

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Diplomityö

Tuomo Heiskanen

Lämpövuoanturin mittauselektroniikan suunnittelu ja toteutus

Tarkastajat:

Prof. Pertti Silventoinen

TkT Mikko Kuisma

Lappeenranta 17. maaliskuuta 2015

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Tuomo Heiskanen

Lämpövuoanturin mittauselektroniikan suunnittelu ja toteutus

Diplomityö

2015

51 sivua, 24 kuvaa, 2 taulukkoa ja 1 liite.

Tarkastajat: Prof. Pertti Silventoinen
TkT Mikko Kuisma

Avainsanat: Mittauselektroniikka, instrumentointi, vahvistin, lämpövuoanturi,
poikittainen Seebeck ilmiö

Energian kulutuksen vähentäminen ja sen tutkiminen on kasvavan kiinnostuksen kohteena. Syntyneen lämmön mittaaminen on yksi tapa mitata energian siirtymistä. Lämpötilan mittaaminen on yleistä, vaikka usein on merkittävämpää selvittää missä ja miten lämpöenergia on siirtynyt. Tästä syystä tarvitaan lämpövuoantureita, jotka reagoivat suoraan lämpövuohon eli lämpöenergian siirtymiseen.

Tässä tutkimuksessa suunnitellaan ja toteutetaan lämpövuoanturin mittauselektroniikka vaativaan käyttöympäristöön. Työssä käytettävän gradienttilämpövuoanturin tuottama jännitesignaali on mikrovolttiluokkaa ja ympäristön aiheuttama kohina voi olla huomattavasti suurempi. Tämän takia anturin tuottamaa signaalia on vahvistettava, jotta sitä voidaan mitata luotettavasti. Tutkimuksessa keskitytään vahvistimen suunnitteluun, mutta suunnittelussa on otettava huomioon koko järjestelmä. Anturin sähköiset ominaisuudet ja ympäristö asettavat rajoitteita vahvistimelle. Tavoitteena on selvittää miten voidaan mitata mikrovolttien jännitesignaalia mahdollisimman suurella taajuuskaistalla vaativassa käyttöympäristössä.

Työn tuloksena syntyi mittalaite, jota voidaan käyttää vaativassa ympäristössä lämpövuon mittaamiseen. Suunnitteluparametrien mukainen vahvistus ja päästökaista sekä offset-jännitteen ryömintä saavutettiin suunnitellulla mittalaitteella, mutta offset-jännite ja kohina olivat hieman suunniteltua suuremmat. Mittalaitteella ja lämpövuoanturilla havaittiin selvästi lämpövuon muutoksia keinotekoisilla herätteillä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Tuomo Heiskanen

Design and implementation of measurement electronics for a heat flux sensor

Master's Thesis

2015

51 pages, 24 figures, 2 tables and 1 appendix.

Examiners: Prof. Pertti Silventoinen
D.Sc. Mikko Kuisma

Keywords: Measurement electronics, instrumentation, amplifier, heat flux sensor, transverse Seebeck effect

The study of decreasing energy consumption is under growing scrutiny. Energy transfer can be measured by the generated heat. Measurement of temperature is common, although often it is more important to determine where and how the thermal energy has been transferred. Therefore heat flux sensors that directly sense heat flux, in other words thermal energy transfer, are needed.

In this research measurement electronics of a heat flux sensor for harsh environment are designed and implemented. The gradient heat flux sensor generates microvolt scale voltage signal and noise caused by the environment can be significantly greater. In order to measure reliably, voltage signal from the sensor has to be amplified. The research focuses on the amplifier design but the whole system needs to be taken into consideration in the design. Electrical properties of the sensor and environment limit the operation of the amplifier. Goal of this thesis is to study how to measure microvolt scale voltage signal with as high bandwidth as possible in harsh environment.

The outcome of this thesis, a measurement device for heat flux sensing in harsh environment was implemented. Gain, bandwidth and offset voltage drift were in accordance with the design but offset voltage and noise were slightly greater. With artificial impulses distinctive changes in heat flux were observed with the measurement device and the heat flux sensor.

Alkusanat

Tämä tutkimus on tehty Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa Tekesin rahoittamassa DEMIS TutLi-hankkeessa. Kiitos kaikille projektin jäsenille.

Erityisesti haluan kiittää Mikko Kuismaa ja Pertti Silventoista työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta sekä Heikki Järvisaloa työn oikolukemisesta. Kiitos myös työhuoneen välle, sain teiltä hyviä ideoita ja tarpeellista apua.

Lämmin kiitos perheelleni, ystäville ja läheisille. Olette tukeneet minua opintojeni aikana.

Lappeenranta 17. maaliskuuta 2015

Tuomo Heiskanen

Sisältö

1 Johdanto	8
1.1 Työn tavoitteet	9
2 Lämpövuointuri	11
2.1 Lämpösähköinen ilmiö	11
2.1.1 Poikittainen Seebeckin ilmiö	13
2.2 Gradienttilämpövuointuri	14
3 Vahvistin	18
3.1 Vahvistintyytit	18
3.2 Topologiat	20
3.2.1 Epäsymmetriset jännitevahvistimet	20
3.2.2 Differentiaalinen jännitevahvistin	22
3.2.3 Instrumentointivahvistin	24
3.3 Operaatiovahvistimen epäideaalisuudet	25
3.3.1 Offset-jännite	26
3.3.2 Kohina	26
3.3.3 Rajallinen päästökaista	28
3.4 Suunnitteluparametrien määrittäminen ja vahvistinten testaus	28
4 Koelaitteen toteutus ja mittaukset	34
5 Yhteenveto	45
Lähteet	48
LIITE I	

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

Merkinnät

<i>A</i>	Vahvistus
<i>C</i>	Kondensaattori
<i>GBWP</i>	Vahvistuksen ja kaistanleveyden tulo
<i>E</i>	Jännitelähde
<i>e</i>	Jännite taajuuden neliön suhteen
<i>I</i>	Virta
<i>L</i>	Kela
<i>q</i>	Lämpövuoto
<i>R</i>	Vastus
<i>T</i>	Lämpötila
<i>TCV</i>	Jännitteen lämpötilaryömintä
<i>V</i>	Jännite

Alaindeksit

in	Tulo
max	maksimiarvo
n	Kohina
OS	Offset
out	Lähtö
RMS	Tehollisarvo
V	Jännite

Lyhenteet

AC	Vaihtosähkö, Alternating Current
A/D	Analogi-digitaali, Analog to Digital
BJT	Bipolaaritransistori, Bipolar Junction Transistor
CMOS	Komplementtinen metallioksidipuolijohde, Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CMRR	Yhteismuotoinen vaimennussuhde, Common-Mode Rejection Ratio
DC	Tasasähkö, Direct Current
DEMIS	Direct Energy Measurement and Information System
FET	Kanavatransistori, Field-Effect Transistor
GBWP	Vahvistus-kaistanleveydstulo, Gain-Bandwidth Product
GHFS	Gradienttilämpövoanturi, Gradient Heat Flux Sensor
JFET	Liitoskanavatransistori, Junction Field-Effect Transistor
MOS	Metallioksidipuolijohde, Metal-Oxide-Semiconductor
RMS	Neliöllinen keskiarvo, Root Mean Square
YBCO	Yttrium-barium-kuparioksidi, Yttrium Barium Copper Oxide

1 Johdanto

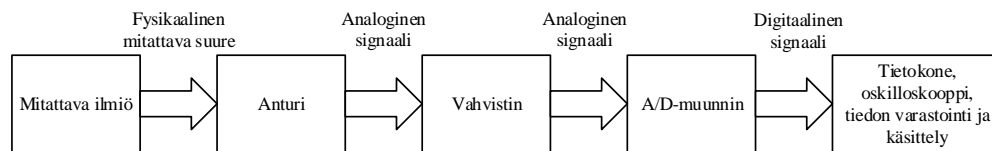
Tämä tutkimus liittyy Tekesin rahoittamaan DEMIS tutkimuksesta liiketoimintaa -hankkeeseen (TutLi). Hankkeessa tutkitaan lämpövuoanturin kaupallisia käyttökohteita ja kehitetään anturin valmistustekniikkaa. Anturin hyödyntämiseksi tarvitaan signaalinkäsittelyä, jonka yksi osa on vahvistin. Työssä käytettävältä lämpövuoanturilta tuleva jännitesignaali on verrannollinen sen läpi kulkevaan lämpövuohon. Kuitenkin syntyvä jännite on pieni, 1 μ V-1 mV, ja ympäristön aiheuttama kohina voi olla useita millivoltteja. Tällöin anturin tuottamaa signaalia on vahvistettava, jotta se erottuu kohinasta ja sitä voidaan mitata luotettavasti.

Projektissa käytettävä anturi perustuu poikittaiseen Seebeckin ilmiöön. Vastaavat anturit ovat vielä vähän käytettyjä ja niiden tutkimukset ovat keskittyneet lähinnä materiaaleihin ja valmistustapoihin. Poikittaiseen Seebeckin ilmiöön perustuvien antureiden instrumentointia on tutkittu vain Niukkanen [1] tekemässä diplomityössä, vaikka poikittaisen Seebeckin ilmiön ominaisuuksia on tutkittu Neuvostoliitossa jo 1970-luvulla [2]. Niukkanen tutki diplomityössään vismuttiin perustuvan lämpövuoanturin instrumentointia sähkömoottorissa. Lämpövuoantureihin soveltuvia materiaaleja on tutkittu useissa tutkimuksissa [2][3][4][5][6]. Lisäksi antureilla on tutkittu ainakin sähkömoottorin lämpövuota [7] ja akun kennojen termisiä parametreja [8] mittaamalla suoraan anturin tuottamaa jännitettä ilman vahvistusta.

Energian kulutuksen tutkiminen ja prosessien optimointi on tärkeää nykypäivän yhteiskunnassa. Myös korkeamman tehotehden tavoittelu sähköisissä ja mekaanisissa laitteissa lisää tarvetta jäähdytyksen suunnittelulle. Lämpövuota tutkimalla saadaan tietoa prosessien energian siirtymisestä. Yleensä kuitenkin mitataan lämpötilaa, vaikka usein on tärkeämpää tietää miten ja missä lämpöenergia on siirtynyt. Tästä syystä tarvitaan lämpövuoantureita, jotka reagoivat suoraan lämpövuohon eli lämpöenergian siirtymiseen. Tästä huolimatta lämpövuoantureita käytetään vähemmän kuin lämpötila-

antureita. [9] Lämpövuoantureita voidaan soveltaa erilaisissa moottoreissa [6], rakennusten ja eristysten tutkimisessa sekä teollisuuden prosesseissa [3]. Lämpövuon mittaamisella voidaan havaita mahdollisesti vikatilanne tai optimoida prosessien energiankulutusta.

Mittaaminen on tiedon keruuta fyysikaalisesta maailmasta. Luotettavien mittausten suorittamiseksi tarvitaan instrumentointia, joka koostuu yleensä anturista, vahvistimesta, A/D-muuntimesta ja mitattua tietoa käsittelevästä laitteistosta. [10] Kuvassa 1.1 on esitetty yksinkertaistettu malli instrumentoinnista.



Kuva 1.1. Yksinkertaistettu malli instrumentoinnista. Muokattu [10]

Instrumentoinnin pääelementti on anturi, joka muuttaa fyysikaalisen suureen mitattavaksi signaaliksi. Yleinen anturin lähtösignaali on sähköisissä järjestelmissä jännite, ja mekaanisissa järjestelmissä siirtymä tai voima. Jos anturin lähtösignaali on pieni, tarvitaan vahvistusta. Monesti instrumentoinnin tulee tuottaa digitaalinen signaali, jotta sitä voidaan käsitellä tietokoneella tai siirtää digitaalisessa järjestelmässä. Jos anturi ei tuota suoraan digitaalista lähtösignaalia, voidaan analoginen signaali muuntaa digitaalseksi A/D-muuntimella. Instrumentoinnin lähtösignaalia voidaan esittää eri laitteilla, kuten tietokoneella ja oskilloskoopilla, tai tallentaa. [10]

1.1 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa mittauselektronikka lämpövuoanturille. Tarkoituksena on selvittää miten voidaan mitata mikrovolttien jännitesignaalia mahdollisimman suurella taajuuskaistalla. Tutkimuksessa keskitytään kuvan 1.1 instru-

mentointimallin vahvistimeen. Työssä tutkitaan myös anturin sähköisiä ominaisuuksia, koska ne vaikuttavat osaltaan vahvistimen suunnitteluun. Anturin mitattuja ominaisuuksia verrataan myös edelliseen tutkimukseen [1]. Rajapintaan vahvistimen ja analogista tietoa käsittelevän laitteiston välillä ei keskitytä. A/D-muunto ja mittaustiedon käsittely tapahtuu oskilloskoopin avulla. Tutkimuskysymyksinä on:

- Miten anturi voidaan mallintaa sähköisesti?
- Mikä on anturilta tuleva signaalitaso ja anturin kaistanleveys?
- Miten anturia voidaan kuormittaa?
- Miten anturin tuottama signaali siirretään?
- Mitä vahvistimelta vaaditaan, jotta sitä voidaan käyttää lämpövuon mittauksessa?
- Mitkä vahvistimen ominaisuudet vaikuttavat tässä sovelluksessa?
- Mitä vaatimuksia käyttöympäristö asettaa?
- Miten järjestelmä suojataan häiriöiltä?

Mittauselektroniikan tulee soveltua käytettäväksi vaativissa olosuhteissa, joissa lämpötila voi nousta lähelle 100 °C. Suunnitteluparametrit muodostuvat käytettävän anturin ominaisuuksista, käyttöympäristön määrittämisestä rajoitteista sekä suunnittelijan rajaa- mista määrittelyistä. Tarkoituksena on pystyä hyödyntämään anturin tuomia ominaisuuksia lämpötilamittaukseen verrattuna. Näitä ovat muun muassa nopea vasteaika ja reagointi suoraan lämpövuohon lämpötilan sijaan. Tavoitteiden mittarina on suunnitteluparametrien toteutuminen lopullisessa mittauselektroniikan toteutuksessa.

Tutkimustapana työssä on kirjallisuustutkimus ja kokeellinen tutkimus. Työssä tutkitaan anturin toimintaa ja verrataan tuloksia edelliseen tutkimukseen [1]. Vahvistimia tutkitaan kirjallisuuskatsauksella ja lopullinen vahvistinsuunnittelu tapahtuu testaamalla eri vahvistintopologioita ja -komponentteja.

2 Lämpövuuanturi

Lämpövuoto kuvaa lämpöenergian siirtymisen suhteessa pinta-alaan. Lämpövuoto koostuu johtumisesta, konvektiosta ja säteilystä [9]. Sen tutkimiseen käytetään yleensä kahta tapaa. Toinen tavoista perustuu tarkkaan mittaukseen keskiarvolämpötilaprofilista pinnan välittömästä läheisyydestä, mistä lasketaan lämpötilagradientti ja lämpövuoto. Toinen tapa on käyttää useista termopareista muodostettua lämpövuuanturia, jonka eri metallit on asetettu vastakkaisille puolille eristepintaa. Jos lämpötilat eristepinnan eri puolilla eroavat, Seebeckin ilmiö aiheuttaa potentiaalieron termoparin välille, joka on verrannollinen lämpötilaeroon. Kun tämän tyyppisen anturin paksuutta ohennetaan, anturin vasteaika paranee, mutta lämpöresistanssi ja samalla herkkyys pienenevät. Näillä lämpövuonon mittaustavoilla voidaan mitata vain lämpövuonon keskiarvoa. [11] Kuitenkin usein halutaan tietää myös paikalliset ja hetkelliset muutokset lämpövuossa [9].

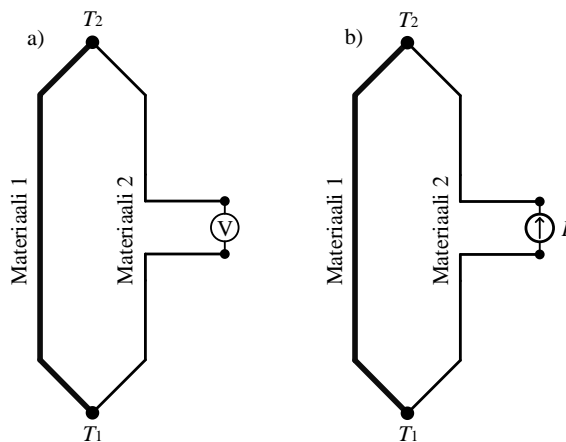
Lämpövuotoa voidaan mitata myös vähemmän tunnettuun poikittaiseen Seebeckin ilmiöön perustuvalla anturilla, jossa syntyvään jännitteeseen vaikuttaa anturin pituus, toisin kuin perinteisessä Seebeckin ilmiöön perustuvassa anturissa. Tämä johtuu poikittaisesta Seebeckin ilmiöstä, jossa syntyvä sähkökenttä on kohtisuorassa lämpövuotoa kohtaan. Anturi voidaan tehdä hyvin ohueksi, jolloin vasteaika paranee vaikka säilytetään sama herkkyys. [2] Poikittaiseen Seebeckin ilmiöön perustuvilla antureilla on raportoitu nanosekuntien vasteaikoja ja niiden herkkyys voi olla 2-50 mV/W. Anturin resistanssi (1-10 Ω) vähentää häiriöiden kytkeytymistä mittausspiiriin. [7]

2.1 Lämpösähköinen ilmiö

Lämpösähköinen ilmiö kuvaa energian muunnon sähkökentän ja lämpövirtauksen välillä. Lämpösähköisiä ilmiöitä ovat Seebeckin, Peltierin ja Thomsonin ilmiöt. Materiaalien lämpösähköiset ominaisuudet ovat mitattavia ja riippuvat materiaalin tilavuu-

desta. [12] Seebeckin ja Peltierin ilmiöistä havaitaan myös poikittaiset ilmiöt [13].

Seebeckin ilmiö kuvaa lämpöenergian muutoksen sähköenergiaksi. Kun kahden eri johteen välillä on lämpötilaero, syntyy jännitepotentiaali. Peltierin ilmiö taas kuvaa sähköenergian muutoksen lämpöenergiaksi. Kahden eri johteen liittäessä muodostuu tai vapautuu lämpöä, kun niiden läpi kulkee sähkövirta. [14] Kuvassa 2.1 on esitetty Seebeckin ja Peltierin ilmiöt.



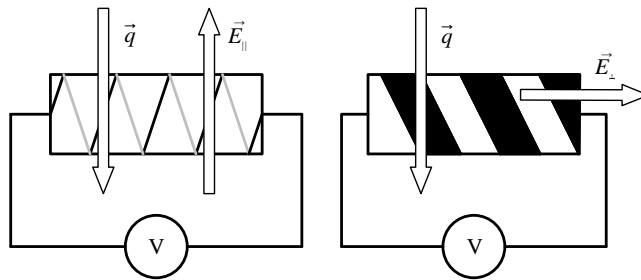
Kuva 2.1. a) Seebeckin ilmiö. Lämpötilaero synnyttää jännitteen eri materiaalien välille. b) Peltierin ilmiö. Virta aiheuttaa lämmön muodostumisen tai vapautumisen kahden eri materiaalin liittäessä. Muokattu [4]

Seebeckin ilmiössä syntyvä jännite on verrannollinen materiaalien ominaisuuksiin ja lämpötilaeroon. Peltierin ilmiössä lämpötilaero johteiden välillä on verrannollinen virran suuruuteen ja suuntaan sekä materiaalien ominaisuuksiin. Lämpö voi sitoutua tai vapautua Peltierin ilmiössä riippuen virran suunnasta. Ilmiö on eri kuin johteen vastuksessa syntyvä Joulen lämpiäminen. Peltierin lämpö on lineaarinen virran suhteen, kun taas Joulen lämpö on neliöllisesti verrannollinen. Peltierin lämpö voi olla positiivinen tai negatiivinen ja se on palautuva, sen sijaan Joulen lämpö on aina positiivinen ja palautumaton. [12] Thomsonin ilmiö kuvaa virrallisen johtimen lämpiämisen tai viilentymisen, kun se on lämpötilaeron vaikutuksessa. Thomsonin ilmiötä tarvitaan tarkoissa lämpösähköisissä mallinnuksissa, mutta se ei ole laitteiden lämpösähköisten ominaisuuksien kannalta kovin merkittävä. [15]

Seebeckin ilmiön synnyttämä jännite muodostaa virran suljetussa piirissä. Virta ja lämpötilaerot aiheuttavat Peltierin ja Thomsonin ilmiöt, jotka aiheuttavat pieniä virheitä systeemin kokonaislämpöön. Joulen lämpiämisestä syntyy kuitenkin paljon suurempia virheitä, jotka vaikuttavat mittaukseen. [16] Tästä syystä Peltierin ja Thomsonin ilmiöitä ei käsitellä tässä työssä tarkemmin. Joulen lämmön vaikutusta pyritään minimoimaan pitämällä vastukset mahdollisimman pieninä.

2.1.1 Poikittainen Seebeckin ilmiö

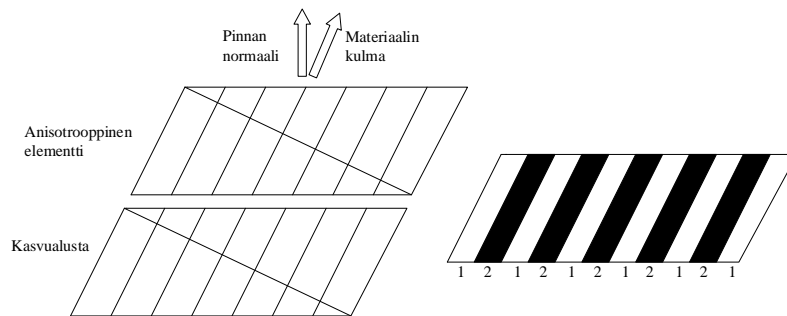
Seebeckin ilmiössä syntyvä jännite on yhdensuuntainen lämpövuon kanssa, mutta poikittaisessa ilmiössä jännite on kohtisuorassa lämpövuon kanssa. Poikittainen ilmiö voidaan havaita kaikissa johtimissa, joissa Seebeckin kerroin on anisotrooppinen, eli kerroin ei ole sama pituuden ja leveyden suhteen. [13] Kuvassa 2.2 on esitetty syntyvän jännitteen ja lämpövuon suhde normaalin Seebeckin ilmiön ja poikittaisen ilmiön tapauksessa.



Kuva 2.2. Lämpövuon ja muodostuvan jännitteen suunnat Seebeckin normaalissa ja poikittaisessa ilmiössä. Normaali Seebeckin ilmiö vasemmalla ja poikittainen oikealla. Seebeckin ilmiössä jännite on yhdensuuntainen lämpövuon kanssa, poikittaisessa ilmiössä jännite on kohtisuorassa lämpövuon kanssa. Muokattu [3]

Anisotrooppinen ominaisuus voi olla materiaalin luontainen tai se voidaan saavuttaa kerrostamalla kahta eri materiaalia. Muodostamalla materiaali, joka on luontaisesti anisotrooppinen, kulmassa pinnan normaalin suhteen, muodostuu siihen lämpötilagra-

dientin vaikutuksesta poikittainen Seebeckin ilmiö. Tämä voidaan saavuttaa esimerkiksi kasvattamalla anisotrooppista ainetta pinnan normaalin suhteen vinolle kasvualustalle. Saman voi saavuttaa myös kerrostamalla kahta eri materiaalia kulmassa pinnan normaalin suhteen. [2] Perinteisissä Seebeckin ilmiöön perustuvissa laitteissa, kuten termopareissa, tämä kulma on 0° tai 90° , jolloin ei esiinny poikittaista Seebeckin ilmiötä [4]. Kuvassa 2.3 on esitetty poikittaiseen Seebeckin ilmiöön perustuvan elementin luontaisesti anisotrooppinen ja kerrostamalla tehty rakenne.



Kuva 2.3. Kaksi tapaa muodostaa anisotrooppinen termoelementti. Vasemmalla luontaisesti anisotrooppisesta materiaalista muodostettu pinnan normaalin suhteen kulmassa oleva kappale. Oikealla anisotrooppisuus on tehty kerrostamalla kahta eri materiaalia kulmassa. Muokattu [2]

Anisotrooppinen termoelementti voidaan muodostaa kerrostamalla metalleista, metalliseoksista ja puolijohdeista [3]. Yleisesti käytettyjä materiaaleja ovat vismutti, vismuttitelluridi, kupari-konstantaani sekä suprajohdeet, kuten YBCO [2]. Käytetyt materiaalit ja rakenne riippuvat käyttökohteen määräämistä ominaisuuksista, kuten lämpötilasta [17].

2.2 Gradienttilämpövuonturi

Tässä työssä käytetään gradienttilämpövuonturia (GHFS), jonka toiminta perustuu poikittaiseen Seebeckin ilmiöön. Anturi on tehty kahdesta metallista jotka on difuusiohitsattu kerroksittain. Muodostunut kappale on leikattu $20-45^\circ$ kulmassa, jolloin metallikerrokset ovat kohtisuorasta kulmasta poikkeavia pituussuunnassa. [17] Anturin

rakenne on samanlainen kuin kuvassa 2.3 esitetty kahdella materiaalilla muodostettu rakenne. Kuvassa 2.4 on esitetty tässä työssä käytetyt anturit.

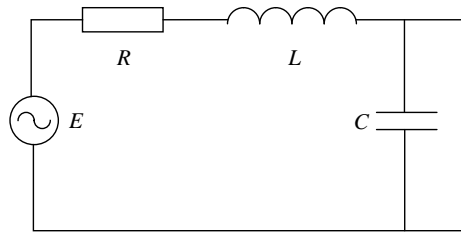


Kuva 2.4. Työssä käytetyt anturit.

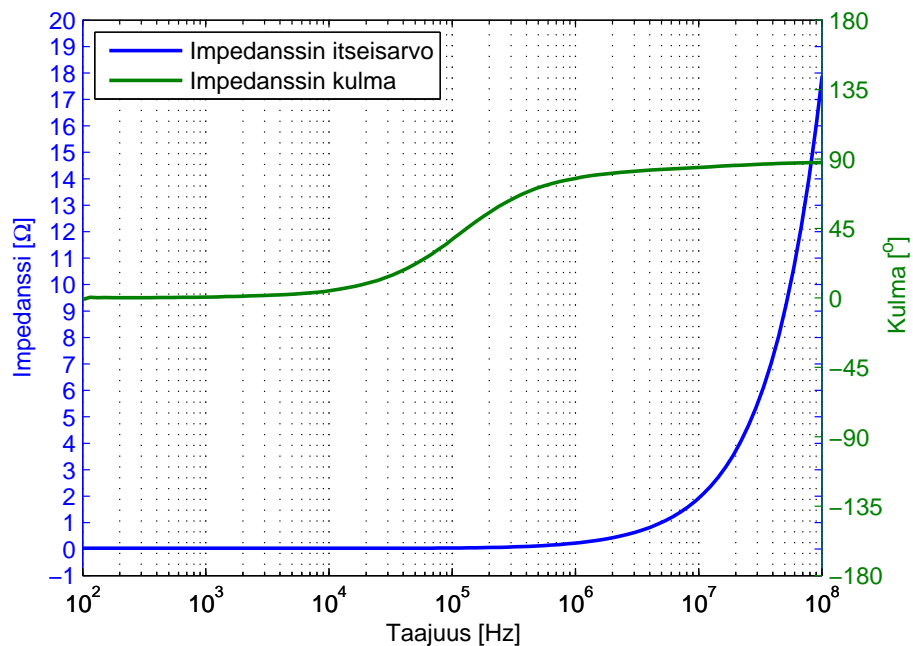
Lämpövuoanturit perustuvat yleensä materiaaleihin, joiden toimintalämpötilan yläraja on alle 271 °C. Näitä antureita ei voida käyttää korkeissa lämpötiloissa, kuten lentokoneellisuudessa ja metallurgiassa. Kahdesta metallista valmistetulla anturilla voidaan saavuttaa korkeampi toimintalämpötilan yläraja. [3] Tällöin anturin herkkyys kuitenkin on huonompi kuin matalampien lämpötilojen lämpövuoantureilla [17].

Niukkanen [1] esitti poikittaiseen Seebeckin ilmiöön perustuvien lämpövuoantureiden sijaiskytkennäksi kuvassa 2.5 esitettyä kytkentää. Tässä työssä käytetyillä antureille tehtyjen mittausten perusteella saatiin vastaava tulos, mutta anturien materiaaliroisista johtuen arvot eroavat toisistaan. Mittaus suoritettiin impedanssianalysointilaitteella HP-4194A. Kuvassa 2.6 on esitetty yhden tässä työssä käytetyn anturin impedanssikäyrä taajuuden suhteen.

Mittauksissa saatiin antureiden sijaiskytkennän resistansseiksi 0,03-0,6 Ω , kapasitansseiksi 5-10 pF ja induktansseiksi 50-330 nH. Anturin impedanssi alkaa muuttumaan



Kuva 2.5. Anturin sijaiskytkentä. E on jännitelähde, R on vastus, L kela ja C kondensaattori. Muokattu [1]



Kuva 2.6. Anturin mitattu impedanssin itseisarvo ja impedanssin kulma taajuuden suhteen.

1 MHz jälkeen, jota ennen impedanssin arvon määrää resistanssi. Mittausten arvoihin vaikutti myös anturin johdinten pituudet, minkä vaikutus näkyi varsinkin induktanssin suuruudessa. Suurin induktanssin arvo on mitattu pisimmällä johdolla ja pienin anturilla, jossa on lyhimät johdot. Myös kapasitanssin huomattiin kasvavan johdon pituuden suhteen.

Poikittaiseen Seebeckin ilmiöön perustuvia antureita pidetään jännitelähteinä [2][3][4][5][6]. Ideaalisen jännitelähteen impedanssi on nolla ja virtalähteen impedanssi ääretön [18]. Tällöin anturin sijaiskytkennän ja impedanssikäyrän perusteella anturi voi-

daan mallintaa jännitelähteenä. Antureiden ominaisuuksia mitattiin myös vahvistamalla niiden tuottamia virta- ja jännitesignaaleja virta- ja jännitevahvistimilla. Antureiden tuottamat signaalit virtavahvistuksella riippuivat anturin impedanssista, kun taas jännitevahvistuksella tuotetut signaalit olivat toisiaan vastaavat. Tämä johtuu siitä, että antureiden sisäiset resistanssit muodostavat vastusjaon virtavahvistimen takaisinkytkentävastuksen kanssa ja täten muodostavat jännitevahvistimen. Myös mittaustulosten perusteella anturi voidaan mallintaa jännitelähteenä.

3 Vahvistin

Vahvistin on analogisen signaalinkäsittelyn tärkeimpiä komponentteja. Sen tarkoituksena on vahvistaa siihen syötettävää signaalia tietyllä vahvistuksella. Lisäksi vahvistimeen voi lisätä suodatusta, jolla saadaan suodatettua signaalin sisältöä ja mahdollisia häiriöitä.

Yksinkertaisimmillaan vahvistin on yksittäinen transistori, mutta niiden käyttämiseen tarvitaan tarkoin mitoitettuja oheiskomponentteja, kuten bias-kytkentää. Usein käytetäänkin operaatiovahvistimia, jotka koostuvat useista transistoreista yhdellä piirillä. Operaatiovahvistimien transistorit ja oheiskomponentit on mitoitettu tiettyä tarkoitusta varten. Sovelluksesta riippuen operaatiovahvistimen valintaan vaikuttavat eri asiat ja varsinkin herkän jännitesignaalin tapauksessa vahvistimen valinta on suunnittelun kannalta merkittävä.

Vahvistimen suunnittelu riippuu koko järjestelmästä. Vahvistimen valintaan vaikuttavat liitettävän anturin ominaisuudet, käyttöympäristö sekä rajapinta vahvistimen lähdön ja analogista tietoa käsittelevän laitteiston välillä. Tässä työssä pyritään suunnittelemaan ja toteuttamaan vahvistin vaativiin olosuhteisiin, joissa lämpötila voi nousta lähelle 100 °C. Työssä tarkoituksena on myös hyödyntää anturin ominaisuuksia, kuten nopeaa vasteaikaa. Vahvistimen ja analogista tietoa käsittelevän laitteiston rajapintaan ei keskitytä, vaan vahvistimen kuormitus tapahtuu oskilloskoopilla.

3.1 Vahvistintyypit

Suuri osa operaatiovahvistimista on differentiaalisia bipolaarivahvistimia, jotka koostuvat bipolaaritransistoreista (BJT). Muita yleisiä operaatiovahvistintyyppisiä ovat differentiaaliset FET- ja CMOS-vahvistimet sekä chopper-stabiloidut vahvistimet. Niiden toiminta eroaa toisistaan ja niillä on valmistustavasta riippuen eri ominaisuudet. Vah-

vistimen tyyppin valinta riippuu halutusta bias-virrasta, offset-jännitteen ryöminnästä, DC-vahvistuksesta ja tuloimpedanssista. [19]

Bipolaarivahvistin on yleiskäyttöinen operaatiovahvistin, jota käytetään matalan kohinan vahvistimena pienen impedanssin lähteille laajalla lämpötila-alueella [19]. Bipolaarivahvistimella on monia etuja; se on yksinkertainen, sillä on hyvin pieni offset-jännite ja tulojen bias-virrat ovat sovitettuja eivätkä vaihtelee suuresti lämpötilan mukaan. Lisäksi lasertrimmauksella on mahdollista minimoida offset-jännitteen ryömintä lämpötilan suhteen. [20] Bipolaarivahvistimilla on usein alhaisin kohina [21].

FET-vahvistimet omaavat korkean tuloimpedanssin ja soveltuvat korkean impedanssin lähteille. Niiden bias-virta on pienempi kuin bipolaarivahvistimissa, mutta se on herkempi lämpötilan muutoksen suhteen [19]. Niiden tuloaste koostuu JFET -tyypin transistoreista ja vahvistus sekä lähtöaste on toteutettu BJT:llä. Niillä on yleensä suurin offset-jännite ja ryömintä lämpötilan suhteen. FET-vahvistimien DC-ominaisuudet ovat yleensä heikot, mutta niiden AC-ominaisuudet ovat hyvät. [22]

CMOS-operaatiovahvistimet koostuvat MOS-tyypin transistoreista. Niillä on yleensä pieni offset-jännite ja sen ryömintä [22], mutta niiden kohina on korkein [21].

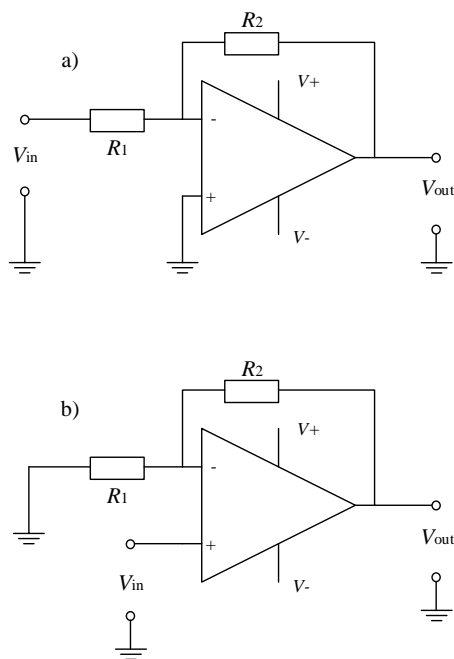
Chopper-stabiloiduilla vahvistimilla on pienin jännitteen ryömintä ja niillä saavutetaan suuri, jopa 150 dB, avoimen piirin vahvistus. Chopper-vahvistinta ei voi kuitenkaan käyttää differentiaalisena vahvistimena. Sitä käytetään integraattorina sekä pienen lämpötilaryöminän ja suuren tuloimpedanssin puskurivahvistimena. [19] Chopper-vahvistinten stabilointi tapahtuu sisäisen kytkävän piirin avulla, joka tasoittaa offset-jännitteen lähelle nollaa. Kytkeä aiheuttaa häiriöitä ja rajoittaa chopper-vahvistinten taajuuskaistan kytkentätaajuutta pienemmille taajuuksille. [20]

3.2 Topologiat

Lämpövuoanturi on jännitelähde, joten tarkastelussa keskitytään vain jännitevahvistimiin. Jännitevahvistimen tulo voi olla epäsymmetrinen tai differentiaalinen. Myös vahvistimen lähtö voi olla operaatiovahvistimesta riippuen epäsymmetrinen tai differentiaalinen. [23] Kaikki tarkastellut vahvistintopologiat ovat lähdeoltään epäsymmetrisiä.

3.2.1 Epäsymmetriset jännitevahvistimet

Epäsymmetrinen jännitevahvistin voidaan muodostaa invertoivana tai ei-invertoivana. Kuvassa 3.1 on esitetty vahvistimien rakenne.



Kuva 3.1. Epäsymmetristen jännitevahvistimien kytkennät, a) invertoiva ja b) ei-invertoiva vahvistin. V_{in} on vahvistimen tulo ja V_{out} lähtö.

Molemmissa topologioissa vahvistus asetetaan kahden ulkoisen vastuksen avulla. Invertoivan vahvistimen jännitevahvistus A_V saadaan yhtälöllä

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.1)$$

ja ei-invertoivan vahvistus yhtälöllä

$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.2)$$

joissa R_2 on takaisinkytkentävastus ja R_1 on tulovastus. [24]

Yhtälöstä 3.1 nähdään, että invertoiva vahvistin kääntää vahvistettavan signaalin polariteetin. Lisäksi invertoivan vahvistimen tuloimpedanssi määräytyy vastuksen R_1 mukaan. [24] Jännitevahvistimen tuloimpedanssin tulisi olla huomattavasti suurempi kuin lähteen impedanssin [25]. Tällöin vältetään signaalin vääristymiseltä, koska jännitejakoa ei tapahdu ja vahvistin ei kuormita lähdettä [26]. Lähteen impedanssin ollessa ohmien luokkaa tulee vahvistimen tuloimpedanssin olla kilo-ohmiluokkaa ja kilo-ohmien lähteillä megaohmiluokkaa. Tämä kasvattaa operaatiovahvistimen lähdön kohinaa, koska vastuksen terminen kohina riippuu vastuksen arvosta [27]. Suuri tulovastus johtaa suureen takaisinkytkentävastukseen, koska vahvistus riippuu niiden suhteesta. Suurella vahvistuksella tämä voi johtaa käytännössä mahdottoman kokoisen vastuksen valintaan [24]. Lisäksi takaisinkytkentävastuksen terminen kohina lisää lähdön kohinaa.

Ei-invertoiva vahvistin säilyttää vahvistettavan signaalin polariteetin ennallaan ja sen tuloimpedanssi on sama kuin operaatiovahvistimen tuloimpedanssi [24]. Tällöin ei-invertoivan vahvistimen kohdalla voidaan valita pienemmät vastukset ja vähentää näin vastusten termistä kohinaa.

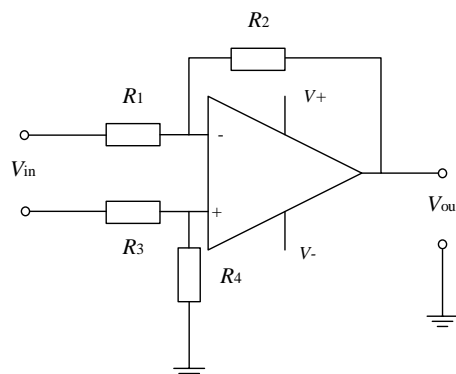
Vaikka operaatiovahvistimet suodattavat yhteismuotoista signaalia, epäsymmetrisissä vahvistimissa tulojen yhteismuotoinen signaali näkyy vahvistimen lähdössä. Tulojen

eroava signaali näkyy lähdössä vahvistimen vahvistuksella ja yhteismuotoinen signaali yksikkövahvistuksella vahvistettuna. [28] Yhteismuotoinen vaimennus (CMRR) on huono molempien epäsymmetristen vahvistimien kohdalla. Tästä syystä ne eivät sovellu sovelluksiin, joissa esiintyy yhteismuotoisia häiriöitä.

3.2.2 Differentiaalinen jännitevahvistin

Differentiaalinen jännitevahvistin vahvistaa operaatiovahvistimen tuloihin syötettyjen signaalien eroa ja samalla yhteismuotoiset signaalit eivät vahvistu. Pienen, millivolttien, jännitesignaalin tuottavien antureiden instrumentoinnissa käytetään usein differentiaalista jännitevahvistinta. Anturin johtimien ja maan välillä voi olla huomattavasti suurempi jännite-ero kuin anturin lähtösignaali, jolloin epäsymmetrisellä vahvistimella ei voi vahvistaa anturin lähtösignaalia halutusti. Differentiaalisella jännitevahvistimella kuitenkin vahvistetaan vain lähtösignaalia ja yhteismuotoinen jännite maan ja johtimien välillä ei vaikuta lähtösignaaliin. [24]

Differentiaalisen jännitevahvistimen rakenne muodostuu invertoivasta ja ei-invertoivasta vahvistimesta. Kuvassa 3.2 on esitetty differentiaalisen jännitevahvistimen rakenne.



Kuva 3.2. Differentiaalinen jännitevahvistin.

Invertoivan ja ei-invertoivan vahvistimen vahvistukset tulee valita samaksi, jotta yh-

teismuotoinen signaali vaimentuisi. Vahvistukset mitoitetaan yhtä suuriksi yhtälöllä

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.3)$$

missä R_1 on inverttoivan tulon tulovastus ja R_2 takaisinkytkentävastus sekä R_3 ei-inverttoivan tulon tulovastus ja R_4 vastus maan ja ei-inverttoivan tulon välillä. Yleensä valitaan R_1 ja R_3 sekä R_2 ja R_4 yhtä suuriksi keskenään. Tällöin differentiaalisen jännitevahvistimen vahvistus saadaan yhtälöllä 3.4. [24]

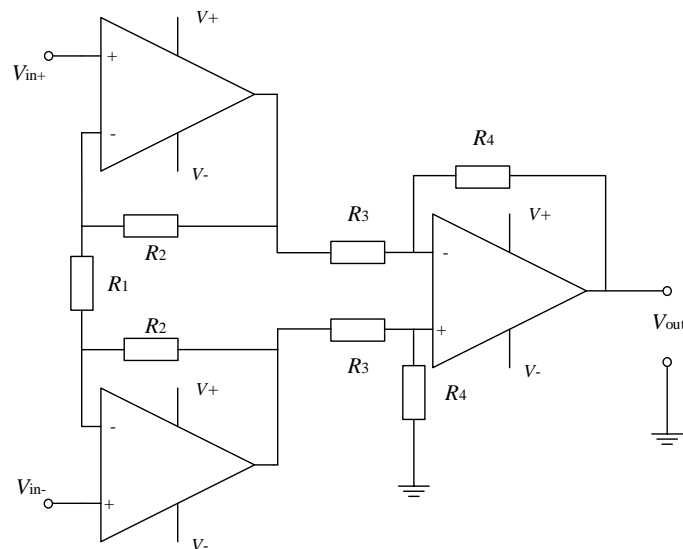
$$A_V = \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

Idealisesti yhteismuotoisen signaalin vaimennus on ääretön, mutta pienikin vastusten arvojen poikkeaminen toisistaan aiheuttaa, että osa yhteismuotoisesta signaalista näkyy vahvistimen lähdössä. Myös vahvistimen tuloimpedanssi vaikuttaa yhteismuotoisen signaalin vaimenemiseen. Kuten edellä mainittiin, vahvistimen tuloimpedanssi pitäisi olla huomattavasti lähteen impedanssia suurempi. Differentiaalisen vahvistimen tuloimpedanssi on tulovastusten summa, jolloin suuren tuloimpedanssin saavuttamiseksi niiden arvot on valittava suureksi. Kuten ei-inverttoivan vahvistimen tapauksessa, differentiaalisen jännitevahvistimen vastusten R_2 ja R_4 arvo voi kasvaa käytännössä liian suureksi vaadittavan vahvistuksen saavuttamiseksi. [24] Vastusten arvo vaikuttaa myös niissä syntyvään lämpökohinaan [27]. Lisäksi differentiaalisessa jännitevahvistimessa vahvistuksen muuttaminen on hankalaa. Vahvistuksen muuttamiseen tulee muuttaa aina kahta vastusta, jotta yhtälön 3.3 mukainen suhde säilyy. Molemmat näistä haitoista voidaan ratkaista instrumentointivahvistimella. [24]

3.2.3 Instrumentointivahvistin

Differentiaalisen jännitevahvistimen tuloimpedanssia voidaan kasvattaa puskuroimalla tuloja jänniteseuraajilla [24]. Instrumentointivahvistimen lähtöasteena toimivat ei-invertoivat vahvistimet toimivat korkean tuloimpedanssin puskureina lähtöasteessa olevalle differentiaalivahvistimelle. Näin signaalia voidaan myös vahvistaa ennen differentiaalista jännitevahvistinta. [28]

Instrumentointivahvistin koostuu usein kolmesta operaatiovahvistimesta. Myös kahden operaatiovahvistimen instrumentointivahvistin on mahdollinen. [28] Kuvassa 3.3 on esitetty instrumentointivahvistimen rakenne.



Kuva 3.3. Kolmella operaatiovahvistimella tehdyn instrumentointivahvistimen kytkentä. Tuloaste koostuu kahdesta ei-invertoivasta jännitevahvistimesta ja lähtöaste differentiaalisesta jännitevahvistimesta.

Tuloasteena toimivat ei-invertoivat vahvistimet vahvistavat differentiaalista signaalia yhtälön 3.2 mukaisesti ja yhteismuotoinen signaali vahvistuu yksikkövahvistuksella. Lähtöasteena toimiva differentiaalinen vahvistin taas vahvistaa ideaalisesti vain differentiaalista signaalia. [28] Instrumentointivahvistimen kokonaisvahvistus saadaan yhtälöllä 3.5.

$$A_V = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3.5)$$

Instrumentointivahvistimen vahvistusta voi muuttaa vaihtamalla vastuksen R_1 arvoa [24]. Valmistajat tarjoavat valmiita yhden piirin instrumentointivahvistimia, joissa sisäiset vastukset ovat tarkasti mitoitettu vastaamaan toisiaan. Tällöin päästään korkeisiin CMRR-arvoihin, yli 100 dB. Valmiiden piirien vahvistus voidaan usein valita ulkoisella vastuksella R_1 . [28]

3.3 Operaatiovahvistimen epäideaalisuudet

Koska operaatiovahvistimet eivät ole ideaalisia, on tärkeää tietää sovellukseen sopivan vahvistimen valintaan vaikuttavat parametrit. DC-parametrit edustavat sisäisiä virheitä, jotka johtuvat sisäisten komponenttien yhteensopimattomuudesta. Nämä virheet ovat aina näkyvissä, kun vahvistimeen on kytketty käyttöjännite, ja ne määrittävät kuinka hyvin vahvistimen lähtö vastaa ideaalista operaatiovahvistinmallia. [22] Lisäksi operaatiovahvistimella on rajallinen taajuuskaista, joka riippuu vahvistuksesta [24].

Lämpövuoanturin tapauksessa tarvitaan tuhansien vahvistus, jotta mikrovolttien jännitesignaali saadaan havaittavaksi, ja mahdollisimman suuri taajuuskaista, koska halutaan hyödyntää ja tutkia anturin ominaisuuksia. Lisäksi anturia käytetään eri ympäristöissä, joissa lämpötilat voivat vaihdella suuresti. Vahvistin ei saa myöskään tuottaa häiriötä, joka voi vaikuttaa mittaustarkkuuteen. Tällöin tärkeimpiä vahvistimen suunnitteluparametreja ovat offset-jännite sekä sen ryömintä lämpötilan suhteen, kohina ja GBWP, joka kertoo kaistanleveyden tietyllä vahvistuksella.

3.3.1 Offset-jännite

Offset-jännite määritellään jännitteenä, joka tulee asettaa operaatiovahvistimen tulojen välille, että vahvistimen lähtöjännite on nolla. Ideaalisesti tämän jännitteen pitäisi olla nolla, mutta todellisuudessa tulot ovat eri tasajännitteessä. [24] Offset-jännite voi olla polariteetiltaan positiivinen tai negatiivinen ja se vaihtelee jopa saman erän vahvistimien kesken [22].

Offset-jännite johtuu tulotransistoreiden ja sisäisten komponenttien epätarkkuuksista, jotka syntyvät yleensä piiytimen valmistusvaiheessa. Erot transistoreissa tai niiden vastuksissa aiheuttavat erisuuren bias-virran tulotransistoreissa, joka aiheuttaa jänniteeron operaatiovahvistimen tuloissa. Suljetussa piirissä offset-jännite vahvistuu ei-invertoivan kytkennän vahvistuksella. [22] Offset-jännite muuttuu lämpötilan mukaan, jonka takia sitä on vaikea kompensoida. Lisäksi komponentin ikääntyminen vaikuttaa offset-jännitteen suuruuteen. [20]

3.3.2 Kohina

Kohina on sattumanvarainen signaali, jonka hetkellistä arvoa ei voi ennustaa. Kohina voi muodostua operaatiovahvistimen sisäisesti ja siihen liittyvissä passiivisissa komponenteissa. Piiriin voi myös muodostua kohinaa ulkoisesta lähteestä. [29] Kohina on tärkeä suunnitteluparametri, koska se määrittää pienimmän tulosignaalin, jota voidaan vahvistaa ilman selvää signaalin laadun huonontumista. Kohina asettaa myös ylärajan vahvistimen vahvistukselle. Jos vahvistusta kasvatetaan rajattomasti, operaatiovahvistimen lähtöasteen transistorit ajautuvat aktiivialueen ulkopuolelle ja saturoituvat tuloasteessa vahvistetun kohinan takia. [23]

Operaatiovahvistimen sisäisesti ja sen oheiskomponenteissa syntyy viidenlaista kohinaa; rae-, lämpö-, flikkeri-, purske- ja vyörykohinaa. Raekohina johtuu satunnaisista

vaihtelusta varauksen kantajien liikkeessä johtimissa. Raekohina riippuu virrasta, mutta ei lämpötilasta. Lämpökohina aiheutuu elektronien liikkeestä ja törmäyksistä johtimissa, joka lisääntyy lämpötilan kasvaessa. Lämpökohina riippuu lämpötilasta, mutta ei virrasta. Vastuksien aiheuttama kohina johtuu lämpökohinasta ja on verrannollinen vastuksen arvoon ja lämpötilaan. Flickeri- eli $1/f$ -kohina johtuu useasta lähteestä, mutta pääosin se aiheutuu kidevirheistä. Purskekohina johtuu puolijohteiden epätäydellisyydestä ja raskasmetalli-ionien seostamisesta. Vyörykohina syntyy kun pn-liitos toimii estosuuntaisessa läpilyönnissä eli lähinnä zener-diodien tapauksessa. Suuren estosuuntaisen sähkökentän vaikutuksesta elektroneilla on tarpeeksi liike-energiaa muodostamaan elektroni-aukkoparin törmätessään kiderakenteen atomeihin. Törmäykset ovat sattumanvaraisia ja niistä muodostuu virtapulsseja, jotka ovat vastaavia kuin raekohinan, mutta voimakkaampia. Operaatiovahvistimien tapauksessa vyörykohinalla ei ole merkitystä, jos operaatiovahvistin ei sisällä zener-diodeja. [29]

Rae- ja lämpökohinan tehospektrit ovat tasaiset taajuuden suhteen. Flickeri- ja purskekohina ovat matalan taajuuden kohinaa. Flickerikohinan teho pienenee kun taajuus kasvaa ja se havaitaan varsinkin tasavirran tapauksessa. Sen tehospektri sisältää saman tehon jokaiselle dekadille taajuuden suhteen. Purskekohinan teho pienenee taajuuden kasvaessa. [29]

Operaatiovahvistimien datalehdissä kohina koostuu yleensä kahdesta osasta, $1/f$ -kohinasta eli pinkistä kohinasta ja tehospektriltään tasaisesta kohinasta eli valkoisesta kohinasta. Nämä muodostuvat kaikista edeltä mainituista kohinoista. Pinkki kohina on määräävä alemmilla taajuuksilla ja valkoinen kohina korkeammilla taajuuksilla. Valmistajien datalehdissä on kuvaaja, jossa on esitetty kohina taajuuden suhteen. Suunnittelun kannalta taajuus, jossa valkoinen kohina muuttuu määrääväksi on merkittävä. Jos vahvistimen taajuuskaista on suuri, noin kolme dekadia tätä taajuutta suurempi, voidaan pinkki kohina jättää huomiotta. Datalehdissä ilmoitetaan myös operaatiovahvistimen tulon kohinajännite ja -virta. Tulojännitteen kohina esitetään jännitelähteenä joka on sarjassa ei-invertoivan tulon kanssa ja tulovirran kohina esitetään tulojen ja

maan välisillä virtalähteillä. Pienillä lähteen tuloimpedansseilla tulojännitteen kohina on merkitsevä. Tulon kohina vahvistuu ei-invertoivan vahvistimen vahvistuksella. [29]

Ulkoiset lähteet aiheuttavat myös kohinaa järjestelmään. Kohina voi siirtyä johtumalla tai säteilemällä muista piireistä. Kohinaa voi johtua esimerkiksi maapotentiaalin tai käyttöjännitteen kautta. Säteileviä kohinalähteitä ovat esimerkiksi hakkurit, puhelimet, radiot ja valaistus. Radiotaajuinen interferenssi voi aiheuttaa huomattavan kohinan läh- töön. [29]

3.3.3 Rajallinen päästökaista

Operaatiovahvistimen epäideaalisuuksista johtuen sen differentiaalinen avoimen pii- rin vahvistus on äärellinen ja pienenee taajuuden suhteen. Sisäisesti kompensoitujen operaatiovahvistimien vahvistus laskee yleensä 20 dB dekadilla, joka johtuu vahvistin- piirin sisäisestä ensimmäisen asteen suodattimesta. Suodatin on muodostettu konden- saattorilla, joka on samalla piirillä vahvistimen kanssa. Sen tarkoituksena on stabiloida vahvistin. [24]

Valmistajien datalehdissä rajallinen päästökaista kuvataan GBWP:llä. Se kertoo pääs- tökaistan ja vahvistuksen tulon, ja sen avulla voi määrittää operaatiovahvistimen kais- tanleveyden tietyllä vahvistuksella tai päinvastoin. GBWP on vakio jännitevahvistimil- le. [29]

3.4 Suunnitteluparametrien määrittäminen ja vahvistinten testaus

Ennen lopullisen mittalaitteen toteutusta määritettiin suunnitteluparametrit. Paramet- rien avulla valittiin testattavat vahvistintopologiat ja -piirit, joilla tehtiin alustavat mit- taukset. Mittausten perusteella valittiin lopullinen vahvistimen toteutustapa. Testatta-

viksi vahvistimien topologioiksi valittiin differentiaalinen jännitevahvistin ja instrumentointivahvistin, koska anturilta mitattava jännite on hyvin matala ja voi sisältää yhteismuotoista häiriötä. Epäsymmetrisellä vahvistimella yhteismuotoinen häiriö voi vaikuttaa mittaukseen pienen jännitesignaalin tapauksessa. Vahvistimen lähtö valittiin epäsymmetriseksi.

Vahvistimen tuloimpedanssi vaikuttaa mittaukseen, mutta anturin impedanssi on korkeintaan 1Ω . Tällöin vahvistimen tulossa ei tapahdu mittaukseen vaikuttavaa jännitejakoa kuin alle kilo-ohmien tuloimpedansseilla. Tuhansien vahvistuksellakin differentiaalisen jännitevahvistimen tulovastukset voidaan mitoittaa niin, että vahvistimen tuloimpedanssi ei muodosta jännitejakoa anturin kanssa, ja kuitenkin takaisinkytkentävastus on kohtuullinen.

Anturin on raportoitu kykenevän nanosekuntiluokan vasteaikoihin [3] ja sen tuottama jännitesignaali on korkeintaan 1 mV. Anturin koko kaistanleveyden hyödyntämiseksi tulisi käyttää korkeakaistaisia vahvistimia, joiden GBWP pitäisi olla satoja gigahertsejä. Korkeakaistaisten vahvistinten DC-, offset- ja lämpötilaryömintäominaisuudet eivät sovellu korkeassa lämpötilassa tapahtuviin mittauksiin. Tästä syystä vahvistimen kaistaksi valittiin 350 kHz kompromissina vahvistimien ja anturin ominaisuuksien väliltä. 350 kHz kaistanleveydellä pystytään mittaamaan 1 μ s vasteaikoja. Vahvistimen vahvistukseksi valittiin 2200 eli 66,8 dB, jolloin $\pm 2,5$ V -käyttöjännitteellä saadaan koko jännitealue käyttöön. $\pm 2,5$ V -käyttöjännite tarvitaan Niukkanen [1] käyttämiin vahvistimiin, joita testataan myös tässä työssä.

Suunnitteluparametreiksi valittiin offset-jännite ja sen ryömintä lämpötilan suhteen, vahvistus, kaistanleveys sekä kohina. Suunnitteluparametrit ovat:

- Vahvistimen tulo differentiaalinen, lähtö epäsymmetrinen
- Offset-jännite alle ± 50 mV
- Offset-jännitteen lämpötilaryömintä alle ± 1 mV/ $^{\circ}$ C

- Vahvistus 2200 eli 66,8 dB
- Kaistanleveys 350 kHz
- Kohina alle 10 mV
- Komponenteilla vähintään 100 °C lämpötilakesto

Tällöin anturilta tuleva 1 mV jännitesignaali ei saturoidu vahvistettuna ja lämpötilavaihtelut eivät vaikuta suuresti mittaukseen. Kohinan ollessa 10 mV, se vastaa anturilta 5 μ V muutosta jännitesignaalisissa.

66,8 dB vahvistuksella ja 350 kHz kaistalla vahvistimen GBWP:n tulisi olla vähintään 770 MHz. Näin korkean kaistan vahvistimilla offset-jännite ja sen ryömintä sekä kohina ovat suunnitteluparametreja suuremmat, joten vahvistinkytkentä pitää rakentaa kahdesta asteesta. Ensimmäinen aste sisältää differentiaalisen vahvistimen tai instrumentointivahvistimen. Toisessa asteessa vahvistetaan ensimmäisen asteen lähtösignaalia tarvittavalla vahvistuksella. Jälkimmäisen vahvistimen topologiaksi valittiin ei-invertoiva vahvistin, jolloin signaalin polariteetti ei muutu ja vahvistimella on megaohmien tuloimpedanssi. Lisäksi ei-invertoivaan vahvistimeen voidaan asettaa pienet vastukset, jolloin niiden lämpökohina ei vaikuta mittaukseen.

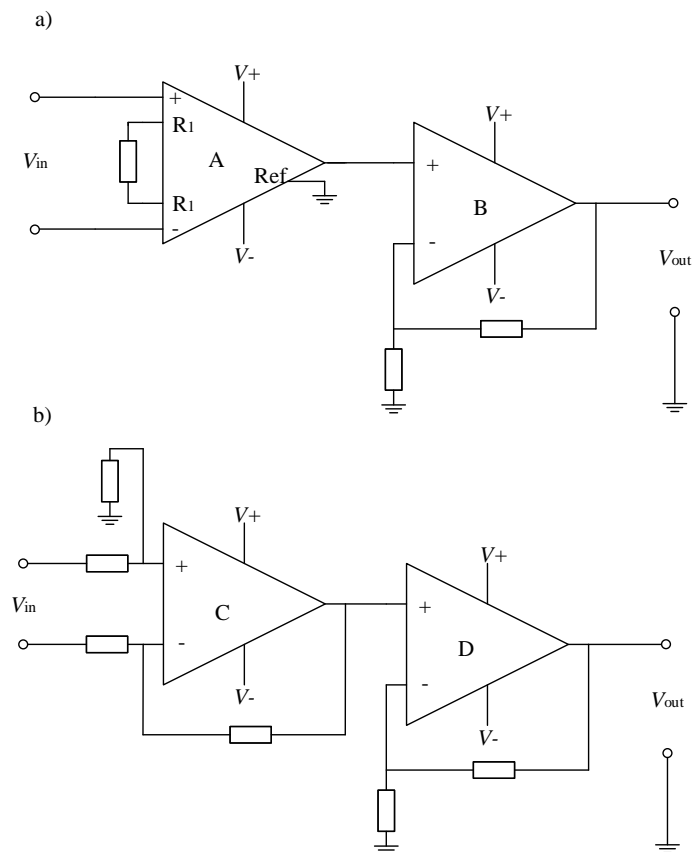
Suunnitteluparametrien perusteella testattaviksi vahvistinpiireiksi valittiin taulukossa 3.1 esitetyt vahvistimet. Taulukossa on esitetty tärkeimmät valintaan vaikuttavat ominaisuudet.

Taulukko 3.1. Työssä testattavat vahvistimet. Arvot ovat datalehdissä annetut tyypilliset arvot ja maksimiarvot. V_{OS} on tulon offset-jännite ja TCV_{OS} on sen ryömintä lämpötilan suhteen, e_n on tulon kohina taajuuden neliön suhteen sekä $GBWP$ on taajuuden ja vahvistuksen tulo. [30][31][32][33][34][35][36][37]

	MCP6N16	AD8429	MAX4488	LMP2022	LMP7732	ISL28248	ADA4841	AD8512
V_{OS} [μ V]	0	-	70	-0,9	9	0	40	80
$V_{OS,max}$ [μ V]	17	150	750	5	600	2	300	800
TCV_{OS} [μ V/°C]	-	0,1	0,3	0,001	0,5	0,03	1	0,9
$TCV_{OS,max}$ [μ V/°C]	0,06	1	6	0,02	5,5	-	-	5
e_n [nV/ \sqrt{Hz}]	32	1	4,5	11	3	28	2,1	8
$GBWP$ [MHz]	0,19	15	42	5	21	4,5	80	8

Vahvistinpiireistä MCP6N16 ja AD8429 ovat instrumentointivahvistimia ja loput operaatiovahvistimia. Chopper-vahvistimet MCP6N16 ja LMP2022 otettiin mukaan testiin, koska niillä saavutetaan parhaat lämpötilaominaisuudet, ja lisäksi Niukkanen [1] käytti LMP2022-piiriä tutkimuksessaan. Chopper-vahvistimen sisäinen kytkeminen aiheuttaa kuitenkin häiriötä korkeammille taajuuksille ja vahvistimet eivät sovellu käytettäväksi lämpövuotaturin kanssa. Lisäksi ne eivät sovellu differentiaalisiksi vahvistimeksi eikä pienille impedansseille.

Eri vahvistinkytkentöjen toimintaa mitattiin koekytkennöillä, jotka muodostettiin instrumentointivahvistimella ja ei-invertoivalla vahvistimella sekä differentiaalisella ja ei-invertoivalla jännitevahvistimilla. Koekytkennät on esitetty kuvassa 3.4.



Kuva 3.4. Koekytkennät eri vahvistinpiirien testaamiseen. a) instrumentointivahvistimen (A) ja ei-invertoivan vahvistimen (B) kytkentä, b) differentiaalisen jännitevahvistimen (C) ja ei-invertoivan vahvistimen (D) kytkentä.

Instrumentointivahvistimena, kuvassa vahvistin A, käytettiin AD8429-piiriä. Toista instrumentointivahvistinta MCP6N16 ei käytetty, koska sen havaittiin aiheuttavan kytkentähäiriötä suunniteltua päästökaistaa matalammille taajuuksille. AD8429-piirin vahvistukseksi mitoitettiin 600, jolloin sen kaistanleveys on 350 kHz. Ensimmäisen koeyhteyksien ei-invertoiva vahvistin, kuvan vahvistin B, muodostettiin ADA4841- ja AD8512-piireillä, joiden käyttöjännite soveltuu käytettäväksi AD8429-piirin kanssa. Sen vahvistukseksi mitoitettiin 3,56, jolloin kytkennän kokonaisvahvistus on 2136. Toinen koeyhteyksien vahvistimet C ja D, muodostettiin taulukossa 3.1 esitetyillä operaatiovahvistimilla. LMP2022-piiriä ei kuitenkaan käytetty, koska sen havaittiin aiheuttavan kytkentähäiriötä päästökaistalle. Vahvistukseksi molemmille vahvistimille mitoitettiin 47, jolloin kokonaisvahvistus on 2209. Molempien koeyhteyksien vahvistukset ovat lähellä suunniteltua kokonaisvahvistusta.

Eri vahvistinpiireillä muodostettujen koeyhteyksien kohinat ja offset-jännitteet mitattiin oikosuljetulla tulolla. Taulukossa 3.2 on esitetty mitatut kohinat ja offset-jännitteet huoneenlämmössä eri vahvistinpiireillä muodostetuilla koeyhteyksillä.

Taulukko 3.2. Kuvassa 3.4 esitettyjen vahvistinkytkentöjen offset-jännite ja kohina. Taulukon kaksi ensimmäistä ovat instrumentointivahvistimen ja ei-invertoivan vahvistimen kytkentöjen mitatut arvot. Viisi viimeistä ovat operaatiovahvistimilla muodostettujen differentiaalisen ja ei-invertoivan jännitevahvistimen kytkentöjen mitatut arvot.

	AD8429 ja ADA4841	AD8429 ja AD8512	MAX4488	LMP7732	ISL28248	ADA4841	AD8512
V_{OS} [mV]	-51,2	-51,9	29,6	34,0	970,6	-129,7	-176,2
V_n [mV]	26	24	93	52	133	74	64

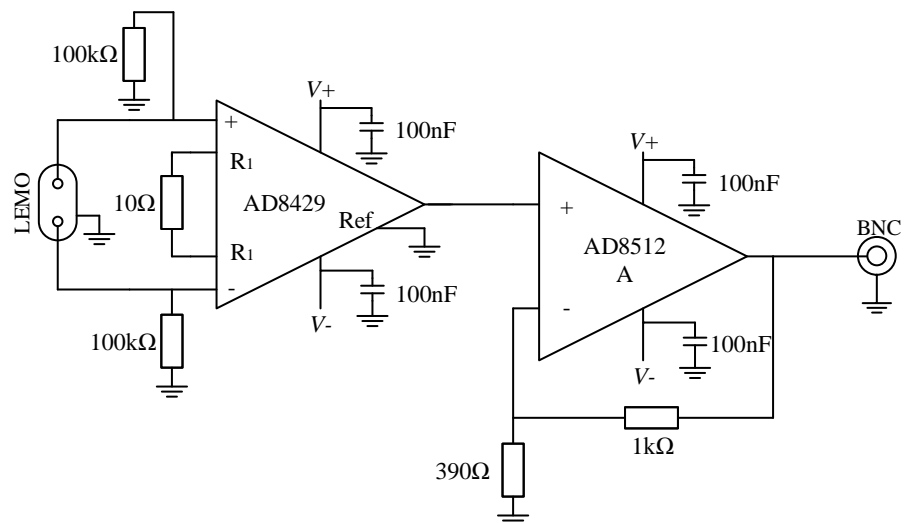
Mittauksien perusteella instrumentointivahvistimella muodostettu kytkentä toimii paremmin kuin differentiaalisella jännitevahvistimella muodostettu kytkentä. Offset-jännite on MAX4488- ja LMP7732-operaatiovahvistimilla tehdyllä kytkennällä pienempi kuin instrumentointivahvistimella AD8429 tehdyllä, mutta kohina on paljon suurempi kaikilla differentiaalisilla vahvistimilla. Tästä syystä vahvistimen toteutustavaksi valittiin instrumentointivahvistimen ja ei-invertoivan vahvistimen kytkentä.

Datalehtien arvojen perusteella ADA4841- ja AD8512-vahvistimilla ei ole suurta eroa.

Valmistajan arvojen mukaan ADA4841:n kohina ja offset-jännite ovat pienempiä kuin AD8512:n, mutta mittausten perusteella AD8512:n kohina on pienempi. GBWP on molemmilla riittävä ja offset-jännitteen ryömintä on lähellä toisiaan. Näissä kytkennöissä instrumentointivahvistimen ominaisuudet määräävät suurimmalta osin vahvistimen toiminnan. Lopulliseen vahvistinkytkentään valittiin AD8512, koska se pystyy ajamaan 1000 pF kapasitiivista kuormaa [37], kun taas ADA4841 pystyy ajamaan 10 pF kapasitiivista kuormaa [36]. Mittalaitetta tullaan käyttämään eri sovelluksissa, joiden vahvistimen lähdölle asettama kuorma voi vaihdella. AD8512:n kyky ajaa suurempaa kapasitiivista kuormaa takaa, että mittalaite toimii varmemmin myös tilanteissa, joissa sovelluksen kuorma ei vastaa tässä tutkimuksessa käytetyn oskilloskoopin asettamaa kuormaa. Kapasitiivisena kuormana voi toimia esimerkiksi testattua pidempi johto.

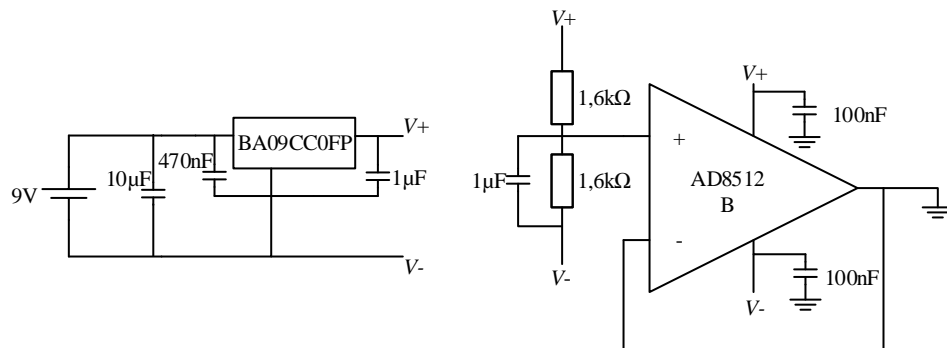
4 Koelaitteen toteutus ja mittaukset

Mittausten perusteella vahvistinkytkenstä tehtiin versio, joka rakennettiin koepiirilevylle. Lopullinen piirilevy valmistetaan, kun vahvistimen toiminta ja mahdolliset muutostarpeet on tutkittu lopullisessa käyttöympäristössä. Vahvistinpiireiksi valittiin instrumentointivahvistin AD8429 ja operaatiovahvistin AD8512. Instrumentointivahvistimen vahvistus on 600, joka saadaan valitsemalla vahvistusvastuksen arvoksi $10\ \Omega$ [31]. Ei-invertoivan vahvistimen takaisinkytkentävastuksen arvoksi valittiin $1\ \text{k}\Omega$ ja toisen vastuksen arvoksi $390\ \Omega$, jolloin sen vahvistus on yhtälön 3.2 mukaan 3,56. Tällöin kokonaisvahvistus on 2136 eli 66,6 dB, joka on lähellä suunniteltua 66,8 dB. Instrumentointivahvistimen -3 dB -kaistanleveydeksi mitoitettiin suunnitteluparametrien mukaan 350 kHz, joka vastaa AD8429-piirin kaistanleveyttä valitulla vahvistuksella. Instrumentointivahvistimen vahvistus mitoitettiin mahdollisimman suureksi, jotta saavutetaan mahdollisimman suuri CMRR [28]. Vahvistuksella 600 AD8429-piirin CMRR on yli 130 dB [31]. Instrumentointivahvistimen tulot kytkettiin $100\ \text{k}\Omega$ vastuksilla referenssipisteeseen, jolloin tulojen bias-virrälle on kulkureitti [28]. Kuvassa 4.1 on esitetty lopullinen vahvistinkytkenä.



Kuva 4.1. Toteutetun vahvistimen kytkentäkaavio.

Vahvistimen tehonsyöttö tapahtuu 9 V -paristolla, jolloin vältetään sähkönverkon aiheuttamilta häiriöiltä. Pariston jännite reguloidaan lineaariregulaattorilla BA09CC0FP, joka valittiin sen pienen jännitteen aleneman (300 mV) takia. Lisäksi se kykenee tuottamaan 1 A virtaa ja sen toimintalämpötila yltää 125 °C asti. [38] Lineaariregulaattori valittiin, koska hakkurista muodostuu kytkentähäiriötä, joka voi vaikuttaa mittaukseen. Vahvistimet tarvitsevat kaksipuoleisen käyttöjännitteen [31][37], jonka takia tulee muodostaa referenssipiste, maapotentiaali. Referenssipiste valittiin käyttöjännitteen puolivälistä. Se tuotetaan AD8512-piirin toisella vahvistinasteella, jolla puskuroidaan 1,6 kΩ vastuksilla tehtyä jännitejakoa. Puskurointi muuntaa vastusten korkean impedanssin lähes nolllaksi, jolloin vastukset eivät kuormita kytkentää [28]. Vastukset valittiin niin, että virran kulutus ei lisääny huomattavasti koko piirin virran kulutukseen nähden. Samalla vastusten arvot pyrittiin pitämään mahdollisimman pieninä, jotta niiden terminen kohina pysyisi mahdollisimman pienenä. Kuvassa 4.2 on esitetty vahvistimen tehonsyöttö ja referenssipisteen muodostaminen.



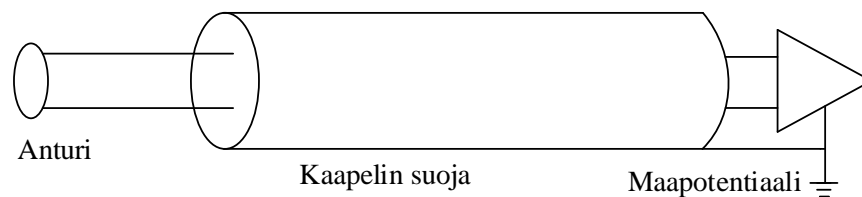
Kuva 4.2. Toteutetun vahvistimen tehonsyötön ja referenssipisteen muodostaminen.

AD8512 soveltuu referenssipisteen tuottamiseen hyvin, koska sen kohina on pieni ja se on stabiili yksikkövahvistuksella [37]. Toinen vaihtoehto referenssipisteen tuottamiseksi olisi 4-5 V -jänniteregulaattori, mutta sen tuottama jännitetaso ei muutu, jos pariston jännite laskee. Tällöin vahvistimen lähtö voi leikkaantua, kun vahvistimen käyttöjännitteen positiivinen puoli referenssitason nähden laskee. Lisäksi pienen kohinan operaatiovahvistin tuottaa vähemmän kohinaa kuin regulaattori. Esimerkiksi sovelluk-

seen sopiva LD1117-sarjan 5 V -regulaattori tuottaa $100\ \mu\text{V}$ kohinan [39], kun taas AD8512 tuottaa yksikkövahvistuksella samalla tarkasteltavalla taajuusalueella $1\ \mu\text{V}$ kohinan [37].

Tasaisen käyttöjännitteen takaamiseksi kytkentään lisätään suodatuskondensaattoreita. Korkeataajuisten häiriöiden suodattamiseksi pieni, alle $0,1\ \mu\text{F}$, kondensaattori tulisi sijoittaa mahdollisimman lähelle jokaisen vahvistinpiirin käyttöjännitenastoja [28]. Lisäksi regulaattori tarvitsee kondensaattorit toimiakseen oikein [38]. Kytkentään lisättiin myös suurempi, $10\ \mu\text{F}$, kondensaattori, joka pystyy tasaamaan hitaampia jännitteen vaihteluja. Käyttöympäristön takia ei voida käyttää elektrolyyttikondensaattoreita, koska ne eivät sovellu käytettäväksi korkeissa lämpötiloissa. Niillä kuitenkin saataisiin suurempi kondensaattorin arvo, joka tasaisi hitaita jännitteen vaihteluja. Kokomittauselektronikan kytkentäkaavio on esitetty liitteessä I.

Signaalin siirto on suunniteltava huolella varsinkin pienen jännitesignaalin tapauksessa. Pitkät ja suojaamattomat johdot keräävät ympäristöstä häiriöitä ja myös anturin kytkentä referenssijännitteeseen voi aiheuttaa virtasilmukoita ja kytkeytyviä häiriöitä [40]. Kuvassa 4.3 on esitetty signaalin siirto.



Kuva 4.3. Anturin signaalin siirto ja suojaus. Suojan sisällä johtimet ovat kierretty. Muokattu [27]

Tässä työssä anturi on kelluva eli sitä ei ole kytketty referenssijännitteeseen. Signaali siirretään kierretyssä parikaapelissa, joka on suojattu johtavalla kuorella. Johtimien kiertäminen ja suojaaminen vähentää johtimiin kytkeytyvää häiriötä. Suoja on maa-

doitettu vain vahvistimen päästä, koska tällöin vältytään maalenkin muodostumiselta, mikä parantaa kaapelin suojausta. [40] Johtimiin kytkeytyvät häiriöt ovat tässä tapauksessa yhteismuotoisia [27] ja vaimenevat differentiaalisessa jännitevahvistuksessa.

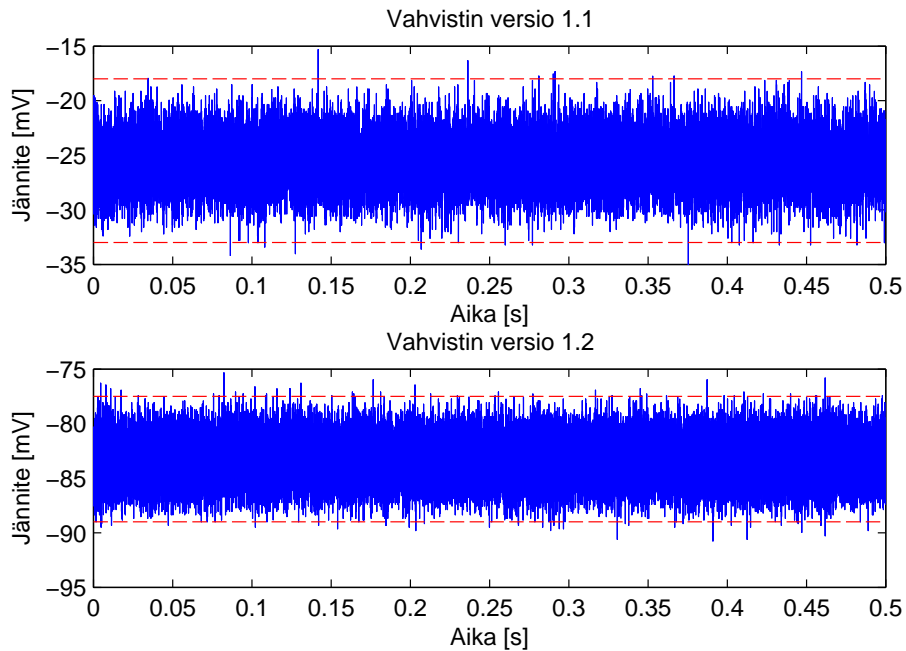
Ulkoisista lähteistä aiheutuvia häiriöitä voidaan estää suojaamalla elektroniikka metallisella kotelolla [41]. Molempien vahvistimien referenssipotentiaali kytkettiin piirilevyn maahan, josta maapiste kytkettiin koteloon yhdestä pisteestä lähdön liittimestä. Tällöin kotelon sisälle ei pääse muodostumaan maalenkkiä. Anturin liittäminen ja vahvistimen lähtö vaativat liittimet. Oikeanlaiset liittimet suojaavat häiriöiltä, jotka voivat kulkeutua kotelon sisälle liittimen reiästä. Lisäksi liittimiä tarvitaan, jotta johdot voidaan kiinnittää tukevasti. [41] Työssä käytettiin anturin kytkemiseksi LEMO-liittimiä, jotka soveltuvat kierretylle parikaapelille, korkean taajuuden mittauksiin ja häiriöiltä suojautumiseen [42]. Lähdön liittimenä toimii BNC-liitin, joka soveltuu referenssipisteeseen verrattavan signaalin siirtoon. Lisäksi BNC-liitin on yleinen muun muassa oskilloskoopeissa käytetty liitin. Kuvassa 4.4 on esitetty toteutettu mittalaite.



Kuva 4.4. Lopullinen laite. Metallinen ulkokuori ja liittimet suojaavat mittauselektroniikkaa kytkeytyviltä häiriöiltä.

Vahvistinkytkennästä tehtiin kaksi versiota. Ensimmäisen version referenssjännite tehtiin jänniteregulaattorilla, toisen operaatiovahvistimella. Lisäksi toiseen versioon pa-

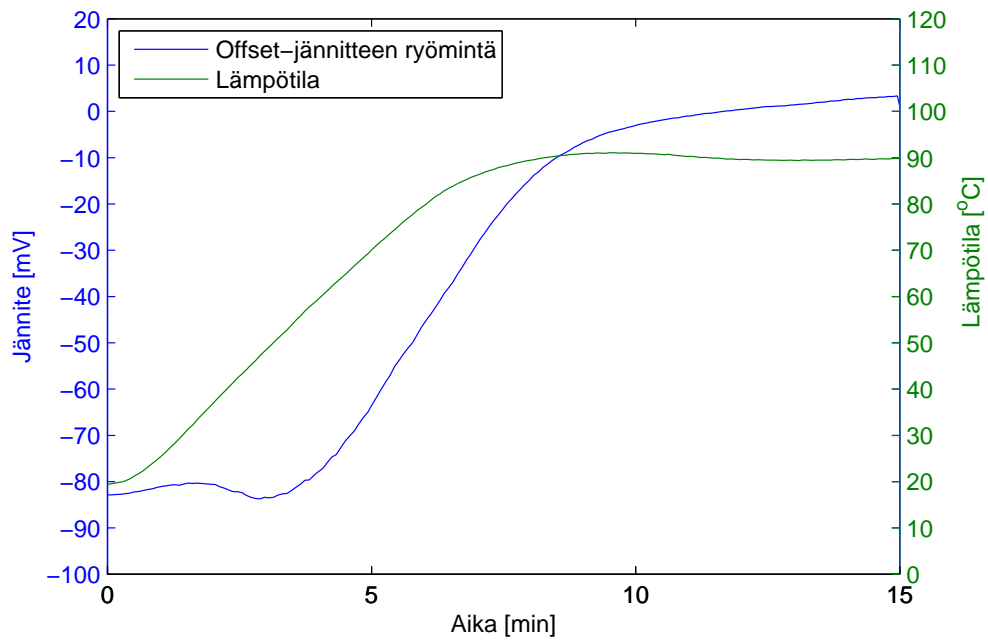
rannettiin komponenttien asettelua koekytkentälevylle. Ensimmäisen version kohina oli suurempi kuin toisen, mutta offset-jännite pienempi. Kuvassa 4.5 on esitetty molempien versioiden mitatut kohinat ja offset-jännitteet.



Kuva 4.5. Vahvistimien eri versioiden mitatut kohinat ja offset-jännitteet. Ylempänä ensimmäinen versio ja alempana toinen. Kuvaaajien y-akselien jänniteskaalat ovat samat.

Kuvasta nähdään, että ensimmäisen version offset-jännite on noin -25 mV ja toisen version -83 mV. Ensimmäisen version kohina on amplitudiltaan noin 7,5 mV, kun taas toisessa versiossa se on alle 6 mV. Offset-jännitteen suuruus ei kuitenkaan ole ratkaiseva, vaan sen ryömintä. Tästä syystä loput mittaukset on tehty vähemmän kohinaa sisältävällä toisella versiolla. Ryöminnän voi olettaa olevan samaa suuruusluokkaa molemmilla versioilla, koska käytössä on samat vahvistinpiirit. Offset-jännitteen ryömintää tutkittiin lämpökaapissa ja mittaus on esitetty kuvassa 4.6.

Mittaus ei sisällä pitkää tasoittumista loppulämpötilaan, koska mittauksissa ilmeni, että käytetty paristo ei kestä korkeita lämpötiloja. Mittauksen perusteella voidaan kuitenkin päätellä, että offset-jännitteen ryömintä on positiivinen lämpötilan kasvaessa ja sen kerroin on noin $1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Offset-jännitteen ryömintä on suunnitteluparametrien mukainen ja se vastaa 1°C käyttölämpötilan muutoksessa noin kymmenesosaa kohinasta.

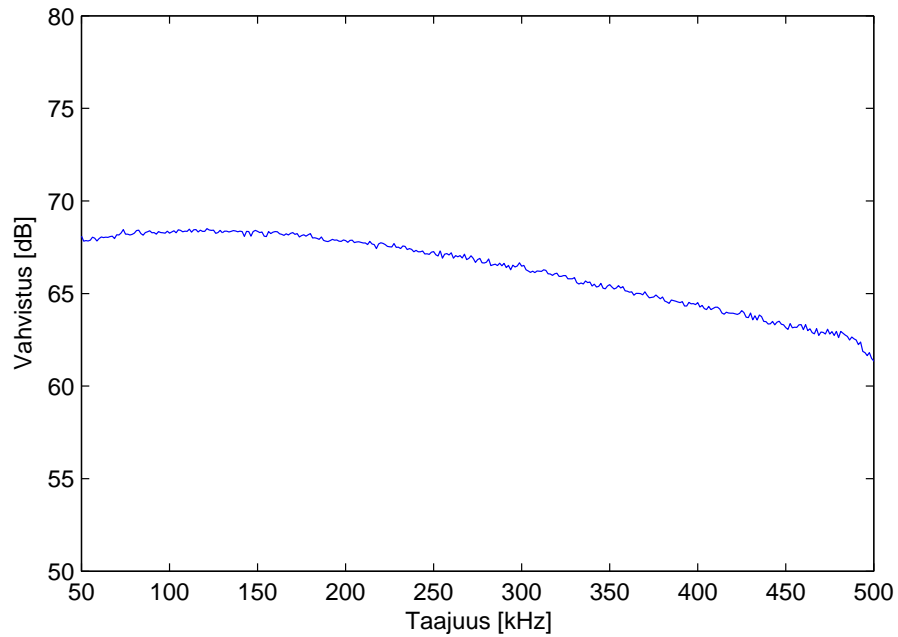


Kuva 4.6. Vahvistimen offset-jännitteen ryömintä lämpötilan suhteen.

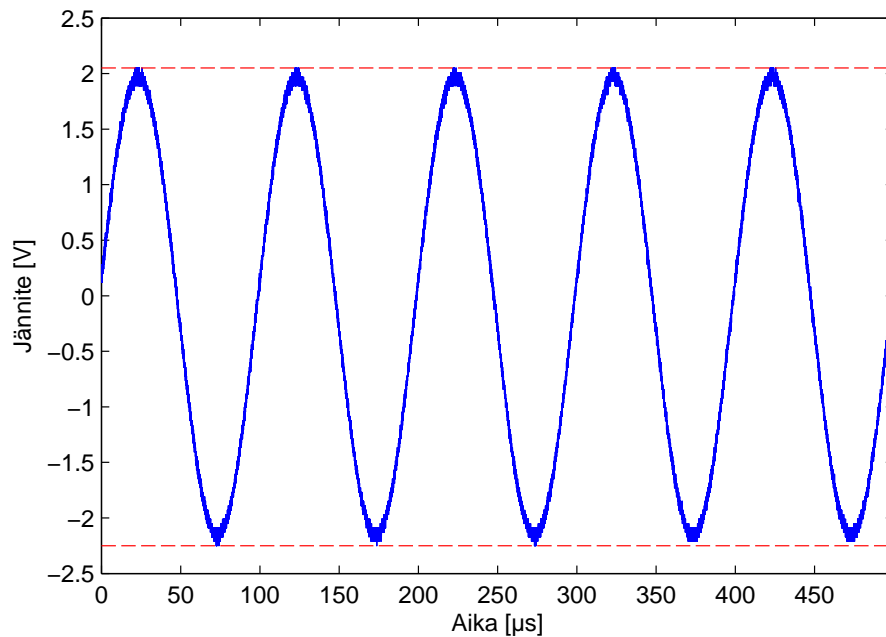
Vahvistinkytkennän vahvistus ja taajuuskaista mitattiin HP4200-taajuusanalysaattorilla. Taajuusanalysaattorista syötettiin $0,7 \text{ mV}_{\text{RMS}}$ signaalia ja vahvistimen lähtöä mitattiin differentiaalimitta-anturilla N2793A, koska vahvistimen tulon ja lähdön referenssipiste ei voi olla sama. Kuvassa 4.7 on esitetty mitattu taajuusvaste. Mitta-anturin vaimennus (20 dB) on huomioitu kuvassa.

Taajuusvasteesta nähdään, että vahvistinkytkennän vahvistus on hieman suunniteltua suurempi, maksimissaan noin 68 dB. 350 kHz vahvistus on noin 65 dB eli -3 dB -rajataajuus vastaa suunniteltua. Taajuusvastetta tutkittiin myös pienemmällä taajuusalueella (0-10 kHz), josta selvisi, että vahvistimen vahvistus on vakio ja vastaa samaa vahvistusta kuin taajuusvasteen päästökaistan vahvistus. Vahvistimen toimintaa mitattiin myös syöttämällä signaaligeneraattorista signaalia, jonka taajuus oli 10 kHz ja 350 kHz ja amplitudi 1 mV. Mittaukset on esitetty kuvissa 4.8 ja 4.9.

Kuvista nähdään, että päästökaistan vahvistus on 2150 eli 66,6 dB ja -3 dB -rajataajuuden vahvistus 1400 eli 62,9 dB. Vahvistukset eroavat taajuusanalysaattorilla mitatusta taajuusvasteesta. Tämä voi johtua hyvin pienen tulojännitteen tarkkuudesta mittauk-

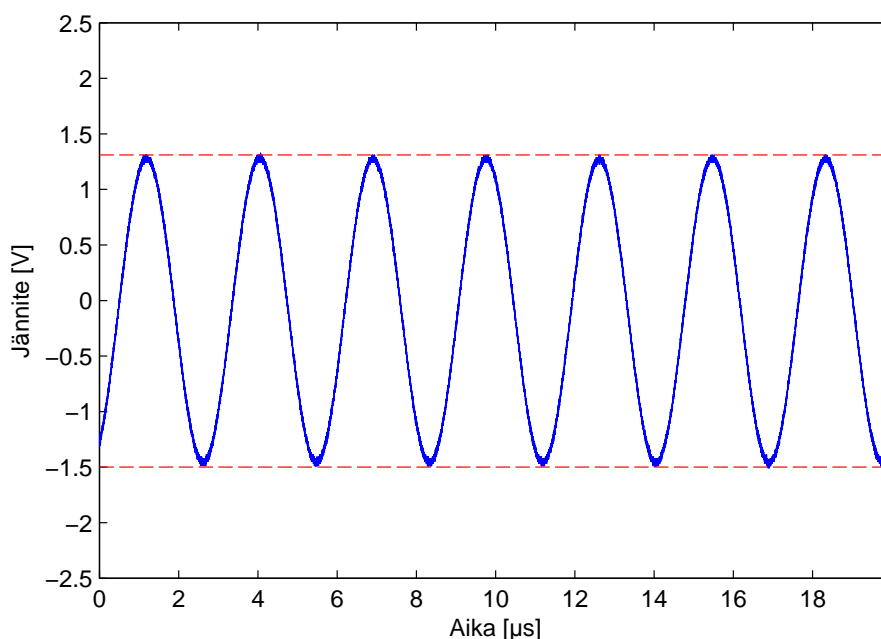


Kuva 4.7. Vahvistimen mitattu taajuusvaste. Vahvistus on hieman suunniteltua suurempi, mutta -3 dB -rajataajuus on suunniteltu 350 kHz.



Kuva 4.8. Vahvistimen lähdöstä mitattu signaali, kun tulosignaalin jännitteen amplitudi on 1 mV ja taajuus 10 kHz. Vahvistetun signaalin amplitudi on 2,15 V ja taajuus 10 kHz.

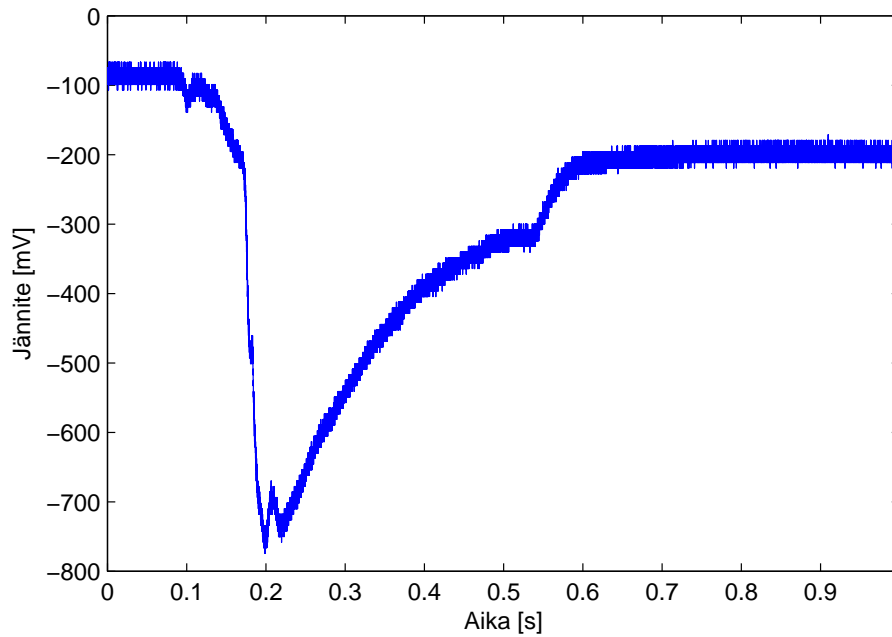
sisä. Signaaligeneraattorilla syötetyn signaalin tapauksessa mittaustulokset vastaavat lähes mitoitettua, kuitenkin 350 kHz taajuus on vaimentunut 3,7 dB.



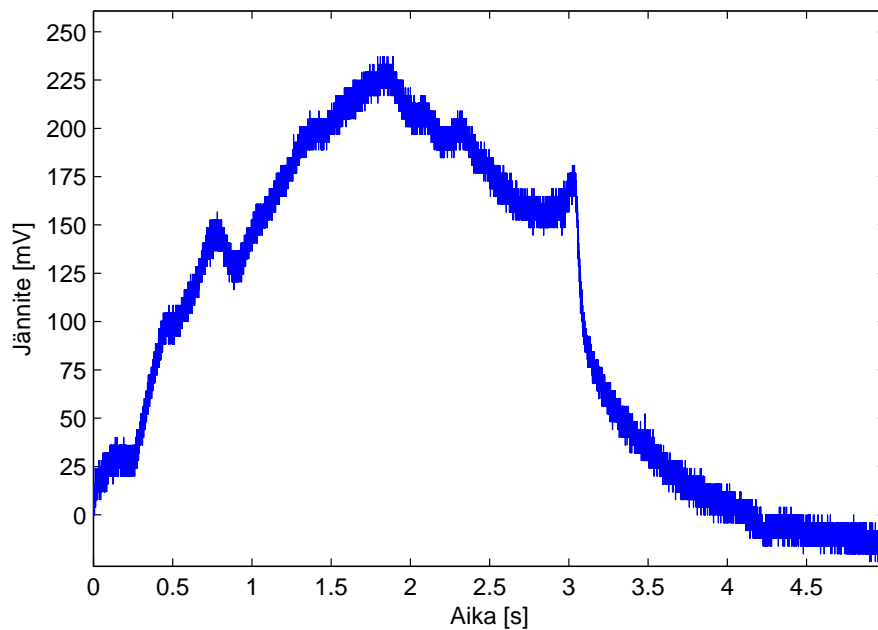
Kuva 4.9. Vahvistimen lähdöstä mitattu signaali, kun tulosignaalin jännitteen amplitudi on 1 mV ja taajuus 350 kHz. Vahvistetun signaalin amplitudi on 1,4 V ja taajuus 350 kHz.

Anturin reagoitua keinoitekoisiin herätteisiin tutkittiin jääspraylla, tupakansytyttimellä sekä valokuvaussalaman tuottamalla lämpösäteilyllä. Kuvissa 4.10, 4.11 ja 4.12 on esitetty mittaukset. Lisäksi vahvistimen tuottaman kohinan suuruutta mitattavaan lämpövuohon testattiin lämmittämällä anturia sormella, joka oli noin 10°C lämpimämpi kuin anturin toinen puoli. Mittaus on esitetty kuvassa 4.13.

Kuvista 4.10 ja 4.11 nähdään, että anturi tuottaa suuremman vasteen jääspraylla kuin tupakansytyttimellä. Tupakansytyttimen liekin aiheuttama lämpövuoto kuitenkin pitäisi olla suurempi kuin jääsprayn. Mittauksiin voi vaikuttaa varsinkin tupakansytyttimen tapauksessa anturin kiinnitysmateriaalin lämpiäminen, koska liekin aiheuttama lämpö leviää anturin ympärille. Tällöin anturin puolien lämpötilaero, ja samalla lämpövuoto, pienenee. Jääspray pystyttiin kohdentamaan tarkemmin pelkästään anturin toiseen pintaan. Lisäksi eri antureilla mitatessa havaittiin, että reagoitua kylmään ja kuumaan vaihteli. Anturit ovat tässä vaiheessa hanketta vielä yksittäiskappaleita, joiden ominaisuudet vaihtelevat.

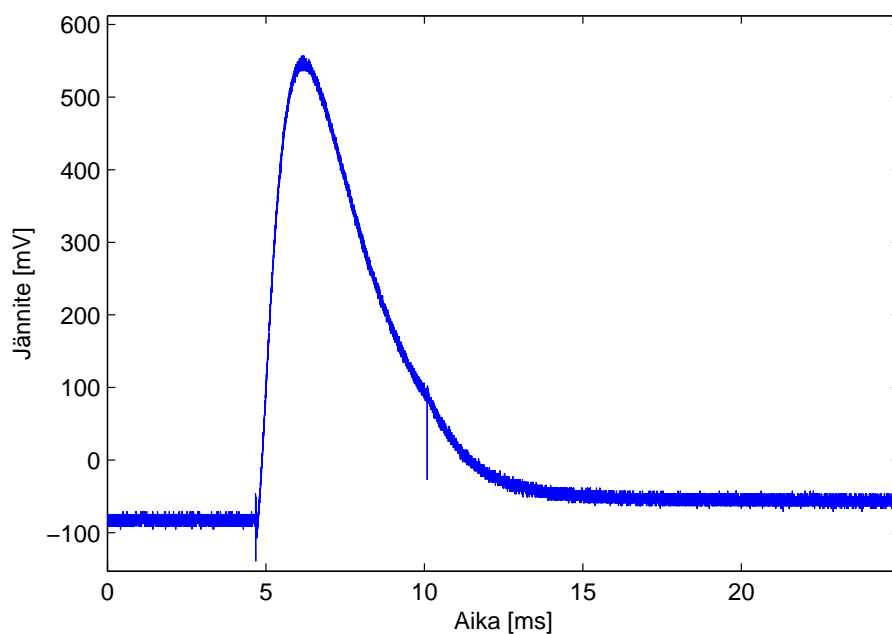


Kuva 4.10. Anturin jäähdyttäminen jääspraylla, jonka lämpötila on -49°C .

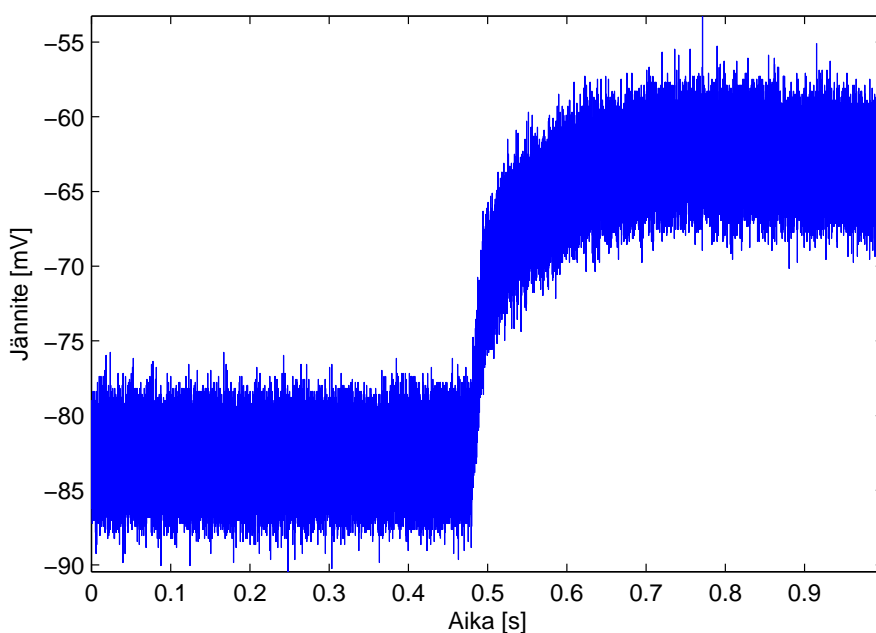


Kuva 4.11. Anturin lämmittäminen tupakansytyttimellä. Tupakansytyttimen liekki lämmittää myös anturin kiinnitysmateriaalia, mikä voi vaikuttaa syntyvän jännitteen suuruuteen.

Kuvassa 4.12 näkyy selvästi kaksi piikkiä, jotka syntyvät salamän tuottamasta mittauspiiriin kytkeytyvästä häiriöstä. Salamalla päästiin noin 1 ms nousureunoihin, joten an-



Kuva 4.12. Anturin reagointi valokuvaussalaman tuottamaan lämpövuohon. Kuvassa näkyy selvästi kaksi piikkiä, jotka johtuvat salaman synnyttämistä kytkeytyvistä häiriöistä. Lämpövuon nousuaika on noin 1 ms.



Kuva 4.13. Anturin toisen pinnan lämmitys sormella. Anturin läpi on noin 10°C lämpötilaero. Kohina on noin puolet lähtösignaalin muutokseen verrattuna.

turin todellista vasteaikaa ei voida määrittää käytetyillä herätteillä. Kuvasta 4.13 nähdään, että 10°C lämpötilaero anturin yli aiheuttaa 20 mV vasteen, joka on noin kaksi

kertaa kohinan suuruus. Vahvistimesta aiheutuva kohina vastaa siis noin $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutosta anturilta.

Mittauksien perusteella kohinan, offset-jännitteen ryöminän, vahvistuksen ja kais-tan osalta päästiin suunniteltuihin arvoihin. Kohina (12 mV) oli hieman suunniteltua (10 mV) suurempi sekä offset-jännite (-83 mV) oli suunniteltua (-50 mV) suurempi toisella versiolla. Anturilta tulevasta signaalista pystytään mittaamaan $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutoksia lämpötilaerossa. Offset-jännitteen ryömintä $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ käyttölämpötilan muutoksessa vastaa noin 1 mV muutosta mitatussa signaalissa. Tämä vastaa noin $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ muutosta anturin yli olevassa lämpötilaerossa.

Mittausten toistettavuutta ei voida tutkia luotettavasti, koska toistettavaa lämpövuota ei voitu muodostaa. Lisäksi eri antureiden tuottamissa vasteissa havaittiin poikkeamia, vaikka suuruusluokka eri herätteillä mitatuissa testeissä oli vastaava. Mittauksiin vaikuttaa muun muassa lämmönlähteen etäisyys anturista sekä anturin läpi kulkevan lämpövuon muuttuminen, kun anturin kiinnitysmateriaali lämpiää tai viilenee. Mittauksien perusteella voidaan todeta, että vaikka kaikki suunnitteluparametrit eivät aivan täytty-neet, voidaan toteutettua mittalaitetta käyttää lämpövuoanturin lähtösignaalin mittaa-miseen.

5 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa suunniteltiin ja toteutettiin lämpövuoanturin mittauselektroniikka vaativaan käyttöympäristöön. Tarkoituksena työssä oli pystyä hyödyntämään lämpövuoanturin tuomia ominaisuuksia lämpötilamittaukseen verrattuna. Samalla tutkittiin myös käytettävän anturin toimintaa. Toteutettu mittalaite koostuu vahvistimesta, signaalin siirrosta ja suojauksesta. Vastaavien lämpövuoantureiden instrumentointia on tutkittu vain Niukkasen [1] toimesta. Niukkasen käyttämä anturi oli herkempi ja instrumentointi oli suunniteltu sähkömoottorin lämpövuon mittaamista varten. Tässä työssä suunniteltiin yleiskäyttöinen mittauselektroniikka, jonka kaistanleveys on korkeampi kuin aiemmassa tutkimuksessa, jotta voidaan testata lämpövuoanturin todellista toimintaa.

Työn tavoitteena oli selvittää miten voidaan mitata mikrovolttien jännitesignaalia mahdollisimman suurella taajuuskaistalla. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon koko järjestelmä. Anturilta tulevan signaalin jännitetaso ja kaistanleveys, anturin sähköinen malli sekä käyttöympäristö rajaavat suunnitteluratkaisuja ja vaikuttavat vahvistimen suunnitteluun. Tässä työssä ei otettu kantaa mittausjärjestelmän ja analogista tietoa käsittelevän laitteiston rajapintaan, mikä osaltaan vaikuttaa myös vahvistimen lähdön suunnitteluun.

Työssä käytettävän gradienttilämpövuoanturin ominaisuuksia tutkittiin mittaamalla sen sijaiskytkentä ja tarkastelemalla sen tuottamaa lähtösignaalia jännite- ja virtalähdemallin perusteella. Anturin sijaiskytkentä vastasi aiemmin esitettyä sijaiskytkentää [1]. Anturin materiaaleista johtuen sijaiskytkennän komponenttien arvot erosivat aiemmin esitetystä. Mittausten perusteella todettiin, että anturi voidaan mallintaa jännitelähteenä.

Vahvistimen suunnitteluparametrit muodostuivat käytettävän anturin ominaisuuksista, käyttöympäristön määrittämisestä rajoitteista sekä suunnittelijan rajaamista määritte-

lyistä. Anturin pienen lähtöjännitteen takia käytettiin differentiaalista vahvistinta, koska anturin johdinten ja maapotentiaalin välillä voi olla paljon suurempi jännite kuin anturin tuottama signaali. Vaativa käyttöympäristö, jossa lämpötila voi nousta lähelle 100 °C, rajaa käytettäviä vahvistimia ja asettaa ehdon niiden lämpötilaominaisuuksille. Lisäksi ympäristöstä aiheutuva kohina on otettava huomioon suunnittelussa. Vahvistimen suunnitteluperusteiksi valittiin vahvistus 2200, lähtösignaalin kohina alle 10 mV, offset-jännite alle ± 50 mV ja sen ryömintä ± 1 mV/°C. Vahvistimen kaistanleveydeksi rajattiin 350 kHz, jolloin on mahdollista suunnitella vahvistin myös vaihteleviin olosuhteisiin.

Vahvistimesta tehtiin koeversiot eri topologioilla ja piireillä. Toteutettaviksi topologioiksi valittiin differentiaaliset jännite- ja instrumentointivahvistin. Vahvistinpiirit valittiin datalehdissä annettujen arvojen perusteella. Työssä testattiin myös aiemmassa tutkimuksessa käytettyjä vahvistinpiirejä [1], jotka osoittautuivat soveltuvan huonosti pienen impedanssin antureille sekä suunnitteluparametrien mukaisen taajuuskaistan mittaukseen. Lopullinen vahvistinkytkentä ja -piiri valittiin mittausten perusteella. Topologiaksi valittiin instrumentointivahvistimen ja ei-invertoivan vahvistimen kytkentä. Kytkentä koostui kahdesta vahvistinasteesta, jotta saavutetaan suunnitteluparametrien mukainen kaistanleveys ja vahvistus.

Vaadittu vahvistus ja taajuuskaista saavutettiin lopullisella vahvistinkytkennällä, mutta kohina oli hieman suurempi kuin suunniteltu. Lisäksi offset-jännite vaihteli testikappaleiden kesken vaikka kyseessä oli samanlaiset vahvistinpiirit. Viimeisellä versiolla se oli suunniteltua suurempi. Offset-jännitettä tärkeämpi parametri on kuitenkin sen ryömintä lämpötilan suhteen ja mittausten perusteella vahvistimen offset-jännitteen lämpötilaryömintä oli suunnitteluparametrien rajoissa. Lämpövuoanturin antaman signaalin toistettavuutta ei voitu tutkia tarkasti, koska toistettavaa lämpövuota ei voitu tuottaa. Anturin todellista vasteaikaa ei voitu määrittää, koska testattavilla herätteillä päästiin noin 1 ms nousuaikoihin.

Vaikka kaikkia suunnitteluparametreja ei aivan täytetty, pystyttiin toteutetulla järjestelmällä mittaamaan lämpövuoanturin tuottamaa signaalia. Keinotekoisilla herätteillä saavutettiin parhaimmillaan noin 1 V lähtösignaali. Vahvistimesta aiheutuva kohina todettiin vastaavan noin 5 °C muutosta anturin pinnan lämpötilassa. Jatkotutkimuksena mittalaitteen kohinaa ja offset-jännitettä tulisi pienentää. Kun mittaukset lopullisessa käyttöympäristössä tarkentavat vaadittavaa vahvistusta ja mittalaitteen muutostarpeita, voidaan suunnitella kytkennälle piirilevy, jolla voidaan vaikuttaa kohinan suuruuteen. Myös rajapintaa mittalaitteen ja A/D-muuntimen sekä tietoa käsittelevän laitteen välillä tulisi tutkia.

Lähteet

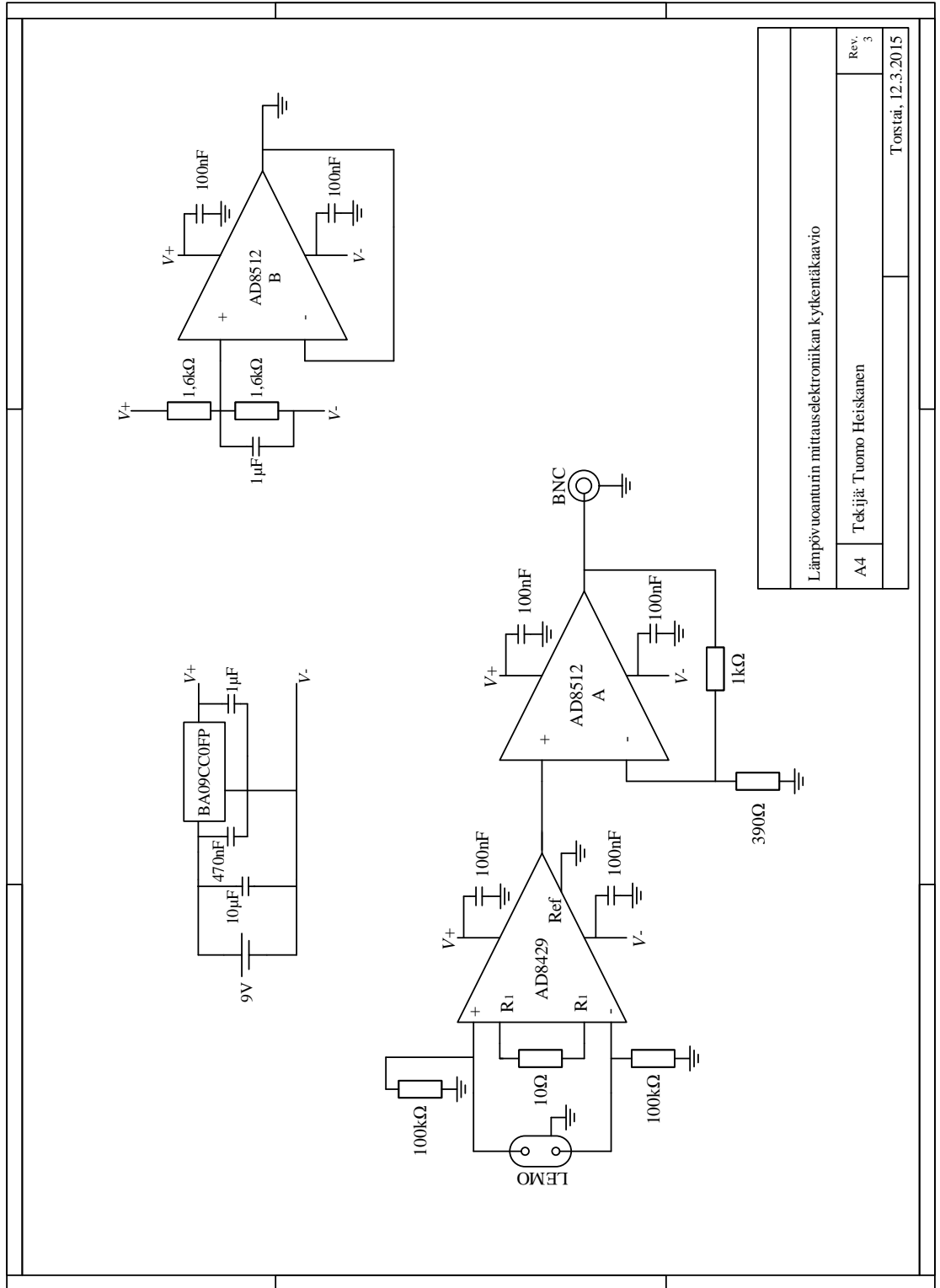
- [1] M. Niukkanen, “Design of an amplifier and an instrumentation setup for a harsh environment heat flux measurement application – case axial flux electric machine,” Master’s Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2013.
- [2] B. S. Mann, “Transverse thermoelectric effects for cooling and heat flux sensing,” Master’s Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- [3] A. V. Mityakov, S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. A. Snarskii, M. I. Zhenirovsky, ja J. J. Pyrhönen, “Gradient heat flux sensors for high temperature environments,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 176, no. 0, ss. 1 – 9, 2012.
- [4] R. A. Derryberry, “Artificial anisotropy for transverse thermoelectric heat flux sensing,” Master’s Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [5] S. Sapozhnikov, V. Mityakov, ja A. Mityakov, “Bismuth-based gradient heat-flux sensors in thermal experiment,” *High Temperature*, vol. 42, no. 4, ss. 629–638, 2004.
- [6] S. Raphael-Mabel, “Design and calibration of a novel high temperature heat flux sensor,” Master’s Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [7] H. Jussila, A. Mityakov, S. Sapozhnikov, V. Mityakov, ja J. Pyrhönen, “Local heat flux measurement in a permanent magnet motor at no load,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 11, ss. 4852–4860, 11 2013.
- [8] K. Murashko, A. Mityakov, J. Pyrhönen, V. Mityakov, ja S. Sapozhnikov, “Thermal parameters determination of battery cells by local heat flux measurements,” *Journal of Power Sources*, vol. 271, ss. 48–54, 2014.

- [9] T. E. Diller, “Heat flux,” *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*, J. Webster ja H. Eren, Toim. Taylor & Francis, 2014, luku 67, ss. 67–1,67–15.
- [10] J. R. Hansman, “Characteristics of instrumentation,” *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook, Second Edition: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*, J. Webster ja H. Eren, Toim. Taylor & Francis, 2014, luku 2, ss. 2–1,2–9.
- [11] A. Mityakov, V. Mityakov, S. Sapozhnikov, ja Y. Chumakov, “Application of the transverse seebeck effect to measurement of instantaneous values of a heat flux on a vertical heated surface under conditions of free-convection heat transfer,” *High Temperature*, vol. 40, no. 4, ss. 620–625, 2002.
- [12] D. MacDonald, *Thermoelectricity: An Introduction to the Principles*. Dover Publications, 1962.
- [13] D. Rowe, *Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics*. Taylor & Francis, 2012, luku 1, ss. 1–1,1–12.
- [14] D. Chung, *Applied Materials Science: Applications of Engineering Materials in Structural, Electronics, Thermal, and Other Industries*. Taylor & Francis, 2001.
- [15] D. Rowe, “General principles and basic considerations,” *Thermoelectrics Handbook*, D. Rowe, Toim. CRC Press, 2005, luku 1, ss. 1–1,1–14.
- [16] D. Pollock, “Thermoelectric phenomena,” *CRC Handbook of Thermoelectrics*, D. Rowe, Toim. CRC Press, 1995, luku 2, ss. 2–1,2–11.
- [17] S. Sapozhnikov, V. Mityakov, A. Mityakov, ja S. Mozhaĭskii, “Gradient-type sensors for heat flux measurements at high temperatures,” *Technical Physics Letters*, vol. 34, no. 10, ss. 815–817, 2008.

- [18] J. R. Cogdell, Z. Wan, C. R. Paul, ja R. C. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook*, 2nd ed. CRC Press, 1997.
- [19] D. Murty, *Transducers and Instrumentation*, 2nd ed. PHI Learning, 2010.
- [20] W. Jung, *Op Amp Applications Handbook*. Newnes, 2005.
- [21] K. Silvonen, *Elektroniikka ja puolijohdekomponentit*. Otatieto, 2009.
- [22] R. Palmer, "Dc parameters: Input offset voltage," Texas Instruments, Tekninen raportti, 2001.
- [23] P. Gray, P. Hurst, S. Lewis, ja R. Meyer, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*. John Wiley & Sons, 2009.
- [24] A. S. Sedra ja K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 5th ed. Oxford University Press, 2004.
- [25] B. Liptak, *Instrument Engineers' Handbook, Fourth Edition, Volume Two: Process Control and Optimization*. CRC Press, 2005.
- [26] H. Eren, *Electronic Portable Instruments Design and Applications*. CRC Press, 2003.
- [27] D. C. Swanson, *Signal Processing for Intelligent Sensor Systems*. CRC Press, 2000.
- [28] C. Kitchin ja L. Counts, *A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers, 3rd edition*. Analog Devices, 2006.
- [29] R. Mancini, "Op amps for everyone," Texas Instruments, Tekninen raportti, 2001.
- [30] *Zero-Drift Instrumentation Amplifier*, Microchip, 2014.
- [31] *1 nV/sqrt(Hz) Low Noise Instrumentation Amplifier*, Analog Devices, 2011, rev. 0.

- [32] *MAX4475-MAX4478/MAX4488/MAX4489 SOT23, Low-Noise, Low-Distortion, Wide-Band, Rail-to-Rail Op Amps*, Maxim Integrated, 6 2012, rev. 6.
- [33] *LMP202x Zero-Drift, Low-Noise, EMI-Hardened Amplifiers*, Texas Instruments, 2008.
- [34] *2.9 nV/sqrt(Hz) Low Noise, RRIO Amplifier*, Texas Instruments, 2007.
- [35] *4.5MHz, Single Dual and Quad Precision Rail-to-Rail Input-Output (RRIO) Op Amps with Very Low Input Bias Current*, Intersil, 9 2010.
- [36] *Low Power, Low Noise and Distortion, Rail-to-Rail Output Amplifiers*, Analog Devices, 2014, rev. F.
- [37] *Precision, Very Low Noise, Low Input Bias Current, Wide Bandwidth JFET Operational Amplifiers*, Analog Devices, 2009, rev. 1.
- [38] *2A/1A Fixed Output LDO Regulators*, ROHM Semiconductor, 8 2013, rev. 003.
- [39] *Adjustable and fixed low drop positive voltage regulator*, STMicroelectronics, 9 2013, rev. 33.
- [40] H. Ott, *Noise reduction techniques in electronic systems*. Wiley, 1988.
- [41] X. C. Tong, *Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*. CRC Press, 2008.
- [42] *Unipole & multipole connectors*, LEMO, 2010.

LIITE I



Lämpövoianturin mittauselektronikan kytkentäkaavio	
A4	Tekijät: Tuomo Heiskanen
	Rev. 3
	Torstai, 12.3.2015