillaattorin koko valmistusvaiheiden ketjua ja huomattiin, että koneistukseen liittyviä parannuksia löydettiin perus DFM-sääntöjä noudattamalla sekä soveltamalla. Tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että muutamilla muutoksilla suunnittelussa voidaan saavuttaa entistäkin virheettömämpi ja toimivampi tuote.

LÄHTEET

- [1] Rehg. J., Kraebber. H., Computer-Integrated Manufacturing, 2001, s.138 - 144 ISBN 0-13-087553-8
- [2] Peter B. de Selding, "Spectratime To Build More Atomic Clocks for Galileo" Space News, 14.6.2012
- [3] Ruusu vuori, J. ja Tiittula, L. (2005) Haastattelu – tutkimus, tilanteet ja vuorovaikutus. Vastapaino, Helsinki.
- [4] Eskelinen H & al., Observations on the manufacturability of mechanical subassemblies for remote sensing transducers. Proceedings of the XXIII Convention on Radio Science and Remote Sensing Symposium, URSI, Remote Sensing Club of Finland, IEEE. HUT, 24. -25.8.1998. P. 167-168. ISSN 0786-8154.
- [5] Eskelinen H & al., Improving the performance of mechanical microwave subassemblies for telecommunication electronics. Proceedings of the 15th International Conference on Production Research (ICPR). University of Limerick, 9. -13.8.1999. 4 p.
- [6] Eskelinen H & al., Manufacturability of all-metallic passive high power RF-components in volume production. Proceedings of the URSI/IEEE XXIV Convention on Radio Science, Turku, 4. - 5.10.1999. 2 p. ISSN 0789-6719. ISBN 951-29-1531-6.
- [7] Eskelinen H & al., Assembly considerations of high power wide-band patch antenna arrays, Proc. of the Antennas and Propagation 2000-conference, Davos 9.-14.4.2000, ISBN 92-9092-776-3
- [8] Eskelinen H., Varis J., Ström J. & Heinola J-P., "DFM(A)- Aspects for an E-Plane Waveguide Ring Resonator Design, 23rd International Manufacturing Conference (IMC23), 30.8-1.9.2006, University of Ulster, Northern Ireland
- [9] Eskelinen H., Ström J-P., DFM(A)-Aspects of an Advanced Cable Gland Design, Lappeenranta University of Technology, Faculty of Technology, Department of Mechanical Engineering, Research Report 73/2008, ISBN 978-952-214-449-2 (Paper back), ISBN 978-952-214-450-8 (PDF), ISSN 1459-2932
- [10] Ström, Juha-Pekka & Eskelinen, Harri & Silventoinen, Pertti, Manufacturability and assembly aspects of an advanced cable gland design for an electrical motor drive, International Journal of Design Engineering, 2009, vol. 2, nro. 1, p. 26-46, ISSN 1751-5874.
- [11] Eskelinen H & al., Using manufacturability analysis for the efficient design of microwave mechanics. Engineering Mechanics (Association for Engineering Mechanics) 1999. V. 6, n. 1, p. 71-74. ISSN 1210-2717.

- [12] Eskelinen H & al., Manufacturability analysis - A useful subset of systems engineering. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1999. V. 14, n. 2, p. 33 – 35. ISSN 0885-8985.
- [13] Eskelinen H & al., Developing design methodology and DFMA-approach for passive microwave mechanics, Proc. of Nord Design 2000-conference, Copenhagen 24.-25.8.2000, ISBN 87-90130-28-6
- [14] Eskelinen H & al., Novel DFMA-tools for passive MW- and RF-components in cost-effective mass production, Proc. of EuMW-conference, Paris 3.-5.10.2000, ISBN 0 86213 212 6
- [15] Eskelinen H & al., Improving the Productivity of Complex Electronic Systems Design by Utilizing Applied Design Methodologies, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, Vol 16, N.10, 2001, ISSN 0885-8985
- [16] Eskelinen H., Lähti K-P. & Silventoinen P., “DFM(A)- Aspects for an SMA Connector Design, LUT 2004, Department of Mechanical Engineering”, Research report 53, ISBN 951-764-946-0, ISSN 1459-2932, 40 pages
- [17] Lipsanen A., Eskelinen H., & Silventoinen P., “DFM(A)- Aspects for a Fixed Electrical Attenuator Design”, LUT 2004, Department of Mechanical Engineering”, Research report 54, ISBN 951-764-953-3, ISSN 1459-2932, 30 pages
- [18] Eskelinen H., Tuunanen M., Suoranta R. & Silventoinen P., “DFM(A)- Aspects for a Horn Antenna Design” LUT 2004, Department of Mechanical Engineering”, Research report 55, ISBN 951-764-955-X, ISSN 1459-2932, 34 pages
- [19] Eskelinen H., Heinola J-M. & Silventoinen P., “DFM(A)- Aspects for a Microwave Waveguide Ring Resonator Design, Department of Mechanical Engineering, LUT 2004, Research report 56, ISBN 951-764-958-4, ISSN 1459-2932, 37 pages
- [20] Eskelinen H., Kettunen M., & Silventoinen P., “DFM/DFM(A) – Analysis and Aspects of Applying Systematic Engineering for A Microwave Test-Fixture Design”, Department of Mechanical Engineering, LUT 2004, Research report 58, ISBN 951-764-970-3, ISSN 1459-2932, 36 pages
- [21] Eskelinen H & al., Suggestions for finding optimum materials and manufacturing methods for metallic microwave cavity resonators. Proceedings of the 13th European Frequency and Time Forum and 1999 IEEE International Frequency Control Symposium. Besancon, 13. -16.4.1999. 6 p.
- [22] Eskelinen H & al., Observations on the manufacturability of mechanical subassemblies for maritime and missile electronics. Proceedings of the 5th International Conference on Radar Systems, IEEE-AES. Brest, 18. -20.5.1999. Poster session of subassemblies, p. 1-6.

- [23] Eskelinen H., Heinola J-M., & Varis J.P, " Manufacturing of modified SMA-connector made of CU-OF copper to fulfil MIL-standard specifications", IMC22, Proc. of the 22nd International Conference, Dublin, Ireland, 31.8.-2.9.2005, pp.123-129, ISBN 0-9551218-0-9
- [24] Eskelinen H & al., Shock tests with a phase locked crystal oscillator, Proc. of the 14th EFTF-conference, Torino 14.-16.2.2000
- [25] Eskelinen H., Heinola J-M., & Silventoinen P., "A phase locked crystal oscillator design to withstand long-term vibration loading", 19th European Frequency & Time Forum and 2003 IEEE International Frequency Control Symposium, Besancon, France, 22.-24.3.2005.
- [26] Eskelinen H., Havia E., & Heinola J-M., "Effects of Corroding Compounds on the Reliability of Soldered Joints inside Enclosures for Electronics", EltuPak, Pori, 19.-20.5.2005, ss. 46-52, ISBN 952-15-1362-4, ISSN 1795-2166
- [27] Eskelinen H & al., Weldability analysis guides the joining process in microwave mechanics. Proceedings of the 9th International Conference on the Joining of Materials (JOM, Institute for Joining of Materials). Helsingor, 16. -19.5.1999. P. 157-163.
- [28] Eskelinen H & al., Weldability issues of mechanical subassemblies for harsh environment electronics. Proceedings of the International Welding Conference on Efficient Welding and Industrial Applications (ICEWIA). LUT, 25. – 27.8.1999. 8 p. ISBN 951-764-351-9.
- [29] Eskelinen H & al., Computer integrated use of CAE and microwave mechanics simulation in welded stripline filter design, Proc. of the TWI-conference Computer Technology in Welding and Manufacturing, Copenhagen, 6.-6.6.2000
- [30] Eskelinen H & al., Joining instructions for welded MW-mechanics, Proc. of the International Conference on the Joining of Materials, JOM-10, May 11-14,2001, Helsingor, Denmark, ISBN 87-89582-097-1
- [31] Eskelinen H & al., Joining Instructions for Welded MW-Mechanics, International Journal for the Joining of Materials, Vol 13, N. 1, 2001, ISSN 0905-6866
- [32] Eskelinen H & al., Application of ultrasonic welding for joining of aluminium and copper alloy parts of a microwave component, Australasian Welding Journal, Vol. 48, 1st Quarter, 2003, p. 42 - 47, ISSN 1039-0642
- [33] Eskelinen P, & Eskelinen H., "Conductive Joints in Prototyping and Field Repair of Radio Frequency Devices, International Journal for the Joining of Materials, Vol 16, N. 1, p. 15-19, March 2004, ISSN 0905-6866

- [34] Eskelinen H & al., Hermeticity, inner atmosphere properties and heat distribution measurements of welded enclosures for electronics, International Journal for the Joining of Materials, Vol 15, N. 3, p. 1-4, September 2003, ISSN 0905-6866
- [35] Eskelinen H & al., Projection welding application for encapsulating electronics, International Journal for the Joining of Materials, Vol 14, N. 1/2, June 2002, ISSN 0905-6866
- [36] Eskelinen H & al., Laser processing - an optimal tool for encapsulating electronics. Proceedings of the 7th Nordic Conference in Laser Processing of Materials (NOLAMP). LUT, 23. - 25.8.1999. 6 p. ISBN 951-764-350-0.
- [37] Eskelinen H & al., A look at optimised laser processing for the manufacturing of passive microwave modules. Proceedings of the 29th European Microwave Conference. München, 4. – 8.10.1999. P 365-368. ISBN 08 6213 1529.
- [38] Eskelinen H & al., A mathematical tool for optimising limited volume laser production of passive microwave components, Proc. of the Stimulating manufacturing excellence in small and medium enterprises SMSSME-2000-conference, Coventry, 16.-20.4.2000, ISBN 0905949862
- [39] Eskelinen H & al., Application of concurrent engineering in innovative manufacturing and design of a milled microwave filter construction, Proc. of the Managing Innovative Manufacturing MIM2000-conference, Birmingham 17.-19.7.2000, ISBN 0-86176-653-9
- [40] Eskelinen H., & Heinola J-M., Utilizing Probability Distributions of Manufacturing Accuracy of Low Loss Band Pass Filter for Support System Design, URSI/IEEE XXIX Convention on Radio Science, Espoo, 1.-2.11.2004, ISBN 951-38-6295-X, ISSN 0357-0387, pages 83-86
- [41] Merja Huhtala, Anna-Niina Räsänen, Mika Lohtander, Harri Eskelinen, Juha Varis, DFMA-Aspects of sheet metal product in case of low-cost strategy, paper 99, USB Proceedings, IEEE ISAM 2011, 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing ,25th-27th May 2011 Tampere Hall Tampere, Finland , IEEE Catalog Number: CFP11ATP-USB, ISBN: 978-1-61284-341-4
- [42] Mika Lohtander, Harri Eskelinen, Juha Varis, Observations of Applying DFM(A) in MW Mechanics and Sheet Metal Work, paper 143, USB Proceedings, IEEE ISAM 2011, 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing ,25th-27th May 2011 Tampere Hall Tampere, Finland , IEEE Catalog Number: CFP11ATP-USB, ISBN: 978-1-61284-341-4
- [43] Lohtander M, Eskelinen H, Varis J: "Review of DFMA aspects to design modern MW- and sheet metal products", The 4th International Conference on Advanced Design and Manufacturing (ADM2011) ,Kunming, China, 21th -23rd September 2011

[44] Lohtander M, Eskelinen H, Varis J: "Review of Design for Manufacturing and Assembly Aspects to Designing Modern Micro-wave and Sheet Metal Products" Key Engineering Materials Vol. 486 (2011) pp 9-12, Trans Tech Publications, Switzerland, ISSN: 1662-9795

[45] Eskelinen, H. & al.; Microwave Mechanics Components, Artech House, New York / London, 3 / 2003, ISBN 1-58053-368-X.

[46] Pere A, Koneenpiirustus I, s.47-49 1994, ISBN 951-97096-0-6

[47] <http://www.mhakala.fi/tiedostot/kuvat/Sorvit/PumaMX2500.jpg>

LIITTEET

Liite 1. Haastattelun kysymykset

A Saavutettava valmistustarkkuus

1. Mihin tarkkuusluokkiin (IT-aste) olisi mahdollista päästä seuraavissa tapauksissa:
 - a. Ontelon halkaisijan mittatoleranssi?
 - b. Ontelon halkaisijan ympyrämäisyys?
 - c. Ontelon korkeuden mittatoleranssi?
 - d. Ontelon pohjan nastan sama-akselisuus ontelon keskiakselin kanssa?
 - e. Ontelon pohjan nastan korkeuden mittatoleranssi?
 - f. Tehonsyöttösilmukoiden sisääntuloreikien paikkatoleranssi?
 - g. Ontelon kannen keskellä olevan viritysruuvien paikkatoleranssi?
2. Mihin pinnanlaatuun päästään ontelossa seuraavissa tapauksissa:
 - a. Pohjan pinnankarheus (Ra) eri työstöradoilla M, C, R ?
 - b. Ontelon seinämän pinnankarheus?
 - c. Ontelon kannen sisäpinnan pinnankarheus?

B Valmistusvaiheisiin ja kappaleen kiinnitykseen liittyvät kysymykset

3. Montako kappaleen kiinnitys/irrotus-vaihetta teidän kone- ja kiinnitin valikoimaa käyttäen on tarpeen?
4. Ontelon sisänurkan pienin saavutettavissa oleva pyöristyssäde?
5. Millainen pinnankarheus olisi sopiva Ni+Au-pinnoitteelle?
6. Mitä vaihtoehtoisia tapoja olisi koneistaa mahdollisimman mitta- ja muototarkka ontelo?
7. Onko piirilevyn koneistetun taskun seinämän minimipaksuudelle jokin valmistuksellinen raja-arvo (kierrereiän etäisyys sisä/ulkoseinästä) ?

C Valmistusdokumentteja koskevat näkökulmat

8. Voitteko hyödyntää SolidWorks-malleja suoraan koneistuksen ohjauksessa?
9. Miten toleranssien sallittu vaihteluväli otetaan huomioon SolidWorks-malleja käytettäessä?
10. Voiko alkuperäisestä SolidWorks-mallista lähtien valmistaa suoraan mittakaavamuutoksella suuremman/pienemmän kappaleen?
11. Onko oheisissa 2D-dokumenteissa joitakin merkintöjä, joita muuttamalla, lisäämällä tai poistamalla voisi helpottaa valmistusta?

D Materiaaliin liittyvät kysymykset

12. Alkuperäinen materiaali on AlMg3 (EN-AW 5754), olisiko teidän näkökulmasta jokin toinen alumiiniseos valmistettavuuden (ml. pinnoitus) näkökulmasta parempi vaihtoehto?

E Lastuamisaikaan liittyvät näkökulmat

13. Millainen on lastuamisaikojen ero jos pyritään mahdollisimman tarkkaan onteloon tai jos tyydytään helposti saavutettavaan valmistuksen laatuun?
14. Kuinka suuri osuus kokonaislastuamisajasta on ontelon koneistus?

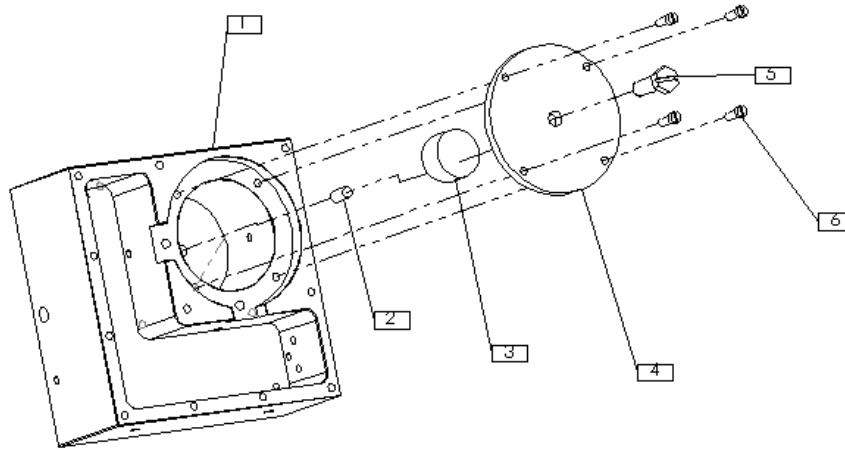
F Valmistuskustannuksiin liittyvät näkökulmat

15. Mihin hintaluokkaan kappaleen koneistus (ilman pinnoitusta) asettuu (0...200, 200...1000, 1000...3000, 3000...5000 €), jos tehdään mahdollisimman laadukas ja vain 3 kpl sarja.
16. Miten hintaluokka muuttuu, jos kappalemäärä olisi 1000 kpl?
17. Mikä kappaleessa on kustannusten kannalta kallein vaihe (pl. kultapinnoite)?

G Toiminnan asettamien vaatimusten täytyminen

18. Kuinka ongelmallisina näette seuraavien muotojen valmistamisen (esim. asteikolla 0...10, 0 on vaikein):
- SMA-liittimien asennusreikien poraukset ja kierteytykset?
 - Pohja- ja päällyskansien kiinnitysreikien poraukset ja kierteytykset?
 - Ontelon kannen kiinnitysreikien poraukset ja kierteytykset?
 - Ontelon suuntaisten läpireikien poraukset?
 - Onteloon avautuvien syöttösilmukoiden asennusreikien poraukset?
 - Ontelon pohjan nastan koneistus?

Liite 3. Satelliittioskillaattorin räjäytyskuva sekä osaluettelo



SUOMI		RUOHO		SUOMI		SUOMI	
SUOMI		SUOMI		SUOMI		SUOMI	
SUOMI		SUOMI		SUOMI		SUOMI	
				Räjätyskuva			
				2		A3	

Osa	Kuvaus	Määrä	Aine	Viittaukset
1	Satelliittioskillaattori	1	EN-AW 5754	Ni+Au pinnoitus
2	Lasisauva	1	CA15	
3	Keraaminen kide	1	E4230	
4	Kansi	1	EN-AW 5754	Ni+Au pinnoitus
5	Säätöruuvi	1	M4 Z	Ni+Au pinnoitus
6	Ruuvi	4	M2.05 Z	Ni+Au pinnoitus