



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

JÄNNITEREFERENSSIN SUUNNITTELU

Teemu Paananen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2016
Tietotekniikka
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tietotekniikka
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

PAANANEN, TEEMU:
Jännitereferenssin suunnittelu

Opinnäytetyö 50 sivua, joista liitteitä 15 sivua
Toukokuu 2016

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää 10 V:n jännitereferenssi mitta- ja kalibrointikäyttöä varten. Työ tehtiin Icraft Oy:lle, joka tekee elektroniikan ja ohjelmistojen alihankintasuunnittelua Tampereella.

Koska jännitereferenssiä haluttiin voida käyttää mahdollisimman monessa eri tarkkuuden sovelluksessa, päätettiin siitä suunnitella niin stabiili kuin käytävissä olevilla resursseilla oli mahdollista. Referenssijännite päätettiin tuottaa zener-diodin avulla sen yksinkertaisen käytettävyyden ja matalan hinnan takia. Zener-diodiin perustuvista referenssi-piireistä valittiin Linear Technologyn LTZ1000A-piiri. Kyseiseen piiriin päädyttiin sille luvatus suorituskyvyn lisäksi siksi, että suuret mittalaittevalmistajat kuten Fluke ja Keysight käyttävät samaa referenssi-piiriä tarkimmissa mittalaitteissaan. Referenssi-piiriin lisäksi myös muissa komponenteissa käytettiin mahdollisimman hyvälaatuisia malleja. Jännitereferenssi päätettiin jakaa moduuleihin, jotka koostuivat referenssimoduulista, akkumoduulista sekä ulostulojännitteen säätömoduulista. Tähän rakenteeseen päädyttiin, sillä ulostulojännitteiden lisäämisestä ja muuttamisesta haluttiin tehdä mahdollisimman yksinkertaista. Käyttämällä jokaisessa ulostulossa jännitteen asettamista varten omaa säätömoduulia, tähän tavoitteeseen päästiin.

Laitteesta suunniteltiin referenssimoduuli sekä hahmotelma ulostulon säädöstä. Referenssimoduulia myös testattiin, jonka perusteella se todettiin toimivaksi.

Asiasanat: jännitereferenssi, stabiilisuus, tarkkuus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Information Technology
Embedded Systems and Electronics

PAANANEN TEEMU:
Designing a Voltage Reference

Bachelor's thesis 50 pages, appendices 15 pages
May 2016

The aim of this bachelor's thesis was to develop a 10 V voltage reference for measurement and calibration applications. The thesis was made for Icraft Oy which provides subcontract designing of electronics and software at Tampere Finland.

Because applications and their level of accuracy that reference would be used in future were unknown, it was decided to be designed as stable as available resources would allow. Technique of the reference was decided to be semiconductors because of their simple structure and low costs. Selected reference chip ended up being the best available, Linear Technology's LTZ1000A. It was selected because of its superb performance and because big companies like Fluke and Keysight use it in their flagship measurement devices. Additionally also other components used in the device were selected from the higher end of their class. Voltage reference was divided into modules which consisted of reference module, battery module and output control module. This structure was selected because changing and adding new output voltages had to be as simple as possible. Using own control module for every output provided a solution for this.

Out of the three modules in the system, reference module and a first sketch of output amplifier were designed. Reference module was also tested and established as functional.

Key words: voltage, reference, stability, accuracy

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	REFERENSSITYYPIT	8
2.1	Puolijohdereferenssit	8
2.1.1	Bandgap-jännitereferenssit.....	9
2.1.2	Buried zener	10
2.2	Muut referenssityypit	11
2.2.1	Weston-kenno	12
2.2.2	Josephsonin referenssi.....	12
3	TARKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	14
3.1	Lämpötila	14
3.2	Liitokset	15
3.3	Maadoitus.....	16
3.4	Aika.....	16
3.5	Mekaaninen rasitus	17
3.6	Muut häiriönlähteet.....	17
4	SUUNNITTELU	19
4.1	Ominaisuuksien määrittely ja pääkomponenttien valitseminen	19
4.1.1	Referenssiipiiri	19
4.1.2	Muut komponentit.....	21
4.2	Referenssimoduulin kytkennän suunnittelu.....	21
4.3	Referenssimoduulin piirilevyn suunnittelu	24
4.4	Ulostulon jännitteenjaon suunnittelu	25
4.4.1	Ulostulovahvistimen kytkennän suunnittelu	26
4.4.2	Ulostulovahvistimen piirilevyn suunnittelu	27
5	VALMIS REFERENSSILEVY JA SEN TESTAUS.....	29
5.1	Jännitteet	29
5.2	Lämpötila	30
5.3	Piirilevyn rakenne	30
6	JATKOSUUNNITTELU.....	32
7	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	35
	LIITTEET	36
	Liite 1. Referenssimoduulin kytkentä	36
	Liite 2. Referenssimoduulin piirilevy.....	37
	Liite 3. Referenssimoduulin 1. kerros	38
	Liite 4. Referenssimoduulin 2. kerros	39

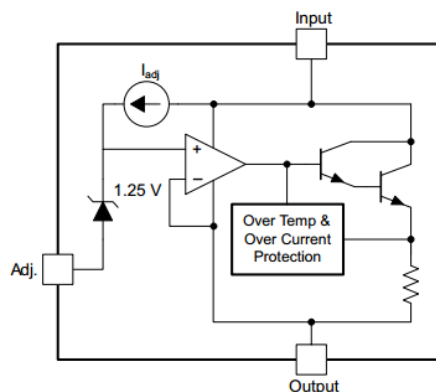
Liite 5. Referenssimoduulin 3. kerros	40
Liite 6. Referenssimoduulin 4. kerros	41
Liite 7. Referenssimoduulin 3D-malli	42
Liite 8. Ulostulovahvistimen kytkentä	43
Liite 9. Ulostulovahvistimen piirilevy.....	44
Liite 10. Ulostulovahvistimen piirilevyn 1. kerros.....	45
Liite 11. Ulostulovahvistimen piirilevyn 2. kerros.....	46
Liite 12. Ulostulovahvistimen piirilevyn 3. kerros.....	47
Liite 13. Ulostulovahvistimen piirilevyn 4. kerros.....	48
Liite 14. Ulostulovahvistimen piirilevyn 3D-kuva päältä	49
Liite 15. Ulostulovahvistimen piirilevyn 3D-kuva alta.....	50

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä selvitetään suunnitteluvaatimukset tarkan jännitereferenssin tuottamiseksi sekä esitellään suunniteltu referenssi. Opinnäytetyö tehtiin Icraft Oy:lle, joka on Tampereella toimiva elektroniikan ja ohjelmistojen alihankintasuunnittelua tarjoava yritys. Työssä suunniteltua jännitereferenssiä tullaan käyttämään laitteiden testauksessa ja kalibroinneissa.

Jännitereferenssi on laite, jonka tehtävä on tuottaa stabiili jännite sen ikääntymisestä sekä kuormituksen ja lämpötilan muutoksista riippumatta. Sitä käytetään jännitelähteissä, A/D- ja D/A-muuntimissa sekä muissa mittaus- ja ohjausjärjestelmissä. Jännitereferenssiä tarvitaan aina, kun halutaan tuottaa tai mitata jokin jännite. Tämä siksi, että jännitteen määrittämiseksi sitä täytyy voida verrata johonkin tunnettuun jännitteeseen. Yksinkertaisimmillaan referenssinä voidaan käyttää laitteen käyttöjännitettä, josta voidaan tuottaa esimerkiksi vastusjaolla siihen halutussa suhteessa oleva jännite. Useimmiten laitteen käyttöjännite on kuitenkin hyvin epästabiili, mistä seuraa se, että myös tuotettu jännite on hyvin epästabiili. Tarkkuuden parantamiseksi referenssijännitteen tarkkuutta tulisi siis parantaa.

Käytännössä vertailujännitteen tuottamiseen käytetään erillistä jännitereferenssiä, jonka tarkkuus on riittävän suuri halutun lopputuloksen tarkkuuden saavuttamiseksi. Jännitereferenssi voi olla integroituna esimerkiksi A/D-muunninpiiriin sisälle, se voi olla oma osionsa kytkennässä tai kokonaan erillinen laite. Kuvassa 1 on esimerkki 1,25 voltin jännitereferenssin käytöstä LM317-regulaattoripiirissä.



KUVA 1. Jänniteregulaattorin lohkokkaavio (LM317 3-Terminal Adjustable Regulator 2014, 8)

Lähtöjännitettä säätäviä transistoreja ohjataan operaatiovahvistimella, jonka positiiviseen sisääntuloon kytketty zener-diodi toimii jännitereferenssinä. Vahvistimen negatiivinen sisääntulo on kytketty regulaattorin ulostuloon, joten se pyrkii ohjaamaan ulostulon samalle tasolle referenssijännitteen kanssa. Virtageneraattorin tehtävänä on asettaa zener toimintatilaan. Jos Adj-nastan jännitettä nostetaan, vahvistimella näkyvä jännite ja sen myötä myös ulostulojännite nousee. Jännitereferenssiä käytetään siis vertailukohteena ulostulon takaisinkytkennälle, jonka perusteella erovahvistin tekee tarvittavat muutokset ulostulon ohjaukseen.

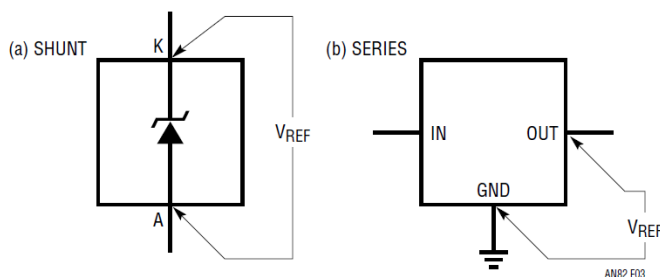
Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli suunnitella erillinen jännitereferenssi, jota voidaan käyttää muiden laitteiden toiminnan testaukseen ja kalibrointiin. Työssä esitellään tekniikoita referenssin toteuttamiseen sekä asioita, joita täytyy ottaa suunnittelussa huomioon hyvän tarkkuuden saavuttamiseksi. Työssä esitellään myös suunniteltu jännitereferenssi ja sen toiminnan testaustulokset.

2 REFERENSSITYYPIT

Jännitereferenssejä voidaan tehdä muutamalla eri tekniikalla. Suositummat ja monikäyttöisimmät näistä ovat puolijohdetekniikkaan perustuvat referenssit. Ne ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, helppokäyttöisiä sekä ennen kaikkea edullisia. Niiden toiminta muistuttaa tavallisia jänniteregulaattoreita, mutta niiden lähtöjännitteen stabiilius on huomattavasti parempi. Jos puolijohdereferenssien suorituskyky ei kuitenkaan riitä, voidaan käyttää polttokennotekniikkaan perustuvia Weston-kennoja, tai tarkinta tähän mennessä kehitettyä jännitereferenssityyppiä Josephsonin referenssiä.

2.1 Puolijohdereferenssit

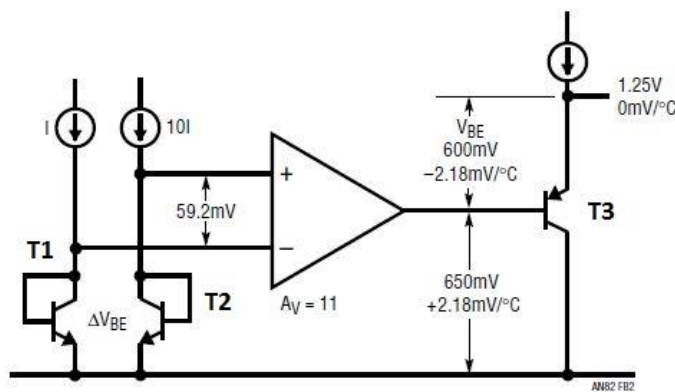
Puolijohdereferenssejä on kahta eri tyyppiä, sarjaan (series) ja rinnan (shunt) kytkettävät referenssit (kuva 2). Sarjaan kytkettävät referenssit muistuttavat paljolti tavallista kolmenastista jänniteregulaattoria, kun taas rinnankytkettävät tavallista zener-diodia. Erona sarjaan ja rinnan kytkettävillä referensseillä on se, että sarjaan kytkettävässä kuormavirta kulkee piirin läpi, kun taas rinnankytkettävässä kuormavirta otetaan piiriä ajavasta lähteestä. Sekä sarjaan että rinnan kytkettäviä jännitereferenssejä voidaan valmistaa usealla eri tavalla, joista esitellään kaksi suosituinta. (Whelan, B 2009, 3).



KUVA 2. Rinnan ja sarjaan kytkettävät referenssit (Understanding and Applying Voltage References 1999, 4)

2.1.1 Bandgap-jännitereferenssit

Bandgap-referenssin toiminta perustuu siihen, että kun kahta identtistä diodia ajetaan erisuuruilla virroilla, niiden yli muodostuvat erisuuruiset jännitteet (kuva 3). Säättämällä ohjausvirtojen suhdetta diodien välinen offset-jännite säätyy. Lisäksi tällä offset-jännitteellä on suhteellisen tarkasti ennustettavissa oleva lämpötilakerroin, noin $3,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ jokaista millivolttia kohden lämpötilassa 23°C . Kumoamalla tämän offset-jännitteen lämpötilakerroin vastakkaismerkkisellä lämpötilakertoimella, putoaa koko piirin lämpötilakerroin lähelle nollaa.



KUVA 3. Bandgap-referenssi (Understanding and Applying Voltage References 1999, 12)

Kuvassa 3 vasemmalla olevien npn-transistorien T1 ja T2 kanta-emitteri-diodien läpi ajetaan erisuuruiset virrat. Virtojen suhde tuottaa jännite-eron ΔV_{BE} , jonka suuruus on

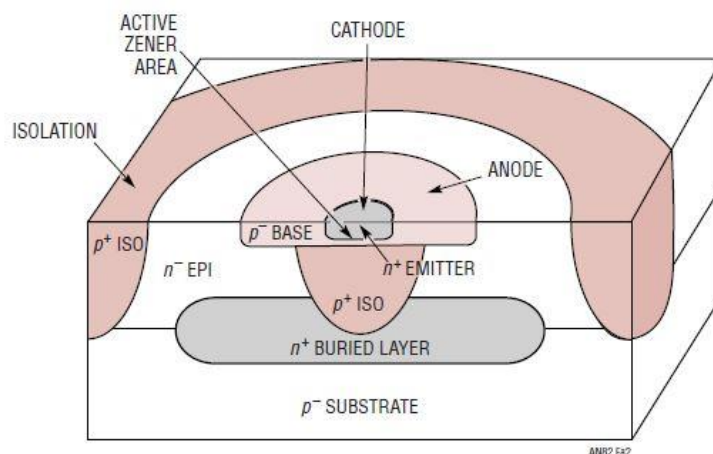
$$\Delta V_{BE} = V_{BE1} - V_{BE2} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right) \quad (1)$$

Kaavassa 1 ΔV_{BE} on kantojen välinen jännite, k on Boltzmannin vakio, T absoluuttinen lämpötila (298 K huoneessa), q elektronin varaus $1,6021773 \cdot 10^{-19}$ C ja I_{C1} sekä I_{C2} transistorien virrat. Esimerkissä ΔV_{BE} vahvistetaan ja referenssijännite otetaan npn-transistorin emitteriltä. Transistorin kanta-emitteri-diodin lämpötilakerroin on tuotetun offset-jännitteen lämpötilakertoimen vastaluku. Koska ΔV_{BE} muuttuu noin $3,4 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ jokaista millivolttia kohden, täytyy kuvassa käytetyn transistorin lämpötilakertoimen $-2,18 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ kumoamiseksi ΔV_{BE} :n olla noin 650 mV. Kaavan 1 mukaan, I_{C1} :n ja I_{C2} :n suhteen täytyisi kuitenkin olla tällöin erittäin suuri, noin $9,4 \cdot 10^{10}:1$. Käytännössä ΔV_{BE} täytyy asettaa pal-

jon pienemmäksi ja vahvistaa tämän jälkeen haluttuun arvoon 650 mV. Esimerkissä virtojen suhteena on käytetty 10:1, jolloin kaavan 1 mukaisesti offset-jännite on 59,2 mV ja lämpötilakerroin $200 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Vahvistamalla tätä hieman alle 11-kertaiseksi saadaan offset-jännitteeksi 650 mV ja lämpötilakertoimeksi $+2,18 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Vahvistettu ΔV_{BE} yhdessä pnp-emitteriseuraajan kanssa muodostaa siis bandgap-referenssin, jonka lähtöjännite on kantojen vahvistetun offsetjännitteen ja pnp-transistorin V_{BE} :n summa. Lähtöjännitteen lämpötilakerroin on sitä lähempänä nollaa, mitä tarkemmin ΔV_{BE} :n lämpötilakerroin on säädetty itseisarvoltaan samaksi kuin transistorin T3 kanta-emitteri-jännitteen lämpötilakerroin. (Understanding and Applying Voltage References 1999, liite B.)

2.1.2 Buried zener

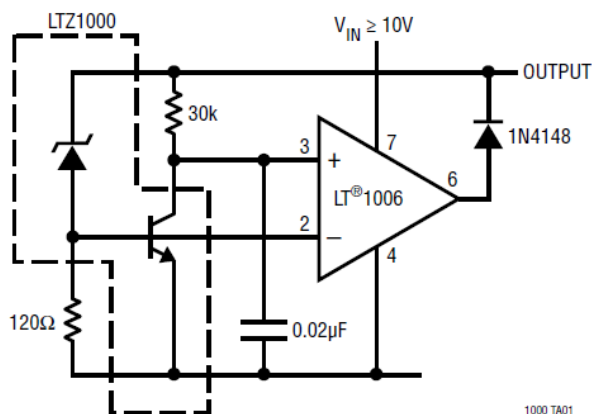
Haudattu zener-diodeja (Buried zener) käytetään hyvin stabiilien referenssien tekemiseen. Ne ovat kalliimpia kuin bandgap-referenssit, mutta niiden suorituskyky on myös selvästi parempi. Buried zener -diodit vastaavat toiminnaltaan tavallista zeneriä, mutta ovat parannellun rakenteensa ansiosta huomattavasti pienikohinaisempia ja stabiilimpia. Perinteisessä zenerissä P-N-rajapinta (Positive-Negative) sijaitsee piipalan pinnassa, jolloin liitokseen syntyy kohinaa ja satunnaista lyhyen ja pitkän aikavälin jänniteryömintää. Pinnassa oleva liitos on myös altis hapettumis- ja saastumisongelmille valmistusvaiheessa. Haudatussa zenerissä P-N-liitos on pinnan alapuolella, jolloin sen kohina on saatu huomattavasti pienemmäksi ja pitkän ajan stabiilius huomattavasti paremmaksi. Kuvassa 4 on eräs tapa valmistaa haudattu zener-diodi.



KUVA 4. Buried zener -diodi (Understanding and Applying Voltage References 1999, 11)

Kuvassa 4 pinnassa oleva n^+ -emitteridiffuusio toimii katodina ja p^- -kantadiffuusio yhdessä p^+ -eristediffuusion kanssa anodina. Pohjalla oleva n^+ -diffuusio estää substraatissa kulkevien häiriöiden pääsyn ylempiin kerroksiin ja diodin ympäri menevä p^+ -diffuusio eristää myös omalta osaltaan diodin muusta kiekosta. P-N-rajapinnan aktiivialue sijaitsee katodin pohjalla, jossa emitterin ja kannan varauksenkuljettajapitoisuudet ovat korkeimmat. Iso-Buried-kerroksen, kanta-epi- sekä iso-epi-liitosten kevyempi seostus varmistaa, että ne eivät ole aktiivisia zenerin johtaessa. Tällä kokonaisuudella saavutetaan erittäin pieni kohinataso ja päästään eroon pinnassa tapahtuvista häiriöistä. (Understanding and Applying Voltage References 1999, liite A.)

Kuvassa 5 on esimerkkikytkentä zenerin käytöstä 7,2 voltin jännitereferenssinä. Kytkennässä operaatiovahvistin pyrkii pitämään sisääntulonsa samassa potentiaalissa ja näin ollen ajaa zenerin läpi stabiilin, 120 ohmin vastuksella asetetun 4 mA:n vakiovirran. Zenerdiodin lämpötilakerroin on suhteellisen huono, joten sen kompensoimiseksi kytkentään on lisätty npn-transistori. Zenerjännitteen ja transistorin kanta-emitterijännitteen lämpötilakertoimet kumoavat likimain toisensa, joten ne muodostavat melko stabiilin referenssin.



KUVA 5. Zener-diodi 7,2 voltin jännitereferenssinä (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 1)

2.2 Muut referenssityypit

Puolijohteisiin perustuvien referenssien etu on niiden yksinkertainen rakenne ja edullinen hinta. Niiden stabiilius ei kuitenkaan riitä äärimmäistä tarkkuutta vaativiin sovelluksiin.

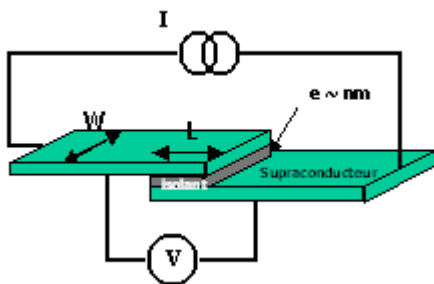
Jos parhaimpienkaan puolijohdereferenssien tarkkuus ei riitä, jää vaihtoehtoja kaksi: polttokennoon perustuva Weston-kenno tai suprajohteisiin perustuva Josephsonin referenssi. (Understanding and Applying Voltage References 1999, 2.)

2.2.1 Weston-kenno

Polttokennojen avulla on valmistettu joitakin referenssityyppejä, mutta käytännössä niitä ei juurikaan käytetä enää. Tarkin kehitetty polttokennoreferenssi on 1800-luvun lopulla keksitty Weston-kenno, joka oli aikansa tarkin jännitereferenssi. Sitä käytettiin muun muassa määrittelemään SI-järjestelmän voltin suuruus aina 1970-luvulle asti. Sen jälkeen Josephsonin referenssi on kuitenkin syrjäyttänyt sen paremman tarkkuutensa ansiosta. Puolijohteiden kehittymisen myötä Weston-kennojen tarve pienemmän tarkkuuden mittauksiin on myös poistunut kokonaan. (Tang, Y., Belecki, N. B., Mayo-Wells, J. K. 2016, 1.)

2.2.2 Josephsonin referenssi

Josephsonin referenssi perustuu englantilaisen Brian Josephsonin vuonna 1962 tekemään havaintoon, että kahden ohuella eristeellä erotetun suprajohteen välille kytketty tasajännite aiheuttaa liitoksessa vaihtovirran, jonka taajuus on verrannollinen DC-jännitteen suuruuteen (kuva 6).



KUVA 6. Josephsonin liitos (Josephson effect)

Sama toimii myös toisin päin. Kun liitoksen läpi ajetaan AC-virta, syntyy DC-jännite V_n , jonka suuruus on

$$V_n = \frac{nhf}{2e} \quad (2)$$

Kaavassa $2n$ kuvastaa sarjassa olevien liitosten lukumäärää, f ohjaustaajuutta, e elektronin alkeisvarausta ja h Planckin vakiota. Taajuutta laskettaessa $2e/h$:n suuruudeksi on määritetty noin 483,6 MHz/ μ V ja jännitettä laskettaessa käytetään sen käänteislukua.

Josephsonin referenssi on tarkin kehitetty jännitereferenssi ja esimerkiksi suprajohdesovelluksia kehittävä Hypres lupaa 1 voltin Josephson-piirilleen tarkkuudeksi 0,05 ppm. Josephsonin liitoksiin perustuvia referenssejä onkin käytetty vuodesta 1972 lähtien SI-järjestelmän voltin referenssinä. Josephsonin referenssin huonoina puolina voidaan pitää sen monimutkaisuutta, kokoa ja sen ylläpidon kustannuksia. Liitokset koostuvat suprajohdeista, joten ne täytyy jäähdyttää esimerkiksi nestemäisellä heliumilla. Yhden liitoksen tuottama jännite on vain joitain millivolteja, joten jo yhden voltin tuottamiseen täytyy liitoksia olla käytännössä tuhansia. Liitosketjua ajavan AC-virran taajuus on myös yleensä 70 – 80 GHz, mikä omalta osaltaan monimutkaistaa laitteen toteutusta. Josephsonin referenssejä käytetäänkin lähinnä kaikkein tarkimpia mittauksia tekevissä laboratorioissa, kun taas muille riittää puolijohdeisiin perustuva jännitereferenssi. (Tang, Y., Belecki, N. B., Mayo-Wells, J. K. 2016, 2.)

3 TARKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Jännitereferenssin kaltaisessa järjestelmässä häiriöiden minimointi on ensiarvoisen tärkeää. Laitteen suunnitteluvaiheessa on siis syytä käyttää reilusti aikaa mahdollisten häiriölähteiden selvittämiseen sekä niiden vaikutuksen poistamiseen. Tässä kappaleessa esitellään jännitereferenssin suunnittelun kannalta tarkkuuteen eniten vaikuttavat tekijät sekä keinoja tarkkuuden parantamiseksi. Vaikka kappale käsitteleeekin häiriönlähteitä jännitereferenssin näkökulmasta, samat ohjeet pätevät myös mille tahansa muulle matalalla taajuudella toimivalle järjestelmälle.

3.1 Lämpötila

Jännitereferenssin kannalta suurimpana häiriön aiheuttajana voidaan pitää lämpötilan vaihtelua. Lämpötila vaikuttaa suuresti komponenttien ominaisuuksiin, jolloin sen muuttuminen voi pilata jännitereferenssin kaltaisen laitteen tarkkuuden täysin. Komponenttivalmistajat ilmoittavat tuotteilleen lämpötilakertoimen, joka kuvaa komponentin käyttäytymistä lämpötilan suhteen. Esimerkiksi Texas Instruments ilmoittaa LM7805-jänniteregulaattorinsa lämpötilakertoimeksi $0,6 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, mikä tarkoittaa komponentin toimintalueella $-40 \text{ }^\circ\text{C} < T_J < 125 \text{ }^\circ\text{C}$ noin 100 mV :n muutosta ulostulossa (LM78XX series voltage regulators 2013, 4). Toinen ääripää on Linear Technologyn LTZ1000-referenssiipiiri, jolle luvataan $0,05 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ eli 7 voltin jännitteellä $0,35 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 1).

Vaikka lämpötilakerroin $0,05 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ onkin jo erittäin hyvä, tarkoittaa se silti sitä, ettei lämpötilan tarvitse muuttua montaa astetta muuttaakseen ulostulon jännitettä olennaisesti. Tästä johtuen tarkimmissa jännitereferensseissä etenkin referenssidiodi on usein ”uunitettu”, eli diodilla on lämmitysvastus, jolla lämpötila pidetään mahdollisimman stabiilina. Referenssiipiiri pyritään myös eristämään ympäristön lämpötilasta ja sen muutoksista mahdollisimman hyvin.

Lämpötila aiheuttaa myös lämpökohinaa resistanssissa. Lämpökohina syntyy elektronien satunnaisesta värähtelystä, joka kasvaa lämpötilan kasvaessa.

Resistanssin tuottama avoimen silmukan RMS-kohinajännite on

$$V_T = \sqrt{4kTBR} \quad (3)$$

Kaavassa V_T on kohinan RMS-jännite, k Boltzmannin vakio, T absoluuttinen lämpötila kelvineinä, B kohinan kaistanleveys ja R resistanssi. Kuten kaavasta näkee, kohinan suuruus on verrannollinen resistanssin ja tarkasteltavan kaistanleveyden neliöjuureen. (Ott, H., W. 1988, 228.) Helpoin tapa minimoida lämpökohinan suuruus on siis pienentää resistanssia tai kaistanleveyttä. Jos näillä ei päästä vielä haluttuun tulokseen, täytyy kytkennän lämpötilaa laskea. Jännitereferenssin kaltaisessa DC-kytkennässä suurin ongelma on pitkän aikavälin muutokset, joten tarkasteltava kaista on usein valmiiksi hyvin pieni, esimerkiksi taajuusväli 0,01 Hz – 10 Hz. Näin ollen myös lämpökohinan suuruus on usein pieni.

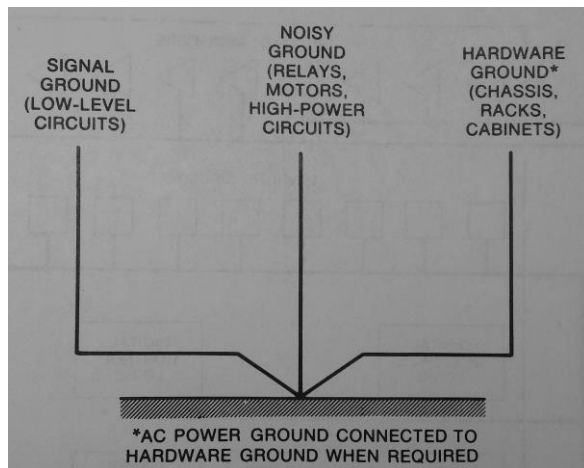
3.2 Liitokset

Lämpöryöminän ohella yksi merkittävimpä häiriölähteitä jännitereferensseissä ovat liitoksiin syntyvät termoparijännitteet. Nämä jännitteet syntyvät, kun kaksi eri metallia ovat kontaktissa toisiinsa. Ne voivat aiheuttaa useiden ppm/°C lämpötilaryömintöjä, joten referenssin liitosten toteutustapa ja materiaalit täytyy suunnitella huolellisesti. Ideaalinen tilanne olisi, jos johtimena käytetty materiaali olisi koko matkalla referenssidiodilta kohteeseen sama. Käytännössä tämä ei ole mahdollista jo pelkästään piirilevyn toteutusteknisistä syistä, mutta käyttämällä johtimissa ja liittimissä esimerkiksi pelkkää kuparia voidaan termopariefektiä minimoida huomattavasti. Kriittisimmät kohteet ovat liittimet, joiden puoliskot ovat eri lämpötiloissa. Tästä esimerkkinä lämpimän kotelon sisältä viileämpään huoneilmaan tulevat liittimet. Näihin tulisi eteenkin kiinnittää huomiota. (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 4.)

Liitoksista syntyy aina myös kohinaa. Tätä kohinaa nimitetään usein 1/f-kohinaksi, sillä sen tehotiheys muuttuu taajuuden käänteisarvona. 1/f-kohina syntyy epätäydellisten liitosten vaihtelevasta kontaktista ja se on suoraan verrannollinen liitoksen läpi kulkevaan virtaan. Kohinan 1/f ominaisuudesta johtuen sen suuruus voi kasvaa hyvinkin isoksi matalataajuisissa kytkennöissä. Tästä johtuen materiaalien lisäksi liitoksissa täytyy käyttää hyvälaatuisia kontakteja. (Ott, H., W. 1988, 239.)

3.3 Maadoitus

Häiriöille herkkiä kytkentöjä suunniteltaessa täytyy maadoitukseen kiinnittää aina huomiota. Jos referenssidiodin paluuvirta kulkee samassa maatasossa esimerkiksi lämmitysvastuksen paluuvirran kanssa, näkyy lämmitysvirran vaihtelu suoraan myös referenssin jännitteen vaihteluna. Matalataajuisissa kytkennöissä paras maadoitustapa on yleensä niin sanottu single-point-topologia, jossa kytkentä jaetaan osiin, joiden maat yhdistyvät vain yhdessä pisteessä (kuva 7).



KUVA 7. Single-point-maadoitus (Ott, H., W. 1988, 83)

Kytkenästä erotetaan herkkät maat, kohinaiset ja suurivirtaiset maat sekä mekaniikka ja nämä yhdistetään vain esimerkiksi syöttöjännitteen maapinnissä. Näin ollen se matka, jonka herkkät signaalit kulkevat yhdessä kohisevien signaalien kanssa, minimoituvat. (Ott, H., W. 1988, 82-83.)

3.4 Aika

Yksi jännitereferenssien suorituskykyyn vaikuttava tekijä on myös aika, sillä referenssin lähtöjännite muuttuu sen ikääntyessä. Tämä muutos tapahtuu yleensä yhteen suuntaan ja on logaritminen. Tämä tarkoittaa sitä, että muutosnopeus on suurimmillaan piirin käyttöönottovaiheessa ja pienenee laitteen vanhetessa. Pitkän aikavälin stabiilius ilmaistaan yleensä yksiköissä ppm/\sqrt{kh} , eli miljoonasosaa per tuhansien tuntien neliöjuuri. Yksikön neliöjuuri kuvastaa muutosnopeuden logaritmista pienenemistä.

Pitkän aikavälin ryöminän vähentämiseksi piiri voidaan ”sisäänajaa”, jolloin piiriä pidetään päällä useita viikkoja. Tänä aikana piirin lähtöjännite mitataan säännöllisin väliajoin ja arvioidaan tuloksista jännitteen muutosnopeus. Kun muutosnopeus on pienentynyt halutulle tasolle, referenssi kalibroidaan ja tarvittaessa viritetään ja se on valmis käyttöön. Käytännössä jännitteen ryöminnystä ajan suhteen ei päästä kokonaan eroon, joten referenssi tulisi kalibroida riittävän usein halutun tarkkuustason säilyttämiseksi. (Understanding and Applying Voltage References 1999, 3.)

3.5 Mekaaninen rasitus

Kaikissa jännitereferenssin kaltaisissa herkissä kytkennöissä mekaanisten rasitusten minimoimiseen tulee kiinnittää huomiota. Esimerkiksi piirilevyn kiinnitystapa laitteeseen voi aiheuttaa mekaanista jännitystä, jonka vaikutus lähtöjännitteeseen voi olla luokkaa 30 ppm. Jos mekaanisen jännityksen suuruus vaihtelee, tuo se lähtöön matalataajuista kohinaa ja pitkän aikavälin ryömintää.

Mekaanisen rasituksen tuomien häiriöiden välttämiseksi piirilevyn kiinnitys tulisi suunnitella siten, ettei se rasita levyä. Piirilevyyn voidaan myös jyrsiä aukot herkkien komponenttien ympärille, jolloin ne ovat eristyksissä piirilevyn kohdistuvilta rasituksilta. Piirilevy voidaan myös käyttää uunissa, jolloin lämpö poistaa kokoonpanovaiheessa levyyn syntyneitä stressitiloja. Tämän ”uunituksen” etuna on myös se, että referenssille voidaan suorittaa edellisessä kappaleessa esitetty sisäänajo samalla. Tyypillisesti tämä uunitus tarkoittaa laitteen käyttöä 125 °C:ssa 168 tuntia, mutta jos tavoite on pelkkä mekaanisen stressin helpotus, riittää lyhempikin aika, eikä laitteen tarvitse olla päällä. (Understanding and Applying Voltage References 1999, 6-7.)

3.6 Muut häiriönlähteet

Muita huomion arvoisia häiriönlähteitä ovat muun muassa ilmavirtausten aiheuttamat häiriöt, piirilevyllä olevien juoksutejäämien ja muiden epäpuhtauksien kautta kytkeytyvät häiriöt sekä laitteen ulkopuolelta kytkeytyvät häiriöt.

Ilman virtaus aiheuttaa lämpötilaeroja piirilevyllä, joka tuo liitosten muodostamien termoparien kautta matalataajuisia häiriöitä kytkentään. Etenkin tarkasti jossain lämpötilassa pidettävät komponentit ovat herkkiä lämpötilan muutoksille, joten ilmavirtaukset voivat aiheuttaa miljoonasosien muutoksia lähtöjännitteeseen. Tällaiset herkäät laitteet ja komponentit tulisikin suojata ilmavirtauksilta. (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 4.)

Piirilevyn pinnalle juotoksesta jäävä juoksute eli ”fluksi” näkyy kytkennässä impedanssina, jota pitkin häiriöt pääsevät kytkeytymään piirilevyllä. Esimerkiksi 100 M Ω juoksutteen kautta referenssipiirin trim-pinniin pääsevä virta riittää heittämään lähdon satoja miljoonasosia pieleen. (Understanding and Applying Voltage References 1999, 5-6.)

Hyvin koteloidussa jännitereferenssissä laitteen ulkopuolelta kytkeytyvät häiriöt eivät ole yleensä kovin suuri ongelma, sillä niiden taajuus on huomattavan paljon suurempi kuin laitteen toimintataajuus. Laitetta suunniteltaessa on kuitenkin hyvä ottaa huomioon käyttöympäristössä olevat häiriönlähteet. Esimerkiksi muuttuvia magneettikenttiä vastaan on vaikea suojautua, joten jos tiedetään laitteen joutuvan toimimaan kyseisen laisessa ympäristössä, täytyy myös suojaukseen kiinnittää huomiota asian mukaisesti.

Merkittävin laitteen ulkopuolella oleva häiriönlähde on sähköverkko. Jos laitteen täytyy toimia verkkovirralla, täytyy verkkohurinan ynnä muiden verkosta tulevien häiriöiden poistoon kiinnittää huomiota. Käytännössä tämä tarkoittaa hyvin suodatettua ja isoitua jännitelähdettä. Parhaaseen tulokseen päästään käyttämällä akkuja, jolloin sähköverkon häiriöistä ei tarvitse huolehtia.

4 SUUNNITTELU

Jännitereferenssin suunnitteluun ryhdyttiin, kun laitteiden testauksessa ja kalibroinnissa oli tarve 10 V referenssille. Jotta referenssiä voitaisiin käyttää erittäin tarkkoissa mittauksissa, asetettiin tavoite sen suorituskyvylle niin ylös, kuin kaupallisesti saatavilla komponenteilla ja järkevällä työmäärällä olisi mahdollista päästä. Tässä kappaleessa esitellään suunnitteluprosessi vaihe vaiheelta ja esitellään tuotettu jännitereferenssi.

4.1 Ominaisuuksien määrittely ja pääkomponenttien valitseminen

Referenssijännitteen suhteen tarve oli ainakin 10 voltille, mutta myös noin 1 V ja 0,1 V tulisi tarpeeseen. Referenssi rakenne päätettiin siten jakaa moduuleihin, jolloin yksi moduuli on itse referenssi ja sen perään voidaan kytkeä erilaisia jännitteen jakajia tai vahvistimia haluttujen jännitteiden tuottamiseksi. Laite tulisi myös toimimaan akuilla, jotta sitä voidaan liikutella ilman sen sähköjen katkaisua.

Kuten edellä mainittiin, haluttiin referenssiin tarkkuus ja stabiilius mahdollisimman suureksi. Ensimmäiseksi täytyikin siis määrittää, mille tarkkuustasolle käytettävissä olevilla resursseilla olisi järkevää pyrkiä. Paras suorituskyky saavutettaisiin Josephsonin referenssillä, mutta sen rakentaminen tarkoittaisi suprajohdeketjun valmistusta ja hyvin suuria kustannuksia. Tähän ryhtymistä ei nähty järkevänä, joten referenssi päätettiin toteuttaa puolijohdetekniikalla. Koska laitteen tärkein ja eniten tarkkuuteen vaikuttava komponentti on itse referenssipiiri, aloitettiin kytkennän suunnittelu sen valitsemisella.

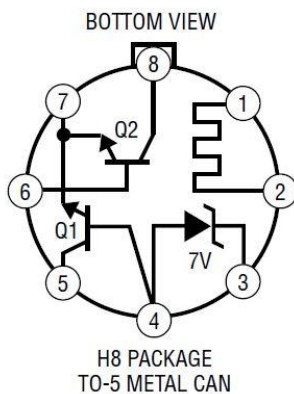
4.1.1 Referenssipiiri

Referenssipiiriksi valittiin Linear Technology:n LTZ1000A, sillä se on tarkin saatavilla oleva puolijohdereferenssi. Taulukossa 1 on valmistajan ilmoittamia ominaisuuksia sille.

Taulukko 1. LTZ1000:n ominaisuudet (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 1)

- Kohina $1,2 \mu V_{p-p}$
- Pitkän aikavälin stabiilius $2 \mu V/\sqrt{kHr}$
- Hyvin matala hystereesi
- Lämpötilakerroin $0,05 \text{ ppm}/^\circ C$
- Lämpötilastabiloitu
- Lämpöresistanssi $400 \text{ }^\circ C/W$ LTZ1000A piirillä
- Käyttölämpötila-alue $-55 \text{ }^\circ C - +125 \text{ }^\circ C$
- TO-99-kotelo

LTZ1000 pitää sisällään haudatun zener-diodin, jossa P-N-liitoksen aktiivialue on tehty piipalan sisään paremman stabiiliuden ja pienemmän kohinatason saavuttamiseksi. Piirissä on myös lämmitysvastus sekä kaksi transistoria lämpötilan mittausta ja lämpökerroimen pienentämistä varten (kuva 8).



KUVA 8. LTZ1000:n rakenne (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 2)

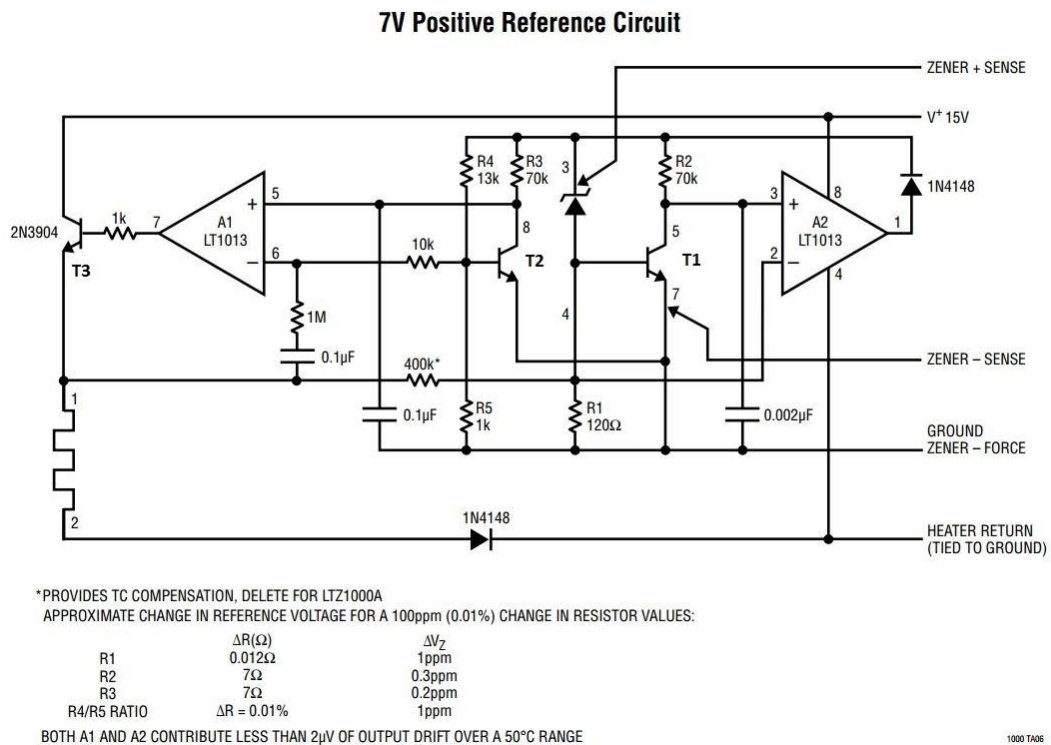
Piiri on TO-5-kotelossa ja siitä on saatavilla versiot LTZ1000 ja LTZ1000A. A-mallissa piisiru on lämpöeristetty paremmin ympäröivästä kotelostaan ja sen myötä myös ympäristön lämpötilan muutokselta. Tässä laitteessa päädyttiin käyttämään A-mallia juuri tästä syystä. (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 1.)

4.1.2 Muut komponentit

Koska referenssiipiiriä ympäröivä kytkentä vaikuttaa erittäin suuresti laitteen tarkkuuteen, pyrittiin komponenttien valinnoissa käyttämään mahdollisimman pienen lämpötilakertoimen ja kohinatason omaavia komponentteja. Operaatiovahvistimiksi valittiin Linear Technology:n LTC2057 sen pienen $0,015 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$:n lämpötilakertoimen ja vähäisen $200 \text{ nV}_{\text{p-p}}$:n kohinan takia (LTC2057 2013, 1). Vastuksina käytettiin Vishay:n VFCEP-sarjan tarkkuusvastuksia, joissa lämpötilakertoimeksi välillä $0 - 60^\circ\text{C}$ luvataan $0,05 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (Ultra High-Precision Z-Foil 2015, 2). Vähemmän kriittisten vastusten tapauksissa käytettiin tavallisia 1 % toleranssin vastuksia. Tarkkuutta vaativissa kondensaattoreissa käytettiin NP0-tyyppin keraamisia kondensaattoreita hyvän lämpötilakertoimen saavuttamiseksi. Muissa kondensaattoreissa käytettiin X7R-malleja.

4.2 Referenssimoduulin kytkennän suunnittelu

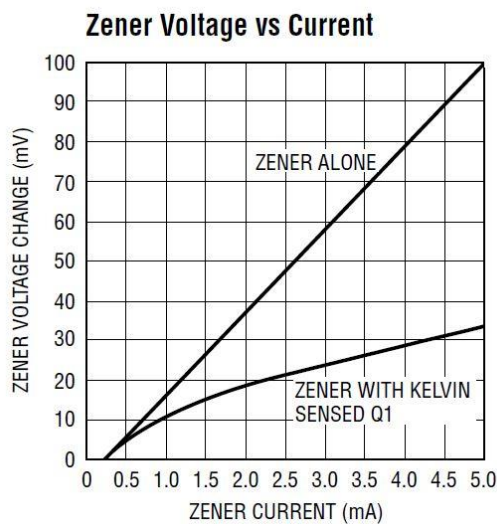
Kun käytettävä referenssiipiiri oli valittu, ryhdyttiin suunnittelemaan itse kytkentää. Pohjana päätettiin käyttää referenssiipiirin datalehdessä esitettyä kytkentää (kuva 9).



KUVA 9. LTZ1000:n esimerkkikytkentä (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 6)

Kuvan alalaidassa on myös esitettyä eri komponenttien epätarkkuuksien vaikutus koko kytkennän tarkkuuteen.

Kytkenän toimintaperiaate on seuraavan lainen: Operaatiovahvistin A2 pyrkii saamaan negatiivisen sisääntulonsa samalle tasolle positiivisen kanssa, joten se ajaa lähtöönsä riittävän suuren virran, että vastuksen R1 yli oleva jännite vastaa transistorin T1 CE-jännitettä. A2 toimii siis vakiovirtalähteenä, jonka virran suuruus asetetaan R1:llä. Ajamalla tämä virta zener-diodin läpi muodostuu siihen vakiojännite. Kuvassa 10 näkyy zener-jännitteen muutoksen suhde sen virtaan.



KUVA 10. Zener-jännitteen muutos virran suhteen (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 3)

Kuvan mukaisesti jo pieni muutos virrassa aiheuttaa merkittävän muutoksen jännitteessä. Tästä johtuen on tärkeää, että R1:n lämpötilakerroin on mahdollisimman pieni.

Varsinainen referenssijännite on zener-diodin ja transistorin T1 kanta-emitteri-jännitteen summa. Yksinään zenerin lämpötilakerroin on huono, noin $+2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Kanta-emitterivälin lämpötilakerroin on noin $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, joten kytkemällä nämä sarjaan lämpötilakertoimet kumoavat toisensa.

Operaatiovahvistimen A2 positiivisessa sisääntulossa olevan kondensaattorin tehtävä on kytkeä mahdolliset AC-signaalit maahan ja näin ollen estää kytkentää värähtelemästä.

Samoin vahvistimen lähdössä oleva diodi varmistaa, että virta kulkee varmasti vahvistimesta pois päin ja estää näin ollen värähtelyjä myös omalta osaltaan. Vastusten R2 ja R3 tehtävä on asettaa transistorien läpi kulkeva virta.

Kytkenän vasemmanpuoleinen osa pyrkii pitämään LTZ1000-piirin vakio-lämpötilassa. Vasemmassa alakulmassa näkyvä komponentti on LTZ1000-piirin sisältämä lämmitysvastus. Sitä ohjataan operaatiovahvistimen A1 lähtöön kytketyllä transistorilla T3. Lämpötila asetetaan vastuksilla R4 ja R5, joiden muodostaman jännitteen jaon suuruus asetetaan vastaamaan transistorin kanta-emitteri-jännitettä tavoitelämpötilassa.

A1:n negatiivisen takaisinkytkennän $1\text{ M}\Omega$:n vastus ja $0,1\ \mu\text{F}$ kondensaattori toimivat ylipäästösuotimina. Yhdessä $10\text{ k}\Omega$:n vastuksen kanssa ne laskevat A1:n vahvistuksen 150 desibelistä 40 desibeliin yli 1,6 hertsin taajuuksilla. Kytkennän alalaidassa oleva diodi pitää lämmitysvastuksen alaosan korkeammassa potentiaalissa kuin zener-diodin anodi. Tämä diodi tarvitaan, sillä LTZ1000-piirin rakenteesta johtuen zenerin anodin ja lämmitysvastuksen välillä on diodina toimiva P-N-liitos, jota ei saa päästää johtavaan tilaan (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 4). Tähdellä merkitty $400\text{ k}\Omega$:n vastus voidaan kytkeä kompensoimaan lämpötilakerrointa LTZ1000:n perusmallia käytettäessä, eikä sitä tarvita A-mallin kanssa sen paremman lämpöeristyksen ansiosta.

Valmis kytkentä on liitteessä 1. Esimerkkikytkennän osalta muutoksena ovat tulleet paremmat operaatiovahvistimet sekä eri transistori ja diodit. Esimerkkikytkennässä olevat LT1013-operaatiovahvistimet korvattiin LTC2057-vahvistimilla niiden yli kaksi dekadia paremman lämpötilakertoimen takia. Transistori korvattiin MMBT3904-mallilla ja diodit BAS16-malleilla, sillä niitä sattui olemaan hyllyssä ja ne soveltuivat käyttötarkoituksiinsa. Myös vastusten arvoja on hieman muutettu sen mukaan, mitä oli saatavilla. Piirin lämpötilan asettavassa vastusjaossa käytettiin esimerkkikytkennän suhdetta 13:1. Vastusjaon $13\text{ k}\Omega$:n tuottamiseen käytettiin $10\text{ k}\Omega$:n, $2\text{ k}\Omega$:n ja $1\text{ k}\Omega$:n vastusten sarjaankytkentää, koska $0,05\text{ ppm}/^\circ\text{C}$:n vastuksia ei saanut suoraa $13\text{ k}\Omega$:n kokoisena. Tällä jaolla lämpötila asettuu noin $60\text{ }^\circ\text{C}$:een, joka on reilusti ympäristön maksimilämpötilan yläpuolella (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 5). Käyttölämpötila voisi olla pienempikin, joten vastusarvoja saatetaan muuttaa vielä testauksen edetessä. Valmistaja ilmoittaa myös, että tuotannollisista vaihteluista johtuen lämpötila samalla jännitejaolla voi vaihdella $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ laitteiden välillä. Myös tästä syystä jännitejaon suuruus täytyy tarkastaa testauksen yhteydessä.

Itse referenssiipiirin ohjaukseen tarvittavan elektroniikan lisäksi kytkentään on laitettu jänniteregulaattori, jolla tuotetaan 10 V käyttö sähkö kytkennän operaatiovahvistimille ja lämmitysvastukselle. Jänniteregulaattorin suorituskyvystä lähinnä kohinataso on kiinnostava tässä yhteydessä, joten regulaattoriksi valittiin Linearin LT3042 sen matalan, 10 Hz – 100 kHz kaistalla olevan $0,8 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$ kohinajännitteen takia (LT3042 2015, 1).

Kytken lähtöön on myös lisätty puskurointi, joka on toteutettu LTC2057:llä sekä sen kanssa sarjaan lisätyllä virranajokykyä parantavalla LT1010:lla.

Referenssijännite otetaan ulos piirilevyltä 3 mm ruuviliitoksista. Tämä siksi, että voidaan testata tinajuotoksen lisäksi muidenkin materiaalien käyttöä liitoksen tekemiseen. Ruuviliitoksella saavutetaan lisäksi huomattavasti luotettavampi ja pienikohinaisempi liitos, kuin esimerkiksi jousiliittimillä. Kytkennässä maat on erotettu toisistaan ja jokaiselle on oma ruuviliitin, joiden kautta ne yhdistyvät yhdessä pisteessä. Tällä single-point menetelmällä pyritään minimoimaan lämmitysvastuksen sekä operaatiovahvistimien paluuvirtojen pääsyä häiritsemään referenssijännitettä. Se, onko maat parasta yhdistää käyttö- tai lähtöjännitteen nollapinnissä tai esimerkiksi kotelossa tullaan testaamaan, kun laitteesta saadaan ensimmäinen kokonainen versio valmiiksi.

4.3 Referenssimoduulin piirilevyn suunnittelu

Piirilevystä tehtiin ensin kaksikerroksinen kokeiluversio, jonka jälkeen tässä esiteltävässä viimeisimmässä versiossa päädyttiin nelikerroksiseen levyyn. Valmis piirilevy, sen kaikki kerrokset sekä 3D-malli ovat liitteissä 2 – 7.

Koska laitteen toiminnan kannalta on tärkeää, ettei referenssiipiirin lämpötila muutu, päätettiin se eristää muusta kytkennästä mahdollisimman hyvin. Piirin eristämiseksi sen ympäriltä poistettiin piirilevyä siten, että muodostui neljä 2,4 mm leveää ja noin 45 mm pitkä kaistaletta piirin ja muun kytkennän välille. Näiden kaistaleiden tarkoitus on eristää referenssiipiiri muun kytkennän lämpötilavaihteluilta ja piirilevyssä mahdollisesti olevilta mekaanisilta rasituksilta. Referenssiipiiri ympäröitiin myös 2,5 mm paksuilla kupariveidoilla tasaamaan lämpötilaeroja piirin ympärillä.

Piirilevyllä näkyvät 3 mm reiät REF+, REF-, AGND ja GND ovat referenssijännitteen ja maa-signaalien liitospaikat ja kulmissa ovat reiät piirilevyn kiinnityspaikat. Piirilevyn

ensimmäisellä kerroksella sijaitsee kaikki kytkennän komponentit sekä suurin osa signaalilivedoista. Ensimmäisen kerroksen tyhjiä alueita ei täytetty maatasolla, sillä levyllä ei esiinny korkeataajuisia signaaleja joiden kytkeytymistä viereiseen vetoon täytyisi estää. Lisäksi ensimmäisen kerroksen maataso täytyisi täyttää toisen kerroksen maatasoon menevillä läpiviennillä näiden pitämiseksi samassa potentiaalissa, josta koettiin olevan vain enemmän haittaa kuin hyötyä.

Toinen piirilevyn kerros täytettiin signaalimaalla AGND, jotta kytkennän herkimmillä paluuvirroilla olisi mahdollisimman matalaimpedanssinen reitti takaisin maahan. Referenssjännitteen maataso ja lämmitysvastuksen ja vahvistimien suurempivirtainen maataso erotettiin tästä tasosta häiriöiden pienentämiseksi. Kolmannella kerroksella sijaitsee käyttöjännitetaso, jonka kautta operaatiovahvistimet ja lämmitysvastus saavat virtansa. Neljännellä kerroksella sijaitsee suurempivirtainen maataso GND, sekä joitain signaalivetoja, jotka eivät mahtuneet ensimmäiselle kerrokselle.

Piirilevyn suunnittelussa pyrittiin siihen, että eteenkin herkimpien virtojen reitit olisivat mahdollisimman lyhyet ja pieni-impedanssiset. Komponenttien sijoitteluun kiinnitettiin paljon huomiota. Lähtöjännitteen puskurointi on sijoitettu alalaitaan hieman erilleen muista komponenteista. Jos muiden komponenttien lämpenemisen havaitaan vielä haittaavan puskurin toimintaa, voidaan piirilevyyn tehdä aukko näiden välille ja vähentää tällä lämpötilan siirtymistä. Todennäköisesti tähän ei tarvitse kuitenkaan ryhtyä, sillä ainoa komponentti minkä läpi kulkee merkittävästi virtaa, on lämmitysvastusta ohjaava transistori ja tämä on sijoitettu toiselle puolelle piirilevyä aivan ylälaitaan.

4.4 Ulostulon jännitteenjaon suunnittelu

Referenssikytken tuottama jännite 5 mA:n zener-virralla on noin $7,2 \text{ V} \pm 0,5 \text{ V}$ yksilöstä riippuen (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 2). Kun tähän lisätään vielä muiden kytkennän komponenttien toleranssien tuottamat virheet, kasvaa referenssjännitteen toleranssi entisestään. Lisäksi kytkennässä ei ole mitään keinoa jännitteen muuttamiseksi, joten pitkän aikavälin jänniteryömintöjä ei voida kalibroida pois. Voidaan siis todetaan, ettei tällä kytkennällä yksinään voida tuottaa tarkasti ennustettavaa ja säädettävissä olevaa jännitettä.

Tämä rakenne oli tietoinen valinta, sillä referenssiipiiristä haluttiin mahdollisimman yksinkertainen ja modulaarinen. Referenssikytkenän osalta riitti siis, että se tuottaa jonkin stabiilin jännitteen, josta myöhemmillä kytkennöillä generoidaan halutut jännitteet ulostuloon.

Referenssimoduulin suunnittelun jälkeen seuraava tehtävä olikin kytkennän suunnittelu, jolla referenssin tuottamasta jännitteestä saataisiin säädettyä tarvittavat jännitearvot tarkkuuden kärsimättä. Halutut ulostulojännitteet olivat ainakin 10 V, 1 V ja 0,1 V, mutta myös muille jännitearvoille tulisi olemaan mahdollisesti tarvetta. Rakenteesta päätettiin siten tehdä sellainen, että jokainen ulostulojännite tuotetaan omalla moduulilla. Näitä moduuleja voitaisiin kytkeä rinnan sen mukaan, montako eri jännitettä tarvitaan. Näissä ulostulomodueleissa tulisi myös olla keino lähtöjännitteen hienosäätämiseksi tulevia kalibrointeja varten. Myös sellaista rakennetta mietittiin, missä yksi vahvistin olisi nostanut jännitteen esimerkiksi 10 volttiin, josta se olisi jaettu vastusjaolla sopiviksi ulostuloiksi. Tätä ei nähty kuitenkaan järkevänä, sillä yhteen ulostuloon syntyvät virheet olisivat näkyneet kaikissa ulostuloissa ja uusien lähtöjännitteiden tuottaminen olisi ollut vaikeaa. Käyttämällä omaa moduulia jokaiselle ulostulolle saatiin toisistaan riippumattomat lähtöjännitteet, joiden määrää voidaan tarvittaessa kasvattaa lisäämällä moduuleita rinnan.

Ulostulomodueleista päätettiin suunnitella ensin vahvistin, jolla generoitaisiin haluttu 10 voltia. Vahvistimesta suunniteltiin vasta ensimmäinen versio, joten se tulee muuttumaan vielä tulevaisuudessa.

4.4.1 Ulostulovahvistimen kytkennän suunnittelu

Ulostulovahvistimen ensimmäisen prototyyppiversion kytkentä on liitteessä 8. Referenssiltä tuleva jännite kytketään ruuviliittimeen J2, jonka vieressä olevasta liittimestä J4 voidaan vetää johto seuraavan vahvistimen sisääntuloon. Referenssijännite säädetään LTC2057-operaatiovahvistimella ja sen negatiiviseen takaisinkytkentään lisätyllä tarkkuusvastusjaolla. Vastusjakoon asetettiin reilusti vastuspaikkoja, jotta haluttu jännite voitaisiin saavuttaa mahdollisimman tarkasti kiinteitä vastuksia käyttämällä.

Jännitteen hienosäätöä varten jakoon lisättiin säätövastus, jonka vaikutusta jakoon voidaan säätää sen ympärillä olevilla vastuksilla R8, R13 ja R18. Koska tarkimmissa saatavilla olevissa vastuksissa kokovalikoima on hyvin suppea, tullaan vastusjako toteuttamaan käyttäen sekaisin tarkkoja ja vähemmän tarkkoja vastuksia. Epätarkempien vastusten tuottaman virheen pienentämiseksi suurin osa jaosta toteutetaan tarkkoilla vastuksilla ja epätarkkoja käytetään pienemmän osuuden säätämiseen. Näin ollen epätarkkojen vastusten aiheuttama virhe vaikuttaa vain pieneen osaan jaettua jännitettä ja kokonaisvirhe pysyy pieneenä. Tässä yhteydessä virheellä tarkoitetaan lämpötilakerrointa, koska tarkalla vastuksen arvolla ei ole väliä jaossa olevan säätövastuksen ansiosta. Sen sijaan vastusarvojen pysyminen vakiona on erittäin tärkeää jännitteen vakiona pitämiseksi, joten pienen lämpötilakertoimen omaavia vastuksia tulee käyttää ensisijaisesti.

Vahvistimen lisäksi kytkentään on laitettu sama jänniteregulaattori ja ulostulon puskurointi, kuin referenssikytkennässä. Tässä tapauksessa regulaattorin lähtöjännite on asetettu vastuksella R1 12 volttiin, jotta vahvistin kykenisi tuottamaan 10 voltin ulostulojännitteen. Jännitereferenssin tavoin ulostulovahvistin saa käyttösähkönsä akuilta.

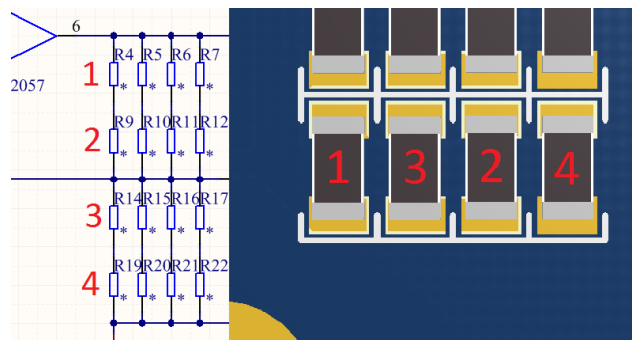
4.4.2 Ulostulovahvistimen piirilevyn suunnittelu

Vahvistimen piirilevyn suunnittelussa tavoitteeksi otettiin lämpötilaerojen minimoiminen eteenkin vastusjaossa. Vastusten lämpötilaerojen minimoiminen on erittäin tärkeää, sillä jos vastusten lämpötilat muuttuvat eri suhteessa myös niiden resistanssit muuttuvat eri suhteessa. Tämä vaikuttaa taas jännitejaon suuruuteen, joten vastukset täytyy pitää mahdollisimman tarkasti samassa lämpötilassa. Sillä, mikä tämä lämpötila on tai paljonko se vaihtelee, ei ole niin suurta merkitystä kunhan vastusten arvot muuttuvat samassa suhteessa.

Suunniteltu piirilevy, sen kaikki kerrokset ja 3D-kuvat ovat liitteissä 9 – 15. Vahvistinosio on suunniteltu samalla tavalla kuin referenssilevykin, eli komponentit ja suurin osa signaalivedoista ensimmäisellä kerroksella, signaalimaataso toisella, kohinaisempi maa kolmannella ja käyttöjännite neljännellä.

Vastusjako sen sijaan päätettiin erottaa muusta kytkennästä piirilevyyn tehtyjen aukkojen avulla. Tämä ei olisi välttämättä ollut tarpeellista kun ottaa huomioon, ettei piirilevyllä ole paljon lämpeneviä komponentteja. Varotoimenpiteenä tähän kuitenkin päädyttiin.

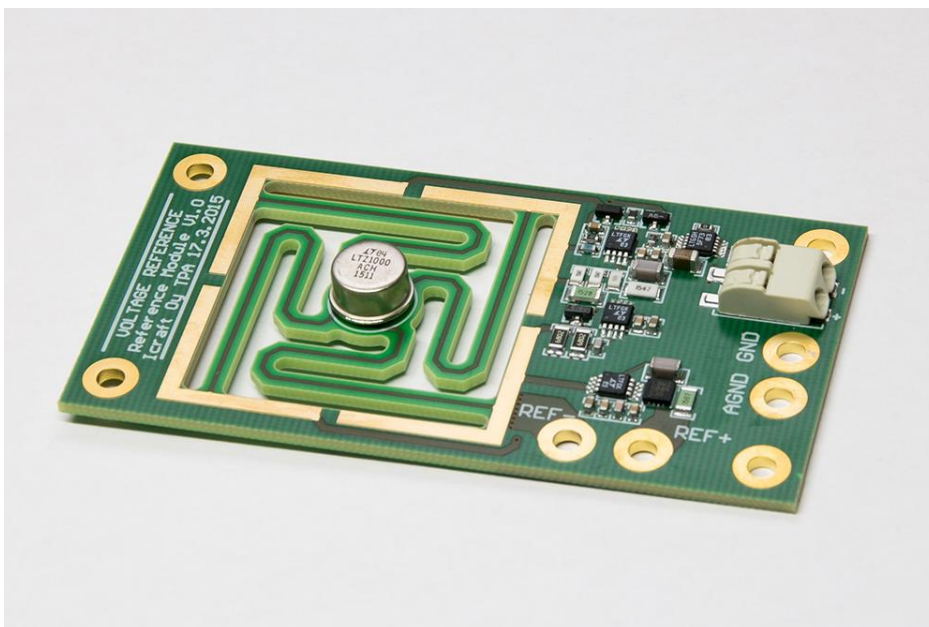
Vastusjaon ympärillä oleva alue täytettiin maatasolla jokaiselta kerrokselta ja alueelle lisättiin läpivientejä sekä neljä ruuvinreikää lämpötilojen tasaamiseksi. Ruuvinreiät lisättiin myös, sillä vastusten ympärille jyrsitään alumiinikotelo parantamaan lämmön siirtymistä. Koteloon voidaan myös tarvittaessa lisätä lämmitysvastus pitämään se huoneen lämpötilan vaihteluiden yläpuolella. Päällys- ja pohjakerroksen maatasoista poistettiin osittain juotteenestokerros paremman lämmönjohtuvuuden takaamiseksi. Vastusten pitämiseksi samassa lämpötilassa ne myös aseteltiin limittäin kuvan 11 osoittamalla tavalla. Tällöin jaossa vastakkain olevat vastukset saatiin levyille vierekkäin, mikä parantaa niiden pysymistä samassa lämpötilassa.



KUVA 11. Vastusjako

5 VALMIS REFERENSSILEVY JA SEN TESTAUS

Referenssimoduulin piirilevy tilattiin Brandner PCB:ltä ja kokoonpano suoritettiin itse. Valmis moduuli näkyy kuvassa 12.



KUVA 12. Referenssimoduuli

5.1 Jännitteet

Ulostulojännitteen mittaamiseksi käytettiin Keythleyn 2015 THD 6,5 numeron yleismittaria. Jännitteen mittaaminen tapahtui 10 voltin mitta-alueella, jolla sen resoluutio on 10 μV . Datalehdessä ilmoitetaan mittarin tarkkuudeksi vuosi kalibroinnin jälkeen 30 ppm lukemasta ja 5 ppm mitta-alueesta. (Model 2015/2015P THD Multimeter 2001, 238.) Mittari edellisestä kalibrointikerrasta oli jo 3,5 vuotta, joten mittaustulokset ovat lähinnä suuntaa-antavia.

Valmistaja ilmoittaa laitteen lämpenemisajaksi yhden tunnin, jonka jälkeen se on saavuttanut luvattun tarkkuutensa. Yleismittaria päädyttiin pitämään päällä kuitenkin useampi tunti ennen mittausta. Mittarin lämpiämisen jälkeen se näytti referenssimoduulin ulostulojännitteeksi 7,15722 V, joka vastaa odotettua noin 7,2 voltia. Referenssijännitettä mitattiin myös noin puolen tunnin ajan, jolloin mittarin lukema ei muuttunut.

Kytkenästä mitattiin myös muut jännitteet, jotka on merkitty liitteessä 1 olevaan kytkentään. Mittauksissa havaittiin muun muassa, että vastuksen R8 yli oleva jännite on noin 0,436 V, joka tarkoittaa noin 3,6 mA:n zener-virtaa. Yleismittarin lisäksi kytkennän jännitteet mitattiin Keysight:n DSOX3034A-oskilloskoopilla niiden stabiiliuden selvittämiseksi. Mittausten perusteella molemmat moduulin vahvistinkytkennät olivat stabiileja, eikä kytkennässä esiintynyt värähtelyä. Mittaukset tehtiin pian referenssin sähköjen päällekytkemisen jälkeen.

5.2 Lämpötila

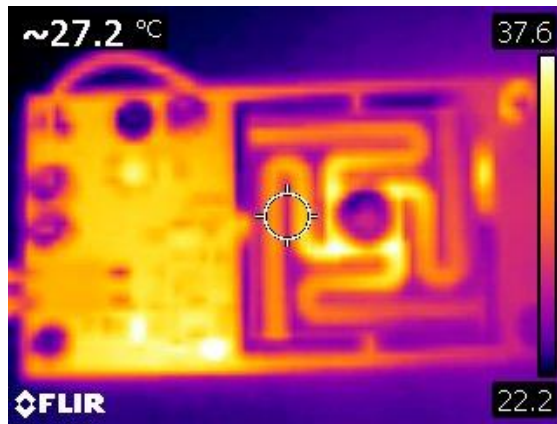
Piirilevyn eri osien lämpötilavaihteluiden vaikutusta kytkennän toimintaan testattiin kylmäsprayllä. Referenssipiirin jäähdytyksellä oli merkittävä vaikutus lähtöjännitteen suuruuteen, koska piirillä oleva lämmitysvastus ei ehdi reagoida nopeasti laskevaan lämpötilaan. Datalehdessä ilmoitetaan lämmitysvastuksen resistanssiksi noin 300 Ω , joten 10 V jännitteellä sen virta on maksimissaan 33 mA (LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference 2015, 2). Paremman reagointinopeuden saavuttamiseksi käyttöjännitettä täytyisi kasvattaa, jolloin myös akkujännitteen pitäisi olla suurempi. Tätä ei nähty kuitenkaan tarpeellisena, koska koteloituna referenssi tulee olemaan eristettynä ympäristön lämpötilan muutoksilta.

Referenssipiirin lisäksi ainut lämpötilan muuttuessa lähtöjännitteen suuruuteen vaikuttava komponentti oli puskuripiiri LT1010. Sen lämpötila ei vaikuttanut läheskään yhtä paljon ulostuloon kuin referenssipiirin, mutta asia vaatii vielä tarkempaa tarkastelua paremmalla koejärjestelyllä. Myös lähtöön kiinnitettyjen johtojen liitoksien lämpötilan vaikutusta ulostuloon testattiin, mutta käytettävissä olevissa mittalaitteissa ei riittänyt resoluutio muutoksen näyttämiseksi.

5.3 Piirilevyn rakenne

Piirilevyn rakenteen suhteen erityinen kiinnostuksen kohde oli referenssipiirin ympärillä olevat kaistaleet. Niiden tarkoituksena oli eristää piiri muun kytkennän lämpötilan muutoksilta sekä mekaanisilta rasituksilta, joten niiden toimintaa testattiin vääntelemällä piirilevyä ja katsomalla lämpökameralla lämpötilojen leviäminen levyllä.

Testien perusteella kaistaleet vaikuttivat tekevän tehtävänsä. Vääntelyllä ei ollut vaikutusta lähtöjännitteeseen ja piiri vaikutti olevan lämpötilan suhteen erillään muusta kytkennästä. Kuvassa 13 on lämpökameralla otettu kuva piirilevystä.



KUVA 13. Lämpökameralla otettu kuva referenssilevystä

Kuvan mukaisesti, lämpötila leviää tasaisesti referenssin ympärillä ja referenssiä ympäröivä paljas kupariveto hidastaa LTZ1000-piirin ja muun kytkennän välisen lämpötilaeron tasoittumista. Aivan oikeassa laidassa näkyvät lämpimämmät kohdat ovat heijastuksia paljaasta metallista, joten ne voidaan jättää huomiotta. Kuvanottohetkellä kytkentä oli ollut päällä vasta hetken, joten ajan kuluessa lämpötila kyllä tasaantuu piirilevyllä. Tämä ei kuitenkaan haittaa, sillä referenssipiirin eristämisen ansiosta lämpötilan muutos leviää hitaasti ja lämmityspiiri ehtii siten reagoimaan tarpeeksi nopeasti.

6 JATKOSUUNNITTELU

Ulostulovahvistimen ja jännitteenjaon suunnittelun lisäksi jännitereferenssiä varten suunnitellaan vielä tehonsyöttö sekä mekaniikka. Referenssin on tarkoitus toimia akuilla, joissa tulisi olla kapasiteettia riittävästi pitämään laite toiminnassa esimerkiksi kalibroita- vaksi kuljettamisen ajan. Näitä akkuja varten täytyy suunnitella myös laturi. Koska lai- tetta halutaan voida käyttää myös sen ollessa latauksessa, täytyy laturin suunnittelussa kiinnittää paljon huomiota sähköverkosta tulevien häiriöiden poistoon.

Mekaniikan suhteen alustava suunnitelma on, että referenssimoduuli on omassa lämpö- eristeellä täytetyssä kotelossaan. Tähän koteloon tuodaan sisään akuilta tuleva käyttöjän- nite ja otetaan ulos referenssijännite ulostulon vahvistimille ja jakajille. Akkujen, laturin ja ulostulopiirien koteloinnista ja eristyksestä ei ole päätetty vielä, mutta koko koko- naisuus tullaan sijoittamaan yhden kotelon sisään. Tämän kotelon takapaneeliin tulee lii- täntä joko verkkovirrälle tai teholähteelle ja etupaneeliin liitännät ulostulojännitteelle sekä mahdolliselle kaapeleiden häviöitä kompensoivalle sense-ominaisuudelle. Ulostulo- jen säätöä varten kotelo täytyy avata, jolloin päästään käsiksi jännitteet asettavien mo- duulien trimmausvastuksiin.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä oli tarkoituksena suunnitella stabiili jännitereferenssi. Laitteeseen suunniteltiin, toteutettiin ja testattiin kiinteän jännitteen antava referenssimoduuli. Laitteeseen suunniteltiin myös ulostulojännitteen säätävän vahvistinmoduulin kytkentä ja piirilevy, joita ei kuitenkaan tilattu vielä.

Laitteen suunnittelussa lähdettiin liikkeelle ominaisuuksien määrittelystä. Referenssi päätettiin toteuttaa puolijohdetekniikalla sen yksinkertaisuuden ja pienten kustannusten takia. Saatavilla olevista puolijohdereferensseistä valittiin parhaimmiston kuuluva Linear Technologyn LTZ1000A-referenssiipiiri. Piirin hinta oli suunnitteluhetkellä alle 60 euroa, joten kustannukset pysyivät huomattavasti pienempänä, kuin mitä ne olisivat olleet esimerkiksi Josephsonin referenssin kanssa. Muissa kytkennän komponenteissa käytettiin myös laadukkaita malleja.

Kytkenän pohjana käytettiin LTZ1000-referenssiipiirin datalehdessä esitettyä esimerkkikytkentää, johon lisättiin tarvittavat komponentit käyttöjännitteen regulointia ja lähtöjännitteen puskurointia varten. Alustavien testien perusteella kytkentä vaikuttaa hyvältä, mutta eteenkin lämmityskytkennän toimintaa täytyy testata vielä lisää. Myös parasta paikkaa yhdistää eri maasignaalit täytyy testata, kun laiteen kaikki osat valmistuvat.

Piirilevyn suunnittelussa tavoitteeksi otettiin referenssiipiirin eristäminen muusta kytkennästä lämpötilan ja mekaanisten rasitusten suhteen. Referenssin ympärille tehtiin ohuet kaistaleet, joilla se yhdistettiin muuhun piirilevyyn. Tämä ratkaisu vaikuttaa toimivalta ja piirilevyn lopputulokseen ollaan toistaiseksi muutenkin tyytyväisiä.

Referenssimoduulin toimintaa mitattiin Keithleyn 2015 THD 6,5 numeron yleismittarilla sekä Keysight:n DSOX3034A-oskilloskoopilla. Yleismittarin annettua lämmittä muutama tunti, se näytti referenssin lähtöjännitteeksi 7,15722 V, joka vastaa odotettua noin 7,2 voltin jännitettä. Kytkennästä mitattiin myös muut jännitteet, jotka vastasivat odotettuja arvoja. Oskilloskoopilla mitattaessa kytkennässä ei myöskään havaittu värähtelyjä.

Kytkenästä testattiin myös kylmäsprayllä eri komponenttien lämpötilan muutosten vaikutus lähtöjännitteeseen. Suurin vaikutus oli referenssiipiirin jäädyttämisellä ja muista kytkennän osista vain puskuriipiiri vaikutti lähtöjännitteeseen merkittävästi.

Jännitereferenssin ulostulovahvistimesta suunniteltiin ensimmäinen versio kytkennästä sekä piirilevystä. Piirilevyä ei kuitenkaan tilattu vielä, sillä kytkentä vaatii vielä jatko-suunnittelua. Etenkin se, tulisiko vastusjako erottaa muusta kytkennästä lämpötilan suhteen vai pyrkiä pitämään samana, vaatii lisää miettimistä. Lisäksi kytkentään saatetaan lisätä sense-ominaisuus ulostulosta lähtevien johtojen häviöiden kompensoimiseksi.

Laitteeseen tullaan suunnittelemaan vielä ulostulon vahvistimen lisäksi jonkinlainen jännitteenjakaja, jolla ulostuloon saadaan myös referenssiä pienempiä jännitteitä. Lisäksi laitteeseen tehdään käyttöjännitteiden syöttö akuista sekä näiden latauspiiri. Myös kotelointi tullaan suunnittelemaan.

LÄHTEET

Josephson effect. Laboratoire national de métrologie et d'essais. Luettu 4.5.2016.
http://www.lne.eu/en/r_and_d/electrical_metrology/josephson-effect-ej.asp

Linear Technology. 2015. LTZ1000/LTZ1000A Ultra Precision Reference. Luettu 14.3.2016. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/1000afe.pdf>

Tang, Y., Belecki, N. B., Mayo-Wells, J. K. A Practical Josephson Voltage Standard at One Volt. Luettu 11.4.2016. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/sp958-lide/315-318.pdf>

Texas Instruments. 2014. LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. Luettu 24.4.2016.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>

Linear Technology. 2015. LT3042 20V, 200mA, Ultralow Noise, Ultrahigh PSRR RF Linear Regulator. Luettu 17.4.2016. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3042fa.pdf>

Linear Technology. 2013. LTC2057/LTC2057HV High Voltage, Low Noise Zero-Drift Operational Amplifier. Luettu 17.4.2016.
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2057f.pdf>

Linear Technology. 1999. Understanding and Applying Voltage References. Application Note 82. Luettu 21.12.2015. <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an82f.pdf>

Whelan, B. 2009. How to Choose a Voltage Reference. Linear Technology magazine 3/2009. <http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTMag-V19N1-03-References-BrendanWhelan.pdf>

Ott, H., W. 1988. Noise reduction techniques in electronic systems. New York: John Wiley & Sons Ltd.

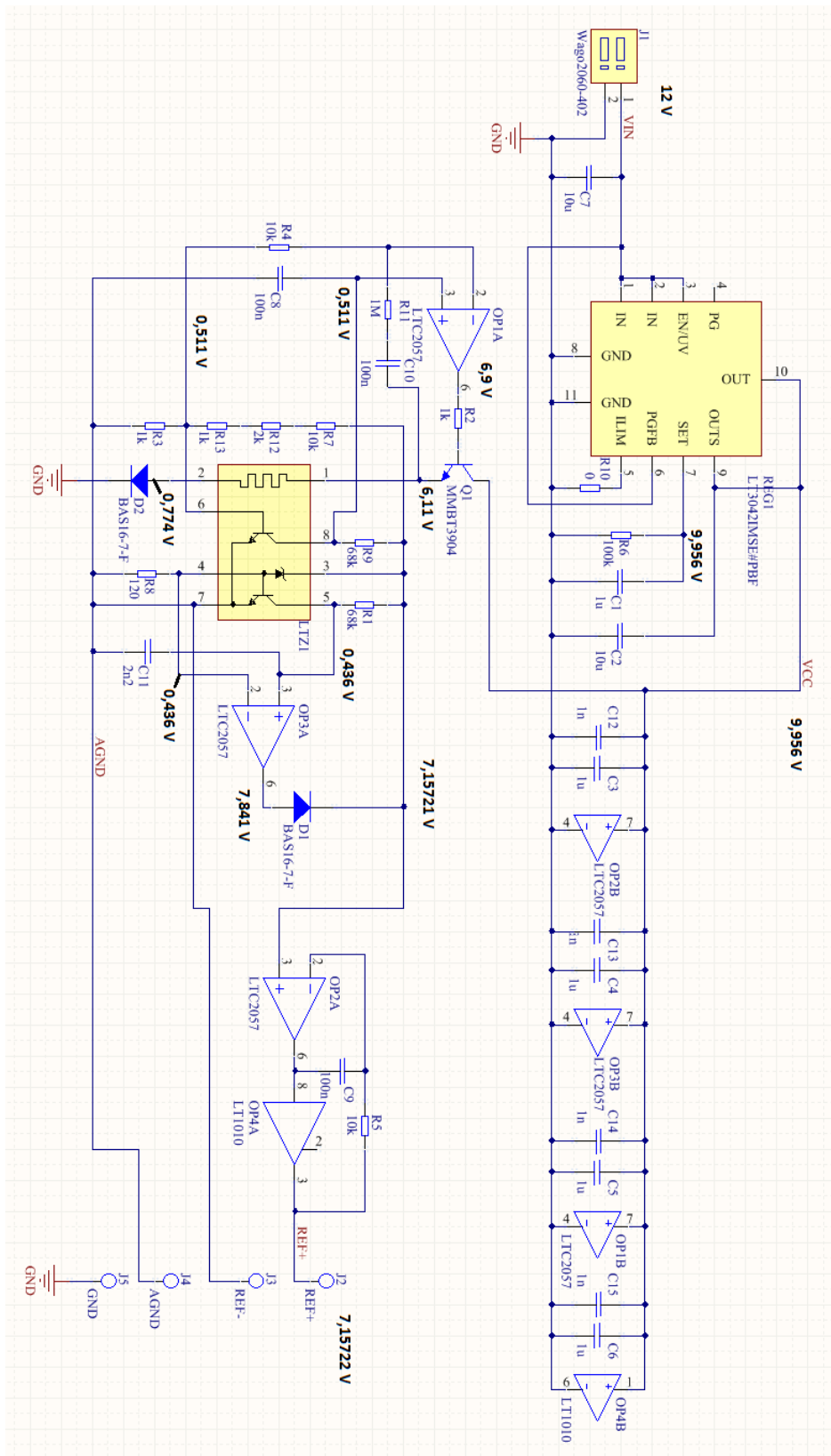
Texas Instruments. 2013. LM78XX Series Voltage Regulators. Luettu 25.4.2016.
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7805c.pdf>

Keithley. 2001. Model 2015/2015P THD Multimeter User's Manual. Luettu 8.5.2016.
<http://exodus.poly.edu/~kurt/manuals/manuals/Keithley/KEI%202015,%202015P%20User.pdf>

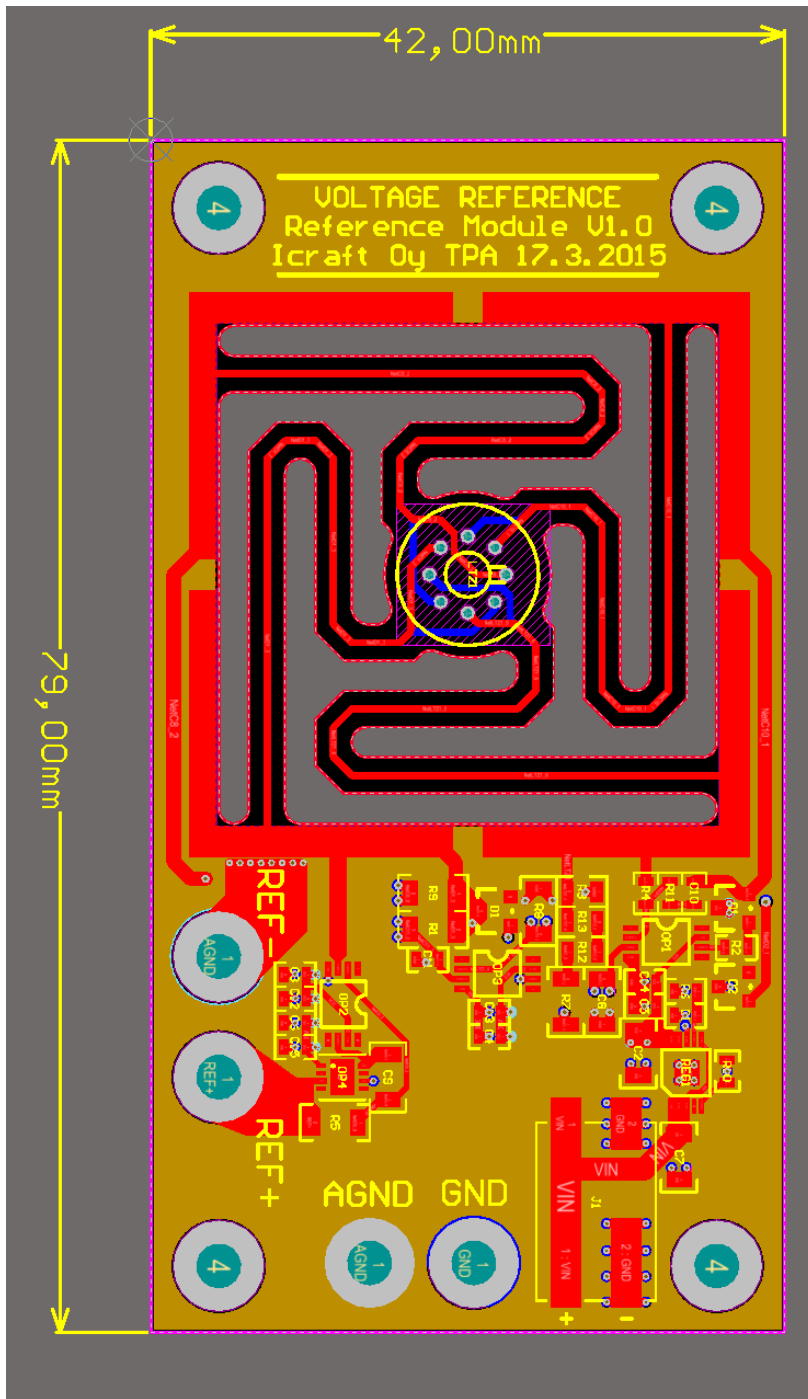
Vishay Foil Resistors. 2015. Ultra High-Precision Z-Foil Flip Chip Resistor. Luettu 8.5.2016. <http://www.vishaypg.com/docs/63106/VFCP.pdf>

LIITTEET

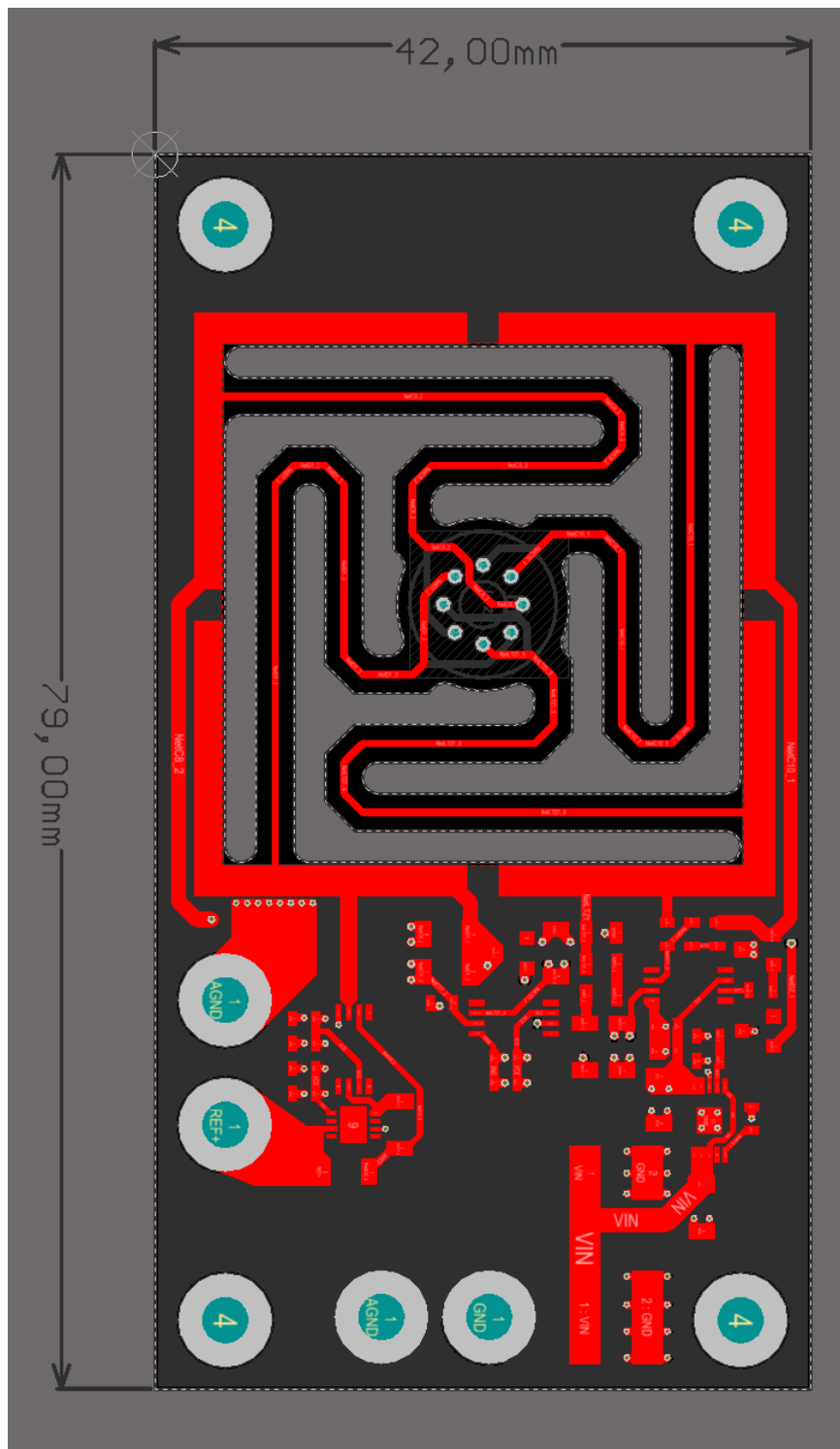
Liite 1. Referenssimoduulin kytkentä



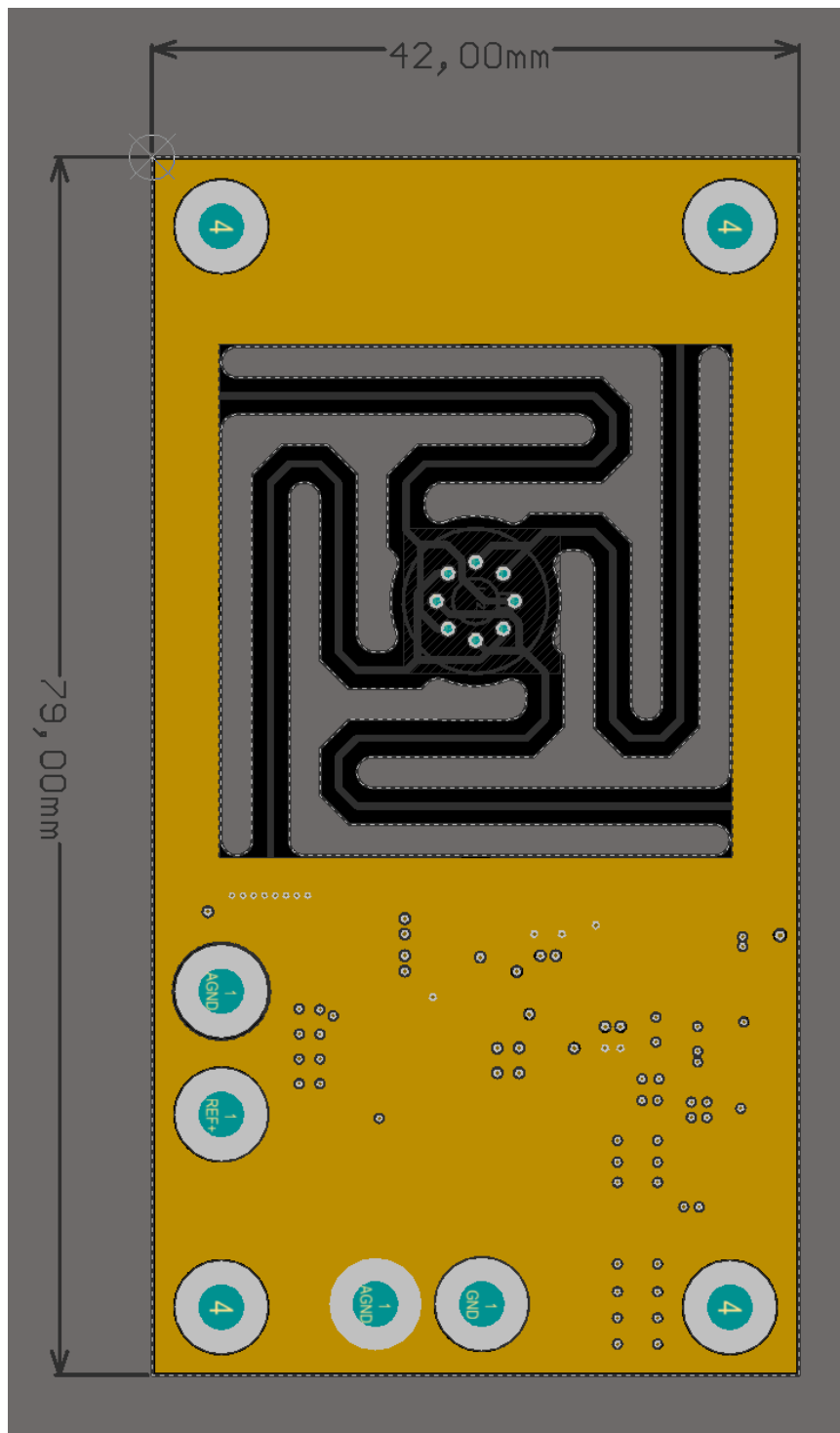
Liite 2. Referenssimoduulin piirilevy



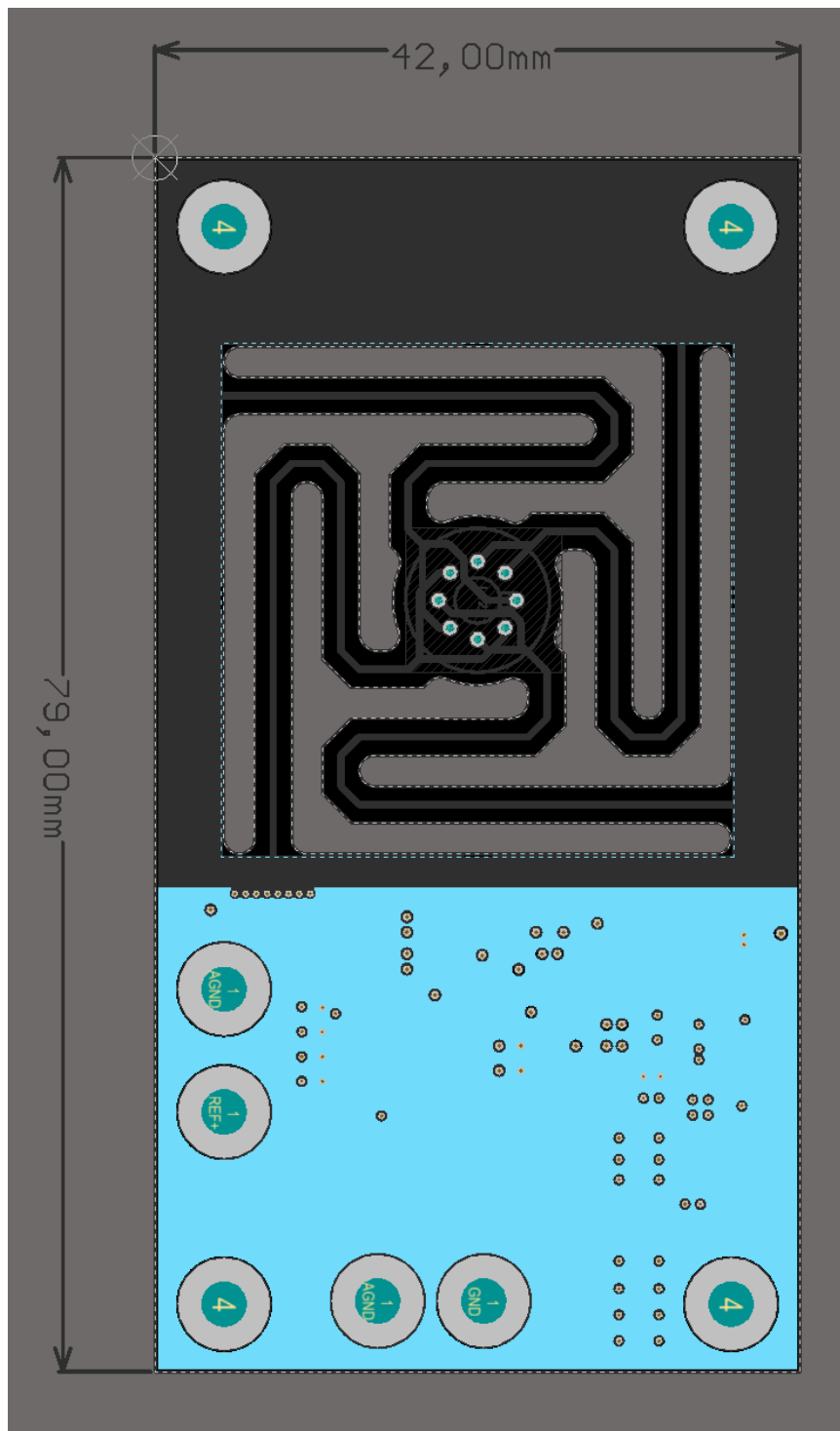
Liite 3. Referenssimoduulin 1. kerros



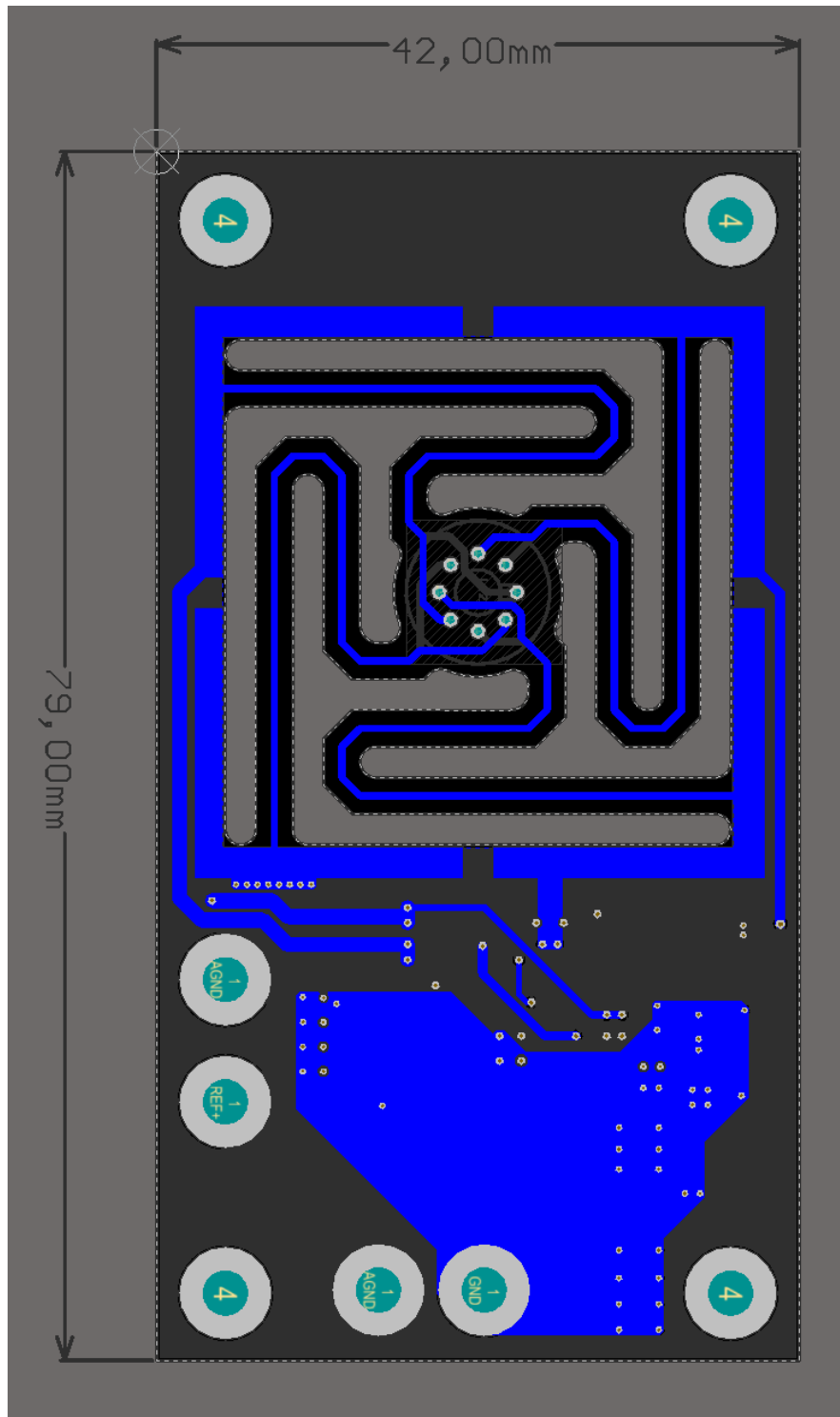
Liite 4. Referenssimoduulin 2. kerros



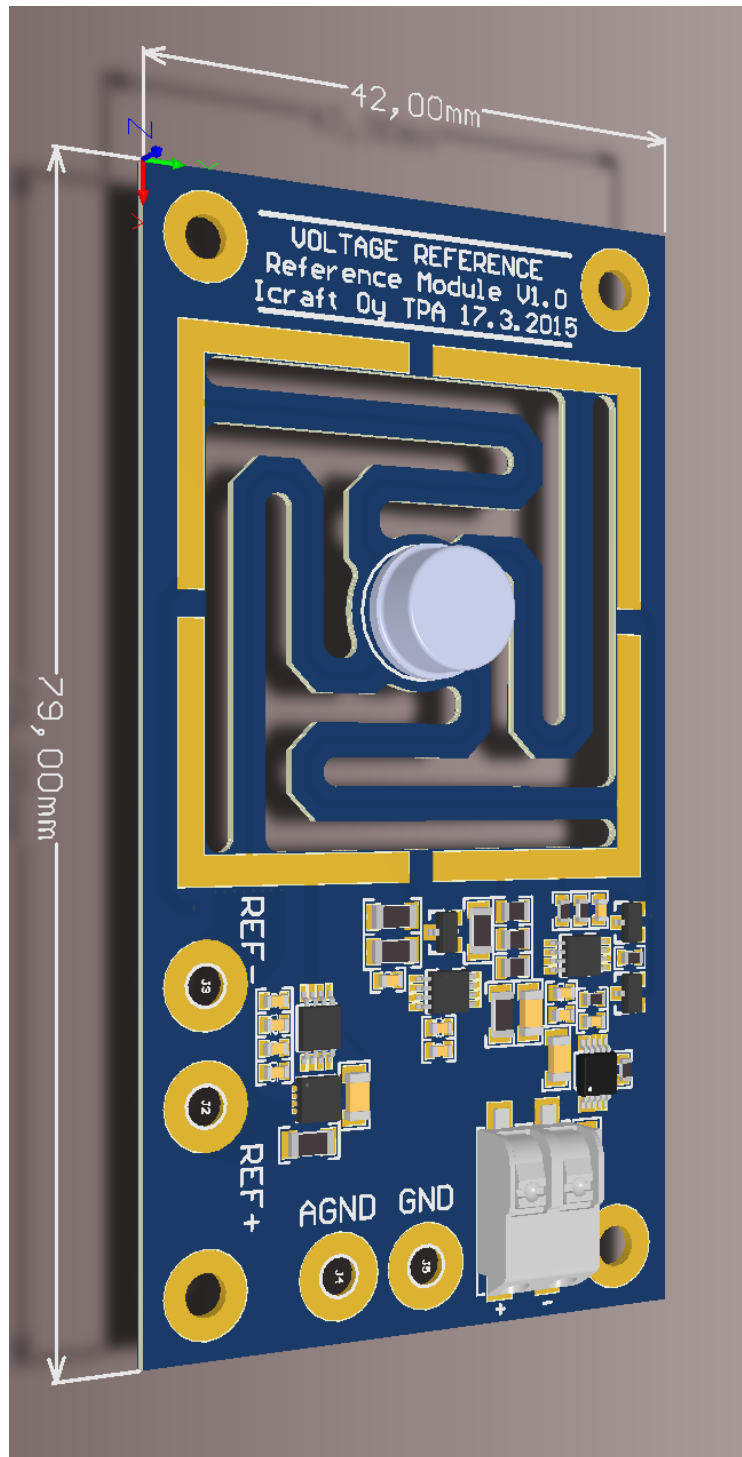
Liite 5. Referenssimoduulin 3. kerros



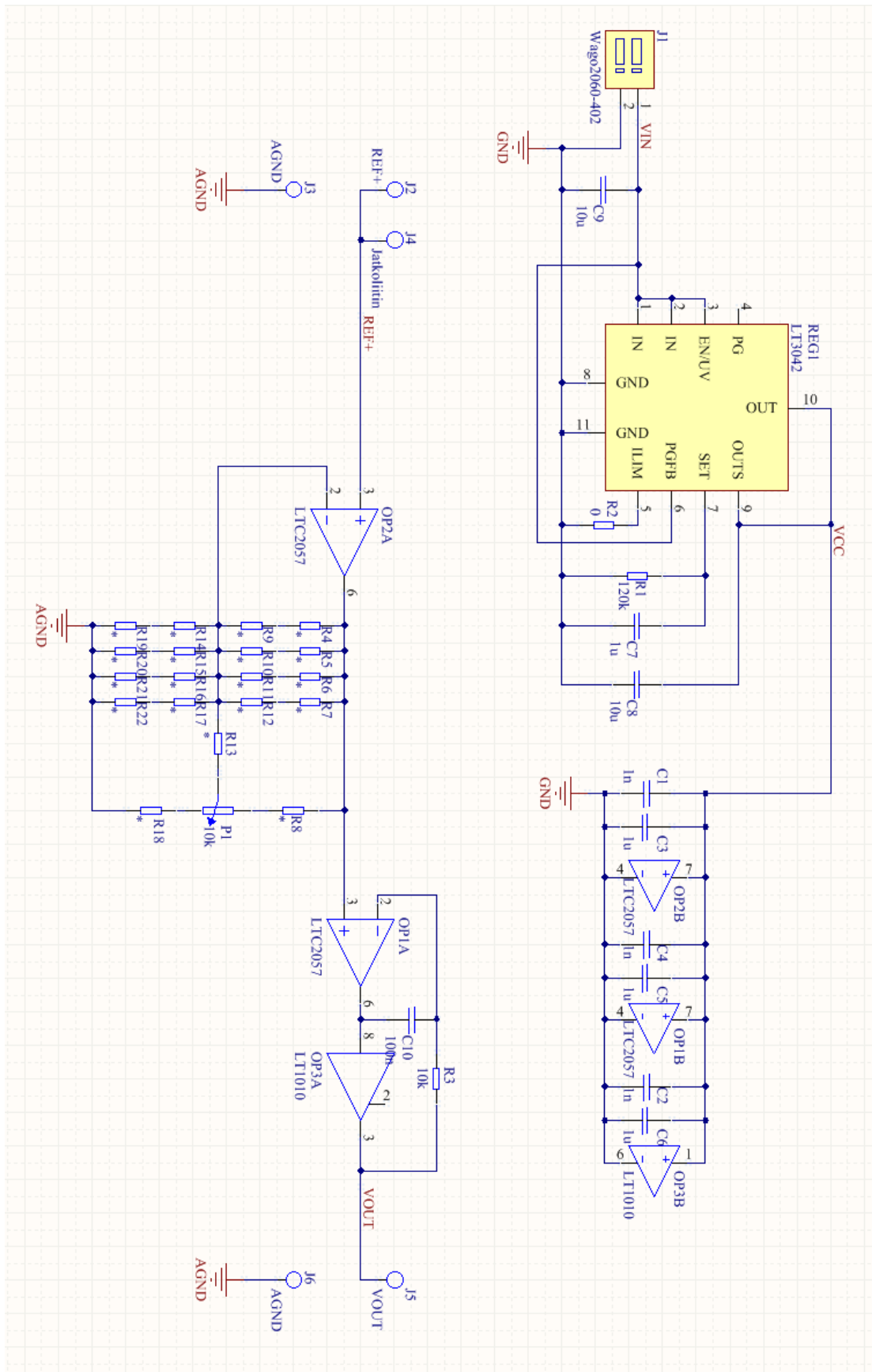
Liite 6. Referenssimoduulin 4. kerros



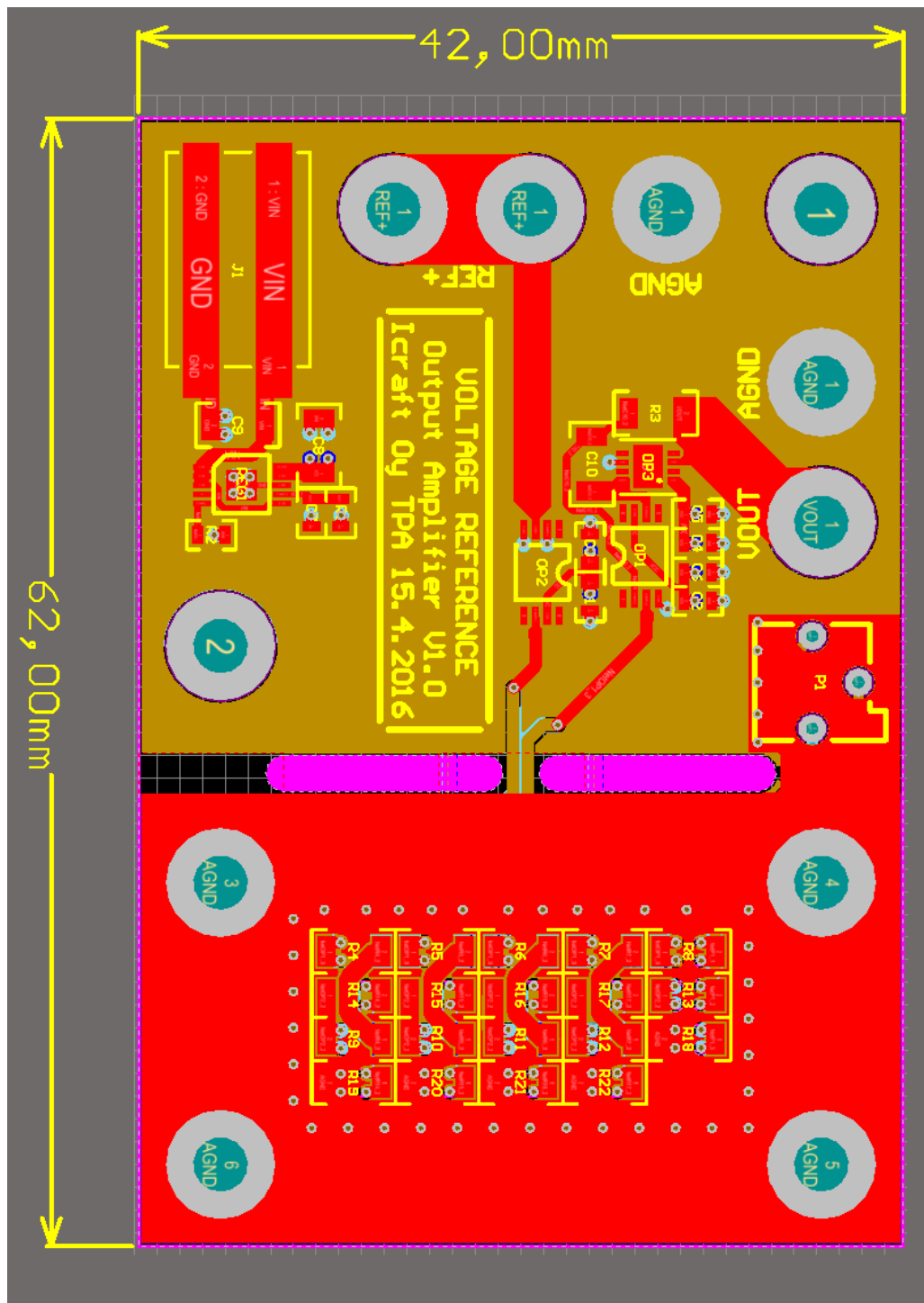
Liite 7. Referenssimoduulin 3D-malli



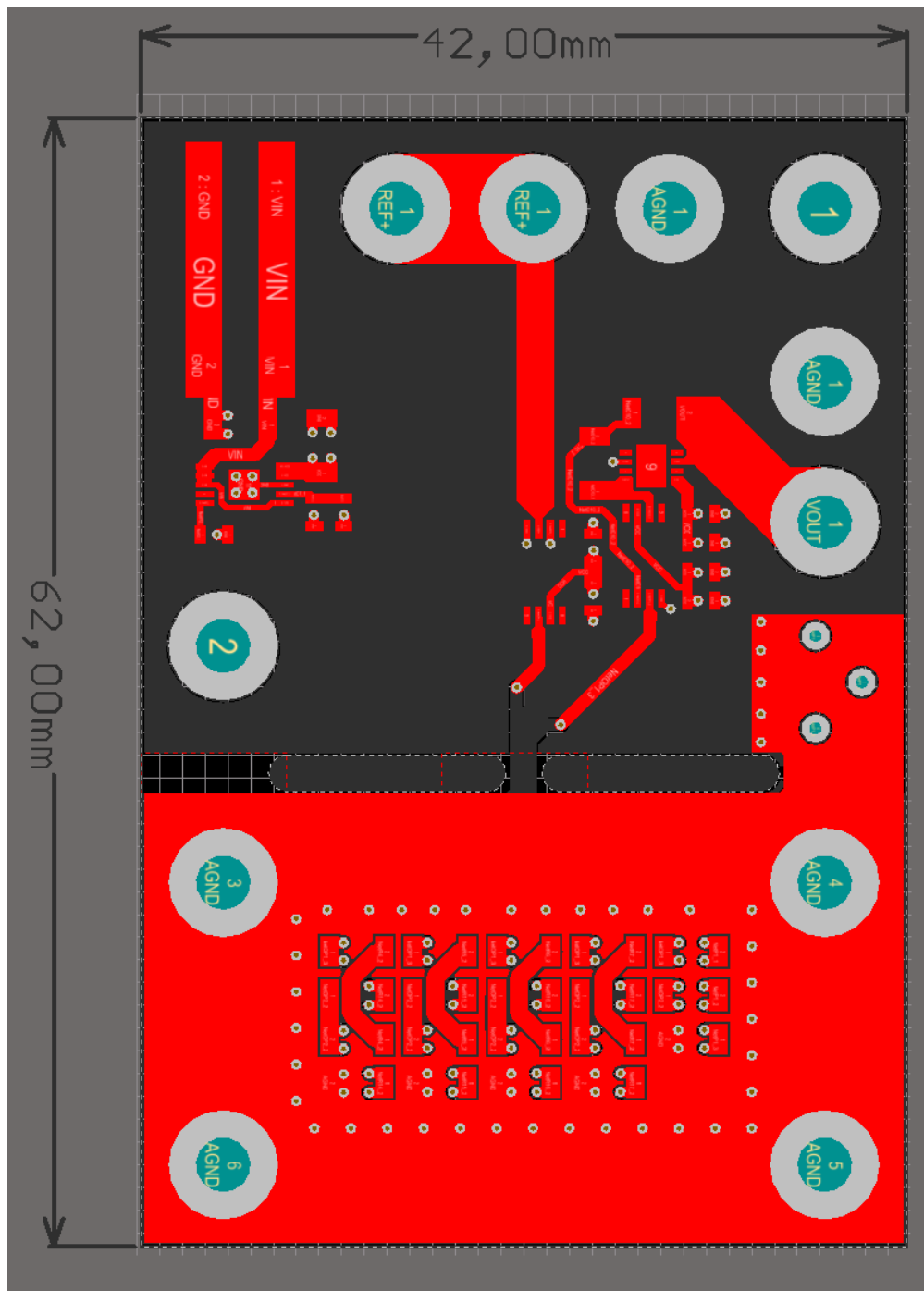
Liite 8. Ulostulovahvistimen kytkentä



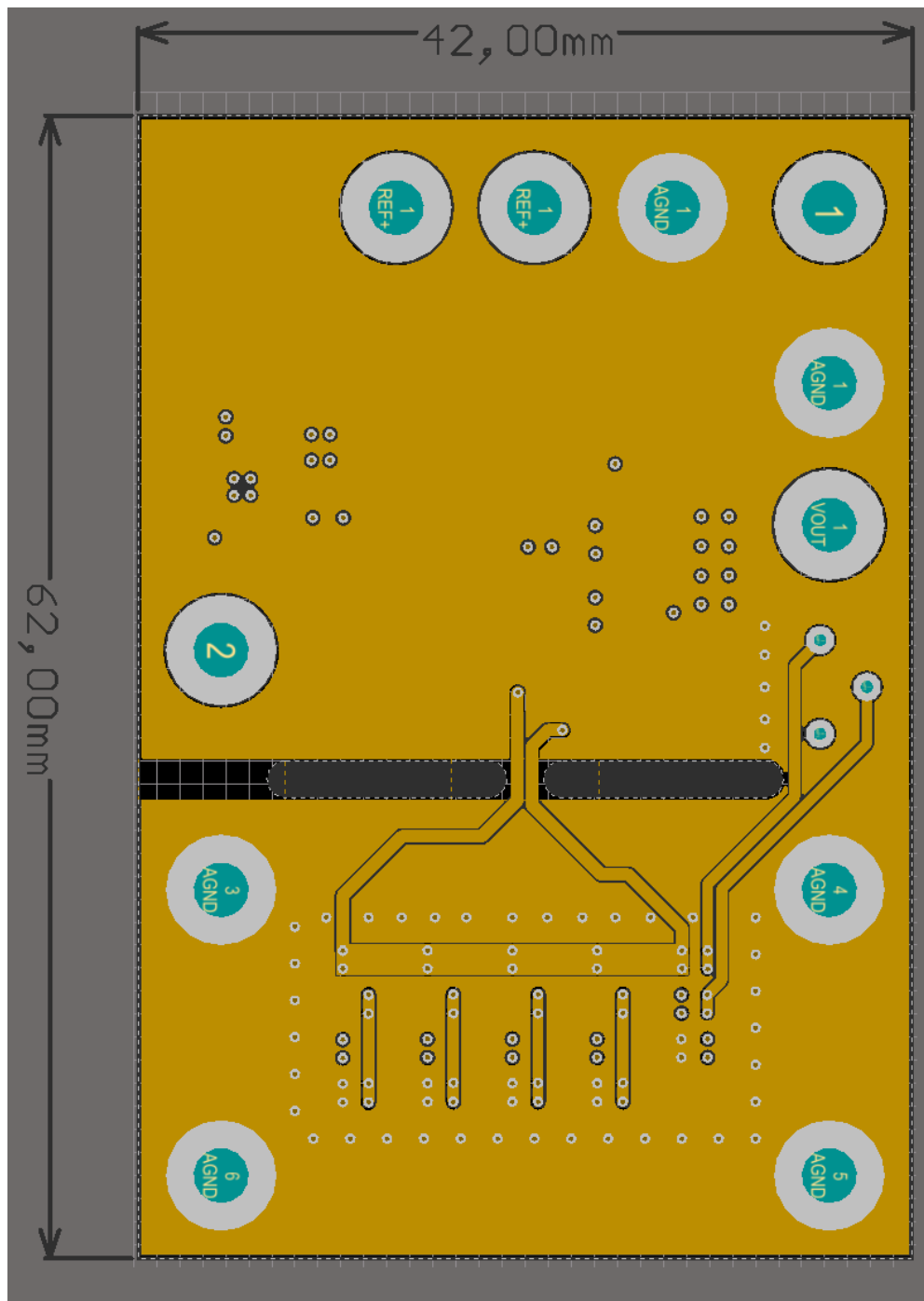
Liite 9. Ulostulovahvistimen piirilevy



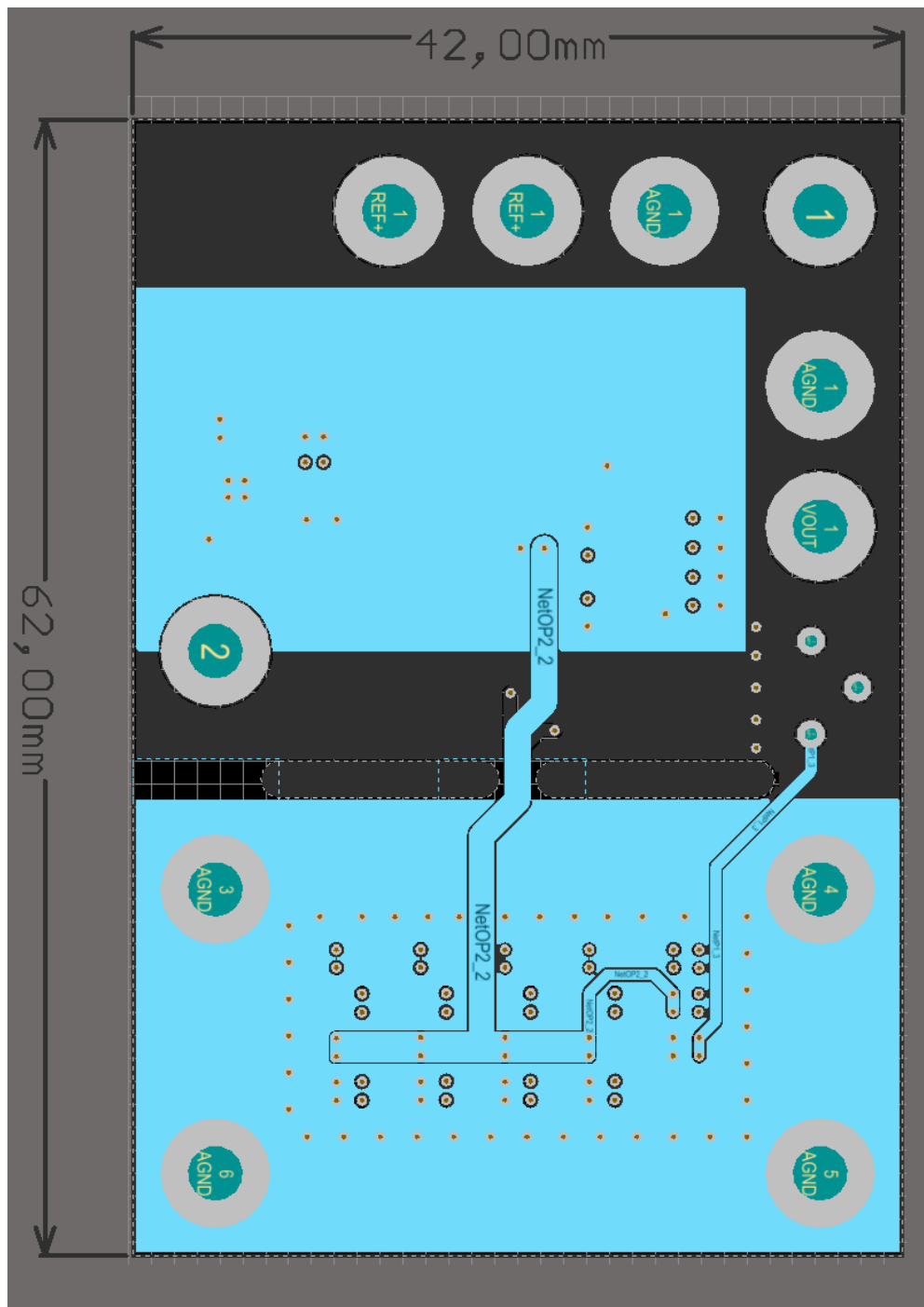
Liite 10. Ulostulovahvistimen piirilevyn 1. kerros



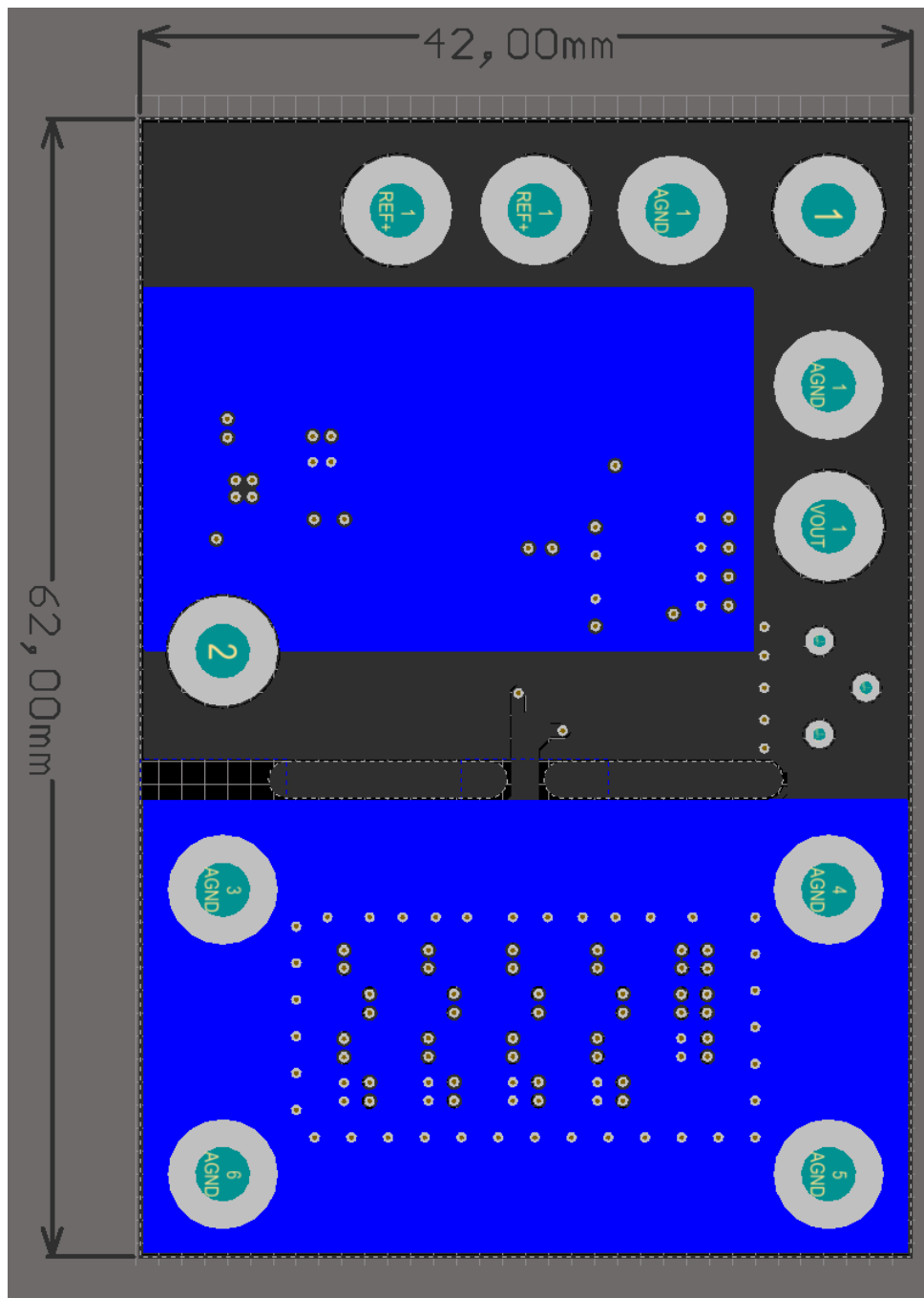
Liite 11. Ulostulovahvistimen piirilevyn 2. kerros



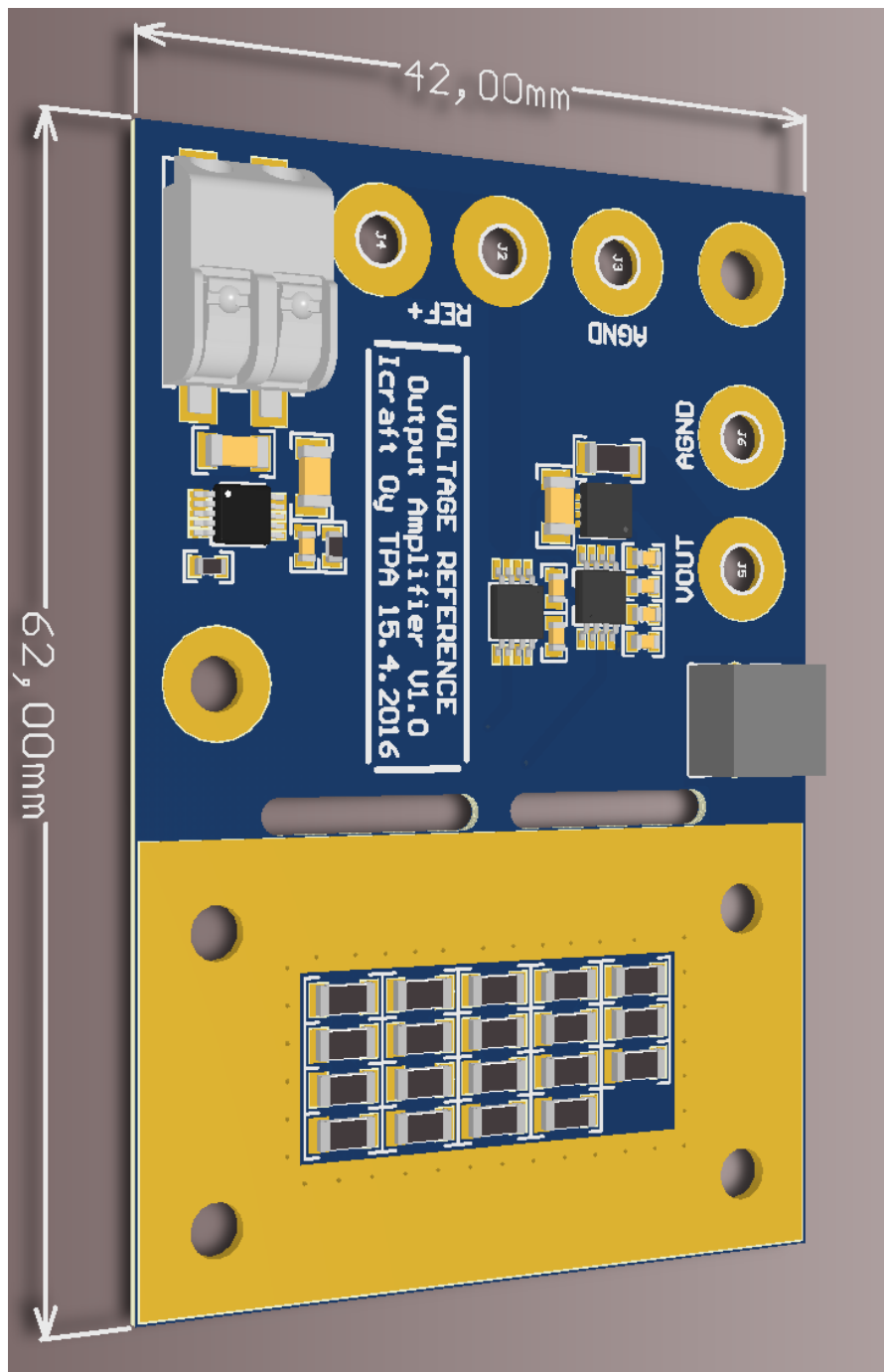
Liite 12. Ulostulovahvistimen piirilevyn 3. kerros



Liite 13. Ulostulovahvistimen piirilevyn 4. kerros



Liite 14. Ulostulovahvistimen piirilevyn 3D-kuva päältä



Liite 15. Ulostulovahvistimen piirilevyn 3D-kuva alta

