

Opinnäytetyö (YAMK)

Ohjelmistotekniikka ja ICT

2020

Jani Jokiranta
Ville Mynttinen
Jukka Saarenlaita

TRANSPONDERIN LÄMPÖKALIBROINTITYÖVAIHEEN TEHOSTAMINEN



OPINNÄYTETYÖ (YAMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ohjelmistotekniikka ja ICT

2020 | 59 sivua

Jani Jokiranta

Ville Mynttinen

Jukka Saarenlaita

TRANSPONDERIN LÄMPÖKALIBROINTITYÖVAIHEEN TEHOSTAMINEN

Työssä tutkittiin kohdeyrityksen tuotannon tehostamista transponderituotteen lämpökaliibroinnin osalta. Transponderi on kaapelitelevisioverkon lisälaitte, jota käytetään mittaukseen ja etähallintaan. Sen toimintalämpötila-alue on laaja, sillä sitä käytetään ulkokohteisiin sijoitetuissa laitteissa, joiden ympäristölämpötila voi vaihdella merkittävästi. Kalibroinnilla pyritään varmistamaan transponderin mittaustarkkuus koko toimintalämpötila-alueella.

Tehostamista lähdettiin tutkimaan tarkastelemalla nykyistä valmistusprosessia sekä analysoimalla kalibroinnista kerättyä dataa ja mittaamalla transpondereiden suorituskykyä käytännön olosuhteita jäljitellen. Data-analyysit suoritettiin tilastollisia tunnuslukuja tarkastellen ja mittaukset tehtiin kohdeyrityksen olosuhdehuoneessa. Testausympäristö rakennettiin muistuttamaan yksinkertaisen kaapelitelevisioverkon rakennetta.

Ratkaisuna työssä ideoitiin kalibrointiprosessi, joka perustuu kerätyn datan keskiarvoistamiseen ja näytteistykseen, jolloin normaalin kalibrointiprosessin aikana transpondereita ei tarvitsisi mitata useassa eri lämpötilassa. Tätä peilattiin myös mahdollisiin tulevaisuuden teknologiaratkaisuihin.

Analyysien lopputuloksena uutta kalibrointiprosessia voidaan pitää toimivana vaihtoehtona nykyiselle kalibrointiprosessille. Keskiarvoistettua dataa hyödyntävää kalibrointia käyttävillä transpondereilla tehtyjen mittausten tulokset viittaavat siihen, että tällä uudella menetelmällä voitaisiin saavuttaa sama mittaustarkkuus käytännön olosuhteissa kuin nykyiselläkin kalibroinnilla.

Työssä havaittiin kuitenkin tiettyjä yksityiskohtia, jotka viittaavat nykyisen kalibrointiprosessista kerätyn datan epäluotettavuuteen. Lisäksi uuden ja nykyisen menetelmän testien tilastollinen luotettavuus on alhainen pienten näyttemäärien takia. Nämä seikat puhuvat lisätutkimusten puolesta.

ASIASANAT:

kaapelitelevisio, kalibrointi, lämpö, prosessi, statistiikka, transponderi, viritin

MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Software Engineering and ICT

2020 | 59 pages

Jani Jokiranta

Ville Mynttinen

Jukka Saarenlaita

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF TRANSPONDER TEMPERATURE CALIBRATION PROCESS

This study investigated the possibility of efficiency improvement in the thermal calibration part of the manufacturing process of a target company's transponder production. Transponder is a peripheral device used in cable television network equipment for measurement and network management. It has a wide temperature range of operation, as it can be installed in locations with considerable swings in ambient temperatures. The calibration process aims to guarantee a level of measurement accuracy over the whole operational temperature range.

The study began with a review of the manufacturing process, analyzing the existing calibration data, and measurement of transponders in life-like conditions. Data was analyzed by means of statistics, while the measurements were done in a climatic chamber in the company. The test environment was built to imitate a simple cable television network.

As a solution, the study offers a new calibration process based on averaging collected calibration data, and sampling. This would effectively mean that the process would not be reliant on calibration measurements over a range of temperatures. The process' implications on future technologies were also explored.

According to the data analyses, this new calibration process could be a practical alternative to the current method. Results of comparing average based calibration to the conventional one likewise supported this conclusion.

During the course of the study, certain details were however noticed, that could lead to some inaccuracies in the application of existing data. Further, the new and current method comparison results are subject to some uncertainty due to limited amount of samples tested. Both of these factors support additional research to be conducted.

KEYWORDS:

cable television, calibration, process, statistics, temperature, transponder, tuner

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 TRANSPONDERIN TOIMINTAPERIAATE	9
2.1 Kaapeliverkon menosuunnan muutoksia	10
2.2 Transponderin käyttö kompensattorina	11
2.3 Virittimen toteutus	12
3 TRANSPONDEREIDEN KALIBROINTI JA TARKISTUSMITTAUS	14
3.1 Nykyinen kalibrintiprosessi	15
3.2 Nykyinen valmistusprosessi Lean-näkökulmasta.	16
3.3 Suunniteltu uusi prosessi	18
3.4 Kustannushyödyt	19
4 UUDEN KALIBROINTITÄULUKON LUONTI	22
4.1 Datan luonne ja kriteerit	22
4.2 Keskiarvoistaminen	23
4.3 Olemassa olevan datan analysointi	24
4.4 Uuden kalibrintitaulukon luonti	27
4.5 Datan luonteen varmentaminen	28
4.6 Systemaattisten virheiden huomiointi	30
5 KALIBROINNIN VERIFIOINTI	31
5.1 Testiympäristö ja mittausperiaatteet	31
5.2 Mittaamiseen liittyvät virhetekijät	33
5.3 Lineaarisuuden tarkastelu	36
5.4 Mittaustulosten analysointi	37
6 VAIHTELUIDEN MITTAAMINEN JA VÄHENTÄMINEN	39
6.1 Vaihteluiden määrittäminen	39
6.2 Lämpökaliointiprosessin aikana syntyvät vaihtelut	40
6.3 Vaihtelut laitealustoissa	41
6.4 Vaihtelut laitealustan kalibrintijigissä	45

7 KALIBROINTI TRANSPONDERIN TEKNOLOGIAN MUUTTUESSA	46
7.1 Teknologisesti erilaisen virittimen suunnittelussa huomioitavia asioita	47
7.1.1 Jäähdytys	47
7.1.2 Ohjelmisto	48
7.1.3 Tuotannollisuus	49
7.2 Uuteen teknologiaan siirtyminen	49
7.3 DOCSIS 4.0 -standardin huomioon ottaminen	50
8 HAVAINNOT JA PÄÄTELMÄT	51
8.1 Metodiikka	52
8.2 Datan analysoinnista	52
8.3 Mittausten suorittaminen	54
8.4 Kalibrointiprosessi	54
8.5 Kalibrointiprosessi teknologiaa muutettaessa	54
8.6 Kehittämissuhteet ja uudet tutkimusaiheet	55
9 YHTEENVETO	56
LÄHTEET	57

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

ALSC	<i>Automatic level and slope control.</i> Automaattinen tason ja kaltevuuden säätö.
BOM	<i>Bill of materials.</i> Tuoterakenne, komponenttien listaus.
CMTS	<i>Cable Modem Terminal System.</i> Kaapelitelevisioverkkojen tietoliikenneyhteyksien päätelaite palveluntarjoajan päässä.
COGS	<i>Cost of goods sold.</i> Kokonaiskustannus, yritykselle syntynyt kustannus tuotteen valmistamisesta.
Design	Suunniteltu tai toteutettu tuoterakenne.
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specification.</i> Kaapelitelevisioverkkojen tietoliikennestandardi.
FDX	<i>Full duplex.</i> Kaksisuuntainen ja aikajakoinen tiedonsiirtomenetelmä
FPY	<i>First pass yield.</i> Ensisaanto.
HFC	<i>Hybrid fiber coaxial.</i> Nykyaikainen kaapelitelevisioverkon rakenne, jossa hyödynnetään kuitutekniikkaa.
HMS	<i>Hybrid Management Sub-layer.</i> Standardoitu kaapelitelevisioverkon hallintajärjestelmä.
Jig	<i>Jigi.</i> Apuväline tietyn työvaiheen suorittamiseksi.
KPI	<i>Key performance indicator.</i> Suorituskyvyn mittari.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation.</i> Digitaalinen modulaatiomenetelmä.
RSSI	<i>Received Signal Strength Indication.</i> Vastaanotetun signaalin taso.
Six Sigma	Statistiikkaan perustuva laadunhallintatyökalu.
Transponderi	Lähetin-vastaanotin-pari.
Viritin	Vastaanottimen vastaanottotaajuuden säädin.

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on tehty kaapelitelevisioverkon laitteita valmistavalle yritykselle. Työssä on käsitelty verkon ylläpidossa hyödynnettävää etähallintalaitetta, transponderia, jolla voidaan valvoa ja ohjata verkon toimintaa. Transponderi koostuu verkon signaaleja mittaavasta yksiköstä sekä modeemista, joka kommunikoi hallintamodeemin (*management modem*) kanssa. Hallintamodeemi sijaitsee palveluntarjoajan päässä verkkoa, päätelaitteistolla (*headend*).

Työssä perehdyttiin transponderin lämpökali brointiprosessin tehostamiseen, joka on tuotteen valmistuksen pisin yksittäinen vaihe. Kalibroinnilla pyritään minimoimaan lämpötilamuutosten aiheuttamaa epätarkkuutta transponderin mittauslinjalla (ml. mittaavat komponentit). Kalibrointiprosessiin on tehty jatkuvasti parannuksia, koska transponderituotteiden volyymin kasvun takia tuotannon kapasiteetti ei riittänyt sitä kattamaan. Ajallisen keston lisäksi tämä prosessimalli synnyttää suuria väli varastoja ja pitkiä odotusaikoja tuotteen valmistusprosessissa.

Prosessin tehostamisen lähtökohtaisena ideana oli yksilöllisten lämpökali brointien poistaminen, joka voitaisiin saavuttaa luomalla yksilöstä riippumaton kalibrointitaulukko, eli nk. vakiotaulukko. Vakiotaulukointiin on pyritty aikaisemminkin nykyisillä tuotteilla. Aikaisemmat yritykset ovat päättäneet siihen, että dataa analysoitaessa on kiinnitetty huomiota vain ääripäihin ja poikkeaviin havaintoihin, päätyen tulokseen, ettei mittausmenetelmää muuteta.

Työtä lähdettiin tekemään sekä analysoimalla olemassa olevaa dataa, että rakentamalla erikseen mittausympäristö uuden datan keräämistä varten. Mittadata on diskreettiä ja mittapisteitä on ennalta tiedossa oleva määrä. Data itsessään on esitetty taajuuden ja lämpötilan funktiona. Dataa analysoitiin tilastollisten menetelmien ohjelmistoilla.

Työn aikana pyrittiin myös havaitsemaan ja tunnistamaan vaihteluiden eri lähteitä. Lisäksi haluttiin ottaa esille testausympäristön eri osa-alueiden vaikutus kalibrointiprosessiin. Näiden tekijöiden vaikutusta on koitettu poistaa eri menetelmin aikaisemmin. Tämä on kuitenkin monimutkaista, koska testausympäristö muuttuu ajan suhteen esimerkiksi lämpötilan vaikutuksesta ja transpondereiden kytkemisen aiheuttaman mekaanisen rasituksen takia.

Vakioinnin käyttöönoton jälkeen olisi mahdollista käyttää vapautuvia resursseja muualla. Tarkoituksena ei välttämättä ole luopua mittaamisesta kokonaan vaan jokainen laite voitaisiin mitata edelleen yksilöllisesti, mutta yhdessä lämpötilassa ja lämpötilojen ääripäiden arvot voitaisiin laskea riittävän suurella tarkkuudella. Näin on toimittu joidenkin muidenkin tuotteiden kalibrointien kohdalla. Säästettäviä resursseja on laadultaan suorja ja epäsuoria. Niistä

esimerkkeinä testauslaitteiston uusimiseen liittyvät kustannukset, testaukseen käytetyn olosuhdehuoneen sähkön kulutus, olosuhdehuoneen käytön mahdollistuminen muissa kalibroinneissa ja testeissä sekä niiden tuotteiden läpimenoaika, joihin transponderit asennetaan.

Työn aikana ei löytynyt vastaavaan sovellukseen tehtyä tutkimusta tai opinnäytetyötä. Tilastollisia menetelmiä on yrityksessä käytetty muissa yhteyksissä, mutta niiden soveltaminen on rajoittunut resurssien allokoinnin takia.

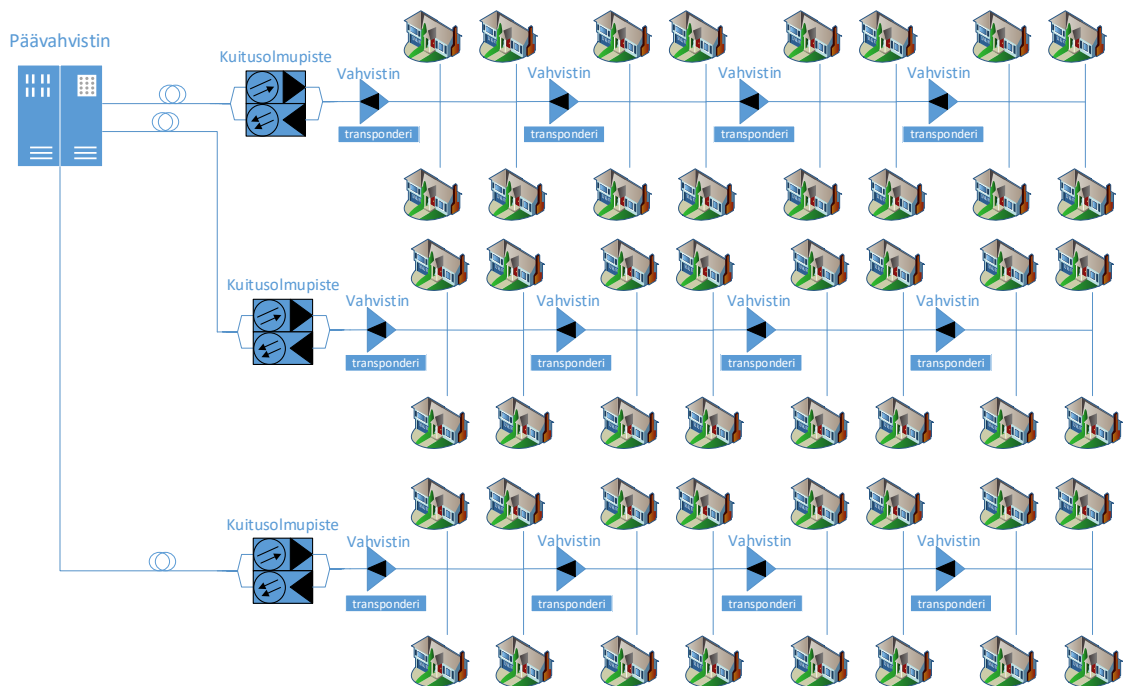
Kaapelitelevisioverkon transponderia ja sen tuotannollistamista on käsitelty useissa opinnäytetöissä erityisesti sellaisissa, jotka ovat tehty samaan yritykseen. Niissä ei kuitenkaan olla käsitelty tätä ongelmaa yhtä perusteellisesti, vaikka saman yrityksen tuotannon parantamisesta on myös tehty opinnäytetöitä, kuten Peltonen, 2020 ja Särkkä, 2014. Esimerkiksi Hallman, 2007 käsittelee transponderin valmistusta yleisellä tasolla, eikä keskity lämpökaliibroinnin tehostamiseen. [1-4]

Työn ensimmäinen luku käsittelee transponderin toimintaa teknologia- ja laitetasolla, sitä seuraavat luvut kalibroitua ja kalibroidutietojen analysointia sekä transponderiteknologian muutosta. Viimeiset luvut käsittelevät uuden kalibroitutietojen luontia, testausta ja virhetekijöiden vaikutusta. Lopuksi on pohdintaa saavutetuista tuloksista ja tehdyistä johtopäätöksistä. Työn ulkopuolelle on rajattu varsinaisen uuden kalibroitutietojen prosessin käyttöönotto ja toteutus.

Työ toteutettiin 3 henkilön yhteistyönä ja tehtävät sekä työssä käsiteltävät osa-alueet jaettiin kunkin erikoisosaamisen mukaan, vaikka jokaisella onkin ollut jotain annettavaa kaikkiin aihealueisiin. Jani Jokiranta oli vastuussa transponderin toiminnallisuuden ja teknologian tarkastelusta, Ville Mynttinen tuotantoprosessin ja mittausautomaation ja -tekniikan käsittelystä sekä Jukka Saarenlaita kalibroidutietojen sekä mittaus tulosten prosessoinnista analyysiä varten. Tulosten analysointiin ja johtopäätöksiin osallistui jokainen.

2 TRANSPONDERIN TOIMINTAPERIAATE

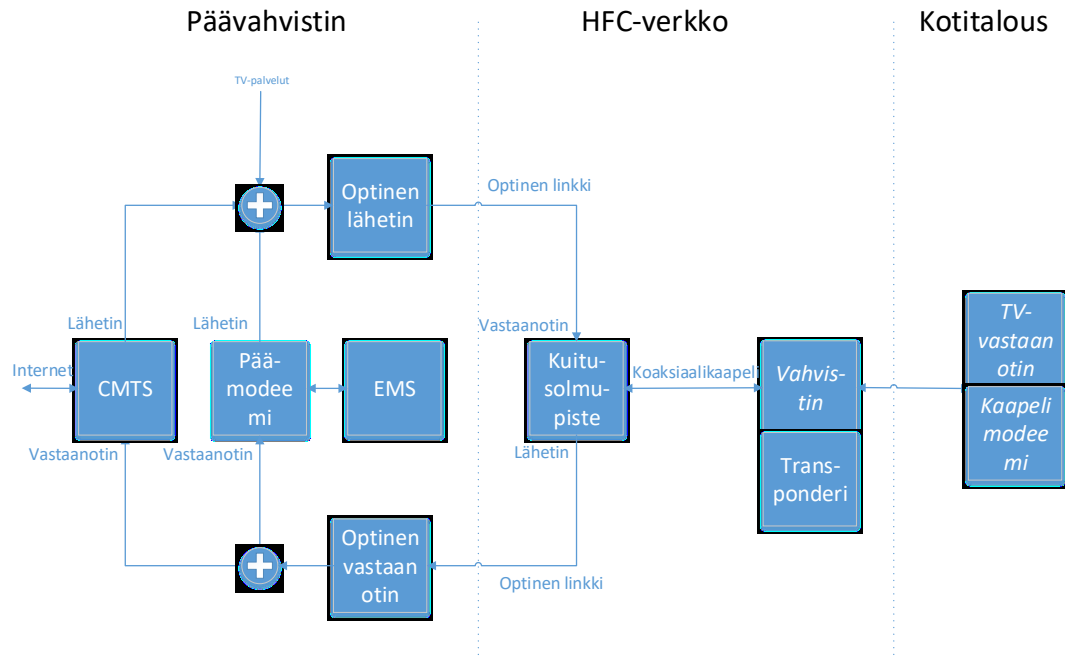
Kaapelitelevisioverkot koostuvat muun muassa kentälle asennettavista vahvistimista ja kuitusolmupisteistä, joiden etähallintaan käytetään niihin erikseen myytäviä transpondereita. Transpondereilla pystytään tehostamaan verkon ylläpitoa esimerkiksi hillitsemällä häiriöiden kulkemista paluusuuntaa pitkin. Jos verkon tiettyyn osaan on päässyt häiriö, se voi aiheuttaa palvelukatkoksen useille kotitalouksille. Etähallinnan avulla pystytään mittaamaan ne vahvistimet ja kuitusolmupisteet, joiden kautta häiriö kulkee verkossa. Tällöin saadaan katkaistua sen kulkeminen sulkemalla paluusuunta tarvittavista laitteista, jolloin häiriö saadaan eristettyä muusta verkosta. Mahdolliset palvelukatkokset koskevat silloin pienempää osaa verkkoa. Kuvassa 2.1 on esimerkki verkosta, jossa jokaiseen vahvistimeen on asennettu transponderi. Riippuen kaapeliverkosta ja sen operaattorista, etähallinnan etuja voidaan saavuttaa vähäisemmälläkin määrällä. [5-9]



Kuva 2.1. Perinteisen HFC-verkon rakenne.

Yrityksen transponderit koostuvat modeemista ja virittimestä. Modeemit kommunikoivat päävahvistimessa sijaitsevan hallintamodeemin kanssa HMS-standardin mukaisella liikenteellä tai vaihtoehtoisesti yrityksen itse kehittämällä protokollalla. Modeemiliikenne koostuu muun muassa vahvistimelle tai kuitusolmupisteelle lähetetyistä komendoista ja virittimen mittaustuloksista päävahvistimen suuntaan. Mittaustuloksia otetaan kaapeliverkon

menosuunnasta ja paluusuunnasta. Paluusuunnasta mitataan häiriöiden tasoja ja menosuunnasta kaapelikanavien tasoja. Kuvassa 2.2 on lohkokkaavio päävahvistimen ja kotitalouden välissä olevista laitteista ja toiminnoista. Kuvassa HFC-verkko on tyypistetty yhteen kuitusolmupisteeseen ja vahvistimeen, kun käytännön tilanne on lähempänä kuvan 2.1 tilannetta.



Kuva 2.2. HFC-verkon tietoliikenteen lohkokkaavio.

Menosuunnan mittauksista saatua tulosta käytetään tyypillisesti kompensoimaan verkossa tapahtuvia muutoksia säätämällä vahvistimen tai kuitusolmupisteen lähdön tasoa. Tason säädöt voidaan asettaa automaattille. [5-8]

2.1 Kaapeliverkon menosuunnan muutoksia

Kaapeliverkkoja käytetään monenlaisissa ympäristöissä ja yrityksen valmistamien tuotteiden pitää toimia $-40\text{ °C} \dots +55\text{ °C}$ alueella. Ympäristölämpötilan lisäksi vahvistimen tai kuitusolmupisteen asennuspaikka vaikuttaa niiden lämpötilaan. Jos laitteita asennetaan katujakokaappeihin, voi kaapin sisälämpötila kohota ulkolämpötilaa selvästi korkeammaksi auringonpaisteen vaikutuksesta. [5-8]

Lämpötilan muutokset vaikuttavat kaapeliverkon laitteiden vahvistinpiirien toimintaan. Niiden vahvistukset muuttuvat lämpötilan suhteen, jolloin kanavien tasot vaihtelevat verkossa esimerkiksi yön ja päivän sekä kesän ja talven välillä. Tätä varten vahvistimien ja

kuitusolmupisteiden vahvistusta ei säädetä maksimiin, vaan jätetään säätövaraa kompensointia varten. [5]

Ilman mitään kompensointiota, yhden vahvistimen tai kuitusolmupisteen vahvistus voi elää lämpöalueen ääripäiden välillä n. 3 dB riippuen vahvistimesta tai kuitusolmupisteestä. Tyypillisesti laitteiden sisälle saadaan rakennettua kompensoattoreita, mutta niillä ei saada kompensoitua kaikkea. Kaapeliverkot voivat sisältää useita peräkkäisiä laitteita, jolloin kanavien tasojen muutokset kumuloituvat. Liian suuret laskut kanavien tasoissa voivat aiheuttaa palvelukatkoja kotitalouksissa. [5-8]

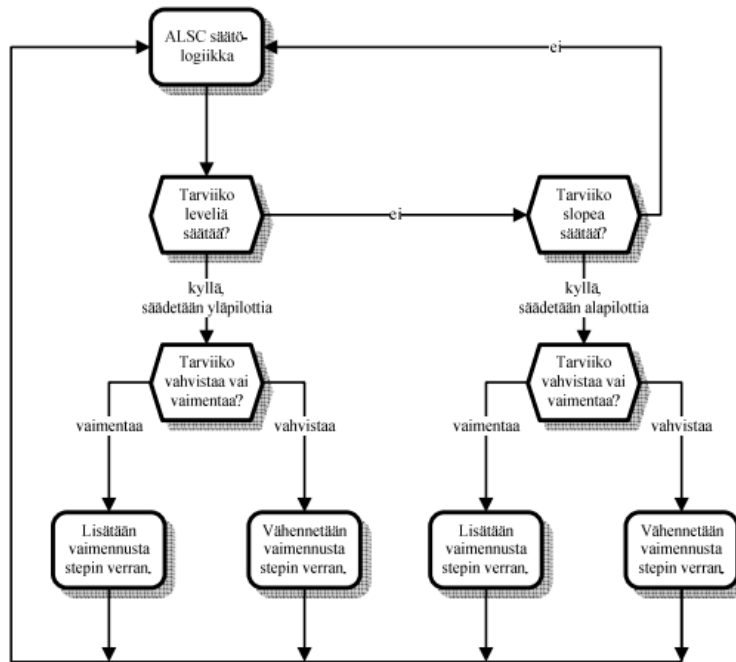
2.2 Transponderin käyttö kompensoattorina

Kaapelioperaattorit pitävät huolta verkon toiminnasta ja pyrkivät pitämään kaapeliverkon kanavien tasot stabiileina kotitalouksiin. Jo muutamaan kaapeliverkon kriittiseen paikkaan asennetulla transponderilla tähän tavoitteeseen päästään vähemmällä säätötoimenpiteillä kentällä. Mitä enemmän transpondereita on asennettu, sitä vähemmän on tarvetta tehdä säätötoimenpiteitä paikan päällä. [5-8]

Rovaniemeltä löytyy Suomen pohjoisempia kaapelitelevisioverkkoja. Siellä esimerkiksi vuoden 2019 talven kylmimmän päivän 6.2. lämpötilan $-30,1\text{ °C}$ ja kesän kuumimman päivän 26.7. lämpötilan $+30,7\text{ °C}$ ero on $60,8\text{ °C}$. Tällaiseenkin verkkoon asennetun transponderin pitää pystyä toimimaan luotettavasti. [10, 11]

Koska automaattisäädön tarkkuus perustuu transponderin virittimen mittauksiin, sen pitää toimia laajalla lämpötila-alueella. Virittimen *design* pitää sisällään lämpötilan mukaan muuttuvia komponentteja, mitkä vaikuttavat tason mittaamiseen. Modeemiliikenteessä lämpötilojen muutoksilla ei ole vaikutusta kentällä. [5-8]

Verkon säätämisen vähentyminen perustuu transponderien mahdollistamaan automaattisäätöön (ALSC), missä virittimellä mitataan kaapeliverkosta kanavien tasoja. Kuvassa 2.3 on esitetty ALSC-toiminnallisuus. [5]

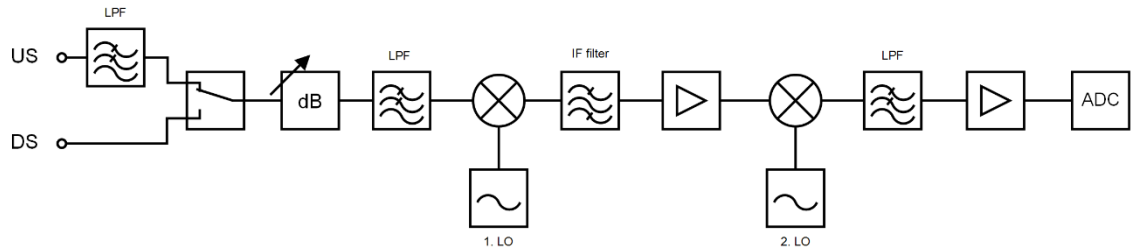


Kuva 2.3. ALSC:n säätölogiikka (kuva J. Vuorinen).

Automaattisäädön perustana toimivat virittimen mittaustulokset ja operaattorin määrittelemän kanavien tavoitetason pohjalta laskettu ero. Tämän tiedon nojalla säädetään vahvistimessa tai kuitusolmupisteessä vaimentimilla laitteen lähtötaso tavoitetasoon. Vaimentimet on säädetty niin, että siellä on tasojen nostoa varten jätetty vahvistusta käyttämättä. Tyypillisesti tavoitetaso säädetään kohdilleen laitteen asennuksen yhteydessä kentällä. [5-8]

2.3 Virittimen toteutus

Transponderin virittimen lohkokaavio on piirretty kuvassa 2.4. Se on tyypillinen superheterodyne-vastaanotin kahdella sekoittimella. *Designiin* on lisätty toinen vastaanottoreitti, koska kaapeliverkoissa on erikseen meno- ja palusuunta kaapeliverkon vahvistimissa ja kuitusolmupisteissä. Reitin valinta hoidetaan virittimen rakenteeseen kuuluvalla mikrokontrollerilla, sen mukaan mitä taajuutta ollaan mittaamassa. Mikrokontrolleri pitää sisällään myös ADC-ominaisuuden jolla RF-taso ilmaistaan halutusta taajuudesta.



Kuva 2.4. Transponderin virittimen lohkokkaavio.

Lämpötilan suhteen suurimmat erot syntyvät virittimen vahvistinpiireissä. Ero tuotteen toiminta-alueella kuumimmasta kylmimpään on 4 dB vahvistuksessa, mikä on tuotteesta kalibroitu joka laitteesta yksilöllisesti pois. Muut komponentit eivät yhtä merkittävästi vaikuta mittaustarkkuuteen lämpötilan suhteen, mutta niistäkin kertyy hajatekijöitä, joita ei ole tutkittu erikseen.

3 TRANSPONDEREIDEN KALIBROINTI JA TARKISTUSMITTAUS

Transponderin nykyinen valmistusprosessi voidaan jakaa karkeasti seuraaviin osa-alueisiin:

1. Kokoonpano
2. Ohjelmointi
3. Yleinen sähköisen toiminnan testaus
4. Vaimenninmittaus
5. **Lämpökali brointi** ja välitajuussuodattimen testaus
6. Loppumittaus
7. Liikennöintitestaus

Kokoonpanovaiheessa (1) laitteeseen tulevat moduulit ja muut osat yhdistetään, jonka jälkeen transponderiin ladataan laiteohjelmisto (2). Tämän jälkeen tehdään yleinen sähköisen toiminnan testaus (3), jossa tarkistetaan mm. jännitteet ja laitteessa olevien ledien toiminta.

Tällä hetkellä transpondereissa käytössä oleva arkkitehtuuri on rakennettu siten, että kuvan 2.4 lähtötasoa mittaavalle ADC-osiolle pyritään saamaan aina sama vakiotasotiettyjen rajojen sisään. Osiolle tulevaa tasoa säädellään transponderin sisäisen vaimentimen avulla.

Aiemmin vaimennin mitattiin lämpökali broinnin yhteydessä, jolloin kokonaisaika kali brointivaiheelle oli n. 9 h. Lämpökali brointivaiheeseen kulunutta aikaa saatiin lyhennettyä eriyttämällä vaimenninmittaus omaksi työvaiheekseen. Tämä erillinen työvaihe kuitenkin vaati 2 ihmisen täysipäiväisen työpanoksen. Tämän takia yritys toteutti muutama vuosi sitten sisäisen projektin, jossa vaimentimen käyttäytyminen todettiin vakioksi, joka mahdollisti vakiotaulukon käytön vaimentimelle. Ainoastaan muutaman vaimentimen ääriasennon pisteen käyttäytyminen ei ole ennustettavaa, joten niiden todellinen vaimennus täytyy mitata (4).

Lämpökali broinnissa (5) laitteen näyttämä mittaustulos pyritään saamaan samaksi lämpötilasta riippumatta. Kuvan 2.4 välitajuussuodattimen (*IF, intermediate filter*) toiminnan tarkastus testataan myös toistaiseksi tässä työvaiheessa. Seuraavissa kappaleissa termillä kali brointi tarkoitetaan valmistusprosessin lämpökali brointivaihetta, johon työn on tarkoitus vaikuttaa.

Loppumittauksessa (6) laitteen toiminta tarkastetaan mittaamalla se oikeassa ympäristössä. Mittaus tapahtuu huoneenlämmössä ja laitteen absoluuttisen tarkkuuden täytyy mennä haluttujen kriteerien sisään.

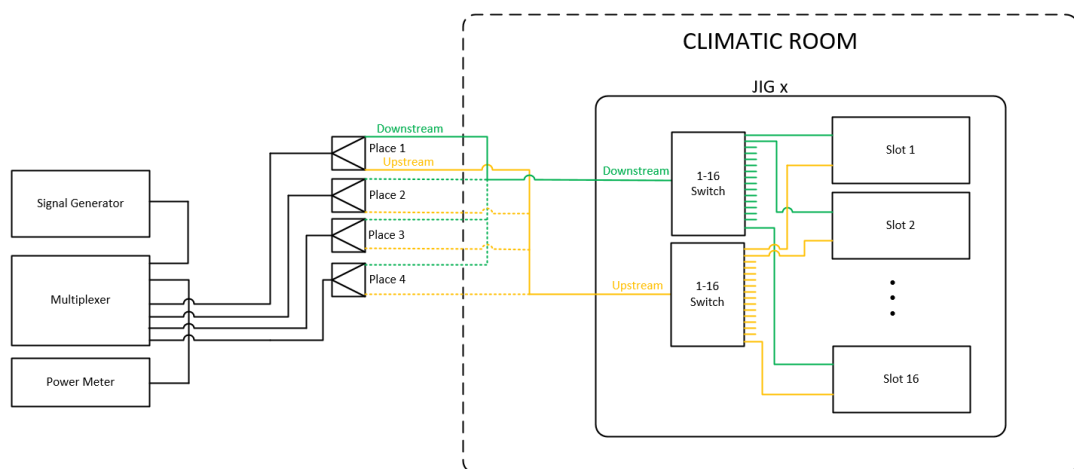
Liikennöintitestauksella (7) lopuksi varmistetaan, että kommunikaatio transponderin modeemin kanssa onnistuu. Samalla tarvittaessa päivitetään laitteessa oleva kommunikaatio-ohjelmisto haluttuun versioon.

3.1 Nykyinen kalibrointiprosessi

Nykyisessä kalibrointiprosessissa transponderit mitataan yksilöllisesti 3:ssa eri lämpötilassa ja mittaustulosten perusteella transpondereille kirjoitetaan kalibrointi-arvot. Mittauksissa apuna käytetään lämpökaappia ja eräänlaista testialustaa eli ns. *jigiä*, johon mitattavat transponderit kiinnitetään mittauksen ajaksi. Tällöin useampi transponderiyksilö saadaan mitattua kerralla. Lämpökaappi käy läpi lämpötilat $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Transponderin ollessa jigissä ympärillä ei ole muuta lämmittävää osaa, jolloin transponderin lämpötila on lähes sama kuin ympäristössä.

Transpondereiden kalibrointiin on tällä hetkellä käytössä 2 lämpökaappia, johon kumpaankin mahtuu 4 jigiiä. Yhteen jigiiin voidaan kytkeä kerralla enintään 15 transponderia. Näin ollen yhdestä kaapista saadaan ajettua läpi enintään 60 transponderia yhtä mittauskertaa kohti.

Mittaus on automatisoitu kokonaan ja se tapahtuu säätämällä lämpökaapin lämpötila halutuksi ja odottamalla ennalta määritelty aika, jotta mitattavien transpondereiden lämpötila on oletettu tasaantuneeksi. Kussakin lämpötilassa signaali ohjataan signaaligeneraattorilta multiplexerin läpi tehomittarille vertailuarvoa varten ja erikseen jigille. Jigien sisällä signaali kytketään vielä erikseen kullekin transponderille. Edellä mainitut vaiheet tehdään jokaiselle halutulle mitattavalle taajuuspisteelle. Jigin kaikki transponderit ja taajuuspisteet mitataan ennen siirtymistä seuraavaan jigiiin. Seuraavassa kuvassa 3.1 on esitetty yksinkertaistettu esimerkki mittausjärjestelystä.



Kuva 3.1. Lämpökalibrointiprosessin mittausjärjestely.

Vertaamalla transponderin (kuvan 3.1 slot 1...16) mittaustulosta ja tehomittarin mittamaa tulosta saadaan laskettua transponderin kyseisen taajuuspisteen ja lämpötilan kalibrointiarvo. Jokaisen mittaustuloksen reitti signaaligeneraattorilta kunkin jigien slottiin sekä tehomittarille on erikseen mitattu, jotta niiden vaikutus saadaan laskettua tuloksesta pois.

Toistaiseksi lämpökaliibroinnin yhteydessä mitataan myös 1 lämpötilassa transponderin välitaajuussuodattimen toiminta (kuvan 2.4 IF-filter) ja varmistetaan sen suodatuksen olevan riittävän kapea.

Kaapin lämpötilasiirtymät ($25\text{ °C} \rightarrow -5\text{ °C} \rightarrow 36\text{ °C} \rightarrow 70\text{ °C}$) kestävät noin 20 minuuttia ja transpondereiden lämpötilojen tasaantumisaika on n. 15 minuuttia. Lisäksi mittausten lopussa täytyy odottaa hetki (n. 25 min) kuumasta huoneenlämpöön siirtymisessä, jotta laitteisiin voidaan koskea. Näistä voidaan laskea kaavan 3.1 mukaan 3 lämpötilan läpikäymiseen kuluva aika ilman mittauksia.

$$t_{min} = 3 \cdot (20\text{ min} + 15\text{ min}) + 25\text{ min} = 130\text{ min} \quad (3.1)$$

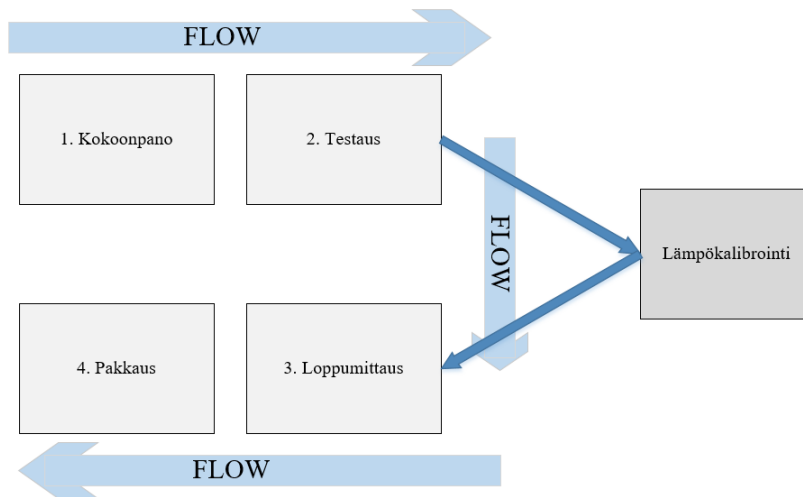
Kaikkien mittauspisteiden läpikäynti jigien kohden jokaisessa lämpötilassa ($t_{Jigmeas}$) kestää n. 8 min. Jos jigissä on kiinni transponderi, kunkin yksilön mittaustulosta tuodaan testiin lisäaikaa ($t_{DUTmeas}$) n. 0,5 min. Näistä saadaan kaavan 3.2 mukaan laskettua kalibroinnin kesto ($t_{Calibrate}$) kun otetaan huomioon kaapissa olevien jigien määrä (N_{Jig}), mittauksessa olevien laitteiden kokonaismäärä (N_{Dut}) ja oletetaan, että mitataan kaikki 3 lämpötilaa.

$$t_{Calibrate} \approx 3 \cdot (N_{Jig} \cdot t_{Jigmeas} + N_{Dut} \cdot t_{DUTmeas}) \quad (3.2)$$

Aiemmin mainitun täyden kaapin ($N_{Jig} = 4$ ja $N_{Dut} = 60$) mittaaminen kestää siis n. 316 min, eli n. 5 h 15 min. Kaavasta 3.2 havaitaan myös, että on ajallisesti nopeampaa mitata samaan aikaan 1 jigissä 4 laitetta kuin vain 1 laite kussakin 4 jigissä.

3.2 Nykyinen valmistusprosessi Lean-näkökulmasta.

Yritys on jo usean vuoden ajan noudattanut Lean-valmistuksen periaatteita, joilla pyritään mm. hyvään virtausnopeuteen. [12] Peruseriaatteena on noudattaa ns. soluvalmistuskonseptiä kaikessa tuotannossa. Kuvassa 3.2 on esitetty solukonsepti, jossa tuote kulkee eri vaiheiden kautta kokoamisvaiheesta pakkausvaiheeseen.



Kuva 3.2. Normaali soluvalmistuskonsepti ja transponderin lämpökaliointin suhde siihen.

Nykyinen transpondereiden kalibroitint prosessi rikkoo periaatteita sillä solusta transponderit lähtevät 2. vaiheen jälkeen muualle ja ne eivät palaudu takaisin vaiheeseen 3 välttämättä samaa reittiä tai samassa erässä.

Nykyisen kalibroitint prosessin ongelmiksi voidaan laskea mm. seuraavat asiat:

1. Erillinen erävalmistus ja välivarastojen määrä
2. Ajallinen kesto ja luotettavuus
3. Vaatii olosuhdehuoneen/lämpökaapin
4. Mittapaikan oma kalibointi työläs
5. Mittapaikan multiplekserille paljon kytkentäkertoja

Nykyinen kalibroitint prosessi kohdan 1 mukaan rikkoo yrityksessä valmistuksessa käytettävää mallia, jossa tuotteet valmistetaan solussa ns. *one-piece-flow* periaatteen mukaisesti. Kalibroitinta varten transponderit poistuvat solusta puskuriin, josta useampi menee kerralla kalibroiintiin. Kalibroinnin jälkeen transponderit palaavat takaisin soluun eränä, jolloin ennen vaihetta 3 syntyy toinen puskuri. Näiden puskureiden takia tarvitaan suuria välivarastoja, jotta soluoperaattorin työ ei katkea. Jos kaikki menee normaalin prosessin mukaan, on soluoperaattorilla näennäisesti työn alla laitteita jatkuvasti vaikkakaan sama yksilö ei kierrä solussa yhdellä kerralla läpi. Suurien välivarastojen takia tuotannonohjaus myöskin vaikeutuu, sillä esimerkiksi pienen 10 kpl erän laittaminen soluun valmistettavaksi ei ole kannattavaa.

Kohdan 2 ajallinen kesto aiheuttaa välillisesti muita ongelmia. Laskennallisesti voidaan ajatella, että 5 h kalibroitintaika 60 laitteella tekee n. 5 min / laite. Kuitenkin nykyisellä tavalla tehtäessä jokin virhe esimerkiksi mittauksen kommunikaatioyhteyksissä voi pilata koko erän testauksen ja

kaikkien mittaaminen on aloitettava uudelleen. Kaikkia lämpötiloja ei toisaalta kuitenkaan tarvitse mitata uudelleen, sillä voidaan valita lämpötilat joita transponderit eivät vielä ehtineet käydä. Kalibroinnin lopussa tehdään mittaustuloksille automaattinen tarkastelu, jossa voidaan havaita ettei transponderi välttämättä täytä määriteltyjä kriteereitä, jolloin kyseiset yksilöt on mitattava uudelleen. Lisäksi kalibroinnin jälkeen tehtävän loppumittauksen yhteydessä voidaan myös todeta ettei transponderi asteta sille asetettuja vaatimuksia. Lämpökaapin mittausten perusteella tulos on ollut näennäisesti oikea, mutta kalibrointi kuitenkin on hieman pielessä. Kummassakin tapauksessa kalibrointi on suoritettava uudelleen. Näistä aiheutuu vaihtelua vaiheen suoritusajaksi, jolloin 5 min / laite ei enää päde vaan se on paljon suurempi.

Kohdan 3 mukaan nykyinen prosessi edellyttää olosuhdehuoneen/lämpökaapin, jonka ylläpito vaatii resursseja ja säännöllisesti suoritettavia huoltoja ja kalibrointeja ja/tai tarkastuksia. Tästä tulee myös vaihtelua kun tuotteita ei voida tämän aikana valmistaa ellei lasketa, että tuotteita tehdään puskuriin tai otetaan jo kalibroituja laitteita puskurista. Lisäksi lämpökaapille voidaan laskea sähkönkulutus.

Kohdat 4 ja 5 viittavaat kohdan 3 tapaan ylläpidon vaativuuteen. Kaikkien mittalinjojen kalibroinnin tulee olla kunnossa, jotta saadaan luotettava tulos. Kalibroinnin yhteydessä jokaisen jigin kaikki 15 eri linjaa kalibroidaan erikseen. Mittalaitteiden toimivuuden luotettavuus tulee myös esille. Välillä on havaittu, että multiplekserin eniten käytettävän reitin linjan kytkin on hajonnut hyvinkin nopeasti oletettuun kestävyYTEEN nähden.

Jonkinlaisen kalibroinnin laite kuitenkin vaatii, eli mittauksesta ei päästä täysin eroon. Nykyisen prosessin muuttamisesta saattaa aiheutua välillisesti muita asioita, jotka täytyy ottaa huomioon. Tuotteen läpimenoaika lyhenee, mutta vastaavasti solussa operaattorin työaika saattaa kasvaa. Tässä täytyy huomioida miten tämä vaikuttaa operaattorin solutyöskentelyyn. Toisaalta tarvittaessa voidaan muuttaa myös valmistusprosessin muita osa-alueita, jotta ei muodostu pullonkauloja ja työvaiheet saadaan ajallisesti tasapainoon. Esimerkiksi 5 min lisätyön siirtämisestä soluun ei välttämättä täysin suoraan tule lisää työaika, sillä itse mittaus on automatisoitu ja tarvittaessa kerralla mitattavien laitteiden määrää voidaan nostaa.

3.3 Suunniteltu uusi prosessi

Uudessa prosessissa kalibrointi tehdään vain yhdessä lämpötilassa ja muut lämpötila-arvot saadaan mitatuista tuloksista laskemalla. Ensimmäisessä vaiheessa kalibrointi voitaisiin mahdollisesti toteuttaa samassa testiympäristössä kuin nykyinenkin, mutta ilman lämpötilan

vaihtamista ja lämpökaappia. Käyttämällä olemassa olevaa mittausympäristöä ei tarvitse rakentaa uutta ja nykyinen solun toimintaprosessi ei muutu. Tämän menetelmän avulla voisi kerätä kokemuksia ja säätää prosessia saatujen havaintojen pohjalta.

Tulevaisuudessa prosessi on tarkoitus muuttaa solussa tehtäväksi. Tällöin kalibrointi ja tarkistusmittaus on syytä erottaa toisistaan erillisiksi osiksi, jotta systemaattisilta virheiltiltä vältyttäisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että kalibrointi tehdään toisessa alustassa ja tarkistusmittaus tehdään varsinaisessa laitealustassa. Näiden tulosten täytyy olla hyvin lähellä toisiaan.

Keskiarvoistamiseen perustuvan taulukon myötä kalibrointiprosessi tulisi muuttaa jossain määrin näytepohjaiseksi. Yleisimpiä näytteistykseen perustuvia laadunvalvontamenetelmiä ovat *acceptance sampling* ja *control charts*. Ensimmäinen menetelmä perustuu eräkohtaiseen tarkasteluun, jossa erä hylätään tai hyväksytään näytteiden suorituskyvyn perusteella. Toinen menetelmä pohjautuu säännölliseen näytteidenottoväliin ja näytteiden keskiarvon tarkasteluun. [13] Tämä otantamittaus voitaisiin tehdä nykyisellä kalibrointitavalla. Tällöin transpondereiden lämpökäyttäytyminen mitattaisiin lämmöissä osittain samaan tapaan kuten tähänkin asti ja täten varmistuttaisiin lämpökäyttäytymisen olevan sama kuin on oletettu tai ryhtyä toimenpiteisiin jos näin ei ole.

Uuteen prosessiin siirryttäessä tulee rakentaa myös menetelmä, jonka avulla voidaan varmistua käytetyn keskiarvotaulukon ajantasaisuudesta. Tämä voisi tapahtua esimerkiksi ottamalla huomioon edellä mainitun näytteistykseen tulokset, jolloin taulukko eläisi esim. liukuvan keskiarvon mukaan automaattisesti. Toisena vaihtoehtona on taulukon päivitys muutoin joko säännöllisesti tai silloin kun transponderin sisäisessä rakenteessa tapahtuu selkeitä muutoksia kuten uudet piirilevyversiot. Näissä tapauksissa ehdottoman tärkeää on ratkaista kenen vastuulle päivittäminen kuuluu, tai mikä automaattinen järjestelmä ilmoittaa päivityksen tarpeesta.

3.4 Kustannushyödyt

Nykyisen prosessin kustannusten arviointi on osittain hankalaa, sillä kaikki niistä eivät ole ilmeisiä ja osa niistä on piilossa. Kustannuksia voidaan arvioida monella tapaa ja seuraavassa onkin karkeasti arvioitu muutaman parametrin avulla nykyisen prosessin muuttamisella mahdollisesti saavutettava rahallinen hyöty. [12]

Olosuhdehuoneen sähkönkulutus on selkeästi havaittava menoerä. Todellista sähkönkulutusta ei ole mitattu, mutta arvioidaan kulutus seuraavasti. Kaapin nimellisteho on 7,8 kW ja oletetaan, että koko kalibrointiprosessin kestolle (5 h) jaettuna kaappi käy jatkuvasti 40 % teholla (3,12 kW)

jollin saadaan sähkönkulutukseksi n. 15 kWh. Jos teollisuuden sähkön kokonaishinnaksi arvioidaan n. 0,10 €/h [14], saadaan yhden kalibrointikerran hinnaksi n. 1,5 €. Täyden kaapin (60 laitetta) tapauksessa tästä saadaan 0,025 €/laite. Kaappi ei kuitenkaan ole aina ole täysi ja mahdollisten uudelleenmittausten takia pyöristetään tämä arvoon 0,05 €/laite.

Vaikka lämpökaapin toiminta on automatisoitu, täytyy jonkun ylläpitää prosessia, eli täyttää kaapin jigit laitteilla sekä purkaa valmiit tuotteet pois. Lisäksi mahdollisten häiriötilanteiden takia lämpökälibrointiprosessiin sitoutuu työaika. Oletetaan näihin menevän aikaa 2 h. Jos hinta työlle on 22 €/h, saadaan summaksi 44 €. Sama aika voidaan olettaa kuluvan käytettäessä joko 1 tai 2 kaappia (60 tai 120 laitetta). Näin ollen tästä syntyy kustannuksia joko 0,70 €/laite tai 0,35 €/laite. Otetaan näistä karkeasti arvioksi 0,45 €/laite.

Yrityksen sisällä on aiemmin laskettu eräs arvio ensisaannon (*FPY, First Pass Yield*) vaikutuksesta yleisimpien valmistettävien vahvistimien ja kuitusolmupisteiden valmistuksen kustannuksista. Näissä laskelmissa ensisaantoprosenttiyksikön hinnaksi on saatu 0,50 – 0,60 €/%-yks. Kyseinen hinta siis säästetään laitetta kohden kun tuotteen valmistuksen ensisaanto paranee 1 %-yks. [15] Transpondereiden valmistus kuitenkin poikkeaa laskelmassa käytetyistä tuotteista, sillä siinä ei esimerkiksi ole käsin viritettäviä komponentteja sekä valmistusprosessikin on hieman erilainen ja hyvin pitkälle automatisoitu kokoonpanoa lukuun ottamatta. Oletetaan tässäkin varovaisempi arvio ja käytetään laskelmissa pienempää arvoa 0,30 €/%-yks.

Yrityksen KPI-mittareista nähdään, että esimerkiksi yhden 8 viikon jakson aikana on valmistettu n. 2700 kpl tutkimuksen kohteena olevaa transponderituotetta. Näiden ensisaanto on karkeasti 70 %. Eri työvaiheiden ensisaantoja tutkimalla havaitaan huonoimmat tulokset olevan sekä lämpökälibroinnissa että loppumittauksessa, joiden molempien ensisaanto on n. 84 %. Käytännössä siis nämä 2 prosessin vaihetta muodostavat koko tuotteen ensisaantoprosentin. Tuloksista voidaan päätellä myös sekin, että vaikka lämpökälibrointi näennäisesti menee läpi, niin osa tuotteista ei siltikään täytä sille asetettuja vaatimuksia todellisessa mittaussympäristössä. Lisäksi vain 1 % kokonaismäärästä vaatii jotain todellisia korjaustoimenpiteitä eli tuotteille täytyy syystä tai toisesta vain tehdä jompikumpi prosessin vaihe uudelleen. [16]

Yrityksessä hieman tuotteesta ja tuotekategoriasta riippuen tyydyttävänä tasona on pidetty 80 % ja tavoiteltavana hyvänä tasona >90 % ensisaantoa. Näin ollen tutkimuksen kohteena olevan transponderin valmistuksen ensisaannossa on parantamisen varaa ainakin 20 %-yks. Vaikka ensisaannon parantamisen tarve on selkeä ja se oletettavasti paranee reilusti prosessia muuttamalla, otetaan tässäkin marginaalia ja oletetaan näissä laskelmissa ensisaannon paranevan

10 – 15 %-yks. Tämä tarkoittaa 3,0 – 4,5 € säästöä laitetta kohden kun ensisaannon hintana pidetään aiemmin mainittua 0,30 €/%-yks.

Laskemalla yhteen sähkönkulutuksen (0,05 €), lämpökaapin prosessin ylläpidon (0,45 €) ja ensisaannon parantamisella (3,0 – 4,5 €) saavutettavat säästöt, päästään lukemaan 3,5 – 5,0 € *per* valmistettu laite jos käytettäisiin vakiotaulukkoa. Esimerkiksi valmistamalla tutkimuksen kohteena olevia transpondereita 10 000 kappaletta vuodessa, voidaan vuosisäästöiksi saada vähintään 35 000 – 50 000 euroa.

Pelkkien säästöjen lisäksi huomioon täytyy ottaa, että uuden kalibrointiprosessin käyttöönotto vaatii työaikaa (automaation rakentaminen, toiminnan varmistaminen, taulukoiden laskeminen) kertaluonteisesti, jonka takaisinmaksuaika tulisi laskea. Lisäksi lasketut säästöt pienentyvät jonkin verran jos mukaan lasketaan uuden prosessin vaatima ylläpito (esim. testialustojen säännöllinen kalibrointi), vakiotaulukon ajantasaisuuden varmennus esim. näytteistykseen perustuen ja muu vakiotaulukon ylläpidon vaatima prosessi.

Vaikka kustannukset onkin laskettu karkeasti ja pyöristetty reilusti alaspäin, eikä laskelmissa ole otettu huomioon yllä mainittuja uusia kustannuksia, saadaan pelkästään ensisaannon parantamisella aikaan merkittävät säästöt. Toisaalta laskelmissa ei ole myöskään huomioitu kaikkia nykyisen kalibrointiprosessin kustannuksia kuten lämpökaapin vaatimia huoltotoimenpiteitä, isojen välivarastojen kustannuksia tai valmistuksen ennustettavuuden vaikeutta tuotannonohjauksen kannalta.

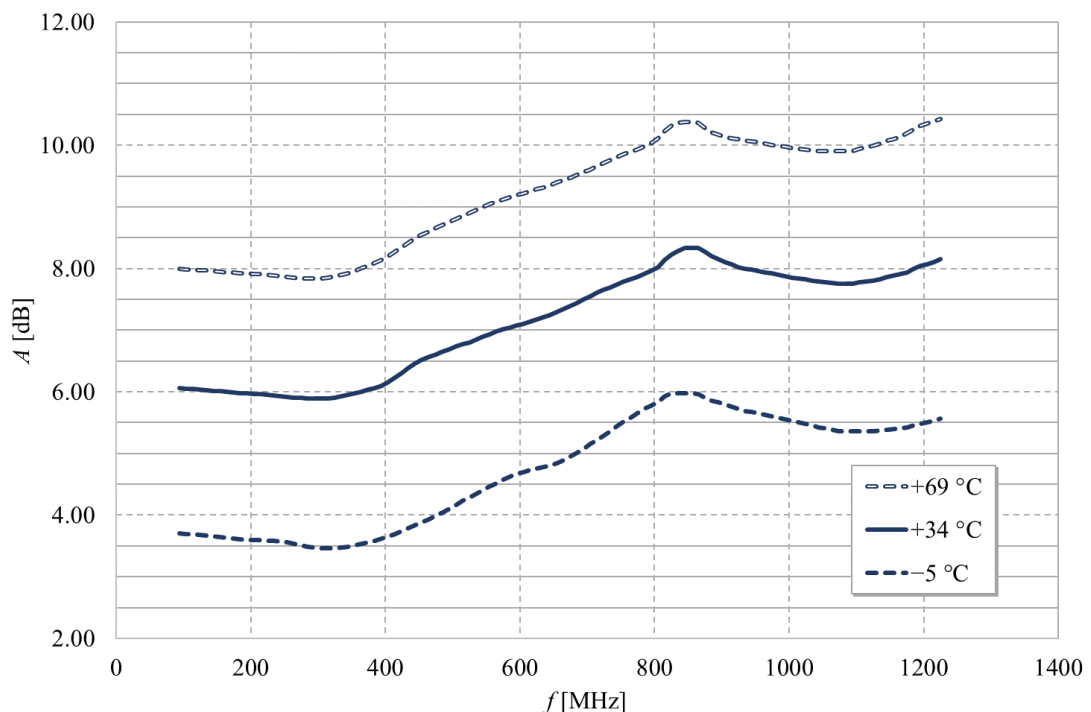
4 UUDEN KALIBROINTITAULUKON LUONTI

Vakioidun kalibroinnin idea perustuu siihen, että hyödyntämällä olemassa olevaa kalibrointidataa kyetään luomaan tarpeeksi tarkka kalibrointitaulukko kaikkiin olosuhteisiin ja riippumatta laitteesta, jossa taulukkoa käytetään. Tässä luvussa käsitellään taulukon luonnin edellytyksiä ja seurauksia.

Työssä ollaan keskitytty tarkastelemaan vain transpondereiden menosuuntaa — taajuusaluetta 85...1218 MHz — mutta käytettyjä menetelmiä voidaan pitää pätevinä myös paluusuunnalle.

4.1 Datan luonne ja kriteerit

Kalibrointitaulukko itsessään on 2-ulotteinen matriisi, jossa ilmaistaan kalibrointivaiheessa mitattua transponderin mittalinjan vaimennustasoa A (yks. dB) taajuuden ja lämpötilan funktiona. Taulukossa on 123 taajuustason pistettä jokaista 3 lämpötilaa kohden. Alustavasti datan oletetaan olevan taajuuskohtaisesti normaalijakautunutta. Mittapisteiden lukumäärän takia esimerkkidataa ei ole taulukoitu, vaan siitä on esitetty kuvaaja kuvassa 4.1.



Kuva 4.1. Tyypillisen kalibrointitaulukon data esitettynä kuvaajamuodossa. Lämpötila vastaa kalibroinnin aikana transponderin mittaamaa lämpötilaa.

Datan luonteesta tehdään seuraavat oletukset, jotka pohjautuvat laitteen havaittuun käyttäytymiseen:

- 1) Transponderin mittalinjan vaimennus kasvaa lämpötilan kasvaessa sekä laskee lämpötilan laskiessa; ja
- 2) Vaimennus minimi- ja maksimilämpötilojen välissä on minimi- ja maksimivaimennuksen välissä.

Nämä oletukset johtavat siihen, että taulukkoa voidaan interpoloida. Extrapolointia tarkkuutta ei voida taata, sillä ei tiedetä käyttäytykö transponderi samalla tavalla myös sen normaalin käyttöalueen ulkopuolella.

Työssä osittain viitataan Six Sigma -periaatteen mukaisiin menetelmiin, mutta pyrkimyksenä ei varsinaisesti ollut tavoitella Six Sigma -tasoista suorituskykyä. Six Sigmalla itsessään viitataan menetelmiin, joilla pyritään saavuttamaan erittäin suuri saanto ja siten vähentämään saanto-ongelmista syntyvää tappiota. Se on nimensä mukaisesti jonkin prosessin suorituskyvyn tilastolliseen tarkasteluun perustuva toimintatapa. [17]

Työssä käsitellään dataa normaalijakautuneen luonteen mukaisesti, jolloin tilastolliset tunnusluvut kuten hajonta (σ) ovat vertailukelpoisia arvoja. Normaalijakautuneisuutta on tarkasteltu kappaleessa 4.5.

Analysoinnin kriteeriksi on asetettu, että taajuuskohtaisesti laitteiden hajonta tulisi pysyä 2,0 dB sisällä. Tässä tapauksessa sillä tarkoitetaan, että alueen $\pm 3\sigma$ (kattaa 99,7 % normaalijakaumasta) tulee pysyä kyseisen arvon sisällä.

4.2 Keskiarvoistaminen

Yleispätevän kalibrointitaulukon luonti perustuu kerätyn kalibrointidatan keskiarvoistamiseen. Keskiarvon muotoja on monia, kuten aritmeettinen keskiarvo, geometrinen keskiarvo, moodi ja mediaani. Näistä erityisesti kiinnitetään huomiota mediaaniin (keskiluku), sillä se kuvaa keskiarvoa, joka on tilastollisesti keskellä tarkasteltavan näytejoukon arvoja. Toisin sanottuna puolet näytteistä omaavat arvon, joka on yli mediaanin ja toinen puolet alle sen. [18]

Tämän määritelmällisen ominaisuuden vuoksi työssä keskiarvoistuksen menetelmäksi valittiin mediaani, joka takaa että laitekohtainen vaihtelu tapahtuu tasaisessa määrin keskiarvon kummallakin puolella.

Keskiarvomääritelmän lisäksi on tärkeää määritellä minkälaisesta keskiarvoistuksesta on kyse. Työssä ei pyritä etsimään yhtä lukua, jota voitaisiin käyttää taulukon sijaan vaan keskiarvoistettua lukujoukkoa, joka taulukoidaan.

4.3 Olemassa olevan datan analysointi

Kalibrointitaulukot analyysiä varten saatiin tietokannasta, johon on tallennettu kaikkien kalibroituja transpondereiden mittatulokset. Analysoinnin yhteydessä taulukoista karsittiin pois selvästi virheellisiä mittaustuloksia, jotka voivat johtua esimerkiksi siitä, että mitatut laitteet ovat olleet viallisia. Muita virhetuloksia voivat aiheuttaa esimerkiksi operaattorin tekemä virhe kalibrointiprosessin aikana tai kalibrointilaitteiston viat. Kriteerinä oli mittadan jatkuvat nollatulokset tai arvot, jotka poikkeavat selkeästi odotetusti. Täysin systemaattista tarkastelua näistä poikkeavista arvoista ei kuitenkaan tehty.

Analyysi itsessään tehtiin tietokoneella laskentaohjelman avulla. Analyysissä tarkisteltiin yksittäisen taajuuspisteen vaimennuksen erotusta (ΔA) kuumassa ja kylmässä lämpötilassa. Tämä koettiin järkeväksi tavaksi, sillä arvo kuvastaa mittaustarkkuuden vaihteluväliä kyseisellä taajuudella, joka on kirjattu tuotteen spesifikaatioon. Työssä tarkasteltiin eri kokoisia näytejoukkoja:

- Suuri näytejoukko, jota analysoitiin sen kattavuuden takia ($N \approx 3000$).
- Pienempi näytejoukko, joka helpottaa datan käsittelyä, mutta pitäisi kuitenkin olla riittävän kattava antamaan luotettavia tuloksia ($N \approx 200$).
- Pieni näytejoukko, jota käytettiin työn aikana tehdyissä mittauksissa. Tätä käsitellään seuraavassa luvussa.

Haluttiin myös arvioida minkälaista keskiarvoistettua taulukkoa voitaisiin käyttää. Esimerkiksi vain yhden arvon käyttäminen koko taajuusalueelle lämpötilaa kohden tai lämpötila-alueelle taajuuspistettä kohden vaikuttaa houkuttevalta, sillä tällöin tuotetta ei tarvitsisi mitata ollenkaan.

Analyysiä varten pyrittiin arvioimaan tarvittavaa näytemäärää, jolla saataisiin tarpeeksi luotettava otanta saatavilla olevasta datasta. Arvioitu tarvittava näytteen koko N voidaan laskea kaavan 4.1 avulla.

$$N = \frac{Z^2 \sigma^2}{d^2} \quad (4.1)$$

Tässä Z on muuttuja halutun todennäköisyyden α arvolle, σ on hajonta ja d on arvo, joka kuvaa merkittävää muutosta populaatiossa. Arvot näille muuttujille voidaan arvioida saatavilla olevan tiedon perusteella. [19]

Aikaisemmin oltiin analysoitu 123:n kappaleen joukko transpondereiden kalibrointitaulukoita. Tällöin analysoinnissa käytettiin seuraavanlaista metodia:

1. Lasketaan kuumimman ja kylmimmän taulukon arvojen erotus kullekin taajuuspisteelle.
2. Keskiarvoistetaan (aritmeettinen keskiarvo) erotukset.
3. Tarkastellaan keskiarvojen eroja.

Tämän metodin ideana oli tulkita jo keskiarvoistetun taulukon hajontaa. Päädyttiin tulokseen $\sigma_{max} \approx 0,461$ (95 % luottamuksella). Tästä laskemalla kaavan 4.1 perusteella arvoilla $\alpha = 0,99$, eli $Z = 2,58$ ja $d = 0,1$ päädytään otoskokoön 142 näytettä.

Arvo α :lle valittiin suoraan luottamusarvon mukaan, jonka halutaan olevan korkea; d -arvon valintaan ei ole selkeää yhtä syytä, mutta koska kysymyksessä on desibeliarvot, koettiin $d = 0,1$ kuvastavan sellaista lukuarvoa, jota paljon suurempaa virhettä ei mittauksissa haluttaisi. Realistisesti kuitenkin esimerkiksi mittaustulosten tarkkuus ei välttämättä kuitenkaan ole yhtä suuri.

Tuloksen perusteella pääteltiin, että analysoitu datamäärä ei vielä olisi riittävä haluttuun luottamustasoon, mutta analyysin tarkoitus olikin toisaalta vain antaa jonkinlainen käsitys kalibrointitaulukoiden hajonnasta.

Isommalle joukolle ($N = 2988$) tehtiin vastaavanlainen analyysi, mutta sillä poikkeuksella, että erotuksia ei keskiarvoistettu, vaan niistä laskettiin jokaisesta taajuuskohtaisesti tilastollisia tunnuslukuja. Tästä isosta joukosta saatiin tulos $\sigma_{max} \approx 0,311$ (95 % luottamuksella) ja $\sigma_{max} \approx 0,313$ (99 % luottamuksella). Tällöin tarvittavaksi otoskooksi saataisiin 66 näytettä (99 % luottamuksella).

Ison otosmäärän ($N = 2988$) tuloksia analysoitiin myös kahdella toisella tavalla. Näillä tavoilla pyritään vastaamaan kysymyksiin siitä voidaanko käyttää yhtä arvoa lämpötilaa tai taajuuspistettä kohden:

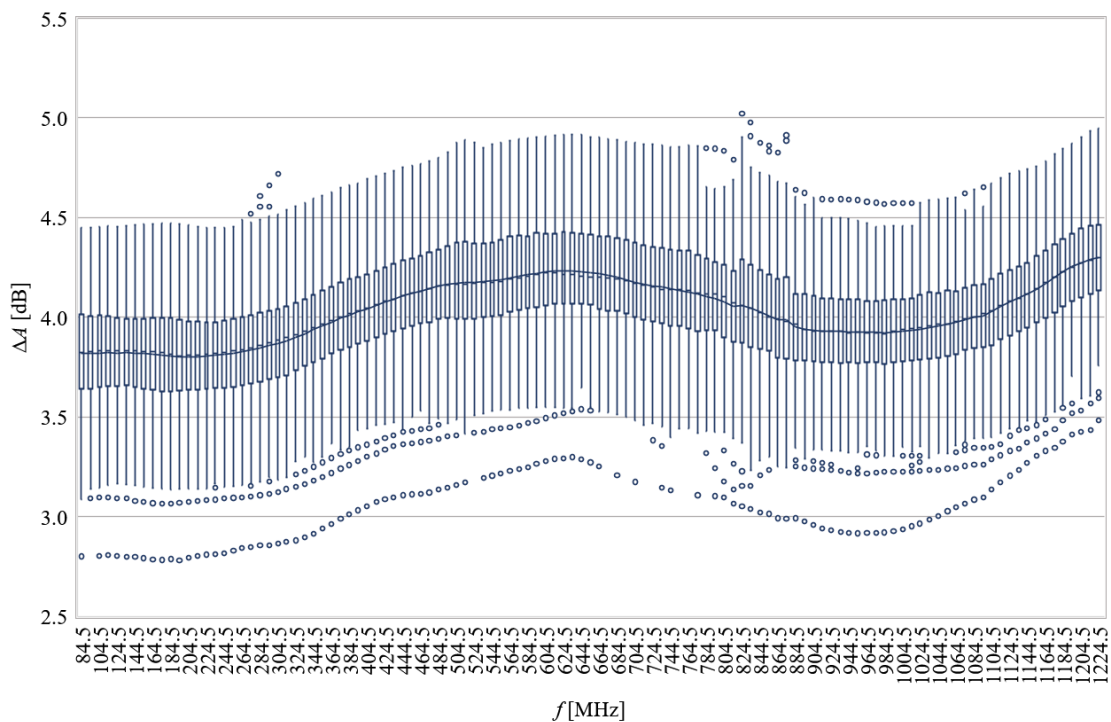
1. Taajuudesta ja lämpötilasta riippumattomuus.
2. Lämpötila- ja taajuuskohtainen hajonta.

Täysin lämpötilasta tai taajuudesta riippumattomuutta analysoitiin laskemalla kaikista näytetarvoista hajonta. Tulos oli $\sigma_{max} \approx 1,919$ (taajuuden suhteen, ilman luottamusvälin tarkastelua), joka on erittäin suuri, eikä analyysiä siten kannattanut jatkaa.

Lämpötilasta riippumattomuutta analysoitiin laskemalla hajonta kaikilta eri taajuuspisteiltä kaikilla lämpötiloilla. Tällöin tulokseksi saatiin $\sigma_{max} \approx 1,806$ (kuten yllä), joka on myös erittäin suuri, joten tätä analyysiä ei jatkettu.

Vastaavasti taajuudesta riippumattomuutta analysoitiin laskemalla kaikista näytteistä lämpötilakohtainen hajonta. Tulokseksi saatiin $\sigma_{max} \approx 0,582$ (kuten yllä), joka on selkeästi lämpötilariippumatonta tulosta parempi, mutta silti heikompi kuin erotusanalyysin tulos. Tätäkään analyysiä ei jatkettu pidemmälle.

Edellä mainittujen tulosten perusteella analysoitava datamäärä pienennettiin aluksi 200 laitteen otokseen, jotta sen käsittely olisi helpompaa. Näiden laitteiden kalibrointitaulukon mittatulosten hajonta on esitetty kuvassa 4.2 alla.

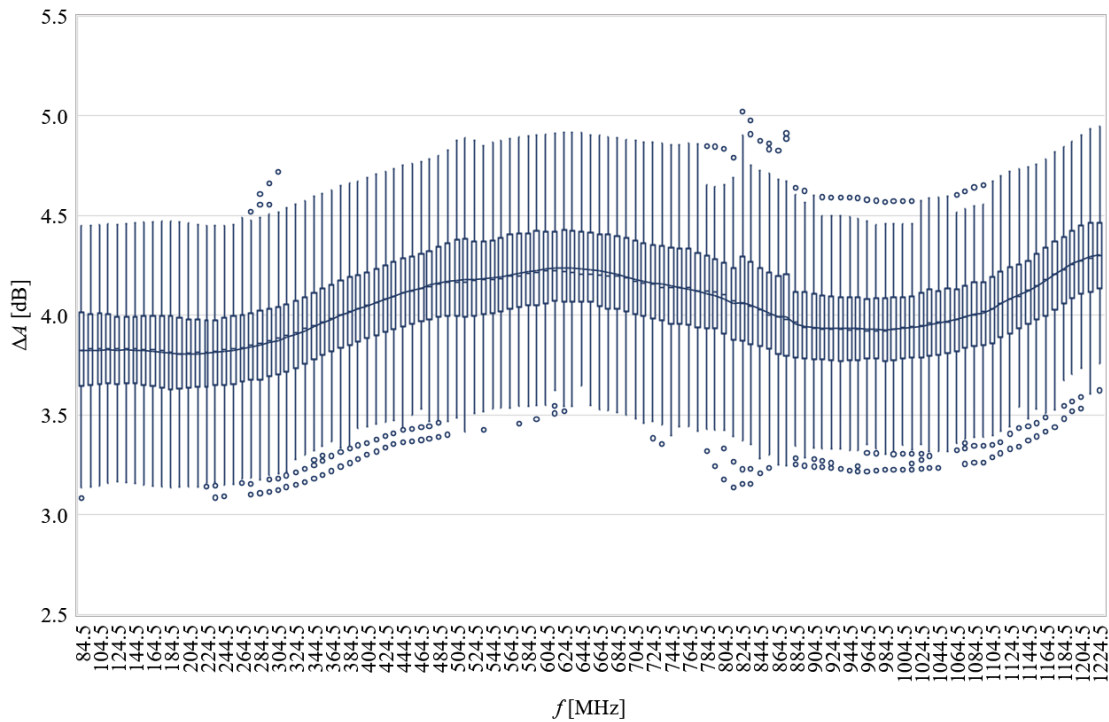


Kuva 4.2. Laatikko-janakuvaaja, joka esittää 200 laitteen otokseen perustuvaa dataa.

Kuvasta voidaan nähdä, että datassa on jonkin verran poikkeamia ja tarkempi katsaus osoitti suurimpien poikkeamien, kuvaajassa matalimmat ΔA -arvot, johtuvan vain yhden laitteen tuloksista. Tämän laitteen tulokset jätettiin pois jatkossa esitetyistä analyyseistä, sillä tämän

yksilön kalibroinnin mittatulokset saattavat olla virheellisiä. Kyseisen laitteen näytteiden poistamisen jälkeinen tilanne on esitetty kuvassa 4 alla.

Voidaan havaita, että yhden laitteen poistaminen otoksesta ei kuitenkaan merkittävästi aikaansaanut muutosta esimerkiksi keskiarvoja kuvaavaan käyrään.



Kuva 4.3. Laatikko-janakuvaaja, joka esittää 199 laitteen otokseen perustuvaa dataa. Joukosta oltiin poistettu erityisen poikkeava yksilö.

4.4 Uuden kalibrointitaulukon luonti

Uusi kalibrointitaulukko luotiin edellä mainitun ääriämpötilatulosten erotuksen perusteella. Työssä päätettiin käyttää lineaariseen interpolaatioon perustuvaa perusfunktiota. Tällöin erotusten mediaanista lasketaan kutakin taajuutta kohden muutos lämpötilan funktiona kaavan 4.3 mukaan.

$$M' = \frac{\mu_{0.5}(A_{i_{max}} - A_{i_{min}}, N)}{T_{max} - T_{min}} \quad (4.3)$$

Kaavassa 4.3 A_i kuvastaa mitattua vaimennusta taajuuspisteessä i , T lämpötilaa ja $\mu_{0.5}(x, N)$ mediaania laskettuna N -kokoisesta otoksesta kyseisellä taajuuspisteellä. Uusi keskiarvoistettu

taulukko muodostetaan välilämpötilassa T_0 (esim. huoneenlämmössä) tehdyn mittauksen perusteella kaavan 4.4 mukaisesti.

$$M_i = A_{i_{T_0}} + M' \cdot (T - T_0) \quad (4.4)$$

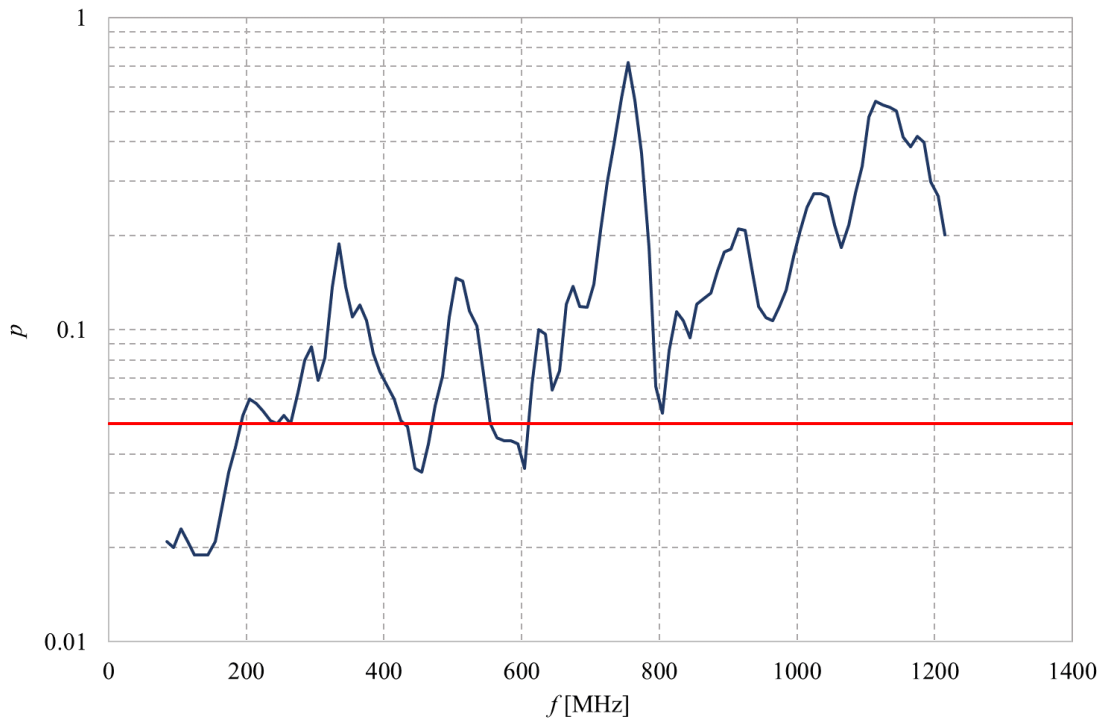
Kaavassa 4.4 T on lämpötila, jolle taulukon arvo halutaan laskea. Käytännössä T on joko T_{min} tai T_{max} .

Edellä mainitut kaavat edellyttävät tietynasteista lineaarisuutta transponderin mittalinjan käyttäytymisessä kalibroittavan lämpötila-alueen sisällä. Tämä on luonnollisesti ollut oletus myös alkuperäiselläkin kalibroitimenetelmällä, vaikkei se välttämättä ole täysin oikea oletus.

4.5 Datan luonteen varmentaminen

Kuten jo kappaleessa 4.1 todettiin, datan oletettiin olevan normaalijakautunutta, mutta tätäkin haluttiin analysoida, jotta voitaisiin olla tietoisia valitun menetelmän mahdollisista vaikutuksista. Normaalijakautuneisuutta voidaan arvioida mm. Anderson-Darling-testillä, joka vertaa otosta haluttuun jakaumatyyppiin. Analyysin tuloksena saadaan niin kutsuttu AD-tulos, jonka perusteella voidaan päätellä onko testattu data kyseisen jakauman mukainen. Työssä käytetty laskentaohjelma antoi tulokset myös p -arvoina, joita tilastollisessa tarkastelussa yleensä käytetään. [20]

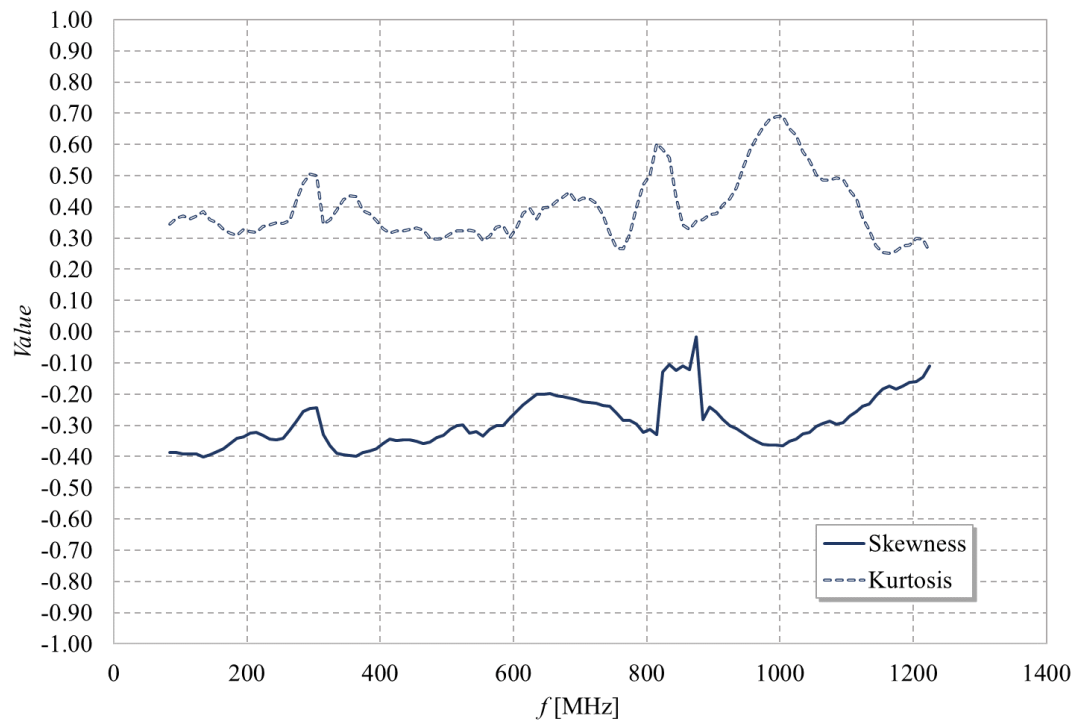
Alla kuvassa 4.4 on yllä mainitusta $N = 199$ kokoisesta otoksesta tehdyn AD-analyysin tulokset p -arvoina. Tässä analyysissä p -arvo kuvastaa todennäköisyyttä nollahypoteesille eli sille, että otos on normaalijakautunut. Nollahypoteesin rajana pidettiin arvoa 0,05, joka on merkitty kuvaan punaisena viivana. [20, 21]



Kuva 4.4. Anderson-Darling-analyysin p -arvojen tulokset otoksesta $N = 199$ (poistettu yksi poikkeava näytejoukko) taajuuden funktiona.

Analyysin perusteella pääteltiin, että data on pääosin normaalijakautunutta, vaikka merkittäviä poikkeamia vaikuttaisi olevan erityisesti matalemmilla taajuuksilla. Tätä puoltaa osittain myös kuvan 4.5 kuvaajat, jotka esittävät otoksen huipukutta ja vinoumaa. Nämä arvot ovat kuitenkin toissijaisia Anderson-Darling analyysille.

Analyysiin käytettiin apuna itse kehitettyä ohjelmistoa, joka yhdisti kaikki otoksen transponderien kalibrointitaulukot. Varsinainen laskenta tehtiin kuitenkin kaupallisten tietokoneohjelmistojen avulla.



Kuva 4.5. Huipukkuus- ja vinoumakuvaajat otoksesta $N = 199$. Mitä korkeampi huipukkuusarvo (*kurtosis*) on, sitä lähempänä keskiarvoa jakauman arvot ovat, jolloin jakauman muoto on piikikkäämpi. Negatiivinen vinouma (*skewness*) merkitsee, että jakauman arvot ovat keskiarvoa suurempia, kun taas positiivisella vinoumalla ne olisivat keskiarvoa pienempiä. Arvot ovat suhteutettu hajontaan ja näytteiden määrään. [21, 22]

4.6 Systemaattisten virheiden huomiointi

Tuloksia analysoidessa ja uutta kalibrointitaulukkoa luodessa kiinnitettiin huomiota muutamaankin tärkeään asiaan:

- tulosten systemaattinen poikkeama oletetusta ja
- poikkeaman juurisyy sekä mahdollinen korjaus.

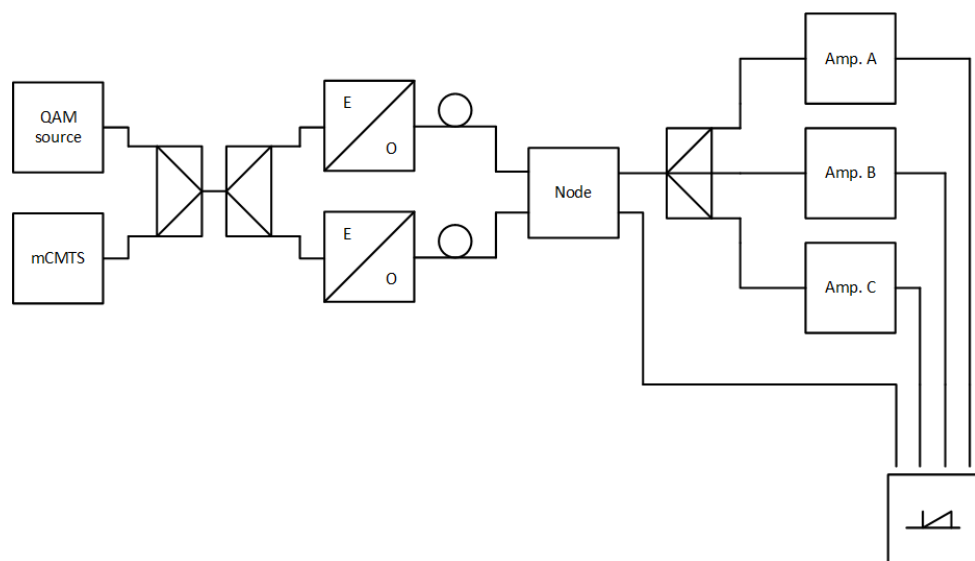
Systemaattista poikkeamaa havaittiin kun tutkittiin vaimennuksen muutostrendiä lämpötilan funktiona. Tätä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5.3. Havainto oli, että muutos koko lämpötila-alueella ei ollut lineaarista, vaan trendin kulmakerroin muuttui keskimmäisen lämpötilan molemmiin puolin.

5 KALIBROINNIN VERIFIOINTI

Transpondereiden kalibrointien verifiointia varten suunniteltiin oma testijärjestelmä, jossa transponderit asennettiin sellaisiin laitealustoihin, joihin ne voisivat normaalikäytössä tulla. Verifiointiin valittiin laitealustoja 4 kpl ja transpondereita 20 kpl. Tällä tavoin saatiin useita mittauskombinaatioita (transponderiyksilöä alustaa kohden).

5.1 Testiympäristö ja mittausperiaatteet

Testaukseen suunniteltu järjestelmä pystytettiin yrityksen tiloihin, tilaavaan olosuhdehuoneeseen sekä mittalaitteet sen lähiympäristöön. Lisäksi alustoja varten tehtiin liikuteltava seinä, johon ne voitiin asentaa kuten alustat yleensä asennettaisiin. Testausympäristöä kuvaava lohkokaavio on esitetty kuvassa 5.1 alla.



Kuva 5.1. Testausympäristö kalibrointien verifiointiin.

Alustoista yksi oli kuitusolmupiste (*fiber node*), johon mitattava signaali syötetään valokuitutekniikalla. Tästä yhdestä alustasta signaali jatkui jakajan (*splitter*) kautta loppuihin kolmeen vahvistinlaitteeseen (*amplifier*). Vastaavasti transpondereiden tietoliikenne liikkui kuitusolmupisteen läpi takaisin signaaleita tuottavaan laitteeseen.

Menosuunnan testisignaalit luotiin nk. mini-CMTS-laitteella ja päätelaitteiston signaaligeneraattorilla, josta ne vietiin valokuitulähtettimeen. Paluusuunnan signaali vietiin vastaavasti valokuituvastaanottimen kautta mini-CMTS:lle.

Testaus perustui signaalien mittaamiseen spektrianalysointilaiteilla yksitellen jokaisen vahvistimen lähtöportista, ja vertaamalla mittaustulosta transponderin omaan mittaustulokseen. Testiympäristössä kaikkien laitteilta tulevien kaapelien pituudet ja tyypit pidettiin yhdenmukaisena, jotta tarvittaessa kaapelien vaikutus voitaisiin laskea pois tuloksista samoin perustein (jos ollaan kiinnostuneita absoluuttisista tuloksista).

Testiympäristöstä vain testattavat laitteet olivat olosuhdehuoneessa sisällä ja mittalaitteet sekä signaalilähteet sen ulkopuolella. Näin ollen lämpötilan muutoksen vaikutus kohdistui vain testattaviin laitteisiin.

Testisignaalien mittaus suoritettiin spektrianalysointilaiteiden kanavatehomittauksella. Mittaus perustuu mitatun tehon integrointiin tietyltä kaistanleveydeltä. Mittauksia varten luotiin automaatio-ohjelma LabVIEW'illä, jolla mittaaminen pystyttiin suorittamaan tehokkaasti niin, että vain mittajohdon vaihtaminen laitteesta toiseen jouduttiin tekemään käsin. Olosuhdehuoneen lämpötilan säätö tehtiin käsin, sillä automatisoinnilla ei olisi saavutettu mainittavia hyötyjä.

Standardissa EN 60728-3 on annettu määritelmä testisignaaleista, jonka mukaan niiden parametrit ovat QAM256, symbolinopeus 6,952 Msymb/s ja kaistanleveys 8 MHz. Spektrianalysointilaiteiden asetuksiksi valittiin alla listatut suositellut asetukset: [23, 24]

- Detector mode: Sample
- RBW: 100 kHz
- VBW: 1 MHz
- Input Att: 15 dB
- Span: 10 MHz

Aluksi mittaus suoritettiin niin, että jokainen transponderi kävi vähintään 1 alustassa, jonka jälkeen mittauksia toistettiin kierrättämällä transpondereita muihin alustoihin. Kaikkia transpondereita ei kuitenkaan mitattu kaikissa alustoissa ajan säästämiseksi. Ensimmäisessä vaiheessa mittauksia suoritettiin 6 lämpötilassa (-20 °C, -5 °C, 10 °C, 25 °C, 40 °C, 55 °C).

Toisessa vaiheessa transpondereihin syötettiin keskiarvoistettu kalibrointitaulukko, jonka jälkeen mittaukset uusittiin samalla periaatteella kuin ensimmäisessäkin vaiheessa. Tällä kertaa mittauksia tehtiin ajan säästämiseksi vain 3 lämpötilalla (-20 °C, 20 °C, 55 °C).

Mittauksen tarkoituksena oli testata päästäänkö keskiarvoistetulla kalibrointitaulukolla yhtä tarkkaan mittaussuorituskykyyn kuin alkuperäisellä kalibrointitaulukolla.

Mittauksia tehtiin 16 MHz:n välein, joka tarkoittaa 70 mittauspistettä. Tämä on hieman yli puolet kaikista mahdollisista pisteistä, joita kalibrointitaulukko käyttää. Mittauspisteiden määrää

pidettiin kohtuullisena, vaikka se ei katakaan kaikkia taulukon pisteitä, sillä se kuitenkin kattaa koko transponderin käytössä olevan menosuunnan taajuuskaistan. Alin mittataajuus oli 90 MHz ja ylin 1210 MHz. Edellä mainitut taajuudet ovat käytettyjen QAM-signaalien keskitaajuuksia.

5.2 Mittaamiseen liittyvät virhetekijät

Mittausten yhteydessä pyrittiin myös havaitsemaan mahdolliset virhe- ja hajatekijät, jotta tuloksien analysointi olisi mahdollisimman luotettavaa.

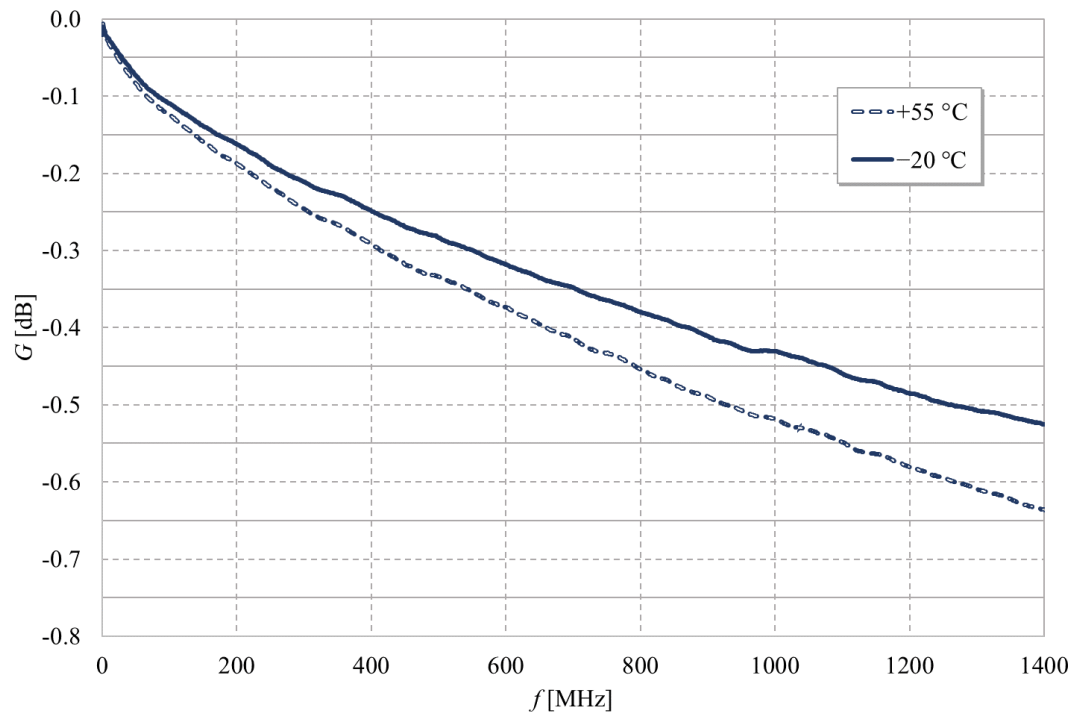
Mittauksen tarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin:

- QAM-signaalin kohinaluonteisuus.
- Spektrianalysaattorin mittatarkkuus.
- Spektrianalysaattorin kalibroinnin stabiilius.
- Olosuhdehuoneen lämpötilan tarkkuus, ml. lämpötilan eläminen mittauksen aikana.
- Alustakohtaiset kalibroitaulukot.
- Mittakaapeleiden ominaisuuksien muuttuminen lämpötilan ja käytön suhteen.

Koska absoluuttisen mittatarkkuuden parantaminen on hankalaa, ja tarkoitus oli keskittyä transponderin lämpökäyttämiseen, pyrittiin mittaustuloksia analysoimaan suhteellisesti toisiinsa verrattuna. Näin esimerkiksi mittakaapelien vaikutus tuloksista voidaan jättää huomiotta. Mittakaapeleita kuitenkin tutkittiin mittaamalla niiden vaimennus, jotta tarvittaessa tiedettäisiin jokaisen alustan lähdössä oleva absoluuttinen taso. Kaapeleiden mittaustulokset on esitetty kuvassa 5.2.

Spektrianalysaattorin luotettavuutta verrattiin yleisesti käytössä olevaan Agilentin USB-tehomittariin, jonka oletettiin olevan tarkempi. [24] Tehomittarin ollessa laajakaistainen, mittausta varten kuormasta sammutettiin kaikki muut kanavat yhtä kanavaa lukuun ottamatta.

Testiin satunnaisesti valitulla kanavalla 474 MHz spektrianalysaattorin mittaamaksi lukemaksi saatiin 96,3 dB μ V ja tehomittarin 96,6 dB μ V. Tulosten perusteella spektrianalysaattorin tulosta voidaan pitää yhtä luotettavana kuin tehomittaria tässä tapauksessa.



Kuva 5.2. Testissä käytettyjen koaksiaalikaapeleiden vaimennus eri ympäristön lämpötiloissa.

Yleisesti ottaen mittauksen epätarkkuus lasketaan geometrisena keskiarvona seuraavan kaavan 5.1 mukaisesti:

$$e = \sqrt{\sum_N \left(\frac{\Delta x_i}{x_i}\right)^2} \cdot 100 \% \quad (5.1)$$

missä e on suhteellinen epätarkkuus prosentteina, N on mittaustuloksen epätarkkuuteen aiheuttavien tekijöiden määrä, x mitattu tulos ja Δx on epätarkkuustekijän vaikutus mitattuun arvoon. [25]

Koska kaikkia virheiden lähteitä on hankala kartoittaa ja niiden tarkkaa vaikutusta mittaukseen arvioida, käytetään tässä seuraavaa heuristista menetelmää:

1. Arvioidaan analysaattorin ja QAM-signaalin yhteisvaikutus.
2. Arvioidaan testattavan laitteen epätarkkuuden, mitta-alustan epätarkkuuden ja QAM-signaalin yhteisvaikutus.
3. Arvioidaan olosuhdehuoneen lämpöeläminen ja tämän vaikutus testattavaan laitteeseen.

Koska QAM-signaali on yhteinen tekijä analysaattorin mittaepätarkkuuden termissä sekä testattavan laitteen epätarkkuudessa, kokonaistulos tulee olemaan hieman pessimistinen.

Analysaattorin ja QAM-signaalin yhteinen epätarkkuustermi $\Delta x_a/x_a$ (tulos 1,9 %) arvioitiin yhdestä mittauksesta saadun tuloksen perusteella seuraavasti:

1. Luettiin mittaustulos usealla taajuudella kolmesti.
2. Laskettiin jokaisen kolmen tuloksen erotus toisistaan ja laskettiin niiden keskiarvo.
3. Laskettiin jokaisen kolmen tuloksen keskiarvo.
4. Verrattiin erotuksien keskiarvoa tuloksen keskiarvoon.

Vastaavaa menetelmää käytettiin myös testattavan transponderin mittauksen suhteellisen epätarkkuuden $\Delta x_b/x_b$ (tulos 1,1 %) arviointiin. Koska mittaus tehtiin usealla eri taajuudella, joilla myös mitatut tasot vaihtelevat, arvioitiin kokonaisepätarkkuudeksi tekijöiden keskiarvo.

Testattavan laitteen lämpöelämisiksi arvioitiin 4,7 dB/74 °C, eli n. 0,064 dB/°C ja vastaavasti lämpökaapin lämpötilan vaihteluksi n. ± 2 °C, jolloin virhetermi olisi n. 0,128 dB. Kun tämä suhteutetaan mittauksessa käytettyyn keskimääräiseen mittaustasoon (n. 100 dB μ V), saadaan suhteelliseksi epätarkkuudeksi $\Delta x_c/x_c$ noin 1,4 %. Tällöin voidaan laskea epätarkkuudet sekä spektrianalysaattorin että transponderin mittatuloksille (kaavat 5.2 ja 5.3):

$$e_{SA} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_a}{x_a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_c}{x_c}\right)^2} \approx 2,36 \% \quad (5.2)$$

spektrianalysaattorille ja

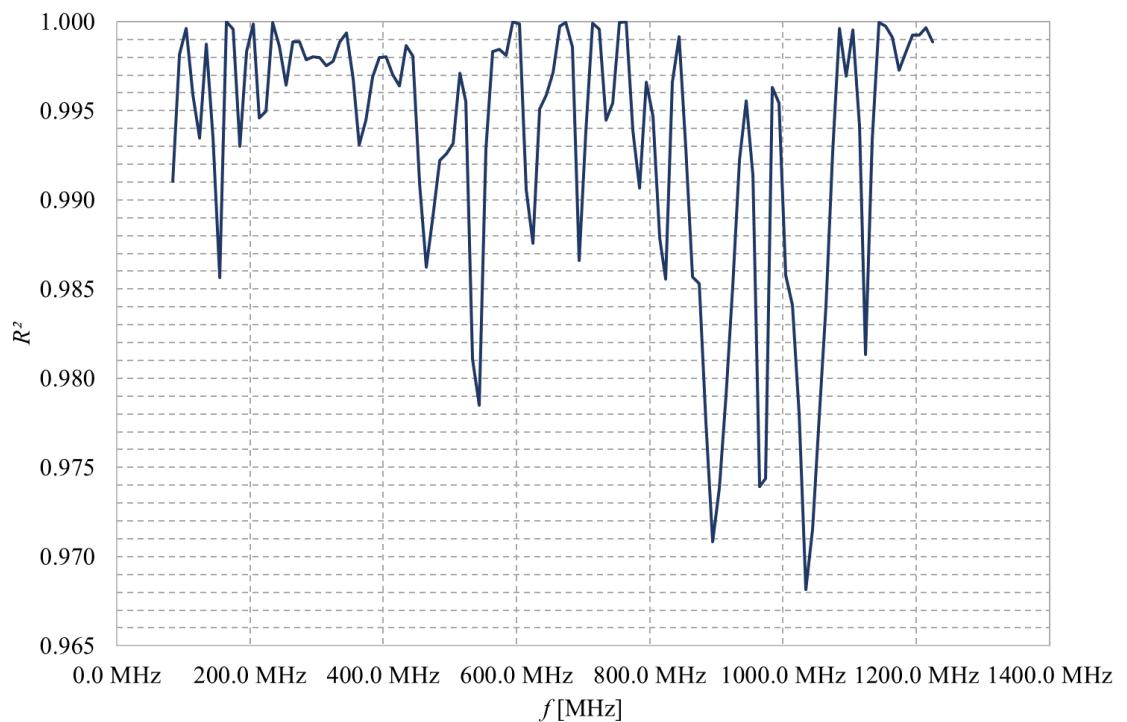
$$e_{TP} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x_b}{x_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta x_c}{x_c}\right)^2} \approx 1,78 \% \quad (5.3)$$

transponderille. Kun tätä epätarkkuusarvoa verrataan taas keskimääräiseen tasoon, saadaan tulokseksi noin +0,20 dB/−0,21 dB spektrianalysaattorin tulokselle ja +0,15 dB/−0,16 dB transponderin mittatulokselle.

Näistä tuloksista voidaan päätellä esimerkiksi se, että kappaleessa 4.3 käytetty $d = 0,1$ dB arvo otoskokoa laskettaessa oli suhteellisen hyvä, koska se on parempi kuin mittatarkkuus, mutta toisaalta ei moninkertainen, joka olisi johtanut tarpeettoman suureen analysoitavaan datamäärään.

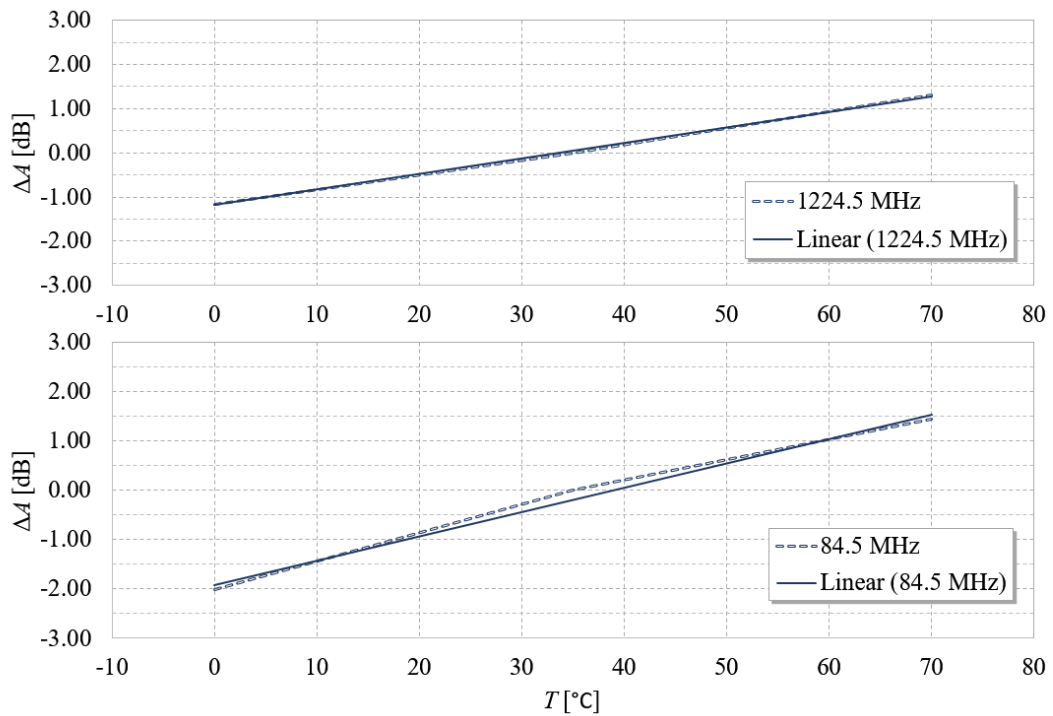
5.3 Lineaarisuuden tarkastelu

Myös transpondereiden lineaarisuutta lämpötilan suhteen arvioitiin. Näissä testeissä yhtä lämpötilaa pidettiin nollakohtana, johon vaimennuksen muutosta ΔA arvioitiin jokaisella taajuudella erikseen. Alla kuvassa 5.3 on esitetty 1 transponderin mittalinjan vaimennuksen sopivuutta lineaariseen regressioon. Tulokset on ilmaistu R^2 -arvon kuvaajassa, jossa mitä lähempänä arvo on lukua 1, sitä lineaarisempaa käyttäytymistä voidaan pitää. [26]



Kuva 5.3. Yhden transponderin lineaarisuutta kuvaava R^2 -arvo kuvattuna taajuuden suhteen.

Alla kuvassa 5.4 on saman transponderin vaimennuksen muutosta esittävät kuvaajat kahdelta taajuudelta. Nämä kuvaajat toimivat hyvinä esimerkkeinä siitä miten R^2 -arvojen erot näkyvät käytännössä. On kuitenkin huomioitavaa, että regressiomalli ei kulje keskilämpötilassa 0 dB:n pisteen kautta niin kuin voisi olettaa.



Kuva 5.4. Yhden transponderin lämpötilalineaarisuus kahdella taajuudella. Taajuuden 84,5 MHz R^2 -arvo on 0,991 ja taajuuden 1224,5 MHz R^2 -arvo on 0,999.

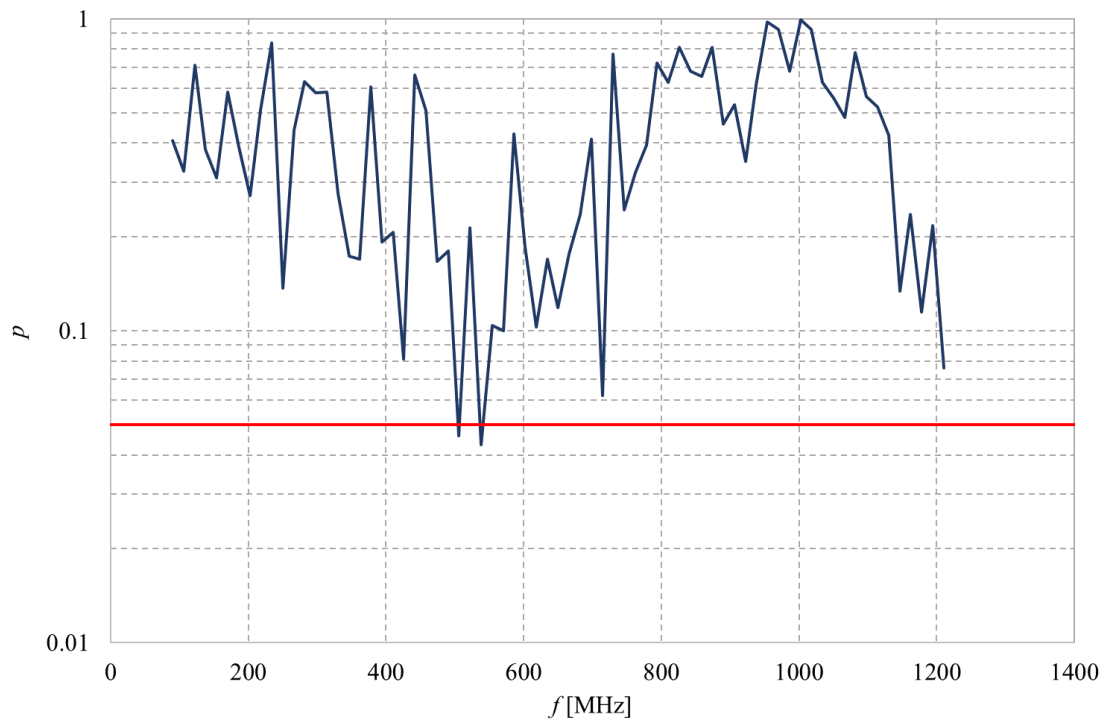
Kuvasta havaitaan, että 84,5 MHz taajuudella vaimennuksen muutos poikkeaa lineaarisesta huomattavasti (maksimi 0,19 dB), kun taas 1224,5 MHz taajuudella poikkeamaa on selvästi vähemmän (maksimi 0,05 dB).

5.4 Mittaustulosten analysointi

Uutta keskiarvoistettua kalibrointia ja vanhaa kalibrointia verrattiin keskenään riippumattoman t-testin avulla. Analyysi vertaa mittaustulosten odotusarvojen eroja. [27] Tässä analyysissä ei tarkasteltu alustakohtaisen vaihtelun vaikutusta vaan kaikkia tuloksia pidettiin toisiinsa vertailukelpoisina. Alkuperäistä kalibrointia käyttävien mittausten $N = 60$ ja keskiarvoista kalibrointia käyttävien $N = 35$.

Analyysin nollahypoteesina H_0 pidettiin ehtoa $\mu_0 = \mu_1$, eli kummankin otoksen keskiarvot ovat samat. T-testistä saadaan 2 tulosta, t -arvo ja p -arvo. Näistä arvoista tässä analyysissä on tarkasteltu p -arvoa, jonka perusteella yleisesti ottaen nollahypoteesi hylätään, mikäli $p < 0,05$. Kuvassa 5.5 esitettyjen tulosten perusteella voitaisiin ajatella, että varsinaista eroa kalibrointitaulukoilla ei ole. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkansa jokaisen mittauspisteen kohdalla.

Lisäksi joillakin mittauspisteellä p -arvo oli suhteellisen alhainen vaikka pysyikin raja-arvon yläpuolella.



Kuva 5.5. Alkuperäisen kalibroititaulukon ja keskiarvoistetun kalibroititaulukon mittatuloksista tehdyn t-testin p -arvotulokset taajuuden funktiona. Punainen viiva kuvaa tyypillistä raja-arvoa 0,05.

Tulosta voidaan toisaalta analysoida myös voiman (β -arvo) näkökulmasta. Voimalla tarkoitetaan todennäköisyyttä havaita tietty poikkeavuus näytteiden tai otosten kesken. [21] Alla taulukossa 5.1 on esitetty todennäköisyydellä β havaittava erotus eri näytemäärien suhteen. Testissä käytettiin kappaleen 4.3 analyysin perusteella arviota $\sigma = 0,31$.

Taulukko 5.1. Poikkeavuus sen havaitsemistodennäköisyyden ja näytemäärän suhteen.

Näytteiden määrä (N)	$\beta = 0,95$	$\beta = 0,97$	$\beta = 0,99$
35	0,271	0,289	0,322
40	0,253	0,269	0,301
50	0,226	0,241	0,268
60	0,206	0,219	0,245

Toisaalta toisinpäin laskettuna 35 näytteellä 0,15 poikkeavuuden havaitsemisen todennäköisyys on 51,4 % ja 0,20 poikkeavuuden havaitsemistodennäköisyys on 75,8 %. Vaikka 35 näytteen otoksella ei päästäisikään kriittisen 95 % havaitsemistodennäköisyyteen näillä tarkkuuksilla (vrt. mittausepäätarkkuus kappaleessa 5.2), t-testin tulosta voidaan kuitenkin pitää hyvin suuntaa antavana.

6 VAIHTELUIDEN MITTAAMINEN JA VÄHENTÄMINEN

Edellisessä luvussa sivuttiin jo mittaustulosten epätarkkuuksia kalibroinnin verifioinnin suhteen. Analyysi keskittyi kuitenkin työn aikana tehtyihin varmistusmittauksiin, eikä varsinaisesti tuotannossa tehtävään kalibrointiprosessiin, josta tässä luvussa puhutaan.

6.1 Vaihteluiden määrittäminen

Vaihtelun lähteitä pyrittiin määrittämään tarkastelemalla kaikkia käsiteltyjä työvaiheita alkuperäisestä kalibroinnista alkaen, mukaanlukien työn aikana tehdyt mittaukset ja lopullinen keskiarvopohjainen kalibrointiprosessi. Nämä kaikki tulevat vaikuttamaan tuotannolliseen vaihteluun.

Tarkastelun tuloksena päädyttiin siihen, että vaihteluiden lähteitä ovat ainakin seuraavat:

- Transponderien kalibroinnissa käytetyt alustat ja mittalaitteet.
- Testialustojen kalibrointijigi ja käytetyt mittalaitteet.
- Työn mittauksissa käytettyjen signaalilähteet ja mittalaitteet.
- Kaikissa kalibroinneissa ja mittauksissa käytetyt olosuhdekaapit.
- Mittapisteiden määrä taajuuden ja lämpötilan suhteen.
- Ihmisperäiset lähteet, kuten huonosti tehdyt kytkennät laitteissa tai johtimissa.
- Testilaitteiden kuluminen, liittimet kytkettäessä ja materiaalit lämmöissä.
- Prosessin vaiheiden määrä yleisesti. Vaiheet luovat mahdollisuuksia vaihtelun lähteiden synnylle.

Mahdollisia toimenpiteitä vaihteluiden vähentämiseksi pyrittiin myös kartoittamaan. Aihetta käsitellään seuraavissa kappaleissa, jotka keskittyvät tarkastelemaan vaihteluiden syntymekanismeja. Varsinaiisiin toimenpiteisiin ei projektin aikana ryhdytty niiden vaatiman ajankäytön takia. Työn osalta vähentämistoimet jäävät siten havainnoista raportoinniksi.

Työssä esitetty keskiarvoistusmalli vähentää vaihteluita jo itsessään vähentämällä kalibrointiprosessin vaiheita, joista vaihteluita voi syntyä.

6.2 Lämpökali brointiprosessin aikana syntyvät vaihtelut

Tuotannon kalibroinnissa syntyy kappaleessa 4.6 esitettyjen tulosten mukaisesti samankaltaisia virheitä kuin edellisessä luvussa käsitellyn kalibroinnin verifiointin epätarkkuuden suhteen. Tuotannon kalibrointiprosessissa kuitenkin esimerkiksi spektrianalysointin sijaan käytetään tehomittaria, jonka oletetaan olevan tarkempi varsinkin absoluuttisessa tehomittauksessa, kuten mainittu lähteessä [24].

Työn aikana keskityttiin tarkastelemaan mahdollisia vaihteluita jigissä. Edellä mainittiin jo mahdolliset kytkentöihin liittyvät virheet, mutta niiden tutkiminen vaatisi merkittävästi enemmän aikaa kuin työlle oli käytettävissä. Sen sijaan työssä tutkittiin ympäristötekijöitä, eli lämpötilan vaikutusta mittaustulokseen.

Poikkeamaa tutkittiin myös perehtymällä kalibrointimenetelmään tarkemmin kokeen perusteella, jonka tulokset on esitetty taulukossa 6.1. Kokeessa pantiin kalibroinnissa käytettyyn testialustaan 4 lämpöanturia, joista mitattiin arvot eri lämpötiloissa sekä eri vaiheissa kalibrointiprosessia. Lämpötilojen havaittiin vaihtelevan merkittävästi kalibrointiprosessin aloituksen ja lopetuksen välillä. Tästä seuraa siis se, että vaikka näennäisesti laitteet ovat kalibroinnin ajan tietyssä ympäristölämpötilassa, eri transponderit voivat kuitenkin olla kalibrointihetkellä toisistaan poikkeavissa lämpötiloissa.

Tämän syynä lienee ennenkaikkea se, että transponderien tuottama lämpöteho vaikuttaa merkittävästi niiden lähiympäristöön. Myös kalibroinnissa käytetyn olosuhdekaapin lämpötilastabiilius vaikuttaa tuloksiin.

Taulukko 6.1. Kalibroinnissa käytetyn testijigin lämpötiloja eri kohdista ja eri vaiheissa.

Lämpötila	-5 °C		+70 °C	
	Aloitus	Lopetus	Aloitus	Lopetus
Kalibrointivaihe → Anturin sijainti ↓				
Slot A	+0,7 °C	-2,4 °C	+67,4 °C	+71,8 °C
Slot B	+3,2 °C	+0,0 °C	+66,8 °C	+78,0 °C
Reuna	-0,6 °C	-2,0 °C	+66,8 °C	+71,3 °C
Keski	+1,6 °C	-0,5 °C	+66,4 °C	+71,9 °C

Taulukon 6.1 tuloksista voidaan havaita, että samassa kohtaa jigä on selvästi eri lämpötila eri vaiheissa kalibrointia, vaikka periaatteessa oletuksena on, että lämpötila on sama koko kalibroinnin vaiheen ajan. Vastaavasti myös sijainnilla nähdään olevan vaikutusta lämpötilaan. Vaikutusta kalibrointiin voidaan verrata kappaleessa 5.2 esitettyihin tuloksiin mittauserpätarkkuudesta.

Tällainen virhe on systemaattista, mutta kuitenkin ennustamatonta siinä mielessä, että ilman kattavaa tutkimista, ei voida tietää mikä transponderi on kalibroitu milläkin ajanhetkellä suhteessa kalibroinnin vaiheeseen. On kohtalaisen työlästä jäljittää missä jigiapaikassa mikäkin transponderi on kalibroitihetkellä ollut. Lisäksi on mahdollista, että jigyksilö on ollut eri kunnossa (ikäntyminen) kalibroitihetkellä. Näin ollen kyseistä virhettä ei voida korjata yksiselitteisesti ilman lisätyötä.

6.3 Vaihtelut laitealustoissa

Työssä kiinnitettiin huomiota myös siihen miten laitealustat vaikuttavat transponderin suorittamaan mittaukseen. Tällä on merkitystä, sillä jokaisessa laitealustassa on oma kalibrointi, jolla pyritään kompensoimaan eroa alustan lähdön ja transponderin tulon välillä.

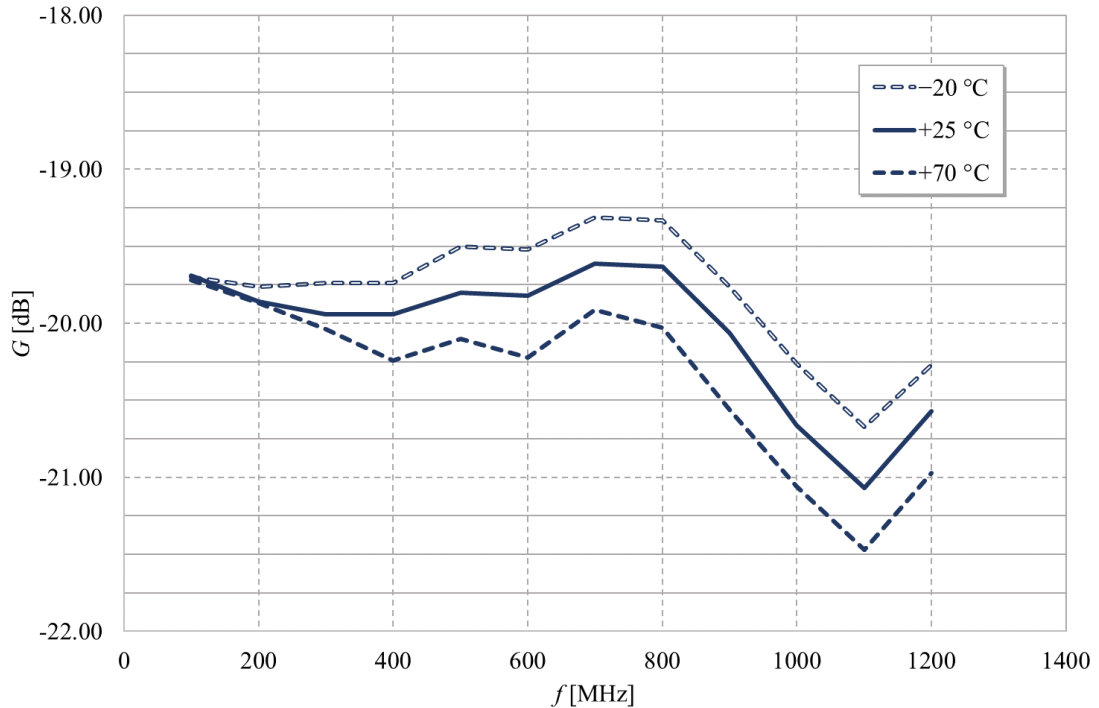
Laitealustat kalibroidaan asettamalla laitealustaan mitta-adapteri, eli kalibrointijigi, joka kytkeytyy transponderin mittalinjaan. Taulukko syntyy mittaamalla alustan RF-lähdön ja kalibrointijigin RF-liittimen välistä vahvistusta G . Alustan mittalinjan oma lämpökäyttäytyminen on mitattu laitealustan suunnittelun aikana ja sen oletetaan olevan vakio kaikilla saman laitealustan yksilöillä. Kalibroinnin aikana alustan sen hetkinen lämpötila otetaan ylös ja saadun mittaustuloksen perusteella laitteelle interpoloidaan kalibrointitaulukko.

Kalibrointitaulukko poikkeaa transpondereiden taulukoista, sillä mittauspisteitä on vain 12 (n. 10 % transpondereiden mittauspisteistä) ja mittaustaajuuudetkin ovat eri. Alustan kalibroinnissa on kuitenkin mitattu koko kaista, jonka perusteella taulukko on luotu. Muiden taajuuksien kalibrointi luodaan interpoloimalla tai ekstrapoloimalla. Alla taulukossa 6.0 on esimerkki laitealustan kalibrointitaulukosta ja kuvassa 6.1 on esitetty taulukkoa vastaavat kuvaajat graafisesti.

Taulukko 6.2. Esimerkki laitealustan kalibrointitaulukosta. Mittatulosten yksikkö on desibeli.

	100 MHz	200 MHz	300 MHz	400 MHz	500 MHz	600 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1000 MHz	1100 MHz	1200 MHz
-20 °C	-19.70	-19.76	-19.74	-19.74	-19.50	-19.52	-19.31	-19.33	-19.76	-20.26	-20.67	-20.27
25 °C	-19.69	-19.86	-19.94	-19.94	-19.80	-19.82	-19.61	-19.63	-20.06	-20.66	-21.07	-20.57
70 °C	-19.72	-19.87	-20.04	-20.24	-20.10	-20.22	-19.91	-20.03	-20.56	-21.06	-21.47	-20.97

Yksi merkittävä tekijä on laitealustan kalibroinnissa syntyvät mahdolliset virheet. Tähän vaikuttaa erityisesti tapa, jolla laitealustat kalibroidaan.



Kuva 6.1. Taulukon 6.2 kalibrointi-arvot graafisessa muodossa. Kalibrointitaulukon arvot vastaavat samalla mittalinjan amplitudivastetta.

Alustan kalibrointiin syntyy virhettä ainakin seuraavasta kolmesta syystä:

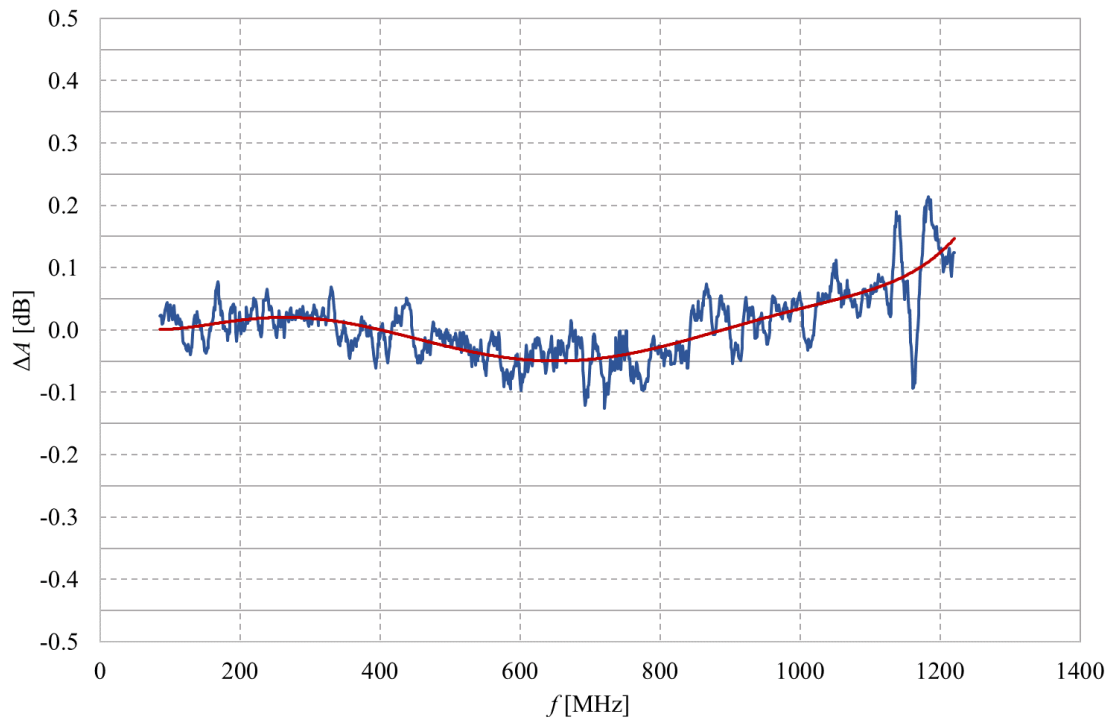
- 1) Mitta-adapteri ei synnytä transponderia vastaavaa lämpökuormaa.
- 2) Laitealustan kalibroinnissa käytetään eri määrää mittauspisteitä kuin transpondereilla.
- 3) Mitta-adapterin impedanssisovitus ei välttämättä ole sama kuin transponderin.

Näistä tutkittiin työn puitteissa erityisesti kohtaa 1. Tutkiminen toteutettiin kokeen avulla, jossa transponderia muutettiin sellaiseksi, että se toimii muutoin normaalisti, mutta sen RF-tulo oltiin kytketty laitteen ulkopuoliseen liittimeen. Tällä tavoin kyettiin luomaan realistisempi tilanne lämpökuormituksen suhteen. Tässäkin tilanteessa jää kuitenkin huomiotta transponderin lämpötilan muutos kun se vastaanottaa signaalia.

Alla kuvassa 6.2 on esitetty erotus tuotannossa käytettävän mitta-adapterin ja testiä varten tehdyn mitta-adapterin mittaustuloksista. Punainen kuvaaja esittää polynomisovitusta, jolla pyritään esittämään keskimääräistä erotusta. Laitealustana käytettiin yhtä samoista laitteista, jota käytettiin myös luvun 5 testeissä.

Kokeen perusteella voidaan arvoida, että näiden 2 mitta-adapterin välillä on eroa n. 0,15 dB mitattavan taajuuskaistan yläpäässä. Jonkinverran poikkeamaa tapahtuu myös taajuuskaistan

keskivaiheilla. Tuloksessa on havaittavissa myös merkittävää kohinamaista poikkeamaa trendistä, joten avain tarkasti poikkeamaa on mahdotonta arvioida.



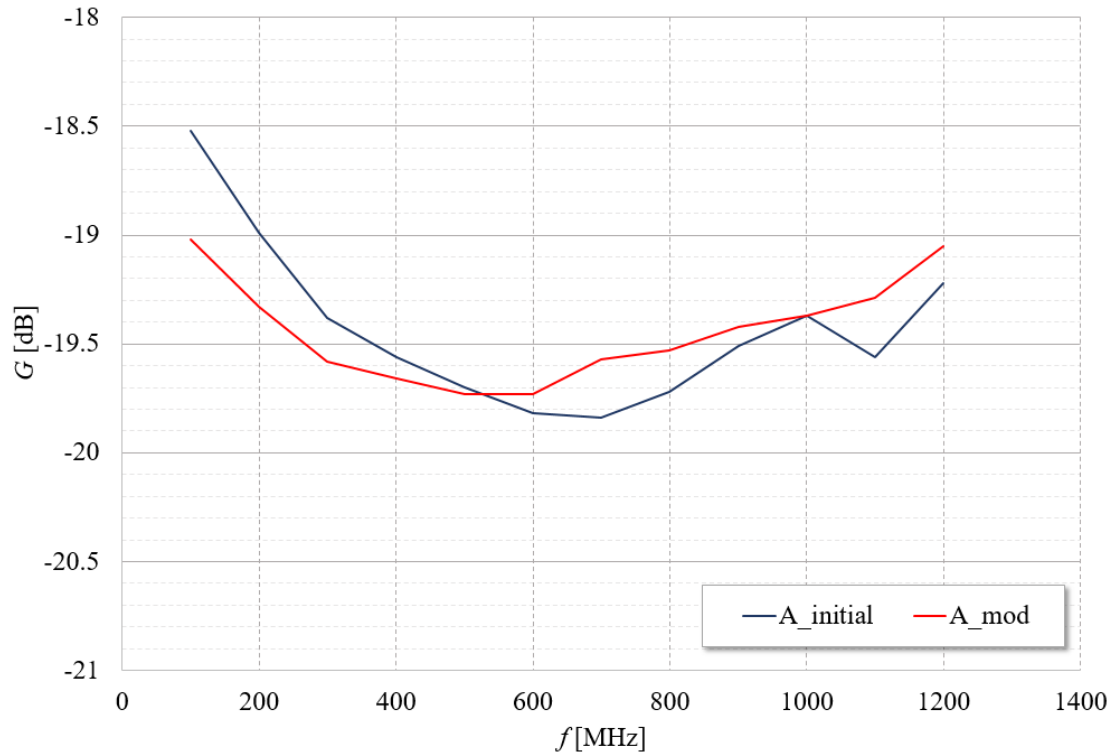
Kuva 6.2. Mitta-adaptoreiden erotus laitealustassa. Sininen kuvaaja esittää mittatulosta ja punainen kuvaaja on polynomisovitus mitattuloksesta, eli se kuvaa keskimääräistä toimintaa.

Tulos kertoo siitä, että laitealustojen kalibroinnissakin tapahtuu systemaattista virhettä, joka vaikuttaa kokonaisuuteen ja näin ollen saavutettavaan mittatarkkuuteen.

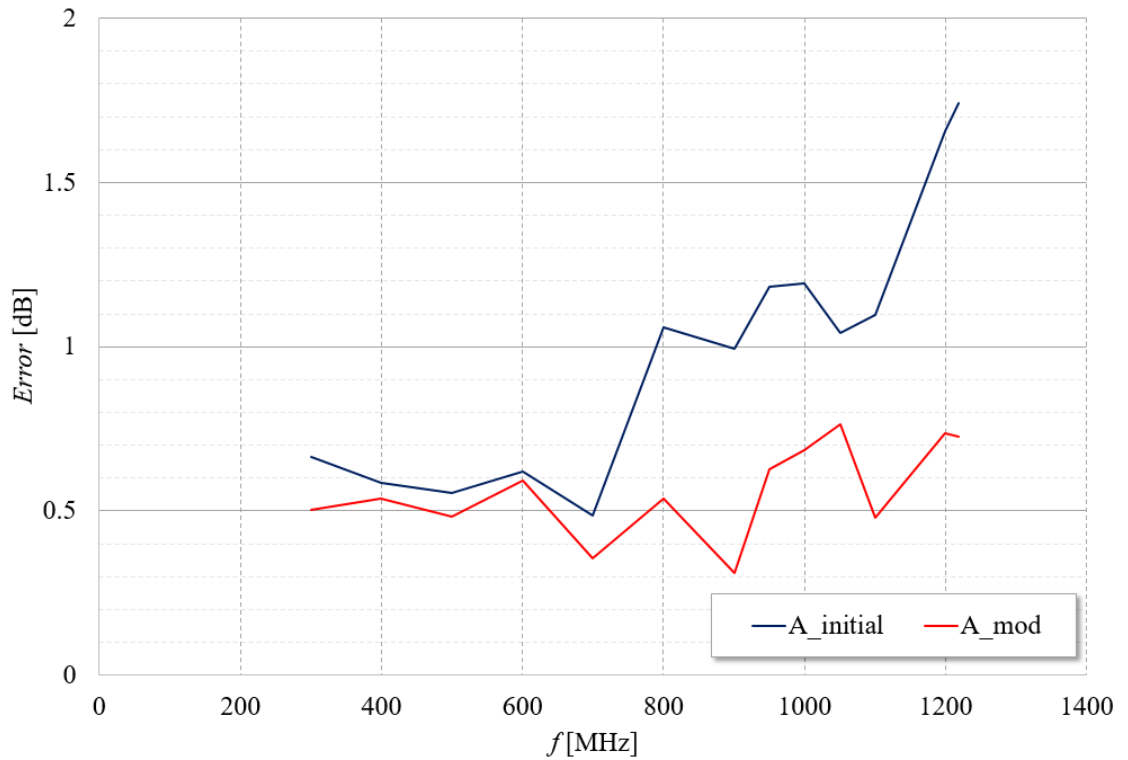
Laitealustan suunnittelun yhteydessä on tärkeää ottaa huomioon transponderin mittalinjan impedanssisovitus. Seuraavassa on havainnollistettu impedanssisovituksen vaikutusta (absoluuttiseen) mittaustulokseen. Käytössä on sama laitealusta (A), jossa mittalinjan impedanssia on paranneltu sekä transponderi, jonka kalibrointia ei ole muutettu. Taulukosta 6.0 ja kuvasta 6.3 havaitaan ettei mitta-adapterin kanssa tehty laitealustan kalibrointi juurikaan eroa ($< 0,5$ dB) alkuperäisen ($A_{initial}$) ja mittalinjan impedanssisovituksen parantamisen (A_{mod}) välillä. Kuvasta 6.4 nähdään kuitenkin impedanssisovituksen merkittävä vaikutus mittaustarkkuuteen.

Taulukko 6.3. Laitealustan kalibrointitaulukko (25 °C) ennen ja jälkeen impedanssisovituksen parantamisen.

25 °C	100 MHz	200 MHz	300 MHz	400 MHz	500 MHz	600 MHz	700 MHz	800 MHz	900 MHz	1000 MHz	1100 MHz	1200 MHz
$A_{initial}$	-18.52	-18.99	-19.38	-19.56	-19.7	-19.82	-19.84	-19.72	-19.51	-19.37	-19.56	-19.22
A_{mod}	-19.02	-19.33	-19.58	-19.66	-19.73	-19.73	-19.57	-19.53	-19.42	-19.37	-19.29	-19.05



Kuva 6.3. Laitealustan mittalinjan kalibrointi ennen impedanssisovituksen parannusta (A_initial) ja sen jälkeen (A_mod).

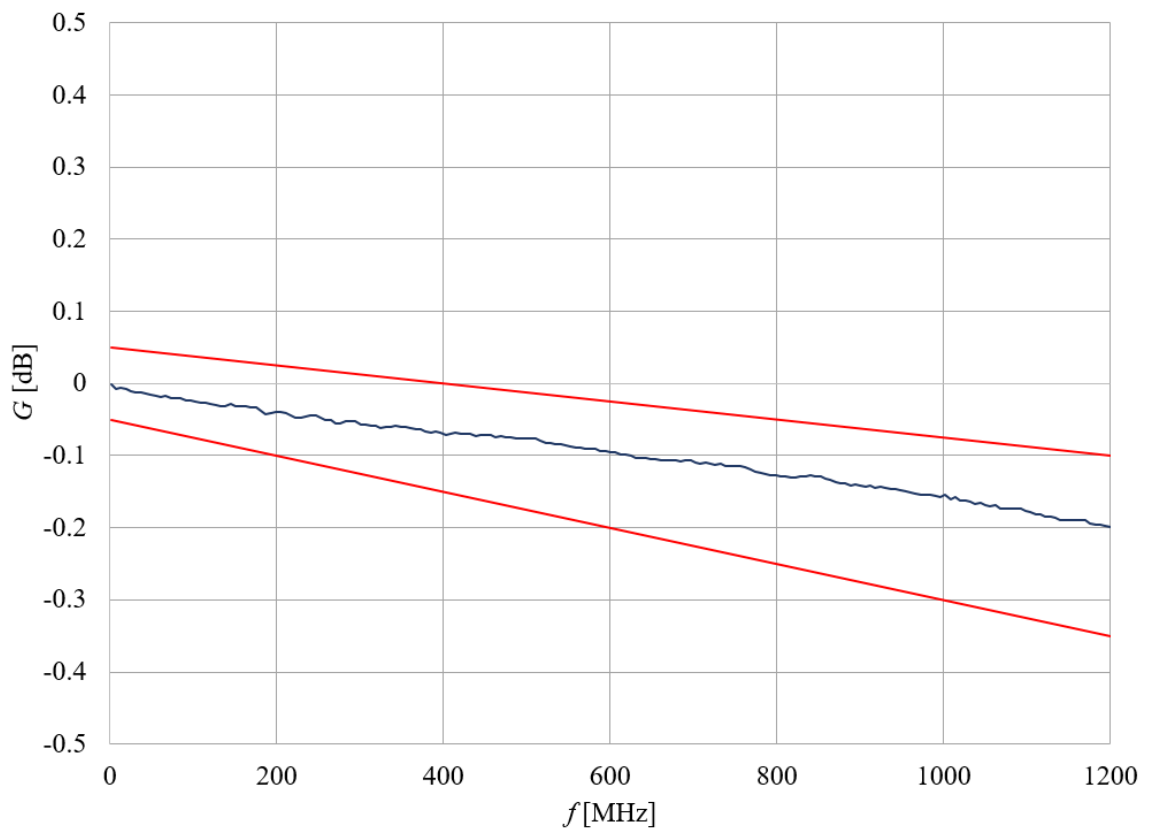


Kuva 6.4. Transponderin absoluuttinen mittavirhe ennen alustan impedanssisovituksen parannusta (A_initial) ja sen jälkeen (A_mod).

Transponderin mittausvirheeksi (*Error*) saadaan jopa 1 dB huonompi tulos jos impedanssia ei ole huomioitu oikein. Toisaalta tässäkin tapauksessa lämpökälibroidun transponderin virhe on sama lämpötilasta riippumatta.

6.4 Vaihtelut laitealustan kalibrointijigissä

Kuvassa 6.5 on esitetty erään laitealustan kalibrointiin (taulukko 6.2) käytettävän kalibrointijigin amplitudivaste. Punaiset viivat kuvastavat sille sallittua vaihteluväliä. Vastetta ei käytetä kompensoimaan laitealustan vastetta sitä kalibroitaessa, mutta jigi itsessään testataan säännöllisesti, n. 6 kk välein. Toisaalta merkittävät poikkeamat näkyvät alustan kalibroinnissa, jossa on omat hyväksyntäraajat.



Kuva 6.5. Laitealustan kalibrointijigin amplitudivaste ja hyväksyntäraajat.

Koska vastetta ei käytetä alustan kalibroinnissa, se aiheuttaa virheen alustan kalibrointitaulukkoon. Korkeilla taajuuksilla rajojen erotus on jopa 0,25 dB, joka vaikuttaa suoraan transponderin mittaustuloksen tarkkuuteen alustojen välillä.

7 KALIBROINTI TRANSPONDERIN TEKNOLOGIAN MUUTTUESSA

Yrityksen kaikki HFC-verkkotuotteet ovat DOCSIS 3.1 yhteensopivia. DOCSIS-standardit on luotu määrittelemään kaapelimodeemien liikennöintiin liittyvät tekniset toteutukset kaapeliverkossa. Standardista vastaa voittoa tavoittelematon Cable Television Laboratories. Sen jäsenenä on kaapelitelevisioon liittyvää liiketoimintaa harjoittavia yrityksiä ympäri maailmaa. [28]

Nykyinen viritin pohjautuu DOCSIS 3.1 -standardin taajuuskaistaan kaapelimodeemien osalta kaapelitelevisioverkoissa. Transpondereissa nämä kaistat ovat paluusuunnan osalta 5 – 204 MHz ja menosuunnan osalta 54 – 1218 MHz. DOCSIS 3.1 määrittelee myös menosuunnan osalta korkeamman taajuuden 1794 MHz, vaikka käytännössä kaapeliverkkoja ei toistaiseksi olekaan toteutettu kyseiseen ylätaajuuteen asti. [29]

Taajuuskaistat on määritelty uudessa DOCSIS 4.0 -standardissa paluusuunnan osalta 5 – 85 MHz ja menosuunnan osalta 108 – 1218 / 1794 MHz. Koska jo nykyiset kaapeliverkkotuotteet toteuttavat kyseiset taajuuskaistat 1218 MHz asti, voi siirtyminen DOCSIS 4.0 mukaiseen verkkoon käytännössä tarkoittaa ylätaajuuden vaihtumista 1794 MHz:in. Mahdollinen taajuuskaistan muutos tarkoittaa transponderituotteiden viritin uudelleen suunnittelua. [30]

Uusi standardi pitää sisällään uuden taajuusjakoisuuteen perustuvan modeemien liikennöinnin. Siitä käytetään termiä *Full Duplex* (FDX). Siinä taajuusväli 108 – 684 MHz on sekä paluusuunnan että menosuunnan taajuuskaistaa samanaikaisesti. Tämä on uusi mahdollinen toteutus kaapelimodeemien kaistan lisäämiseksi paluusuunnan osalta. Tällöin ei ole välttämättä tarpeen kasvattaa kaapeliverkon taajuuskaistaa 1794 MHz:iin asti. [30]

DOCSIS 4.0 -standardin tuodessa uusia vaihtoehtoja toteuttaa taajuuskaistan lisäämistä kaapeliverkkoihin ja FDX:n keskeneräisyyden takia ei ole vielä täysin selvää miten uusia kaapeliverkkoja tullaan toteuttamaan tulevaisuudessa. Tämä tuo haasteita varautua muutoksiin transponderituotteissa, koska on vaikeaa arvioida millainen viritin FDX-verkossa tarvitaan. [31]

7.1 Teknologisesti erilaisen virittimen suunnittelussa huomioitavia asioita

On mahdollista, että nykyisten kaltaisia transponderituotteita ei tulla tulevaisuudessa tekemään montaa uutta versiota. Teknologian kehitystä on tapahtunut paljon kaapeliverkoissa käytettäville komponenteille uusien standardien myötä. Tällöin nykyisen kaltainen superheterodyne-vastaanotin, joka on suunniteltu palakomponenteilla, voidaan korvata kompaktimmalla ja suorituskykyisemmällä versiolla nostamatta hintaa, kun tarkastellaan kokonaisuutta ja suorituskyvyn kasvua.

Markkinoilla on useita erilaisia viritinkomponentteja, joilla on iso taajuus- ja tulotehokaista sekä pieni tulotehon mittausepä-tarkkuus komponentin lämpötila-alueella. Ellei viritin pidä sisällään datan prosessointia varten omaa prosessoria, sellainen tarvitaan erillisenä komponenttina, kuten nykyisessä virittimessä. Sisäänrakennetulla prosessorilla varustetulla virittimellä saavutettavat edut olisivat yksinkertaisempi kytkentä, jolloin sen valmistaminen olisi helpompaa ja se olisi vähemmän vikaantumisaltis. Lisäksi yksilöllinen lämpökali brointi monissa eri lämpötiloissa olisi tarpeeton. Edellä mainituista syistä johtuen tuotteen materiaalikustannukset voisivat jopa olla suuremmat ja silti tuotteen elinkaaren kokonaiskustannukset olisivat edullisemmat nykyiseen verrattuna. [12]

Vaikka nykyiseen virittimeen on mahdollista tehdä keskiarvoistettu kalibrointitaulukko, sen luominen on vaatinut paljon tutkimusta, koska hajonta on ollut tuntematonta ja ennustamatonta. Tämä sama työ täytyy tehdä aina uudelleen mikäli uusi transponderituote on virittimen osalta nykyisen kaltainen. Kokonaissästö on kuitenkin merkittävä, jolloin se olisi kannattavaa tehdä vaikka se nostaa laitteen suunnitteluhankkeen kustannuksia ja pidentää tuotteen pääsyä markkinoille. Erillistä viritinkomponenttia käyttämällä ei ole näitä ongelmia, koska valmistaja ilmoittaa hajonnan, jolloin sen tutkimiseen ei tarvitse käyttää aikaa. Edelleen hajonnan ennustettavuus olisi haasteena, mutta hajonnan suuruus on komponentin valintakysymys. [12]

7.1.1 Jäähdytys

Virittimen koon pienentyessä haaste tulee olemaan tarvittavan jäähdytyksen järjestäminen, koska viritinkomponentit pitävät sisällään paljon tehoa kuluttavia toimintoja ja komponentin pinta-ala ei ole suuri. Tällöin joudutaan yhdestä kohdasta siirtämään paljon lämpöä pois. Myös komponentin toimintalämpötila-alue voi tuoda haasteita, koska yrityksen kaapelitelevisioverkon kentälle asennettavat tuotteet ovat määritelty toimivaksi pääsääntöisesti välillä -40 °C ja $+55\text{ °C}$.

Laitteet on myös suunniteltu passiivijäähdytteisiksi, jolloin lämpösuunnittelulla on iso merkitys. Viritinkomponenteissa ongelmaksi saattaa tulla kylmän kesto. Usein kyseiset komponentit on suunniteltu käytettäväksi kotitalouksissa mistä niitä löytää televisioista, digibokseista, satelliittivastaanottimista sekä kaapelimodeemeista. Edellä mainittujen tuotteiden ei tarvitse toimia pakkasella, jolloin niiden lämpötila-alue ei sovellu kentälle asennettaviksi. On mahdollista järjestää laitteeseen lisälämmitystä, jotta komponentit olisivat aina toiminnallisella lämpötila-alueella. Tämä tarkoittaa kylmällä ilmalla energian lisäkulutusta ja kustannuksia. Kustannuksia lisää myös tarvittavat komponentit ja niiden mahdollinen testaus.

7.1.2 Ohjelmisto

Viritinkomponentin käyttöönottoaminen ja nykyisen viritimen korvaaminen sillä ei tarkoita pelkästään uutta piirilevyä komponentein, vaan myös vanha laiteohjelmisto pitää korvata uudella. Muutosten tekemisessä suurin osa keskittyisi tehomittaustulosten kyselyyn ja käsittelyyn. Nykyisessä viritimessä tulosten saamiseksi pitää ohjata paljon erilaisia komponentteja ja käyttää mikrokontrollerin sisäistä AD-muunninta tuloksen saamiseksi. Esimerkiksi tilanteessa, jossa tuloksen saamiseksi käytetään viritinkomponentin sisäistä RSSI-toimintaa, riittää tuloksen kysyminen komponentissa käytössä olevaa dataväylää pitkin. Dataväylän kautta viritin voidaan myös ohjata halutulle mittaustaajuudelle.

Joissakin viritinkomponenteissa on sisäinen prosessori. Tällöin olisi mahdollista korvata nykyisistä viritimistä myös niissä käytössä oleva mikrokontrolleri samalla komponentilla. Tämä säästäisi piirilevyn pinta-alaa jota voitaisiin hyödyntää tekemällä tuotteesta nykyistä pienempi. Jotta tämä olisi mahdollista, pitäisi tehdä paljon erilaisia hankintoja ohjelmiston kehittämistä varten, koska nykyiset kehittämisessä tarvittavat laitteet ja ohjelmistot eivät välttämättä tue uutta prosessoria. Myös tuotannossa tapahtuvat toiminnot, jotka liittyvät tuotteen ohjelmointiin, menisivät todennäköisesti uusiksi. Tämä tarkoittaisi hankintoja ja uusien menetelmien käyttöönottoa. Edellä mainittujen syiden vuoksi viritimen ja prosessorin yhdistelmä korvaamassa nykyistä viritintä ei ole kannattavaa tehdä ellei ole pakko saada tuotetta pienemmäksi.

Nykyisellä viritimellä voidaan ottaa useita kymmeniä tuloksia eri taajuuksilta minuutissa. Myös uudella viritimellä täytyy päästä samaan, jotta olemassa olevat toiminnallisuudet ovat yhtä käytettäviä kuin nykyisellään. Sopivalla komponentin valinnalla on mahdollista saada vielä enemmän mittaustuloksia samassa ajassa. Iso osa toiminnollisuuksista pysyisi kuitenkin samana, koska kaapeliverkkoon itsessään ei olisi tulossa uusia ominaisuuksia. Tällöin ohjelmiston

muutokset rajoittuisivat virittimen toiminnan ohjaamiseen ja tällaisen transponderihankkeen pullonkaula ei olisi ohjelmiston kehittäminen.

7.1.3 Tuotannollisuus

Myös tuotannolliset tarpeet täytyy ottaa huomioon uudessa virittimessä, koska huolimatta eduista mitä sillä pyritään saavuttamaan, sen mittaustarkkuus pitää tarkastaa ja tarvittaessa kalibroida. Muutokset tuotantoon on minimoitavissa jos laitteen suunnittelussa otetaan asia huomioon tekemällä laite toiminnoiltaan työssä esitellyn kaltaiseksi, ei muutoksia tarvittaisi testaukseen tai testausympäristöön. Paras tilanne on jos tuotteeseen voidaan sisäänrakentaa testausta osana laitteen toimintaa. [12]

7.2 Uuteen teknologiaan siirtyminen

Uuteen teknologiaan siirtyminen virittimessä ei ole järkevää, elleivät siitä saatavat edut ole suuremmat kuin siirtymästä aiheutuvat kulut. Muita tarpeita, kuten tuotteen koon pienentäminen, ei ole tällä hetkellä näköpiirissä.

Uusien tuotteiden hankkeista aiheutuu aina kuluja. Jos vielä uusia transponderituotteita tullaan tarvitsemaan, ei hankkeeseen normaalistikin kohdistuvia kuluja pidä huomioida tarkastellessa uuteen teknologiaan siirtymistä. Tällöin pitää keskittyä miten paljon enemmän hankkeessa on tehtävää uuden teknologian takia. Yrityksessä on ollut käytössä joissain tapauksissa 3 vuoden takaisinmaksuaika, kun on laskettu kannattavuuksia erilaisten vaihtoehtojen välillä.

Teknologian muuttuessa takaisinmaksuaikaan pitää huomioida lisääntyneet ajat mm:

- Elektroniikkasuunnittelussa
- Piirilevysuunnittelussa
- Ohjelmistosuunnittelussa

Edellä mainittujen hankkeen aikana syntyneiden lisäkulojen lisäksi pitää arvioida uuden tuotteen BOM ja COGS sekä mahdollisesti ylläpidon muuttuessa siitä syntyvät kulut tai säästöt. Sen jälkeen on mahdollista vertailla onko uuteen teknologiaan järkevää siirtyä.

7.3 DOCSIS 4.0 -standardin huomioon ottaminen

Uuden standardin myötä on selvää, että kaapeliverkot tulevat tulevaisuudessa muuttumaan ja se pitää huomioida suunniteltaessa uusia transponderituotteita. Verkkoarkkitehtuurin osalta on 2 mahdollista skenaariota, joista FDX-toteutus on keskeneräinen siinä käytettävien komponenttien osalta kaapelimodeemeissa, päämodeemeissa sekä kentällä olevissa laitteissa. Toisessa skenaariossa taajuuden kasvaessa 1794 MHz:iin muutoksia verkkoarkkitehtuurin on tulossa vähemmän. Kaapeliverkkojen taajuuskaistaa on kasvatettu useasti ensimmäisen DOCSIS standardin julkaisusta 1997 lähtien. Taajuuskaistan kasvattaminen tarkoittaa uusia komponentteja myös kaapelimodeemeihin ja päämodeemeihin sekä kentällä oleviin laitteisiin, mutta muutokset eivät ole yhtä suuria kuin FDX-toteutuksessa. [31]

Vaikka standardin tuomat muutokset ovat tiedossa, on epäselvää mikä skenaario lopulta päättyy kaapeliverkkoihin, joka vaikeuttaa tällä hetkellä uuteen teknologiaan siirtymisessä. Jos laskennallisesti olisi mahdollista tehdä nykyiseen kaapeliverkkoon tuote, jonka toteutus olisi edullisempi kuin nykyisen, ei se kannata tulevaisuuden muutoksista riippumatta, jos ei tiedetä kumpi skenaarioista toteutuu. Tuotteen elinkaari ei olisi tarpeeksi pitkä, jolloin uuteen teknologiaan siirtymistä ei pidä toteuttaa ennen kuin on selvää miten verkot tullaan rakentamaan.

8 HAVAINNOT JA PÄÄTELMÄT

Lämpökaliibroinnilla on merkittävä ajallinen osuus laitteen valmistuksessa, vaikka muitakin parannusta vaativia osioita työn ohessa havaittiin. Lämpötiloissa toteutettavaa kalibrointia voi luonnehtia nimenomaisesti juuri prosessin pullonkaulaksi.

Kalibrointia tutkittiin analysoimalla mitattuja taulukko- ja data-asetuksia useasta laitteesta tilastollisin menetelmin. Näin pyrittiin arvioimaan voidaanko tätä vaihetta prosessissa lyhentää merkittävästi käyttämällä esimerkiksi valmiiksi luotua taulukkoa, joka sopisi jokaiseen laitteeseen. Tämän edellytyksenä olisi, että taulukko voitaisiin jotenkin keskiarvoistaa kaikilta osin. Tätä ei voida kuitenkaan käytännössä toteuttaa sellaisenaan, sillä laitteissa on yksilöllisiä vaihteluita, joten tarvitaan jonkinlainen yksilökohtainen kompensointi (*offset*).

Analyysiä tehtiin tarkistelemalla datan hajontoja sekä luonnetta. Tällä tavoin kyettiin luomaan käsitys siitä mitä datalla voidaan tehdä. Analyysissä todettiin, että kalibrointitaulukko voidaan luoda keskiarvoistamalla taajuuskohtaisesti kalibrointitaulukon minimi- ja maksimilämpötilojen taulukkoarvojen erotus. Tämä erotus suhteutetaan edellä mainittuun *offset*-arvoon, jolloin syntyy yksilökohtainen kalibrointitaulukko, joka kuitenkin pohjautuu keskiarvoistamiseen lämpötilakompensoinnin suhteen.

Työn aikana tehtiin mittauksia, joiden tarkoituksena oli tarkastella kalibroinnin toimivuutta. Mittaukset aloitettiin käyttämällä alkuperäisessä kalibrointiprosessissa luotuja taulukoita sekä myöhemmässä vaiheessa analyysin pohjalta luotuja keskiarvoon pohjautuvia kalibrointitaulukoita. Mittauksia varten luotiin testiympäristö, jolla pyrittiin mallintamaan kaapelitelevisioverkkoa.

Mittaustuloksia verrattiin keskenään tilastollisten menetelmien avulla. Tämä analyysi kertoi kuinka paljon nämä eri kalibrointimenetelmät poikkeavat toisistaan tulosten tarkkuuden suhteen. Analyysin näytämäärä oli alhainen, jotta voitaisiin vetää täysin luotettava johtopäätös, mutta sen tulokset antavat kuitenkin ymmärtää, että keskiarvoistukseen pohjautuva menetelmä voisi antaa luotettavia tuloksia halutulla tarkkuudella.

Työssä käytiin läpi myös kalibrointiprosessia kokonaisuutena. Tämä tehtiin pääasiassa kahdesta syystä: lämpökaliibrointiprosessin vaihtelun lähteiden havaitsemiseksi sekä sen ymmärtämiseksi, miten prosessia tulisi muuttaa uutta keskiarvoistamiseen perustuvaa menetelmää käytettäessä.

8.1 Metodiikka

Työssä sovellettiin eri menetelmiä ja työkaluja eri asioihin. Menetelmien valintaa ohjasi sekä työkalut itsessään että tekijöiden ammattitaito ja asianmukaiset lähteet. Lähteet valittiin ammattikirjallisuudesta, koulutusmateriaalista sekä kohdeyrityksen sisäisestä materiaalista (esim. yrityksen KPI-mittarit). Mainitut asiat sekä työhön osallistuneiden henkilöiden ja sidosryhmien antamien eri näkökulmien uskotaan tukevan työn luotettavuutta ja tehtyjä päätelmiä.

Mittaustyövaiheessa menetelmäksi valittiin yksinkertaisen kaapeliverkon rakenteen mittaaminen olosuhdehuoneessa, sillä näin saatiin testattua transpondereiden toimintaa tilanteessa, joka on lähellä niiden oikeaa toimintaympäristöä. Suuren kaapeliverkon rakentamista ei nähty perusteltuna, sillä sen rakentaminen on työlästä. Se olisi lisännyt mittajärjestelyiden monimutkaisuutta ja isompi verkko olisi tuottanut enemmän käsiteltävää dataa, joka olisi lisännyt mittausaikaa sekä analyysien tekemiseen käytettävää aikaa. Näin ollen ison verkon rakentaminen ei olisi antanut lisäarvoa suhteessa käytettyyn aikaan. Yritys suorittaa vastaavia mittauksia säännöllisesti samoissa tiloissa myös isommilla verkkorakenteilla.

Vastaavasti esimerkiksi mittapisteiden – sekä taajuustasossa että lämpötilan suhteen – määrään vaikutti käytetyt laitteet sekä ajankäytölliset perusteet. Mittauspisteiden valinnassa varmistettiin kuitenkin, että ääripisteet tulivat mitatuiksi. Samoin testattujen transpondereiden määrään vaikutti aika, joka niiden mittaamiseen oli käytettävissä. Testausalustoina käytetyt kaapelitelevisioverkon laitteet valikoitiin sillä perusteella, että niiden nähtiin kuvaavan yrityksen tyypillisiä tuotteita, joihin transponderi voidaan sijoittaa.

Työkalujen valintaan vaikutti niiden saatavuus: Office-paketin mukaiset työkalut ovat käytössä kohdeyrityksessä. Myös Minitab-ohjelmisto oli tutkimuksen aikana käytössä kohdeyrityksellä ja sen käyttö oli tekijöille tuttua. LabVIEW on yrityksessä käytössä useissa testausympäristöissä, joten sen valinta työkaluksi oli ilmeinen. Mittalaitteina käytettiin yrityksen käytössä olevia laitteita, joiden uskotaan olevan luotettavia – yritys suorittaa säännönmukaisesti mittalaitteiden kalibrointeja.

8.2 Datan analysoinnista

Työssä analysoitiin eri tavoin transpondereiden suorituskykyä, jotta voitaisiin päätellä pystytäänkö keskiarvoistavaa menetelmää käyttämään transpondereiden kalibroinneissa. Työssä käsiteltiin olemassa olevan datan analysointia sekä tutkittiin testilaitteista saatua mittadataa

pienellä koemäärällä laitteita sekä perinteisen kalibroinnin kanssa että keskiarvoistetulla kalibroititaulukolla. Työssä tarkisteltiin myös alkuperäisen kalibroinnin luotettavuutta kalibroitiprosessin vaihteluihin keskittyen.

Työn analyseissä keskityttiin pääasiassa kalibroititaulukoiden ääripäiden erotuksien hajonnan tarkasteluun. Analyysi tulosten hajontojen suhteesta (erotuksen sijaan) on perusteltua, mutta tähän analyysiin sisältyy olennaisesti virhe absoluuttisesta mittatarkkuudesta, johon vaikuttaa mm. taajuudesta riippuvainen mittakaapeliin vaimennus, sekä mittalaitteiden ominaisepätarkkuudet.

Kuitenkin esimerkiksi mittavirheanalyysin tulosten mukaisesti ja lineaarisuustarkastelun perusteella kaapelivaimennus ja mittaepätarkkuudet eivät ole kovin suuria, joten esimerkiksi ANOVA olisi voinut olla vaihtoehtoinen testaustapa t-testin sijaan. ANOVA on menetelmä, joka arvioi yhden tai useamman otoksen keskinäistä ja niiden välistä varianssia. Kuten t-testissä, analyysi olisi pitänyt tehdä taajuuskohtaisesti.

Analyseistä kävi ilmi, että jo alkuperäisessä kalibroidatassa on paljon mahdollisia virhetekijöitä ja jopa osa analyysissä käytetystä datasta voi olla epäluotettavaa. Toisaalta, olemassaolevan datan tarkastelun perusteella todettiin, että hajonta on jo nyt suhteellisen pieni, jolloin voitaisiin silti pitää realistisena käyttää työssä mainittua keskiarvoistukseen perustuvaa menetelmää transpondereiden kalibroinnissa.

Työssä käsiteltiin dataa desibeli-yksiköissä, mutta olisi mahdollista ajatella sen tarkastelua myös ei-logaritmisessa muodossa. Tällöin voitaisiin esimerkiksi päätellä jotain transponderin toiminnan fysikaalisista ominaisuuksista, jotka vaikuttavat transponderin mittalinjan vaimennukseen. Asia ei tosin ole yksiselitteinen ja dataa kuitenkin normaalisti tuontaprosessissa käsitellään sen logaritmisessa muodossa.

Analyseissä käytetyistä työkaluista mainittakoon, että työssä käytettiin mm. Excel- ja Minitab-ohjelmistoja. Työn aikaisten kokemusten perusteella Excel sopi kiitettävästi nopeisiin yksinkertaisiin laskutoimituksiin ja raportoitujen kuvaajien tekoon, kun taas Minitab tarjosi paremmat työkalut tilastolliseen laskentaan. Minitabilla havaittiin kuitenkin omia rajoituksia esimerkiksi datamäärien suhteen, sen kuvaajien muokkausmahdollisuudet ovat rajalliset, eikä sillä voinut tehdä kaikkea peruslaskentaa yhtä helposti kuin Excelillä.

8.3 Mittausten suorittaminen

Iso osa työn ajasta käytettiin kalibroinnin verifointiin tarkoitetun mittausjärjestelmän rakentamiseen sekä mittaamiseen (kuva 5.1). Kuten luvussa 5 mainittiin, verifointimittauksia varten kehiteltiin oma ohjelmisto LabVIEW'illä, joka nopeutti mittaamista, mutta tämänkin jälkeen manuaalisiksi työvaiheiksi jäi olosuhdehuoneen ohjaus sekä kytkentöjen tekeminen, mukaanlukien transpondereiden vaihto testialustoihin.

Myös olosuhdehuoneen ohjauksen automatisointia harkittiin, mutta siitä luovuttiin koska sen ei koettu nopeuttavan mittausta yhtä paljon kuin esimerkiksi mitattavan laitteen automaattinen vaihtaminen olisi voinut tuoda. Sen sijaan kuitenkin datan mittauksen jälkeistä jälkikäsitteilyä varten tehtiin pieni ohjelmisto LabVIEW'illä, jolloin data voitiin koota helpommin käsiteltävään muotoon. Näin saatiin myös nopeaa palautetta heti mittausten suorittamisen jälkeen.

8.4 Kalibroitiprosessi

Nykyinen lämpökaliointiprosessi on monimutkainen ja altis häiriöille. Nykyinen prosessi myös rikkoo yrityksen soluvalmistuskonseptia. Prosessissa syntyy vaihtelua, joka vaikuttaa tuotteen läpimenoaikaan ja lisää valmistuskustannuksia.

Prosessia muuttamalla on mahdollista saada aikaan merkittävät kustannussäästöt (10 000 kappaleen valmistusmäärällä vähintään 35 000 € vuodessa) kun ensisaanto paranee, tuotteiden läpimenoaika lyhenee ja valmistusprosessin vaihtelevuus pienentyy. Prosessista tulee myös ennustettavampi, jolloin tarvittaessa jopa 1 kappaleen tilauksen valmistaminen kustannustehokkaasti on mahdollista.

Toisaalta prosessin muuttamisesta aiheutuu asioita, jotka täytyy ottaa huomioon. Siirtymällä keskiarvoistamiseen, täytyy säännöllisesti varmistua taulukon ajantasaisuudesta esimerkiksi näytteistykseen perustuen. Ratkaistava on myös missä vaiheessa lämpökaliointivaiheen yhteydessä itse kalibroiintiin liittymättömät mittaukset uuden prosessin aikana suoritetaan.

8.5 Kalibroitiprosessi teknologiaa muutettaessa

Tässä työssä kuvattua uutta vakiotaulukoihin perustuvaa kalibroitiprosessia ei lähtökohtaisesti pitäisi joutua muuttamaan teknologian muuttuessa. Sen myötä voi olla mahdollista toteuttaa uusia

ominaisuuksia, mutta hyvin suunniteltuina niiden tuomat muutokset eivät tarkoita muutoksia kalibrointiin. Tällöin ne säästöt mitkä on saavutettu siirtymällä uuteen prosessiin, on käytettävissä myös teknologian muuttuessa. Uudet teknologiat voivat kuitenkin mahdollistaa tehokkaamman tuotantoprosessin, kuin mitä työssä on esitetty.

8.6 Kehittämisehdotukset ja uudet tutkimusaiheet

Työn aikana ilmenneet nykyisen kalibrointiprosessin epäkohdat ovat yksi jatkotutkimuksen kohde, joka yrityksessä olisi hyvä suorittaa. Tällöin keskiarvoistukseen perustuvan taulukoinnin lähteenä tulisi myös käyttää epäkohtien poistamisen jälkeistä kalibrointidataa. Vertailu perinteisen ja työn ehdottaman kalibrointimenetelmän välillä tulisi tällöin myös uusina. Lisäksi voitaisiin ottaa uudestaan tarkasteluun mahdollinen täysin keskiarvoistukseen perustuva kalibrointi, joka ei edellytä mittausta edes huoneenlämmössä.

Samoin kalibrointiprosessin muutoksen vaikutuksia valmistuksen kokonaiskustannuksiin pitäisi arvioida tarkemmin. Jo nyt saatujen tulosten perusteella kohdeyrityksen muitakin tuotantoprosesseja on suositeltavaa tarkastella kokonaiskustannusten kannalta.

DOCSIS 4.0 -standardin määrittelemät muutokset kaapeliverkkoihin alkavat näkyä lähitulevaisuudessa. Tämän työn puitteissa ei ollut mahdollista tehdä järkevää vertailua komponenttitasolla minkälaisia olisivat erilaiset toteutusvaihtoehdot ja niiden kustannukset sekä hankkeen kannalta (tuotteen luonti) että BOM- ja COGS-kustannusten (tuotteen valmistus) osalta.

Kun on saatavilla uusia komponentteja, on mahdollista tutkia uuteen teknologiaan siirtymisen kannattavuutta. On myös mahdollista, että nykyisen viritin hinta uudella kalibrointiprosessilla on edelleen kannattavampi vaihtoehto tulevaisuudessa, koska sen BOM-hinta on erittäin kilpailukykyinen jo nykyisten viritinkomponenttien kanssa ja siirryttäessä uuteen teknologiaan kaapeliverkkoihin soveltuvia komponentteja on todennäköisesti vähemmän tarjolla, kuin nykyään.

9 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli tutkia transponderin lämpökali brointiprosessia ja pyrkiä tehostamaan kyseistä työvaihetta kohdeyrityksen tuotannossa. Tutkimuksessa suoritettiin useita testejä ja tilastollisia analyysejä olemassa olevasta mittaustadastasta sekä vertailua uuteen mittadataan.

Työn tuloksena oli toimiva keskiarvoistukseen perustuva menetelmä transponderin lämpökali broinnin toteuttamiseksi. Menetelmällä kyetään saavuttamaan hyvällä varmuudella samanlainen mittaustarkkuus kuin nykyisin käytössä olevalla kalibrointimenetelmällä. Samalla työvaiheen kesto lyhenee merkittävästi sekä prosessin vaihtelun lähteet vähenevät. Tämän seurauksena voidaan odottaa merkittäviä vuosittaisia säästöjä.

Menetelmää voidaan pitää myös toimivana mallina tulevaisuuden transpondereille, mikäli niiden toteutus on samankaltainen kuin nykyisen transponderimallin. Toisaalta vielä parempana tilanteena voidaan pitää sitä, että uusi transponderi olisi suunniteltu sellaiseksi, ettei se vaadi erillistä lämpökali brointia.

Uutta kalibrointiprosessia ei kuitenkaan otettu kohdeyrityksessä vielä käyttöön työn puitteissa, sillä sen käyttöönotto edellyttää resursseja sekä tiettyjen toimintamallien muutosta. Työn tulosten nähdään joka tapauksessa olevan tärkeää tietoa yritykselle, josta kertoo työn sidosryhmien tyytyväisyys, sekä alustava päätös toteuttaa muutokset.

Mittaustulosten tarkkuutta suositellaan edelleen jatkotutkittavaksi sekä seurattavaksi uuden menetelmän käyttöönoton jälkeen. Lisäksi työssä havaitut nykyisen kalibrointiprosessin virhelähteet tulisi tutkia tarkemmin ja kyätä poistamaan tai minimoimaan niiden vaikutus uuteen menetelmään, jotta transponderin mittaustarkkuutta kyettäisiin edelleen parantamaan.

Sen lisäksi, että työ tuotti uutta tietoa yritykselle, uskotaan kyseisen uuden kalibrointimenetelmän olevan käyttökelpoinen malli myös muiden tuotteiden tuotantoprosesseille. Työssä esiteltyjä tilastollisia menetelmiä voidaan joka tapauksessa soveltaa muidenkin tuotteiden osalta. Näiden tarkastelut jäävät tulevaisuuden tutkimusten kohteeksi.

LÄHTEET

- [1] Hallman, J. *AC6950-transponderin tuotanto*. AMK-opinnäytetyö. Turun Ammattikorkeakoulu, tietoliikennetekniikan koulutusohjelma, elektroniikkatuotanto. Turku. 2007. 23 s.
- [2] Väkevä, R. *Modulaarinen olosuhdetestausjärjestelmä*. AMK-opinnäytetyö. Turun Ammattikorkeakoulu, elektroniikan koulutusohjelma, elektroniikkatuotanto. Turku. 2014. 37 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014060511989>
- [3] Peltonen, M. *Tuotannon kehittäminen Lean Six Sigma -menetelmien avulla*. YAMK-opinnäytetyö. Turun Ammattikorkeakoulu, Ohjelmistotekniikka ja ICT. Turku. 2020. 35 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020061018209>
- [4] Särkkä, H. *Elektroniikkatuotteen valmistusympäristön suunnitteluprosessin kehittäminen*. AMK-opinnäytetyö. Turun Ammattikorkeakoulu, elektroniikan koulutusohjelma, elektroniikkatuotanto. Turku. 2014. 41 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2014070413296>
- [5] Vuorinen, J. *ALSC-tutkimusprojekti*. Insinöörityö, Turun Ammattikorkeakoulu, elektroniikan koulutusohjelma, elektroniikka. Turku. 2008. 30 s.
- [6] Järvenpää, P. *Kaapelitelevisioverkon hallintajärjestelmä*. Diplomityö, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, sähkötekniikan koulutusohjelma, tietoliikennetekniikan laitos. Turku. 1996. 86 s.
- [7] Uusi-Seppälä, M. *Kaapelitelevisioverkon transponderin RF-modeemi*. Insinöörityö. Turun Ammattikorkeakoulu, tietoliikennetekniikan koulutusohjelma, elektroniikka. Turku. 2001. 73 s.
- [8] Halen, S. *Siirtolaitteiden hallinta kaapelitelevisioverkossa*. Diplomityö, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, sähkötekniikan koulutusohjelma, tietoliikennetekniikan laitos. Turku. 1998. 70 s.
- [9] Kuusisto, S. *Kaapelitelevisioverkon Transponderin digitaaliosan suunnittelu ja toteutus*. Pro gradu –tutkielma, Turun Yliopisto, elektroniikka ja tietoliikennetekniikka, informaatioteknologian laitos. Turku. 2002. 81 s.
- [10] Elisa Oyj. *Rovaniemen kaapeli-tv mainos*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.11.2020] Saatavissa: <https://elisa.fi/rovaniemi/>
- [11] Foreca Suomi. *Rovaniemen havaintohistoria*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.11.2020]. Saatavissa: <https://www.foreca.fi/Finland/Rovaniemi/havaintohistoria>
- [12] Anderson, D. M. *Design for manufacturability*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. 486 s. ISBN 9781482204926

- [13] Morrison, S. J. *Statistics for Engineers: an Introduction*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Incorporated, 2009. 193 s. ISBN 9780470746431 (sähköinen).
- [14] Eurostat, *Sähkön hintatilastot*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.11.2020]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics/fi#Muilta_kuin_kotitalousk.C3.A4ytt.C3.A4jilt.C3.A4_perityt_s.C3.A4hk.C3.B6n_hinnat
- [15] Rumpunen, T. *Ensisiaantoprosentin hinta 2019*, Yrityksen sisäiset tietojärjestelmät. [Pdf-dokumentti]. [Viitattu 6.11.2020].
- [16] Yrityksen KPI-mittarit, *Production TimeTool*, Yrityksen sisäiset tietojärjestelmät. [Viitattu 6.11.2020]
- [17] Desai, D. K. *Six Sigma*. Bengaluru, Karnataka, India: Himalaya Publishing House, 2010. 153 s. ISBN 9789350432457 (sähköinen).
- [18] Bissell, D. *Statistical Methods for SPC and TQM*. London, UK: Chapman and Hall, 1994. 384 s. ISBN 0412394405 (painettu).
- [19] Israel, G. D. 1992. *Determining Sample Size*. [Verkkodokumentti]. Julkaisu. Institute of Food and Agricultural Sciences (IFAS), University of Florida. [Viitattu 3.8.2020]. Saatavissa: https://www.academia.edu/21353552/Determining_Sample_Size_1
- [20] Narsky, I., Porter, F. C. *Statistical Analysis Techniques in Particle Physics: Fits, Density Estimation and Supervised Learning*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Incorporated, 2013. 461 s. ISBN 9783527677313 (sähköinen).
- [21] Tolmunen, T. *Kvantitatiiviset menetelmät, Osa 2*. Luentomateriaali. Turun Ammattikorkeakoulu, Turku. 2018. 56 s.
- [22] Minitab Support. *Methods and formulas for Descriptive Statistics*. [Verkkodokumentti]. Minitab, LLC. [Viitattu 5.8.2020]. Saatavissa: <https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/basic-statistics/summary-statistics/descriptive-statistics/methods-and-formulas/methods-and-formulas/>
- [23] SFS-EN IEC 60728-3:2018. *Cable networks for television signals, sound signals and interactive services. Part 3: Active wideband equipment for cable networks*. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. 2018. 61 s.
- [24] Archambault, J. *Power Measurements on DOCSIS Downstream QAM Signals*. [Verkkodokumentti]. Julkaisu. ARRIS, Inc. [Viitattu 3.8.2020]. Saatavissa: http://educyclopedia.karadimov.info/library/DOCSIS_QAM_Power_Measurement.pdf
- [25] Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S., Kärhä, P. *Laadukkaan mittauksen perusteet*. Espoo, Suomi: Metrologian neuvottelukunta ja Mittatekniikan keskus, 2011. 137 s. ISBN 9789525610765 (sähköinen).
- [26] Oja, H., Shevlyakov, L., G. *Robust Correlation: Theory and Applications*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Incorporated, 2016. 353 s. ISBN 9781119264538 (sähköinen).

- [27] Christmann, E. *Beyond the Numbers, Making Sense of Statistics*. Virginia, USA: National Science Teaching Association, 2011. 226 s. ISBN 9781936959921.
- [28] CableLabs. *About CableLabs*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.11.2020]. Saatavissa: <https://www.cablelabs.com/about-cablelabs>
- [29] CableLabs specifications. *DOCSIS 3.1 Physical Layer Specification*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.11.2020]. Saatavissa: <https://www.cablelabs.com/specifications/CM-SP-PHYv3.1>
- [30] CableLabs specifications. *DOCSIS 4.0 Physical Layer Specification*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.11.2020]. Saatavissa: <https://www.cablelabs.com/specifications/CM-SP-PHYv4.0>
- [31] LightReading. *Docsis 4.0 prototypes could be here in less than a year*. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.11.2020]. Saatavissa: <https://www.lightreading.com/cablevideo/docsis/docsis-40-prototypes-could-be-here-in-less-than-year/d/d-id/763520>