



# Galvaanisesti eristetty moni-kanavainen termoparimittari

Olga Virtaniemi

OPINNÄYTETYÖ  
Toukokuu 2021

Tieto- ja viestintäteknikan tutkinto-ohjelma  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tieto- ja viestintätekniikan tutkinto-ohjelma  
Sulautetut järjestelmät ja elektroniikka

VIRTANIEMI, OLGA:  
GALVAANISESTI ERISTETTY MONIKANAVAINEN TERMOPARIMITTARI

Opinnäytetyö 38 sivua, joista liitteitä 2 sivua  
Toukokuu 2021

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli toteuttaa galvaanisesti eristetty monikanavainen termoparimittari. Työssä suunniteltiin ja rakennettiin galvaanisesti eristetty monikanavainen termoparimittari, jolla mitataan lämpötila  $-10$  ja  $-200$  °C:n välisellä alueella K-tyyppisellä termoparilla ja joka toimii Raspberry Pi:n yhteydessä.

Opinnäytetyöraportissa käydään läpi termoparien teoriaa. Termopari on lämpötila-anturi, jonka toiminta perustuu lämpösähköilmiöön. Anturi soveltuu erittäin laajalle mittausalueelle ja haastaviin käyttöympäristöihin. Ominaisuuksiensa ansiosta termoparista on tullut suosittu teollisuudessa.

Laite suunniteltiin toimeksiantajan antaman määritelmän perusteella. Työssä avataan, mihin osiin laitteen rakenne perustuu ja selitetään kytkennässä käytettyjen komponenttien tehtävät ja toimintaperiaatteet. Termoparilta saatu jännitesignaali menee vahvistimelle, jossa jännite vahvistetaan 330-kertaiseksi. Vahvistettu signaali muunnetaan digitaaliseksi ja isolaattorin kautta lähetetään Raspberry Pi:lle. Isolaattorin rooli on tässä laitteessa tärkeä, sillä se tuottaa turvallisuutta ennen kaikkea käyttäjälle.

Piirilevysuunnittelu ja osasijoittelu toteutettiin PADS-ohjelmiston avulla. PADS on Mentor Graphicsin maksullinen piirilevysuunnitteluohjelmisto, joka on laajasti käytössä elektroniikan suunnittelussa Suomessa.

Mittarin toimivuus todettiin laboratoriossa oskilloskoopilla ja yleismittarilla tehdyissä testeissä. Mittaustulokset osoittivat, että laite on toimiva ja täyttää toimeksiantajan vaatimukset. Laitteen vaatimukset saavutetaan valitsemalla komponentit, joiden toleranssit ovat mahdollisimman pienet. Esimerkiksi käytetyt vastukset on valittu toleranssilla  $\pm 1\%$ . A/D-muunnoksen tarkkuutta on parannettu koodilla, joka suoran yhtälön avulla kalibroi mittaustuloksia.

Valmis laite voidaan koteloida tai sitä voidaan käyttää laboratoriomittauksissa sellaisenaan. Laite on Huld Oy:n omaisuutta.

---

Asiasanat: termopari, termoelementti

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Program in ICT Engineering  
Embedded Systems and Electronics

VIRTANIEMI, OLGA:  
GALVANICALLY ISOLATED MULTICHANNEL THERMOCOUPLE THERMOMETER

Bachelor's thesis 38 pages, appendices 2 pages  
May 2021

---

The purpose of the thesis is to create a galvanically isolated multichannel thermocouple thermometer. The thermometer will be used in the electronics laboratory of the company Huld Ltd.

The beginning of the study is dedicated to the theory of thermocouples. A thermocouple is a sensor used to measure temperature and it can be applied to extremely high temperature measurements.

The thesis describes how the printed circuit board (PCB) was designed, what the main components are and what role they play in the circuit. The circuit is based on a differential amplifier, which amplifies the signal coming from the thermocouple, an AD converter, which converts the signal from analog to digital form and a digital isolator, which provides safety.

The PCB was designed with PADS design software. PADS Logic was used to create the schematic and PADS Layout for making the PCB's layout. The software and a license were provided by Huld Ltd.

After the PCB's production, it was tested in Huld's laboratory with an oscilloscope, a multimeter and scripts. During the tests, the amplification of the circuit, AD converter's functionality and I<sup>2</sup>C bus's traffic were checked. The tests have demonstrated that the device is working well and is suitable for internal measurements. The thermometer is the property of the company.

---

Key words: thermocouple

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	TERMOPARI .....	8
	2.1 Seebeck-ilmiö.....	8
	2.2 Termoparien tyypit .....	9
	2.3 Termoparien edut ja haitat .....	10
	2.4 Kompensointi .....	11
3	LAITTEEN SUUNNITTELU.....	12
	3.1 Vahvistin .....	12
	3.1.1 Differentiaalivahvistin.....	12
	3.1.2 Vahvistusasteen laskenta.....	13
	3.1.3 Vastuksien mitoitus.....	13
	3.2 A/D-muunnos .....	15
	3.2.1 A/D-muunnoksen periaate .....	16
	3.2.2 Referenssijännite .....	16
	3.2.3 Virhearviointi.....	17
	3.2.4 I <sup>2</sup> C väylä .....	18
	3.3 Virransyöttö.....	18
	3.3.1 Lineaarinen regulaattori.....	19
	3.3.2 DC/DC-jännitemuunnin.....	19
	3.3.3 Rippelijännite ja sen suodatus.....	20
4	GALVAANINEN EROTUS .....	22
	4.1 Isolaattori .....	22
	4.2 Maadoitus .....	24
5	KOMPONENTTISIJOITTELU JA REITITYS .....	25
	5.1 Layout .....	25
	5.2 Tarkistus .....	26
	5.3 Valmistaminen ja komponenttien ladonta.....	27
6	TESTAUS .....	28
	6.1 I <sup>2</sup> C-väylän testaus .....	28
	6.2 Vahvistuksen testaus .....	28
	6.3 A/D-muuntimen testaus ja kalibrointi.....	29
	6.4 Häiriösietotestit.....	31
7	POHDINTA .....	33
	LÄHTEET.....	35
	LIITTEET .....	37
	Liite 1. Skeema .....	37

Liite 2. Layout ..... 38

**LYHENTEET JA TERMIT**

A/D	Analog-to-digital converter, analogia-digitaalimuunnin
BOM	Bill of materials, osaluettelo
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, komplementaarinen metallioksidipuolijohde
CPL	Component placement list, luettelo, jossa on komponenttien koordinaatit ja rotaatio.
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit, kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä
LSB	Least significant bit, vähiten merkitsevä bitti
OOK	On-off keying, yksinkertaisin modulaatio, jossa kantoaalto kytketään päälle ja pois
EMI	Electromagnetic interference, radiotaajuushäiriöt
RF	Radio frequency, radiotaajuus
PCB	Printed circuit board, piirilevy
SCL	Serial clock, kellolinja I <sup>2</sup> C liikennöinnissä
SDA	Serial data, I <sup>2</sup> C liikennöinnin sarjamuotoinen datalinja
TTL	Transistor-transistor logic, bipolaaritransistoreihin perustuva logiikkaperhe

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Huld Oy, joka on älykkäiden koneiden, laitteiden ja digitaalisten ratkaisujen suunnittelusta tunnettu suunnittelutoimisto. Työssä tutkitaan termoparien toimintaperusteita.

Tämän työn tarkoituksena on suunnitella, rakentaa ja testata 3–5 -kanavainen termopari, joka tulee Raspberry Pi:n lisäkortiksi. Toivottu laitteen mittaustemperatuurialue on  $-10\text{ °C} - 200\text{ °C}$  ja mittaukset suoritetaan K- ja T-tyyppin termopareilla. Kanavien tulee olla erotettuja ja pystyä mittaamaan lämpötiloja 600 V/200 ns nousunopeudella nousevan yhteismuotoisen signaalin läsnäollessa. Kanavien eristysvahvuuden pitää olla verkkovirran kestäviä eli vähintään  $\sim 1\text{ kV}$  luokkaa. Laitteen käyttölämpötila on  $20\text{ °C} - 30\text{ °C}$ . Rakennettu laite tulee yrityksen sisäiseen käyttöön.

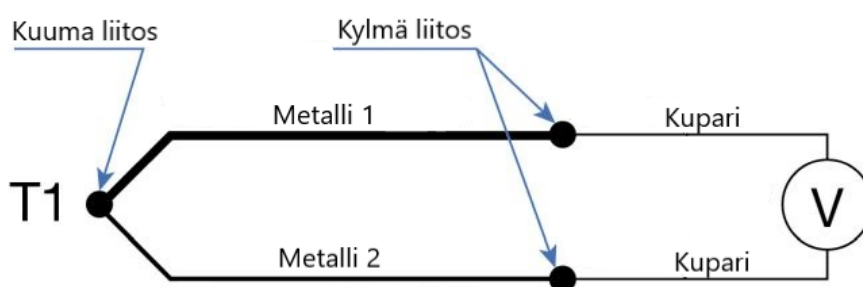
PCB-levyn suunnittelu on pitkä ja työläs prosessi. Ensin kartoitetaan käyttötarpeet ja tulevan laitteen spesifikaatiot. Seuraavaksi perehdytään teoriaan ja mietitään, mistä kytkentä koostuu. Tämän jälkeen valitaan komponentit ja tehdään lopullinen piirikaavio. Piirikaavio simuloidaan ja myös komponenttisijoittelu suunnitellaan osana valmistusprosessia. Valmis levy testataan huolellisesti laboratoriossa.

Työssä esitellään laitteen osien toimintaperiaatteet ja niiden vaikutus laitteen toimintaan. Työssä on selitetty vahvistimen vahvistusasteen laskelma ja vastuksien mitoitus. Erityisesti on huomioitu galvaaninen erotus sekä sen toteutukseen liittyviä yksityiskohtia.

Levyn suunnittelu toteutettiin PADS -ohjelmiston avulla. Laitteen piirikaavio piirrettiin PADS Logic -ohjelmalla. Komponenttisijoittelu puolestaan toteutettiin PADS Layout -työkalun avulla. Suunnittelun jälkeen piirilevy valmistettiin sekä juotettiin paikoilleen kuuluvat komponentit. Testaus toteutettiin Huld Oy:n laboratoriossa.

## 2 TERMOPARI

Termopari tai termoelementti on yksi monista lämpötila-antureista, joita käytetään erilaisissa kaupallisissa ja teollisissa sovelluksissa. Termoelementtien yksinkertainen rakenne tekee niistä halpoja ja kestäviä. Termopari muodostuu kahdesta yhteen hitsatusta langasta, jotka on valmistettu eri metalleista. Tätä hitsauspistettä kutsutaan kuumaksi liitokseksi ja vastaavasti vapaalla olevat päät ovat kylmät liitokset tai vertailupisteet (kuvio 1).



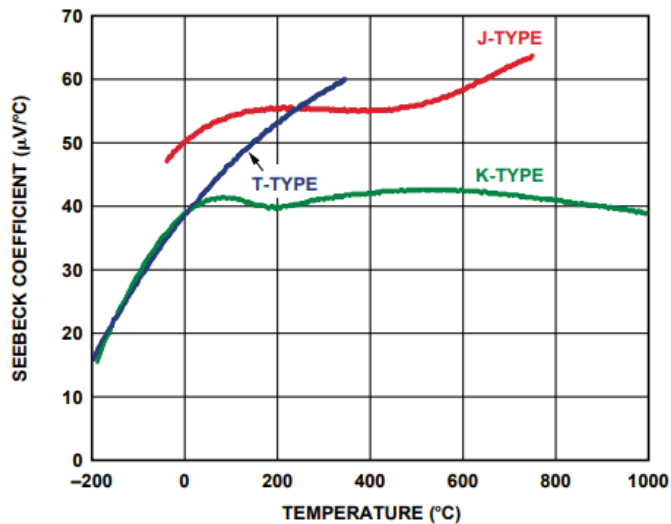
KUVIO 1. Termoparin rakenne (Beamex 2019)

### 2.1 Seebeck-ilmiö

Termoparin toiminta perustuu Seebeck-ilmiöön. Vuonna 1822 saksalainen fyysikko Thomas Seebeck huomasi, että termojännite syntyy kahden eri materiaalin välille, jos niitä pidetään eri lämpötilassa. (Keysight technologies 2020.) Termoparissakin muodostuu termojännite, kun hitsauspisteen ja vertailupisteen välillä on lämpötilaero. Jännite riippuu lineaarisesti mittauspisteen ja referenssipisteen lämpötilaerosta.

Seebeck-kerroin kuvaa termoelementin herkkyyttä ja muuttuu lämpötilan funktiona. Jännitesignaali on epälineaarinen, sen käyrä muuttuu lämpötilan kasvaessa. Esimerkiksi, nollalämpötilassa T-tyyppin termoparin herkkyys on  $39 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , mutta  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa herkkyys on kasvanut arvoon  $47 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . K-tyyppi puolestaan on stabiili ja sen Seebeck-kerroin välillä  $0\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$  on suurin piirtein  $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . (Texas Instruments 2018.) Kuvio 2 esittää miten eri termoparien Seebeck-kerroin riippuu lämpötilasta.





KUVIO 2. Seebeck kerroin  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  (InstrumentationTools 2021)

## 2.2 Termoparien tyypit

Termoparin jännitevaste vaihtelee metallien yhdistelmästä riippuen. On olemassa useita termoparityyppejä, joita sovelletaan eri lämpötila-alueille, käyttöolosuhteille ja tarkkuuksille.

Taulukossa 1 on esitetty termoparien ominaisuuksia, joita ovat lämpötilamittausalue, herkkyyskerroin, lankamateriaali (positiivinen ja negatiivinen pää) sekä tarkkuus. Taulukosta huomataan, että Seebeck-kerroin vaihtelee lämpötilan nousun myötä, eli mitä korkeampi lämpötila sitä herkempi on termopari. Jalometallista tehdyt termoparit eivät ole niin herkkiä, mutta soveltuvat laajemmalle mittauslämpötila-alueelle.

TAULUKKO 1. Termoparityyppien ominaisuuksia (Thermometrics Corporation 2013)

Tyyppi	Lankamateriaali	Mittausalue, °C	Seebeck-ker- roin, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	Tarkkuus, °C
B	+ Platinum 6 % Rhodium - Platinum 30 % Rhodium	0 – 1820	5 – 10	+/- 2,0
E	+ Chromel - Constantan	-270 – 1000	40 – 80	+/- 1,7
J	+ Iron - Constantan	-210 – 1200	50 – 60	+/- 2,2
K	+ Chromel - Alumel	-270 – 1300	28 – 42	+/- 2,2
R	+ Platinum 13 % Rhodium - Platinum	-50 – 1760	8 – 14	+/- 1,5
S	+ Platinum 10 % Rhodium - Platinum	-50 – 1760	8 – 12	+/- 1,5
T	+ Copper - Constantan	-270 – 400	17 – 58	+/- 1,0

### 2.3 Termoparien edut ja haitat

Metallista riippuen termoelementti pystyy mittaamaan laajalla lämpötila-alueella  $-270\text{ }^\circ\text{C}$  –  $1760\text{ }^\circ\text{C}$ . Lisäksi termoparit ovat isku- ja värinäkestäviä ja soveltuvat käytettäväksi vaarallisissa olosuhteissa. Pienen koon vuoksi termoelementit pysyvät reagoimaan nopeasti lämpötilan muutokseen. Vasteaika muuttuviin lämpötiloihin on muutama sata millisekuntia. Termoparit eivät altistu kuumenemiselle.

Termoparien käyttöön liittyy myös haasteita. Signaalinkäsittely on monimutkaista koska lämpöparin jännitesignaali pitää muuntaa käyttökelpoiseksi lämpötilan arvoksi. Tarkkuuden heikentymisen välttämiseksi tarvitaan aikaa suunnitteluun. Mittaustuloksen tarkkuus riippuu termoparin sisäisistä virheistä, jotka johtuvat lämpöparien metalliominaisuuksista ja vertailupisteen lämpötilasta. Lämpöparit koostuvat kahdesta eri metallista, mikä tekee lämpöparista alttiin korroosiolle. Korroosio aiheuttaa epäjalomman metallin syöpymistä, mikä heikentää mittausjärjestelmän tarkkuutta, eli termoparit on suojattava korroosiolta.

Koska mitatun signaalin suurusluokka on mikrovoltteja, sähköisten ja magneettisten kenttien aiheuttamat häiriöt ovat ongelma. Magneettikentän häiriöitä voi vähentää huomattavasti kiertämällä lämpöparin johdot keskenään tai käyttämällä suojattua kaapelia. Mittalaitteen pitäisi suodattaa signaali joko komponenteilla tai ohjelmallisesti. (OMEGA Engineering 2021.)

## 2.4 Kompensointi

Kylmäpisteen lämpötila pitää olla tiedossa, jotta mittaustulos saadaan mahdollisimman tarkasti. Kun termoelementtiä käytetään ensimmäistä kertaa, kylmäpisteen liitos laitetaan jääveteen, siten että referenssilämpötilaksi tulee 0 ° C. Jääkylvyssä pitäminen ei kuitenkaan sovi kaikkiin mittauksiin ja sen takia vertailupiste kompensoidaan. Vertailupisteen lämpötila mitataan toisella lämpötila-anturilla – termistorilla tai vastuslämpötila-anturilla. Sitten kylmäliitoksen lämpötila muunnetaan kylmäliitoksen jännitteeksi. Kompensoitu arvo lasketaan siten, että termoelementin jännitelukemaan lisätään kylmäpisteen jännite:

$$V = V_{TC} + V_{CJ} \quad (1)$$

jossa,

$V$  = anturin ulostulojännite

$V_{TC}$  = termoparin jännite

$V_{CJ}$  = kylmäpisteen jännite. (Texas Instruments.)

Termoelementtitaulukoissa esitetyt arvot ovat laskettu kylmäliitoksen lämpötilan ollessa 0 °C, koska silloin kylmäliitoksen jännite on 0 mV. Siinä tapauksessa, kun kylmäliitoksen lämpötila poikkeaa 0 °C:sta, mittaustulos vaatii korjausta.

### 3 LAITTEEN SUUNNITTELU

Tässä luvussa tarkistellaan kytkennän komponentit ja selvitetään niiden toimintaa. Lähtökohtaisesti yksi kanava koostuu vahvistimesta, A/D-muuntimesta sekä jännitelähteestä.

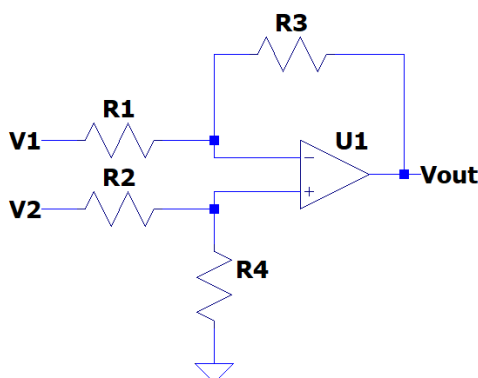
#### 3.1 Vahvistin

Lämpömittaus termoparien avulla perustuu lämpösähköiseen ilmiöön. Koska termoparien jännitemittausalue on millivolttien (mV) luokkaa, tarvitaan operaatiovahvistin tulosignaalin vahvistamiseksi.

Operaatiovahvistin (engl. operational amplifier) on elektroniikkakomponentti, joka mahdollistaa kahden sisääntulonsa jännitteen vahvistuksen kertoimella  $A$ . Tarkoituksesta riippuen käytetään eri operaatiovahvistimen kytkentöjä.

##### 3.1.1 Differentiaalivahvistin

Laitteen suunnittelussa käytettiin differentiaalivahvistinta, jonka toimintaperiaate perustuu kahden tulosignaalin väliseen erotukseen (Silvonen 2002). Alla on havainnollinen kuva differentiaalivahvistinkytkennästä (kuvio 3).



KUVIO 3. Differentiaalivahvistimen kytkentä

Kytkenä vahvistaa kahden tulojännitteen eron. Vahvistusaste määräytyy vastuksien avulla, joista  $R_1$  ja  $R_2$  sekä  $R_3$  ja  $R_4$  ovat samansuuruisia. Tässä on esitetty differentiaalivahvistimen laskukaava:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) * \frac{R_3}{R_1} \quad (2)$$

### 3.1.2 Vahvistusasteen laskenta

Lasketaan kaavan 2 avulla haluttu vahvistusaste. Ulostulojännite voi vaihdella alueella 0 V – 3,3 V. Sisääntulojännite riippuu halutusta mittausalueesta.

$$A = \frac{V_{out\ max} - V_{out\ min}}{V_{in\ max} - V_{in\ min}} \quad (3)$$

Tiedetään, että maksimi sisääntulojännite on 8,237 mV T-tyyppin termoparin taulukon perusteella, jos päiden välinen lämpötilaero on 180 °C. Vastaavasti -30 °C lämpötilaerolla minimijännite on taulukon mukaan -1,156 mV. Kerroin 1,05 tarkoittaa, että mahdollinen mittausrvirhe voi olla 5 %. Sijoitetaan tunnetut arvot:

$$A = \frac{3,3\ V - 0\ V}{(8,237\ mV - (-1,156\ mV)) * 1,05} = 330$$

Saatiin vahvistusasteeksi 330, jonka perusteella mitoitetiin vastukset.

### 3.1.3 Vastuksien mitoitus

Differentiaalivahvistinpiirille pätee seuraava lause, kaava 4:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \quad (4)$$

Kaavasta nähdään, että positiivisen ja negatiivisen puolen vastuksien suhde pitäisi olla sama. Mitoitetaan ensin vastus R4. Vastus R4 muodostetaan vähintään kahdesta vastuksesta, koska ideana on tuoda vastuksen kytkennän kautta offset-jännite referenssijännitelähteestä. Offset-jännite mahdollistaa A/D-muuntimen toiminnan negatiivisen jännitteen alueella. Offset lisättiin, jotta A/D koodi ei mene nollaksi, jos sisääntulossa on 0 voltia.

$$V_{out} = V_{in} * \frac{R_{41}}{R_{4243} + R_{41}} \quad (5)$$

$$\frac{R_{41}}{R_{4243} + R_{41}} = \frac{-1,156 * 10^{-3} * 1,05 * 330}{3,3} = 0,12138$$

$$R_{41} = 0,12138 * (R_2 + R_1)$$

$$R_{4243} = 7,238 * R_{41}$$

Valitaan mielivaltaisesti  $R_{41}$ :n arvo E12-sarjasta, esimerkiksi 100 k $\Omega$ . Yllä olevan laskun perusteella voidaan laskea  $R_{4243}$ :n arvo, joka on 723,8 k $\Omega$ . E12-sarjasta ei löydy suoraan tarvittavaa vastusta, joten muodostetaan tarvittava resistanssi rinnakkainkytkennän avulla. Oletetaan, että  $R_x$  on haluttu vastusarvo. Valitaan E12-sarjasta seuraava pienin vastus, joka on isompi kuin  $R_x$ . Tähän tarkoituksen sopii 820 k $\Omega$  vastus, annetaan sille nimeksi  $R_{42}$ . Toisen vastuksen  $R_{43}$  arvo ratkaistaan seuraavasta yhtälöstä:

$$R_{43} = \frac{1}{\frac{1}{R_x} - \frac{1}{R_{42}}} \quad (6)$$

$$R_{43} = \frac{1}{\frac{1}{723,8 * 10^3 \Omega} - \frac{1}{820 * 10^3 \Omega}} = 6,169 M\Omega$$

Lähin E12-sarjassa oleva vastus on 6,8 M $\Omega$ , joten otetaan se. Sitten lasketaan juuri valittujen, rinnankytkettyjen vastusten resistanssi  $R_4$ .

$$R_4 = \frac{1}{\frac{1}{R_{41}} + \frac{1}{R_{42}} + \frac{1}{R_{43}}} \quad (7)$$

$$R_4 = \frac{1}{\frac{1}{100 * 10^3 \Omega} + \frac{1}{820 * 10^3 \Omega} + \frac{1}{6,8 * 10^3 \Omega}} = 87,9773 k\Omega$$

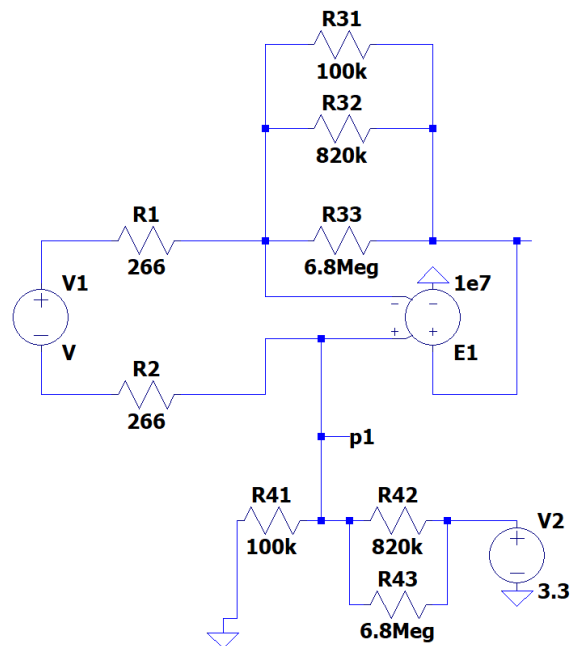
$R_1$  ja  $R_2$  arvot lasketaan seuraavasti:

$$A = \frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} \quad (8)$$

Koska  $R_3 = R_4 = 87,9773 \text{ k}\Omega$ , niin  $R_1 = R_2$

$$R_1 = R_2 = \frac{R_3}{A} = \frac{R_4}{A} = \frac{87,9773 \text{ k}\Omega}{330} = 266,59 \Omega$$

Näin ollen saatiin kaikki vastuksien arvot selville, kuvio 4.



KUVIO 4. Differentiaalivahvistimen kytkentä

### 3.2 A/D-muunnos

Lämpötila-anturilla eli termoparilla mitattu signaali on analoginen signaali. Analoginen signaali on jatkuva amplitudin ja ajan suhteen, digitaalisignaali toisaalta on diskreetti (epäjatkua).

Raspberry Pi:lle tulevan signaalin on oltava digitaalinen. Koska Pi:ssä ei ole sisäänrakennettua A/D-muunninta, oli käytettävä erillistä muunninta.

### 3.2.1 A/D-muunnoksen periaate

A/D-muunnos alkaa ottamalla analogisesta signaalista tietyllä taajuudella näytteitä, esimerkiksi 10 000 kertaa sekunnissa. Nyquistin teoreeman mukaan, jos halutaan välttää signaalin vääristymistä, näytteenottotaajuus on oltava vähintään kaksi kertaa suurempi kuin signaalissa esiintyvä korkein taajuuskomponentti (Huttunen 2014). Mikäli taajuus on liian pieni, näytteet voivat mennä päällekkäin ja näin tapahtuu laskostumista.

Seuraavassa vaiheessa näytteiden arvot pyöristetään lähimpään kvantisointitasoon eli kvantisoidaan. Kvantisointivirhe tapahtuu silloin, kun analogisen signaalin ja digitaalisen muunnoksen välillä ei ole tarkkaa vastaavuutta. Toisin sanoen todellinen analoginen arvo eroaa lähimpään kvantisoituun tasoon pyöristetystä arvosta.

### 3.2.2 Referenssijännite

Työhön valittiin ADC121C021 Texas Instrumentin A/D-muunnin. Muunnin on yhteensopiva I<sup>2</sup>C väylän kanssa, muunnosaika on 1 µs. Kellosignaali tulee Raspberry-mikrokontrollerista.

Analoginen signaali muunnetaan digitaaliseksi aina suhteessa referenssijännitteeseen. Referenssijännite rajaa A/D-muuntimelle syötettävän signaalin jännitteen, eli jos  $V_{REF}$  on 3,3 V, niin maksimisisäntulojännite on 3,3 V ja minimi 0 V. A/D-muuntimen resoluutio kuvaa digitaalisen mittalaitteiston erottelukykyyä, eli mitä korkeampi resoluutio sitä tarkempi muunnettu signaali on. Laitteessa käytetyn A/D-muuntimen resoluutio on 12 bittiä,  $2^{12}$  on 4096 eli A/D-muunnin pystyy erottelemaan 4096 jännitetasoa. Korkean resoluution avulla voidaan välttyä kvantisointivirheeltä. Referenssijännitteen avulla määritetään pienin havaittava jännite-ero, eli resoluutio voltteina. Työssä käytetään 3,3 voltin referenssijännitelähdettä:

$$LSB = \frac{U_A}{2^{12}} \quad (9)$$



$$LSB = \frac{3,3V}{2^{12}} = 805 \mu V$$

Toisin sanoen 1 LSB (Least Significant Bit) vastaa 805  $\mu V$ :n jännitettä, eli A/D-muunnoksen viimeisen bitin muutos tarkoittaa, että jännite muuttuu 805  $\mu V$  verran.

A/D-muunnoksesta voidaan laskea termoparin lämpötila.

$$V_{TC} = \frac{V_{REF} * A/D \text{ koodi}}{2^{12} * vahvistus} \quad (10)$$

### 3.2.3 Virhearviointi

A/D-muuntimen kokonaismittausvirhe lasketaan neliöllisesti summattaessa, kaavan 11 mukaisesti:

$$Total \ error = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_n^2} \quad (11)$$

A/D-muuntimen mittauserpävarmuudet johtuvat muutamasta tekijästä: lineaarisuuserpävarmuus (INL), kvantisointierpävarmuus (DNL), offset-virhe ( $V_{OFF}$ ) sekä gain-virhe (GE). ADC121C027:n lineaarisuuserpävarmuuden suuruus on 1 LSB, kvantisointierpävarmuus 1 LSB, offset-virhe 1,6 LSB sekä gain-virhe 6 LSB (Texas Instruments, 2013). Kokonaismittausvirhe lasketaan kaavasta 12.

$$Total \ error = \sqrt{INL^2 + DNL^2 + V_{OFF}^2 + GE^2} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Total \ error &= \sqrt{(1 * 805 \mu V)^2 + (1 * 805 \mu V)^2 + (1,6 * 805 \mu V)^2 + (6 * 805 \mu V)^2} \\ &= 5127 \mu V \end{aligned}$$

$$\frac{5127 * 10^{-6} V}{3,3 V} * 100\% = 0,15 \%$$

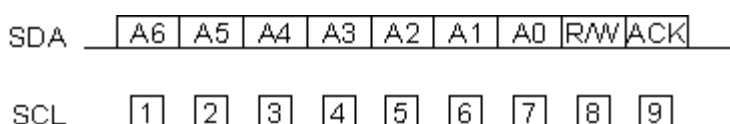
Näin selvitettiin, että työssä käytetyn A/D-muuntimen kokonaismittausvirhe on 0,15 % mittaustuloksesta.

### 3.2.4 I<sup>2</sup>C väylä

1980-luvulla Phillips Semiconductors on kehittänyt I<sup>2</sup>C-väylän, jonka tarkoitus on kommunikointi ja ohjaus integroitujen piirien kesken. Toisin sanoen I<sup>2</sup>C-väylä mahdollistaa tiedonsiirron päälaitteelta (isäntä) valitulle laitteelle (orja). I<sup>2</sup>C-väylä pystyy yhdistämään useita mikropiirejä ja antureita, jotka tunnistetaan osoitteiden perusteella.

Orjalaitteella on 7-bittinen osoite, joista neljä ensimmäistä bittiä valmistaja määrittää itse. Suunnittelija asettaa loput bitit osoitepinnien avulla yhdistämällä pinnit joko maahan tai käyttöjännitteeseen tai jättämällä kytkemättä (floating). Kahdeksas bitti on R/W-bitti, joka kertoo orjalaitteelle, onko tulossa luku- vai kirjoituskäskeä. Jos R/W-bitti on 1 se tarkoittaa, että laitteelta luetaan dataa, ja vastaavasti bitti on 0 silloin, kun laitteelle kirjoitetaan dataa.

I<sup>2</sup>C-väylässä on sarjamuotoinen synkroninen kaksisuuntainen data- ja kellopulsulinja, SDA ja SCL. Tiedonsiirto tapahtuu isännän aloitteesta. Isäntälaitte lähettää kellosignaalin ja säätelee tiedonsiirron nopeuden. Kuviossa 5 esiintyy bittijono heti aloituksen jälkeen. Yhdeksännen bitin eli ACK:n aikana orjalaitte vastaa onko osoite oikein vai ei.



KUVIO 5. I<sup>2</sup>C-väylä

### 3.3 Virransyöttö

Raspberryilta piirilevylle tulee sekä 5 V että 3,3 V jännite. 3,3 V tulee suoraan erottimen toiselle puolelle, muuten jännite stabiloidaan ennen komponenteille syöttöä. Tässä luvussa tarkistellaan regulaattoriin ja DC/DC-muuntimen ominaisuuksia.

### 3.3.1 Lineaarinen regulaattori

Lineaarinen regulaattori on piiri, jonka toimintaperiaate pohjautuu sisääntulon ja ulosmenon välissä olevan säätöelementin ohjaukseen. Lineaariset regulaattorit ovat aina step-down -tyyppisiä. Se tarkoittaa, että sisääntulojännite on aina isompi kuin ulostulo. Koska lineaariregulaattorien toiminta perustuu säätövastukseen regulaattorit ovat täysin EMI-häiriöttömiä.

Työssä käytettiin MIC5501 regulaattoria, jonka sisääntulojännite vaihtelee 2,5 V - 5,5 V ja ulostulo on 1 V - 3,3 V. Tässä kytkennässä piirin tarkoitus on laskea jännite 5 V:sta 3,3 V:iin. Kytkentää varten valittu isolaattori sietää 5 V. Piirissä oleva A/D käyttää 3,3 V referenssijännitettä. Jotta molemmat piirit pystyisivät kommunikoimaan keskenään saumattomasti, on tärkeää, että niiden jännitetaso on sama.

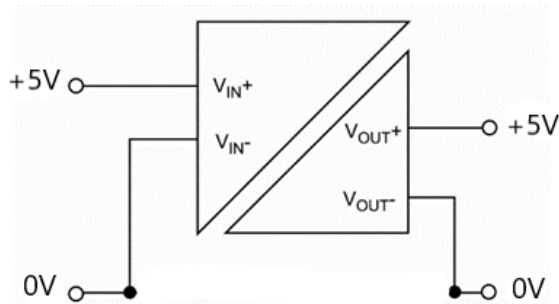
Jälkikäteen selvitettiin, että erotinpiiri menee 1-tilaan jännitesignaalin ollessa vähintään 2 V. Eli käytännössä lineaariselle regulaattoreille eikä sen ohjeiskomponenteille ole tarvetta. Jos ykköstilän minimijännite olisi vaikka 4 V, niin 3,3 V tasolla operoiva A/D ei olisi pystynyt tuomaan erottimelle tarvittavaa jännitteettä ja linja olisi ollut aina 0-tilassa. Tällöin erottimen piirin käyttöjännitteen laskeminen regulaattorin avulla olisi voinut laskea myös 1-tilan minimijännitteet neljästä volttista alas.

### 3.3.2 DC/DC-jännitemuunnin

Regulaattorin tärkein tehtävä on moduulin käyttöjännitteen ylläpitäminen vaaditulla tasolla. Lohkon käyttöjännitteen tulee olla mahdollisimman hyvin suodatettu ja häiriötön.

Perinteisesti DC/DC-muuntimeksi kutsutaan laitetta, joka muuntaa tasajännitteen toiseksi eripotentialiseksi tasajännitteeksi. Tässä sovelluksessa hyödynnetään muuntimen toista ominaisuutta eli galvaanista erotusta.

Laiteen jännitelähteenä toimii Recom RKE DC/DC 5 V isoitu muunnin. Tässä tapauksessa jännitteen  $V_{IN}$  tulo ja  $V_{OUT}$  lähtö ovat samansuuruisia, mutta ne on sähköisesti erotettu toisistaan. Puolet piiristä on korkeajännitteisellä alueella ja puolet matalajännitteisellä. Myös maat ovat erotettu sähköisesti, kuvio 6.

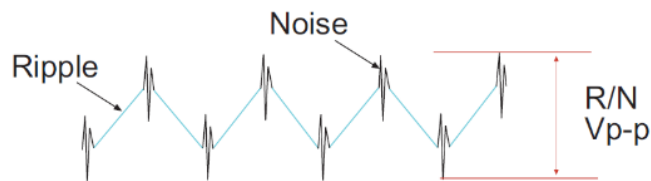


KUVIO 6. Recom muuntimen rakenne

Koska sisään tuleva jännite on  $5\text{ V} \pm 10\%$  ja ulostulojännite on  $5\text{ V} \pm 5\%$ , muunnin eliminoi kaikki pienet muutokset, mitkä voi tapahtua sisääntulossa.

### 3.3.3 Rippelijännite ja sen suodatus

DC/DC-muuntajan toiminta perustuu tasasuuntaajaan, jonka jännite on pulssimainen, jos suodatus puuttuu. Sen takia DC/DC ulostulosignaali esiintyy rippeliä ja kohinaa, kuvio 7. Rippelillä tarkoitetaan häiriöjännitteiden tehollisarvon ja tasajännitteen suhdetta. Rippelijännite on ei-toivottu ilmiö ja sen poistamiseksi on käytettävä filttareita. Tässä tapauksessa käytettiin LC-alipäästösuodatinta.



KUVIO 7. Rippeli ja kohina (Digikey, 2018)

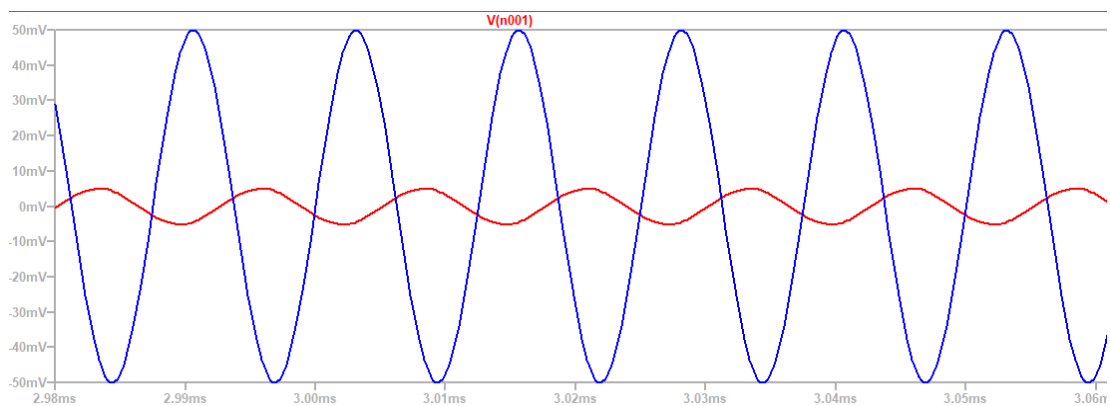
Työssä simuloitiin muuntimen toiminta LT-spicella. Mittauksen perustella se tuottaa 50 mV rippelijännitettä. Tiedetään, että piiri toimii 80 kHz taajuudella. Mitoitetaan LC-suodatinta varten tarvittavien komponenttien arvot:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (13)$$

Näin ollen

$$LC = \frac{1}{2\pi * f}^2 \quad (14)$$

$LC = 3,957 * 10^{-10}$  perusteella valitaan kelan  $L = 3,6 \mu\text{H}$  ja kondensaattorin  $C = 10 \mu\text{F}$ . Piirretään mitoitettu kytkentä LT-spice simulaattorissa. Todetaan simuloinnin avulla, että rippelijännite on pienentynyt kymmenesosaan, kuvio 8.



KUVIO 8. Rippelijännitteen suodatus, punaisella suodatettu jännite

Sytä käyttäviä DC/DC-muuntimia on muutama. Ensinnäkin sen avulla pystytään rikkomaan maasilmukoita, jolloin sähköiset häiriöt eivät pääse vaikuttamaan piirin muihin osiin. DC/DC-muunnin myös lisää käyttöturvallisuutta. Lisäksi tasajännitemuunnin parantaa toimintavarmuutta. Jos laitteella on useampi kanava, jännitelähteen eristäminen omalla DC/DC-muuntimella takaa sen, että jos jokin kanava on viallinen tai oikosulussa, muut kanavat eivät kärsi siitä.

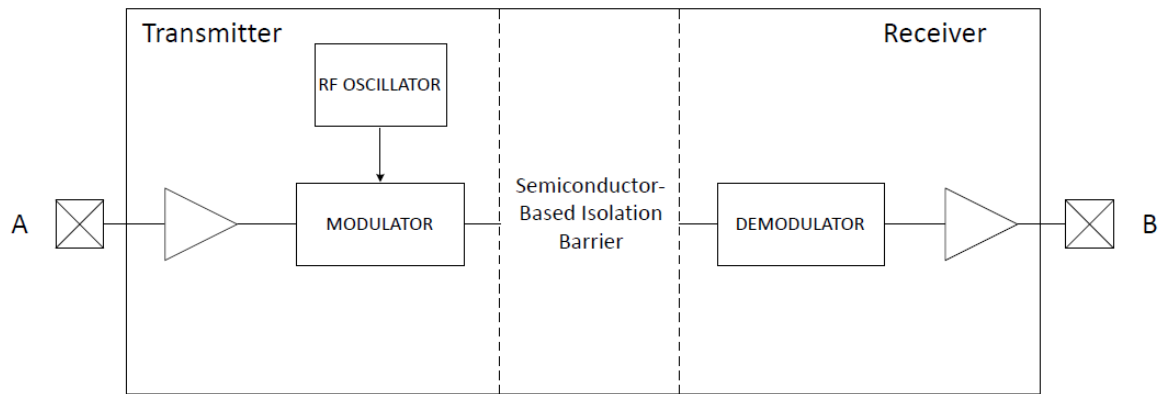
## 4 GALVAANINEN EROTUS

Käyttöjännitteiden näkökulmasta laite on jaettu niin sanotusti kahteen osaan: korkea- ja pienoisjännitealueeseen. Pienoisjännitteeksi kutsutaan tasajännitettä 120 volttiin asti sekä vaihtojännitettä 50 volttiin asti. Suojatakseen pienoisjännitteellä toimivaa elektroniikkaosaa ja käyttäjää korkeajännitteestä, erotettiin sähköisesti eli galvaanisesti nämä kaksi aluetta. Toisin sanoen näiden alueiden välillä ei saa kulkea tasavirta. Digitaalisessa logiikassa käytetään korkeintaan 5 V jänniteettä. Jos samassa järjestelmässä käytetään yli 120 V suurjännitteitä, on tärkeää erottaa digitaaliset pienjännitteet suurjännitteistä fyysisesti ja sähköisesti. Galvaaninen erotus on aika yleinen käytäntö, kun yhdistetään mikrokontrollerilla operoiva laite korkeita jännitteitä sisältävään järjestelmään. Laitteissa korkeat jännitteet eivät johdu pelkästään vaihtosähköverkossa, vaan ne myös voivat syntyä systeemissä ilmenevistä voimakkaista häiriö- tai kytkentäpiikeistä. Galvaaninen erotus tässä laitteessa on toteutettu isolaattorin sekä DC/DC-muuntimen avulla.

### 4.1 Isolaattori

Isolaattorien tai digitaalisten erottimien etenemisviive on pieni, elinkaari on pitkä, sekä ne on helppo liittää useimpiin mikrokontrollereihin. Kytkentää varten valittiin SI8602AC-B-IS erotin koska se on yhteensopiva I<sup>2</sup>C tiedonsiirtoväylän kanssa. Komponentti on edullinen, pienikokoinen sekä kuluttaa vähän tehoa.

Isolaattorin toiminta muistuttaa optoerottimen toimintaa, mutta moduloidaan RF-kantaaltaa valon sijaan. Laitteen yksinkertainen arkkitehtuuri tarjoaa vankan eristetyn väylän signaalille eikä vaadi erityisiä alustamisia käynnistyksen yhteydessä. Alla olevassa kuviossa 9 on esitetty yksinkertaistettu lohkokaavio yhdelle Si86xx-kanavalle.



KUVIO 9. Isolaattorin lohkokkaavio (Slicon Labs 2019)

Kanava koostuu RF-lähettimestä ja RF-vastaanottimesta, joiden välillä on puoli-johde-eriste. Lähettimen sisääntulossa A moduloidaan kantaalto on-off keying -modulaatiomenetelmällä, joka on yksi muoto amplitudimodulaatioista. OOK-modulaatio voidaan ajatella kantaallon kytkemisenä päälle ja pois. Vastaanottajan puolella oleva demodulaattori selvittää tulotilan ja sovittaa signaalin lähtöön B. OOK-modulaatio on parempi kuin pulssimodulaatio, koska se tarjoaa parempaa häiriösietokykyä, pienemmän virrankulutuksen ja enemmän vastustuskykyä ulkoisen magneettikentän vaikutukselle.

Erottimessa tulo- ja lähtöjännitteet voivat olla samansuuruiset. Digitaalisia erottimia käytetään usein eristettyjen jännitelähteiden kanssa, mikä mahdollistaa maa-doitushäiriöiden ja kohinavirtojen estämisen. Digitaaliset erottimet toimivat CMOS- tai TTL-logiikkakytkentäteknikalla, ja niillä on määritetyt oletusarvon mukaiset lähtötilat joko korkeille tai matalille signaaleille.

CMOS-tekniikkaan perustuvissa erottimissa käytetään piidioksidipohjaisia dielektrisiä aineita. Erottimet koostuvat kahdesta erillisestä integroidusta piiristä - syöttöpiiristä ja lähtöpiiristä, jotka on yhdistetty kytketyillä liitosjohdoilla sekä korkeajännitteen kestäväällä muottiyhdisteellä. Jokaiselle piirille on oma jännitesyöttö. Eristyspiiri voi sisältää yhden tai kaksi eristekerrosta, jotka kestävät erittäin korkeita jännitteitä.

OOK-moduloinnissa sisääntulevan signaalin bittivirta moduloidaan sisäisellä oskillaattorilla. Moduloitu signaali välittyy eristeen läpi ja ilmestyy vaimettuna vastaanottopuolella. Vastaanottopuolella on esivahvistin sekä verhoikäyrähavaitsin, joiden avulla signaalin demodulointi tapahtuu.

Datalehdessä oli mainittu vaatimuksia piirin layoutia varten. Valmistajan mukaan korkeajännitealue pitää olla fyysisesti erotettuna matalajännitealueelta ja niiden välillä pitää olla turvaväli, joka on minimissään 4.01 mm. Tätä varten piirrettiin 5 mm turvaväli clearance-toiminnon avulla. Datalehdessä myös kehoitetaan käyttämään 1uF arvoista ohituskondensaattoria AVDD ja AGND sekä BVDD ja BGND pinnien välillä. Kondensaattori pitää sijoittaa mahdollisimman lähelle komponentin koteloa.

## 4.2 Maadoitus

Laitteella on kaksi maata: analoginen ja digitaalinen. Analoginen maataso on herkkä digitaalisten laiteiden aiheuttamille häiriöille, ja sen takia maat pidetään erillään. Maadoituksen suunnittelussa on otettava huomioon mahdolliset ongelmat analogisten ja digitaalisten komponenttien välillä.

Yksi perinteinen maadoitusmenetelmä on lisätä piirilevylle yhtenäinen kuparikerros, jota kutsutaan maatasoksi. Maataso on suuri metallialue, jolla on pieni resistanssi analogisen signaalin matalataajuisille virroille, sekä matala induktanssi palaaville digitaalisille suuritaajuisille virroille. Se minimoi sähkömagneettisia häiriöitä ja toimii myös suojana vähentämään herkkyyttä ulkoiselle häiriölle. Maatason ansioista laitteella on parempi signaalin eheys, parempi tarkkuus ja parempi häiriönkesto. Kaksikerrospiirilevyllä kannattaa suunnitella johdotukset ja komponenttisijoittelu niin, että maatasosta tulisi mahdollisimman kattava ja yhtenäinen.

Analogiset ja digitaaliset maat yhdistetään toisiinsa yhteiseen maadoituspisteeseen, jotta signaaleilla on yhteinen vertailupotentiaali.

Maasilmutka muodostuu, jos kaksi komponenttia on maadoitettu eri potentiaaleissa oleviin pisteisiin. Silloin maapisteen välille syntyy jännite, ja se aiheuttaa häiriövirran.



## 5 KOMPONENTTISIJOTTELU JA REITITYS

### 5.1 Layout

Piirilevyn suunnittelussa käytettyjen ohjelmien päävaiheet ovat: mekaniikan määrittely, mukaan lukien levyn muoto sekä kiinnitysreiät, osasijoittelu eli layout, reititys eli vedojen piirtäminen ja postprosessointi eli Gerber-tiedostojen tuottaminen.

Komponenttisijoittelua yleensä pidetään suunnitellun tärkeimpänä osana. Osasijoittelusta riippuu myös se, miten reititys onnistuu. Toisin sanoen, jos layout on virheellinen, sitä ei voi korjata reitityksellä.

Ensimmäisenä sijoitetaan ne komponentit, joiden sijainti on tiedossa, eli liittimet, kiinnitysreiät, kytkimet ja niihin liittyvät oheiskomponentit. Seuraavaksi sijoitetaan suurjännitteiset osat ja sitten suurivirtaiset. Muut osat järjestetään toiminnallisuuden perusteella. (Tikkanen 2004.)

Komponentit piirilevylle tulee asettaa niin, että herkästi häiriintyvät ja häiritsevät osat sijaitsevat mahdollisimman kaukana toisistaan. Analoginen osa on huomattavasti digitaalista herkempi häiriöille. Siitä syystä analoginen maa ja digitaalinen maa erotetaan toisistaan. Piirilevyyden on jyrkitty eristystä varten aukko.

Johdinten vetojen pitää olla mahdollisimman lyhyitä. Tiukkaa mutkia reitin varrella on vältettävä. Johtimien välisen ylikuulumisen estämiseksi johtimien väliä kannattaa kasvattaa.

Jokaisen digitaalipiirin käyttöjännite- ja maadoitusnastan välille kytketään suodatuskondensaattori, joka sijoitetaan mahdollisimman lähellä piiriä. Suodatuskondensaattori varastoi energiaa, jota käytetään virtapulssien tuottamiseen piirin nopeissa muutostiloissa ilman muiden piirien galvaanista häiritsemistä.

Toisin sanoen kondensaattorin toiminnallisen taajuusalueen on käytännössä oltava 10–200 MHz. Jos kondensaattoria ei ole tai se ei toimi riittävän suurella taajuusalueella, aiheuttaa logiikan nopea tilamuutos huomattavia jänniteheilahduksia tehonsyöttölinjassa.

Kondensaattori vähentää tehonsyötön muodostamia silmukoita, jolloin induktiivinen ja kapasitiivinen kytketyminen piirin ja ympäristön välillä on mahdollisimman vähäistä molempiin suuntiin.

Datalehdistä löytyy tyypilliset kytkennät jokaiselle piirille, jossa on myös merkattu tarvittavien passiivisten komponenttien arvot. Lisäksi tarpeen mukaisesti skemaan lisättiin ohituskondensaattoreita.

Suurin osa passiivisista komponenteista on pintaliitoskomponentteja 0603-koteloinissa, mitä tarkoittaa, että niiden koko on 0,06 x 0,03 tuumaa tai 1,52 x 0,76 mm.

Piirikaavio on suunniteltu PADS Logic -ohjelmassa, liite 1. Komponenttien sijoittelu sekä vetojen piirtäminen ovat toteutettu PADS Layout:ssa, liite 2. Sen jälkeen kun piirilevy on suunniteltu, ohjelmistossa generoitiin fyysisen piirin valmistamista varten tarvittavat gerber-tiedostot. Gerber-tiedostot ovat binääriset vektorikuvat, jotka sisältävät komponenttien asettelukuvan, kupari- ja stensiilikerrokset, juotosmaskin sekä poraustiedot.

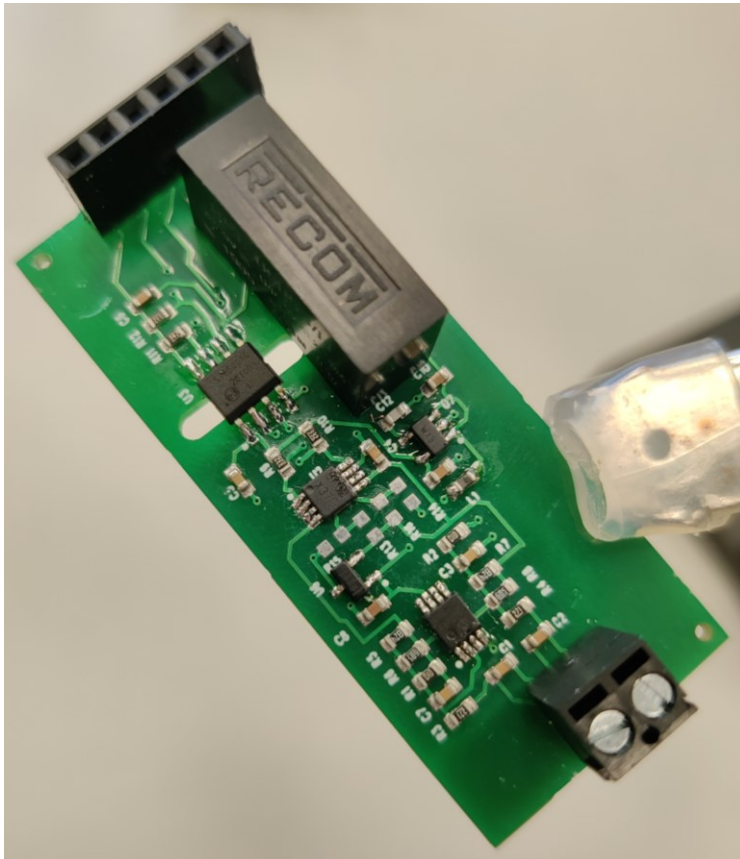
## 5.2 Tarkistus

Valmis layout kannattaa tarkistaa PADSissa olevilla rutiineilla. Clearance-toiminnon avulla voidaan varmistaa, että eristevälit ovat kunnossa. Toiminto kertoo kohdista, jossa määritellyt eristevälit alitetaan. Connectivity-toiminto varmistaa, että kaikki listan mukaiset vedot ovat yhdistetty. Siinä tapauksessa, että joku nasta tai kuparialue on irti, tulee virheilmoitus.

DFF-toiminto (design for fabrication) kartoittaa valmistusprosessin haastavat kohdat. Toiminto etsii johtimien terävät kulmat, liian pienet reiän kaulukset, juotospisteissä olevan merkintäpainatusvärin yms.

### 5.3 Valmistaminen ja komponenttien ladonta

Piirilevy oli valmistettu tehtaalla Kiinassa. Myös osa passiivisista komponenteista oli kiinnitetty tehtaan ladontakoneella. Levyn tilausta varten generoitiin seuraavat tiedostot: BOM (Bill of materials), eli osaluettelo, joka sisältää komponenttien nimet, arvot, tunnuksat, kotelontyyppit yms. sekä CPL – Component placement list, jossa tarkasti määritetään jokaisen komponentin x- ja y-koordinaatit sekä rotaatio. Loput komponentit juotettiin laboratoriossa käsin. Silkkipainokerroksella oleva reference designator eli osatunniste mahdollistaa osien paikkojen identifioimisen, kuva 1. Ykköspinnin sijainti tunnustetaan sen vieressä olevan valkoisen pisteen avulla.



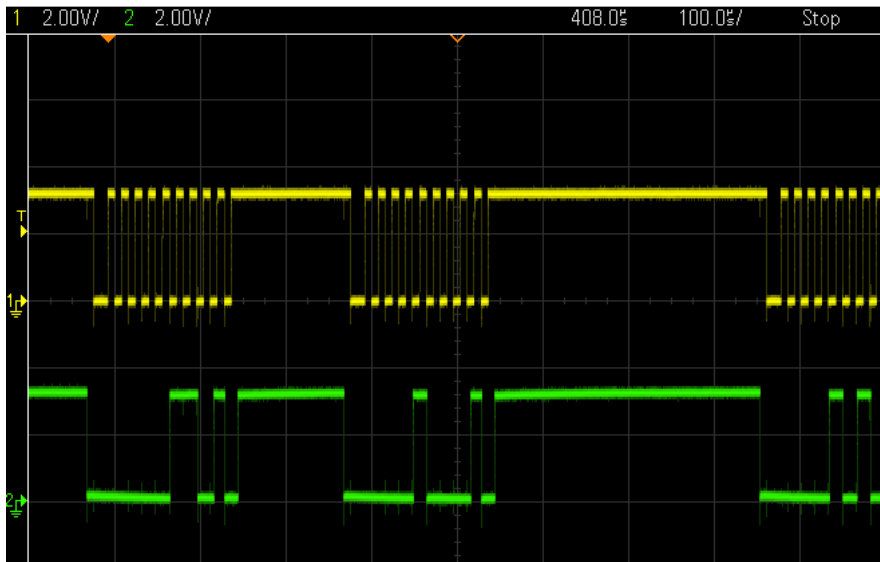
KUVA 1. Valmistettu levy

## 6 TESTAUS

Laitteen toimivuus testattiin vaiheittain. Testaus kohdistuu erityisesti I<sup>2</sup>C-väylän liikennöintiin sekä A/D-muuntimeen. Mittaukset suoritettiin Keysight InfiniiVision MSOX3034T -oskilloskoopin sekä BM235 -yleismittarin avulla.

### 6.1 I<sup>2</sup>C-väylän testaus

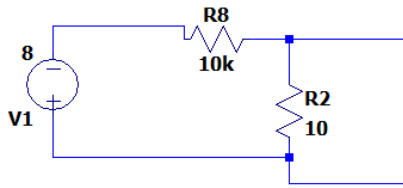
Ensimmäisenä testausohjelmiston avulla testattiin I<sup>2</sup>C-väylän liikennettä eli tuuleeko kellosignaali sekä data Raspberryilta isolaattoriin ja isolaattorilta A/D-muuntimelle. Testaukset suoritettiin oskilloskoopilla. Kuvio 10 esittää testaustuloksia, jotka osoittivat, että I<sup>2</sup>C-väylän liikenne toimii. Keltainen signaali kuvaa kelloa, vihreä vastaa sarjadataa, SDA.



KUVIO 10. I<sup>2</sup>C-väylän testaukset.

### 6.2 Vahvistuksen testaus

Seuraavaksi tarkistettiin piirin todellinen vahvistus. Jännite syötettiin Twintex TP-1350 virtalähteestä. Virtalähde ei pystynyt antamaan tarkasti mV-luokkaista jännitettä, sen takia laitteen sisäänmeno täydennettiin vastusten kytkennällä, kuvio 11. Jännitejaon jälkeen levyille tulee 1/1000 syötetystä jännitteestä, koska jännitejaon suhde on 1000/1.



KUVIO 11. Lisäkytkentä

Virtalähde asetettiin 1 voltiksi ja varmistettiin yleismittarilla, että levy saa 1 mV. Sitten jännitelähde oikosuljettiin 0V signaalin mallintamiseksi. Mitattiin vahvistimen ulostuleva jännite, joka oli 0,428 V. Seuraavaksi laitteelle syötettiin 2,99 mV ja saatiin vahvistimesta 1,417 V. Näiden tietojen perusteella laskettiin vastaako todellinen vahvistus teoreettista, mikä on 330.

$$A = \frac{1,417 \text{ V} - 0,428 \text{ V}}{2,99 \text{ mV} - 0 \text{ V}} = 330,8$$

Todettiin, että vahvistus on sama, kuin suunniteltiin.

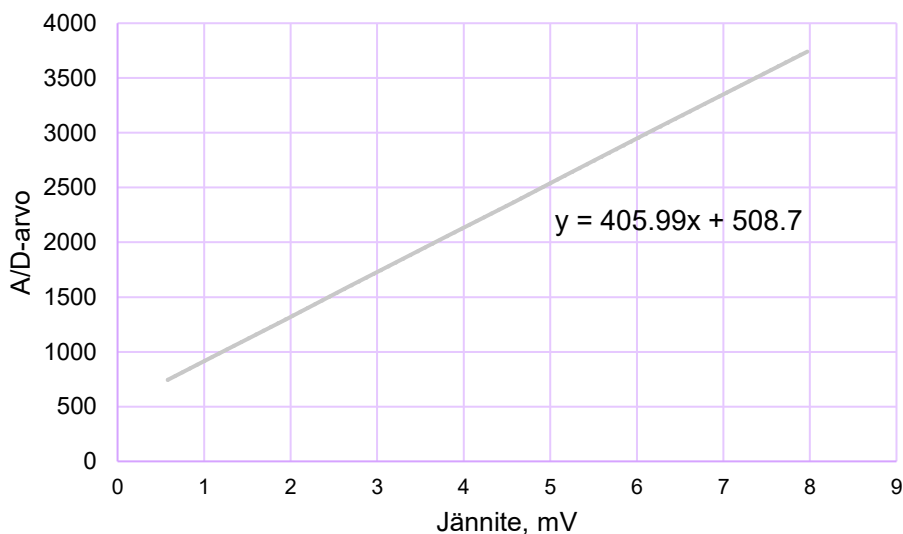
### 6.3 A/D-muuntimen testaus ja kalibrointi

Osana projektia testattiin A/D-muuntimen ulostulo eri jännitteillä. Testaukset suoritettiin PuTTY-terminaaliemulaattorin avulla, jonka avulla päästään Raspberry Pi:n komentoriville. Komentojen avulla monitoroitiin A/D-muunnoksen käyttäytymistä eri syöttöjännitteellä. Mittaukset toteutettiin muutaman päivän aikana, varmistaakseen että edellisen päivän mittaukset pysyvät samalla jännitteellä vakiona. Taulukosta 2 nähdään, että A/D koodi kasvaa jännitteen kasvaessa.

Taulukko 2. A/D- muuntimen lukema

Jännite, mV	A/D koodi
0.58	744
1.15	974
1.94	1294
2.67	1594
3.13	1781
3.81	2057
4.58	2367
5.16	2605
6.18	3021
7.11	3395
7.97	3741

Mittaustuloksien perusteella piirrettiin kaavio sekä ratkottiin suoran yhtälö Excelissä, kuvio 12.



Kuvio 12. A/D-koodin riippuvuus jännitteestä

Kaaviosta nähdään, että A/D koodin riippuvuus jännitteestä on lineaarinen. Yhtälön avulla lasketaan A/D-koodit yllä olevassa taulukossa esiintyville jännitteille mittavirheen selvittämiseksi (taulukko 3).

Taulukko 3. A/D koodin mittaustulokset

Mitattu jännite, mV	A/D koodi	Laskettu A/D-koodi mitatun jännitteen perusteella	A/D-koodi virhe
0.58	744	744.18	-0.18
1.15	974	975.6	-1.6
1.94	1294	1296.34	-2.34
2.67	1594	1592.72	1.28
3.13	1781	1779.48	1.52
3.81	2057	2055.56	1.44
4.58	2367	2368.18	-1.18
5.16	2605	2603.66	1.34
6.18	3021	3017.78	3.22
7.11	3395	3395.36	-0.36
7.97	3741	3744.52	-3.52

Taulukosta voidaan havaita, että maksimi bittivirhe on 3,52 bittiä ja minimi on 0,18 bittiä. Suoran yhtälön avulla voidaan kalibroida laite ja täsmentää mittaustuloksia.

Edellisessä aluvuussa esiintyy 0,428 V lukema eli offset-jännite. Offset-jännite nostaa jännitetasoa niin, että jos jännitettä ei tule ollenkaan, operaatiovahvistimen molempiin tuloihin silti tulee noin 400 mV. Koodi 0 voi tulla A/D muuntimesta vain silloin, kun mittaama jännite-ero on -1,156 mV. Testien avulla selvitettiin, että 0 V tapauksessa A/D koodi on 508.

#### 6.4 Häiriösietotestit

Testien tarkoituksena on tutkia laitteen immuunius häiriölaitteesta tuleville häiriöille. Häiriölaitteesta syötettiin 600V häiriöjänniteettä 100 kHz taajuudella. Häiriölaitteen signaalin nousunopeus on 600ns. Nopeasti nousevat häiriöt häiritsevät enemmän, kuin hitaat.

Tarkistettiin A/D-muuntimen lukemia PuTTY:sta ja todettiin, että laite ei ole täysin immuuni häiriölle, sillä A/D-muuntimen lukema laski 508:sta 450:seen, eli muutos on 58 LSB. Jännitteeksi muunnettuna:

$$\frac{58}{406 \text{ mV}} = 142,85 \text{ mV}$$

Lasketaan lämpötilavirhe, jos tiedetään että K-typin termoelementin Seebeck-kerroin on  $41 \mu V$ :

$$\frac{142,85 \text{ mV}}{41 \mu V} = 3,66 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Toisin sanoen, häiriölaitteen aiheuttama mittavirhe on 142,85 mV tai 3,66 °C, mikä on melko pieni virhe.

Seuraavaksi laitetta häirittiin verkkojännitteellä, eli 230 VAC. Tässä tapauksessa A/D-arvo pysyi 508:ssa, eli mittari ei häiriintynyt verkkojännitteestä.



## 7 POHDINTA

Työtä toteutettaessa perehdyttiin termoparien sekä muiden komponenttien teoriaan. Suunnittelu on vaativa ja miltei tärkein osa laitteiden valmistamisessa, joka riippuu monista tekijöistä. Väärin valittu komponentti voi aiheuttaa huomattavia toimintahäiriötä. PCB:ssä erehdysvaara kasvaa entistä enemmän, sillä väärät komponenttien kiinnitykseen tarkoitetut kuparialueet ja reitit on mahdotonta korjata. COVID-19 aiheutti myös omia haasteita komponenttien saatavuuteen, eli joidenkin osien toimitusaika oli keskimääräistä suurempi.

PADS-ohjelmien käyttö vaati paljon harjoitusta sekä kärsivällisyyttä. Ohjelmien käyttöliittymä on melko selkeä, mutta PADSiin toimintaan liittyy paljon ongelmia, sillä esimerkiksi ohjelma on hidas ja voi yhtäkkiä lakata toimimasta kesken kaiken. Siitä huolimatta PADS on kallis ja laajasti käytetty piirisuunnittelutyökalu.

Työn mielenkiintoisin sekä haastavin osa oli layoutin tekeminen. Komponenttien sijoittelussa on omat säännöt, ja sopivien paikkojen valitsemista voisi verrata palapelin ratkomiseen.

Työn testaaminen toteutettiin oskilloskoopin, yleismittarin ja PuTTY-ohjelman avulla. Oskilloskoopilla todennettiin I<sup>2</sup>C-väylän liikennöinnin sujuvuutta, yleismittarilla tarkastettiin, että komponenteille tulee oikeat jännitteet ja A/D-muuntimen toimintaa testattiin PuTTY:llä. Selvitettiin myös, että A/D-muunnoksen koodi mitattuna ja suoran yhtälöllä laskettuna poikkeavat hieman toisistaan.

Työllä on merkittävä käytännöllinen tarkoitus, koska lämpömittarin kytkennän perusteella voi rakentaa lisää laitteita. On kuitenkin otettava huomioon, että juuri tämä laite ei sovi äärimmäisen korkean lämpötilan mittaamiseen. Laitteesta voidaan kuitenkin tarvittaessa tehdä kelvollinen erittäin korkeille lämpötiloille.

Laitteen suunnittelu ja valmistaminen alusta loppuun oli ehdottomasti arvokas kokemus. Minun mielestäni työ onnistui hyvin, olen saanut kattavasti osaamista PADSista, perehdyin komponenttien toimintaperiaatteisiin ja tutkin datalehtiä.

Olen saanut korvaamattomia neuvoja työkavereiltani, joista olen erittäin kiitollinen. Loppujen lopuksi työstä tuli monipuolinen ja kattava. Olisin keskittynyt testaukseen enemmän, mutta lopullisen ohjelman toteuttaminen vaati lisää aikaa, sillä koodin kirjoittaminen jää minun osaltani tämän työn ulkopuolelle.

## LÄHTEET

ADC121C021, ADC121C021Q, ADC121C027 Data Sheet. Luettu 18.3.2011.  
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc121c021.pdf>

Difficulties with Thermocouples for Temperature Measurement. Luettu 18.2.2021. <https://instrumentationtools.com/difficulties-thermocouples-temperature-measurement/>

I<sup>2</sup>C tutorial. Luettu 24.4.2021. <https://www.robot-electronics.co.uk/i2c-tutorial>

Huttunen H. Signaalinkäsittelyn perusteet. 2014. Luettu 28.3.2021.  
<http://www.cs.tut.fi/kurssit/SGN-11000/SGN-11000.pdf>

Keysight technologies. Practical Temperature Measurements. Application notes.2020. Luettu 8.3.2021. <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06789/application-notes/5965-7822.pdf>

MIC5501/2/3/4 Data Sheet. Luettu 10.3.2021. <http://www.microchip.com/mymicrochip/filehandler.aspx?ddocname=en580292>

MCP616/7/8/9 Data Sheet. Luettu 10.3.2021. <http://www.microchip.com/mymicrochip/filehandler.aspx?ddocname=en011255>

RKE-0505S/H Data Sheet. Luettu 10.3.2021. <https://recom-power.com/pdf/Econoline/RKE.pdf>

REF29xx Data Sheet. Luettu 10.3.2021. <https://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=10&gotoUrl=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Flit%2Fqpn%2Fref2912>

Si860x Data Sheet. Luettu 10.3.2021. <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si860x.pdf>

Silvonen, K., Tiilikainen, M., Helenius, K. 2003. Analogiaelektroniikka. Helsinki: Edita Prima Oy.

Thermocouple Cold (Reference) Junction Compensation. Luettu 4.03.2021.  
<https://blog.beamex.com/thermocouple-cold-junction-compensation>

Thermocouples-Thermocouple Types. Luettu 21.3.2021. <https://www.thermetricscorp.com/thermocouple.html>

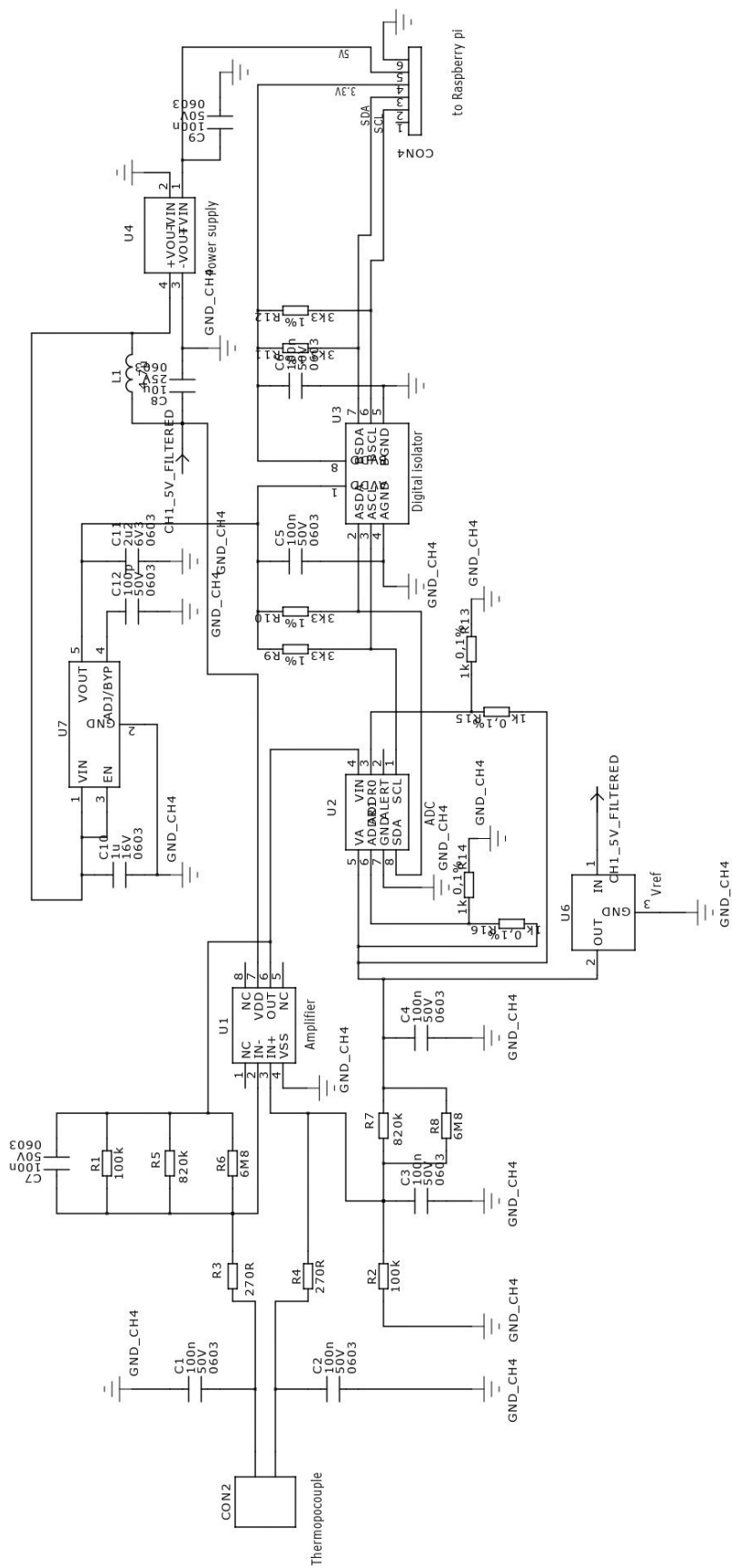
Tikkanen, H. 2004. Piirilevysuunnitteluopas II. Jyväskylä: DS-Design Systems Oy.

Types of thermocouples. Luettu 19.2.2021. <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-types>

Wu, J. 2018. A Basic Guide to Thermocouple Measurements. Texas Instruments. Luettu 18.3.2021. <https://www.ti.com/lit/sbaa274>

LIITTEET

Liite 1. Skeema



Liite 2. Layout

