



**LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU**  
*Lahti University of Applied Sciences*

# LÄMPÖTILAN MITTAUSMODUULI

Analogia-digitaalimuunnin PT-100-anturille

LAHDEN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Tietokone-elektronikka  
Opinnäytetyö  
Kevät 2014  
Juha Eerikäinen

Lahden ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma

EERIKÄINEN, JUHA:

Lämpötilan mittaussmoduuli  
Analogia-digitaalimuunnin PT-100-  
anturille

Tietokone-elektroniikan opinnäytetyö, 31 sivua

Kevät 2014

TIIVISTELMÄ

---

Tässä työssä on suunniteltu ja simuloitu MultiSim-ohjelmalla lämpötilan mittaussmoduuli Koulutuskeskus Salpauksen tarpeisiin. Lämpötilan mittaussmoduuli on myös toteutettu prototyypinä koekytkentäalustalle. Koulutuskeskus Salpauksen tilauksesta suunniteltiin mittaussmoduuli, joka mittaa lämpötilan esimerkiksi sähkömoottorista tai jostain muusta laitteesta, jonka lämpötilaa halutaan seurata.

Moduuli suunniteltiin käyttämään PT100-anturia ja operaatiovahvistinkytkentää. Lämpötilan muuntaminen digitaaliseksi dataksi suunniteltiin muuntamalla lämpötilasta saatu jännitetieto analogia-digitaalimuunnoksella. A/D-muunnos tehtiin työhön siksi, että dataa on helpompi tulkita toisessa laitteessa, esimerkiksi mikro-ohjaimessa tai prosessorissa. Digitaalinen data päätettiin siirtää SPI-sarjaliikenteellä tulkittavaksi moduulin ulkopuolelle.

Aluksi tässä työssä määritettiin lämpötila-asteikko, jota laitteella mitataan. Sen jälkeen määritettiin anturi, jota kytkennässä käytetään lämpötilan mittaamiseen. Lisäksi tehtiin simulointi MultiSim-ohjelmalla. Simuloinnin jälkeen kytkentä toteutettiin koekytkentäalustalle ja mitattiin. Mittausta verrattiin simuloinnin tuloksiin. Digitaalisesta muunnoksessa pyrittiin saamaan mahdollisimman lineaarinen lämpötilaan nähden.

Asiasanat: PT-100-anturi, termopari, analogia-digitaalimuunnin, operaatiovahvistin, lineaarisuus, Callendar - Van Dusen-yhtälö

Lahti University of Applied Sciences  
Degree Programme in computer electronics

EERIKÄINEN, JUHA:

Temperature measurement module  
Analog-digital converter to PT-100-  
sensor

Bachelor's Thesis in computer electronics

31 pages

Spring 2014

ABSTRACT

---

This thesis deals with planning and simulating a temperature sensor module with the MultiSim program for Koulutuskeskus Salpaus. The temperature sensor module was also assembled as a prototype a test-PCB. The purpose of the sensor is to measure the temperature of electric motors or other equipment.

The module uses a PT-100 sensor and operational amplifier circuit. Voltage information of the temperature is converted to digital data by an analog-digital converter. Digital conversion is done because digital data is much easier to interpret in other equipment, for example a microcontroller or processor. Digital data was transferred with an SPI serial interface to be interpreted outside the module.

The first step in this thesis was defining temperature scale of measurement. The next step was to define the sensor, which was used for measuring temperature in the circuit. Also, simulation was done with the MultiSim program. After the simulation the circuit was assembled a test-PCB and measured. The measurement of the test-PCB and simulated circuit were compared. The aim was to make the result of digital conversion as linear as the real temperature.

Key words: PT-100 sensor, thermo pair, analog-digital converter, operational amplifier, linearity, Callendar-Van Dusen equation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	LAITTEET	3
2.1	PT-100-anturi	3
2.1.1	PT-100-anturin tyypilliset mallit.	4
2.1.2	PT-100-anturin kytkeminen	5
2.2	Operaatiovahvistin	6
2.2.1	Operaatiovahvistimen historia	7
2.2.2	Operaatiovahvistimen kytkentöjä	7
2.2.3	Operaatiovahvistimet AD8554 ja LM324	10
2.2.4	AD8554-vahvistimen ominaisuudet	11
2.2.5	AD8554-vahvistimen rakenne	11
2.3	Analogia-digitaalimuunnos	13
2.4	Analogia-digitaalimuunnin	13
2.4.1	Kvantisointivirhe	14
2.4.2	Signaali-kohinasuhde	14
2.4.3	Linearisointivirhe	15
2.5	AD7811 analogia-digitaalimuunnin	15
2.5.1	AD7811:n liitynnät	18
2.5.2	Analogia-digitaalimuuntimen tyypillinen kytkentä	18
2.5.3	Analogia-digitaalimuuntimen toimintamoodit	20
2.5.4	Sarjamuotoinen data muuntimelta	21
2.5.5	Muut AD-muuntimet	22
3	TOTEUTUS	25
3.1	PT-100-anturin kytkentä	25
3.2	Operaatiovahvistimen kytkentä	25
4	MITTAUKSET	27
4.1	Simuloinnin tulokset	27
4.2	Operaatiovahvistimen jännitearvot	27
5	YHTEENVETO	29
	LÄHTEET	31

# 1 JOHDANTO

Työssä oli tavoitteena suunnitella DIN-kiskoon kiinnitettävä lämpötilanmittausmoduuli, joka voidaan liittää erillisen mikroprosessorikortin sarjaliikennetuloon. DIN-kisko on standardi kiinnityskisko, jota käytetään laajasti kojekeskuksissa laitteiden kiinnittämiseen kojekeskuksen pohjaan kiinni. Laitteella olisi tarkoitus mitata esimerkiksi sähkömoottorin lämpötiloja kuormitettaessa moottoria. Sähkömoottorin lämpötilan mittausta voidaan hyödyntää prosessiteollisuudessa, kun halutaan ohjata prosesseja ja varautua vikatilanteisiin.

Sarjaliikennemuotoisella signaalilla lähetetään moduulista mitattavan kohteen lämpötila digitaalisena tietona mikroprosessorille. Mikroprosessorilla voidaan hyödyntää sarjamuotoista dataa esimerkiksi datan keräämiseen pitkällä aikavälillä tai lähettää dataa eteenpäin prosessin ohjausta varten. Sarjamuotoinen data valittiin tähän työhön sen takia, koska analogia-digitaalimuunnin sisältää suoraan nelijohtimellisen sarjaliikenneväylän. Siten saatiin komponenttien määrä pysymään mahdollisimman pienenä. Sarjaliikennettä on helppo tulkita, kun se viedään eteenpäin prosessorille tai mikro-ohjaimelle. Työhön päätettiin valita kymmenenbittinen analogia-digitaalimuunnin.

Työssä käytettiin operaatiovahvistinkytkentää, jolla lämpöanturin jännitettä voidaan muunnella työhön sopivaksi ja pyrittiin saamaan mahdollisimman lineaarinen mittaustulos. Työssä pyrittiin vähintään yhden celsiusasteen tarkkuuteen ja mitta-anturina käytettiin PT-100-anturia, jonka tarkkuus riittää tähän sovellukseen hyvin. Mitattava lämpötila-asteikko on tässä työssä 0 - 120 astetta celsiusta. Asteikon 120 astetta määritettiin sen takia, koska esimerkiksi sähkömoottorin kuormitustilanteessa ei moottorin lämpötila saa nousta yli sadan asteen.

Työssä seurattiin mahdollisia virhetilanteita ja tutkittiin lämpöanturin läpi kulkevan virran arvoa. Virran arvo oli tarkoitus pitää alhaisella tasolla, jotta mittaustulos olisi mahdollisimman tarkka, koska epätarkkuus syntyy epälineaarisuudesta. Epälineaarisuutta lisää myös virran arvon suuruus, jos anturin läpi kulkeva virta alkaa lämmittää anturia.

Moduulin suunnittelussa käytettiin apuna Multisim-simulointiohjelmaa, joka on National Instrumentsin valmistama kytkentöjen simulointiohjelma. Työn tarkoitus ei ollut valmistaa lopullista toimivaa laitetta vaan suunnitella asiakkaan vaatimuksista toimiva prototyyppi, josta voitaisiin siirtyä helposti laitteen jatkokehitykseen.

## 2 LAITTEET

### 2.1 PT-100-anturi

PT-100-anturi valittiin tähän työhön sillä perusteella, koska se on hyvin saatavilla. Lisäksi PT-100-anturi on hyvin kestävä ja huoltovapaa. Anturi voidaan kiinnittää monenlaisiin erilaisiin pintoihin tai jopa upottaa nesteeseen. PT-100-anturi on resistiivinen anturi. Sen vastusarvo nousee lineaarisesti anturin lämpötilan kohotessa. PT-100-anturi on standardimallinen ja hyvin yleisesti käytetty. PT-100-anturin nimi tulee platinan kemiallisesta merkistä ja siitä, että sen resistanssi on 100 ohmia nollassa asteessa.

PT-100-lämpötila-anturin vastusarvo kasvaa lämpötilan noustessa anturin mittapäissä. Anturilla päästään tyypillisesti  $-50 - +100$  °C:n lämpötila-alueilla noin puolen asteen tarkkuuteen, riippuen sovelluksesta. Lämpötilan vastusarvo on lineaarinen. Van Dusen-Callendar-yhtälössä lineaarisuus voidaan todistaa. Van Dusen-Callendar-yhtälö on kaavassa 1. (Wikipedia 2014)

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2 + CT^2(T - 100)] \quad (-200^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C})$$

$$R_T = R_0[1 + AT + BT^2] \quad (0^\circ\text{C} \leq T < 850^\circ\text{C}) \quad (\text{KAAVA 1})$$

$R_T$  on resistanssi lämpötilassa  $T$ ,  $R_0$  on resistanssi nollassa asteessa ja vakiot platinalla (Wikipedia 2014):

$$A = 3,0983 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

Lämpötilan mittaamiseen voidaan käyttää myös muunlaisia antureita. Termistori on puolijohdeanturi, joka on pienikokoinen, ja se perustuu puolijohteen resistanssin riippuvuuteen lämpötilasta. Sen etuna on koko ja herkkyys.

Tyypillinen herkkyys resistanssin muutokseen on noin 4 % / °C.

Puolijohdeanturin haittana tässä työssä on sen voimakas epälineaarisuus, lisäksi termistorin ominaisuudet voivat muuttua voimakkaasti, tai termistori voi muuttua jopa käyttökelvottomaksi, jos se pääsee lämpenemään liikaa. Termistorin mittausrvirran vaikutus on suuri, ja siten se vääristää mittaustulosta. Sen vaste lämpötilan mukaan saadaan Steinhart-Hart-yhtälöstä. Steinhart-Hart-yhtälö on esitetty kaavassa 2. Yhtälö on yleisesti käytetty. Yhtälössä T on lämpötila Kelvineissä ja R on vastusarvo ohmeissa. A, B ja C ovat Steinhart-Hart-parametreja.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C \ln(R)^3 \quad (\text{KAAVA 2})$$

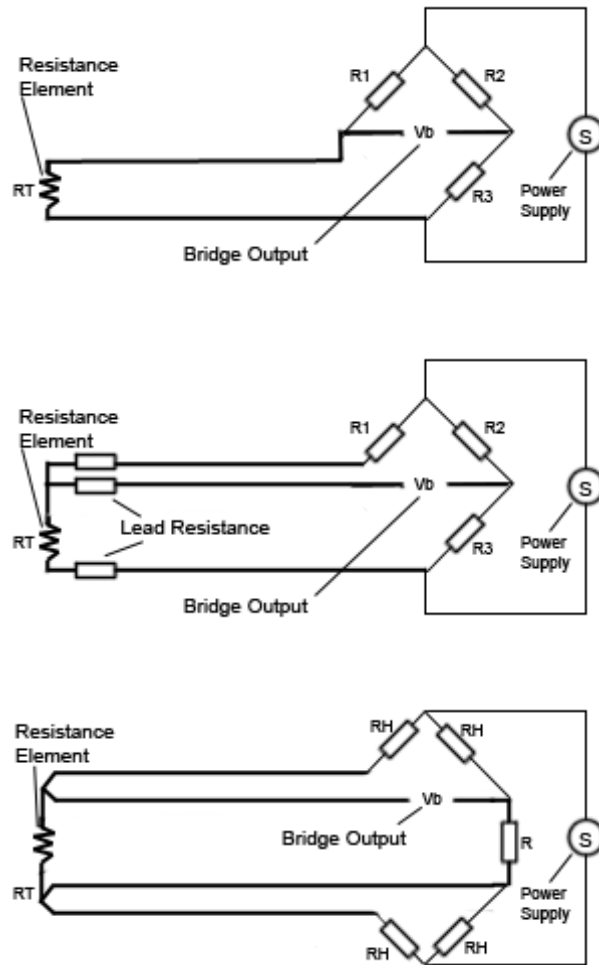
Toinen vaihtoehto PT-100 anturille on termopari. Siinä toiminta perustuu Seebeck-ilmiöön. Ilmiössä kahden eri johteen välille syntyy termojännite eri lämpötiloissa. Yleisesti jännite on 1 - 100  $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ . Termojännite V saadaan liitoksen lämpötilaerosta  $T_{j1} - T_{\text{Ref}}$  sekä Seebeck kertoimesta  $\alpha$ . Termojännitteen yhtälö on esitetty kaavassa 3.

$$V = \alpha ( T_{j1} - T_{\text{Ref}} ) \quad (\text{KAAVA 3})$$

Termoparia käytettäessä olisi kytkentään tehtävä toiselle liitokselle vakiolämpötila ja mitattavaa liitosta verrattaisiin toiseen. Kytkennästä tulisi monimutkainen ja vakiolämpötila olisi vaikea toteuttaa. (Mittaustekniikan perusteet 2007.)

### 2.1.1 PT-100-anturin tyypilliset mallit.

PT-100-antureita on kaksi-, kolme- tai neljäjohtimisia. Tässä työssä käytettiin kaksijohtimista anturia, koska kytkentä ja tarkkuus eivät vaatineet useampijohtimellista anturia. Kuviossa 1 on kolme erilaista mallia anturille. Ylimpänä on kaksijohtiminen anturi, jota käytettiin tässä työssä. Keskellä on kolmejohtimillinen malli, joka tarvitsee lisävastuksia kytkentään. Alimmaisessa, neljäjohtimisellisessä on taas vähemmän vastuksia sarjassa kuin kolmijohtimisessä anturikytkennässä.



KUVIO 1. PT-100-anturin erilaiset mallit (Wikipedia 2014)

### 2.1.2 PT-100-anturin kytkeminen

PT-100 kytketään usein vakiovirtalähteeseen, ja sen navoissa olevaa jännitettä mitataan. Vakiovirtalähteen käyttö on siinä mielessä hyvä, että se pitää virran arvon vakiona, jolloin anturin mittapään lämpötila ei vaikuta virran arvon suuruuteen, jolloin se pysyy lineaarisena.

Anturin resistanssi muuttuu lämpötilan vaihtelun mukaan ja täten myös sen yli mitattava jännite. Kytkentä oli suunniteltava niin, että anturin läpi kulki mahdollisimman pieni virta. Virran on oltava pieni, koska virran arvon noustessa, lämpenee anturi sähkövirran ansiosta, jolloin mittaustulos vääristyy.

Tässä kytkennässä vakavoitua vakiovirtalähdettä ei käytetty. Vakavoidulla vakiovirtalähteellä on sellainen etu, että vakiovirtalähde antaa aina saman virran

ulostulostaan kuormasta riippumatta. Jos vakiovirtalähdettä olisi käytetty, PT-100 -anturin läpi kulkeva virta olisi ollut samansuuruinen, mikä olisi helpottanut jännitemittauksen lineaarisointia. Silloin sähkövirta olisi lämmittänyt anturia aina saman verran. Vakiovirtalähdettä ei käytetty tässä työssä, kun haluttiin tehdä mahdollisimman lineaarinen sovellus mahdollisimman vähillä komponenteilla.

## 2.2 Operaatiovahvistin

Operaatiovahvistin on integroituun piiriin valmistettu komponentti, ja se sisältää useita transistoreja. Sen pääasiallinen tarkoitus on vahvistaa jännitesignaaleja. Operaatiovahvistin on suunniteltu niin, että se vahvistaa piirin tulonastojen välisen jännite-eron. Piirin tarkka vahvistuskerroin ja muut ominaisuudet asetetaan takaisinkytkennällä. Jos takaisinkytkentää ei tehdä, toimii vahvistin jännitevertailijana, eli komparaattorina.

Operaatiovahvistimen käyttöjännite voi olla joko yksi- tai kaksipuolinen. Kaksipuolisella käyttöjännitteellä on luotava keinotekoinen maataso, jolloin komponenttien määrä lisääntyy. Tässä kytkennässä käytetään yksipuoleista käyttöjännitettä, jolloin käyttöjännitteen positiiviseen nastaan kytketään kymmenen voltin positiivinen jännite ja negatiivinen käyttöjännitteenasta kytketään maatasoon.

Avoimen silmukan topologiassa ei takaisinkytkennässä ole vastusta, vaan vahvistuskerroin olisi silloin ideaalisella vahvistimella ääretön. Avoimen silmukan kytkentää ei käytetä, vaan aina asetetaan vastus takaisinkytkentään, jolla vahvistuskerroin asetetaan halutun suuruiseksi.

Takaisinkytkentä voi olla joko negatiivinen tai positiivinen. Negatiivisessa takaisinkytkennässä, jota tässä työssä käytetään, tuodaan operaatiovahvistimen ulostulosta kytkentä takaisin vahvistimen negatiiviseen eli kääntävään sisääntuloon, jolloin jännitteen vahvistus saadaan asetettua tarkkuusvastuksella haluttuun arvoon.

### 2.2.1 Operaatiovahvistimen historia

Operaatiovahvistimen ensimmäinen malli patentoitiin vuonna 1941. Patentoijana oli D. Swartzel Jr. Se toimi kolmella tyhjiöputkella, ja sen käyttöjännite oli +/- 350 voltia. Se sai aikaan 90 desibelin vahvistuksen. Siinä oli vain yksi invertoiva sisäänmeno. Operaatiovahvistin oli käytössä toisessa maailmansodassa tykistön käytössä ja se saavutti huomattavaa hyötyä.

### 2.2.2 Operaatiovahvistimen kytkentöjä

Operaatiovahvistimella on monenlaisia erilaisia kytkentävaihtoehtoja ja sitä kautta erilaisia sovelluksia. Niitä ovat muun muassa jänniteseuraaja, invertoiva vahvistin, ei-invertoiva vahvistin, summaaja, differentiaalivahvistin, instrumentointivahvistin, invertoiva integraattori, invertoiva derivaattori ja komparaattori.

Jänniteseuraaja on yksinkertainen kytkentä, jota kutsutaan myös puskuriksi (buffer). Siinä saadaan aikaiseksi kytkentä, jota voidaan kuormittaa huomattavasti, koska operaatiovahvistimen tulo on suuri-impedanssinen ja ei ota kovinkaan paljon virtaa vastaan. Sitä vastoin lähdöstä saadaan virtaa 10 - 20 milliampeeria. Jänniteseuraajan vahvistus on yksi, eli se ei vahvista jännitettä, vaan tekee virtavahvistuksen.

Invertoiva, eli kääntävä vahvistin kääntää tulosignaalin napaisuuden. Invertoivalla vahvistimella saadaan aikaiseksi myös negatiivinen vahvistus kytkentään. Kääntävä vahvistin saadaan aikaiseksi, kun vahvistimen negatiiviseen tuloon takaisinkytketään lähtösignaali vastuksen kautta. Myös tulosignaali tuodaan vastuksen kautta vahvistimen negatiiviseen tuloon. Vahvistimen positiivinen tulo maadoitetaan. Vahvistus asetetaan vastusa arvoilla. Vahvistus lasketaan kaavalla 4. (Sihvonen, Tiilikainen & Helenius 2003, 193-195.)

$$U_{out} = - \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \times U_{in} \quad (\text{KAAVA 4})$$

Ei-invertoiva eli ei-kääntävä vahvistin saadaan aikaiseksi, kun vahvistimen lähtösignaali kytketään takaisin vahvistimen negatiiviseen tuloon jännitejaon

kautta. Takaisinkytkentä saa aikaan vahvistimen positiiviseen tuloon suuren tuloimpedanssin, joten sitä voidaan kuormittaa huomattavasti, ilman että vahvistin rikkoutuu. Lähtösignaali noudattaa tulon signaalin vaihetta ja vahvistus on aina enemmän kuin yksi. Lähtösignaali saadaan laskettua kaavalla 5. (Sihvonen ym. 2003, 191-193.)

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in} \quad (\text{KAAVA 5})$$

Summaajalla voidaan kytkeä usea tulosignaali, joka summataan lähtöön. Siinä on negatiivinen takaisinkytkentä, jossa käytetään vastusta. Tulosignaalit kytketään vahvistimen negatiiviseen tuloon vastuksen kautta. Kun vastusarvot eri tulosignaleissa ja takaisinkytkennässä ovat samat, voidaan laskea lähtöjännite kaavalla 6. Kaavassa  $V_1$  jne. ovat tulojännitteitä.

$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_n + \dots) \quad (\text{KAAVA 6})$$

jossa  $V_1$  jne. ovat tulojännitteitä. Jos tulojännitteiden vastusarvot ovat identtisiä, mutta takaisinkytkennän vastus on eriarvoinen, saadaan kytkennän ulostulojännite laskettua kaavalla 7.

$$U_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1}\right) \times (V_1 + V_2 + V_n + \dots) \quad (\text{KAAVA 7})$$

Kun tulovastukset ovat keskenään eriarvoiset, kutsutaan kytkentää skaalaavaksi summainkytkennäksi. Silloin lähtösignaali voidaan laskea kaavalla 8. (Sihvonen ym. 2003, 195-197.)

$$V_{out} = -R_f \left( \left(\frac{V_1}{R_1}\right) + \left(\frac{V_2}{R_2}\right) + \left(\frac{V_3}{R_3}\right) + \dots \right) \quad (\text{KAAVA 8})$$

Differentiaalivahvistimella vahvistetaan kahden erilaisen tulojännitteen erotusta. Differentiaalivahvistinkytkennässä tulojännite 1 kytketään vahvistimen negatiiviseen tuloon vastuksen  $R_1$  kautta ja tulojännite 2 positiiviseen tuloon vastuksen  $R_2$  kautta. Lähtöjännite takaisinkytketään vastuksen  $R_f$  kautta

negatiiviseen tuloon. Samoin tulojännite kytketään maatasoon vastuksen  $R_g$  kautta. Lähtöjännite lasketaan kaavalla 9. (Sihvonen ym. 2003, 196, 197.)

$$V_{out} = \left( \frac{R_1 + R_f}{R_1} \right) \times \left( \frac{R_g}{R_g + R_2} \right) V_2 - \left( \frac{R_f}{R_1} \right) V_1 \quad (\text{KAAVA 9})$$

Instrumentointivahvistinkytkenässä on molempiin vahvistimen tuloihin lisätty buffer- eli puskurikytkentä. Sen etuina on hyvä häiriönpoisto ja korkea tuloimpedanssi, joten sitä voidaan kuormittaa paljon.

Instrumentointivahvistinkytkentää voidaan käyttää tarkkuutta vaativiin mittaustoimenpiteisiin. Vahvistus saadaan laskettua kaavalla 10.

$$V_{out} = \left( \frac{R_3}{R_2} \right) \times \left( 1 + \frac{2R_1}{R_{gain}} \right) \times (V1 - V2) \quad (\text{KAAVA 10})$$

$R_1$  on puskurin negatiivisen takaisinkytkennän vastus,  $R_2$  on puskurien ulostulojen ja vahvistimen sisääntulojen välinen vastus,  $R_3$  on vahvistimen negatiivisen takaisinkytkennän ja positiivisen tulojen ja maatasoon välinen vastus.  $R_{gain}$  yhdistää puskurien negatiiviset takaisinkytkennät. (Sihvonen ym. 2003, 198-200.)

Invertoiva, eli kääntävä integraattori integroi eli summaa signaalin ajan suhteen ja kääntää sen napaisuuden. Siinä negatiivinen takaisinkytkentä on tehty kondensaattorin avulla. Invertoiva integraattori toimii alipäästösuotimena, koska kondensaattori poistaa signaalista korkeat taajuudet. (Sihvonen ym. 2003, 201-204.)

Invertoiva derivaattori nimensä mukaan derivoi signaalin ajan suhteen ja kääntää sen napaisuuden lähtönsä. Siinä negatiiviseen tuloon tuodaan signaali kondensaattorin kautta. Positiivinen tulo on maadoitettu. Vahvistimelle tehdään negatiivinen takaisinkytkentä vastuksen kautta. Se toimii samalla ylipäästösuotimena. Invertoivaa derivaattoria käytetään yleisesti, kun halutaan jännitepiikki muuntaa vastakkaisvaiheiseksi. Muunnosta tarvitaan joskus liipaisupulssiksi. (Sihvonen ym. 2003, 204-206.)

Komparaattori, eli jännitevertailija, on kytkentä, jossa takaisinkytkentä on viety vastuksen kautta vahvistimen positiiviseen tuloon. Siinä lähtösignaali on joko

positiivisen käyttöjännitteen tai negatiivisen käyttöjännitteen tasolla riippuen tulosignaalien välisestä suhteesta. Komparaattori kytkentä sopii hyvin termostaattitai hämäräkytkinkytkennäksi, koska se vertailee kahta eri jännitetasoa tuloissaan. Jos negatiivisen tulon jännite on suurempi kuin positiivisen tulon, ulostulojännite on lähellä nollaa, jos vahvistimen negatiivinen käyttöjännite on maadoitettu. Kun positiivisen tulon jännite on suurempi kuin negatiivisen, lähtöjännite vahvistimen ulostulossa on lähellä vahvistimen käyttöjännitettä.

(Sihvonen ym. 2003, 206.)

### 2.2.3 Operaatiovahvistimet AD8554 ja LM324

Tämän työn operaatiovahvistin valittiin sellaiseksi, jossa on mahdollisimman pieni offset-jännite. Offset-jännite on komponentin epäideaalisuuksista johtuva haitallinen jännite, joka näkyy operaatiovahvistimen lähdössä, vaikka tulojen jännitteet ovat yhtä suuret. Offset-jännite on useimmissa tapauksissa haitallinen, varsinkin tässä, koska lämpötilan mittausta tapahtuu juuri jännitteen mittaamisella ja vertaamisella sitä toiseen jännitteen arvoon.

Operaatiovahvistimeksi valittiin Analog Devicesin AD8554-operaatiovahvistin. AD8554-operaatiovahvistin käyttää yksipuoleista käyttöjännitettä, joka on joko 5 tai 2,7 voltia. Operaatiovahvistinpiirissä on samalla piisirulla neljä samanlaista vahvistinpiiriä. Vahvistinpiirit toimivat toisistaan riippumatta, mutta käyttävät samaa käyttöjännitettä ja maatasoa.

Epätarkempi operaatiovahvistin saattaa oskilloida eli värähdellä, jos operaatiovahvistimen ulostulojännite on hyvin lähellä nollaa, eli positiivisen ja negatiivisen tulonastojen välinen jännite on samansuuruinen. Vahvistimen värähtely aiheuttaa sen, että vahvistin ottaa virtaa sisäänmenonastaansa liikaa ja saattaa jopa rikkoutua. Värähtelyä voitiin kuitenkin ehkäistä sijoittamalla kondensaattori operaatiovahvistimen käyttöjännite- ja maanastan välille piirin välittömään läheisyyteen. Kondensaattorilla on ominaisuus, että se hidastaa jännitteen vaihtelua.

Valmistajan mukaan AD8554:n offset-jännite on alle yhden mikrovoltin tasolla, ja se tekee operaatiovahvistimesta tarkan. Se toimii lähellä nollajännitettä ilman

värähtelyä. Kytkenän prototyyppi- ja suunnitteluvaiheessa, johon tämä opinnäytetyö keskittyy, käytettiin kuitenkin LM324-operaatiovahvistinpiiriä, koska se on saatavissa DIP-kotelossa ja näin ollen prototyyppi voidaan helposti muodostaa koekytkenäalustalle. LM324:n offset-jännite on noin millivoltin luokkaa, ja se on prototyyppivaiheessa riittävän tarkka.

#### 2.2.4 AD8554-vahvistimen ominaisuudet

AD8554-operaatiovahvistin on Analog Devicesin valmistama tarkka mutta halpa nelikanavainen operaatiovahvistin. Valmistajan mukaan se sopii ominaisuuksiensa takia hyvin juuri lämpötila-, painemittaus- ja paikoitussovelluksiin. Valmistajan mukaan offset-jännite on vain yksi mikrovolti. Huojunta valmistajan datalehden mukaan on 0,005 mikrovoltia/°C. AD8554-operaatiovahvistin on rail-to-rail-tyyppinen ja se on toteutettu CMOS-tekniikalla. AD8554-vahvistinta pystyy käyttämään yksipuoleisella käyttöjännitteellä.

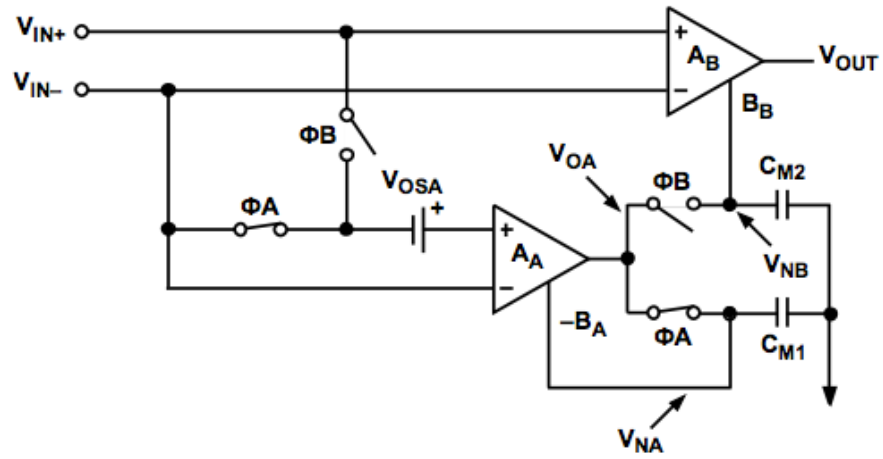
#### 2.2.5 AD8554-vahvistimen rakenne

AD8554-vahvistin koostuu kahdesta erillisestä vahvistinasteesta, pääasteesta ja toisioasteesta. Toisioasteella pyritään korjaamaan offset-jännitettä pääasteesta. Molemmat asteet sisältävät rail-to-rail-sisäänmenotilan, jolloin se mahdollistaa kummankin asteen sisäänmenon rail-jännitteen. Sisäänmenoaste ja rinnakkainen NMOS-aste toimivat yhdessä muodostaen erotusparin. Sisäänmenon erotusasteen ulostulo viedään erilliseen vahvistinasteeseen, jonka ulostulo ohjaa rail-to-rail-ulostuloa. Laaja jänniteasteikko saavutetaan kahdella transistorilla, joilla on yhteinen jännite. Ulostulojännitettä rajoittaa transistorin lähteen ja nielun välinen resistanssi. AD8554-vahvistimella on erinomainen vahvistusarvo. Se saavuttaa jopa 120 desibelin vahvistuksen avoimen silmukan topologiassa kahden kilo-ohmin kuormalla. (Analog devices, Inc. 2012)

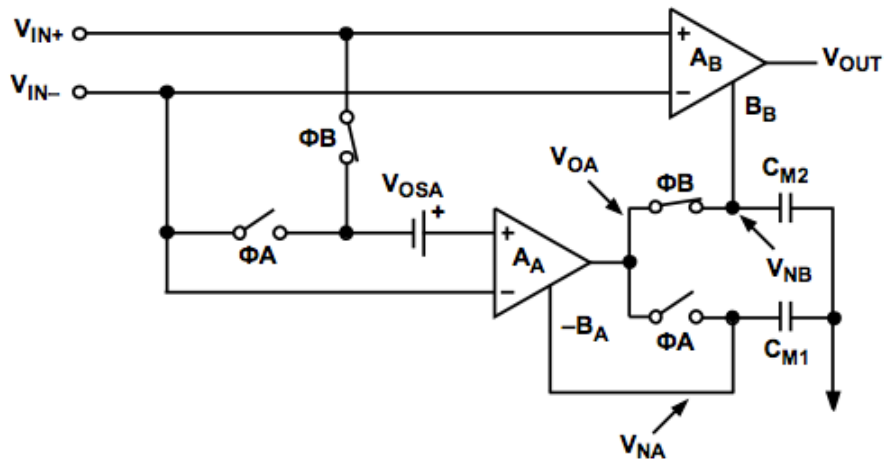
Vahvistimella on kaksi toimintamoodia. Ensimmäinen on nollausmoodi, joka poistaa offset-jännitteen, ja toinen on moodi, joka vahvistaa sisäänmenosignaalin ja päästää vahvistetun signaalin ulos.

Kuviossa 2 muunnin on nollausvaiheessa. Siinä  $\phi A$ -kytkimet ovat kiinni. Kytkinten ollessa kiinni, nollausvahvistin on erotettu vahvistusluupista yhdistämällä sen sisäänmenot.

Kuviossa 3  $\phi A$ -kytkimet ovat auki, ja  $\phi B$ -kytkimet ovat kiinni.  $C_{M1}$ -kondensaattori sisältää offset-jännitteen, ja näin korjaa nollausvahvistimen mahdolliset virheet.



KUVIO 2. Offset-jännitteen nollausvaihe



KUVIO 3. Jännitteen ulostulovaihe

### 2.3 Analogia-digitaalimuunnos

Jatkuva-aikainen signaali, kuten tässä työssä, on jännite, joka saadaan lämpötila-anturilta, ja se voidaan muuttaa diskreettiaikaiseksi lukujonoksi analogia-digitaalimuunnoksella. Informaatiota ei katoa, jos näytteenottotaajuus on vähintään kaksi kertaa signaalin korkein taajuus. Raja-arvoa, joka on kaksi kertaa niin suuri kuin signaalin sisältämä taajuus ( $f_s/2$ ), kutsutaan Nyqvistin taajuudeksi.

Jos näytteenottotaajuus on liian pieni, tapahtuu muunnoksessa laskostumisilmiö. Laskostuminen tapahtuu, kun näytteitä saadaan vähemmän kuin kaksi signaalin yhdestä värähtelyjaksosta. Laskostumista voidaan välttää suodattamalla näytteistettävää signaalia alipäästösuodattimella tai korottamalla näytteenottotaajuutta. (Klapuri & Virtanen 2010.)

### 2.4 Analogia-digitaalimuunnin

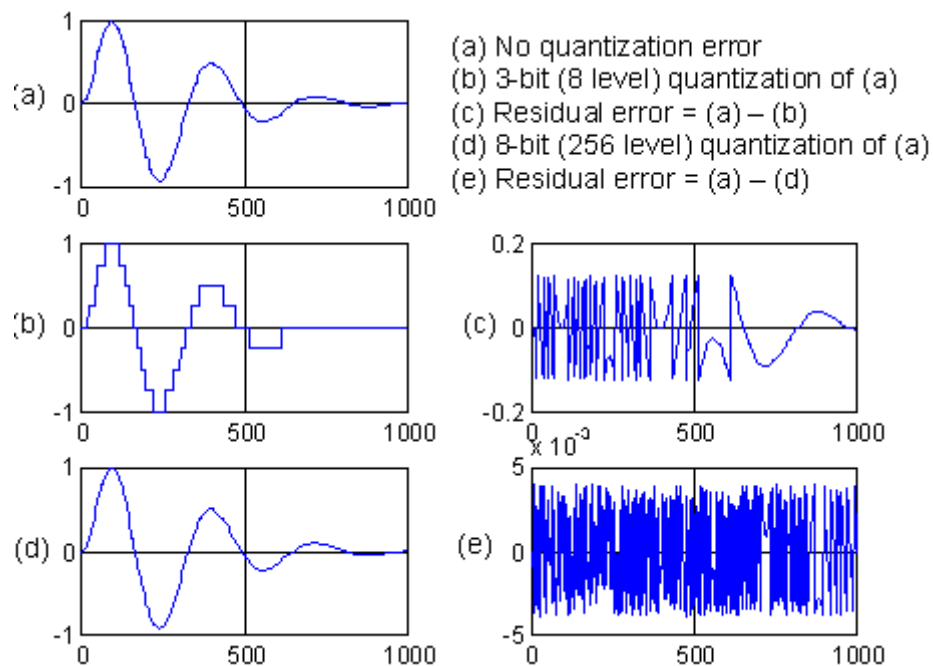
AD-muunnin valittiin tähän työhön siksi, koska siinä on samalla laitteella analogisen signaalin muunnos digitaaliseen binäärimuotoon sekä sen lähettäminen sarjamuotoisena datana eteenpäin laitteelta. Näin saadaan vähäisellä määrällä komponentteja toteutettua moduuli, jolloin piirilevystä tulee kompaktin kokoinen ja vikaantumisriski pienenee. Samoin hinta ei nouse moduulissa korkeaksi.

AD-muunnin on laite, joka muuttaa analogisen jännitteen signaalin digitaaliseksi lukuarvoksi. Se ottaa tietyn aikavälein analogisesta jännitteestä näytteen ja vertaa sitä omaan vertailujännitteeseen muodostaen siitä digitaalisen luvun. Tämän takia vertailujännite on pysyttävä samansuuruisena koko mittauksen ajan.

AD-muuntimen resoluutio on laitteen antaman digitaalisanan bittien määrä. 10-bittisessä muuntimessa resoluutio, eli tarkkuus on  $2^{10}$ , joten laitteesta saadaan 1024 erilaista digitaalista arvoa. Arvot esitetään binäärimuodossa 0 - 1023, jossa binääriluku 1023 vastaa suurinta jännitearvoa ja vastaavasti binääriluku 0 on jännitteen alhaisin arvo. Jos mitattava jännite on nolasta viiteen volttiin, saadaan yksinkertaisella kaavalla  $\frac{5}{1024} = 0,0048828$  voltia eli noin 4,9 millivolttia / bitti. Kymmenbittinen AD-muunnin riittää tähän työhön hyvin koska jännitteestä ei ole tarkoitus saada kuin asteen tarkkuus.

### 2.4.1 Kvantisointivirhe

Kvantisointivirhe on virhe, jossa laitteen analogisen tulokanavan ja digitaalisen muunnostuloksen välillä ei ole tarkkaa vastaavuutta. Tosin sanoen jatkuva-aikaiselle analogiselle signaalille ei ole kaikkia mahdollisia arvoja, joten se pyöristetään lähimpään askeleeseen. Ongelma korostuu, jos digitaalimuuntimessa on pieni resoluutio. Tässä työssä kvantisointivirheen voi jättää huomioimatta, koska kymmenbittinen muunnos riittää tälle lämpötila-asteikolle, kun tässä työssä vaaditaan asteen tarkkuus lämpötilan digitaalivastaavuuteen.



KUVIO 4. Kvantisointivirhe 3-bittisellä ja 8-bittisellä muunnoksella.

### 2.4.2 Signaali-kohinasuhde

Signaali-kohinasuhteella tarkoitetaan signaalissa esiintyvän kohinan tasoa verrattuna signaalin teholliseen arvoon. Suhde ilmaistaan desibeleinä.  $S/N \text{ (dB)} = 10 \log (P_s/P_n)$ , jossa  $P_s$  on hyötysignaalin teho ja  $P_n$  kohinan teho. AD7811-muuntimen signaali-kohinasuhteeksi valmistaja ilmoittaa minimiksi 58 dB. Jos kohinaa esiintyy suurella intensiteetillä, laitteen muunnos ei ole tarkka, koska kohina muuttaa mitattavan jännitteen todellista arvoa. Tähän työhön signaalikohinasuhde on riittävä.

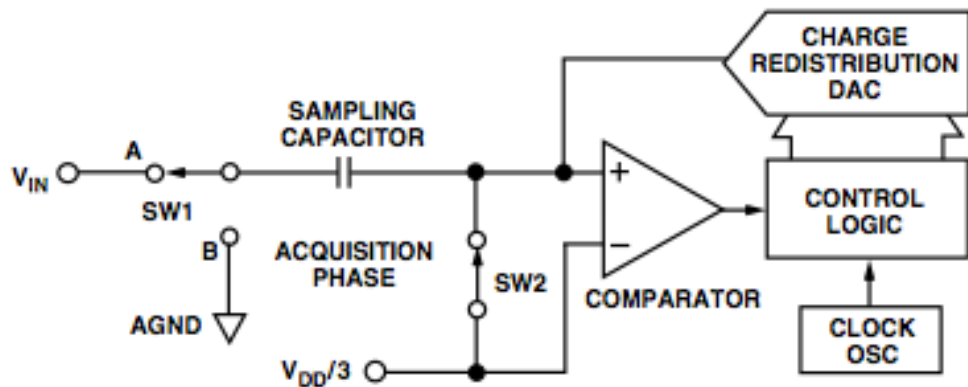
### 2.4.3 Linearisointivirhe

Kaikissa AD-muuntimissa on linearisointivirhettä, joka johtuu niiden fyysisestä toteutuksesta. Linearisointivirheen takia muuntimen lähtö ei seuraa täysin lineaarisesti piirin tuloa. Tätä virhettä voidaan hallita kalibroinnilla ja mittauksilla. Valmistaja ilmoittaa linearisointivirheen prosentteina. Lineaarisuus on tärkeää digitaalimuunnoksessa. Anturin mittaama tulos on lineaarinen, tulkittava tieto pitää myös pysyä lineaarisena, ettei tulos vääristy.

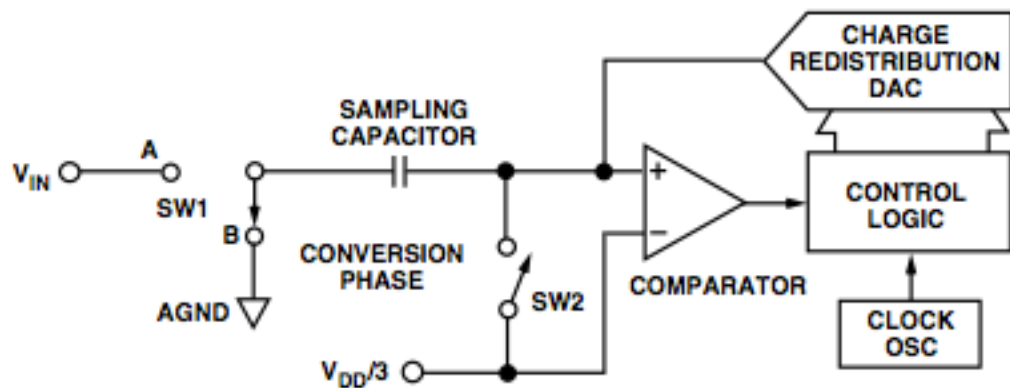
### 2.5 AD7811 analogia-digitaalimuunnin

Työhön valittiin AD-muuntimeksi Analog Devicesin valmistama AD7811. Se on 10-bittinen muunnin, jossa on neljä sisääntulokanavaa, joista käytetään vain yksi. Loput sisääntulokanavat tulee maadoittaa, jotta ne eivät häiritse mittaustapahtumaa.

AD7811 on arvioiva jatkuvan mittaamisen muunnin. Sen toiminta perustuu jännitteen uudelleen varaamiseen. Jännite varautuu laitteeseen minkä jälkeen se mitataan. Muunnoksessa on kaksi vaihetta: ensimmäinen lataa mitattavan jännitteen laitteen varausyksikköön ja toisessa, vertailuvaiheessa sisäänmenonastan kytkin avataan ja varausyksikön jännite vietään komparaattorin kautta loogiseen tulkintayksikköön. Vertailujännite on kytkennässä komparaattorin sekä positiiviseen että negatiiviseen nastaan jännitteen varausvaiheessa, jolloin komparaattori on tasapainotilassa. Vertailuvaiheessa referenssijännitteen kytkin positiiviseen komparaattorin jännitteeseen avataan, jolloin kytkentä jää ainoastaan komparaattorin negatiiviseen nastaan, jolloin vertailu voidaan suorittaa.



KUVIO 5. Jännitteen varausvaihe

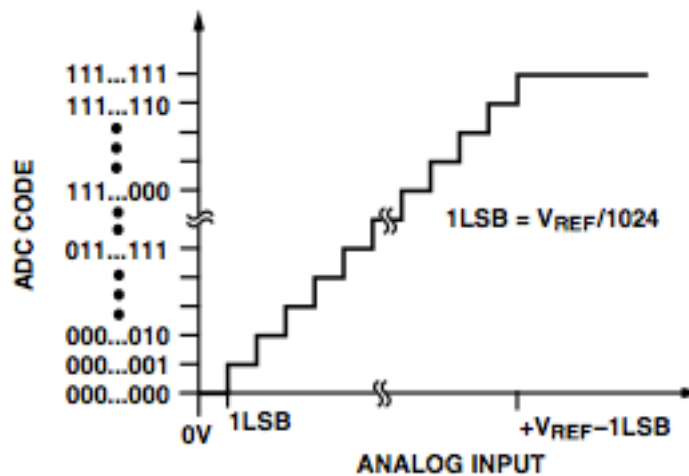


KUVIO 6. Jännitteen muunnosvaihe

Laitteessa on SPI-liitäntä mikrokontrollerille tai prosessorille, jolloin saadaan vietyä sarjamuotoinen digitaalidata eteenpäin laitteelle, jolla digitaaliseksi muutettu lämpötila tulkitaan. Laitteessa on sisäinen referenssi- eli vertailujännite, mutta tässä työssä käytettiin ulkoista vertailujännitettä, koska sisäinen vertailujännite laitteessa on maksimissaan 2,5 voltia ja tässä työssä operaatiovahvistimelta saatava jännite vaihtelee noin nollan ja viiden voltin välillä. Siten voidaan käyttää laajempi skaala jännitteessä. Ulkoisen vertailujännitteen käyttö ei muuta mitenkään tarkkuutta eikä mitään muutakaan arvoa muunnoksessa.

Laitteen tarkkuus on  $\pm 1$  LSB (vähiten merkitsevä bitti), joka riittää tähän työhön hyvin. Linearisointivirhe on valmistajan datalehden mukaan vain yksi prosentti.

Muunnosaika on keskimäärin 2,3 mikrosekuntia, joka riittää hyvin kyseiseen kytkentään, jossa mitataan lämpötilaa ja lämpötilan vaihtelu ei ole nopeaa.



KUVIO 7. AD7811-muuntimen ideaalinen siirtofunktio

AD7811-muuntimen ulostulo on pelkkää binääri-numeerista dataa. Datakoodi perustuu ideaalitalanteessa siten, että jänniteasteikko on jaettu tasan kymmenen bitin binääriluvuiksi, silloin koko jänniteasteikon sisällä jokaiselle jännitetasolle löytyy binäärilukuvastaavuus, silloin koko jänniteasteikosta saadaan 1024 erilaista binääri-numeroa.

AD-muunnin tarvitsee yksipuoleisen ulkopuolisen käyttöjännitteen, joka voi vaihdella 2,7 voltista 5,5 volttiin. Laite osaa itse sammuttaa sisäisen vertailujännitteen, jos käytetään ulkoista vertailujännitettä. Vertailujännite asetetaan tässä kytkennässä +5 volttiin. Liitteenä laitteen datalehti, jossa näkyvät muuntimen signaali-kohinasuhde ja kokonaisharmoninen särö tietyillä taajuuksilla.

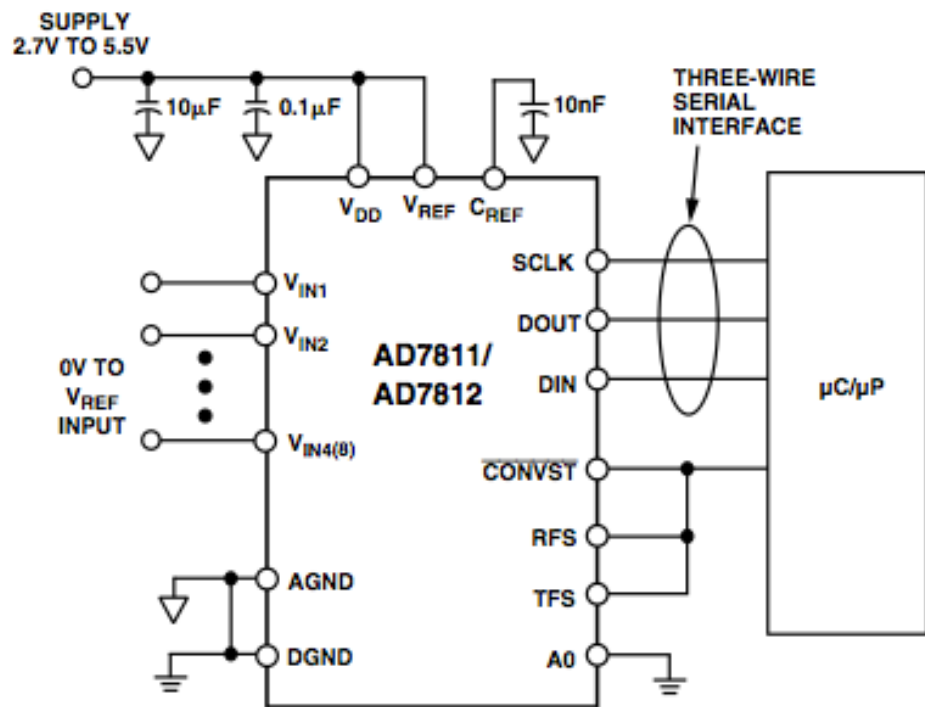
### 2.5.1 AD7811:n liitynnät

AD7811:ssa on neljä toisistaan erillistä analogista sisääntulokanavaa, joten laite pystyy muuntamaan neljästä eri lähteestä analogisen signaalin digitaaliseksi. Syötetty jännite voi vaihdella nollan voltin ja käyttöjännitteen välillä. Laitteessa on osoitenasta, joka voidaan kytkeä ylös tai alas. Osoitenastalla voidaan valita tietty laite, jos samoja laitteita on samassa sarjaliikennelinjassa kaksi.

Lähetysbittinastalla kerrotaan laitteelle, että kontrollibitti pitää lähettää seuraavilla kymmenellä kellopulsilla sarjaliikennenastasta. SCLK -nasta on sarjaliikenteen kellopulsinasta, ja sen avulla piiri tahdistuu sarjaliikennettä vastaanottavaan laitteeseen. SCLK-nastan lisäksi sarjaliikennenastoja on DIN-nasta (sarjamuotoinen data sisälle) ja DOUT-nasta (sarjamuotoinen data ulos). Lisäksi nastoja on RFS, datan vastaanotonasta, ja TFS, datan lähetysnasta, joilla kerrotaan muuntimelle, halutaanko sen lähettävän vai vastaanottavan dataa asettamalla nämä kaksi nastaa joko ylös tai alas.

### 2.5.2 Analogia-digitaalimuuntimen tyypillinen kytkentä

Kuviossa 8 näkyvässä valmistajan ehdottomassa tyypillisessä kytkennässä on käyttöjännite kytketty samaan potentiaaliin kuin referenssi- eli vertailujännite. Laitteen sisäinen vertailujännite on poissa käytöstä.



KUVIO 8. Tyypillinen analogia-digitaalimuunnoskytkentä

CREF-nasta on vertailujännitteen kondensaattoria varten. Kondensaattoria käytetään parantamaan laitteen sisäisen vertailujännitteen kohinaominaisuuksia. SCKL-nasta on laitteelle syötettävää kellopulssia varten. Kellopulssia tarvitaan, jotta laite tahdistuisi sarjaliikennettä vastaanottavan laitteen kanssa. Tahdistusta tarvitaan myös jotta laitteeseen voidaan antaa dataa, kuten käsky aloittaa muunnos.

DOUT-nasta on datan ulossyöttönasta, siitä nastasta laite syöttää datan sarjamuotoisena ulos. Sarjamuotoinen data tulee ulos kellopulssin nousevalla reunalla. Nasta menee korkeaimpedanssiseen tilaan yhdennellätoista kellopulssin nousevalla reunalla, jolloin data on siirretty.

DIN-nasta on datan sisäänmenonasta. Nastasta syötetään sisään kontrollibitti. CONVST-nasta on invertoitu nasta, eli pito ja seuranta menee laitteessa pitotilaan kellopulssin laskevalla reunalla ja tämän jälkeen muunnos aloitetaan.

RFS-nasta on vastaanoton kehyksen tahdistus. Sillä käynnistetään laskuri sarjaliikenneliitännässä. Sillä myös mahdollistetaan yhteensopivuus niihin digitaalisiin signaaliprosessoreihin, joissa on jatkuva-aikainen sarjaliikennekellopulssi ja kehyssignaali. TFS-nasta on kehyksen siirron tahdistusnasta. Nastaan syötetään pulssi, jolloin laitteelle kerrotaan että, seuraavalla kymmenellä laskevalla kellopulssin reunalla syötetään uusi kontrollibitti.

DGND-nasta on digitaalinen maatasonasta. Nasta toimii digitaalisen piirin maatasona, kuten sarjaliikenteen. A0-nasta on osoitenasta; se voidaan kytkeä joko ylös tai alas. Sillä voidaan totettaa kahden muuntimen kytkentöjä samaan sarjaliikenneväylään. AGND-nasta on analogisen piirin maataso. Sitä maatasoa käyttää vertailuna komparaattori, pito ja seuranta, sisäinen vertailujännite ja digitaal-analogimuunnin.  $V_{in1}$ - $V_{in4}$ -nastat ovat muunnettavan jännitteen sisäänmenonastoja. Jänniteskaala niissä on  $0v - V_{ref}$ .

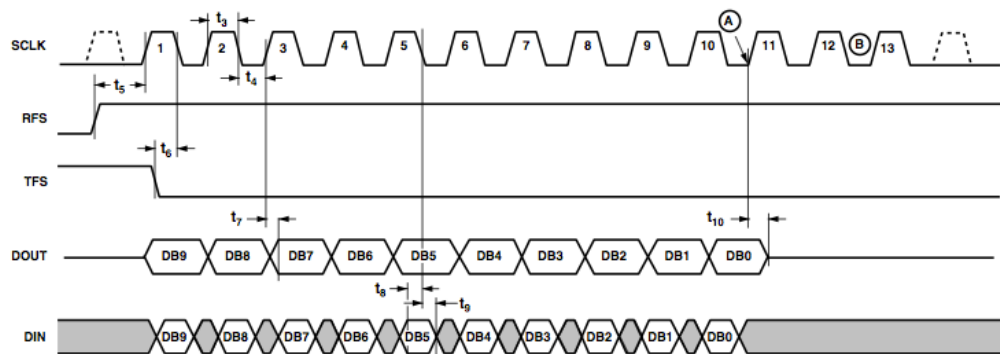
Laitteeseen syötettävä analogisen jännite ei saa olla 200:aa millivolttia korkeampi kuin käyttöjännite. Jos jännite nousee liian korkeaksi, laite rikkoutuu.  $V_{ref}$ -nasta on ulkoisen vertailujännitteen syöttönasta. Siihen voidaan kytkeä vertailujännite, kun halutaan käyttää ulkoista vertailujännitettä. Jos halutaan käyttää ulkoista vertailujännitettä, on EXTREF-bitti kontrollirekisterissä asetettava loogiseen ykköstitaan.

### 2.5.3 Analogia-digitaalimuuntimen toimintamoodit

Toimintamoodit AD7811-muuntimeen valitaan CONVST-nastalla. Moodeja on kaksi. Laite tarkistaa CONVST-bitin tilan laitteen sisäisessä kontrollirekisterissä ennen muunnoksen päättymistä. Jos bitti on loogisessa ykkösasemassa, laite ei sammu muunnoksen jälkeen vaan jatkaa käynnissäoloa. Toisessa moodissa laitteen CONVST-bitti on loogisessa nolla-asemassa, ja laite sammuu heti muunnoksen suoritettuaan. Ensimmäistä toimintamoodia voidaan käyttää silloin kun tarvitaan nopeaa suorituskykyä. Suorituskyky paranee, kun laite ei sammu välillä vaan muunnoksia tehdään jatkuvasti. Toisessa moodissa laitteen virrankulutus pienenee ja muunnoksien välinen aika kasvaa.

#### 2.5.4 Sarjamuotoinen data muuntimelta

Kuviossa 9 on esitetty piirroksen avulla AD7811-muuntimen sarjamuotoisen datan ajoituskaavio. Siinä ylimmässä SCKL-käyrässä on kellotaajuuden jännitekäyrä. Seuraavana alempana on vastaanoton kehyksen tahdistusjännite. RFS-jännitteen nousevalla reunalla ja TFS-jännitteen laskevalla reunalla nollaantuu laskuri joka laskee kellopulsseja. Nollaus täytyy tehdä, jotta laite osaa laskea oikean määrän kellopulsseja, joiden aikana oikea määrä bittejä siirretään sarjaliikenteen siirtorekisteristä sisään ja ulos.



KUVIO 9. Signaalien ajastuskaavio

Ensimmäisen kellopulsstin nousevalla reunalla RFS-signaalin ylösnousun jälkeen DOUT-nasta poistuu korkeaimpedanssisesta tilasta ja data siirretään DOUT-nastasta ulos jokaisella seuraavalla kellopulsstin nousevalla reunalla. DOUT-nasta palaa korkeaimpedanssiseen tilaan yhdennentoista kellopulsstin nousevalla reunalla jolloin data on siirretty ulos.

DIN-signaali on kytketty siten, että ensimmäisen kellopulsstin laskevan reunan jälkeen odotetaan laskevaa reuna TFS-pulssista, minkä jälkeen dataa siirretään sisään jokaisen seuraavan kellopulsstin laskevalla reunalla.

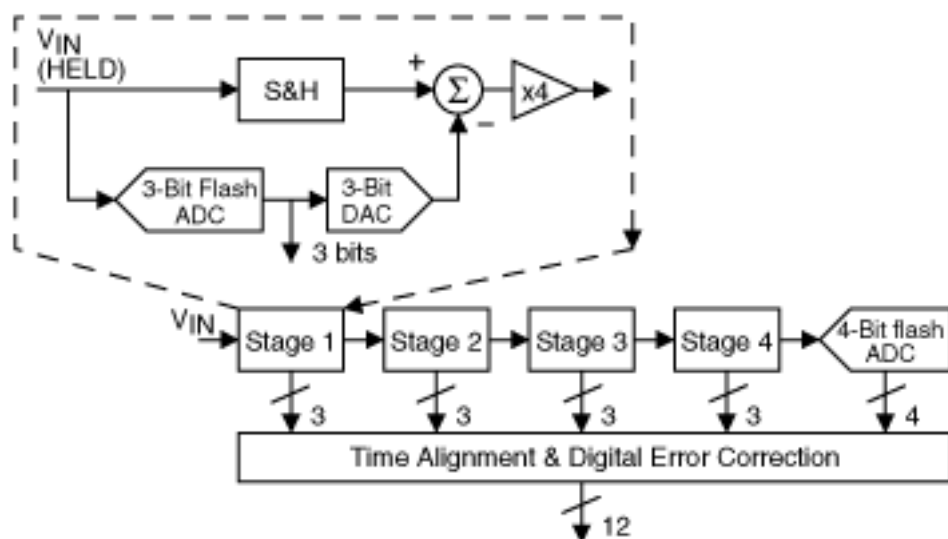
Kontrollirekisteri päivitetään kolmannentoista kellopulsstin nousevalla reunalla. Minimissään tarvitaan siis 13 kellopulsssia sarjaliikenteen kirjoitusoperaatioon. RFS- ja TFS-nastoja voidaan käyttää osoitenastoina, jos laitteita on kytketty useampi samassa sarjaliikenneväylässä. Laite odottaa molempiin nastoihin aktiivisia pulssin reunoja lähettääkseen ja vastaanottaakseen dataa.

Laitteessa on viisinastainen sarjaliikenneväylä. Se mahdollistaa kytkennät monien erilaisten sarjaliikennestandardien kanssa. Vaihtoehtona on yksinkertaistaa kytkentää siten, että vain kolmea johdinta käytetään. Silloin RFS- ja TFS-nastat on kytkettävä CONVST-nastaan. Tällaisessa kytkennässä viedään CONVST-signaali muuntimelle. Signaalin saatuaan laite aktivoituu ja lähettää ja vastaanottaa datan saatuaan muunnoksen valmiiksi.

### 2.5.5 Muut AD-muuntimet

On olemassa neljänlaisia AD-muuntimia. Niitä ovat liukuhihna-, SAR-, Delta-Sigma- ja flash-muuntimet. Tässä työssä valittiin SAR (successive approximation register)-muunnin sen ominaisuuksien takia. Tässä työssä nopeutta muunnokseen ei tarvita, koska lämpötilaa mitattaessa ei lämmönvaihtelu mitattavassa kohteessa ole nopeaa. SAR-muuntimen nopeus riittää tähän työhön hyvin.

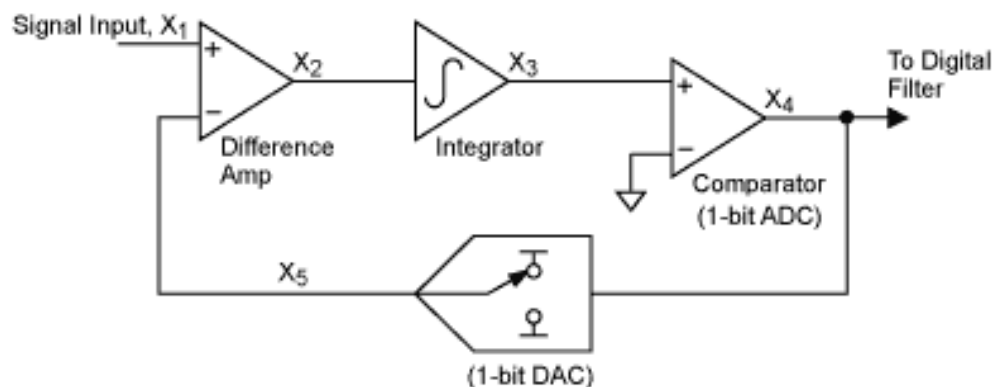
Liukuhihnamuunnin on nopea, mutta nopeuden hintana on sen suuri tehonkulutus. Jos olisimme käyttäneet liukuhihnamuunninta tässä työssä, jäähdyserä olisi ollut pakollinen muuntimelle, koska laite lämpenee voimakkaasti tehonkulutuksen takia. Liukuhihnamuuntimen rinnakkainen muunnos aiheuttaa myös pienen viiveen ensimmäisen muunnoksen eteen. Sen jälkeen muunnosnopeus on satoja kertoja nopeampi kun SAR-muuntimen. Kuviossa 10 katkoviivalla erotettu osio sisältää yhden vaiheen lohkokaaavion. Näitä vaihteita on liukuhihnamuuntimessa useita.



KUVIO 10. 12-bittisen liukuhihnamuuntimen lohkokaavio

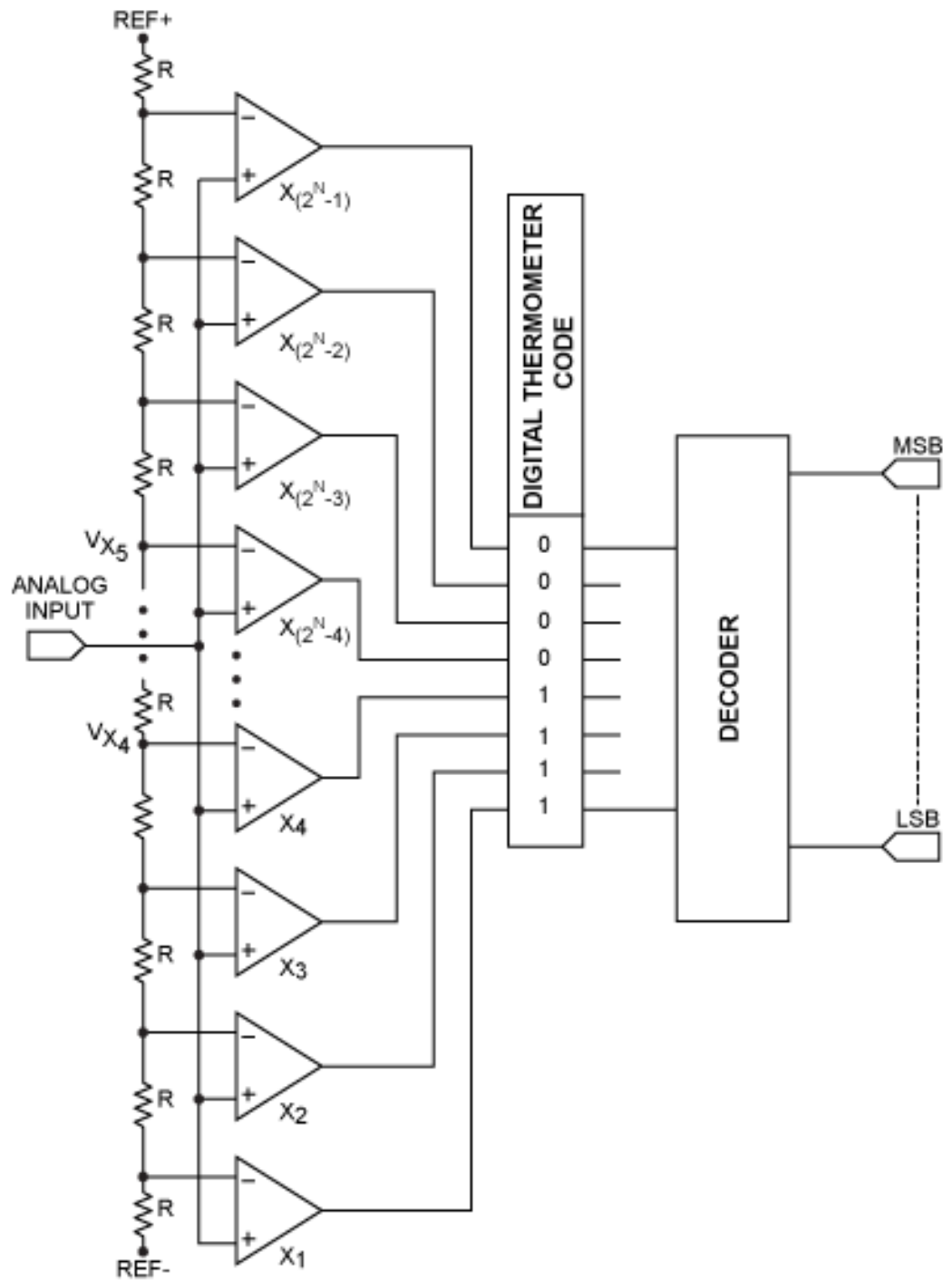
Delta-Sigma-muuntimen nimi tulee sanoista Delta = erotus ja Sigma = summa. Delta-Sigma-muuntimessa on hyvä tasajännitetarkkuus. Sen rakenne mahdollistaa lähes rajattoman resoluution. Delta-Sigma-tyyppinen muunnin sisältää summaimen, integraattorin ja komparaattorin. Delta-Sigman-muuntimen toiminta yksinkertaistettuna kuvattuna: Mitattava jännite otetaan summaimen positiiviseen tuloon ja komparaattorin lähtöjännite takaisinkytketään negatiiviseen tuloon. Summaimen lähtö viedään integraattoriin ja sen lähtö kytketään komparaattorin positiiviseen tuloon. Komparaattori vertailee positiivisen ja maatasoin välillä ja lähtö on joko jännitteellinen tai nollassa.

Hyvänä puolena Delta-Sigma-muuntimessa on mahdollisuus korkeaan resoluutioon ja yksinkertainen rakenne. Huonona puolena voidaan pitää komparaattorin ulostulon virheitä, jotka vääristävät digitaalimuunnosta. Kuviossa 11 on esitetty lohkokaavio, joka kuvaa yksinkertaistettuna muuntimen rakennetta.



KUVIO 11. Delta-Sigma-muuntimen lohkokaavio

Vielä yksi muunnintyyppi on flash-muunnin. Siinä jokaiselle jännitetasolle on oma komparaattori, eli jos halutaan kahdeksanbittinen muunnin, pitää laitteessa olla  $2^8 = 256$  komparaattoria. Kuviossa 12 on havainnollistettu se, että komparaattoreita on jokaiselle bitille. Suuriresoluutioisen muuntimen, esimerkiksi kahdeksantoistabittisen valmistaminen on käytännössä mahdotonta, koska komparaattoreita tulisi silloin  $2^{18} = 262144$  kappaletta.



KUVIO 12. Flash-muuntimen lohkokaavio

### 3 TOTEUTUS

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena suunnitella Koulutuskeskus Salpaukselle lämpötilan mittausmoduuli. Moduulin tuottama digitaalidata viedään sarjamuotoisena datana erilliselle mikroprosessorikortille, jossa se tulkitaan ja muutetaan lämpötila-arvoksi. Digitaalimuunnos tehdään kymmenen bittiseksi digitaalisanaksi. Jännitteen suhde lämpötilaan tulee olla mahdollisimman lineaarinen siten, että anturikytkennästä mitattu jännite suhteessa lämpötilaan muodostaisi suoran yläviistoon kulkevan janan.

Kytkentä simuloitiin aluksi National Instrumentsin Multisim-ohjelmalla ja suoritettiin tarpeelliset mittaukset. Simulointi tehtiin molemmilla operaatiovahvistintyypeillä. Simuloinnin jälkeen kytkentä toteutettiin koekytkentäalustalle ja suoritettiin mittaukset. Prototyypikytkennässä käytettiin LM234-piirejä ja vasta lopullinen versio toteutettaisiin paremmilla operaatiovahvistimilla.

#### 3.1 PT-100-anturin kytkentä

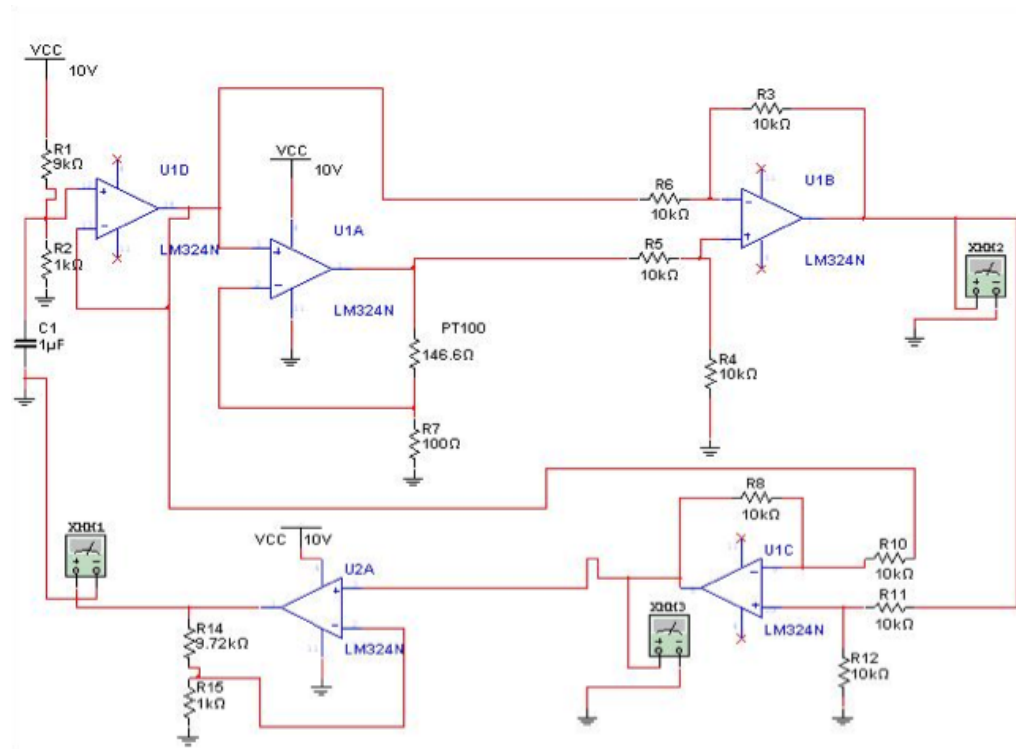
PT-100 –anturi kytketään ensimmäisen vahvistinasteen toiseksi takaisinkytkentävastukseksi yhdessä sadan ohmin tarkkuusvastuksen kanssa, jossa saadaan aikaiseksi jännitteenjako maapotentiaalin ja negatiivisen tulonastan välille. Tarkkuusvastusta on käytettävä, koska tavallisissa sadan ohmin vastuksissa voi olla jopa kymmenen prosentin ero todelliseen vastusarvoon ilmoitettuun verrattuna.

Lämpötila-anturin läpi kulkeva virta on noin kymmenen milliampeeria. Virta tässä tapauksessa jää todella pieneksi, koska operaatiovahvistimen sisäänmenoimpedanssi, eli virran vastusarvo, on todella suuri.

#### 3.2 Operaatiovahvistimen kytkentä

Kuviossa 13 operaatiovahvistinkytkennän ensimmäinen aste on ei-invertoiva vahvistin. Sen ei-invertoivaan tuloon tuodaan yhden voltin referenssijännite ja negatiivisen takaisinkytkennän muodostavat 100 ohmin tarkkuusvastus ja PT-100-

anturi. Näin ollen lämpötilan ollessa nolla astetta, jolloin PT-100-anturin vastusarvo on sata ohmia, vahvistimen lähtöjännite on kaksi voltia ja 120 asteessa 2,466 voltia.



KUVIO 13. Operaatiovahvistinkytkentä

Kuviossa 13 seuraavat kaksi astetta ovat erotusvahvistimia, joiden invertoivaan tuloon tuodaan yhden voltin referenssijännite. Näin saadaan jännitteestä vähennettyä kaksi voltia ja saadaan se vaihtelevaan nollan voltin ja 0,466 voltin välille riippuen lämpötilasta. Tämä jännitealue on sovitettu tähän työhön, koska jännitettä tullaan vahvistamaan kertoimella, jolloin se skaalautuu lineaarisesti. Näin ollen lämpötilaskaalan matalimmalla tasolla, jännite on noin nolla voltia, jolloin sen kertominen ei vääristä tulosta.

Tämän jälkeen jännite skaalataan kertomalla sitä nollan voltin ja viiden voltin välille. Tähän käytetään ei-invertoivaa operaatiovahvistinkytkentää, joka vahvistaa jännitteen noin kymmenkertaiseksi. AD-muunnin lukee tämän jännitteen ja muuntaa sen digitaaliluvuksi. Kytkennän referenssijännite puskuroitiin jännitteen seuraajan avulla. Puskurointia tarvittiin sen takia että vertailujännite pysyy vakiona.

## 4 MITTAUKSET

### 4.1 Simuloinnin tulokset

Kun kytkentää simuloitiin MultiSim-ohjelmalla, kytkentä vaikutti erittäin lineaariselta. Lämpötila-asteikon yläpäässä, PT-100-anturin ollessa 146,6 ohmia, joka vastaa anturin 120 asteen lämpötilaa, saatiin AD-muuntimelle tulevaksi jännitteeksi 4,998 voltia. Asteikon puolella välissä jännite oli tasan 2,5 voltia ja nollassa astetta vastaavassa tilassa jännite oli 37,53 millivoltia. Tämä offset-jännite nollassa asteessa ei kuitenkaan haittaa, koska yksi aste vastaa noin 42 millivoltia ja näin ollen tämä offset-jännite tulkitaan vielä nollassa asteeksi. Simuloinnin mittaustulokset jännitteet vastusarvon suhteen ovat esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Simuloinnin mittaustulokset

PT-100/ohmia	Voltage / V	Temp / astetta Celciusta
100 ohmia	0,037 V	0 astetta
111,9 ohmia	1,279 V	30 astetta
123,3 ohmia	2,500 V	60 astetta
134,7 ohmia	3,722 V	90 astetta
146,6 ohmia	4,998 V	120 astetta

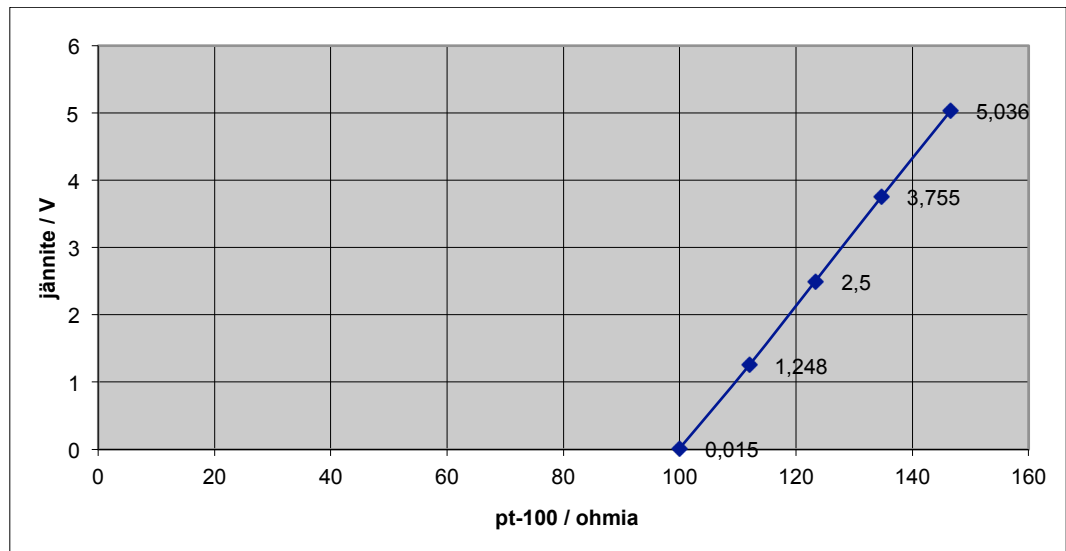
### 4.2 Operaatiovahvistimen jännitearvot

Laitteen fyysisessä operaatiovahvistinkytkennässä laitteen AD-muuntimelle tulevaan johtimesta saatiin mitattua 5,036 voltia, kun PT-100 vastusarvoksi asetettiin 146,6 ohmia, joka vastaa 120 celsiusasteen lämpötilaa. Kun vastusarvo asetettiin sataan ohmiin, joka taas vastaa nollassa astetta PT-100 anturissa, samasta johtimesta mitattiin noin 15 millivoltia, joka on tässä tapauksessa riittävän lähellä nollapotentiaalia. Lämpötila-asteikon puolella välissä eli vastusarvon ollessa 123,3 ohmia mitattiin jännitteeksi 2,5 voltia. Lisäksi mitattiin jännitteet vielä 30:tä ja 90:tä astetta vastaavat vastusarvot ja mittaustuloksista voitiin päätellä, että kytkentä toimii kohtuullisen lineaarisesti. Fyysisen kytkennän mittaustulokset ovat taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Prototyypikytkenän mittaustulokset

PT-100/ohmia	Voltage / V	Temp / astetta Celciusta
100 ohmia	0,015 V	0 astetta
111,9 ohmia	1,248 V	30 astetta
123,3 ohmia	2,500 V	60 astetta
134,7 ohmia	3,755 V	90 astetta
146,6 ohmia	5,036 V	120 astetta

Kuviosta 1 nähdään, että työssä päästiin hyvin lineaariseen tulokseen. Muutamien millivolttien epälineaarisuus ei haittaa, koska työssä oli tarkoitus saavuttaa yhden celsiusasteen tarkkuus. Tämä lineaarisuus siis voitiin saavuttaa myös ilman reguloitua (vakavoitua) vakiovirtalähdettä, joka päätettiin jättää pois tästä kytkennästä.



KUVIO 14. Kytkennän lineaarisuus, suhteessa anturin resistanssiin

## 5 YHTEENVETO

Työssä onnistuttiin suunnittelemaan lämpötilanmittausmoduulin prototyyppi. Aluksi suunniteltiin tarvittava kytkentä ja sen jälkeen käytettiin simulaattoria oikeiden komponenttiarvojen löytämiseen. Kun simuloinnilla oli saavutettu toimiva kytkentä, siirryttiin tekemään prototyyppikytkentää.

Prototyyppikytkennällä pyrittiin samoihin tuloksiin kuin simuloinnissa ja tavoitteena oli lineaarisuus jännitteen suhteen lämpötilaan. Riittävän hyvä lineaarisuus saavutettiin, ja seuraava vaihe olisi tehdä kytkentä piirilevylle ja käyttää siinä laadukkaampia AD8554-operaatiovahvistimia.

Kytkeä piirilevylle ja laadukkaampien operaatiovahvistimien käyttäminen on kuitenkin tämän opinnäytetyön ulkopuolella. Vaikka AD8554-operaatiovahvistimella on paremmat ominaisuudet, jo halvalla ja yleiskäyttöisellä LM324-operaatiovahvistimella saavutettiin tässä työssä raja-arvot saavuttanut kytkentä. Tarkemmalla operaatiovahvistimella päästään vielä tässä kytkennässä 37 millivoltin offset-jännitettä matalammalle tasolle, koska valmistaja lupaa pienemmät offset-jännitteet omalle AD8554-vahvistimelleen.

Työssä huomattiin, että operaatiovahvistimet eivät ole ideaalisia ja epäideaalisuudet pitää ottaa huomioon suunnitteluprosessissa. PT-100-anturin läpi kulkeva virta tässä kytkennässä oli noin 10 milliampeeria, ja se on suurempi mihin pyrittiin. Tämä voitaisiin korjata käyttämällä PT-1000-anturia ja sen kanssa 1000 ohmin vastusta ensimmäisen vahvistinasteen takaisinkytkennässä. Näin virta saataisiin alennettua yhteen milliampeeriin, koska PT-1000-anturin vastusarvo on PT-100-anturiin verrattuna kymmenkertainen.

Toinen mahdollisuus olisi muuttaa kytkentää ja kytkeä lämpötila-anturi sarjaan reguloidun vakiovirtalähteen kanssa ja asettaa virta tällä tavoin sopivaksi. LM317-regulaattorin avulla tämä olisi mahdollista toteuttaa ja PT-100-anturi kytkettäisiin ensimmäisen vahvistinasteen ei-invertoivaan tuloon sarjassa LM317-regulaattorin kanssa.

Työn tavoitteena oli kuitenkin vain suunnitella toimiva konsepti, jonka pohjalta voitaisiin jatkossa suunnitella toimiva laite, ja siinä onnistuttiin. Työssä keskityttiin elektroniikkasuunnittelun ensimmäiseen työvaiheeseen, jossa

asiakkaan vaatimuksista toteutetaan toimiva prototyyppi, josta voidaan helposti siirtyä laitteen jatkokehitykseen. Tässä vaiheessa prototyyppi voidaan esittää asiakkaalle ja keskustella tarkemmin laitteen jatkokehittämisestä ja tarkentaa asiakkaan vaatimuksia. Kytkennän suunnitteluun ja kokeiluun kuluu aikaa, ja vahvistusten asettelu kytkennän vaatimalla tavalla vie aikaa suunnitteluprosessissa.

Tarkkuusvastus on tärkeä osa kytkennässä, koska jos tavallista sadan ohmin vastusta käytetään, saattaa vastuksen vastusarvossa olla jopa kymmenen prosentin vääristymä. Vääristymä aiheuttaa kytkennässä epälineaarisuutta ja silloin ei tuloksia voida hyväksyä. Ilman tarkkuusvastusta olisi joutunut kytkentää muuttamaan siten, että vakavoitua vakiovirtalähdettä olisi joutunut käyttämään ja silloin olisi myös kytkennästä tullut erilainen. AD-muunninta ei tähän kytkentään laitettu, koska sen kytkentä on yksinkertainen ja siitä on olemassa hyvä dokumentaatio valmistajan sivuilla. Tässä työssä keskityttiin vain lämpötila-anturin antaman vastusarvon muuttamiseen jännitteeksi, jonka AD-muunnin sitten tulkitsisi. Jännitteen saaminen haluttuun arvoon ilman virran suuria muutoksia tuo haastetta kytkennän toteuttamiseen. Jännite kuitenkin saatiin aseteltua oikeanlaiseksi ilman että virta muuttaisi lämpötila anturin läpi kulkiessaan. Lineaarisuus toteutui tässä kytkennässä hyvin, koska virta pysyy kohtuullisen pienenä koko lämpötila-asteikolla.

## LÄHTEET

Analog devices, Inc. 2012. AD8551/AD8552/AD8554 Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifiers Data Sheet (Rev E, 11/2012) [viitattu 19.2.2014].

Saatavissa:

[http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8551\\_8552\\_8554.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8551_8552_8554.pdf)

Klapuri, A. & Virtanen, T. 2010. AD/DA-muunnos [viitattu 19.2.2014].

Saatavissa:

<http://www.cs.tut.fi/~digaudio/adda.pdf>

Mittaustekniikan perusteet. 2007. Helsingin yliopisto [viitattu 19.2.2014].

Saatavissa:

[http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/Luento10\\_2007\\_anturit.pdf](http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/Luento10_2007_anturit.pdf)

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

Wikipedia. 2014. Resistance thermometer [viitattu 19.2.2014].

Saatavissa:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Resistance\\_thermometer](http://en.wikipedia.org/wiki/Resistance_thermometer)

