

Luotettavuustestauksia induktiosilmukkavahvistimelle

Pia Laakso

Tekniikan opinnäytetyö  
Tuotantotalous  
Insinööri (AMK)  
KEMI 2014

## ALKUSANAT

Haluan kiittää Qlu Oy:n Juha Nikulaa sekä Telesilmukka Oy:n Mikko Hahoa mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta tutustua induktiosilmukkaratkaisuihin. Ohjaajaani Juha Saarimaata kiitän käytännön testiratkaisuiden toteuttamisesta ja hyvistä neuvoista. Lapin ammattikorkeakoulun projekti-insinöörejä Jaana Kauppia ja Mika Mörtiä kiitän hyvin sujuneesta yhteistyöstä sekä testien valvonnasta sekä lapsiani Pyryä ja Meri-Tuulia pitkäpinnaisuudesta ja ymmärryksestä äidin opiskelua kohtaan.

Kemi 5.5.2014

Pia Laakso

## TIIVISTELMÄ

## LAPIN AMMATTIKORKEAKOULU, Tekniikka

Koulutusohjelma:	Tuotantotalous
Opinnäytetyön tekijä:	Pia Laakso
Opinnäytetyön nimi:	Luotettavuustestauksia induktiosilmukkavahvistimelle
Sivuja (joista liitesivuja):	42 (4)
Päiväys:	7.5.2014
Opinnäytetyön ohjaaja(t):	Juha Kaarela, DI Lehtori Juha Saarimaa, tuotekehitysinsinööri, Telesilmukka Oy
<p>Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli Telesilmukka Oy. Työn tavoitteena oli kartoittaa induktiosilmukkavahvistimelle tarvittavia ja soveltuvia luotettavuustestejä sekä suorittaa jokin näistä testeistä.</p> <p>Opinnäytetyö kuvailee induktiosilmukkavahvistimen rakennetta ja toimintaa sekä teoreettisella tasolla lämpötila-, värinä ja EMC-testauksia. Lämpövanhenemistestaus suoritetaan induktiosilmukkavahvistimen prototyypille Arrheniuksen mallin mukaan. Testitulokset analysoidaan tuotteen odotettavan eliniän määrittämiseksi.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuuden aineistona on käytetty JEDEC:in standardeja ja pääasiassa aiheesta tehtyjä diplomitöitä. Induktiosilmukkavahvistimen prototyypin lämmönsietokyvyn arvioimisessa käytettiin komponenttien datalehtiä. Lämpövanhenemistestaus ja lämpökamerakuvaus suoritettiin Lapin AMK:n TKI-yksikössä. Ohjelmoinnit ja prototyypin lopputestaus suoritettiin Telesilmukka Oy:ssä</p> <p>Induktiosilmukkavahvistimelle löytyi useita luotettavuustestejä. Niistä rajattiin pois kannettaville laitteille tarkoitetut testaukset. Suoritetulla lämpövanhenemistestauksella osoitettiin, että testattu prototyyppi kestää vähintään viiden vuoden normaalikäytön.</p>	
Asiasanat:	Vahvistimet, luotettavuus, elektroniikka, sähkömagneettinen yhteensopivuus, lämpökuvaus.

## ABSTRACT

LAPLAND UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, Technology

Degree programme:	Industrial Management
Author(s):	Pia Laakso
Thesis title:	Reliability Tests for Induction Loop Amplifier
Pages (of which appendixes):	42 (4)
Date:	7 May 2014
Thesis instructor(s):	Juha Kaarela, M.Sc.(Eng.), Senior Lecturer Juha Saarimaa, R&D Engineer, Telesilmukka Oy
<p>This Bachelor thesis was done for Telesilmukka Oy. The objectives of the thesis were to research suitable and necessary reliability tests for induction loop amplifier and perform one of the tests.</p> <p>The thesis describes the structure and functionality of the induction loop amplifier. Temperature-, vibration- and EMC-tests are described on theoretical level. The highly accelerated temperature test based on Arrhenius model was performed on the prototypes of induction loop amplifier. After analyzing the test results the predicted lifetime of the prototype was specified.</p> <p>The study was done mainly on JEDEC standards and several Master's theses. Component datasheets were used to predict the temperature endurance of the components on the induction loop amplifier prototype PCB. The highly accelerated temperature tests and thermal imaging were performed at the research laboratory of Lapland University of Applied Sciences. The Programming and final tests of the prototypes were conducted in Telesilmukka Oy.</p> <p>There were several reliability tests suitable for induction loop amplifiers, but the tests for portable devices were excluded. Based on the results of the highly accelerated temperature testing the conclusion was drawn that the predicted lifetime of the prototype is over 5 years.</p>	
Keywords: amplifiers, reliability, electronics, EMC, thermal imaging.	

## SISÄLLYS

ALKUSANAT.....	2
TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT .....	4
SISÄLLYS .....	5
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET .....	6
1 JOHDANTO.....	7
2 INDUKTIOSILMUKKAVAHVISTIN .....	9
2.1 Päätevahvistinluokat .....	9
2.2 Induktiosilmukkavahvistimen rakenne ja toiminta .....	10
2.3 Induktiosilmukkavahvistimen luotettavuuden haasteet .....	11
3 INDUKTIOSILMUKKAVAHVISTIMELLE HYÖDYLLISIÄ LUOTETTAVUUSTESTAUKSIA .....	17
3.1 Tärytystesti.....	17
3.2 EMC häiriömittaukset.....	20
3.3 Lämpötilasyklus.....	21
3.4 Lämpövanheneminen.....	23
4 INDUKTIOSILMUKKAVAHVISTIMELLE SUORITETUT TESTIT JA TULOKSET .....	25
4.1 Induktiosilmukkavahvistimen lämpenemisen kuvantaminen .....	25
4.2 Lämpövanheneminen.....	30
5 POHDINTA .....	34
LÄHTEET .....	37
LIITTEET.....	38

## KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulointi
JTAG	Joint Test Action Group, ohjelmointiportti
R <sub>ESR</sub>	Ekvivalenttinen sarjaresistanssi
IC	Integrated circuit, Integroitu piiri, mikropiiri
JEDEC	Solid State Technology Association
IPC	Institute for Interconnecting and Packing Electronic Circuits
EIA	Electronic Industries Alliance
ISO	International Standards Organization
NEMI	National Electronics Manufacturing Initiative
CTE	Coefficient of thermal expansion, lämpölaajenemiskerroin
EMC	Electromagnetic Compatibility, Sähkömagneettinen yhteensopivuus
HTOL	High temperature operational life, lämpövanheneminen

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana oli Telesilmukka Oy. Telesilmukka Oy on vuonna 1994 perustettu yritys, jonka keskeinen liiketoiminta-alue on äänentoistojärjestelmät, induktiosilmukka- ja akustiikkaratkaisut sekä niiden asennukset.

Työn tavoitteena oli kartoittaa induktiosilmukkavahvistimelle tarvittavia ja soveltuvia luotettavuustestauksia ja toteuttaa näistä jokin kevään 2014 aikana. Testauksen kohteena oli Juha Saarimaan keväällä 2013 opinnäytetyönään Telesilmukka Oy:lle suunnittelema induktiosilmukkavahvistin. Induktiosilmukkavahvistimen ensimmäiset prototyypit valmistuivat joulukuussa 2013 hieman sen jälkeen, kun tuotteelle oli haettu patenttia.

Telesilmukka Oy:n induktiosilmukkavahvistimen perustana on D-luokan vahvistin, jonka oletetaan olevan edullisuutensa, pienen kokonsa ja korkean hyötysuhteensa vuoksi kilpailukykyinen tuote induktiosilmukkavahvistinmarkkinoilla. Jotta tuote voidaan viedä tuotantoon ja valmiiksi tuotteeksi, täytyy sen läpäistä tietyt luotettavuustestit.

Keskeisimpiä luotettavuustestejä ovat lämpötila-, värinä- ja EMC- testit. Ilman EMC-testiä sähköelektroninen tuote ei voi saada yleiseurooppalaista CE-merkintää ja ilman lämpötilatestauksia tuotteen elinikää on vaikea arvioida. Tärytystesteillä ja lämpösyklauksella varmistetaan tuotteen juotosten kestävyyttä.

Induktiosilmukkavahvistinprototyypille haluttiin suorittaa jokin näistä testeistä. Kireän aikataulun ja hektisen päivätyöni takia päädyttiin suorittamaan lämpövanhenemistestaus Kemissä kotini lähistöllä sijaitsevassa Lapin ammattikorkeakoulun TKI-yksikössä. Samassa yksikössä suoritettiin lämpökameramittauksia induktiosilmukkavahvistinkortin käyttölämpötilan määrittämiseksi. Lämpökamerakuvaukset tehtiin TKI-yksikössä meneillään olevan kuvantamishankkeen osana.

Opinnäytetyöni ohjaaja ja induktiosilmukkavahvistimen suunnittelija Juha Saarimaa huolehti virtalähteiden ja kuormien hankinnasta prototyypille sekä prosessorille ohjelmoitavasta testisekvenssistä ja –signaalista. Käytännön

luotettavuustestausjärjestelyt ja tulosten analyysi tehtiin yhteistyössä, mutta prototyypin toiminnallisuuden testauksen suoritti Saarimaa. Luotettavuustestien päivittäinen valvonta ja avustaminen tapahtui TKI-laboratorion projekti-insinöörien toimesta.

Projektin etenemistä seurattiin yhteistyöpalaverin ja sähköpostikeskusteluin. Oppimisen varmistamiseksi tutustuin induktiosilmukavahvistimeen laboratorioolosuhteissa ennen luotettavuustestauksia sekä perehdyin Saarimaan opinnäytetyöhön aiheesta. Luotettavuustestauksien järjestämisessä sekä toteuttamisessa olin vahvasti läsnä. Lisäksi tutustuin webissä induktiosilmukkaratkaisuihin ja kartoitin toimeksiantajalleni lähiympäristön yrityksiä ja TKI-yksiköitä, joissa työssä käsiteltyjä luotettavuustestauksia voidaan suorittaa.



## 2 INDUKTIOSILMUKKAVAHVISTIN

Opinnäytetyön tutkinnan kohteena on Telesilmukka Oy:n induktiosilmukkavahvistimen prototyyppi. Induktiosilmukkavahvistin sisältää passiivisia komponentteja, prosessorin ja integroitua mikropiirejä.

Induktiosilmukkavahvistimen tärkein komponentti on vahvistinpiiri, tässä tapauksessa päätevahvistin. Päätevahvistimet voidaan jakaa 5 luokkaan seuraavan jaottelun mukaan.

### 2.1 Päätevahvistinluokat

Päätevahvistimella tarkoitetaan vahvistinta, joka syöttää tehoa kuormaan signaalin ohjaamana. Päätevahvistimet eli pääteasteet voidaan luokitella viiteen eri topologiaan niiden lepovirran ja kytkennän mukaan. (Esala, hakupäivä 1.5.2014.)

A-luokan pääteasteen transistori on pienisäröinen ja johtaa koko ajan. Sen hyötysuhde on huono noin 25%. Hyötysuhteesta johtuen se on päätevahvistimena epäkäytännöllinen ja vaatii järeän jäähtytyksen. Yleisemmin niitä käytetäänkin esivahvistimissa ja pientehosovelluksissa. (Esala, hakupäivä 1.5.2014.)

B-luokan pääteasteessa on 2 transistoria. Toinen transistoreista johtaa positiivisella puolijaksolla ja toinen negatiivisella. Kun signaali on nolla kumpikaan ei johda. Nollakohdassa saattaakin esiintyä ylimenosäröä signaalin vaihtaessa transistorilta toiselle. B-luokan vahvistimen hyötysuhde on korkeintaan 78.5%. (Esala, hakupäivä 1.5.2014.)

AB-luokan pääteasteessa transistorien toimintapiste on asetettu niin että pienellä signaalitasolla kumpikin transistori toimii kuten A-luokan pääteaste ja suuremmilla signaaleilla kuten B-luokan pääteaste. Tällä toiminnalla saadaan ylimenosäröä pienennettyä. AB-luokan topologia on ylivoimaisesti yleisin. (Esala, hakupäivä 1.5.2014.)

C-luokan pääteasteen hyötysuhde on jopa 90%, sillä sen transistorit toimivat lähes kytkimien tapaan. Särö on suuri, mutta vahvistimen kuormana on useimmiten viritetty resonanssiipiiri ja se suodattaa särökomponentit pois. (Esala, hakupäivä 1.5.2014.)

D-luokan pääteasteen transistorit toimivat kytkimien tapaan ja niiden hyötysuhde on jopa 95% . Päätetransistoreja ohjataan yleensä pulssinleveysmoduloidulla (PWM) signaalilla. Signaalin taajuus on moninkertainen verrattuna korkeimpaan vahvistettavaan taajuuteen. Tämä helpottaa signaalin modulointitaajuuden poissuodattamista alipäästösuodattimella. Vahvistimesta saatava signaali onkin periaatteessa samanlainen kuin sille syötetty analoginen signaali. D-luokan vahvistin on kevyt ja se tuottaa vähän lämpöä. Sen avulla voidaan rakentaa pieni ja tehokas kokonaisuus. (Esala, hakupäivä 1.5.2014.)

Telesilmukka oy valitsi kehittämäänsä induktiovahvistimeen D-luokan pääteasteen sen ylivoimaisten ominaisuuksien takia. Näitä ominaisuuksia ovat korkea hyötysuhde, hinta ja pieni koko.

## 2.2 Induktiosilmukkavahvistimen rakenne ja toiminta

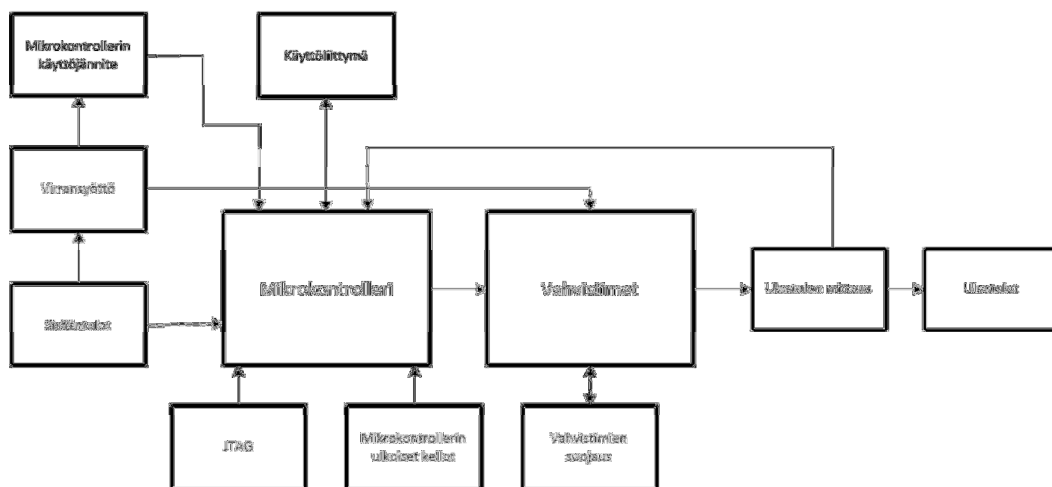
Tässä työssä tutkittu induktiosilmukkavahvistin on Telesilmukka oy:lle opinnäytetyönä tehty prototyyppi. Induktiosilmukkavahvistin on kaksikanavainen, jossa yhteen kanavaan on kytketty rinnan kaksi vahvistinpiiriä. Kaiken kaikkiaan kortilla on siis 4 D-luokan vahvistinta. (Saarimaa 2013, 22.)

Induktiosilmukkavahvistimen kytkennät on tehty seuraten piirivalmistajien suosituskytkeä ja oheiskomponentteja. Näiden lisäksi piirikortille on lisätty mikrokontrolleri synkronointia, taajuuskorjausta ja ulostulojen seuranta varten. Mikrokontrolleri hoitaa myös vaiheensiirron, sisääntulojen valinnan sekä käyttöliittymän. Tarkkuutta vaativiin operaatioihin se tarvitsee kiteen sekä oskillaattorin. (Saarimaa 2013, 26-34.)

Ohjelmointia ja testausta varten kortilla on JTAG-liitäntä. Virrankatkaisija, voimakkuudensäätö, taajuuskorjausvalitsin, tulonvalintakytkin ja merkkivalot

muodostavat käyttöliittymän. Vahvistimien rinnankytkennässä on käytetty tehovastuksia tasausvastuksina. (Saarimaa 2013, 26-34.)

Induktiosilmukkavahvistimen toimintaa voidaan kuvata lohkokaavion avulla. Kuva 1 esittää piirikaavion toiminnallisina lohkoina. (Saarimaa 2013, 30.)



Kuva 1. Induktiosilmukkavahvistimen lohkokaavio (Saarimaa 2013, 30).

### 2.3 Induktiosilmukkavahvistimen luotettavuuden haasteet

Induktiosilmukkavahvistin sisältää useita komponentteja. Tässä kappaleessa käsitellään Telesilmukan induktiosilmukkavahvistimessa käytettyjä komponentteja ja niiden ominaisuuksia korkean lämpötilan ja ikääntymisen suhteen. Viimeisessä kappaleessa esitetään juotteen tuomia haasteita luottavuudelle.

Pintaliitosvastuksia valmistetaan erilaisista kalvomateriaaleista ja niiden resistanssiarvo määräytyy kalvojen seosaineiden ja rakenteiden mukaan. Lämpökäyttämiseen vaikuttaa lämpölaajeneminen ja materiaalien johtavuuden muutokset. Lankavastukset valmistetaan kiertämällä vastuslankaa keraamisen ytimen ympärille. Ne kestävät suuria tehoja ja niiden lämmön kesto on hyvä. Lämpösyklauksessa tosin niiden rikkoutuminen voi alkaa pienestä lovesta, jolla vastusarvo on valmistusvaiheessa asetettu kohdilleen. (Peltonen 2011, 8.)

Kondensaattoreita on eri tyyppisiä ja niiden lämpötilamuutokset ovat hyvin erilaisia. Elektrolyyttikondensaattorien sarjaresistanssi  $R_{ESR}$  pienenee lämpötilan kasvaessa.

Toisaalta korkea lämpötila nopeuttaa elektrolyytin haihtumista kondensaattorin kotelon ja pohjan välistä, mikä aiheuttaa sarjaresistanssin jopa neliöllisen kasvun käyttöiän suhteen. Myös kapasitanssi kasvaa lämpötilan noustessa, mutta toisaalta elektrolyytin kuivuminen ikääntymisen myötä laskee kapasitanssiarvoa. Tantaalikondensaattoreita on sekä nestemäisiä että kuivia. Nestemäisten kapasitanssi käyttäytyy lämpötilan ja ikääntymisen suhteen samoin kuin elektrolyyttikondensaattori. Kuivilla tantaalikondensaattoreilla lämpötilavaikutukset ovat pieniä ja ikääntymisilmiötä ei ilmene lähes ollenkaan. (Peltonen 2011, 9 - 13.)

Keraamiset kondensaattorit jaetaan lämpötilavaikutusten suhteen neljään luokkaan. Luokkien 3 ja 4 kondensaattoreita käytetään enää harvoin. Luokan 1 kondensaattorit ovat lämpötilakompensoituja ja niitä käytetään resonanssipiireissä. Niiltä vaaditaan suurta hyvyyslukua ja kapasitanssin vakautta lämpötilan ja käyttöiän suhteen. Vähemmän kriittisissä sovelluksissa voidaan käyttää luokan 2 kondensaattoreita, joiden hyvyysluku ja kapasitanssin vakaus ovat hieman heikompia. Niissä kapasitanssi pienenee ikääntymisen myötä. (Peltonen 2011, 9 – 13.)

Kelat koostuvat sydänmateriaalista (ilma, rauta, ferriitti) ja sen ympärille kierretystä johdinkäämistä. Lämpötila vaikuttaa sekä johdin- että sydänmateriaaliin muuttaen niiden ominaisuuksia. Kelan hyvyysluku ja induktanssi voivat muuttua lämpötilan noustessa. Muuttuminen riippuu kelan sydän ja johdin materiaalista. (Peltonen 2011, 13 - 14.)

Kiteet ja oskillaattorit muodostavat värähtelevän signaalin. Lämpötila vaikuttaa huomattavasti värähtelytaajuuteen. Muutoksen suuruus on riippuvainen kiteen leikkauksesta. Usein leikkaus on tehty niin että taajuuskäyttäytyminen muodostaa paraabelin, jossa huoneenlämpö on pohjalla tai huipulla. Oskillaattoripiireissä voi olla lämpöantureita ja kompensointipiirejä lämpötilakäyttäytymisen tasaamiseen. Nämä saattavat kuitenkin aiheuttaa arvaamatonta taajuuskäyttäytymistä ja taajuuden vaeltamista. (Peltonen 2011, 14 – 15.)

Puolijohdekomponenttien materiaaleista riippuu kuinka korkeaan lämpötilaan ne soveltuvat. Lämpötilan noustessa materiaalista riippuen saattaa vuotovirta, esimerkiksi diodin estosuuntaan kulkeva virta, kasvaa. Korkeamman kielletyn energiavälin eV

materiaaleilla on korkeampi toimintalämpötila, parempi jännitteenkesto ja osalla myös parempi lämmönjohtokyky. Kielletyllä energiavälillä tarkoitetaan puolijohteen valenssivyön ja johtavuusvyön välistä energiaa. Taulukossa 1 on esitetty eri puolijohdemateriaalien kiellettyjä energiavälejä ja toimintalämpötiloja. Nämä arvot vaihtelevat hieman lähteestä johtuen. (Peltonen 2011, 15 - 17.)

Taulukko 1. Puolijohdemateriaalien kiellettyjä energiavälejä ja lämpötilarajoja (Peltonen 2011, 15 - 17)

Materiaali	Kielletty energiaväli [eV]	Lämpötilaraja [°C]
Ge <sup>(1)</sup>	0,7	100
Si	1,12	250 <sup>(1)</sup> / 150 <sup>(2)</sup>
InP <sup>(1)</sup>	1,25	400
SOI <sup>(2)</sup>	1,12	300
GaAs	1,35	450 <sup>(1)</sup> / 250 <sup>(2)</sup>
6H-SiC <sup>(2)</sup>	3,03	700
4H-SiC <sup>(2)</sup>	3,26	750
GaN <sup>(2)</sup>	3,45	> 700
Timantti <sup>(2)</sup>	5,45	1100

Telesilmukan induktiosilmukkavahvistimessa käytetään vahvistinpiiriä, jonka eV on 0.7. Prosessoripiirin kiellettyjä energiavälejä ei löytynyt, mutta arvioin sen olevan 1.12 perustuen taulukon antamaan arvoon piille (Si) (Peltonen 2011, 17).

Diodit koostuvat PN- tyyppisestä puolijohdeliitoksesta tai metalli-puolijohdeliitoksesta, jolloin diodi on nimeltään schottky-diodi. Induktiosilmukkavahvistimessa on käytössä tämän tyyppin diodi. Korkeat lämpötilat aiheuttavat diodin kynnysjännitteen alenemista ja diodin mahdollisen vuotamisen estosuuntaan. Diodin kuten muidenkin puolijohdekomponenttien vuotovirta kaksinkertaistuu 10°C välein lämmön noustessa. (Peltonen 2011, 18 - 19.)

LED eli loistediodit ovat rakenteeltaan puolijohdediodin kaltaisia. Lyhytaikainen korkea kuumuus aiheuttaa valotehon pienenemistä, joka kuitenkin palautuu normaalilämpötilassa. Pidempiaikainen korkea lämpötila nopeuttaa LED:n puolijohdemateriaalin ja fosforikerroksen hajoamista ja siten valotehon pysyvää pienenemistä. (Peltonen 2011, 19.)

NPN transistori on niin sanottu bipolaaritransistori, joka koostuu kannasta, emitteristä ja kollektorista. Lämpötilan noustessa kanta-emitterijännite pysyy samana, vaikka kantavirta kasvaa kaksinkertaistuen 10°C välein. Vuotovirta on korkeissakin lämpötiloissa vain muutaman mikroampeerin luokkaa. (Peltonen 2011, 20 – 21.)

Integroidut piirit eli IC:t ovat komponentteja, jotka koostuvat sekä aktiivi- että passiivikomponenteista. IC:ssä edellä esiteltyjä komponentteja on integroitu samaan koteloon puolijohdeteknologiaa hyväksi käyttäen. Yleisimmin käytetään CMOS teknonologiaa. Tarkastellussa induktiosilmukkavahvistemassa tällaisia piirejä ovat esimerkiksi mikrokontrolleri, vahvistinpiiri ja jänniteregulaattori.. Lämpötilan nousu aiheuttaa IC:ssa MOS- transistorien kynnysjännitteen laskua, jolloin pienemmät jännitteet lasketaan ykköstilaksi. Myös vuotovirrat aiheuttavat sisäisten kondensaattoreiden nopeamman purkautumisen. Tämä vaikuttaa esimerkiksi muistisolujen kondensaattoreiden latautumiseen ja siten ykkös- ja nollatilojen lähenemiseen. Puolijohteiden toiminta hidastuu lämpötilan noustessa aiheuttaen signaalin etenemisviiveitä. Sisäiset ajoitukset voivat sekoittua ja piirin toiminta häiriintyä. (Peltonen 2011, 24.)

Varsinkin piirilevyllä komponenttiketjuissa saattaa viiveet kasvaa niin suuriksi, että vastaan ottava piiri ei tulkitse signaalia enää oikein. Komponenttien datalehdissä ilmoitetaan hyväksytty käyttölämpötila, missä piiri toimii luotettavasti datalehden ilmoittamien parametrien vaihteluvälillä. Tässä työssä on otettu huomioon induktiosilmukkavahvistimen kaikkien komponenttien maksimi käyttölämpötila. (Peltonen 2011, 24.)

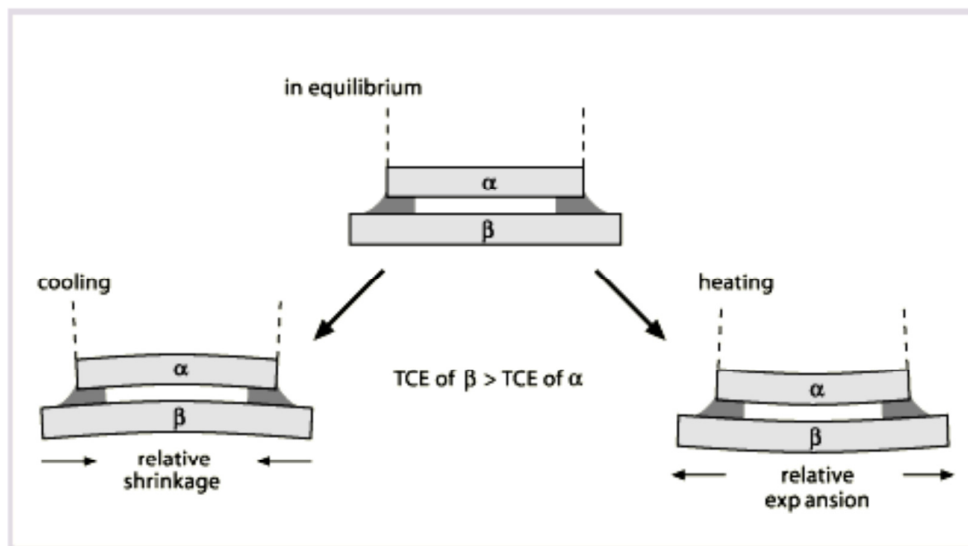
Muoveja käytetään elektronisissa komponenteissa eristeenä. Muovien tulee kestää lämpötilavaihteluita, tärinää, iskuja ja liittimen nastojen välistä jännitettä sekä pieniä vuotovirtoja. (Peltonen 2011, 25.)

Piirilevyn luotettavuuteen vaikuttaa myös piirilevyn rakenne ja juotosaineet. Yleisimpiä juotosaineita tänä päivänä ovat lyijyttömät juotemetallit: tina-hopea-kupari eli SnAgCu (tai SAC), tina-hopea (SnAg) ja tina-kupari (SnCu). Suositaan juotesulia, jotka jähmettyvät samanaikaisesti eutektisessä pisteessä (ns eutektinen koostumus). Tinapohjaiset lyijyttömät juotteet sopivat hyvin yhteen muiden

elektroniikkakokoonpanoissa käytettävien materiaalien kanssa. SnAgCu sulamislämpötila on saatu alhaiseksi lisäämällä tinaan hieman hopeaa ja kuparia. Hopea myös lujittaa juotetta ja siten parantaa virumisen kestoa. Kupari puolestaan vähentää piirilevyn kuparimetallointien liukenemistä. (Nyholm 2012, 3 – 5.)

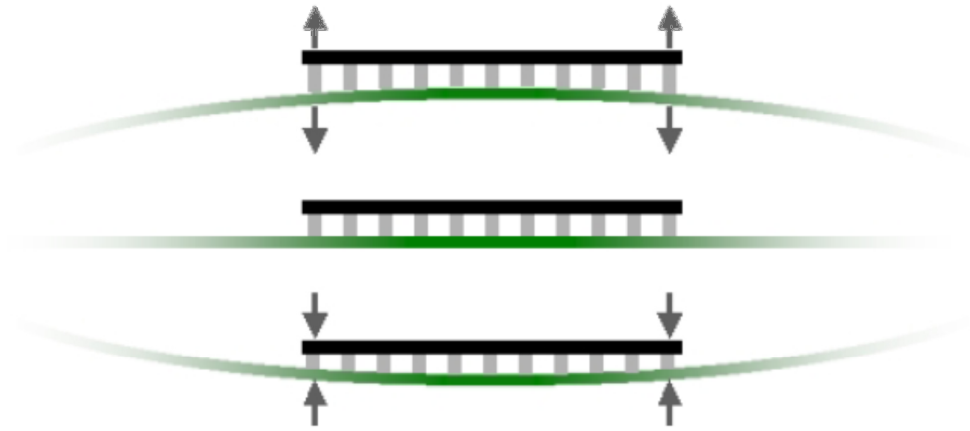
Juoteliitosten kestävyys on oleellista koko laitteen luotettavuudelle. Yksikin vaurioitunut juotoskohta voi aiheuttaa pahimmassa tapauksessa koko laitteen toimimattomuuden. Keskeisimpiä juoteliitosten luotettavuusongelmia ovat niihin kohdistuvat termomekaaniset rasitukset, iskumaiset rasitukset, elektro- ja thermomigraatio, tinaviikset ja metallien välisten yhdistekerrosten irtaantuminen rajapinnasta. (Nyholm 2012, 3 – 5.)

Lämpötilojen vaihtelut aiheuttavat lämpölaajenemista ja koska elektroniikkakokoonpanoissa on useita eri materiaaleja niiden CTE (coefficient of thermal expansion) eli lämpölaajenemiskerroin on eri. Tästä johtuu että kokoonpanon osat rajoittavat toistensa laajenemista ja syntyy leikkaus-, veto- ja puristusjännityksiä. Kuvassa 2 havainnollistetaan asiaa. (Nyholm 2012, 5 – 6.)



Kuva 2. Lämpötilavaihtelut aiheuttavat jännityksiä lämpölaajenemisen kertoimen erojen takia. Kuvassa pintaliitoskomponentin CTE on pienempi kuin piirilevyn. (Nyholm 2012, 6)

Juoteliitosten toinen luotettavuusongelma on niihin kohdistuvat mekaaniset rasitukset kuten iskumaiset kuormitukset ja värinä. Iskumaisia kuormituksia syntyy esimerkiksi laitteen pudotessa lattialle ja kuljetus aiheuttaa värinää. Laite voi myös olla suunniteltu olosuhteisiin, joissa värinä on läsnä koko ajan kuten autot ja lentokoneet. Sekä putoaminen että värinä saa piirilevyn värähtelemään ja taipumaan ylös ja alas. Kuva 3 havainnollistaa värähtelyä ja sen aiheuttamaa rasitusta etenkin pintaliitoskomponenteille. (Nyholm 2012, 6.)



Kuva 3. Piirilevyn värähtely pintaliitoskomponentin alla putoamisen tai värinän seurauksena (Nyholm 2012, 7.)

Kolmas keskeinen luotettavuusongelma on elektromigraatio. Sillä tarkoitetaan elektronivuon aikaansaamaa metalli-ionien liikettä johtimissa. Elektromigraatio voi aiheuttaa kumpujen ja aukkojen syntymisen juotteeseen ja siten aiheuttaa kytkentöihin oikosulkuja tai avoimia piirejä. Se voi myös kiihdyttää metallien välisten yhdistekerrosten kasvua ja alusmetalloinnin liukenemistä. (Nyholm 2012, 7.)



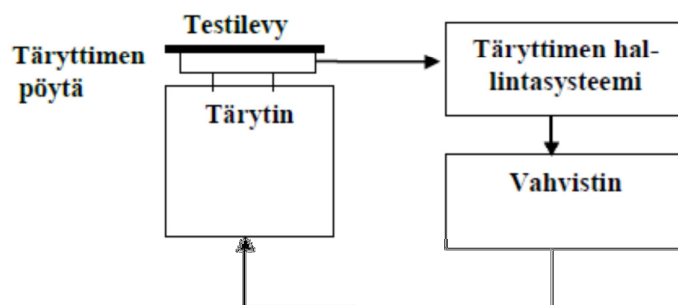
### 3 INDUKTIOSILMUKKAVAHVISTIMELLE HYÖDYLLISIÄ LUOTETTAVUUSTESTAUKSIA

Tämän työn tarkoituksena oli kartoittaa induktiosilmukkavahvistimelle hyödyllisiä ja soveltuvia luotettavuustestauksia. Näiden kiihdytettyjen testien perusajatuksena on saada aikaan elektroniikkakomponenttien sähköisissä kontakteissa vikatyyppejä, jotka todennäköisesti tapahtuisi normaalin käytön aikana. Kiihdytetyissä testeissä vaurio vain syntyy nopeammin kuin se syntyisi normaalikäytössä. Nämä testit tuottavat kahdenlaista tietoa: vauriotyyppi eli missä vaurio on ydintynyt ja miten se on edennyt sekä elinikä eli kuinka nopeaa komponentit ja juotokset ovat vaurioituneet (Suotula 2007, 3.)

Testien tulee olla kaupallisiin tarkoituksiin riittävän nopeita, edullisia ja toistettavia. Luotettavuuden ja toistettavuuden apuna ovat erilaiset standardit, joita monet teollisuusryhmät ovat kehittäneet. Tunnetuimpia organisaatioita ovat JEDEC (Solid State Technology Association), IPC (Institute for Interconnecting and Packing Electronic Circuits), EIA (Electronic Industries Alliance), ISO (International Standards Organization) ja NEMI (National Electronics Manufacturing Initiative). (Nyholm 2012, 3.)

#### 3.1 Tärytystesti

Tärytystestillä simuloidaan elektroniikkalaitteissa käytettävien komponenttien ja niiden liitosten kykyä kestää vähintään keskitasoista tärinää. Keskitasoinen tärinä aiheutuu tuotteen liikkeestä kuljetuksen tai käytön aikana. Tärytyslaitteisto koostuu kolmesta päälaitteesta: tärytin, vahvistin ja hallintajärjestelmä. Laitteiston kaaviokuva on esitelty kuvassa 4. (Nyholm 2012, 14.)



Kuva 4. Tyypillinen tärytyslaitteisto (Nyholm 2012, 14)

JEDEC standardi JESD22-B103B määrittelee kaksi tärytystestiä. Ensimmäisessä testissä pyyhkäistään käyttöympäristön rasituksen mukaan määräytyvä taajuuskaistaa. Testattavaa kappaletta tärytetään yksinkertaisella harmonisella siniaallolla tietyllä maksimikihtyvyydellä. Taajuuskaistan pyyhkäisy pienimmästä suurimpaan taajuuteen ja takaisin suoritetaan neljässä minuutissa pyyhkäisyajan ollessa dekadi per minuutti. Pyyhkäisy suoritetaan neljää kertaa kustakin X,Y,Z suunnasta; yhteensä 12 pyyhkäisyä. Perustellusti testistä voi jättää pois taajuuksia, jotka aiheuttavat kontrolloimatonta resonointia tai joilla ei ole merkitystä jännitysten syntymiseen. (Suotula 2007, 14; JEDEC JESD22-B103B 2006, 3.)

Taulukko 2. JESD22-B103B standardin vaatimukset sinimuotoisen taajuuspyyhkäisyn arvoille käyttöympäristö luokituksittain. (JEDEC JESD22-B103B 2006.3)

<b>Käyttöympäristöluokitus</b>	<b>Huippukiihtyvyys (G)</b>	<b>Poikkeama (mm)</b>	<b>Pyyhkäisykaistan leveys (Hz)</b>	<b>Min. / Max. taajuus (Hz)</b>
<b>1</b>	20	1,5	80	20 / 2000
<b>2</b>	10	1,0	70	10 / 1000
<b>3</b>	3	0,75	45	5 / 500
<b>4</b>	1	0,5	31	5 / 500
<b>5</b>	0,3	0,25	24	5 / 500
<b>6</b>	0,1	0,125	20	5 / 500
<b>7</b>	0,01	0,039	14	5 / 500
<b>8</b>	0,001	0,0127	6,2	5 / 500

JESD22-B103B standardi sisältää myös tärytystestin, jossa pyyhkäisymetodi on korvattu gaussisesti satunnaistetulla tärytyksellä. Taulukossa 3 on esitelty tämän testin testitasot, jotka määräytyvät käyttöympäristön suhteen. Luokat A-C kuvaavat kuljetuksessa syntyvää tärinää. A on näistä kaikkein vaativin käyttöluokka. Luokat D-I kuvaavat käyttöympäristön olosuhteita. D on näistä vaativin käyttöympäristö. Satunnaistärytyksen kesto on 30 minuuttia jokaiseen X,Y,Z akselin suuntaan eli yhteensä 90 minuuttia. (Suotula 2007, 15; JEDEC JESD22-B103B 2006, 4.)

Taulukko 3. JESD22-B103B- standardin vaatimukset satunnaistäritykselle. (JEDEC JESD22-B103B 2006. 4)

Käyttöympäristöluokitus	RMS-kiihtyvyys (G)	RMS-nopeus (mm/s)	RMS-poikkeama (mm)
<b>A</b>	6,27	736,60	23,520
<b>B</b>	3,10	335,28	10,8204
<b>C</b>	1,24	132,588	4,5212
<b>D</b>	1,11	41,656	0,7874
<b>E</b>	0,686	17,8562	0,137922
<b>F</b>	0,416	10,795	0,09017
<b>G</b>	0,246	5,461	0,043434
<b>H</b>	0,123	2,8702	0,0211328
<b>I</b>	0,0626	1,49606	0,010033

Testattava tuote tulkitaan rikkoutuneeksi, mikäli se hermeettisesti ei täytä vaatimuksia, tuotteen parametrit ylittävät sallitut arvot tai se ei toimi tuotteelle tyypillisissä olosuhteissa. Mekaaninen hajoaminen kuten halkeaminen, lohkeaminen tai kappaleen hajoaminen tulkitaan myös rikkoutumiseksi mikäli se johtuu itse testistä eikä kappaleen käsittelystä. (JEDEC JESD22-B103B 2006, 7.)

Induktiosilmukkavahvistimelle suositellisin sinimuotoista taajuuspyyhkäisyä, jolle tulee käyttöympäristöluokitus määritellä ennen testausta. Satunnaistäritys tulisi tehdä luokkien A-C mukaan. Induktiosilmukkavahvistin on alttiina värinälle vain kuljetuksen aikana ja mahdollisesti sen pudotessa lattialle. Mielestäni luokan B satunnaistäritys olisi tällöin riittävä vahvistin kortille.

Tärytystestausta tarjoaa Suomessa usea organisaatio kuten Centria ammattikorkeakoulun Tutkimus ja Kehitysyksikkö Pohjanmaalla. Heiltä löytyvillä laitteilla pystytään tekemään tärytystestausta joko 3 akselisuuntaan tai laajalla lämpötila-alueella -38-+100°C (Centrian www-sivut 2014, hakupäivä 26.4.2014.)

Kajaanin ammattikorkeakoulun Tutkimus-, Kehitys- ja innovaatioyksikkö tarjoaa kolmeen akselisuuntaan tärytystä, mutta myös kuuden vapausasteen tärytystä (Kajaanin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014, hakupäivä 26.4.2014). VTT Expert Services tarjoaa tärytyksen lisäksi suunnittelupalvelua, joka sisältää esimerkiksi

ympäristöolosuhderasitusten ja testausvaatimusten määrittelyä sekä testausohjelmien suunnittelua (Vttextpertservicen www-sivut 2014, hakupäivä 26.4.2014).

### 3.2 EMC häiriömittaukset

EMC (electromagnetic compatibility) tarkoittaa laitteiden sähkömagneettista yhteensopivuutta. EMC-direktiivi 2004/108/EY pyrkii takaamaan tuotteiden vapaan liikkuvuuden ja luomaan hyväksyttävän sähkömagneettisen ympäristön koko EU:n alueelle. Direktiivi sääntelee kaikkia loppukäyttäjälle tarkoitettuja laitteita tai kiinteitä asennuksia, jotka saattavat aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä tai joiden toimintaa sähkömagneettinen häiriö voi häiritä. Laitteen tulee läpäistä sähkömagneettiset yhteensopivuus- eli EMC-testit ennen kuin sille voidaan myöntää yleiseurooppalainen CE (Communité Europeenne) merkintä. (Tukesin www-sivut 2014, hakupäivä 27.4.2014.)

EMC testauksen tavoitteena on tutkia tuottaako laite EMC-vaatimuksia ylittävää määrää sähkömagneettista häiriötä ja toisaalta kestääkö se vaadittavaa määrää häiriötä. Häiriöt ovat joko säteileviä tai johtuvia. Yhteensopivuus koskee laitteiden välistä ja laitteen osien välistä vuorovaikutusta. Laitteen tuottamaa häiriötä kutsutaan emissioksi ja laitteen kykyä kestää häiriöitä immunitetiksi. (SGS:n www-sivut 2014, hakupäivä 27.4.2014.)

EMC testauksia tarjoaa Suomessa moni organisaatio ja yritys. Savonia ammattikorkeakoulu Kuopiossa tarjoaa elektroniikkaa sisältäville laitteille häiriön päästön ja siedon mittaamista EMC mittaustalossaan. Savoniassa laitteelle voidaan lähettää erilaisia häiriösignaaleja antennin kautta sen pyöriessä keskellä EMC laboratorion eristettyä huonetta. Samassa huoneessa voidaan tarkkailla millaisia signaaleja itse laite lähettää. Savonia tekee myös testejä, jossa synnytetään laitteen ympärille magneettikenttä ja tarkkaillaan miten laite kestävä magneettista häiriötä. Myös staattisen sähkönsietoa voidaan testata ESD zapperillä (Sorsa 2011, hakupäivä 27.4.2014.)

Centria Ammattikorkeakoulu tarjoaa yrityksille kattavasti EMC- testauksia. Heillä on radiokaiuton huone ja laitteisto esimerkiksi emissio- ja immunitetitestauksiin ja

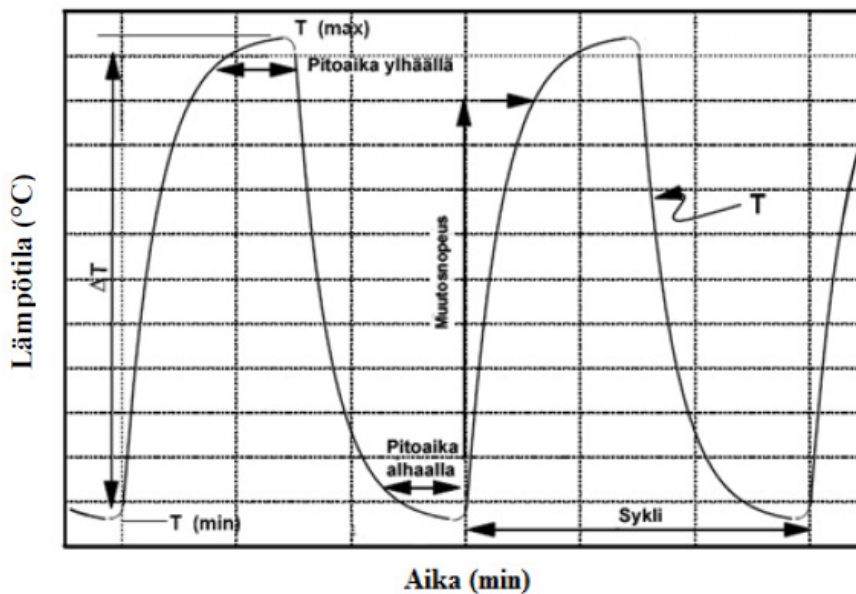
nopeiden transienttien ja sähköstaattisten purkausten aiheuttamien häiriöiden testaamiseen sekä verkkotaajuisiin magneettikenttätestauksiin. (Centrian www-sivut 2014, hakupäivä 26.4.2014.)

Myös Kajaanin Ammattikorkeakoulussa tehdään EMC testauksia. Heidän testauspalveluvalikoimaansa kuuluvat: Emissio- ja ESD-sietomittaukset, RF-kentän sieto ja johtuvan RF:n sieto mittaukset sekä verkkohäiriömittaukset. Myös useat yritykset ja yritysverkostot Suomessa ja Euroopassa tarjoavat EMC-mittauspalveluita.

(Kajaanin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014, hakupäivä 26.4.2014.)

### 3.3 Lämpötilasyklus

Lämpösyklitestissä testikappale asetetaan yleensä yksikammioiseen uuniin, jota vuoroin jäähdytetään ja kuumennetaan kylmällä ja kuumalla ilmalla. Testi voidaan suorittaa myös kaksikammiossa uunissa, jossa testikappale kulkee eri lämpötiloissa olevien kammioiden välillä. Riippumatta uunivalinnasta testikappaleen kokema lämpötila syklataan tietyllä muutosnopeudella valitun maksimi- ja minimiarvon välillä muutamasta sadasta muutamaan tuhanteen kertaan. Ääriarvoissa lämpötila pidetään ennalta määritellyn ajan. Kuva 5 havainnollistaa syklausen periaatetta. (Nyholm 2012, 7 – 8.)



Kuva 5. Lämpösyklauksen lämpötilaprofiili (Nyholm 2012, 8)

JEDEC JESD22-A104D standardi lämpösyklaukselle määrittää maksimi- ja minimilämpötilat käyttöympäristöluokituksen mukaan. Taulukossa 4 esitellään nämä ympäristöluokitukset sekä tyypilliset pitoajat ja syklaustiheys. Tyypillisesti juoteliitoksen väsymisvaurion arvioinnissa käytetään syklausnopeutta 1-2 sykliä tunnissa ja mikäli näytteellä ei ole suurta termistä massaa suositellaan 10-14 asteen muutos nopeutta minuutissa. Mikäli terminen massa on suuri tulee muutoksen olla 15 astetta minuutissa. Lämpötilan muutosnopeus mitataan 10% ja 90% väliltä kokonaislämpötilanmuutoksesta. (Nyholm 2012. 8; JEDEC JESD22-A104D. 2009. 5 - 7)

Taulukko 4. Lämpösyklauksen käyttölämpöluokituksen mukaiset syklausprofiilit. (JEDEC JESD22-A104D, 2009)

Käyttöympäristöluokitus	Min. lämpötila (°C)	Max. lämpötila (°C)	Tyypillinen syklien lkm tunnissa	Tyypillinen pitoaika (min)
A	-55	+85	2 – 3	1, 5 tai 10
B	-55	+125	2 – 3	1 tai 5
C	-65	+150	2	1 tai 5
G	-40	+125	1 – 2	1, 5, 10 tai 15
H	-55	+150	2	1 tai 5
I	-40	+115	1 – 2	1, 5, 10 tai 15
J	-0	+100	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
K	-0	+125	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
L	-55	+110	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
M	-40	+150	1 – 3	1, 5, 10 tai 15
N	-40	+85	1 – 3	1, 5 tai 10

Induktiosilmukkavahvistimen ollessa kyseessä valitsisin yllä olevasta taulukosta käyttöympäristöluokitus K mukaisen syklausen. Minimilämpötila ei vahvistimella koskaan käy alle nollassa ja toisaalta vahvistin voi lämmitä hyvinkin kuumaksi. Kiinnostuksen kohteena ovat vahvistinkortin juotokset, joten syklien määräksi tunnissa valitsisin 2 ja pitoajaksi 10 minuuttia, sillä pitoajat 5,10 ja 15 minuuttia ovat suositeltuja juotosten tarkasteluun. Sekä syklimäärä että pitoaika edustavat siten keskimääräisiä lukuja juoteliitosten väsymistarkasteluun.

Lämpösyklaustestausta Suomessa tarjoavat ainakin Elefors Forssassa oy (Elefors Oy:n www-sivut 2014, hakupäivä 27.4.2014). Lapin ammattikorkeakoulun tutkimus- ja

tuotekehityslaboratoriossa Kemissä voidaan myös suorittaa lämpösyklauksia olosuhdekaapissa (Lapin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014, hakupäivä 27.4.2014).

### 3.4 Lämpövanheneminen

Lämpövanhenemisella tarkoitetaan tuotteen kiihdytettyä vanhenemista korkeassa lämpötilassa. Puhutaan myös kiihdytetystä elinikätestistä HTOL (High temperature operational life). Lämpövanheneminen perustuu kemialliseen reaktioon, jossa reaktioon osallistuvien molekyylien keskinäinen törmäysten taajuus kasvaa. (Allenius 2013, 30.)

Lämpövanhentaminen on suosituin vanhentamisen malli sillä sen tulokset ovat hyviä ja luotettavia ja olosuhteet helposti järjestettäviä ainoan muuttuvan suureen ollessa lämpötila. Yleisimmin käytetään Arrheniuksen lakia määrittämään tuotteen elinikää ja kiihdytyskerrointa. (Jokela 2006, 9.)

Arrheniuksen lain esitti ensimmäisen kerran Saksalainen kemisti J.H. van't Hoff vuonna 1884. Ruotsalainen kemisti Svante Arrhenius esitti vuonna 1889 fysikaalisen perusteen ja tulkinnan laille ja laki nimettiin hänen mukaansa. Arrheniuksen malli esitetään kaavalla 1. (Jokela 2006, 9.)

$$A_f = e^{-\left[\left(\frac{E_a}{k}\right)\left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t}\right)\right]} \quad (1)$$

missä

$A_f$  on kiihdytyskerroin, suhteellinen elinkaarikerroin

$E_a$  on aktivointienergia

$k$  on Boltzmannin vakio ( $8,6159 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ )

$T_u$  on käyttölämpötila (K)

$T_t$  on testauslämpötila (K)

Yleisesti kaavassa käytetään maksimikäyttölämpötilaa käyttölämpötila-arvona. Teppo Allenius kuitenkin esittää opinnäytetyössään seuraavaa kaavaa käyttölämpötilan laskemiseksi. (Allenius 2013, 30.)

$$T_u = \frac{T_v * t_v + T_k * t_k}{t_{\text{kok}}} \quad (2)$$

missä

$t_{\text{kok}}$  on kokonaisaika

$T_v$  on valmiusajan lämpötila

$T_k$  on käyttöajan lämpötila

$t_v$  on valmiusaika

$t_k$  on käyttöaika

Kun Arrheniuksen yhtälön avulla saadulla elinkaarikertoimella jaetaan tuotteelle luvattu elinaika, saadaan luotettavuustestausta varten uunitusaika halutussa testilämpötilassa kuten kaavassa 3 on esitetty (Allenius 2013, 31).

$$t_t = t_u / A_f \quad (3)$$

missä

$t_t$  on testiaika, uunitusaika

$t_u$  on elinikä, käyttöaika

$A_f$  on elinikäkerroin

Lämpövanhentamiseen tarvitaan luotettava uuni, jonka lämpötila pysyy vakaana ja on monitoroitavissa. Tällainen vaatimukset täyttävä olosuhdekaappi löytyy mm. Lapin ammattikorkeakoulun Kemin yksikön TKI-laboratoriossa (Lapin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014, 1.5.2014).

Centrian TKI-yksiköstä löytyy 3 pientä olosuhdekaappia ja yksi 16m<sup>3</sup> olosuhdekaappi. Tilavampi kaappi mahdollistaa useamman piirikortin tai laitteen yhtäaikaisen uunituksen. Myös Kajaanin ammattikorkeakoulu tarjoaa lämpötilatestauksia. (Centrian www-sivut 2014, hakupäivä 1.5.2014; Kajaanin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014, hakupäivä 1.5.2014).



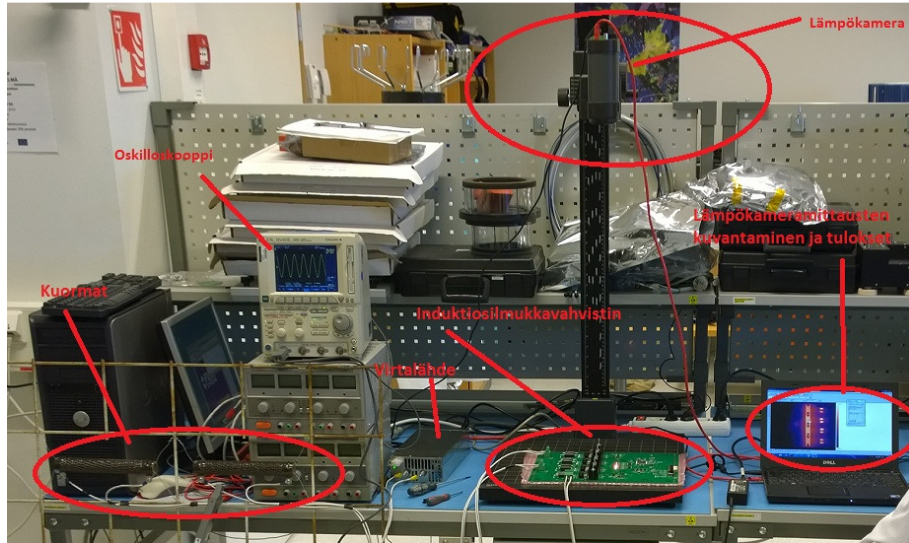
#### 4 INDUKTIOSILMUKKAVAHVISTIMELLE SUORITETUT TESTIT JA TULOKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella induktiosilmukkavahvistimelle soveliaita ja hyödyllisiä luotettavuustestejä ja suorittaa prototyypille jokin näistä testeistä. Toimeksiantajan kanssa sovittiin suunniteltavan ja järjestettävän lämpövanhenemistestaus Lapin ammattikorkeakoulun TKI-laboratoriossa.

Ennen lämpövanhenemistestauksen suorittamista tuli määrittää prototyypin käyttölämpötila. Käyttölämpötilaa tarvitaan Arrheniuksen yhtälössä määrittämään uunitusaikaa. Koska prototyypin käyttölämpötilaa ei ollut aiemmin mitattu eikä sitä pysty määrittelemään muutoin kuin todellisessa käyttötilanteessa, päädyttiin lämpökamerakuvauksiin.

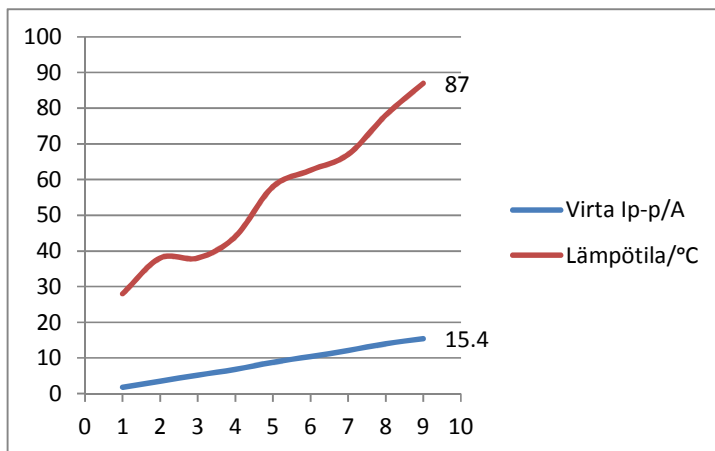
##### 4.1 Induktiosilmukkavahvistimen lämpenemisen kuvantaminen

Lämpökamerakuvaukset suoritettiin Lapin AMK:n TKI-laboratoriossa Flirin Thermavision A320 lämpökameralla. Kuvassa 6 esitellään mittausjärjestelyt. Lämpökamera on asetettu sopivalle korkeudelle tolppaan ja induktiosilmukkavahvistin kameran alle kuvantamispöydälle. Korttiin on kytketty erillinen virtalähde ja raudoitusteräskehikkoon ripustettu kuorma, jolla simuloidaan induktiosilmukkaa. Kuvassa on yhden induktiosilmukkavahvistinkortin 2 kuormaa (á 1.9 $\Omega$ ); yksi kullekin kanavalle. Oskilloskoopilla mitataan ulostulovirtoja ja Flirin Thermacam Reseachers Pro 2.9-kuvantamisohjelmalla seurataan eri komponenttien ja kortin lämpenemistä lämpökamerakuvista.



Kuva 6. Lämpökameramittausjärjestelyt

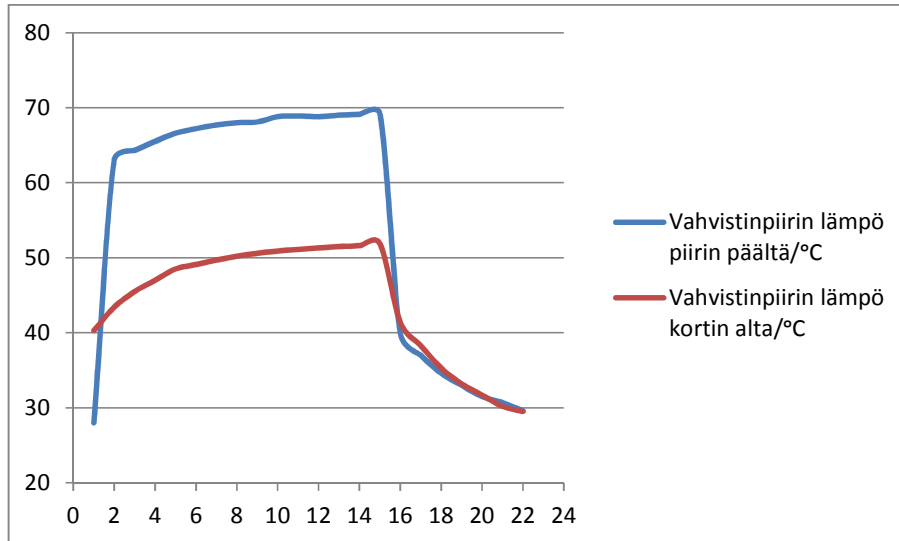
Induktiosilmukkavahvistimen prosessorilta syötettiin vahvistimille sinisignaalia, jonka amplitudissa oli 9 valittavaa tasoa. Ulostulovirta osoitti, että amplitudi kasvoi valintaa suurentamalla ja lämpökameramittaukset kortin komponenttipuolelta lämpötilan nousun vahvistimien tehon lisääntyessä (liite 1). Kuvan 7 kaaviosta näkee, että virran ja kertoimen kasvaessa lineaarisesti kortin lämpötila kasvaa jyrkästi saavuttaen 87°C:een lämpötilan virran  $I_{p-p}$  ollessa 15.4A. Nämä mittaukset suoritettiin 1.6Ω:n kuormalla ja jäähditysrimojen ollessa kiinnitettyinä vahvistimien päälle jäähdytyksen varmistamiseksi.



Kuva 7. Vahvistinkertoimen muutoksen vaikutus lämpötilaan

Induktiosilmukkavahvistimen amplitudivalinnalla 1 suoritettiin lämpötilamittauksia myös ajan funktiona (liite 1). Testauksella haluttiin nähdä kuinka nopeaa vahvistinpiiri

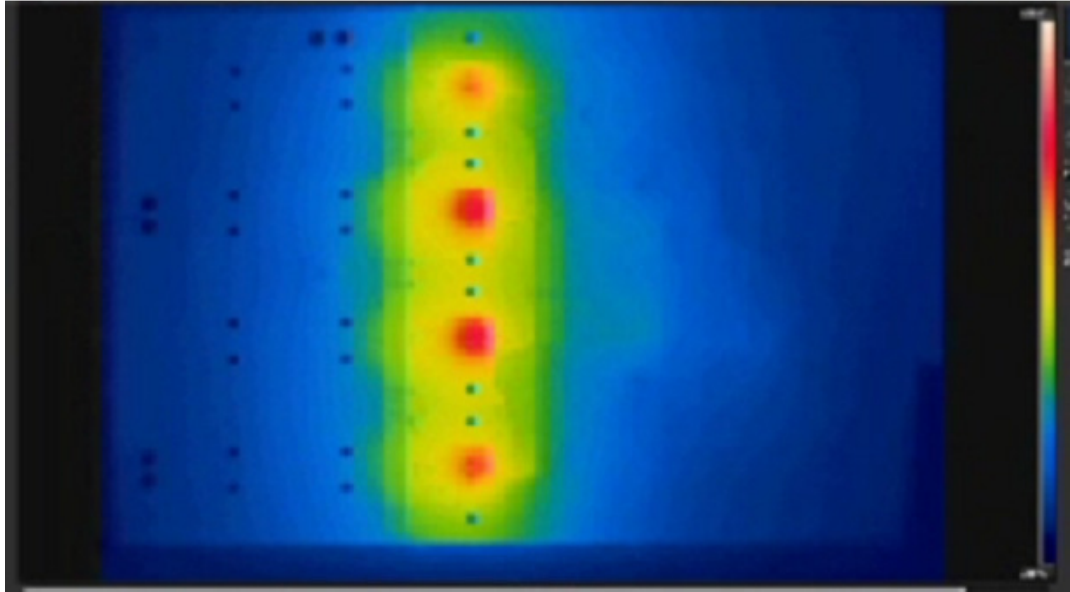
lämpenee ja toisaalta jäähtyy. Induktiosilmukkavahvistimen tärkein komponentti on vahvistinpiiri ja tästä syystä kaikki mittaukset on otettu vahvistin piirin alta tai päältä ilman jäähdytysrimoja. Kuvassa 8 sininen käyrä osoittaa piirin päältä tehtyjä mittauksia ja punainen käyrä piirin alta tehtyjä mittauksia. X-akselilla esitetään aika minuutteina ja y-akselilla on lämpötilat. Ajassa 15 minuuttia induktiosilmukkavahvistin kytketään pois päältä.



Kuva 8. Induktiosilmukkavahvistimen vahvistinpiirin lämpökäyttäytyminen

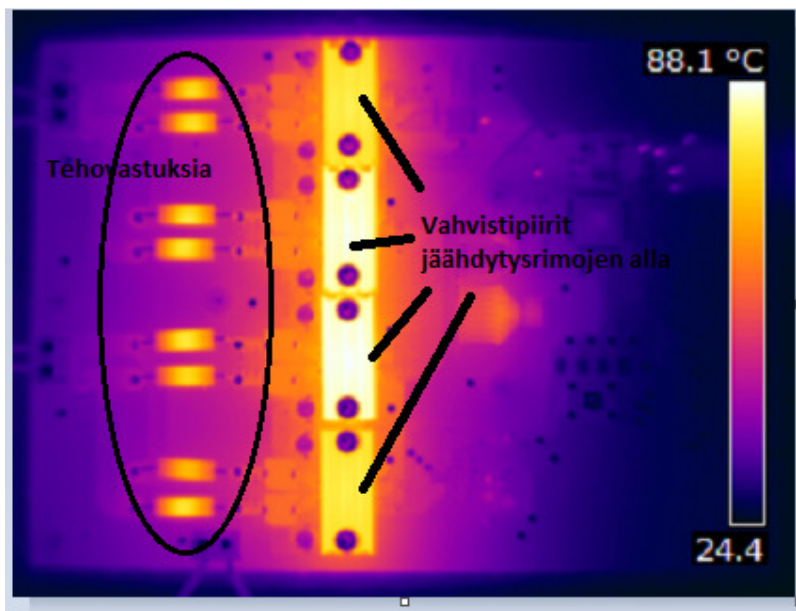
Kuvasta voidaan todeta, että vahvistinpiiri lämpenee nopeasti, mutta myös jäähtyy nopeasti. Ilman jäähdytysrimoja lämpötila voi nousta 70°C:een pienimmälläkin vahvistuksella. Vahvistinpiirin suositeltu maksimikäyttölämpötila ilman jäähdytysrimaa on 85°C, joten vastaavaa testausta ilman jäähdytysrimoja suuremmalla teholla ei uskallettu suorittaa.

Kortin kääntöpuolelta mitattaessa havaittiin lämmön leviämisessä leikkaantumista. Kuvassa 9 punaiset läikät ovat vahvistinpiirejä kuvattuna kortin toiselta puolelta. Kelta-viheralue on lämmön leviämistä ja pystysuorista viivoista voi havaita, että leviäminen leikkautuu piirilevyn signaalivetoihin. Jotta näin ei tapahtuisi, tulisi kortille lisätä lämmönjohtumisreikiä ja siirtää signaalivetoja hieman kauemmaksi.



Kuva 9. Induktiosilmukkavahvistimen lämpeneminen kortin alta

Lisätestauksia varten induktiosilmukkavahvistinkorttiin kiinnitettiin jälleen jäähdytysrimat. Amplitudivalinnaksi asetettiin 9 ja tarkoituksena oli testata korttia täydellä teholla. Kuvassa 10 näkyy kortin lämpeneminen, kun tehot olivat maksimissaan 14 minuuttia. Myöhemmin kuitenkin selvisi, että asetukset eivät olleet oikein vaan todellisuudessa kuvan mittausta on tehty puolella teholla.



Kuva 10. Lämpökamerakuva induktiosilmukkavahvistimesta täydellä teholla

Kuvasta näkyy, että kuumimmat alueet kortilla ovat kahden keskimmäisen vahvistinpiirin kohdalla. Myös tehovastukset kuumenevat reippaasti. Tehovastusten sallittu maksimikäyttölämpötila on  $200^{\circ}\text{C}$ , joten niiden toiminta on turvallista korkeissakin lämpötiloissa. Keskimmäisten vahvistinpiirien lämpötila  $88^{\circ}\text{C}$  on vaarallisen korkealla jo puolella teholla luotettavan toiminnan takaamiseksi (liite 2).

Lämpökameramittausten ansioista havaittiin, että vahvistinpiirien vahvistus oli vain puolet suunnitellusta. Telesilmukka Oy:ssä suoritettiin koeajo, jossa vahvistin saatiin asetettua täydelle teholla. Todellisella täydellä teholla  $1.9\Omega$ :in kuormalla ja jäähdysrimat kiinnitettyinä vahvistinpiiri ylikuumeni. Lämpötilaraja ylittyi ja piiri sammui eli meni niin sanottuun thermal shutdown tilaan.

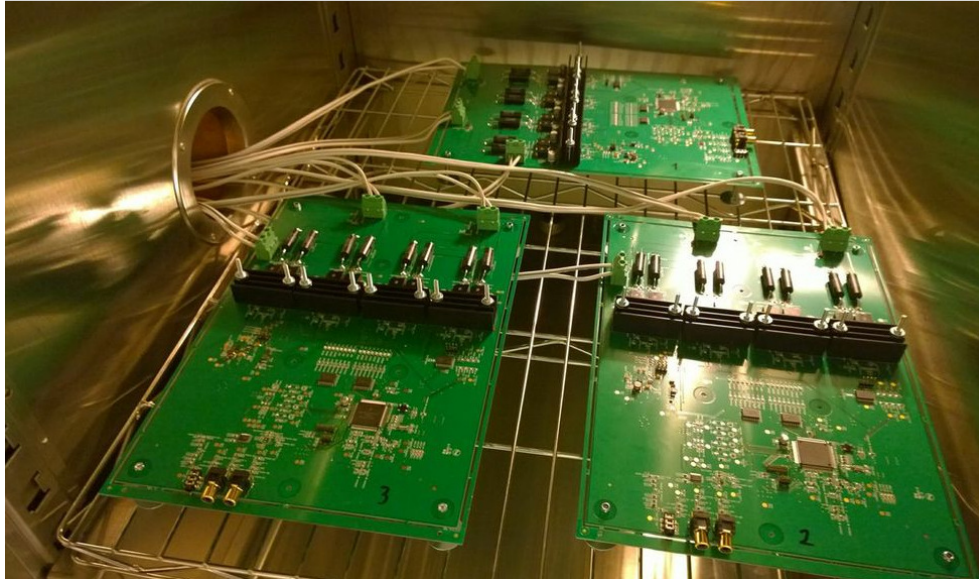
Myöhemmin lämpökameratestausta uusittiin todellisen lämpötilan mittaamiseksi täydellä teholla ja arvoksi saatiin jopa  $135^{\circ}\text{C}$  kuormavirran ollessa  $25.6\text{A}_{\text{p-p}}$ . Kehitysjatoksena ehdottaisiin vahvistimien etäisyyden kasvattamista layoutissa ja jäähdysrimojen optimointia tehokkaaseen jäähdyttämiseen.

Lämpökameramittausten ajatuksena oli kartoittaa induktiosilmukkavahvistimen lämpökäyttäytymistä, mutta etenkin selvittää vahvistimen maksimikäyttölämpötilaa lämpövanhenemistestausta varten. Kuten aiemmin todettiin induktiosilmukkavahvistimen käyttö sinisignaalilla ja maksimiteholla ylikuumentavat vahvistinpiirin nopeasti aiheuttaen lämpölukittautumisen. Jotta lämpövanhenemistestausta olisi luotettava päädyttiin käyttämään amplitudivalintaa 3 ja näin estää lämpölukittautuminen.

Viimeinen lämpökameramittaus suoritettiin käyttäen kuormia ( $\approx 1,9\Omega$ ) ja amplitudivalintaa 3, joita tulisi käyttää myös lämpövanhenemisessä. Lämpötilaa mitattiin tällä asetuksella 10 minuuttia ja se tasaantui lämpötilaan  $47^{\circ}\text{C}$ . Tämän lämpötilan oletetaan olevan maksimikäyttölämpötila amplitudivalinnalle 3. Arrheniuksen kaavassa tätä lukua käytetään arvioitaessa uunitusaikaa lämpövanhenemiselle ja elinikää tuotteelle.

## 4.2 Lämpövanheneminen

Lämpövanhenemisen testaus suoritettiin Lapin AMK:n TKI-yksikössä Kemissä. Käytössä oli Espec EGNX12-6CWL yksikkämmiäinen olosuhdekaappi. Kaappiin uunitukseen laitettiin 3 numeroitua korttia. Korttien lukumäärää rajoitti uunin koko (kuva 11).



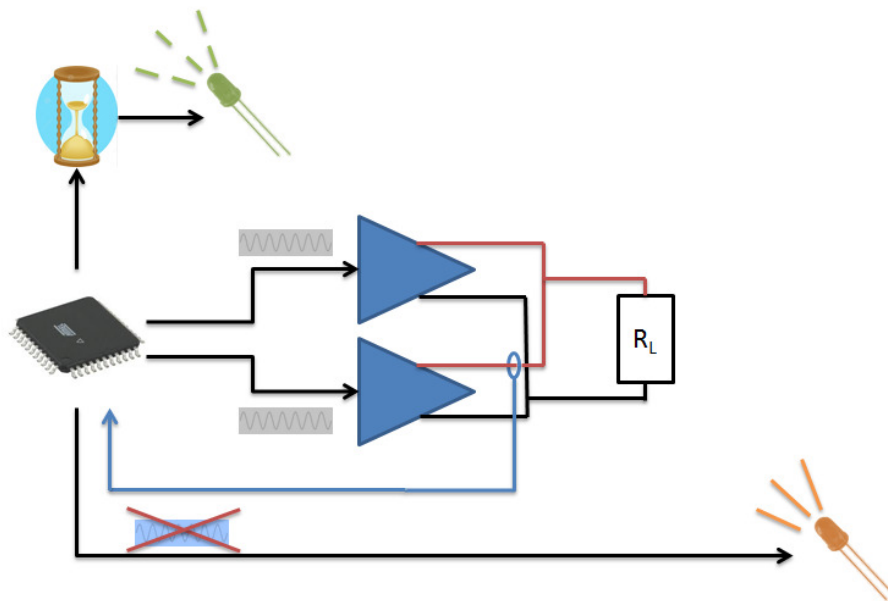
Kuva 11. Induktiosilmukkavahvistinkortit olosuhdekaapissa

Lämpövanheneminen perustui Arrheniuksen kaavaan ja vahvistinpiirin aktivaatioenergiaan, joka on datalehden mukaan  $0.7\text{eV}$ . Kaavaan sijoitettiin käyttölämpötilaksi lämpökameralla mitattu  $47^\circ\text{C}$ . Testauslämpötilaa iteroitiin kaavassa siten, että uunitusaika tulisi kohtuulliseksi ja arvioitu tuotteen elinikä riittäväksi.

Toimeksiantajan toivomus oli uunitus, joka olisi vastannut 10 vuoden elinikää tuotteella. Uunin lämpötilaa rajoittivat komponenttien maksimikäyttölämpötilat. Esimerkiksi kytkimien, eräiden kondensaattoreiden ja LEDien maksimikäyttölämpötila oli vain  $85^\circ\text{C}$ . Iteroinnin tuloksena päädyttiin suosittamaan toimeksiantajalle lämpövanhenemistestauksia  $104^\circ\text{C}$ :ssa, joka on vain asteen pienempi kuin mikrokontrollerin maksimikäyttölämpötila, ja 978 tunnin (41pv) uunitusaikaa. Tämä vastaan tuotteen eliniässä 5,25vuotta. Kymmenen vuoden elinikää vastaava uunitus olisi

kyseisessä lämpötilassa kestänyt 79 päivää. Toimeksiantaja hyväksyi 41 päivän suunnitelman.

Uunitus aloitettiin 12.3.2014 ja se päättyi 22.4.2014. Uunituksen aikana mitattiin kerran päivässä kaikkien kolmen kordin kuormavirtaa kummastakin kuormasta ja tarkkailtiin merkkiLEDejä (liite 3). Prosessori generoi vahvistimelle sinisignaalin ja pyöritti ajastinta, joka vilkutti vihreää LEDiä normaalitoiminnan merkiksi. Oranssi merkkiLED syttyi mikäli 30 sekunnin aikana sinisignaalin huipun ja alimman arvon keskiarvo poikkesi 10% uunituksen alussa kalibroidusta tasosta. Kuvassa 12 on esitelty LEDien toiminta.

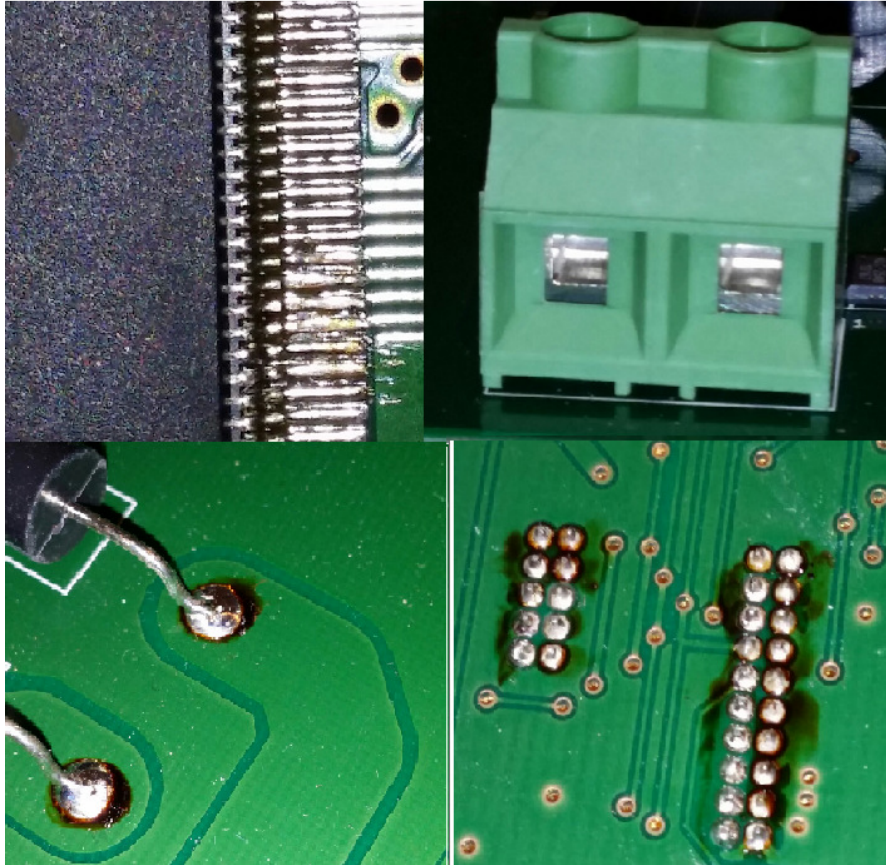


Kuva 12. Induktiosilmukkavahvistimen merkkiLEDien toiminta

Koko uunituksen ajan vihreä LED vilkkui ja oranssi LED ei syttynyt. Myös kuormavirrat pysyivät samansuuruisina uunituksen alusta loppuun. Nämä siis indikoivat induktiosilmukkavahvistimen prototyypin eliniäksi vähintään 5 vuotta. Mikäli käytetään Alleniuksen esittämää käyttö- ja valmiusajat sisältävää kaavaa käyttölämpötiloille, saadaan käyttölämpötilaksi 32°C, kun valmiuslämpötila on 27°C ja käyttöajaksi arvioidaan 6 tuntia ja valmiusajaksi 18 tuntia vuorokaudessa. Tämä 32°C sijoitettuna Arrheniuksen kaavaan antaa tuotteen eliniäksi jopa 18 vuotta.



Jotta tulos olisi varmasti oikea jokainen induktiosilmukkavahvistinkortti tarkastettiin visuaalisesti. Kaikki korttien juotokset olivat silminnähten hyvässä kunnossa ja komponentit eivät vaikuttaneet kärsineiltä. Ainoastaan kuvassa 13 esiintyviä fluksin hartsijälkiä löytyi korteista ja kuvan vihreä liitin oli hieman vaalentunut ja haurastuneen oloinen, mutta edelleen toimiva. Hartsia ei aiheuta oikosulkuja ja siten se ei vaikuta kortin toimintaan.

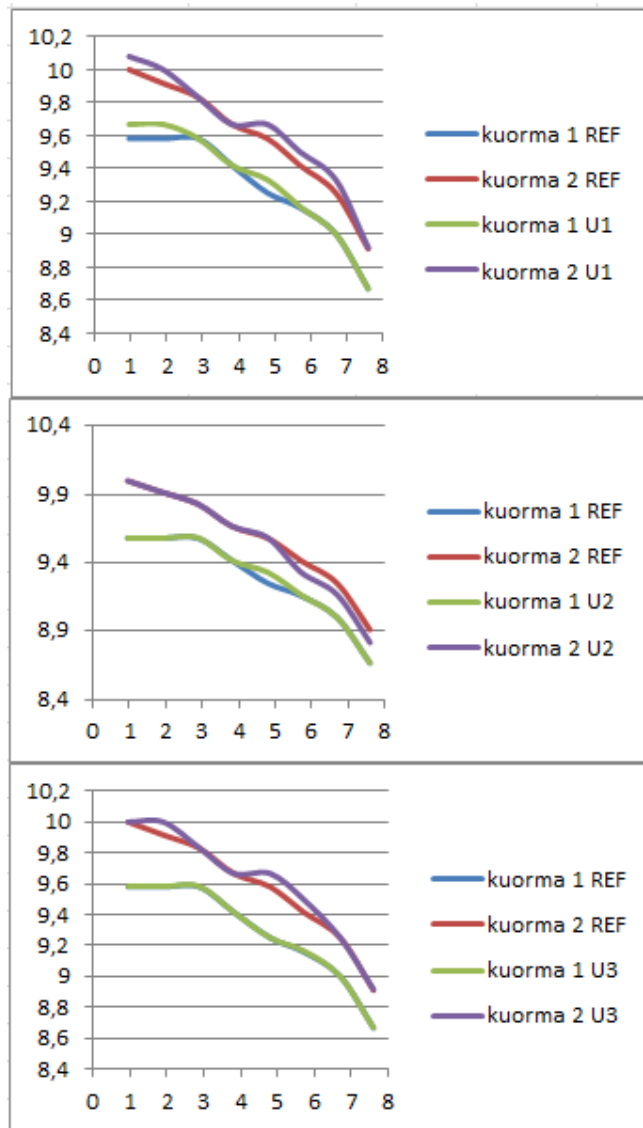


Kuva 13. Induktiosilmukkavahvistinkortin löydöksiä uunituksen lämpövanhentamisen jälkeen

Lopuksi päätettiin vielä tehdä yhdelle uunittamattomalle referenssikortille ja kolmelle uunissa olleelle kortille taajuusvasteanalyysi. Prosessorilta ajettiin vahvistimelle sinimuotoista signaalia, jonka taajuutta muutettiin 30 sekunnin välein. Aloitettiin 1kHz:n taajuudesta ja nostettiin taajuutta kunnes 8kHz oli saavutettu. Tämä on induktiosilmukkavahvistimen normaali toiminta-alue. Joka taajuustasossa mitattiin ulostulon  $I_{p-p}$  kuormavirta kummastakin kuormasta (liite 4). Kunkin kolmen kortin



tuloksia verrattiin referenssikorttiin. Kuvassa 14 on vertailun tulokset, josta voi todeta että taajuusvasteessa ei ole eroa uunitamattomien ja uunitettujen välillä. Mikäli virta olisi huomattavasti tipahtanut jollain taajuudella, se olisi indikoinut rikkoutunutta induktiosilmukkavahvistinta



Kuva 14. Induktiosilmukkavahvistimen taajuusvasteet

Näiden lisätarkastelujen ja Arrheniuksen kaavan perusteella voidaankin todeta, että induktiosilmukkavahvistimen elinikä on ainakin 5 vuotta. Toisin sanoen prototyyppi läpäisi viiden vuoden elinikätestit.

## 5 POHDINTA

Luotettavuustestien kartoittaminen osoittautui yllättävän haasteelliseksi. Englanninkielistä kirjallisuutta on tarjolla, mutta sen on pääsääntöisesti niin yleisellä tasolla kirjoitettua, ettei sen perusteella voi suunnitella käytännön testejä. Standardit usein määrittelevät testaukset tarkemmin, mutta oikean standardin löytäminen teettää työtä ja standardit ovat maksullisia. Päivätyöni elektroniikan suunnitteluprojektien projektijohdossa loi kuitenkin perusteet tämän opinnäytetyön teorialle ja siten helpotti tiedonhakua. Lähteinä on käytetty pääasiassa diplomitöitä ja opinnäytetöitä vaikka haluni oli käyttää alkuperäisiä lähteitä. Kirjallisuutta oli kuitenkin huonosti saatavissa ja nykyisen työpaikkani sisäisiä sivuja en voinut käyttää toisen yrityksen toimeksiantamaan opinnäytetyöhön.

Teoreettista osuutta olisi voinut täydentää vielä erilaisilla standardeilla ja laajemmalla laatuajattelulla. Kokonaisuuteen olisi mahtunut esimerkiksi käsitteiden PPM (parts per million) ja bath tube curven esittely lämpövanhenemistestauksen kylkiäisenä. Induktiosilmukkavahvistimelle olisi voinut myös suorittaa yksityiskohtaisemman riskianalyysin.

Lämpövanhenemisen testaus sujui mallikkaasti ja kortit toimivat vielä yli kuukauden uunituksen jälkeen moitteettomasti. Heräsikin ajatus otannasta. Testissä oli 3 prototyyppikorttia niiden vähäisen valmistusmäärän takia. Kolme korttia lienee riittämätön määrä eliniän luotettavaan arviointiin. Seuraavaksi olisikin hyvä etsiä teoreettista tietoa, millä perusteella otannan tulisi määräytyä, toisin sanoen millä ehdoilla Arrheniuksen malli pätee tuotteen eliniän arvioimisessa.

Allenius esitteli opinnäytetyössään Arrheniuksen kaavassa käytettävän käyttölämpötilan laskemista perustuen valmius- ja käyttöaikoihin ja -lämpötiloihin. D-luokan vahvistin kuuluu vahvistimiin, jotka toimivat kytkimen tavoin. Tämän tosiasian pohjalta Alleniuksen laskelma vaikuttaa hyvin järkevältä tälle induktiosilmukkavahvistimelle. Alleniuksen esittämää kaavaa en onnistunut löytämään mistään muista lähteistä ja kirjaa, jota hän käytti lähteenä en onnistunut saamaan käsiini. Siten tämän kaavan käyttö Arrheniuksen kaavassa jäi hieman mysteeriksi ja vaatisi lisätutkiskelua.

Audiolaitteissa käytetään yleisesti sinisignaalia testisignaalina. Se on kuitenkin huomattavasti rasittavampi signaali laitteelle kuin puhesignaali. Sinisignaalista huolimatta induktiosilmukkavahvistimien vakaa toiminta uunituksen aikana ja sen jälkeen osoittaa, että prototyyppi on hyvin suunniteltu. Jotta saataisiin selville puheen ja sinisignaalin rasittavuuden ero, tulisi kummankin energiatihedyet määrittää ja verrata toisiinsa.

Mielenkiintoista olisi suorittaa lisätestauksia esimerkiksi 5°C korkeammassa lämpötilassa tai tutkia asteittain missä lämpötilassa normaalikäytöllä prototyypin toiminta häiriintyy tai lakkaa. Myös laitteen lämpötilan mittaus induktiosilmukka kytkettynä ja puhesignaalilla rasitettuna tavanomaisessa applikaatiossa olisi hyödyllistä joskin hieman vaikeampaa toteuttaa.

Yllättävää oli huomata kuinka paljon Suomessa etenkin ammattikorkeakoulujen TKI-yksiköissä on tarjolla luotettavuustestauksia eri kokoisille tuotteille. Suosittelenkin, että tätä työtä käytettäisiin hyväksi testausten järjestämisessä ja vähintään tässä työssä esitellyt testit suoritetaan prototyypille. Esimerkiksi Centrian 16m<sup>3</sup> olosuhdekaappi herätti ajatuksen selvittää heidän kykyään suorittaa lämpövanhenemistestausta suuremmalle otannalle.

Työn suurimpia anteja mielestäni oli lämpökameramittaukset käyttölämpötilan määrittämisessä ja lämmönjohtumisen tarkastelussa. Lämpökuvausten perusteella havaittiin layoutin parannustarpeita ja voitiin arvioida induktiosilmukkavahvistimen kriittisimpiä kohtia.

Hyödyllistä olisi myös vertailla kilpailevan valmistajan induktiosilmukkavahvistimen laatuspesifikaatioita; millaista tietoa he tarjoavat luotettavuustesteistään ja millaisia tuntimääriä esimerkiksi he ovat tuotteitaan lämpövanhentaneet. Lisäksi olisi mielenkiintoista kuvata myös kilpaileva piirikortti lämpökameralla ja tutkia kuinka hyvin he ovat hoitaneet lämmönjohtumisen ja kuinka korkean lämpötilan heidän ratkaisunsa saavuttaa.

Harmikseni tämän opinnäytetyön tekeminen osui kiireisimpään ja haastavimpaan vaiheeseen työurallani ja moni tässä kappaleessa pohdituista jatkotoimenpiteistä jäi ain

pohdinnoiksi ajanpuutteen takia. Opinnäytetyöni tukee nykyistä työtäni, mutta samalla avasi ihan uuden maailman laitetason luotettavuustestauksiin ja induktiosilmukkavahvistimiin. Opinnäytetyöni tyydyttää myös jossain määrin kaipuutani turhamaisesta teknologiasta niin sanotun hyödyllisen, ihmistä hyödyttävän teknologian pariin.

## LÄHTEET

- Centrian www-sivut 2014. Hakupäivä 26.4.2014. < <http://tki.centria.fi/>
- Eleforss Oy:n www-sivut 2014. Hakupäivä 27.4.2014. < [www.eleforss.fi](http://www.eleforss.fi)>
- Esala, Mikko 2014. ”Mitä eroa on A- ja B-luokan vahvistimissa?”. Hakupäivä 1.5.2014  
<http://www.kolumbus.fi/mikko.esala/ABclass.pdf>.
- JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry 2006. “ JESD22-B103B: Vibration, Variable Frequency”. JEDEC Solid State Technology Association.
- JEDEC Global Standards for the Microelectronics Industry 2009. “JESD22-A104D Temperature Cycling”. JEDEC Solid State Technology Association.
- Jokela, Ilpo 2006. Kiihdytetty elinikätestaus. Opinnäytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu, Lahti
- Kajaanin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014. Hakupäivä 26.4.2014.  
 <[www.kamk.fi](http://www.kamk.fi)>
- Lapin ammattikorkeakoulun www-sivut 2014. Hakupäivä 27.4.2014.  
 <[www.lapinamk.fi](http://www.lapinamk.fi)>
- Nyholm, Anna 2012. Elektromigraation vaikutus juoteliitosten mekaaniseen ja termomekaaniseen luotettavuuteen. Diplomityö. Aalto yliopisto Teknillinen korkeakoulu, Espoo
- Peltonen, Lauri 2011. Tajuusmuuttajan luotettavuussuunnittelu laajalle lämpötila-alueelle. Diplomityö. Aalto yliopisto Tekninen korkeakoulu, Espoo.
- Saarimaa, Juha 2013. D-luokan induktiosilmukkavahvistin. Opinnäytetyö. Oulun seudun ammattikorkeakoulu, Oulu.
- SGS:n www-sivut. 2014 Hakupäivä 27.4.2013 <[www.SGS.fi](http://www.SGS.fi)>
- Sorsa, Marko. 2011. EMC-laboratorio uudistui Kuopiossa. Hakupäivä 27.4.2014  
<http://www.kuopioinnovation.fi/news/76/34/EMC-laboratorio-uusiutui-Kuopiossa/d.sisasivu>
- Suotula, Lauri 2007. Tärinätestauksen edelleenkehittäminen vastaamaan pudotustestausta eri lämpötiloissa. Diplomityö . Teknillinen Korkeakoulu, Espoo.
- Turvallisuus- ja Kemikaaliviraston www-sivut 2014. Hakupäivä 27.4.2013  
 <[www.tukes.fi](http://www.tukes.fi)>

## LIITTEET

- Liite 1. Lämpökameramittauksia ilman jäähdytysrimaa
- Liite 2. Lämpökameramittauksia jäähdytysriman kanssa
- Liite 3. Lämpövanhenemisen mittauspöytäkirja
- Liite 4. Taajuusvastemittauspöytäkirja

## LIITE 1

1. mittaus ilman jäädytysrimaa: Lämpötilan mittaus ja virran mittaus amplitudia lisäämällä

Amplitudivalinta	Virta Ip-p/A	Lämpötila/°C
1	1,8	28
2	3,5	38
3	5,2	38
4	6,8	44
5	8,8	58
6	10,4	62,6
7	12,1	67
8	14	78
9	15,4	87

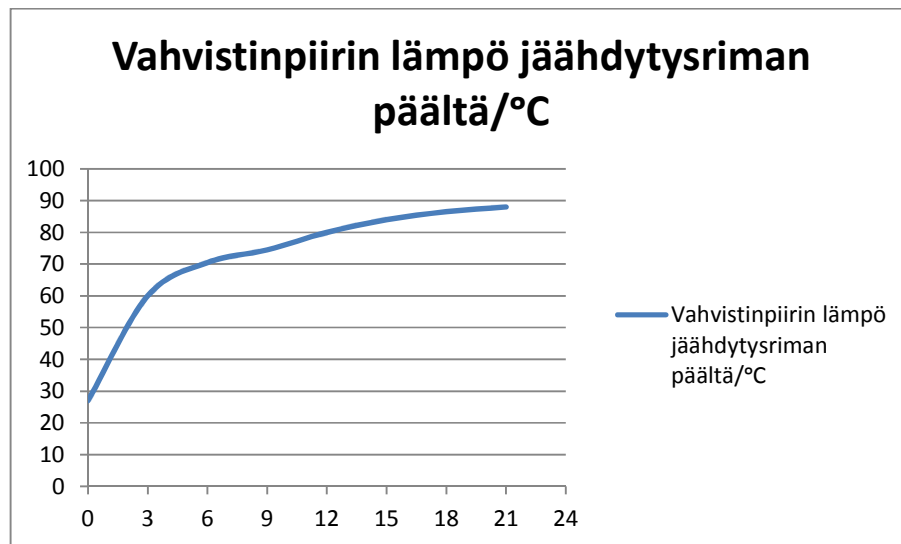
2.mittaus ilman jäädytysrimaa: Lämpeäminen ja jäähtyminen 1 amplitudivalinnalla Ip-p 2A ja mittaus kortin päältä ja alta

Aika/min	Vahvistinpiirin lämpö piirin päältä/°C	Vahvistinpiirin lämpö kortin alta/°C
1	28	40,3
2	63	43,4
3	64,3	45,5
4	65,5	47
5	66,6	48,5
6	67,2	49,1
7	67,7	49,7
8	68	50,2
9	68,1	50,6
10	68,8	50,9
11	68,9	51,1
12	68,8	51,3
13	69	51,5
14	69,1	51,6
15	69,2	51,9
16	39,9	38,3
17	37	35,3
18	34,6	33,2
19	33	31,7
20	31,5	30,2
21	30,7	29,5
22	29,6	28,3

## LIITE 2

1. mittaus jäähdytysriman kanssa: Täyden tehon lämpötilamittaus ajan funktiona

Aika/min	Vahvistinpiirin lämpö jäähdytysriman päältä/°C
0	27
3	60
6	70,5
9	74,5
12	80
15	84
18	86,5
21	88





## LIITE 3

Vahvistin kortin uunituksen seuranta					<b>Normaalitoiminta:</b> vihreä led vilkkuu						
Uunin lämpötila			104C		<b>Vikatilanne:</b> Jos oranssi led vilkkuu ota yhteys Juha Saarimaa p. 0443456974						
Uunitusaika			978	41	<b>Virran mittaus:</b> virran tulisi olla max 1.3-1.5A per kuorma						
			h	pv	jos virta poikkeaa ota yhteys Juha Saarimaahaan						
Aloitus	12.3.2014		klo	15.15	<b>jos vihrea led sammuu</b> --> tarkasta virrat, jos OK jatka testiä,						
Lopetus	22.4.2014		klo	9:15	jos ei OK poista kortti testistä ja kirjaa ylös poistamisaika ja ota yhteyttä Juhaan						
		Kortti1			Kortti 2			Kortti 3			
pvm	klo aika	vihreä	oranssi	lp-p per kuorma/A	vihreä	oranssi	lp-p per kuorma/A	vihreä	oranssi	lp-p per kuorma/A	kertymä/h
12.3.2014	15.15	vilkkuu	ei	2.83/2.85	vilkkuu	ei	2.79/2.81	vilkkuu	ei	2.79/2.81	0
13.3.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,79/2,81	x	ei	2,79/2,81	24
14.3.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,79/2,79	x	ei	2,79/2,75	48
15.3.2014	15:30										72
16.3.2014	15:30										96
17.3.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,79/2,79	x	ei	2,77/2,75	120
18.3.2014	15:30	x	ei	2,83/2,83	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,77/2,75	144
19.3.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,77/2,75	168
20.3.2014	15:30	x	ei	2,64/2,58	x	ei	2,58/2,58	x	ei	2,64/2,60	192
21.3.2014	15:30	x	ei	2,65/2,65	x	ei	2,58/2,63	x	ei	2,62/2,54	216
22.3.2014											240
23.3.2014											264
24.3.2014	15:30	x	ei	2,68/2,68	x	ei	2,63/2,73	x	ei	2,75/2,75	288
25.3.2014	15:30	x	ei	2,75/2,75	x	ei	2,75/2,75	x	ei	2,65/2,65	312
26.3.2014	15:30	x	ei	2,68/2,64	x	ei	2,64/2,64	x	ei	2,50/2,56	336
27.3.2014	16:00	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,75	360
28.3.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,75/2,77	x	ei	2,77/2,77	384
29.3.2014											408
30.3.2014											432
31.3.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,70	456
1.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,75/2,77	x	ei	2,77/2,75	480
2.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,75	x	ei	2,75/2,77	x	ei	2,70/2,75	504
3.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,75	528
4.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,75	552
5.4.2014											576
6.4.2014											600
7.4.2014	15:30	x	ei	2,83/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,77	624
8.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,77	648
9.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,75/2,77	x	ei	2,77/2,77	672
10.4.2014	15:45	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,77/2,77	696
11.4.2014	15:45	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,68/2,66	720
12.4.2014											744
13.4.2014											768
14.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,75	792
15.4.2014	15:45	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,75	816
16.4.2014	15:30	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,77	840
17.4.2014	15:45	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,77	x	ei	2,75/2,75	864
18.4.2014											888
19.4.2014											912
20.4.2014											936
21.4.2014											960
22.4.2014	9:15	x	ei	2,81/2,81	x	ei	2,77/2,75	x	ei	2,75/2,75	978

## LIITE 4

## Taajuusvastenalyysi

## Uunittamaton

Taajuus	kuorma 1 REF	kuorma 2 REF
0,95	9,58	10
1,9	9,58	9,916
2,88	9,58	9,83
3,81	9,417	9,667
4,8	9,25	9,58
5,7	9,16	9,417
6,7	9	9,25
7,6	8,667	8,91

## Uunitettu 1

taajuus	kuorma 1 U1	kuorma 2 U1
0,95	9,667	10,08
1,9	9,667	10
2,84	9,58	9,83
3,81	9,417	9,667
4,8	9,33	9,667
5,7	9,167	9,5
6,7	9	9,33
7,6	8,667	8,917

## Uunitettu 2

taajuus	kuorma 1 U2	kuorma 2 U2
0,95	9,58	10
1,9	9,58	9,916
2,83	9,583	9,83
3,81	9,417	9,667
4,8	9,33	9,583
5,7	9,1667	9,333
6,7	9	9,167
7,6	8,667	8,816

## Uunitettu 3

taajuus	kuorma 1 U3	kuorma 2 U3
0,95	9,583	10
1,9	9,583	10
2,87	9,583	9,833
3,81	9,417	9,667
4,8	9,25	9,667
5,7	9,1667	9,5
6,7	9	9,25
7,6	8,667	8,916