



Mikko Häivölä

Tarkan lämpötilamittauksen toteuttaminen sääkaappiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

7.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Mikko Häivölä
Otsikko: Tarkan lämpötilamittauksen toteuttaminen sääkaappiin
Sivumäärä: 41 sivua + 1 liite
Aika: 7.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine: Elektroniikka
Ohjaajat: Yliopettaja Matti Fischer

Lopputyön tavoitteena oli toteuttaa tarkka lämpömittari käytettäväksi sääkaapissa. Mittarin tuli toimia $-20\text{ °C} \dots 80\text{ °C}$:n lämpötila-alueella $\pm 0,1\text{ °C}$:n tarkkuudella. Mitattu lämpötila tuli näyttää LCD-näytöllä, ja kokonaisuus tuli olla yhdistettävissä tietokoneeseen anturin jännitesignaalin lukemiseksi.

Anturiksi valittiin vastuslämpötila-anturi, ja sen kytkemiseksi testattiin erilaisia analogisia piirejä, joista käyttöön valittiin parhaiten toimiva. Jännitesignaali syötettiin mikrokontrollerille, jolla signaali muutettiin digitaaliseen muotoon, ja näytettiin LCD-näytöllä. Mikrokontrolleri toimii myös liitäntäkohtana tietokoneelle. Lopulta kokonaisuus pakattiin siististi muovilaatikkoon osien suojelemiseksi ja käytettävyyden parantamiseksi.

Asetetut tavoitteet saavutettiin mahdollisuuksien rajoissa, ja lopputulokseksi saatiin toimiva kokonaisuus. Lopputulosta voisi myös parantaa sijoittamalla siihen lisää aikaa ja rahaa.

Avainsanat: elektroniikka, lämpötila, sensori

Abstract

Author: Mikko Häivölä
Title: An Accurate Thermometer for a Weather Chamber
Number of Pages: 41 pages + 1 appendix
Date: 7 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Electronics
Instructors: Matti Fischer, Principal Lecturer

The aim of this thesis work was to design and build an accurate thermometer to be used in a weather chamber. Temperature span was to be -20 °C to 80 °C , with $\pm 0.1\text{ °C}$ accuracy, and the sensed temperature was to be shown on an LCD screen. Also, connectivity to a computer was to be offered for the purpose of screening the sensor output voltage.

After choosing to use RTD as the sensor, a few different analog circuits were manufactured and tested to compare their performance - mainly linearity - to choose the best one to be used in the final product. A microcontroller, which was used as an AD-converter, LCD screen controller and a connection point to a PC, was also chosen from the available selection. Finally, the whole setup was fitted into a box for durability and useability.

The project was a success, ending with a weather chamber thermometer that meets the goals set in the beginning. However, the result could be further improved with more time, better testing equipment and more expensive components.

Keywords: Electronics, Temperature, Sensor

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Eri keinot mitata lämpötilaa	1
2.1	Nestelämpömittari	2
2.2	Bimetallilämpömittari	2
2.3	Pyrometri	4
2.4	Termopari	5
2.5	pn-liitokseen perustuva lämpötila-anturi	8
2.6	Termistori	10
2.7	Vastuslämpötila-anturi (RTD)	12
2.7.1	Anturin rakenne	12
2.7.2	Vastuselementin materiaalit	13
2.7.3	Merkinnät	14
2.7.4	KytKentätävät	14
3	Mittausjärjestelmä	17
3.1	Analoginen piiri	17
3.1.1	Virtalähteillä toteutettu piiri	18
3.1.2	Wheatstonen sillalla toteutettu piiri	22
3.1.3	Analogisten piirien vertailu	26
3.2	Digitaalinen osuus ja kokonaisuus	28
3.2.1	Kokonaisuuden ensimmäinen testaus	32
3.2.2	Toinen testaus Arduinolla	34
3.2.3	Lopputestaus	37
4	Yhteenveto	37
	Lähteet	39
	Liitteet	
	Liite 1: Vastusten R_3 ja R_9 määrittäminen	

Lyhenteet

- ASCII: American Standard Code for Information Interchange. Tietokoneiden merkistö, joka sisältää ensisijaisesti amerikanenglannissa tarvittavat kirjaimet, numerot sekä erikoismerkit.
- IoT: Internet of Things. Järjestelmä, joka toimii internetin kautta, joko itsenäisesti tai etäohjattuna.
- LCD: Liquid-Crystal Display. Ohut ja kevyt näyttölaite.
- NTC: Negative Temperature Coefficient. Negatiivinen lämpötilakerroin, jossa resistanssi pienenee lämpötilan noustessa.
- PTC: Positive Temperature Coefficient. Positiivinen lämpötilakerroin, jossa resistanssi suurenee lämpötilan noustessa.
- RTD: Resistance Temperature Detector. Vastuslämpötila-anturi. Mittauspää, jonka resistanssi muuttuu lämpötilan mukaisesti.
- USB: Universal Serial Bus. Sarjaväyläarkkitehtuuri, jota käytetään ohelaitteiden yhdistämiseksi tietokoneeseen.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on kehittää tarkka lämpötilamittari sääkaapin lämpötilan tarkkailuun. Lämpötilan tulee olla luettavissa LCD-näytöltä, ja laitteen tulee olla yhdistettävissä tietokoneeseen USB-kaapelin kautta, jotta piirin jänniteulostuloa voi tarkkailla.

Tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman tarkka mittaustulos käytettyjen komponenttien sallimissa rajoissa. Mitattava lämpötila-alue on $-20\text{ °C} \dots 80\text{ °C}$. Käytettävissä ei ole keinoja luoda ehdottoman tarkkoja referenssilämpötiloja järjestelmän kalibrointia varten, joten siihen käytetään parhaita saatavilla olevia keinoja.

2 Eri keinot mitata lämpötilaa

Lämpötilaa voidaan mitata monilla erilaisilla tavoilla. Käytettävän menetelmän valintaan vaikuttavat

- lämpötila-alue
- tarkkuus, lineaarisuus, sensitiivisyys ja hystereesi
- aikavakio
- mekaaninen kestävyys
- luettavuus
- ulostuloyksikkö
- hinta/laatusuhde. [1, s. 354].

Seuraavaksi käydään läpi yleisimpiä lämpötilan mittaukseen soveltuvia anturityyppejä, niiden ominaisuuksia sekä yleisimpiä käyttötarkoituksia. Todettakoon, että markkinoilta löytyy todella paljon erilaisia antureita, mutta tässä tutustutaan vain projektin kannalta olennaisimpiin anturityyppeihin.

2.1 Nestelämpömittari

Nestelämpömittareissa käytettiin aiemmin yleisesti nesteinä elohopeaa. Sittemmin esim. EU on suurelta osin kieltänyt elohopean käytön uusissa mittareissa, ja yleisimmin käytetyt nesteet ovat vaihtuneet eri alkoholeiksi [2]. Jos mittari valmistetaan tarkoilla toleransseilla, päästään lukemissa tarkkoihin arvoihin. Alkoholien lämpölaajenemiskertoimet ovat pienempiä kuin elohopealla, joten tarkkuudessa ei päästä aivan elohopean tasolle.

Koska neste laajenee lämmitessään enemmän kuin ympäröivä lasi, se työntyy ylös lasiputkessa, ja näyttää ympäröivän lämpötilan putkeen merkityltä asteikolta. Eri alkoholeilla saavutetaan erilaisia mitta-alueita. Yleisesti käytetyn etanolin mitta-alue on $-110\text{ °C} \dots 100\text{ °C}$ [3].

Elohopea muuttuu kiinteäksi noin -39 °C , joten mittari ei sovellu sitä alempien lämpötilojen mittaamiseen. Korkeat lämpötilat eivät ole ongelma, ja vaikka elohopean kiehumispiste on vain 360 °C , elohopeamittaria voidaan käyttää mittaamaan lämpötiloja jopa 800 °C :seen asti. Tällöin putken sisään täytyy lisätä korkeapaineinen suojakaasu, joka estää elohopean kiehumisen. [1, s. 355–356; 3.]

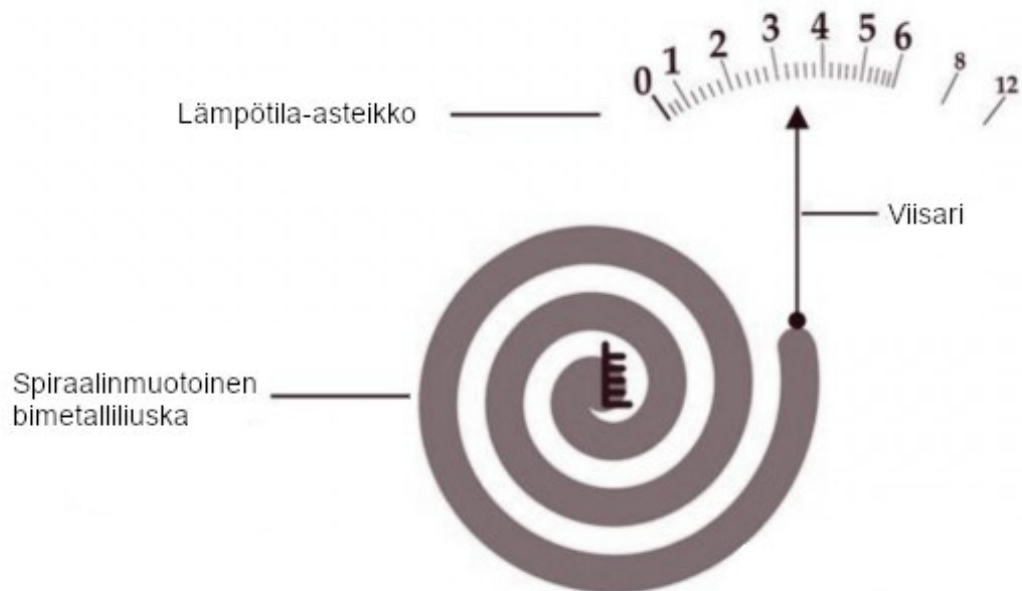
Tämä mittarityyppi on huoltovapaa, halpa, ja se säilyttää tarkkuutensa erittäin hyvin. Lasiputkirakenne ei kestä kovia iskuja, joten niiden käytössä on oltava varovainen, varsinkin jos sisällä on myrkyllistä elohopeaa.

Nestelämpömittarin antama lämpötilalukema on visuaalisessa muodossa, mikä rajaa pois sen käytön osana elektronista piiriä.

2.2 Bimetallilämpömittari

Tämä mittarityyppi perustuu metallien lämpölaajenemiselle. Kahdesta, eri lämpölaajenemiskertoimen omaavasta metallista valmistetaan yhtenäinen metalliliuska. Koska nämä metallit laajenevat eri tahtiin, liuska vääntyy lämpötilan muuttuessa. Tämä liike ohjaa viisaria, joka osoittaa lämpötilan siihen liitetystä

asteikosta. Liuskassa useimmin käytettyjä metalleja ovat teräs, kupari sekä messinki. Kuva 1 näyttää mittarin toimintaperiaatteen. [4.]

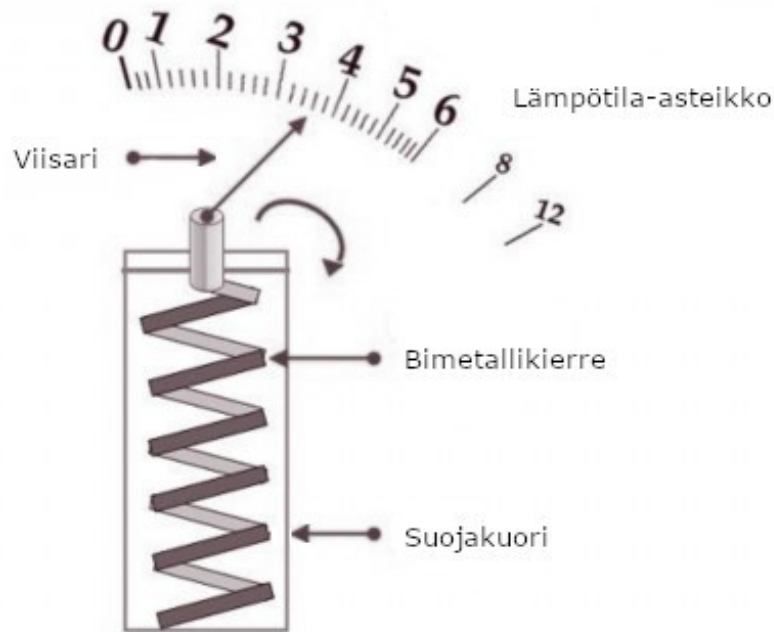


Kuva 1. Spiraalinmuotoinen bimetallilämpömittari [5].

Metalliosa voi olla muotoiltu myös kierremuotoiseksi, josta esimerkki kuvassa 2. Tätä anturityyppiä käytetään myös ohjaamaan mekaanisia kytkimiä. Siinä tapauksessa liuskan päähän on viisarin sijasta liitetty kontaktipinnat, jotka vaihtavat tilaa lämpötilan mukaan. Tilan vaihto voi tapahtua lineaarisesti tai äkillisesti, esim. termostaattikäytössä.

Bimetallilämpömittarit ovat halpoja ja yksinkertaisia, eivätkä ne tarvitse sähköä toimiakseen. Niiden tarkkuus ei kuitenkaan ole kovin hyvä, ja ne ovat kooltaan suhteellisen isoja.

Tämänkin anturityypin antama lukema on analogisessa muodossa, eikä se ole tarpeeksi tarkka etsittyyn käyttöön.



Kuva 2. Kierremallinen bimetallilämpömittari [5].

2.3 Pyrometri

Pyrometreillä voidaan mitata lämpötilaa ilman fyysistä kontaktia mitattavan aineen kanssa. Markkinoilla on eri periaatteilla toimivia pyrometrejä, joiden ominaisuudet ovat tämän käyttötarkoituksen kannalta katsottuna hyvin samankaltaisia. Esimerkiksi otetaan infrapunalämpömittari, joka on yleisin pyrometrityyppi.

Kaikki esineet, joiden lämpötila on absoluuttisen nolapisteen yläpuolella emittoivat infrapunasäteilyä. Infrapunalämpömittarin toiminta perustuu tämän säteilyn mittaamiseen. Mitattava aallonpituuden alue on noin 4–20 mikronia.

Tyypillisesti säteilyenergia keskitetään linssillä lämpösähköpariin. Tästä syntyvä jännite vahvistetaan, jota vastaava lämpötila ilmoitetaan mittaustuloksena. Lukeman tarkkuuteen vaikuttavat materiaalin heijastuskyky, läpäisykyky sekä emissiivisyys. Esine, jonka emissiivisyys on 0,0, on täydellinen heijastin, kun taas esine 1,0 emissiivisyydellä on ns. musta kappale, joka absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn. [6, s. 531–532.]

Pyrometrit ovat melko kalliita, ja mittauksen tarkkuutta voivat häiritä mitattavan pinnan viimeistely, ympäristön lämpötila, ja ilman epäpuhtaudet kuten pöly ja kaasut [6, s. 542–543].

Pyrometrin hyötyihin lukeutuvat kyky mitata vaarallisen tai kuuman aineen lämpötilaa ilman fyysistä kosketusta, vaikeasti saavutettavien paikkojen lämpötilan mittaus sekä helppo liikuteltavuus.

Näillä ominaisuuksilla pyrometri ei ole oikea valinta käytettäväksi tässä projektissa.

2.4 Termopari

Termopari luodaan yhdistämällä kaksi eri metalliseoksista valmistettua johtoa - joita tässä yhteydessä kutsutaan termoelementeiksi - toisiinsa kummastakin päästä. Toinen termoelementti voi olla myös alkuainetta: platinaa, rautaa tai kuparia. Näitä liitospaikoja kutsutaan mittauspääksi ja referenssipääksi. Kun kaapelien yhtymäkohdat sijoitetaan eri lämpötiloihin, Seebeckin-ilmiö luo niiden välille millivolttiluokassa olevan jännitteen. [7.]

Tämä lämpötilan ja jännitteen välinen suhde saadaan yhtälöstä 1 [8].

$$V = \int_{T_1}^{T_2} (S_1 - S_2) \times dT \quad (1)$$

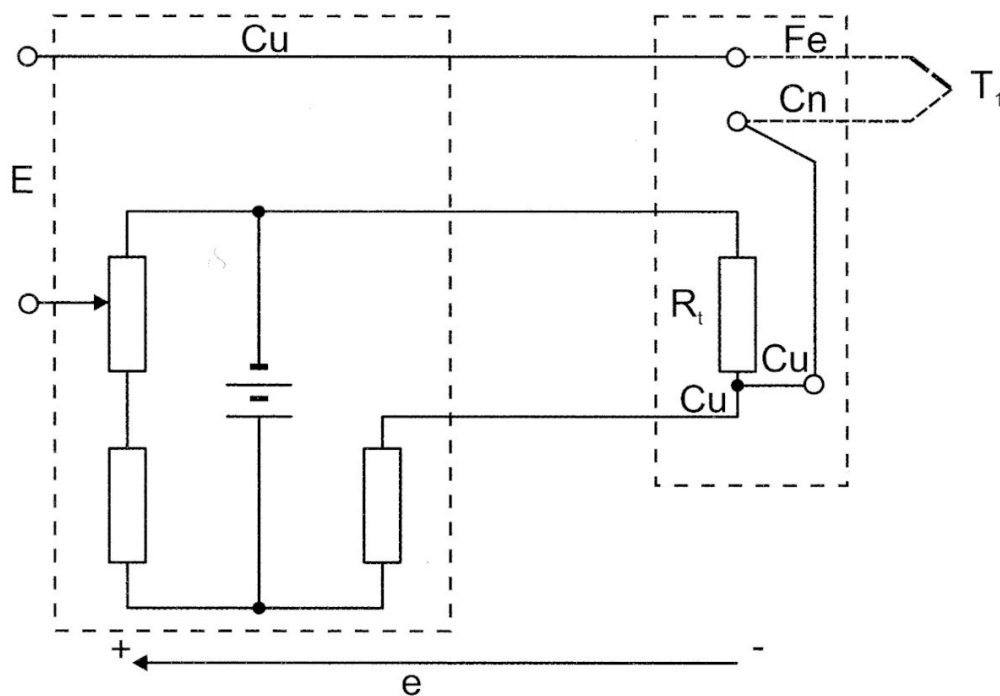
Yhtälössä V on päiden välille syntyvä jännite, T_1 ja T_2 ovat referenssi- ja mittauspään lämpötilat, ja S_1 sekä S_2 ovat termoelementtien Seebeck-kertoimet. Seebeckin kerroin määräytyy termoelementin materiaalin mukaan. [8.]

Yhtälöstä käy ilmi, ettei termopari luo jännitettä, jos termoelementit on valmistettu samasta materiaalista, tai jos mittaus- ja referenssipäiden lämpötilat ovat yhtä suuret. Termoparin luoma jännite siis kertoo, kuinka suuri lämpötilaero päiden välillä vallitsee.

Tästä seuraa, että referenssipään lämpötila on tiedettävä tarkasti, jotta mittauspään lämpötila saadaan määriteltyä. Asia voidaan toteuttaa joko pitämällä referenssipää tarkoin hallitussa referenssilämpötilassa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, tai vaihtoehtoisesti kylmän liitoksen kompensoinnilla. Kylmän liitoksen kompensointi tarkoittaa, että termoparin luoma jännite muutetaan tasolle, jonka se kehittäisi referenssipään ollessa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilassa. Tämä voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. [1, s. 369.]

Piiriin voidaan lisätä jännitelähde, joka eliminoi referenssipään luoman jänniteeron $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n potentiaaliin nähden luomalla vastakkaisen jännitteen termoparin ulostuloon. Esimerkkipiiri on esitetty kuvassa 3.

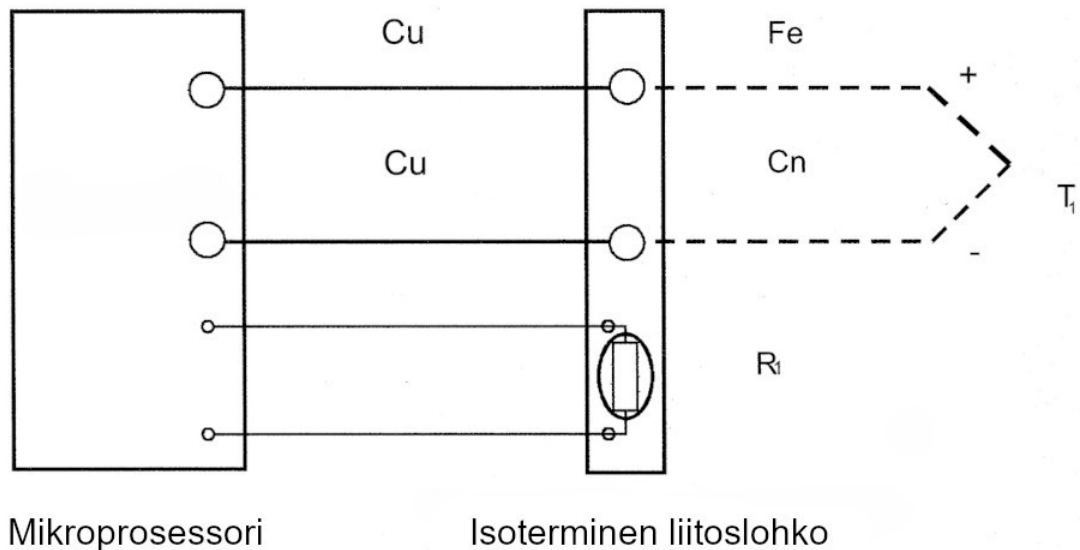
Kuvassa 3 T_1 kuvaa termoparin mittauspäättä ja sen lämpötilaa. Kompensatiopiirin johdotukset täytyy toteuttaa toisiaan vastaavalla materiaalilla, sillä muuten ne muodostavat oman termoparin, joka sekoittaa mittaustuloksen. Kuten kaavasta 1 näemme, termoelementtien yhtäläiset Seebeckin kertoimet vievät kehittyvän jännitteen lämpötilasta riippumatta nolnaan.



Kuva 3. Mekaaninen kylmän liitoksen kompensointipiiri [1, s. 371].

Toinen mahdollisuus kylmän liitoksen kompensoinnille on toteuttaa se elektronisesti. Tällöin referenssipään absoluuttisella lämpötilalla ei ole merkitystä. Kyseinen lämpötila täytyy vain olla tiedossa, jotta lämpötilaero mittauspään verrattuna tiedetään. [1, s. 369–370.]

Tässä tapauksessa referenssipää yhdistetään termisesti toiseen anturiin, joka pystyy lukemaan absoluuttista lämpötilaa, esim. vastuslämpötila-anturi tai termistori. Tämä lämpötilatieto lähetetään mikrokontrollerille, joka kompensoi eron 0 °C :n lämpötilaan nähden, ja ulostuleva jännite pystytään ilmoittamaan termoparin mittauspään todellisena lämpötilana. Tämä toteutustapa on nähtävissä kuvassa 4. [1, s. 369–371.]



Kuva 4. Ohjelmistolla toteutettu kylmän liitoksen kompensointi toisen lämpötila-anturin kanssa [1, s. 370].

Termoparin mittauspää voi olla vain paljaana oleva yhteen juotettujen termoelementtien pää. Tällöin anturin vasteaika on nopea, mutta se voi ruostua tai haettua jos sitä käytetään haastavissa olosuhteissa. [6, s. 544.]

Tästä johtuen mittauspäitä valmistetaan myös metallikuorella suojattuna. Maadoitettu liitospää tarkoittaa, että mittauspää on juotettu kiinni sitä suojaavaan metallikuoreen. Tämä suojelee mittauspäätä korroosiolta, mutta aiheuttaa samalla vasteajan huonontumista ja tekee anturin alttiimmaksi radiotaajuushäiriöille sekä maasilmukkakohinalle. [6, s. 544; 9.]

Suojaus voidaan toteuttaa myös maadoittamattomalla liitospäällä. Se tarkoittaa, että mittauspää on sähköisesti eristetty suojakuoresta, mutta kuitenkin termisesti liitettynä siihen. Vasteaika on vielä maadoitettua liitospäätäkin huonompi. Tämä kuitenkin suojelee anturia sähköiseltä kohinalta, joka parantaa mittauksen tarkkuutta varsinkin käytettäessä matalan tason signaaleita. [6, s. 544; 9.]

Termopari tarjoaa todella laajan mittausalueen, kestää korkeita lämpötiloja, ja on lisäksi erittäin kestävä anturi. Se on kuitenkin verrattain monimutkainen mitaustapa, eikä sen tarkkuus yllä parhaimpien vaihtoehtojen tasolle.

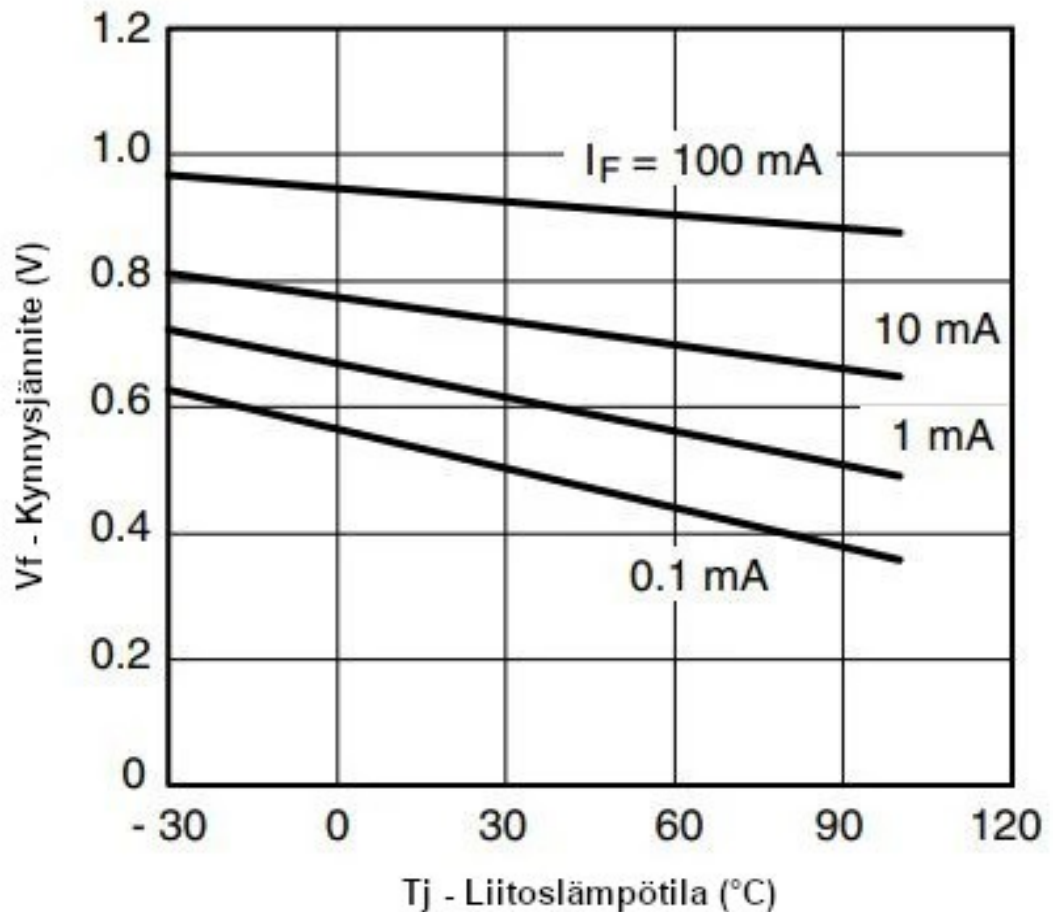
2.5 pn-liitokseen perustuva lämpötila-anturi

pn-liitoksen kynnysjännite muuttuu lineaarisesti lämpötilaa seuraten, jos sen läpi kulkeva virta pysyy vakiona. Kun lämpötila nousee, kynnysjännite laskee. Tätä periaatetta hyödyntämällä diodia tai transistoria voi käyttää lämpötila-anturina rakentamalla sen ympärille sopivan elektronisen piirin. Saatavilla on myös valmiita integroituja piirejä, jotka toimivat tällä periaatteella. [10.]

Integroidulta piiriltä ulostuleva lämpötilatieto on lineaarista ja absoluuttista, ja sillä päästään parhaimmillaan jopa $\pm 0,1$ °C:n tarkkuuteen. Piiriin voidaan myös lisätä muita toimintoja kuten analogi-digitaalimuunnin tai komparaattori, mikä vähentää tukevan elektroniikan määrää. [10.]

Integroidun piirin lämpötila-anturit voivat olla joko suoraan piirilevylle juotettavia komponentteja, tai johdon päässä olevia, kohteeseen sijoitettavia yksiköitä. Hintaa ja kokoa vaihtelevat piirin tyyppin mukaan. Lävitse kulkevaa virtaa täytyy rajoittaa itselämpenemisen rajoittamiseksi. Tämä on hyödyllistä myös siinä

mielessä, että pienemmillä virroilla kynnysjännitteen muutos lämpötilaan nähden on suurempaa kuin isommilla virroilla, mikä tarkoittaa tarkempaa lämpötilalukemaa. Kuva 5 näyttää esimerkkinä 1N4148-diodin kynnysjännitteen ja lämpötilan kuvaajan. [6, s. 540–542.]



Kuva 5. 1N4148 kynnysjännitteen ja liitoslämpötilan vastaavuus [11].

Integroidun piirin anturissa on paljon hyviä puolia, ja se on teoriassa varteenotettava vaihtoehto haettuun tarkoitukseen. Tarkoituksena on kuitenkin rakentaa piiri itse, joten integroidut piirit eivät tue tätä tavoitetta.

Diodin tai transistorin ympärille rakennettu mittausjärjestelmä olisi toinen vaihtoehto, mutta kyseisten komponenttien sijoittaminen sääkaapin sisään ei ole järkevää.

2.6 Termistori

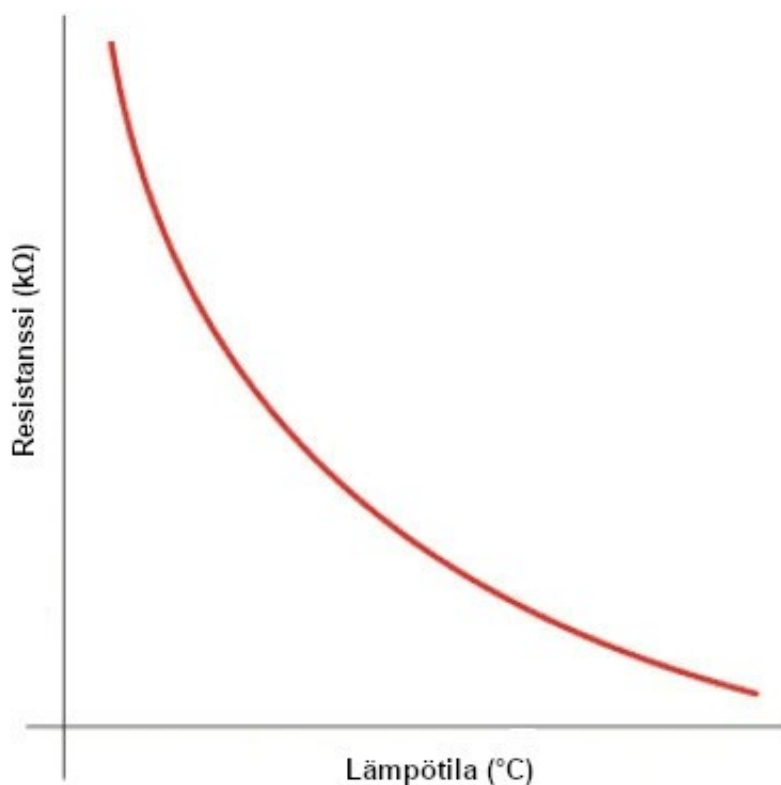
Sana termistori tarkoittaa puolijohteisiin perustuvaa, lämpötilariippuvaista vastusta. Termistorilla on yleisimmin negatiivinen lämpötilakerroin (NTC), mikä tarkoittaa, että sen resistanssi laskee, kun lämpötila nousee. Myös positiivisella lämpötilakertoimella (PTC) toimivia termistoreja on olemassa. Niiden resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. PTC-antureilla on paljon kapeampi lämpötila-alue kuin NTC-antureilla. [12, s. 532.]

Termistorin resistanssin ja lämpötilan välinen riippuvuus perustuu sen valmistusmateriaaleihin, mutta materiaalista riippumatta se on vahvasti epälineaarista. Termistoria käytettäessä tämä epälineaarisuus täytyy kompensoida, jotta tulokseksi saadaan paikkansapitävää lämpötilatietoa. [13.]

Termistorin hyvä puoli on, että sen lämpötilakerroin voi muuttua useita prosenttiyksiköitä yhtä celsiusastetta kohti. Tämä mahdollistaa todella pienten lämpötilamuutosten havaitsemisen. Yleensä termistorin tarkin toiminta-alue on kuitenkin vain noin 50 °C. Kuva 6 näyttää tyypillisen NTC-termistorin resistanssin ja lämpötilan välisen suhteen. [1, s. 383.]

Kun termistori lämpenee, sen ionien lisääntynyt kineettinen energia vapauttaa valenssitasolta elektroneja varauksen kuljettajiksi. Termistoriin pätee myös metalleista tuttu ilmiö, jossa lämpötilan noustessa ionien lisääntynyt värähtely estää varauksen kuljettajien liikettä. Metalleissa tämä aiheuttaa resistanssin nousua lämpötilan mukana. Vapaiden elektronien määrän muutoksen vaikutus on kuitenkin suurempi kuin ionien värähtelyn liikettä estävä vaikutus, joten termistorin resistanssi laskee lämpötilan noustessa. [14.]

NTC-anturien valmistusmateriaaleja ovat mm. nikkelioksidi, kobolttioksidi, silikonioksidit sekä rautasulfiitti. PTC-antureita valmistetaan mm. muovipolymeereistä sekä polymeerikeraamista. [1, s. 384; 16.]



Kuva 6. NTC-termistorin resistanssi lämpötilan funktiona [15].

Termistorien suojakuorimateriaaleina käytetään lasia, epoksia, metalleja, metallioksiedeja ja poltettua fenolia. Joissain tapauksissa suojana voi myös olla vain maalikerros. Suojakuori vaikuttaa anturin kestävyYTEEN, käyttökohteisiin ja toiminnallisiin ominaisuuksiin kuten hystereesiin. [16.]

Termistorien valmistustoleranssit ovat usein melko suuria, ja ellei kyseessä ole erityinen tarkoilla toleransseilla valmistettu termistori, ne täytyy kalibroida käyttöönsä yksitellen koko käytettävällä lämpötila-alueella. [12, s. 532.]

Termistori on laajalti käytetty anturityyppi, jossa on paljon hyviä puolia. Tässä projektissa voisi käyttää NTC-anturia, mutta tehtävään löytyy vielä sopivampi vaihtoehto.

2.7 Vastuslämpötila-anturi (RTD)

Vastuslämpötila-anturi on passiivinen komponentti, jonka sisäinen vastus muuttuu lämpötilan mukaisesti. RTD:llä on yleisesti ottaen positiivinen lämpötilakerroin. Termistorista poiketen RTD:n anturielementin valmistusmateriaaleja ovat metallit, joista yleisimmät ovat kupari, nikkeli, nikkelifraataseos (balco), molybdeeni, volframi ja platina [6, s. 547; 17].

2.7.1 Anturin rakenne

RTD:n lämpötilan mukaan vastustaan muuttava metalli voidaan asettaa anturiin eri tavoin. Kolme yleisintä tyyppiä ovat kierretty elementti, kelattu elementti ja ohutkalvoelementti.

Kierrettyssä elementissä vastuslanka on pyöritetty eristävän, keraamisen ytimen ympärille. Koska vastuslanka pitenee ja lyhenee lämpötilan mukana, se pyöritetään ytimen ympärille vain löyhästi. Keraaminen ydin tukee ohutta lankaa ja antaa anturille hieman kestävyyttä. Vastuslankaa käytetään niin paljon, että saadaan aikaan toivottu resistanssiarvo. Vastuslangan päät yhdistetään johtimiin, ja kokonaisuus suojataan yleensä joko keraamisella tai lasisella pinnoitteella. Tämä anturityyppi on hyvin tarkka, mutta ei erityisen kestävä. [18.]

Kelatussa elementissä on myös keraaminen ydin, mutta tässä tapauksessa sen sisällä on useampi pieni sylinterimäinen reikä, joihin rullataan vastuslankaa pieniksi keloiksi. Lopuksi reiät täytetään sähköä johtamattomalla jauheella, joka tukee lankaa, mutta sallii sen samalla laajentua ja kutistua lämpötilan mukaisesti. Samalla jauhe johtaa lämpöenergiaa tehokkaasti vastuslankaan, parantaen anturin vasteaikaa. Tässä anturityypissä on yleensä suojana metallinen kuori, joka tekee siitä hyvin kestävä. [18.]

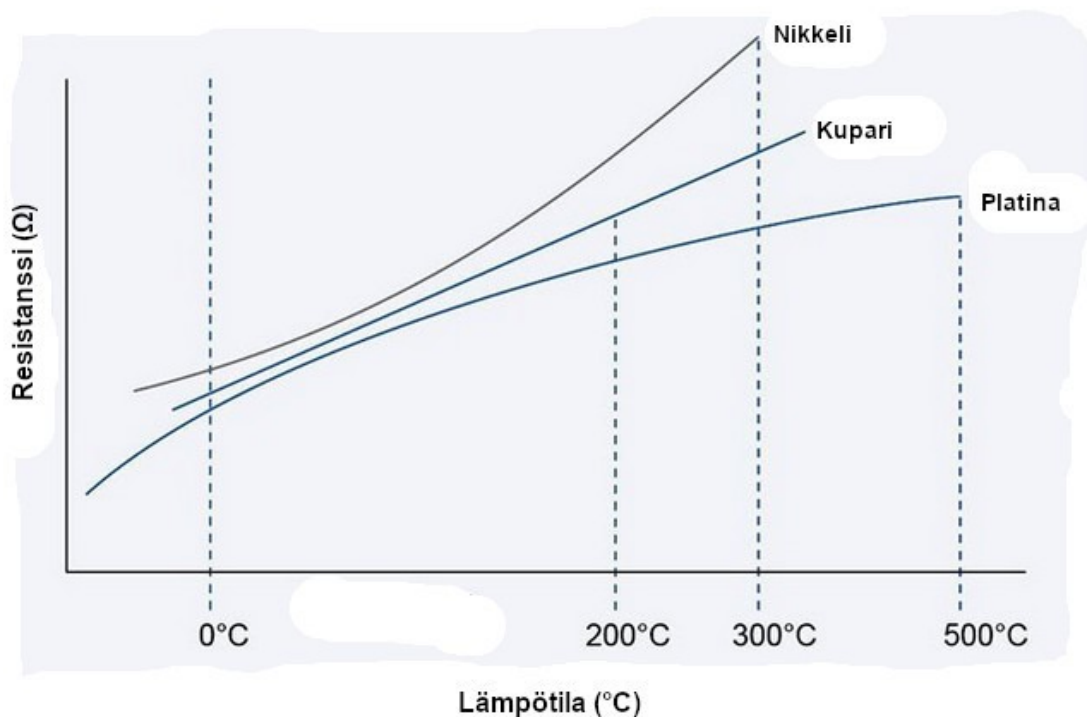
Ohutkalvoelementti koostuu ohuesta metallikalvosta, joka tyhjiöpuristetaan tai silkkipainetaan keraamiselle tai lasiselle alustalleen. Se on pienempi sekä halvempi valmistaa kuin muut vaihtoehdot. Pienen kokonsa takia sillä on hyvä

vasteaika. Toisaalta sen tarkkuus ei yllä kierretyn ja kelatun elementin tasolle. Tätä anturityyppiä voi käyttää myös venymämittarina, joten lämpöanturikäytössä siihen ei saa kohdistua ulkoisia voimia tarkkuuden säilyttämiseksi. [17.]

2.7.2 Vastuselementin materiaalit

Kuparia käytetään vain harvoin RTD-anturien valmistuksessa. Kuten kuva 7 näyttää, kupari on itseasiassa lineaarisin metalli saatavilla olevista vaihtoehdoista, ja sillä on hyvä herkkyys. Se on kuitenkin altis hapettumiselle, varsinkin korkeissa lämpötiloissa, ja sen lämpötila-alue on vaihtoehtoihin verrattuna rajallinen. [6, s. 547–548; 17.]

Nikkeli on halvin vaihtoehto, mutta sillä on siitä huolimatta hyvä herkkyys, eikä se syövy helposti. Nikkelin lämpötila-alue on kuitenkin rajallinen, ja sillä on epälineaarinen vaste. Hintansa tähden sitä kuitenkin käytetään kohteissa, joissa sen rajoitteet eivät haittaa käyttöä. [17; 18.]



Kuva 7. RTD-materiaalien resistansseja lämpötilan funktiona [19].

Volframia käytetään mittaamaan RTD:lle erittäin kuumia lämpötiloja, jopa 1100 °C:seen asti. Volframi on kuitenkin erittäin haurasta, joten sitä on haastavaa työstää. [20.]

Platina on hyvin yleisesti käytetty RTD-anturimateriaali. Sen korroosionkesto on erittäin hyvä, eikä se hapetu ilman vaikutuksesta pitkienkään aikojen kuluessa. Platinan resistanssi muuttuu lämpötilan mukana melko lineaarisesti, ja sillä on hyvin laaja käyttölämpötila-alue, jopa yli 1000 °C. [18.]

Platina on ainoa RTD-anturien valmistusmateriaali, jolle on määritelty kansainvälinen standardi. Standardi määrittää muun muassa eri lämpötilakertoimet ja tarkkuustoleranssit. Jotkut valmistajat käyttävät platinan standardeja myös muiden antureiden valmistuksessa. [17.]

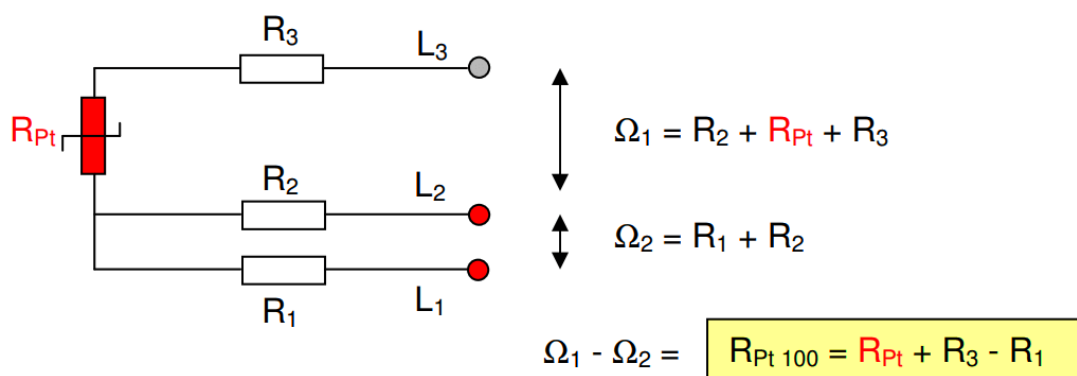
2.7.3 Merkinnät

RTD-anturin merkinnässä on kaksi osaa. Ensimmäinen osa kertoo käytetyn anturimateriaalin: Pt – platina, Ni – nikkeli, Cu – kupari, W – volframi ja Mo – molybdeeni. [17; 21.]

Toinen osa kertoo anturin resistanssiarvon 0°C:n lämpötilassa ohmeina. Yleisiä antureita ovat mm. Pt-100 ja Ni-120.

2.7.4 Kytkentätavat

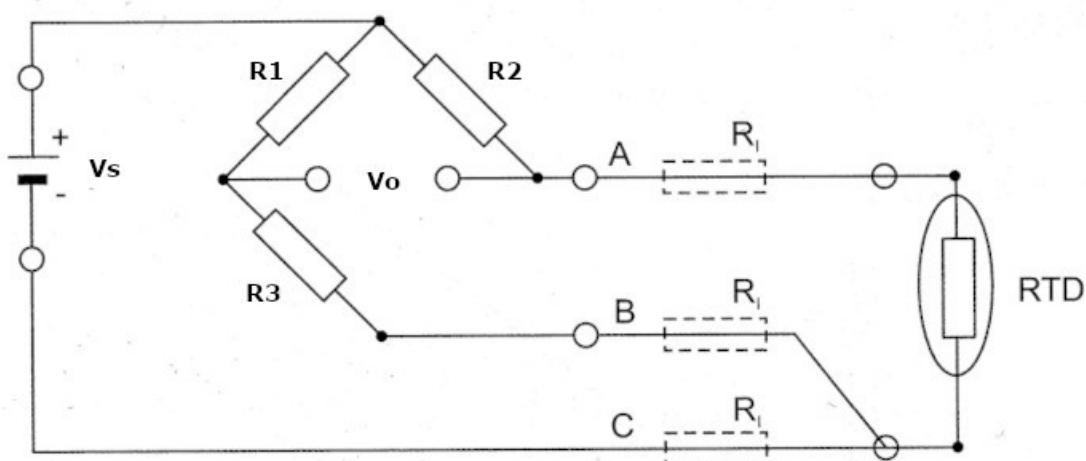
RTD sijoitetaan yleensä etäälle mittauspiiristä, jotta koko piiri ei altistu samoille lämpötiloille kuin itse anturi. Jos kytkemiseen käytetään vain kahta johtoa, niiden resistanssit lisäävät mitatun kokonaisresistanssin määrää. Tämä aiheuttaa mittaustuloksen vääristymistä. Tämä ongelma voidaan kiertää joko kolmijohtotai nelijohtokytkennällä. Kolmijohtokytkennän idea on nähtävillä kuvassa 8.



Kuva 8. RTD kolmijohtokytkenän teoriakuva [22].

Kuten kuva 8 matemaattisesti kertoo, tämä kytkentätapa vaatii kaksi mittausta. L_3 ja L_2 väli antaa tulokseksi kahden johdon sekä RTD:n yhteisresistanssin. L_2 ja L_1 välin mittaus taas antaa tulokseksi kahden johdon yhteisresistanssin. Kun toinen mittaustulos vähennetään ensimmäisestä, saadaan hyvä arvio RTD:n todellisesta vastusarvosta. Tämä tapa ei ole täydellinen, sillä siinä käytetään johdon R_1 resistanssiarvoa kompensoimaan johdon R_3 resistanssi. [22.]

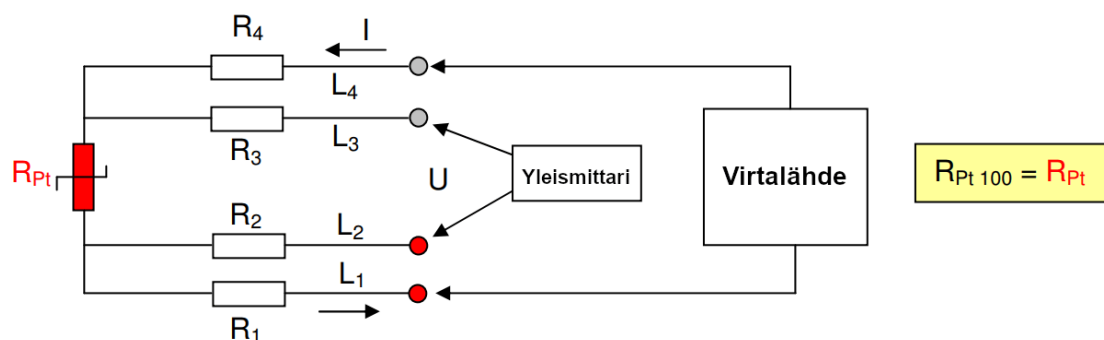
RTD:tä käytetään usein osana Wheatstonen siltaa. Siinä tapauksessa kolmijohtokytkenä on todella helppo toteuttaa. Kuva 9 näyttää kyseisen kytkennän. [1, s. 380.]



Kuva 9. RTD osana Wheatstonen siltaa kolmijohtokytkenällä [1, s. 381].

Sillan vasemman haaran resistanssi on $R_1 + R_3 + R_l$ ja oikean haaran resistanssi taas $R_2 + R_l + R_{TD}$. Koska sillan kumpaankin puoleen vaikuttaa yksi anturin kytkentäjohdoista, niiden vaikutus mitätöityy. Kun kaikki johdot on valmistettu samasta materiaalista, tällä kytkennällä päästään tarkkaan mittaustulokseen. [1, s. 381].

Kaikista tarkin tapa käyttää RTD:tä on nelijohtokytkentä, joka näkyy kuvassa 10. Virtalähde syöttää anturia johtojen R_1 ja R_4 kautta, ja jännitearvo mitataan johtojen R_2 ja R_3 kautta. Kun jännitemittarin tuloresistanssi on tarpeeksi suuri, sen läpi kulkevan virran määrä on häviävän pieni, ja mittaustulos on paikkansapitävä.



Kuva 10. RTD nelijohtokytkennän teoriakuva [22].

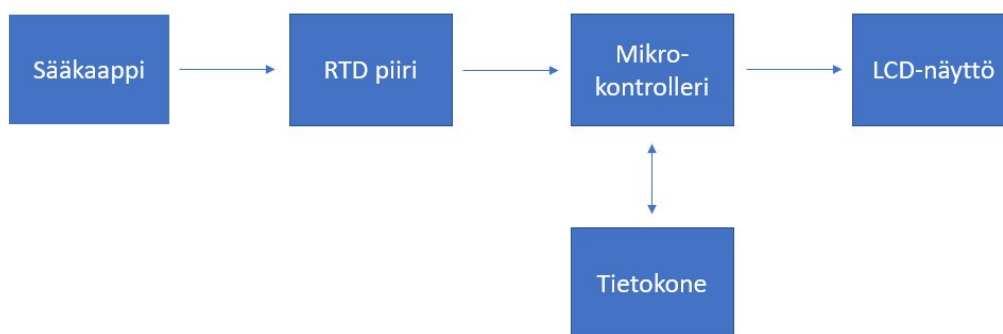
Nelijohtokytkentää ei voi käyttää Wheatstonen sillassa, mutta halutessaan sitä voi käyttää osana Kelvinin siltaa. Tämä kytkentätapa on erittäin tarkka, ja sitä käytetään todella pienten resistanssimuutosten havaitsemiseen. [23, s. 174.]

Platinasta valmistettu RTD on tarkka ja vakaa anturityyppi, joka kestää hapettumista ja korroosiota erittäin hyvin. Sillä on myös hyvä lineaarisuus. RTD on täten paras vaihtoehto tarvitsemaamme käyttöön.

3 Mittausjärjestelmä

Mittausjärjestelmää lähdettiin rakentamaan RTD-anturin ympärille. Käytetty anturi oli toleranssiluokkaa B, joka tarkoittaa $\pm 0,3$ °C:n tarkkuutta. Kuten aiemmassa luvussa käytiin läpi, RTD tarvitsee ympärilleen hieman analogista elektronikkaa, jotta sitä voidaan onnistuneesti käyttää haluttuun tarkoitukseen.

Järjestelmään tarvittiin A/D-muunnin, ja keino saada digitaaliseen muotoon muunnettu signaali näkymään LCD-näytöllä. Järjestelmä tuli lisäksi olla yhdistettävissä tietokoneeseen RTD-piirin jännitesignaalin seuraamisen mahdollistamiseksi. Analogisen piirin, LCD-näytön ja tietokoneen yhdyskohdassa oli luonnollista käyttää mikrokontrolleria. Kuva 11 on lohkokaavio tämän kokonaisuuden toiminnasta.



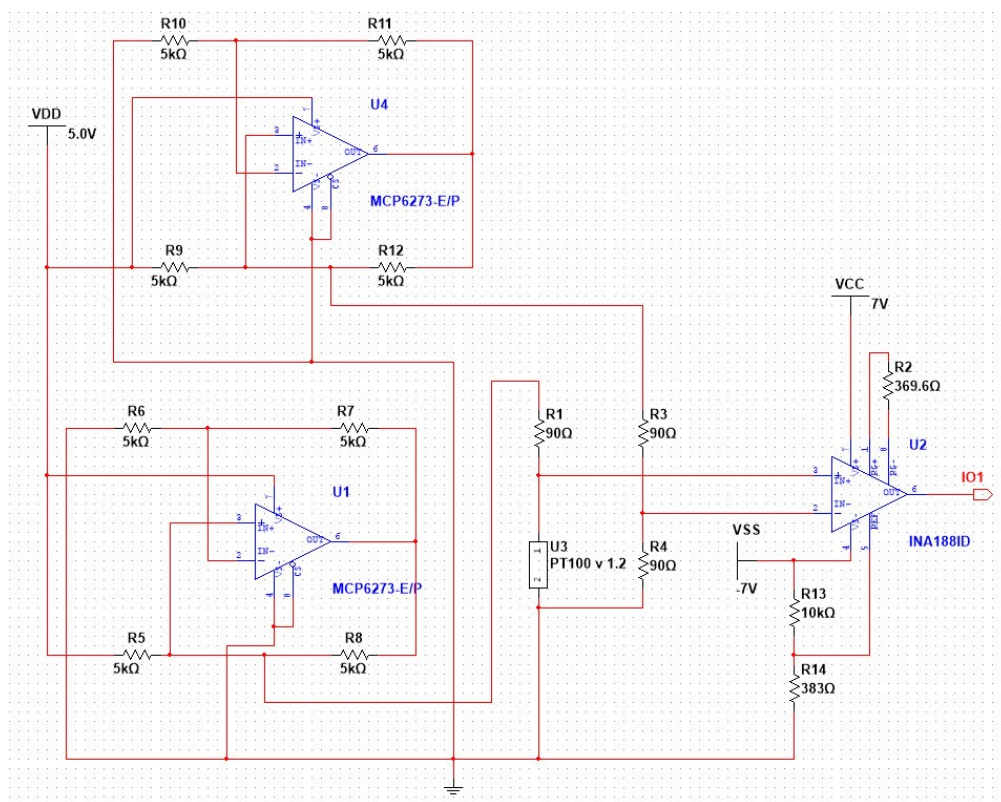
Kuva 11. Lohkokaavio mittauspiiristä.

3.1 Analoginen piiri

Projektin analoginen osa toteutettiin kahdella eri tavalla, toinen virtalähteiden ja toinen jännitelähteellä syötetyn Wheatstonen sillan avulla. Kumpikin piiri toimii toivotulla lämpötila-alueella -20 °C... $+80$ °C, ja antaa ulos lämpötilaa vastaavan jännitteen 0–5 V.

3.1.1 Virtalähteillä toteutettu piiri

Tässä versiossa on kaksi Howlandin tasavirtalähdettä, jotka syöttävät kahta jännitejakajaa. Toinen näistä on passiivinen jakaja, joka antaa jännitteen vertailuarvon aktiiviseen puoleen nähden. Aktiivisen jalan osana on Pt-100-anturi, joka muuttaa ulostulevan jännitteen määrää lämpötilan mukaisesti. Näiden jännitejakajien ulostulot syötetään instrumentointivahvistimeen, joka vahvistaa signaalin haluttuun arvoon. Käytössä on kolmen johdon kytkentä Pt-100-anturille. Multisimillä simuloitu piiri näkyy kuvassa 12.



Kuva 12. Virtalähteillä toteutettu piiri simuloituna Multisim-ohjelmassa.

Howlandin tasavirtalähteen ulostuleva virta i_o otetaan operaatiovahvistimen ei-invertoivasta sisäänmenosta. Kuvassa 12 näkyvän U_1 vahvistimen tapauksessa tämä virta koostuu vastuksen R_5 kautta jännitesyötöltä tulevasta virrasta, ja operaatiovahvistimen ulostulosta vastuksen R_8 kautta tulevasta virrasta. Yhtälössä $2 V_A$ on vahvistimelta ulostuleva jännite ja V_+ ei-invertoivan sisäänmenon jännite [24].

$$i_o = \frac{V_{DD}-V_+}{R_5} + \frac{V_A-V_+}{R_8} \quad (2)$$

Vahvistin U_1 toimii ei-invertoivana vahvistimena, jonka ulostulevan jännitteen V_A yhtälö on [24]

$$V_A = \left(1 + \frac{R_7}{R_6}\right) * V_+ \quad (3)$$

Yhtälöt 2 ja 3 yhdistämällä ulostulevan virran yhtälö sievenee muotoon [24]

$$i_o = \frac{V_{DD}}{R_1} - \frac{V_+}{R_0} \quad (4)$$

Yhtälössä 4 näkyvä R_0 on kuormalle näkyvä ulostulon resistanssi, joka määräytyy yhtälön 5 mukaisesti [24].

$$R_0 = \frac{R_8}{\frac{R_8-R_7}{R_5} \frac{R_6}{R_6}} \quad (5)$$

Koska i_o halutaan jännitteestä V_+ riippumattomaksi, R_0 :n arvo täytyy saada mahdollisimman suureksi. Asettamalla kaikki neljä vastusta yhtä suuriksi, R_0 :n arvo lähestyy ääretöntä, ja yhtälö 4 yksinkertaistuu muotoon [24]

$$i_o = \frac{V_{DD}}{R_1} \quad (6)$$

Projektiä varten ei ollut saatavilla tarkkuusvastuksia, mutta vastukset valittiin yksitellen mittaamalla niiden resistanssit, jotta saavutettiin paras mahdollinen lopputulos. V_{DD} jännite on 5 V, ja käytettyjen vastusten arvo taas 5 k Ω . Täten anturille saadaan tasainen 1 mA:n virta, joka riittää hyvin resistanssin mittaamiseen, ja on samalla niin pieni, ettei se aiheuta itselämpenemistä ja sitä kautta mittaus tuloksen vääristymistä.

Passiivinen jalka pysyy tasajännitteessä 1 mA * 90 Ω = 0,09 V. Aktiivisen jalan resistanssi muuttuu lämpötilan mukaisesti. ≥ 0 °C:n lämpötiloissa Pt-100-anturin resistanssi saadaan yhtälöstä 7 ja < 0 °C:n lämpötiloissa yhtälöstä 8 [21].

$$RTD(T) = R_0 * (1 + A * T + B * T^2) \quad (7)$$

$$RTD(T) = R_0 * (1 + A * T + B * T^2 + C * T^3 * (T - 100)) \quad (8)$$

R_0 on anturin resistanssi 0°C lämpötilassa

$$A = 3.9083 * 10^{-3}$$

$$B = -5.775 * 10^{-7}$$

$$C = -4.183 * 10^{-12}$$

Täten anturin resistanssi -20 °C:n lämpötilassa on 92,15989 Ω, ja 80 °C:n lämpötilassa 130,8968 Ω. Näiden arvojen avulla saadaan myös lämpötiloja vastaavat jännitteet, 0,09216 V ja 0,13089 V.

Vähentämällä jalkojen jännitteet toisistaan, saadaan instrumentointivahvistimelle sisään syötetty jännite. 80 celsiusasteessa se on 0,03874 V. Vahvistimen ulostuleva jännite saadaan kertomalla sisään menevä jännite vahvistimen vahvistusarvolla, joka käytössä olevan INA118:n tapauksessa on [25]

$$G = 1 + \frac{50\,000\ \Omega}{R_G} \quad (9)$$

Haluttu ulostuleva jännite 80 celsiusasteessa on 5 V, ja täten tarvittu vahvistusarvo on 5 V / 0,03874 V = 129. Kun vahvistusarvo on tiedossa, voidaan laskea ulostulo -20 celsiusasteessa, joka on 0,27879 V. Tämä arvo täytyy korjata referenssijännitteellä, ja samalla se muuttaa tarvittun vahvistuksen määrää. Tarvittu referenssijännite -0,27879 V on yhtälössä 10 näkyvä V_c .

$$G = \frac{V_o - V_c}{V_i} \quad (10)$$

Korjattu vahvistuksen määrä on 136,3. Yhtälö 9 ratkaistuna R_G suhteen on nähtävissä yhtälössä 11. Tällä vahvistuksella R_G arvoksi tulee 369,6 Ω.

$$R_G = \frac{50 \text{ k}\Omega}{G-1} \quad (11)$$

Tarvittu $-0,27879 \text{ V}$:n referenssijännite otetaan jännitteenjakajalla vahvistimen -7 V :n syötöstä. Jännitteenjakajan antama jännite saadaan yhtälöstä

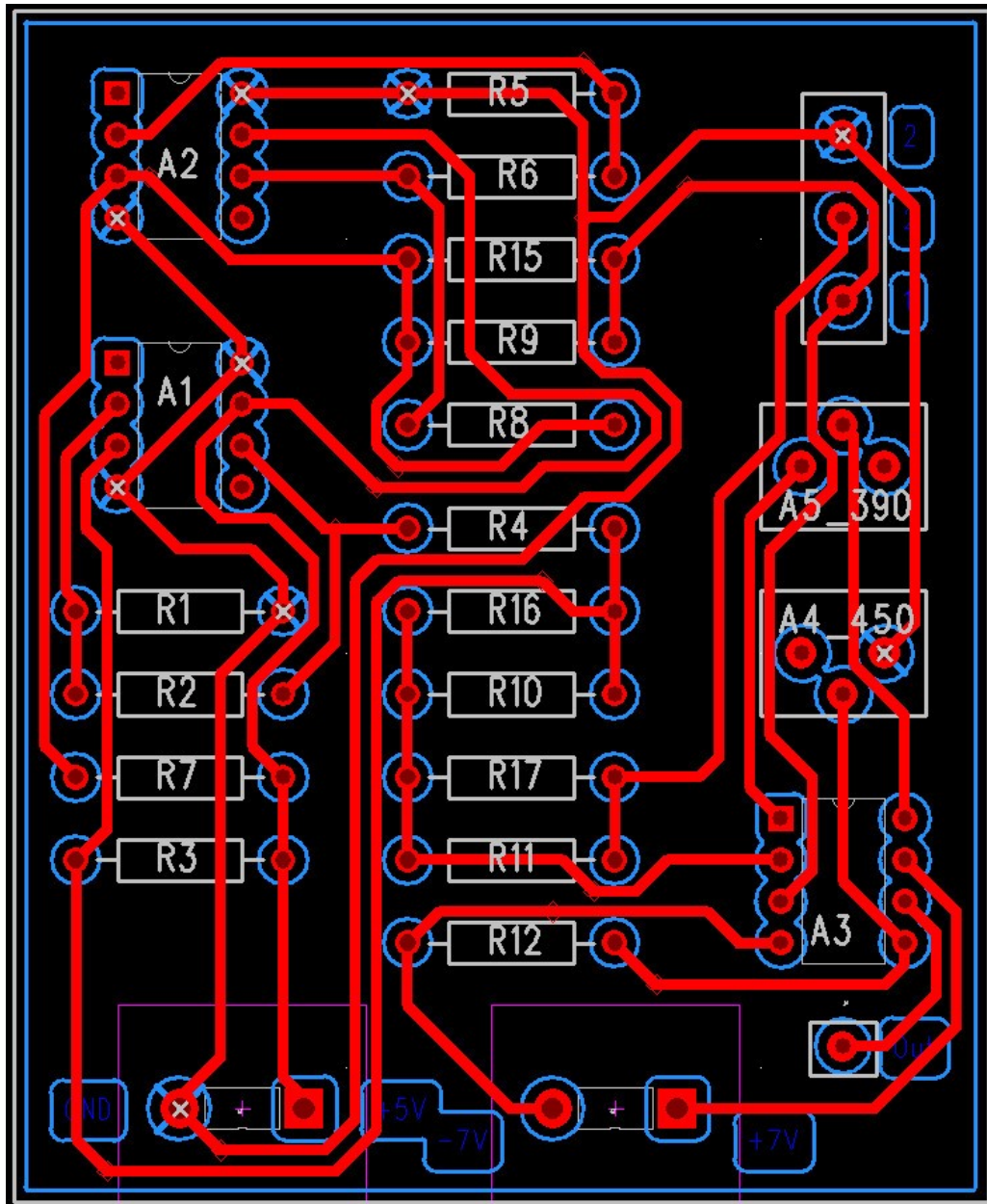
$$V_o = \frac{V_{SS} * R_{14}}{R_{13} + R_{14}} \quad (12)$$

Kun yhtälö 12 ratkaistaan R_{14} :n suhteen, siitä muodostuu

$$R_{14} = \frac{V_o * R_{13}}{V_{SS} - V_o} \quad (13)$$

josta saadaan tulokseksi 383Ω . Sekä vahvistusta säätävä R_2 että jännitteenjakajan R_{14} ovat lopullisessa piirissä säätövastuksia, joiden avulla piirin ulostuloa voidaan hienosäätää.

Kuva 13 näyttää tälle piirille PADSilla suunnitellun piirilevyn alapuolen. Eri komponenttityypit on aseteltu ryhmiin, ja tuloksena on viimeistellyn näköinen piirikortti.

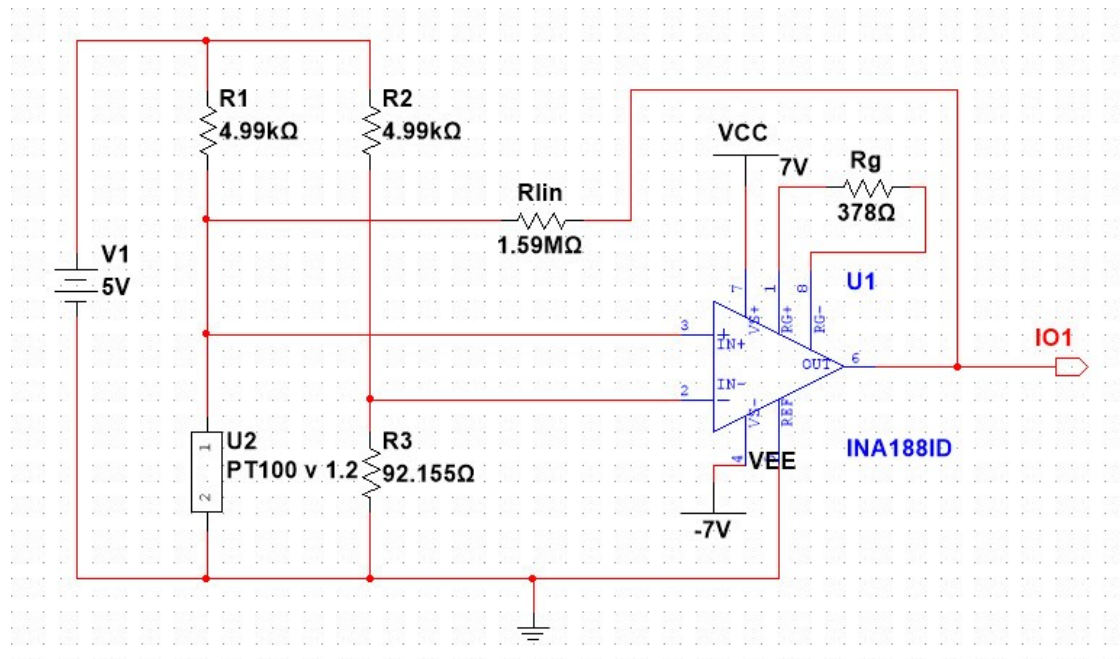


Kuva 13. Virtalähteillä toteutetun piirin piirilevy.

3.1.2 Wheatstonen sillalla toteutettu piiri

Tässä piirissä Pt-100-anturi on kytketty osaksi Wheatstonen siltaa, joka syöttää instrumentointivahvistinta. Piirissä on lisäksi positiivinen takaisinkytkentä ulostulevan signaalin linearisoimiseksi. Pt-100-anturin epälinearisuus on 0 °C:n tuntumassa suhteellisen kapealla 100 °C:n lämpötila-alueella melko pientä, mutta takaisinkytkentä tarvitaan 0,1 °C:n tarkkuustavoitteen takia.

Asia on nähtävissä Pt-100-anturin resistanssiarvon määrittävissä yhtälöissä 7 ja 8. Epälineaarisuutta aiheuttavat termit B ja C kerrotaan lämpötila-arvon toisella ja kolmannella potenssilla, joten niiden vaikutus on pientä nollan asteen tuntu-
massa. Sama asia näkyy piirissä takaisinkytkentävastuksen suurena arvona. Si-
muloitu piiri on nähtävissä kuvassa 14.



Kuva 14. Simuloitu Wheatstonen sillalla toteutettu piiri 1,6 M Ω :n takaisinkytkentävastuksella.

Piirin suunnittelu aloitettiin takaisinkytkentävastuksen R_{lin} arvon määrittämisellä. Tarkoitus on selvittää lineaarisen ja todellisen vasteen ero suurimman virheen kohdalla, 80 celsiusasteessa, ja korjata tämä ero takaisinkytkennän kautta tulevalla virralla.

Yhtälöstä 7 saadaan Pt-100-anturin resistanssiarvo 80 °C:n lämpötilassa, joka on 130,8968 Ω . Poistamalla kaavasta platinan epälineaarisuutta mallintava termi B, saadaan tulokseksi lineaarinen vaste. Lineaarisen vasteen resistanssiarvo 80 celsiusasteessa on 131,2664 Ω .

Wheatstonen sillassa anturin lävitse kulkeva virta muuttuu hieman anturin resistanssin muuttuessa. 80 °C:n lämpötilassa tuo virta on

$$\frac{5 \text{ V}}{4990 \Omega + 130,8968 \Omega} = 0,976 \text{ mA} \quad (14)$$

Täten Pt-100-anturin antama jännite kyseisessä lämpötilassa on $130,8968 \Omega * 0,976 \text{ mA} = 0,1278 \text{ V}$. Vastaavasti lineaarisen vasteen anturin jännite tässä lämpötilassa olisi $131,2664 \Omega * 0,976 \text{ mA} = 0,1282 \text{ V}$. Näillä arvoilla voidaan laskea tarvittun lisävirran määrä, joka nostaa anturin jännitteen lineaarisen vasteen tasolle.

$$\frac{0,1282 \text{ V} - 0,1278 \text{ V}}{130,8968 \Omega} = 2,76 \mu\text{A} \quad (15)$$

80 °C:n lämpötilassa instrumentointivahvistimen ulostulo on noin 5 V, joten halutun takaisinkytkentävastuksen resistanssiarvo on

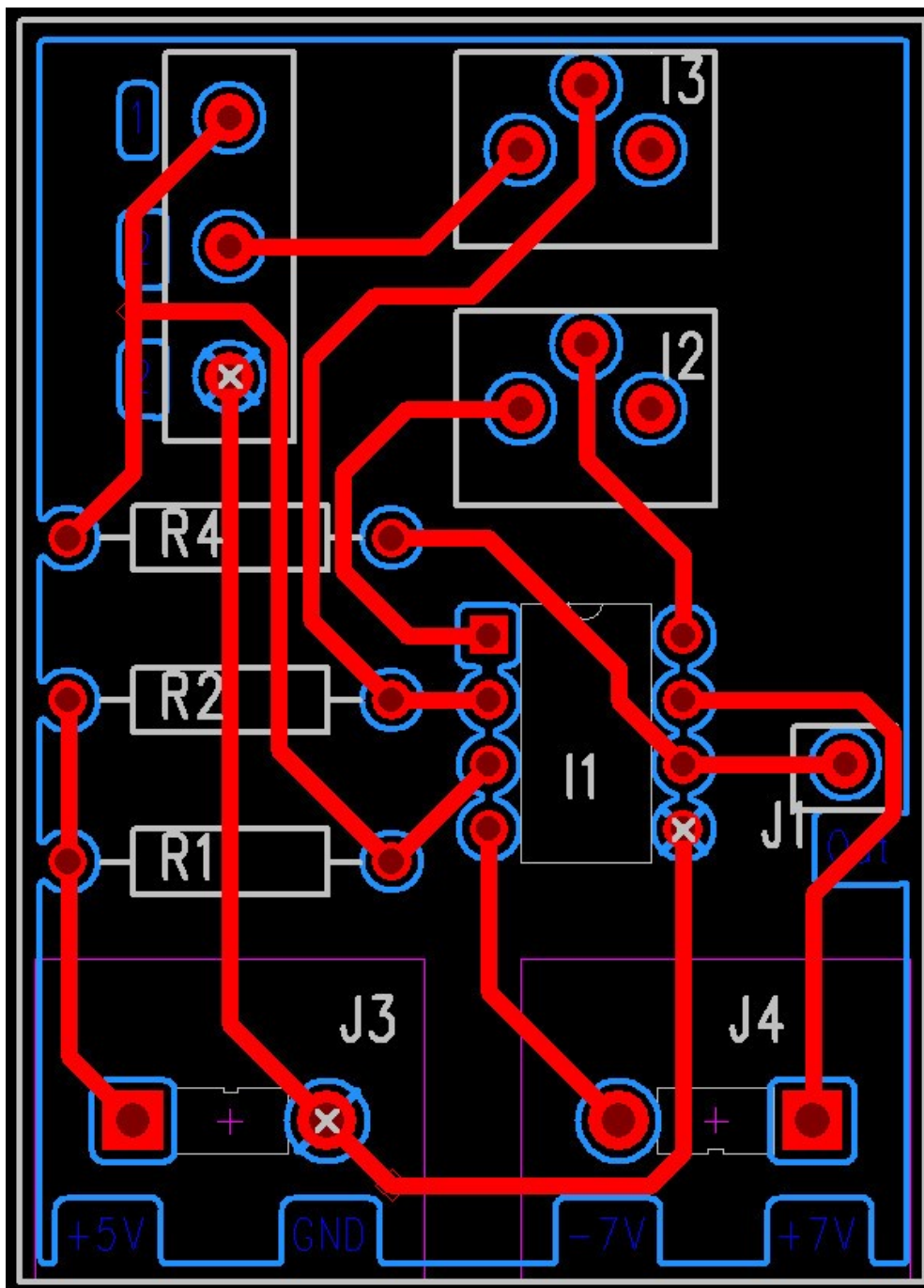
$$\frac{5 \text{ V} - 0,1278 \text{ V}}{2,72 \mu\text{A}} = 1,77 \text{ M}\Omega \quad (16)$$

Lähin käytettävissä oleva vastus oli arvoltaan 1,59 MΩ, ja se valittiin takaisinkytkentävastukseksi.

Vastusten R_3 ja R_g arvot määritettiin analysoimalla piiri solmupistemenetelmällä. Koska yhtälöt ovat melko pitkiä ja monimutkaisia, ne on sijoitettu liitteeseen 1. R_3 :n arvoksi saatiin 92,155 Ω ja R_g :n arvoksi 378,2 Ω. Kuvassa 15 nähdään tämän toteutuksen valmiiksi suunniteltu piirilevy.

Tämä piiri toteutettiin myös vaihtoehtoisella takaisinkytkennän vastuksen arvolla, joka saatiin Texas Instrumentsin tarjoamasta laskurista. Tämä laskuri määrittää takaisinkytkentävastuksen arvon paljon paremmin, sisällyttäen laskutoimitukseen satoja määreitä. Tällöin R_{in} arvoksi saatiin 218 kΩ. [26.]

Kyseinen laskuri ei kuitenkaan antanut muiden vastusten arvoja käytetylle instrumentointivahvistimelle, joten ne määriteltiin jälleen liitteen 1 laskutoimitusten mukaisesti. R_3 :n arvoksi saatiin 92,12 Ω, ja R_g :n arvoksi 403,7 Ω.

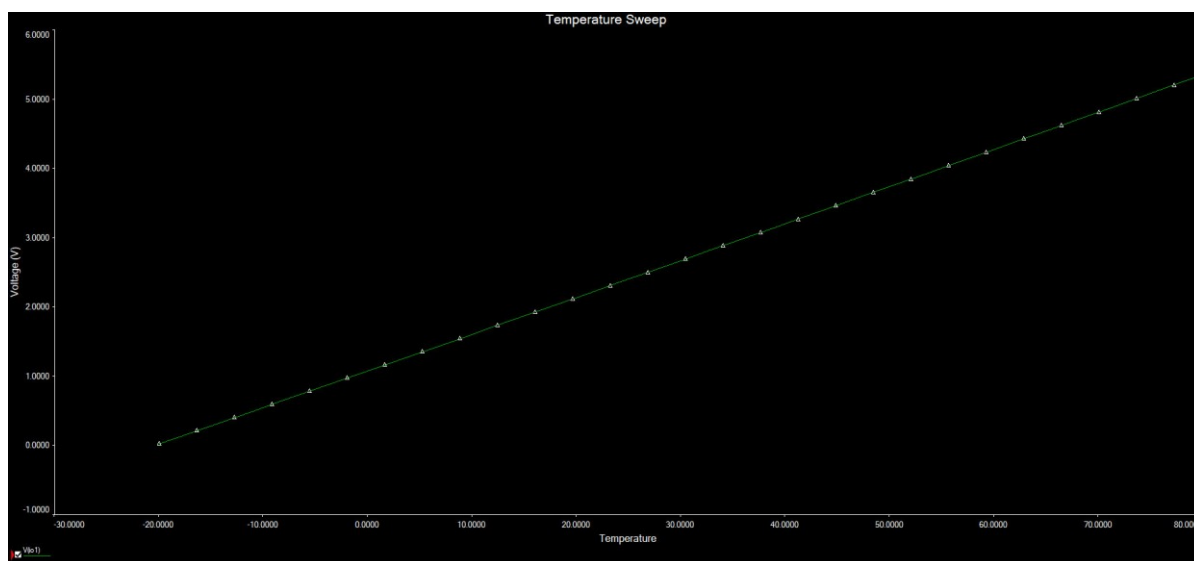


Kuva 15. Wheatstone-piirin piirilevy.

Tätä kolmatta piiriä kasatessa käytettävissä olevat INA118-vahvistimet loppuivat, joten se korvattiin INA121-vahvistimella. INA121 on suorituskyvyltään INA118:aa vastaava, ainoana erona ollen suuremmat valmistustoleranssit.

3.1.3 Analogisten piirien vertailu

Käytettävissä ei ollut Pt-100-anturin tarkkaa SPICE-mallia simulaatiota varten, ja sen sijaan käytettiin lineaarista mallia, joka jättää tuloksista pois anturin aiheuttaman epälineaarisuuden. Kuvassa 16 näkyvä simulointi toi täten vain suuntaa antavan arvion todellisesta suorituskyvystä. Tästä johtuen piirien vertailu suoritettiin valmiiden piirien avulla sääkaapissa.



Kuva 16. Simuloitu virtalähdepiirin jänniteulostulo.

Testauksessa oli kuusi selkeää kohtaa, joissa lineaarisuutta voisi helposti arvioida. -20 °C :n lämpötilassa ulostulon kuuluisi olla 0 V, josta arvot nousevat $20\text{ °C} / 1\text{ V}$ tahdilla aina 80 celsiusasteen 5 V:n ulostuloon asti.

Kun kaikki piirit oli asetettu mittaamaan sääkaapin lämpötilaa, suoritettiin piirien karkea kalibrointi, jotta piirien lineaarisuutta voitiin vertailla. Saatavilla ei ollut tarkkoja lämpötilareferenssejä, joten piirit kalibroitettiin Espec SH-241 -sääkaapin oman lämpömittarin mukaan.

Ulostulevia jännitteitä seurattiin Mastech MY74 -yleismittareilla, jotka näyttävät 2–5 V:n jännitteen kahden desimaalin tarkkuudella. Mitattu lämpötila-alue oli 100 °C , ja ulostulevan jännitteen vaihteluväli 5 V. $0,1\text{ °C}$:n tarkkuus tarkoitti

täten 0,005 V:n askellusta. Näiden yleismittarien tarkkuus ei siis riittänyt näyttämään haluttua tarkkuutta, mutta ne sopivat hyvin tähän välivaiheeseen. Pienemmillä jännitteillä tarkkuus on parempi, mikä on nähtävissä myös taulukossa 1, missä mittaustulokset ovat listattuna.

Taulukko 1. Analogisten piirien jänniteulostulojen vertailutaulukko sääkaapin lämpötilaan nähden.

Sääkaapin näytön lämpötila [°C]	Virtalähdepiirin ulostulo [V]	Wheatstone 1,6 M Ω ulostulo [V]	Wheatstone 218 k Ω ulostulo [V]	Optimiarvo [V]
-20 °C	22 mV	26 mV	28 mV	0 mV
-10 °C	535 mV	549 mV	533 mV	500 mV
0 °C	1,04 V	1,055 V	1,03 V	1,0 V
10 °C	1,55 V	1,57 V	1,535 V	1,5 V
20 °C	2,04 V	2,06 V	2,02 V	2,0 V
30 °C	2,53 V	2,54 V	2,51 V	2,5 V
40 °C	3,03 V	3,04 V	3,01 V	3,0 V
50 °C	3,52 V	3,53 V	3,50 V	3,5 V
60 °C	4,01 V	4,02 V	4,00 V	4,0 V
70 °C	4,51 V	4,52 V	4,50 V	4,5 V
80 °C	5,00 V	5,01 V	5,01 V	5,0 V

Kaikkien piirien suurin poikkeama osui 10 °C:n kohdalle. Vaikka mittaustapa olikin puutteellinen kuten aiemmin todettiin, näiden arvojen mukaan virtalähdepiirin suurin virhe oli 1 °C, 1,6 M Ω :n piirin 1,2 °C, ja 218 k Ω :n piirin 0,7 °C. Näiden tulosten perusteella Wheatstonen sillalla toteutettu piiri 218 k Ω :n takaisinkytkentävastuksella valikoitui ensisijaiseksi ehdokkaaksi lopulliseen toteutukseen, koska sen suorituskyky vaikutti tässä vaiheessa parhaalta. Tarpeen vaatiessa senkin tarkkuutta voitiin vielä parantaa digitaalisesti. Tässä vaiheessa kävi myös selväksi, että tarkemmat säätövastukset olisivat olleet hyödyllisiä. Käytettyjen vastusten tarkkuus riitti vain noin 50 mV askellukseen.

3.2 Digitaalinen osuus ja kokonaisuus

Käytettäväksi mikrokontrolleriksi vaihtoehdot olivat Raspberry Pi 3, Raspberry Pi Pico, Particle Xenon, Particle Argon sekä Arduino Uno.

Raspberry Pi 3 ei varsinaisesti ole mikrokontrolleri, vaan pikemminkin pienoiskokoinen tietokone. Tähän tarkoitukseen sen suurimmaksi ongelmaksi nousi analogisen sisäänmenon puute, joten sitä ei valittu käyttöön. Picon ongelma taas oli sen 3,3 V:n toimintajännite, joka ei riitä tähän käyttötarkoitukseen.

Particlen mikrokontrollerit ovat niin IoT painotteisia, että kaikki kommunikaatio niiden kanssa ohjelmoinnista alkaen täytyy hoitaa internetin kautta, mikä oli tähän tarkoitukseen vain haitallinen asia. Täten jäljelle jäi Arduino Uno, joka sopi tarkoitukseen erittäin hyvin.

Lämpötila näytetään 16x2 kokoisella LCD-näytöllä, jossa on I2C-liitäntä. Arduinon on saatavilla I2C-laajennuskortti, jossa olisi liitin tälle näytölle. Tässä tapauksessa liitäntä hoidettiin kuitenkin vetämällä johdot suoraan Arduinon liitännästoisiin.

Anturin piirikortit tarvitsevat useamman eri jännitteen toimiakseen, ja nämä olivat saatavilla vain koulun tiloissa. Täten muualla tapahtuvaa koodin testausta varten käytettiin säädettävää potentiometriä, jolla simuloitiin sisään tulevaa 0–5 V:n jännitettä. Näin koodia voitiin kehittää helposti saatavilla olevalla USB-liitännän 5 V:n jännitteellä.

Koodin perusidea on hyvin yksinkertainen. Luetaan analogisen sisääntulon jännite, muutetaan se lämpötilalukemaksi ja näytetään tämä lämpötila LCD-näytöllä. Lisäksi sisään tuleva jännite lähetetään sarjamonitoriin tarkkailua varten. Esille nousi kuitenkin kaksi pientä haastetta.

Ensiksikin luettavuuden, siisteyden ja selkeyden vuoksi ilmoitettavan lukeman määre on ilmoitettava. Jos ruudulla lukee vain "Lämpötila 32,7", ei käyttäjä voi olla varma mikä lämpötila-asteikko on käytössä. Täten määreeksi on merkittävä

celsiusasteet. Celsiusuksen merkki ei kuitenkaan kuulu ASCII-merkkeihin, joten se oli toteutettava erikoismerkkinä.

Itse erikoismerkin luominen ei ole vaikea tehtävä, mutta asiaa hankaloittaa se, että tästä johtuen koodissa joudutaan käyttämään kahta eri tapaa näytettäessä tietoja LCD-näytöllä. Yleinen tapa tulostaa tekstiä näytölle on `lcd.print` -toiminto. Tämä toimii sekä muuttujien että ASCII-merkkien näyttämiseksi. Erikoismerkit täytyy kuitenkin näyttää `lcd.write` -toiminnolla, joka toimii myös ASCII-merkkien kanssa, mutta ei muuttujien kanssa.

Toinen haaste liittyy lämpötilalukeman sijaintiin näytöllä. Tulostettaessa mitä tahansa merkkejä näytölle, paikaksi määritellään aloitusruutu, josta merkkijono sitten jatkuu niin pitkälle, kuin merkkejä riittää. Tässä tapauksessa tulostettavalla merkkijonolla oli neljä erilaista muotoa. Ylimmissä lämpötiloissa arvo ilmoitetaan ilman etumerkkiä kuuden ruudun alueella, esim. 72,3 °C. Nollan yläpuolella tarvitaan taas viisi ruutua, esim. 8,2 °C. Nollan alapuolella käytössä on kuusi ruutua, mutta tällä kertaa etumerkin kera, esim. -1,2 °C, ja matalimmissa lämpötiloissa lukema vie seitsemän ruudun verran tilaa, esim. -18,7 °C.

Tästä seuraa, että jos nämä lukemat tulostetaan samaan aloituspaikkaan, lämpötilalukema siirtyy sivusuunnassa lämpötilan muuttuessa, mikä tekee toteutuksesta halvan oloisen. Täten koodia muokattiin siten, että desimaalipiste pysyy aina samalla paikalla, ja eteen tulevat merkit lisääntyvät tai vähenevät tarpeen mukaan. Tämän takia ruutu täytyy myös tyhjentää jokaisella päivityskerralla, jotta tarpeettomat ruudut saadaan tyhjäksi. Ruudut, joihin kirjoitetaan uusi merkki tyhjenevät automaattisesti, mutta ilman ruudun tyhjennystä mm. negatiivista lämpötilaa ilmaiseva miinusmerkki jäisi näkymään myös positiivisilla lämpötila-arvoilla. Lopullinen Arduinon ohjelma on nähtävillä esimerkikoodissa 1.

```

#include "rgb_lcd.h"

// Kirjasto Grove LCD näyttöä varten
rgb_lcd lcd;

// Määritellään ° erikoismerkkinä, koska sitä ei löydy ASCII merkeistä
byte celcius[7] = {0B00100,
                  0B01010,
                  0B00100,
                  0B00000,
                  0B00000,
                  0B00000,
                  0B00000,
                  };

void setup() {
  // Asetetaan LCD näytön koko
  lcd.begin(16, 2);
  // Alustetaan sarjaportin yhteys
  Serial.begin(9600);

  // Alustetaan erikoismerkki
  lcd.createChar(0, celcius);

  // Käynnistystervehdys
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Powered by");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Arduino");
  delay(3000);
}

void loop() {
  // Luetaan analogisesta sisääntulosta
  int sensorValue = analogRead(A0);
  // Määritellään 'voltage' 10-bitin lukuna viidelle voltille
  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
  // Määritellään muuttuja temperature
  float temperature = ((voltage - 1.0) / 0.05) - 0.1;

  // Määritellään eri lämpötila-alueiden ulostulot
  if (temperature >= 0)
  {
    // Lämpötilalukema vaihtaisi paikkaansa näytöllä miinusmerkin ja
    lisääntyvien merkitsevien numeroiden takia,
    // ellei asiaa kompensoitaisi vaihtamalla aloituspaikkaa, joka
    tehdään seuraavaksi
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Temperature");

    lcd.setCursor(1, 1);
    lcd.print(temperature, 1);

    // Tavallinen teksti ja muuttujat voidaan näyttää lcd.print komen-
    nolla, mutta erikoismerkit tarvitsevat
    // lcd.write komennon toimiakseen
    lcd.setCursor(4, 1);
    lcd.write(byte(0));
    lcd.setCursor(5, 1);
  }
}

```

```

lcd.print("C");
}

    if(temperature >= 10)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Temperature");

        lcd.setCursor(1, 1);
        lcd.print(temperature, 1);

        lcd.setCursor(5, 1);
        lcd.write(byte(0));
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print("C");
    }

    if (temperature < 0)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Temperature");

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(temperature, 1);

        lcd.setCursor(4, 1);
        lcd.write(byte(0));
        lcd.setCursor(5, 1);
        lcd.print("C");
    }

    if(temperature <= -10)
    {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0,0);
        lcd.print("Temperature");

        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(temperature, 1);

        lcd.setCursor(5, 1);
        lcd.write(byte(0));
        lcd.setCursor(6, 1);
        lcd.print("C");
    }

// Lähetetään jännitelukema sarjamonitoriin kolmen desimaalin tarkkuu-
della
Serial.println(voltage, 3);

// Pieni viive näytön rauhoittamiseksi ja prosessorin turhan työmäärän
vähentämiseksi
delay(100);
}

```

Esimerkkikoodi 1. Arduino-ohjelma, joka lukee anturipiirin jännitteen, muuttaa lukeman lämpötilaksi ja tulostaa sen LCD-näytölle.

Arduinon käyttöjännite otettiin myös analogiselle piirille menevistä +7 V:n ja GND:n sisäänmenoista. Täten USB-liitin jää vapaaksi tietokoneen liittämistä ja sarjaporttiin lähetettävän jännitesignaalin tarkkailua varten.

3.2.1 Kokonaisuuden ensimmäinen testaus

Kun kaikki oleelliset osat oli saatu yksittäin toimimaan, oli aika suorittaa kokonaisuuden ensimmäinen testaus. Testiajo suoritettiin käytettävissä olevassa sääkaapissa, ja tulokset ovat nähtävillä taulukossa 2.

Testatun piirin ilmoittamaa lämpötilaa seurattiin LCD-näytöltä, ja anturin antamaan jännitesignaalia tietokoneella Arduinon sarjaportista.

Testiä tehdessä oli selkeästi huomattavissa, miten testattavan piirin pienehkö, keraaminen anturi reagoi lämpötilamuutoksiin selvästi nopeammin kuin sääkaapin sisäinen, isohko metallikuorinen anturi. Täten saatu lukema oletettiin aluksi paikkansapitäväksi, kun sääkaapin mittarin lukema saapui asetettuun tavoitelämpötilaan ja tasaantui paikalleen.

Testin lopuksi tuloksia tutkittaessa sääkaappi jätettiin päälle asetettuun 80 °C:n lämpötilaan. Ajan kuluessa oli havaittavissa, että vaikka sääkaapin ilmoittama lämpötilalukema ei enää muuttunutkaan, testattavan piirin ilmoittama lämpötila hiipi hiljalleen liian alhaisesta 79,4 °C:n lämpötilasta 80 °C:n lämpötilaan.

Asiaa tutkittaessa kävi selväksi, ettei sääkaappi näyttänytkään ruudulla todellista sisälämpötilaa, vaan välissä oli jonkinlainen lukemaa muokkaava ohjelma. Lämpötilamuutoksen viimeinen noin 0,5 °C saavutettiin joissain tapauksissa vasta noin 30 min odotuksen jälkeen, vaikka sääkaapin lämpötilamittari olikin näyttänyt tavoitelämpötilaa koko odotusajan.

Tässä mittauksessa oli etuna ensimmäiseen verrattuna Arduinon tarjoama tarkempi jännitelukema yleismittariin verrattuna. Uuden tiedon valossa päätettiin suorittaa uusi testi kaikkien kolmen analogisen piirin kanssa, jotta niiden todellisesta suorituskyvystä saataisiin parempi käsitys.

Taulukko 2. 218 k Ω :n piirin ulos antaman jännitteen testaus koko lämpötila-alueella verraten sääkaapin lämpötilanäyttöä Arduinon lämpötilanäyttöön ja piirin antamaan jännitteeseen.

Sääkaapin näytön lämpötila [°C]	Wheatstone 218 kΩ ulostulo [V]	Jännite muunnettuna lämpötilaksi [°C]
-20 °C	0,020 V	-19,7 °C
-15 °C	0,259 V	-14,8 °C
-10 °C	0,508 V	-9,8 °C
-5 °C	0,758 V	-4,8 °C
0 °C	1,007 V	0,1 °C
5 °C	1,261 V	5,2 °C
10 °C	1,510 V	10,2 °C
15 °C	1,750 V	15,0 °C
20 °C	1,994 V	19,9 °C
25 °C	2,248 V	25,0 °C
30 °C	2,493 V	29,9 °C
35 °C	2,742 V	34,8 °C
40 °C	2,986 V	39,7 °C
45 °C	3,231 V	44,6 °C
50 °C	3,480 V	49,6 °C
55 °C	3,724 V	54,5 °C
60 °C	3,974 V	59,5 °C
65 °C	4,223 V	64,5 °C
70 °C	4,472 V	69,4 °C
75 °C	4,721 V	74,4 °C
80 °C	4,995 V	79,4 °C

3.2.2 Toinen testaus Arduinolla

Tätä testiä varten tehtiin ohjelma, jolla kaikkien kolmen piirin jännitearvot saatiin näkyviin LCD-näytölle helpon seurattavuuden vuoksi. Tämä ohjelma näkyy esimerkkikoodissa 2.

```
#include "rgb_lcd.h"

//Library for using the Grove I2C screen
rgb_lcd lcd;

void setup() {
  //Set up the LCD's number of columns and rows:
  lcd.begin(16, 2);
  //Initialize serial connection
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  //Read from analog input
  int sensorValue1 = analogRead(A0);
  int sensorValue2 = analogRead(A1);
  int sensorValue3 = analogRead(A2);
  //Define voltage as 10-bit value spanning over 5 volts
  float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1023.0);
  float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1023.0);
  float voltage3 = sensorValue3 * (5.0 / 1023.0);

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print(voltage1, 3);

  lcd.setCursor(8, 0);
  lcd.print(voltage2, 3);

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(voltage3, 3);

  delay(100);
}
```

Esimerkkikoodi 2. Testauskoodi kolmelle analogiselle piirille.

Kaikkien piirien anturit sijoitettiin vierekkäin sääkaapin sisälle, ja testiin käytettiin tällä kertaa enemmän aikaa. Piirejä vertailtaessa oli merkillepantavaa, että Wheatstonen sillan piirit reagoivat muutoksiin hieman nopeammin kuin virtalähdepiiri. Oman haasteensa asiaan toi myös se, ettei sääkaapin oma lämpömittari monesti tasaantunut juuri tavoitelämpötilaan, vaan $\pm 0,1$ °C sen ympärille. Puolen tunnin odotus joka askeleella ei ollut ajankäytöllisesti mahdollista, joten

asiaa pyrittiin hieman nopeuttamaan, kuitenkin pitäen silmällä sääkaapin ongelmallista käyttäytymistä. Testin tulokset on listattu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Kaikkien kolmen piirin jänniteulostulojen testaus sääkaapin lämpötilaan verrattuna, Arduinoa jännitemittarina käyttäen.

Sääkaapin näytön lämpötila [°C]	Virtalähdepiiri [V]	Wheatstone 1.6 MΩ [V]	Wheatstone 218 kΩ [V]
-20 °C	0,000 V	0,005 V	0,005 V
-15 °C	0,249 V	0,259 V	0,254 V
-10 °C	0,499 V	0,513 V	0,503 V
-5 °C	0,748 V	0,762 V	0,753 V
0 °C	1,002 V	1,017 V	1,007 V
5 °C	1,256 V	1,276 V	1,261 V
10 °C	1,505 V	1,520 V	1,510 V
15 °C	1,755 V	1,774 V	1,760 V
20 °C	2,004 V	2,024 V	2,014 V
25 °C	2,253 V	2,273 V	2,263 V
30 °C	2,498 V	2,517 V	2,512 V
35 °C	2,742 V	2,762 V	2,757 V
40 °C	2,986 V	3,006 V	3,006 V
45 °C	3,231 V	3,255 V	3,255 V
50 °C	3,475 V	3,500 V	3,504 V
55 °C	3,724 V	3,749 V	3,754 V
60 °C	3,968 V	3,992 V	4,008 V
65 °C	4,213 V	4,242 V	4,256 V
70 °C	4,458 V	4,486 V	4,506 V
75 °C	4,712 V	4,731 V	4,754 V
80 °C	4,951 V	4,971 V	5,010 V

Virtalähteillä toteutetun piirin ulostulo ei ollut aivan lineaarista, vaan se sisälsi Pt-100-anturille ominaisen kaaren, joka olisi piirin hienosäädöllä lievennettävissä, mutta ei poistettavissa. Sääkaappitestauksen hitaus huomioon ottaen, säätöä ei lähdetty suorittamaan. Matalissa lämpötiloissa piiri suoriutuu hyvin, mutta asteikon yläpäässä siihen tulee $-1,0$ °C:n virhe.

1,6 M Ω :n Wheatstone-piiri suoriutuu hieman paremmin, suurimman heiton ylöspäin ollessa $0,3$ °C ja alaspäin $-0,6$ °C.

Parhaimman tuloksen antaa edelleen 218 k Ω :n Wheatstone-piiri, jonka ulostulo on todella lineaarista. Kuten taulukosta 3 nähdään, ulostulo heittää koko lämpötila-alueella välillä $+0,1$ °C... $+0,2$ °C. Jos piirikortilla olevat säätövastukset olisivat tarkempia, heitto olisi säädettävissä tavoitteena olevaan $\pm 0,1$ °C:n tarkkuuteen analogisesti. Vastukset ovat kuitenkin sen verran epätarkkoja, ettei ulostuloa saatu säädettyä aivan kohdalleen. Tästä johtuen säätö hoidettiin digitaalisesti. Kun ulostulevasta lämpötila-arvosta vähennettiin $0,1$ °C koko alueella, saavutettiin haluttu tarkkuus. Tämän huonona puolena on tosin koko toiminnallisen lämpötila-alueen siirtyminen $0,1$ °C alaspäin, jolloin se sijoittuu välille $-20,1$ °C... $79,9$ °C.

Taulukossa 3 on merkillepantavaa 218 k Ω :n piirin 80 °C:n lämpötilassa antama jännite $5,010$ V. Tämän mittaus Arduinolla ei ollut tietenkään mahdollista, sillä sen toiminnallinen jännitealue loppuu viiteen volttiin. Tämä arvo on muista poiketen arvio, joka perustuu jännitearvojen keskinäiseen vertailuun. Kun kävi selväksi, että 218 k Ω :n piirin antama jännite tulee menemään viiden voltin yli, otettiin kaikkien kolmen piirin antamat jännitetiedot ylös, ja puuttuvat askeleet lisättiin seuraamalla toisten piirien käyttäytymistä. Tieto voidaan olettaa paikkansapitäväksi, kun puhutaan vain $0,2$ °C:n siirtymästä, kun se lisäksi on linjassa matalampien lämpötilojen tulosten kanssa.

3.2.3 Lopputestaus

Kun mittausjärjestelmä oli kokonaisuudessaan asennettu laatikkoonsa, suoritettiin vielä lopputestaus sen varmistamiseksi, ettei asennuksessa ollut tapahtunut jotain odottamatonta, kuten säätövastusten asetusten muuttumista. Tällä kertaa testilämpötiloja valittiin vain kolme, mutta jokaista kohtaa testattiin todella pitkään. Taulukko 4 sisältää viimeisen testin tulokset.

Taulukko 4. Lopullisen kokoonpanon näyttämä lämpötila verrattuna sääkaapin näyttämään lämpötilaan.

Sääkaapin näytön lämpötila [°C]	Mittauslaitteen näyttämä lämpötila [°C]
-19,0 °C	-19,1 °C
30,1 °C	30,1 °C
79,0 °C	79,1 °C

Kuten taulukko 4 näyttää, mittauslaite ilmoittaa lämpötilan halutulla tarkkuudella sääkaapin näyttämään lukemaan verrattuna.

Tarkat referenssilämpötilat anturin testaukseen olisivat olleet hyödyllisiä, mutta tällä kertaa jouduttiin tyytymään sääkaapin tarjoamaan lämpötilalukemaan piirin kalibroinnissa.

4 Yhteenveto

Projektin tavoitteena oli valmistaa lämpötilaa mittaava laite, joka toimii $-20\text{ °C} \dots 80\text{ °C}$:n lämpötila-alueella, näyttää lämpötilan $0,1\text{ °C}$:n tarkkuudella ja sopii käytettäväksi sääkaapissa.

Hanke toteutettiin RTD-anturilla, joka asetettiin osaksi tasajännitteellä syötettyä Wheatstonen siltaa kolmijohtokytkenällä. Sillan antama jännite syötettiin Arduino Uno -mikrokontrollerille, jossa analoginen signaali muutettiin digitaaliseen muotoon. Digitaalinen signaali syötettiin tämän jälkeen LCD-näytölle, jossa se

esitettiin celsiusasteina. Arduino ohjelmoitiin myös lähettämään jännitesignaali sarjaporttiin, jonka kautta sitä voi tarkkailla yhdistämällä tietokone Arduinon USB-porttiin.

Kokonaisuus pakattiin muovilaatikkoon, joka suojelee osia ulkoisilta rasitteilta, ja tekee siitä helposti käsiteltävän. Esillä ovat LCD-näyttö, Arduinon USB-liitin, jännitesyöttöjen banaaniliittimet sekä itse RTD-anturi, jonka voi asettaa haluttuun paikkaan mittaamaan lämpötilaa.

Alkuperäiset tavoitteet saavutettiin suurelta osin. Pieneksi puutteeksi jäi toiminnallisen lämpötila-alueen siirtyminen 0,1 celsiusasteella alaspäin. Muilta osin kokonaisuus toimii kuten sen pitääkin.

Jos mittausjärjestelmää haluaa parantaa, tärkeimmäksi parannusehdotukseksi nousee tarkempien komponenttien käyttäminen analogisessa piirikortissa. Varsinkin säätövastusten tulisi olla tarkemmin säädettävissä, jotta piirin kalibrointi voitaisiin tehdä pelkästään analogisesti. Tämä kokonaisuus rakennettiin projektiluontoisesti, joten komponenttivalinnat ja säädöt tehtiin käsin. Tarkkuuskomponenteilla valmistettuna ja arvot tarkasti määriteltynä, myös säätövastukset voisi kenties korvata tavallisilla vastuksilla, tai ainakin valmiiksi säädetyillä säätövastuksilla. Käytetty piirikortti jyrättiin FR4-materiaalista, mutta sen voisi myös tilata teollisesti tuotettuna.

Yksi keskeinen parannuskohta on tietenkin referenssilämpötilojen saatavuus. Jos halutut referenssilämpötilat olisivat lisäksi nopeammin muutettavissa kuin sääkaapin sisälämpötila, mittapiirin kalibrointi olisi huomattavasti helpommin toteutettavissa.

Lähteet

- 1 Ripka, Pavel. Tipek, Alois. 2007. Modern Sensors Handbook. Lontoo: ISTE Ltd.
- 2 Ban on sale of mercury measuring instruments. 2007. Verkkoaineisto. Euroopan Parlamentti. <<https://www.europarl.europa.eu/sides/get-Doc.do?pubRef=-//EP//TEXT+IM-PRESS+20070706IPR08897+0+DOC+XML+V0//EN>>. 10.7.2007. Luettu 24.2.2022.
- 3 Thermometer filling liquids. Verkkoaineisto. Instrumentation Services. <https://web.archive.org/web/20141102152303/http://www.instrumentationservices.net/downloads/Thermometer_Filling_Liquids.pdf>. Luettu 24.2.2022
- 4 Bimetallic thermometer. Verkkoaineisto. Instrumentation Tools. <<https://instrumentationtools.com/bimetallic-thermometer/>>. Luettu 24.2.2022.
- 5 Patil, Vishnu. What is a bimetallic thermometer. Verkkoaineisto. <<https://electricalgang.com/bimetallic-thermometer/>>. Luettu 24.2.2022.
- 6 Wilson, Jon. 2005. Sensor Technology Handbook. Oxford: Elsevier.
- 7 Thermocouple: What is it? 2021. Verkkoaineisto. Electrical 4 U. <<https://www.electrical4u.com/thermocouple/>>. 26.9.2021. Luettu 24.2.2022
- 8 The operating principle of thermocouples. 2014. Verkkoaineisto. Engineering e-solution. <<https://engineeringesolution.blogspot.com/2014/06/the-operating-principle-of-thermocouples.html>>. 6.2014. Luettu 25.2.2022
- 9 How to choose a thermocouple. 2019. Verkkoaineisto. Omega. <<https://www.omega.com/en-us/resources/selecting-a-thermocouple>>. 17.4.2019. Luettu 25.2.2022.
- 10 The engineer's guide to temperature sensing. 2019. Verkkoaineisto. Texas Instruments. <<https://www.ti.com/lit/eb/slyy161/slyy161.pdf?ts=1646036412808&>>. Luettu 28.2.2022.
- 11 1N4148 Datasheet. 2017. Verkkoaineisto. Vishay. <<https://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>>. 6.7.2017. Luettu 28.2.2022.
- 12 Fraden, Jacob. 2010. Handbook of modern sensors. Lontoo: Springer.

- 13 What is a thermistor, and how its working? 2020. Verkkoaineisto. Linqip Technews. <<https://www.linqip.com/blog/what-is-a-thermistor/>>. 10.12.2020. Luettu 28.2.2022.
- 14 Bush, Joe. 2018. Energy band theory. Verkkoaineisto. <<https://www.student-circuit.com/learning/year1/electronic-materials/energy-band-theory/>>. 12.3.2018. Luettu 18.3.2022.
- 15 Lavaa, Anaa. 2021. What is the core difference between thermistor and RTD? Verkkoaineisto. <<https://www.linqip.com/blog/what-is-the-core-difference-between-thermistor-and-rtd/>>. 10.28.2021. Luettu 28.2.2022.
- 16 Types of thermistors. A fundamental comparison between them. 2020. Verkkoaineisto. Linqip Technews. <<https://www.linqip.com/blog/types-of-thermistor-a-fundamental-comparison/>>. 15.12.2020. Luettu 28.2.2022.
- 17 Introduction to RTDs. Verkkoaineisto. Capgo. <<https://www.capgo.com/Resources/Temperature/RTDs/RTD.html>>. Luettu 1.3.2022.
- 18 RTD-lämpötila-antureiden perusteet. Verkkoaineisto. PR Electronics. <<https://www.prelectronics.com/fi/the-fundamentals-of-rtd-temperature-sensors/>>. Luettu 1.3.2022.
- 19 What is a sensor, and application of sensors. Verkkoaineisto. Chip'n'Salsa. <<https://chipnsalsa.com/what-is-sensor-part-2-temperature-sensor/>>. Luettu 1.3.2022.
- 20 Resistance thermometer transducer. Verkkoaineisto. Electronics club. <<https://electronics-club.com/resistance-thermometer-transducer/>>. Luettu 1.3.2022.
- 21 Wells, Collin. 2011. Signal conditioning and linearization of RTD sensors. Verkkoaineisto. <<https://www.ti.com/lit/ug/tidu433/tidu433.pdf>>. 24.9.2011. Luettu 2.3.2022.
- 22 Formula of 2 wire RTD, 3 wire RTD & 4 wire RTD. Verkkoaineisto. Instrumentation Tools. <<https://instrumentationtools.com/formula-of-2-wire-rtd-3-wire-rtd-4-wire-rtd/>>. Luettu 2.3.2022.
- 23 Northrop, Robert B. 2005. Introduction to instrumentations and measurement. Boca Raton: Taylor & Francis.
- 24 Franco, Sergio. 2019. The Howland current pump. Verkkoaineisto. <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/the-howland-current-pump/>>. 7.1.2019. Luettu 25.3.2022.
- 25 INA118 datasheet. 2022. Verkkoaineisto. Texas Instruments. <<https://www.ti.com/lit/gpn/INA118>>. Luettu 5.4.2022.

- 26 Trump, Bruce. 2011. Analog linearization of resistance temperature detectors. Verkkoaineisto. <<https://www.ti.com/lit/an/slyt442/slyt442.pdf>>. Luettu 6.4.2022.

Vastusten R_3 ja R_g määrittäminen

Vastusten R_3 ja R_g määrittäminen

$$V_- (G_2 + G_3) - E \cdot G_2 = 0 \quad V_- = \frac{E \cdot G_2}{G_2 + G_3}$$

$$V_+ (G_1 + G_{R10} + G_{R11}) - E \cdot G_1 - V_{out} \cdot G_{R11} = 0$$

$$V_+ = \frac{E \cdot G_1 + V_{out} \cdot G_{R11}}{G_1 + G_{R10} + G_{R11}}$$

INA 118/118 vahvistus $A_v = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_g}$

$$V_{out} = (V_+ - V_-) \cdot A_v$$

$$V_{out} = \left(\frac{E \cdot G_1 + V_{out} \cdot G_{R11}}{G_1 + G_{R10} + G_{R11}} - \frac{E \cdot G_2}{G_2 + G_3} \right) \cdot \left(1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_g} \right)$$

Ajokohdan $V_{out} = 0$

$$\left(\frac{E \cdot G_1}{G_1 + G_{R10} + G_{R11}} - \frac{E \cdot G_2}{G_2 + G_3} \right) \cdot \left(1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_g} \right) = 0$$

Toteutuu kun

$$\frac{E \cdot G_1}{G_1 + G_{R10} + G_{R11}} = \frac{E \cdot G_2}{G_2 + G_3}$$

$$(E \cdot G_1) (G_2 + G_3) = (E \cdot G_2) (G_1 + G_{R10} + G_{R11}) \quad (G_1 = G_2)$$

$$G_3 = G_{R10} + G_{R11} \quad \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_{R10}} + \frac{1}{R_{R11}}$$

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{R_{R10}} + \frac{1}{R_{R11}}}$$

$$R_3 = 92,155 \Omega$$

$$V_{out} = \left(\frac{E \cdot G_1 + V_{out} \cdot G_{R12}}{G_1 + G_{R10} + G_{R12}} - \frac{E \cdot G_2}{G_2 + G_3} \right) \left(1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_9} \right)$$

Ansatz $V_{out} = 5 \text{ V} = E$

$$1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_9} = \frac{E}{E \left(\frac{G_1 + G_{R12}}{G_1 + G_{R10} + G_{R12}} - \frac{G_2}{G_2 + G_3} \right)}$$

$$\frac{50 \text{ k}\Omega}{R_9} = \frac{1}{\frac{G_1 + G_{R12}}{G_1 + G_{R10} + G_{R12}} - \frac{G_2}{G_2 + G_3}} - 1$$

$$R_9 = \frac{50 \text{ k}\Omega}{\frac{1}{\frac{G_1 + G_{R12}}{G_1 + G_{R10} + G_{R12}} - \frac{G_2}{G_2 + G_3}} - 1}$$

$$R_9 = 378,2 \text{ }\Omega$$