

Hermann Jylhä

Hallittu ja
käytännössä

valvottu

peltier-jäähdytys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tietotekniikan koulutusohjelma

Insinööriytyö

7.5.2015

Tekijä(t) Otsikko	Hermann Jylhä Hallittu ja valvottu peltier-jäähdytys käytännössä
Sivumäärä Aika	33 sivua + 2 liitettä 7.5.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	tietotekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	sulautetut järjestelmät
Ohjaaja	lehtori Keijo Länsikunnas
<p>Insinööriyön aiheena on suunnitella, rakentaa ja testata peltier-elementille ohjain, jota voidaan myös valvoa ulkopuolelta Zigbee-radioverkon kautta.</p> <p>Peltier-elementin ohjaimen pohjaksi valittiin Arduino Uno-kehitysalusta. Arduino unolle rakennettiin oma prototyyppiipiirilevy, johon kaikki ohjaimen tarvittava apuelektronikka sijoitettiin. Suunnittelun aikana muodostui ongelmaksi peltier-elementin hinta ja niiden tarvitsemat erikoiset jännitteet. Ohjaimessa käytetty ensimmäinen MosFET-piiri tuhoutui, koska se todennäköisesti ei testeissä kytkeytynytäkään täysin päälle. Pienen kytkentämuutoksen jälkeen toinen MosFET-piiri toimi odotetulla tavalla.</p> <p>Työn ohjaimen toimiessa keskityttiin muodostamaan yksinkertainen Zigbee-radioverkko työssä käytetyn Arduino Unon ja Raspberry Pin välille. Zigbee-radioverkon pystyttäminen ei ollut täysin ongelmaton, sillä projektissa käytetyt kaksi Zigbee-moduulia olivat hieman erilaisia.</p> <p>Työssä onnistuttiin rakentamaan peltier-elementille ohjain joka ajoi noin 90 W:n peltier-elementtiä kuumenematta lainkaan. Ohjainta testattaessa peltier-elementin todellinen jäähdytystehokkuus yllätti. Peltier-elementti vaatii yli kaksinkertaisen määrän energiaa jäähdytettävään lämpö määrään nähden. Ohjaimessa käytetty peltier-elementti ilmeni hieman liian heikoksi, sillä se ei pystynyt puristamaan lämpötiloja halutulle tasolle. Peltier-elementin avulla on mahdollista rakentaa ilmajäähdytys, joka pystyisi puristamaan lämpötilat halutulle tasolle, kunhan valittu peltier-elementti on riittävän tehokas ja sille tarjotaan sen tarvitsema täysi jännite.</p>	
Avainsanat	Arduino Uno, MosFET, Peltier, PWM, TEC, Zigbee

Author(s) Title	Hermann Jylhä Controlled and monitored peltier-cooling in practise
Number of Pages Date	34 pages + 2 appendices 7 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Information technology
Specialisation option	Embedded systems
Instructor	Keijo Länsikunnas, lecturer
<p>The topic for the thesis is design, build and test a controller for thermoelectric cooler which can be monitored remotely with Zigbee-network.</p> <p>Arduino Uno development kit was chosen as the base for the controller. A prototype controller board was built for arduino uno which included all the necessary components. The needed voltages and expensive prices with thermoelectric coolers rose as a problem during the desing phase. The first tested MosFET was destroyed, because it most likely failed to reach full saturation - which in turn caused it to heat up uncontrollably. After a small design change second MosFET worked as expected.</p> <p>As the controller itself started working right, it was time to focus on the Zigbee-radionetwork between Arduino uno and Raspberry Pi. Building the Zigbee-radionetwork was not without its own problems, because project used two slightly different Zigbee-modules.</p> <p>Working controller for the thermoelectric cooler was succesfully built which effortlessly controlled a 90W thermoelectric cooler. During testing, the real cooling ability of thermoelectric coolers was surpricing. Thermoelectric cooler needs over double the amount of energy to cool a certain heatload properly. With thermoelectric cooler it is possible to build aircooling, which can squeeze the temperatures to the desired level, as long as the chosen thermoelectric cooler is powerful enough and it receives enough power.</p>	
Keywords	Arduino Uno, MosFET, Peltier, PWM, TEC, Zigbee

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Suunnittelu	2
2.1	Mikroprosessori, laitteen aivot	2
2.2	Lämpötilan seuranta	2
2.3	Peltier	4
2.4	Tehon hallinta	8
2.5	Zigbee	10
3	Ohjaimen prototyyppi	12
3.1	Jäähdytettävä laite	12
3.2	Komponenttien valinta	13
3.3	Jäähdytyksen ohjain	20
3.4	Yksinkertaisen Zigbee-verkon rakentaminen	21
4	Prototyypin testaaminen	24
5	Yhteenveto	30
	Lähteet	31

Liitteet

Liite 1. Testeissä tietojen keräämiseen käytetyt apuohjelmat.

Liite 2. Arduino Uno:ssa ajettu ohjelma

Lyhenteet

API	Application Programming Interface. Zigbee moduulin toimintatila, jossa ohjelma neuvottelee suoraan Zigbee moduulin kanssa.
AT	Application Transparent. Zigbee moduulin toimintatila, jossa moduuli voi lähettää vain yhteen laitteeseen tietoa.
MosFET	Metal-oxide-semiconductor Field Effect Transistor. Metallioksidi puolijohdekanavatransistori. Komponentti, jonka avulla voidaan suurta tehoa ohjata pienellä jännitteellä.
NTC	Negative Temperature Coefficient. NTC termistori. Komponentti, jonka vastusarvo muuttuu lämpötilan mukaan.
PWM	Pulse-Width Modulation. Pulssinleveysmodulaatio. Digitaalitekniikan keino hallita tehoa.
TDP	Thermal Design Power. Laitteen tuottama lämpöenergia.
TEC	ThermoElectric Cooler. Lämpösähköinen jäähdytin. Komponentti, joka siirtää lämpöä puolelta toiselle. Tunnetaan myös nimellä peltier-elementti.

1 Johdanto

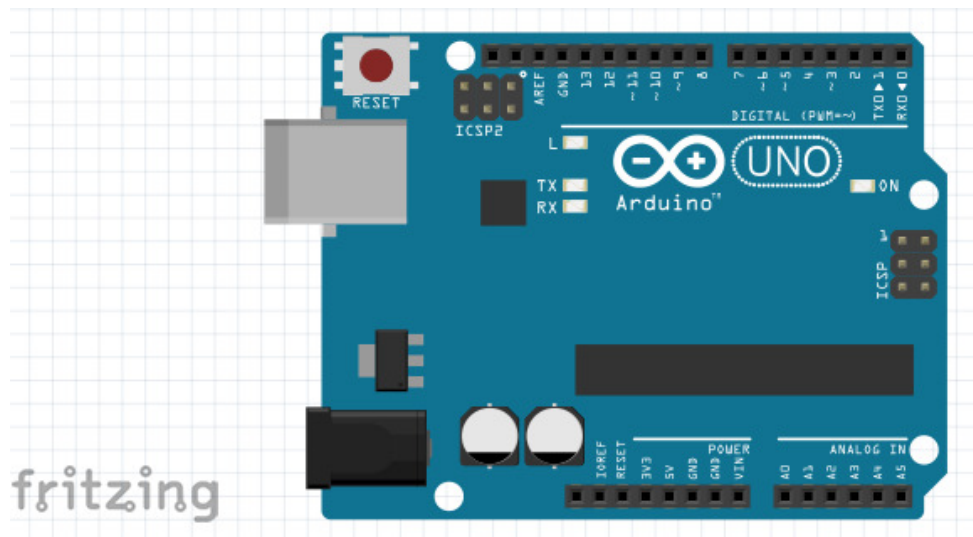
Insinööriyön aihe on peltier-elementin ohjaimen suunnittelu, rakentaminen ja testaus. Ohjaimella voidaan hallita esimerkiksi tietokoneen prosessorin lämpötilaa. Aihe on mielenkiintoinen, sillä olen suunnitellut rakentavani kyseisen ohjaimen jo pitkään. Ohjaimen ja riittävän tehokkaan peltier-elementin avulla voidaan prosessorista saada mahdollisimman paljon tehoa. Teho saadaan prosessoria ylikellottamalla – eli ajamalla prosessoria suuremmalla nopeudella kuin mihin se on alumperin tarkoitettu. Peltier-elementin avulla voidaan suoritin pakottaa kylmemmäksi ja siten saavuttaa suuremmat kellotaajuudet. Peltier-elementtiä on tarkoitus ohjata PI-säädintä vastaavalla tavalla. Arduino Uno mittaa kylmälevyn lämpötilaa ja pitää tavoitelämpötilana huoneen lämpötilaa. Mitatun kylmälevyn lämpötilan ollessa kuumempi kuin huoneen lämpötila ohjataan peltier-elementille enemmän tehoa ja kun tavoiteltava huoneen lämpötila saavutetaan vähennetään peltier-elementin tehoa. Ilmajäähdytyksen alin mahdollinen lämpötila on hieman huoneen lämpötilaa korkeampi, sillä lämpöä haihduttaakseen jäähdytyssiilen täytyy olla kuumempi kuin ympäröivä ilma. Peltier-elementti muodostaa puoliansa väliin lämpötilaeron, jolloin jäähdytyssiili on kuumempi kuin jäähdytettävä suoritin. Insinööriyön tavoitteena on suunnitella, rakentaa ja testata ohjaimen prototyyppi. Ohjainta on tarkoitus valvoa langattomasti, ja tähän tehtävään soveltuu Zigbee mainiosti. Ohjaimen perusrungoksi valitsin Arduino uno kehitysalustan, jolle suunnittelen ja rakennan oman apuelektronikan. Ohjainta tulee valvomaan pienikokoinen Raspberry PI, joka myös hoitaa tiedon tallennuksen sekä raportoinnin.

Elektronikan piirisuunnittelu, elektronikan komponentit sekä piirilevyn suunnitteluopintojaksot antoivat hyvän pohjan työn rakentamiseen. Työ koskettaa useita eri elektronikan ja sulauttujen järjestelmien osa-alueita, virtapiirin suunnittelusta mikroprosessorin ohjelmointiin.

2 Suunnittelu

2.1 Mikroprosessori, laitteen aivot

Ohjaimen pohjaksi valitsin Arduino Uno kehitysalustan, sillä sen ympärille on helppo rakentaa mitä erilaisempia koekytkentöjä ja se on helppo ohjelmoitava. Arduino Uno perustuu ATmega328-mikroprosessoriin, joka voidaan ohjelmoida tekemään melkein mitä vain. Mikroprosessori ohjelmoidaan Arduino IDE -kehitysympäristössä, jossa käytetään ohjelmointikielenä C++:aa. Ohjaimen mikroprosessorilta tarvitaan tässä työssä ainoastaan AD-muunninta, PWM-ohjainta ja sarjaporttia, eli ohjain pääsee melko helpolla. Seuraavassa kuvassa on Arduino Unon kuva Fritzing-ohjelmistossa. (Arduino Uno 2014)

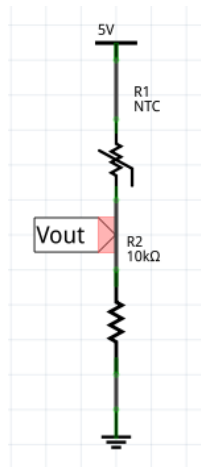


Kuva 1. Arduino Uno

2.2 Lämpötilan seuranta

Lämpötilan seurantaan valitsin yksinkertaisen NTC-termistorin, jonka vastusarvo muuttuu lämpötilan mukaan. NTC-termistorin seuraaminen on varmatoimista ja nopeaa. Absoluuttinen, tarkka lämpötila ei ole ohjaimen toiminnan kannalta merkittävää, sillä ohjain tarvitsee vain kahden anturin eron. IC-pohjaisella lämpötila-anturilla päästäisiin tarkempiin mittaustuloksiin, mutta niiden lukeminen on työläämpää kuin tavallisen NTC-termistorin.

Virtapiiri



Kuva 2. Yksinkertainen jännitteenjakopiiri

Lämpötilan mittaaminen yksin NTC-termistorilla ei onnistu, vaan se tarvitsee avuksi vastuksen, jonka arvo ei muutu. Edellä näkyvässä kuvassa 2 näkyvä NTC-termistori ja vastus muodostaa yksinkertaisen jännitteenjakopiirin, jonka avulla NTC-termistorin yli vaikuttava jännite voidaan mitata, muuttua vastusarvoksi ja lopulta lämpötilaksi. (Using NTC Thermistors with Arduino 2013)

Vastusarvon laskeminen

Ohmin lain avulla NTC-termistorin vastusarvo voidaan laskea. Ensin lasketaan, kuinka suuri virta kulkee molempien vastusten läpi.

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

Kaavasta 1 johtamalla saadaan vastuksen R_1 yli vaikuttava jännite V_{out} ratkaistua.

$$V_{out} = R_1 \frac{U}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Ratkaisemalla tuntemattoman muuttujan R_1 , saamme kaavan 3.

$$R_1 = \frac{R_2 * U}{V_{out}} - R_2 = R_2 * \left(\frac{U}{V_{out}} - 1 \right) \quad (3)$$

Vastusarvon muuttaminen lämpötilaksi

NTC-thermistorin vastusarvo muutetaan lämpötilaksi Steinhart-Hart yhtälöllä. (Kaava 4).

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C(\ln(R))^3 \quad (4)$$

T on lämpötila (Kelvineinä)

R on NTC-thermistorin vastusarvo

A, B ja C ovat Steinhart-Hart vakioita kyseiselle NTC-vastukselle.

Ja kaavalla 5 muunnetaan lämpötila kelvineistä celsiusasteisiin

$$T_{\circ C} = T_{\circ K} - 273.15 \quad (5)$$

2.3 Peltier

Peltier-elementti on lämpösähköinen komponentti, joka siirtää peltier-ilmiön avulla lämpöä peltier-elementin puolelta toiselle. Peltier-elementtiä käytetään laitteissa, joiden lämpötilaa halutaan hallita. Peltier-elementin lämmönsiirtosuuntaa voidaan hallita yksinkertaisesti virran suuntaa vaihtamalla. Normaalisti peltier-elementtejä käytetään kuitenkin jäähdyttämiseen, sillä lämmittäminen on huomattavasti helpompaa tavallisella sähkövastuksella.

Peltier-elementillä on seuraavanlaisia etuja:

- Huoltovapaa, hiljainen ja pitkäikäinen, sillä peltier-elementissä ei ole liikkuvia osia
- Voidaan valmistaa minkä muotoiseksi ja kokoiseksi tahansa
- Jäähdytettävän kohteen lämpötila voidaan puristaa alle ympäristön lämpötilan

Peltier-elementeillä on seuraavanlaisia haittoja

- Hyötysuhde heikko
- Suuri tehonkulutus

- Kylmyydestä johtuva kosteuden kerääntyminen eli kondensaatio

(Peltier Cooler Information 2015, Guide to Advanced Cooling: Peltier edition 2014)

Kondensaatio

Koska peltier-elementti pystyy puristamaan lämpötilan myös ympäristön lämpötilaa alemmaksi, tulee ongelmaksi kondensaatio eli kosteuden kerääntyminen jäähdytettäviin osiin. Yksinkertaisin keino välttää kerääntyvää kosteutta on välttää jäähdyttämästä ympäristön lämpötilan alapuolelle. Toinen keino rajoittaa kondensaatiota on valvoa ympäristön lämpötilaa ja ilman kosteutta, ja niistä laskemalla kastepiste. Tämän avulla saadaan huoneilman lämpötilaa alempana oleva lämpötilaraja, ainakin jos huoneilma on riittävän kuivaa. Kaavalla 6 voidaan laskea kastepisteelle likimääräisen arvo, jos huoneilman kosteus on yli 50%. (Dew point 2015)

$$T_d = T - \frac{(100-RH)}{5} \quad (6)$$

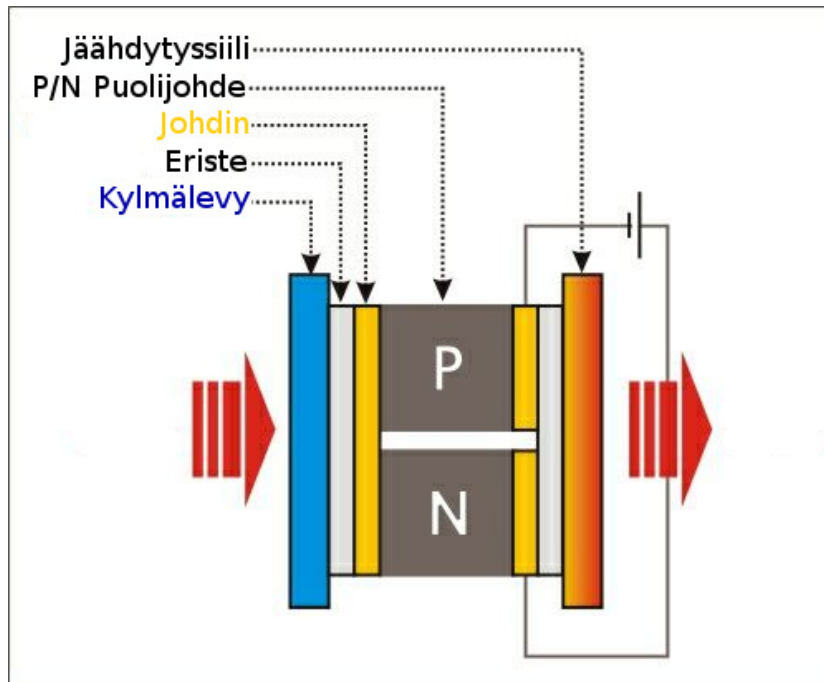
T_d on kastepiste

T on ympäristön lämpötila

RH on ympäristön suhteellinen kosteus prosentteina.

Jos lämpötilaa haluttaisiin välttämättä ajaa merkittävästi huoneen lämpötilan alle, täytyy kaikki jäähtyvät osat eristää ympäristöstä. Hyväkään eristäminen ei poista ongelmaa täydellisesti. Mikäli kosteutta pääsee kertymään riittävästi, kosteus alkaa aiheuttamaan ongelmia. Liiallinen kosteuden kertyminen voi pahimmillaan rikkoa jäähdytettävän laitteen. Varmin keino kosteusongelmien välttämiseen on pysytellä hieman ympäristön lämpötilan yläpuolella. Tämän projektin ohjain pyrkii pitämään jäähdytettävän kohteen hieman huoneen lämpötilaa korkeammalla, jolloin kosteuden kerääntyminen ei muodostu ongelmaksi.

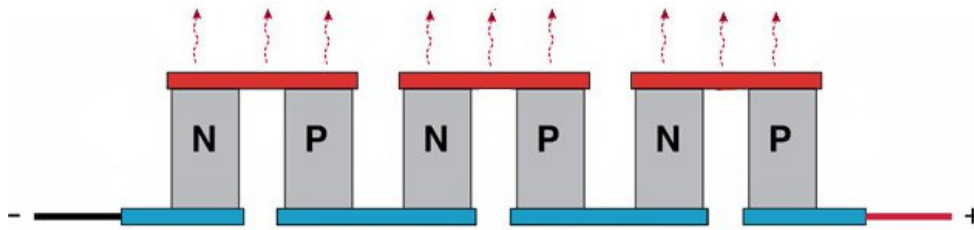
Peltier-elementin rakenne



Kuva 3. Peltier-pohjaisen jäähdytyksen rakenne. (Understanding Thermoelectric Cooling 2015)

Kuvassa 3 on kuvattu Peltier-pohjaisen jäähdytyksen rakenne. Peltier-elementtiin sisältyvät osat ovat eristeiden välissä olevat johtimet ja puolijohteet. Peltier-elementin eristeet ovat tavallisesti valmistettu keraamista, joka on hyvä sähköeriste, kohtuullinen johtamaan lämpöä ja ei kutistu tai laajene merkittävästi. Kylmälevy jakaa jäähdytettävästä kohteesta tulevan lämpöenergian useille soluille.

Jokaisessa solussa on kahta erilaista materiaalia jotka yhdessä muodostavat lämpöparin. Virran kulkiessa lämpöparin läpi lämpöenergiaa siirtyy puolelta toiselle. Peltier-elementti on tavallisesti koteloitu keraamista valmistettujen levyjen väliin. Toinen levyistä imee lämpöä ja toinen tarjoaa imetyn lämmön ja imemisen yhteydessä muodostuvan hukkalämmön eteenpäin jäähdytys siilelle. Jäähdytys siili siirtää lämmön ilmaan, joka puhalletaan kotelosta ulos.



Kuva 4. Peltier-elementin rakenne. (Peltier Elements Generate Heat Cold or Electricity 2015)

Peltier-elementin tehoa voidaan kasvattaa lisäämällä lämpöparien määrää. Fyysisesti lämpöparit sijaitsevat levyllä rinnakkain, vaikkakin sähköisesti ne ovat sarjaankytkettynä. Lämpöpareihin valittu materiaali vaikuttaa myös peltier-elementin tehoon. Kuvassa 4 on Peltier-elementin rakenne, jossa näkyy useampi lämpöpari. Lämpöä imevä puoli eli jäähtyvä puoli on merkitty sinisellä ja kuumeneva puoli punaisella.

Peltier-elementin koon valinta

Peltier-elementin tarvittava teho saadaan kaavalla 7.

(7)

Q_{\max} on peltier-elementin maksimiteho
 Q on jäähdytettävän kohteen maksimi lämmöntuotto
 ΔT on tavoiteltava lämpötilaero peltier-elementin eri puolilla
 ΔT_{\max} on peltier-elementin puolien maksimi lämpötilaero, usein 70°C

(Thermoelectric Coolers FAQ 2014)

Mitä suurempaa lämpötilaeroa halutaan, sitä enemmän tehoa tarvitaan. Mikäli riittää että peltier pitää 20°C:n lämpötilaeron, saadaan 90 W:n lämpökuormalla peltier-elementin minimi vaatimukseksi 126W:n teholla toimiva peltier. Mikäli halutaan puristaa 40°C:n lämpötilaero, tarvitaan 90 W lämpökuormalla vähintään 210 W:n teholla toimiva peltier.

Kaavaasta 7 voidaan johtaa peltier-elementin tuottama lämpötilaero, jos tunnetaan sekä jäähdytettävän kohteen lämmöntuotto ja peltier-elementin teho.

$$\Delta T = \Delta T_{max} - \frac{Q * \Delta T_{max}}{Q_{max}} \quad (8)$$

Q_{max} on peltier-elementin maksimiteho

Q on jäähdytettävän kohteen maksimi lämmöntuotto

ΔT on tavoiteltava lämpötilaero peltier-elementin eri puolilla

ΔT_{max} on peltier-elementin puolien maksimi lämpötilaero, usein 70°C

2.4 Tehon hallinta

Peltier-elementin tehoa säädellään sen läpi kulkevan virran ja jännitteen suuruudella. Peltier-elementti kytketään sarjaan sitä ohjaavan komponentin kanssa. Peltier-elementti toimii parhaiten tasaisella virralla, mutta sitä voidaan ohjata myös PWM-ohjauksella.

Komponentin tuottama teho riippuu sen läpi kulkeman virran suuruudesta ja vastusarvosta, joka voidaan laskea kaavalla 9.

$$P = R * I^2 \quad (9)$$

P on komponentin teho

R on komponentin vastusarvo

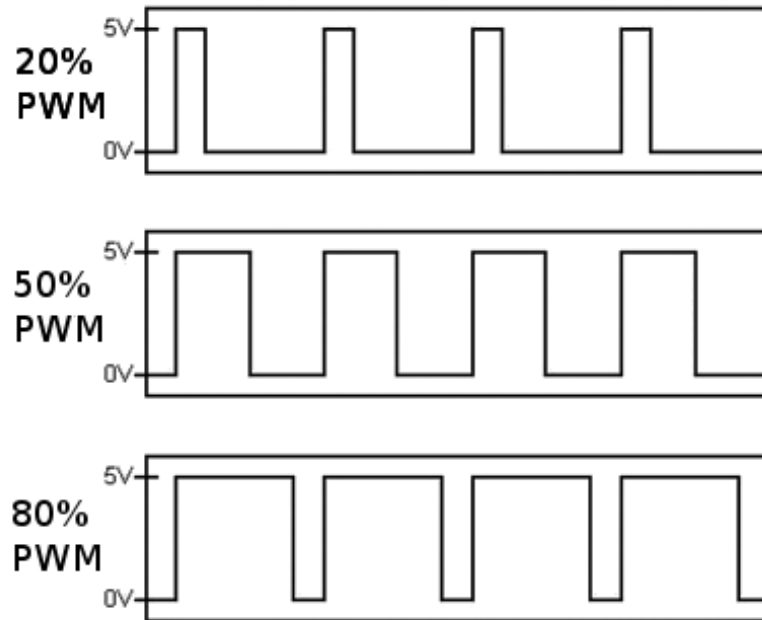
I on komponentin läpi kulkevan virran suuruus

Peltier-elementtiä voidaan ohjata kahdella eri tavalla, virran määrää muuttamalla tai syöttämällä tehoa vain osan ajasta. Virran suuruuden ohjauksessa täytyy ohitettava energia ohjata muualle. Tällöin peltier-elementtiä ohjaava MosFET kuumenisi merkittävästi. Peltier-elementti käyttäytyy normaalin vastuksen tapaan; tarjoamalla enemmän virtaa peltier toimii tehokkaammin.

PWM, Pulse Width Modulation

PWM-ohjauksessa ohjain on aina täysin päällä tai täysin pois. Tällöin ohjain kuumenee mahdollisimman vähän. Ohjaimen ollessa täysin päällä sen vastusarvo on lähellä nollaa, tällöin ohjain toimii lähinnä johtimena. Vaikka ohjaimen läpi kulkisi suurikin virta, se ei kuumene lähes lainkaan mikä johtuu vastusarvon pienuudesta.

Ohjaimen ollessa pois päältä sillä on erittäin suuri vastusarvo, joka vastaa katkosta virtapiirissä. Tällöin virtaa ei kulje lainkaan, jolloin myöskään ohjain ei lämpene. Kuva 5 kuvaa PWM-ohjausta. Jännitteen ollessa 5V ohjain on täysin päällä ja 0V jännitteellä ohjain on pois päältä.



Kuva 5. PWM-ohjauksen jännitteet eri PWM-suhteilla. (2/3 Throttle on 3s or WOT on 2s? 2010)

PWM-ohjauksella voidaan hallita kaikkia komponentteja, jotka käyttävät tasavirtaa. Esimerkiksi ledien himmennys toteutetaan myös PWM-ohjauksella. Kun ledin virtaa katkotaan sopivalla tahdilla ja suhteella, ihmissilmä ei näe sitä välkyntänä vaan ledin kirkkauden vähentymisenä. (Pulse-width modulation 2015, Controlling LED brightness using PWM 2010, Secrets of Arduino PWM 2009)

MosFET

Peltier-elementin tarvitsemaan suureen virtamäärään tarvitaan siihen kykenevä ohjain. MosFET-piirin avulla voidaan kytkeä pienellä ohjauksella suuriakin virtoja. Virtaa voidaan hallita myös tavallisella transistorilla, mutta MosFET soveltuu tehtävään paremmin. Tavallista transistoria ohjataan virran määrällä ja MosFET-piiriä jännitteellä. Tavallinen transistori tarvitsee jatkuvaa virran syöttämistä ja MosFET-piiri toimii kondensaattorin tavoin. MosFET piirin päästyä saturaatiotilaan putoaa tarvittava ohjausvirta käytännössä nolnaan. Projektissa tarvitaan ainoastaan virran nopeaa kytkentää, ja siihen MosFET-transistori on omiaan. MosFET-piirit tarjoavat saturaatiotilassa hyvin pienen vastusarvon, jolloin MosFET ei lämpene suurillakaan virroilla.

MosFET-transistoreita on kahta päätyyppiä, N- ja P. Käytännön erona N-tyyppinen MosFET kytkeytyy päälle, kun ohjauspinniin annetaan jännitettä. P-tyyppinen toimii täysin päinvastoin – siinä MosFET päästää oletuksena virran läpi, ja annettaessa ohjauspinniin jännitettä katkaisee yhteyden. N-tyyppinen MosFET on huomattavasti yleisemmin käytössä kuin P-tyyppinen. (Mosfet as a switch 2014)

2.5 Zigbee

Zigbee on langaton tiedonsiirtoverkko, joka noudattaa IEEE 802.15.4 standardia. Zigbee-verkko muistuttaa pitkälti Bluetoothia, mutta Zigbee-verkot sallivat maksimissaan jopa 65 536 laitetta Bluetoothin jäädessä tavallisesti kahden laitteen keskinäiseksi yhteydeksi. Bluetooth laitteet paritetaan keskenään, mutta Zigbee-verkoissa olevat laitteet liittyvät verkkoon verkkotunnuksen perusteella. Zigbeellä voidaan muodostaa monimutkaisiakin verkkoja.

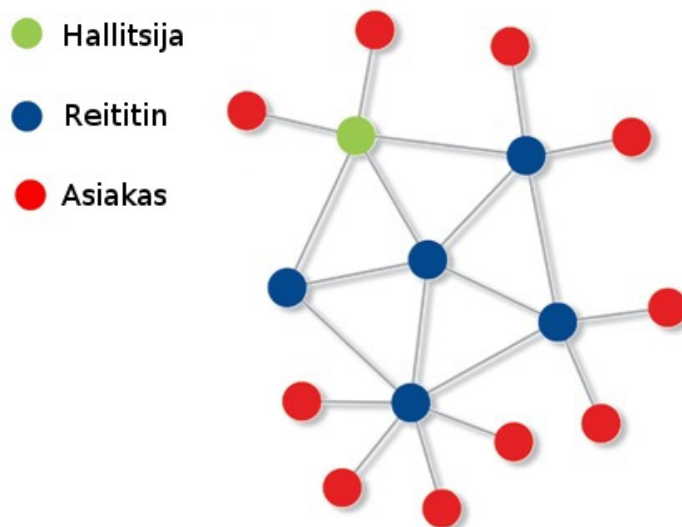
Zigbee-laitteet voivat toimia kahdessa eri tilassa – AT ja API. AT eli Application Transparent-tilassa moduuliin ohjelmoidaan suoraan vastaanottavan moduulin tiedot. Tällöin verkko kahden laitteen välillä on helppo ja suoraviivainen pystyttää, sillä se ei tarvitse moduuleja käyttäviltä laitteilta mitään erityistoimia. AT-tilassa laitteet näkevät suoraan toisensa, aivan kuin ne olisivat suoraan fyysisesti yhteydessä toisiinsa. API- eli Application Programming Interface-tilassa Zigbee-moduulit voivat lähettää tietoa mihin

tahansa verkon osaan, mutta tila vaatii Zigbee-moduulia käyttävältä laitteelta oman tuen.

Yksinkertaisin Zigbee-verkko on kahden laitteen välinen AT-verkko, jolloin toinen laitteista toimii verkon hallitsijana ja toinen päätelaitteena.

API-tilassa Zigbee-laitteet voivat toimia kolmella eri tavalla – Hallitsijana, reitittimenä ja päätelaitteina eli asiakkaana. Hallitsija määrää mitkä laitteet pääsevät verkkoon ja niitä joka verkossa on vain yksi. Reititin toimii nimensä mukaisesti tiedon välittäjänä, joka siirtää tietoa verkkolaitteiden välillä. Päätelaite on kaikista yksinkertaisin toiminnaltaan, ja se vaatii aina suoran yhteyden joko suoraan reitittimeen tai hallitsijaan. Hallitsijalla ja reitittimillä voi olla yksi tai useampi yhteys muihin verkon osiin, jolloin voidaan muodostaa hyvinkin monimutkaisia verkkoja.

API-tilassa oleva Zigbee-verkko voidaan liittää Internetissä sijaitsevaan pilveen Digi Internationalin valmistamalla ConnectPort-reitittimellä. Reititin hoitaa tiedon siirron Internetissä sijaitsevan pilven ja fyysisen Zigbee-verkon välillä. Reitittimen takana oleviin laitteisiin voidaan muodostaa yhteys samalla tavalla kuin fyysisesti läsnä oleviin laitteisiin. Reitittimen avulla voidaan muodostaa siltoja useissa eri sijainneissa olevien zigbee-verkkojen välille. Kuvassa 6 on kuvattu hieman monimutkaisempi API-tilassa oleva Zigbee-verkko.



Kuva 6. Esimerkki hieman monimutkaisemmasta Zigbee-verkosta (To ZigBee or Not to Zigbee 2009)

Zigbee verkon nopeus on 20 kbit/s – 250kbit/s riippuen käytettävästä taajuudesta. 868 MHz verkko kantaa kaikista parhaiten mutta on samalla myös kaikista hitain ja 2,4 GHz verkko on kaikista nopein, mutta samalla myös verkon kantavuus kärsii. Zigbee-verkon rakennevaihtoehdoista johtuen soveltuu se mainiosti anturiverkkojen rakentamiseen.

API-tilassa oleva Zigbee-verkko muistuttaa IP-verkkoa. API-tilassa Zigbee-verkossa liikkuu paketteja, joissa on lähettävän ja vastaanottavan Zigbee-moduulin osoite.

3 Ohjaimen prototyyppi

3.1 Jäähdytettävä laite

Jäähdytettäväksi kohteeksi päätin kokeilla vanhaa tietokonetta, jossa on seuraavat osat.

- Emolevy Asus M2N-CM DVI
- Prossessori AMD Athlon 64 x2 5000+, TDP 65 W
- Muisti 1 Gt DDR2, 800MHz
- Jäähdytyssiili Zalman CNPS10X Extreme

(Datasheet, AMD Athlon 64 x2 5000+ 2014)

3.2 Komponenttien valinta

Peltier-elementti

Peltier-elementiksi valitsin Elfa distelectricistä saatavilla olevan suurimman mahdollisen järkihintaisen Peltier-elementin, jonka tärkeimmät tiedot ovat:

- Elfa osanumero 75-661-77
- Valmistaja ja malli Laird PE-127-14-11-S
- Siirrettävä lämpömäärä Q
- Siirtyvä lämpö Q_{\max} 89W
- Käyttöjännite 15.7V
- Maksimi lämpötilaero ΔT_{\max} 72°C
- Koko 40mm x 40mm x 3.8mm

(Datasheet, PE-127-14-11-S 2010)

Sijoittamalla kaavaan 8 käytetyn prosessorin tuottaman lämpömäärän eli Q :n, Peltier-elementin maksimi lämpötilaeron ja Peltier-elementin maksimi lämmönsiirtomäärän, voidaan laskea Peltier-elementin kuuma ja kylmälevyjen lämpötilaero.

$$\Delta T = \Delta T_{\max} - \frac{Q * \Delta T_{\max}}{Q_{\max}}$$

$$\Delta T = 72 - \frac{65 * 72}{89} = \frac{1728}{89} \approx 19^{\circ}\text{C}$$

Valittu Peltier-elementti pystyy puristamaan täydellä teholla kuuman- ja kylmänpuolen lämpötilaeroksi noin 19°C.

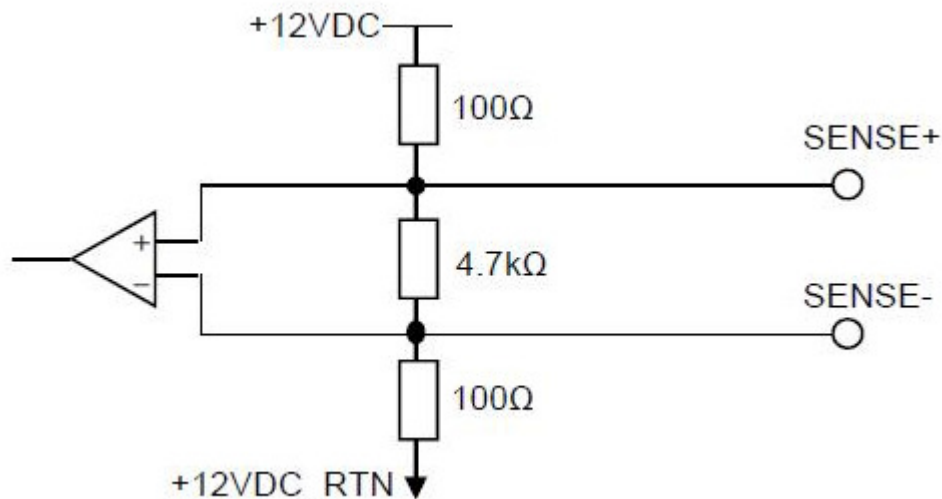
Peltier-elementin virtalähde

Peltier-elementti tarvitsee oman virtalähteensä, sillä normaalista tietokoneen virtalähteestä ei saa Peltier-elementin tarvitsemaa jännitettä. Säädetty laboratoriovirtalähde toimisi mainiona testilähteenä mutta ne ovat erittäin kalliita.

Prototyypin päädyin hankkimaan sopivan käytetyn virtalähteen eBay-verkkokaupasta. Virtalähteen tärkeimmät tiedot ovat:

- Valmistaja ja Malli Dell AA23300
- Virtalähteen teho +12 V, 44.5 A, 550 W

Kyseisen virtalähteen erikoisuutena on sen 12 V linjan säätömahdollisuus 12 - 14,3 V välillä ulkoisella trimmerillä. Trimmeri käyttää hyödyksi virtalähteen omaa 12 V säätömahdollisuutta joka normaalisti on yhteydessä maahan, mutta kun yhteys onkin hieman korkeampaan potentilaaliin - virtalähteen 3,3 V linjaan - saadaan jännitettä korotettua hieman virtalähteen 14,4 V ylijännitesuojan alle. Jännitettä korottamalla saadaan peltier-elementistä enemmän tehoa irti. Kuvassa 7 on kuvattu virtalähteen 12 V linjan muokattu seurantavirtapiiri.



Kuva 7. Jännitesäädön kytKentä (Simple High Quality 12Volt 100Amp Power Supply 2012)

Peltier-elementtiä ohjaava MosFET

Ensimmäiseen yritykseen valitsin Elfa-distelectriciltä suurimman mahdollisen MosFET-piirin, jota voidaan ohjata suoraan mikroprosessorilta, eli logiikkatason piirin. Logiikkatason MosFETin valinnalla saadaan piiristä mahdollisimman yksinkertainen. Valitun MosFET-piirin tärkeimmät tiedot ovat seuraavat:

- Elfa osanumero 71-396-37
- Valmistaja ja malli IR IRLU8743PBF
- Maksimi jännite V_{max} 30 V
- Maksimi virta I_{lim} 160 A
- Vastusarvo R_{DS} 3.1 m Ω
- Maksimi lämmöntuotto P_{tot} 135 W

(Datasheet, IRLU8743PBF 2013)

Piirin avuksi valitsin Elfa-distelectriciltä kaveriksi piirille myös siihen sopivan pienen jäähdetyssiilin. Laskennallisesti piirin ei pitäisi kuumentua käytännössä lainkaan, sillä suurimmalla prototyypissä esiintyvässä virtamäärällä piiri hukkaa alle 1W:n edestä tehoa.

MosFET-piirin tietojen perusteella sen pitäisi kestää suuriakin virtoja. Ensimmäisissä testeissä henkilöautoista tutun E7-lampun 50W:n kuorman kanssa valittu MosFET-piiri kuumeni kuitenkin hallitsemattomasti, tuhoutuen täysin. Testissä olleet virtalähteen maataso ja ohjaimen maataso olivat erillään. Tällöin isolla kuormalla MosFET-piiri ei todennäköisesti kytkeytynyt päälle ihan täydellisesti, jolloin MosFET-piiri synnytti hukkalämpöä merkittävästi.

Toiseen yritykseen valitsin Elfa-distelectriciltä suurimman mahdollisen TO-220 koteloidun MosFET-piirin, jolloin MosFET-piiriin voitiin liittää paljon suurempi jäähdetyssiili. Uuden MosFET-piirin tärkeimmät tiedot ovat:

- Elfa osanumero 73-796-85
- Valmistaja ja malli ST VNP35N07
- Maksimi jännite V_{max} 18 V

- Maksimi virta I_{lim} 35 A
- Vastusarvo R_{DS} 28 m Ω
- Maksimi lämmöntuotto P_{tot} 120 W

(Datasheet, VNP35N07 2004)

Piiri tarvitsee varmuudeksi myös jäähdytys­siilen, jotta piiri pysyy mahdollisimman viileänä suuressakin kuormassa. Valitun jäähdytys­siilen tärkeimmät tiedot ovat:

- Elfa osanumero 75-593-62
- Valmistaja Fischer Elektronik
- Malli SK 75/ 37,5/ SA 220
- Terminen resistanssi R_{th} 10 K/W

(Datasheet, SK 75/ 37,5/ SA 220 2014)

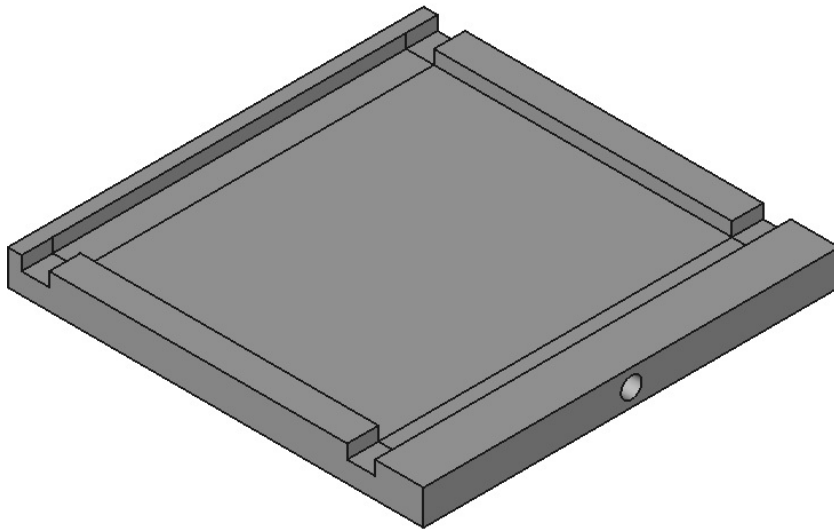
NTC-thermistorin eli lämpöanturin tärkeimmät tiedot ovat:

- Elfa osanumero 60-260-41
- Valmistaja BC Components
- Malli 2381 640 63103
- Resistanssi @ 25°C R_{25} 10k Ω
- Steinhart-Hart vakiot
- $A1$ 3.354016E-03
- $B1$ 2.569850E-04
- $C1$ 2.620131E-06
- $D1$ 6.383091E-08

(Datasheet, NTCLE100E3 2012)

Kylmä- ja kuumalevy

Jotta Peltier-elementin molempien puolien lämpötilaa voidaan valvoa, tarvitaan peltier-elementin molemmille puolille metallista valmistetut välikappaleet jotka samalla tasaavat lämpötilan vaihteluja. Levy on nimeltään kuumalevy kun levy on sijoitettu peltier-elementin kuumenevalle puolelle ja kylmälevy kun levy sijaitsee peltier-elementin jäähtyvällä puolella. Kuvassa 8 on FreeCad-sovelluksella piirretty mallinnus kylmä/kuumalevystä, jossa näkyy myös NTC-thermistorin eli lämpöanturin sijoituspaikka.



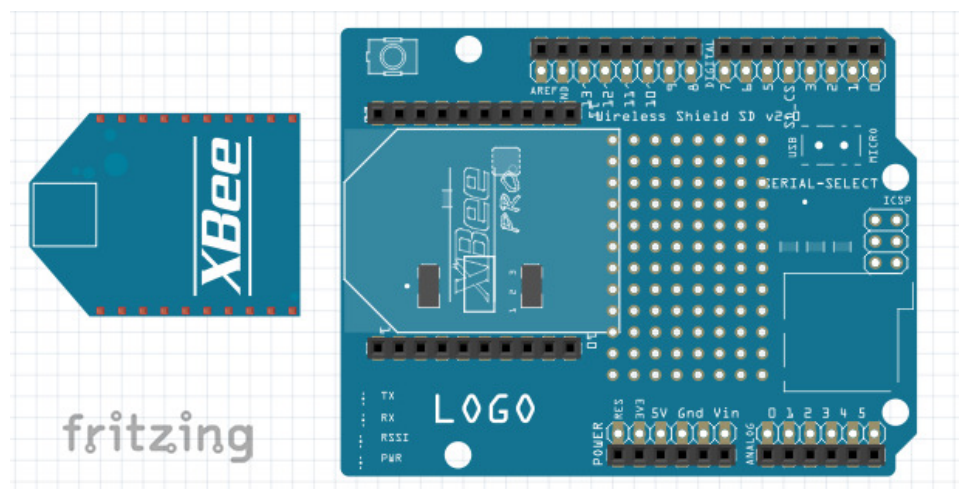
Kuva 8. Kylmä/kuumalevy, jonka syvennykseen peltier-elementti tulee ja päätyyn NTC-thermistori.

Toinen, mutta merkittävästi vaikeampi keino valvoa peltier-elementin lämpötilaa on kiinnittää pienukainen NTC-thermistori suoraan peltier-elementin sisälle. Jälkikäteen tämä on kuitenkin hyvin vaikea toteuttaa, joten päädyin toiseksi parhaaseen tapaan seurata lämpötilaa, eli itsetekoiseen kylmä/kuumalevyyn.

Kylmä/kuumalevystä piirsin FreeCad-sovelluksella ensin mallin, josta sitten teetin koekappaleet alumiinista. Alumiini on prototyyppiin hyvä valinta, sillä se on edullista, helposti työstettävää ja johtaa hyvin lämpöä.

Arduino Uno ja Zigbee-moduuli

Varmin tapa liittää Zigbee-yhteensopiva moduuli Arduino Uno on Xbee Shield. Xbee shield tarjoaa valmiin pohjan mihin Zigbee-moduuli tarvitsee vain asentaa. Zigbee-moduulit eivät ole suoraan yhteensopivia Arduino Unon kanssa, sillä Arduino Uno käyttää 5 V sarjaliikennettä ja Zigbee 3,3 V. Xbee-shieldissä on oma elektroniikka, joka huolehtii jännitteen muunnoksesta ja mahdollistaa myös Zigbee-moduulin ohjelmoinnin suoraan tietokoneella dip-kytkintä kääntämällä. Kuvassa 9 on Fritzing-ohjelmistoon mallinnettu Xbee/Zigbee shield. (Arduino XBee shield 2014)



Kuva 9. Xbee shield ja Xbee/Zigbee-moduuli.

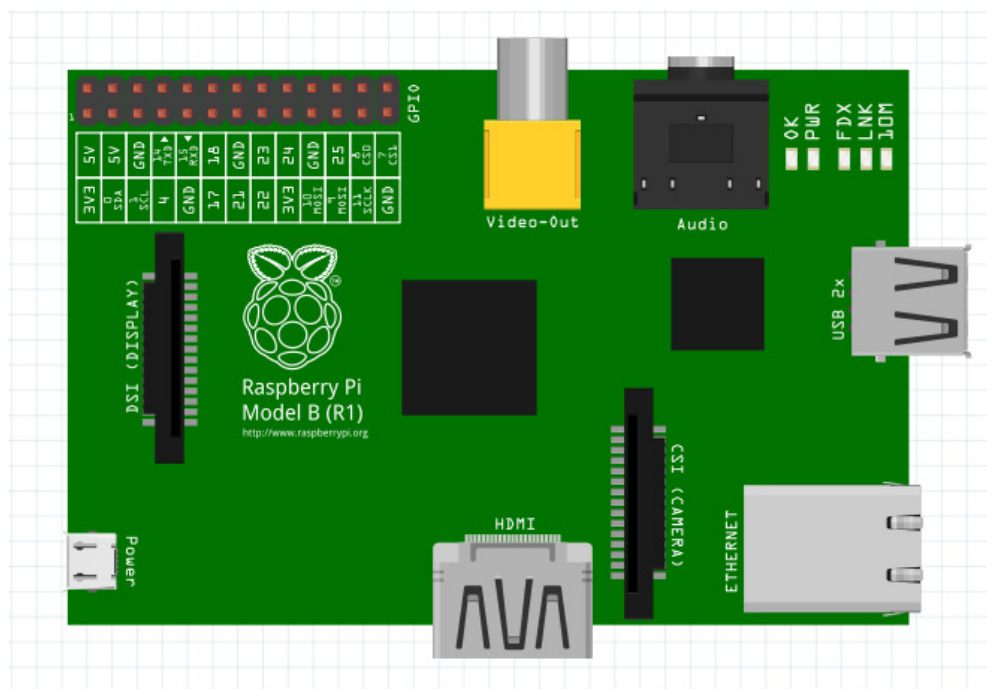
Jäähdytyksen valvonta, Raspberry Pi

Tietojen keruuta ja tallennusta hoitaa Raspberry Pi -tietokone, johon on liitetty oma Zigbee moduuli joka toimii samalla verkon hallitsijana. Zigbee-verkon avulla yksi Raspberry Pi voi hoitaa useidenkin jäähdytysohjaimien tietojen tallentamisen langattomasti. Tämän projektin Zigbee-verkko on yksinkertainen kahden laitteen välinen AT-verkko. Useampien laitteiden lisääminen verkkoon onnistuu lisäämällä asiakaslaitteita jotka ottavat yksisuuntaisen yhteyden suoraan verkon hallitsijaan. Laajennetun verkon saisi muodostamalla API-verkon, mutta tämä vaatii lisää ohjelmointia molempiin päihin.

Raspberry Pi on noin luottokortin kokoinen täysiverinen tietokone, jossa kaiken keskuksena toimii Broadcomin SOC- eli System On Chip -piiri. SOC-piirin sisälle on

integroitu keskusmuisti, näytönohjain ja prosessori pieneen tiukkaan pakettiin. Raspberry Pi:ssä pyörii käyttöjärjestelmänä muistikortilta ajettava Rasbian Linux.

Rasbian Linux on Debian Linuxiin pohjautuva ilmainen käyttöjärjestelmä, joka on optimoitu juuri Raspberry Pi:lle. Raspberry Pi:ssä on liitännäismahdollisuudet moneen eri käyttötarkoitukseen – mutta tässä projektissa Raspberryn Pi:n tehtäväksi tulee kerätä, käsitellä ja tallentaa jäähdytyksen ohjaimelta tulevaa tietoa. Kuvassa 10 on fritzing-ohjelmiston mallinnus Raspberry Pi-tietokoneen piirilevystä.

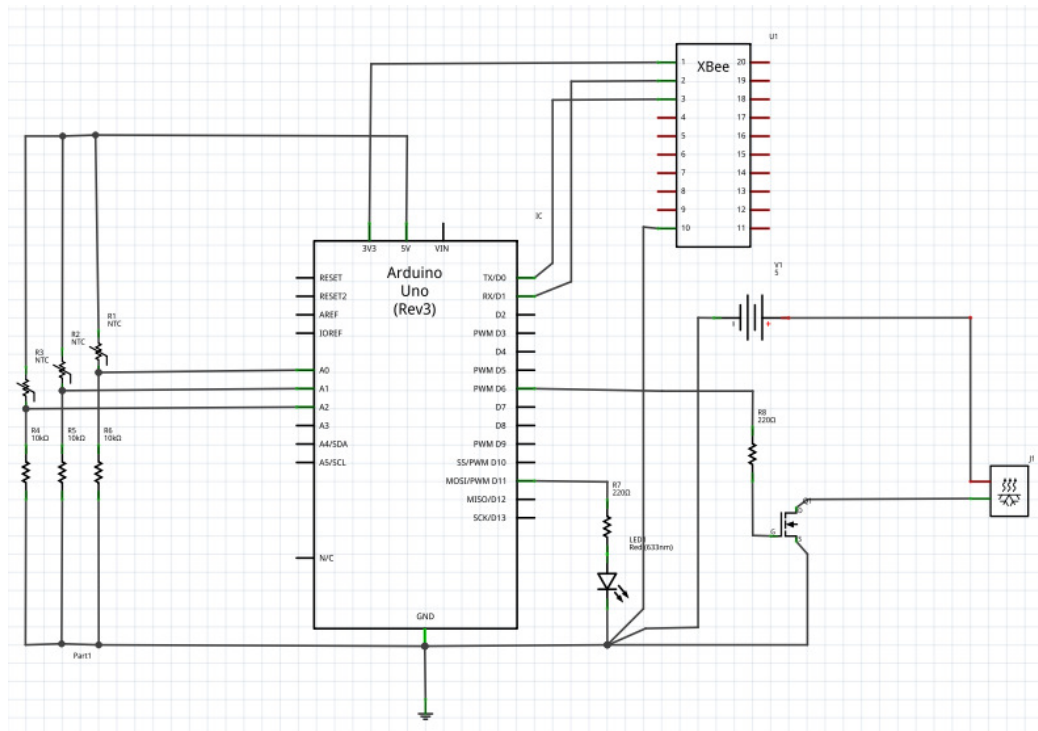


Kuva 10. Raspberry Pi (Raspberry Pi 2015)

Tietojen tallennukseen tulen käyttämään omakirjoittamaa ohjelmaa, joka lukee Zigbee-verkosta tulevaa tietoa ja tallentaa sen rrdtool-tietokantaan. Rrdtool-työkalua kutsutaan ajamalla suoraan itse rrdtool-ohjelmaa. Rrdtool sopii tarkoitukseen mainiosti, sillä se on suunniteltu juuri ajan mukaan muuttuvien tietojen tallentamiseen erittäin tiiviisti.

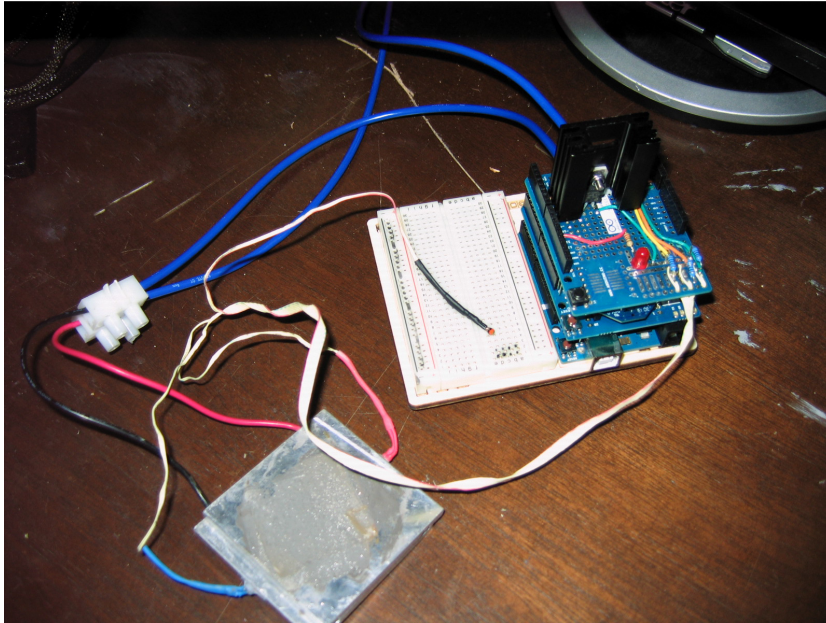
RRDTool-tietokannoista voidaan tulostaa myös omat raportit miltä tahansa tietokannassa olevasta ajankohdasta.

3.3 Jäähdytyksen ohjain



Kuva 11. Kytentäkaavio

Kuvan 11 kytentäkaaviossa ovat jäähdytyksen ohjaimen osat sekä osien väliset kytennät. Kuvan keskellä on itse ohjaimen sydän, Arduino Uno. Kytentäkaaviossa näkyy myös led-valo, jolla jäähdytyksen ohjauksen tilaa voi seurata myös silmämääräisesti. (High-Power Control: Arduino + N-channel MosFET 2012, Using NTC Thermistors with Arduino 2013)



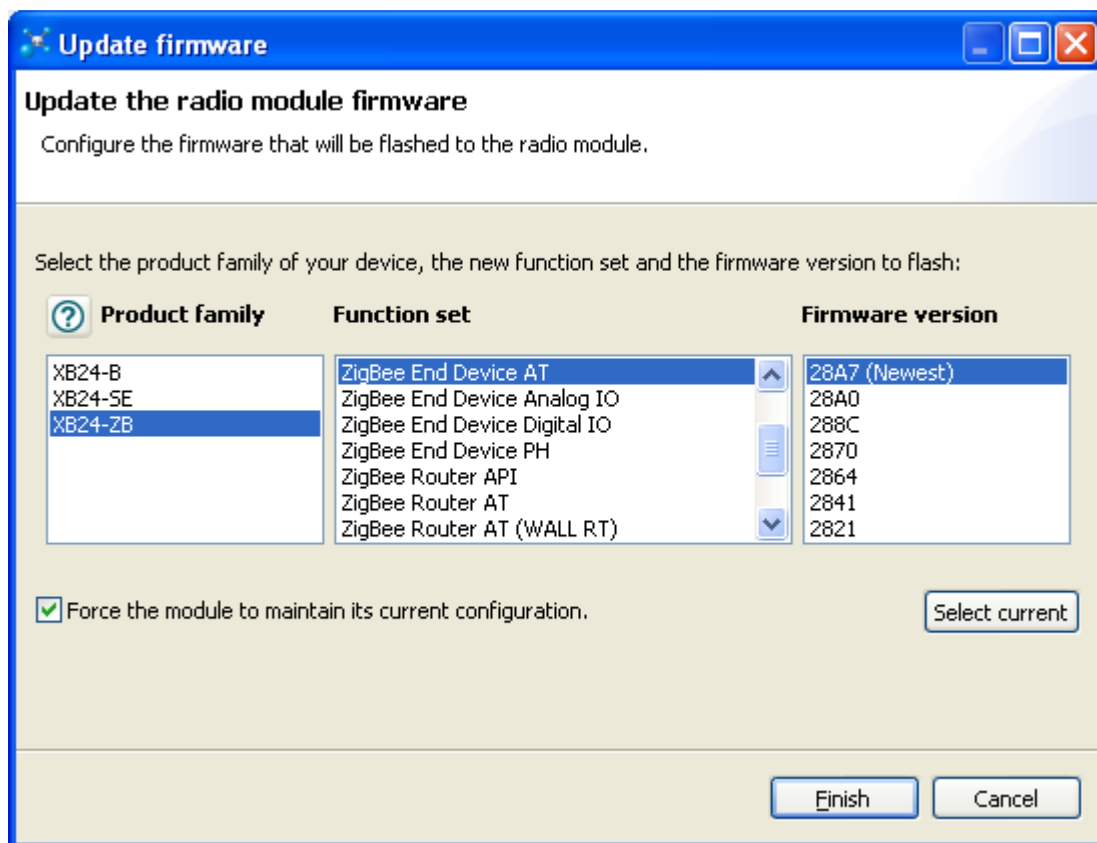
Kuva 12. Jäähdytyksen ohjaimen prototyyppi kasattuna ja toimitavalmiina

Kuvassa 12 on esillä kylmä- ja kuumalevyjen sisällä oleva peltier-elementti, lämpötilanturit, itse ohjain sekä hieman piilossa oleva Zigbee-moduuli. Peltier-elementtiä syöttävä virtalähde on kuvan ulkopuolella sinisten johtojen päässä.

3.4 Yksinkertaisen Zigbee-verkon rakentaminen

Jäähdytyksen ohjaimen prototyypin testaukseen riittää yksinkertainen kahden laitteen Zigbee-verkko, jossa Raspberry Pi:hin yhteydessä oleva moduuli toimii verkon hallitsijana ja Arduino Uno:on yhteydessä oleva Zigbee-moduuli toimii verkon asiakkaana.

Arduino Unossa oleva Zigbee-moduuli on Xbee S2 -sarjaa, joka on Zigbee-moduuleiden kevyestä päästä. Kevyessä Zigbee-laitteessa firmware eli laiteohjelmisto määrää laitteen kyvyt, sillä laitteessa oleva muistinmäärä ei yksinkertaisesti riitä kaikille toiminnoille. Firmware ohjelmoidaan Digi International yhtiön X-CTU-ohjelmistolla Zigbee-moduuliin.



Kuva 13. Arduino Uno:on yhteydessä olevan Zigbee-moduulin firmwären ohjelmointi

Kuvassa 13 on X-CTU-ohjelmiston käyttöliittymä Zigbee-moduuliin valittavasta firmwaresta. Pitkästä listasta valitaan pystyttävään kevyeen verkkoon sopivin joka on Zigbee End Device, eli päätelaite/asiakas ohjelmisto. Raspberry Pi:hin yhteydessä oleva Zigbee-moduuli on jo raskaampaa ja uudenpaa Xbee S2C-sarjaa, jossa kaikki toiminnot ovat yhdessä laiteohjelmistossa.

Seuraavana vuorossa on itse moduuleiden asetusten määrittäminen. Asetukset voidaan määrittää käsin suoraan konsolista tai X-CTU-ohjelmiston avulla. Käsin asetusten määrittäminen on hieman hitaampi keino, sillä jokainen komento täytyy kirjoittaa käsin. Jos komennot kirjoittaa ensin muistioon ja sieltä kopioi komennot suoraan konsoliin, tulevat ne liian nopealla tahdilla Zigbee-moduulille. Jokaisen komennon jälkeen täytyy odottaa Zigbee-moduulin kuittaus komennon onnistumisesta. X-CTU-ohjelmistosta on kaksi eri versiota: perus X-CTU joka on käyttöliittymältään sekava, ja uudempi mutta epävakaa X-CTU-NG. (Configuring XBee Radios with X-CTU 2014)

Zigbee-moduulin tärkeimmät asetukset ja niiden vaihtoehdot ovat:

- +++ Konfiguraatiotila eli asetusten määrittystila
- ATAP API –tila päälle/pois 1 / 0
- ATBD Sarjanopeus 0 - 7
- ATCE Hallitsijatila päälle/pois 1 / 0
- ATCN Konfiguraatiotilasta poistuminen
- ATDH Kohdelaitteen ylempi sarjanumero
- ATDL Kohdelaitteen alempi sarjanumero
- ATID Verkon ID 0-FFFF
- ATSH Laitteen ylempi sarjanumero
- ATSL Laitteen alempi sarjanumero
- ATWR Tallentaa tehdyt asetukset

(XBee Zigbee Howto 2012, XBee/XBee-PRO ZB (S2) Modules 2014, Basic XBee ZB ZigBee (Series 2) Chat 2014)

Kaikkien verkossa olevien laitteiden täytyy käyttää samaa verkkotunnusta ja sarjanopeutta.

ATBD-komento määrää laitteen käyttämän sarjanopeuden. Vaihtoehtoina ovat nopeudet 1200, 2400, 4800, *9600*, 19200, 38400, 57600 ja 115200. Oletuksena Zigbee-moduulit käyttävät nopeutta 9600 eli arvoa 3.

Kaikki Zigbee-laitteet eivät tue komentoa ATCE eli Coordinator Enable. ATCE:llä kytketään päälle moduulin hallitsijatila.

Kahden laitteen Zigbee-verkossa laitteiden ylempi ja alempi sarjanumero eli ATSH ja ATSL annetaan vastapuolen Zigbee-moduuliin vastaaviin paikkoihin – ATDH ja ATDL. Sarjanumeroiden avulla laitteet osaavat lähettää tietonsa siten oikeaan suuntaan.

Valitsin seuraavat asetukset kevyempään Arduino Unossa olevaan Zigbee-moduuliin:

- ATID 2014
- ATDH 0013A200
- ATDL 4093BB4F

Seuraavat asetukset valitsin Raspberry Pi:ssä olevaan moduuliin

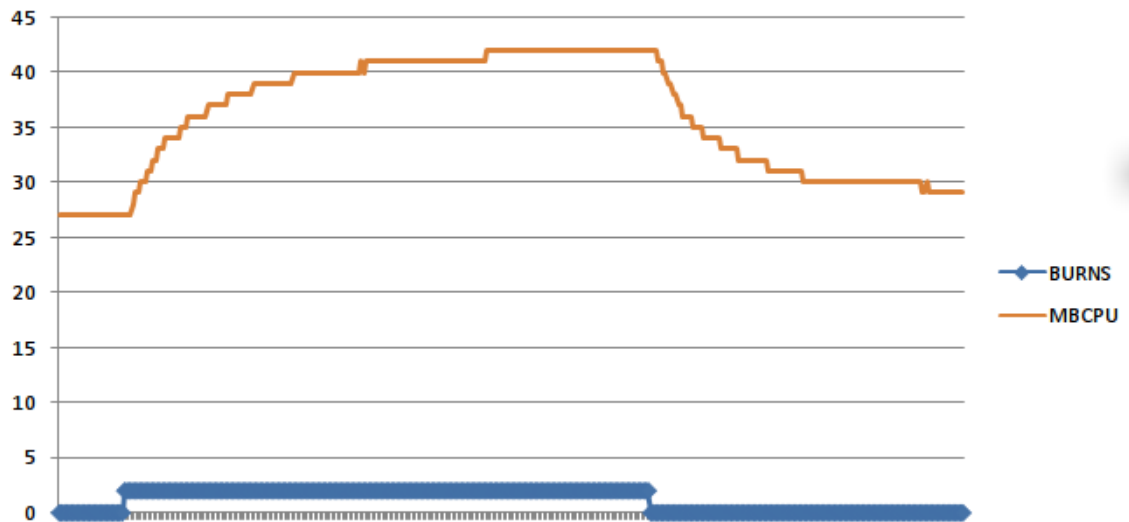
- ATID 2014
- ATDH 0013A200
- ATDL 40AD612F

Hieman asetusten tallentamisen jälkeen moduulit löysivät toisensa ja tiedonsiirto alkoi.

4 Prototyypin testaaminen

Jäähdytystä testattiin käynnistämällä tietokone SystemRescueCD-työkalulla. SystemRescueCD on CD-levyltä ajettava pieni Linux, joka on parhaimmillaan juuri laitteiston toimivuuden kokeiluissa. SystemRescueCD:llä on monia työkaluja, mukaanlukien suoritinta rasittava burnK7-ohjelma. Testaamisen aikana Arduino Uno tallenti kuumalevyn lämpötilaa, kylmälevyn lämpötilaa, huoneen lämpötilaa ja PWM-ohjauksen suhdetta. Tiedot yhdistettiin emolevyn antureiden tietoihin ja tallennettiin sekunnin välein. Lämmönsiirron maksimoimiseksi eri osien välillä käytän Arctic Silver 5 tahnaa eri elementtien välissä.

Ensimmäisessä kokeilussa pelkkä ilmajäähdytys – Arduino tallentaa pelkkää huoneen lämpötilaa, joka on noin 23°C. Prosessoria kuormitetaan kunnes prosessori saavuttaa korkeimman lämpötilansa. Testissä suoritinta kuormitettiin noin neljä minuuttia, koko testin kestäessä noin kuusi minuuttia.



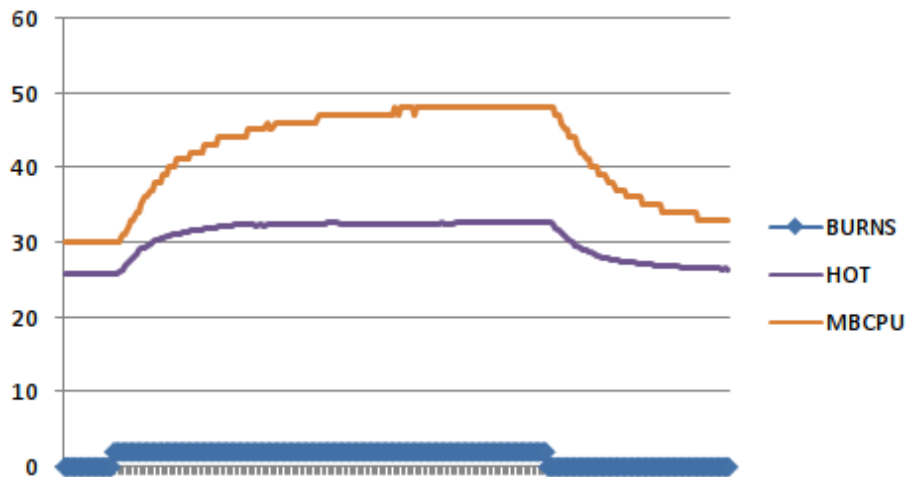
Kuvio 1. Suorittimen lämpötila pelkällä ilmajäähdyksellä

Kuviossa 1 olevien merkintöjen tarkoitukset ovat:

- Burns Suoritinta rasittavien ohjelmien lukumäärä
- MBCpu Emolevyn mittaama suorittimen lämpötila

Ennen suorittimen kuormittamista, suoritin on noin 27°C:n lämpötilassa. Kuormituksen alettua suoritin käy pahimmillaan noin 42 °C:n lämpötilassa.

Toisessa kokeilussa suorittimen ja jäähdyttimen välissä on pelkkä kuumalevy tallentamassa lämpötilaa ja testaamassa itse kuumalevyn käyttäytymistä. Testissä suoritinta kuormitettiin noin kolme minuuttia ja testi kesti noin viisi minuuttia. Kokeilun mittaustiedot ovat kuviossa 2.



Kuvio 2. Lämpötilakäyttäytyminen ilman peltier-elementtiä, kuumalevyn kanssa.

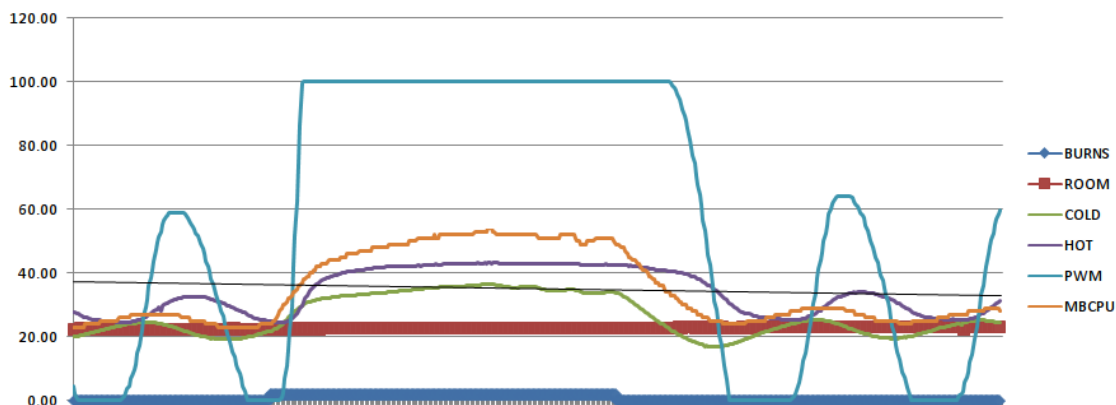
Kuviossa 2 olevien merkintöjen tarkoitukset ovat:

- Burns Suoritinta rasittavien ohjelmien lukumäärä
- Hot Suorittimen ja jäähdyttimen välissä oleva hotplaten lämpötila
- MBCpu Emolevyn mittaama suorittimen lämpötila

Ennen rasiustestin alkamista suoritin on noin 30°C:n lämpötilassa. Rasituksen alkaessa suoritin kerää hiljalleen huippulämpötilansa, joka on emolevyn anturin mukaan 48°C. Testin alettua ilmenee, että kuumalevyssä oleva lämpötila-anturi ei pääse missään vaiheessa lähelle emolevyn ilmoittamia lukemia. Lämpötilaero selittyy pitkästi antureiden sijoituksella – emolevy käyttää suoraan suorittimen omia ytimen yhteydessä olevia antureita ja kuumalevyssä sijaitseva anturi on melko kaukana. Kuumalevy käy noin parhaimmillaan 32°C:n lämpötilassa.

Testi paljasti, että kuumalevy itsekin on hieman heikko johtamaan lämpöä. Parempiin tuloksiin päästäisiin ohuemmalla kuumalevyllä, mutta silloin ongelmaksi muodostuu lämpötilan johtuminen reunoille, josta itse kuumalevyn lämpötila mitataan. Kuumalevyn läsnäolo heikentää jäähdytystä miltei 6°C:n verran. NTC-termistorin voisi sijoittaa myös keskelle kuumalevyä, mutta tällöin kuumalevystä tulisi paksumpi. Toinen vaihtoehto kuumalevyn parantamiseen on koko NTC-termistorin vaihtaminen merkittävästi pienempään, jolloin kuumalevystä tulisi myös ohuempi. Kolmas keino kuumalevyn parantamiseen olisi valmistuttaa kuumalevy kuparista, mutta kupari on työläämpää työstettävää ja kallista alumiiniin nähden.

Kolmanteen testiin suorittimen päälle tulee ensin kylmälevy, kylmälevyn päälle peltier-elementti, peltier-elementin päälle kuumalevy ja kuumalevyn päälle itse jäähdytyslaite. Testi kesti noin seitsemän minuuttia ja suorittinta kuormitettiin noin kaksi minuuttia.



Kuvio 3. Lämpötilakäyttäytyminen peltier-elementin kanssa sekä peltier-elementin molemmilla puolilla levyt.

Kuviossa 3 olevien merkintöjen tarkoitukset ovat:

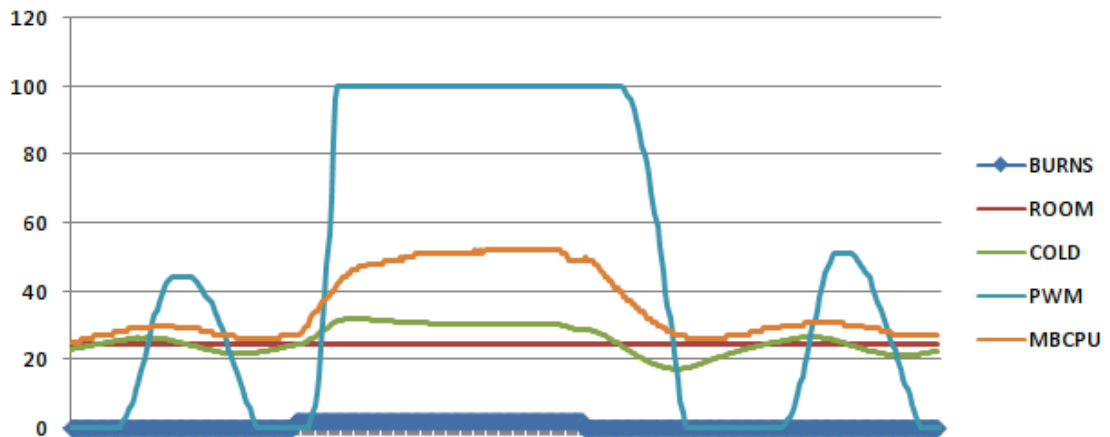
- Burns Suorittinta rasittavien ohjelmien lukumäärä
- Room Testaamisen aikana vallitseva huoneen lämpötila, noin 23°C
- Cold Kylmälevyn lämpötila peltier-elementin kylmällä puolella
- Hot Kuumalevyn lämpötila peltier-elementin kuumalla puolella
- PWM Peltier-elementin ohjaus prosentteina
- MBCpu Emolevyn mittaama suorittimen lämpötila

Ennen suorittimen kuormittamisen aloittamista näkyy kuviossa uusi ilmiö – jäähdytyksen ohjaus huojuu hieman yli puoleenväliin ja taisin nolnaan. Tämä johtuu peltier-elementin ohjaustavasta. Peltier-elementti toimii lähinnä eristeenä, ellei sille tarjota yhtään virtaa. Kylmälevy käy pahimmillaan 36°C:n lämpötilassa ja kylmimmillään 17°C:n lämpötilassa.

Kuormituksen aikana suoritin kuumenee pahimmillaan jopa 54°C:n lämpötilaan, häviten pelkälle ilmajäähdytykselle jopa 12°C:n erolla. Eroa synnyttävät sekä kuuma- että kylmälevyjen olemassaolo. Peltier-elementin teho sille syötetyllä 14,3 V jännitteellä oli myös hienoinen pettymys. Peltier-elementtiä syöttävä virtalähde otti verkosta noin 140

W tehoa, joka mitattiin pistorasiaan asennetulla mittarilla. Mittarina käytettiin Avecin valmistamaa FHT-9999-energiankulutusmittaria, jolla saadaan edes suuntaa-antavat kulutuslukemat. Jäähdytyksen seurannan hitaudesta johtuen suorittimen lämpötila käy hetkellisesti hieman huoneen lämpötilan alapuolella.

Neljännessä kokeessa poistettiin kuumalevy pois peltier-elementin päältä. Tällöin peltier-elementti jäähtyy suoraan jäähdytyssiileen. Kokeen tulokset ovat kuviossa 4.



Kuvio 4. Lämpötilakäyttäytyminen ilman kuumalevyä

Testin aikana suoritin käy parhaimmillaan 52°C:n lämpötilassa. Lämpötilaero kuumalevyn kanssa on vain 2°C, eli kuumalevyn välissä oleminen ei merkittävästi heikennä peltier-elementin suorituskykyä. Kuvioista 4 näkyy sama ohjauksen vaihtelu kuin edellisessä testissä. Kylmälevy käy pahimmillaan 32°C:n lämpötilassa ja kylmimmillään 17°C:n lämpötilassa.

Viimeisessä kokeessa kokeilin peltier-elementtiä suoraan ilman mitään ohjausta ja ilman kuuma- ja kylmälevyjä. Ensimmäinen yritys keskeytyy ennen aikojaan tietokoneen omatoimiseen sammumiseen. Suorittimen ympärillä näkyi pieni kerros nestettä, joka on kerääntynyt erittäin kylmän suorittimen takia. Suorittimen sisäiset anturit antoivat hieman ennen sammumista -20°C:n lämpötilalukemia. Suorittimen ja peltier-elementin reunoilta löytyi sammumisen todellinen syy – vesi. Kylmät pinnat keräsivät muutamassa hetkessä riittävästi kosteutta, joka aiheutti tietokoneen enneaikaisen sammumisen. Kuvassa 14 näkyy suorittimen raportoimat lämpötilat peltier-elementin toimiessa täydellä voimalla.

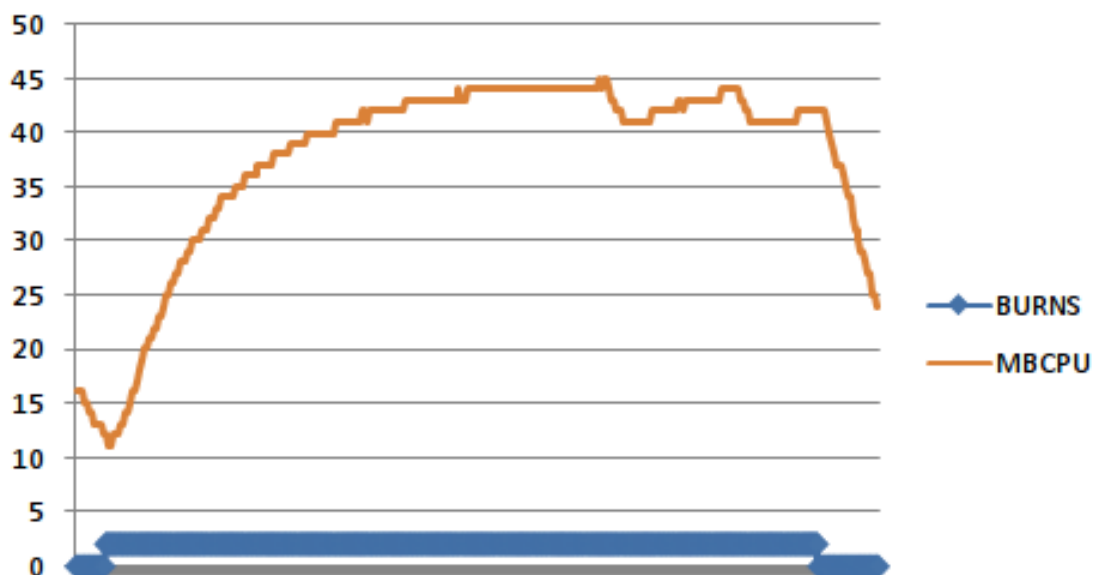
```

k8temp-pci-00c3
Adapter: PCI adapter
Core0 Temp:   -18.0°C
Core0 Temp:   -26.0°C
Core1 Temp:   -21.0°C
Core1 Temp:   -5.0°C

```

Kuva 14. Suoritin lepotilassa peltierin jäähdyttäessä täydellä teholla

Toiseen yritykseen käynnistin suorittinta kuormittavat ohjelmat ennen varsinaista mittausta estäen suorittimen liiallisen kylmenemisen ja kokeen keskeytyksen ennenaikaisesti uudelleen. Kun tilaa tallentavat ohjelmat olivat valmiina lähtöön, suljin suorittinta kuormittavat ohjelmat ja odotin lämpötilojen hieman laskevan.



Kuvio 5. Suorittimen lämpötila pelkän peltier-elementin kanssa

Kuviossa 5 on mittaustulokset pelkän peltier-elementin kanssa. Kuvoista 5 näkee selvästi, että suoritin lähtee rasitustestiin huoneilmaa kylmemmästä lämpötilasta. Huoneilman lämpötila oli testin aikana noin 23°C. Ensimmäisestä ennenaikaisesta

sammumisesta käy jo ilmi, että peltier-elementti ei saa olla yksin ilman minkäänlaista lämpötilan hallintaa. Kylmyys aiheuttaa kosteuden kerääntymistä, mikä taas saattaa pahimmillaan rikkoa laitteet.

Tietokoneen prosessorin omilla sisäisillä antureilla suorittimen lämpötila kuormituksen jälkeen jäähtyi pitkästi pakkasen puolelle -25°C :n tuntumaan. Kuormituksen aikana suorittimen lämpötila käy pahimmillaan 45°C :n lämpötilassa. Peltier-elementin tavoite oli saada pidettyä suoritin noin huoneen lämpötilassa. Ilmajäähdytykseen verrattuna valittu peltier-elementti häviää täydellä teholla noin 3°C .

5 Yhteenveto

Zigbee-verkon rakentaminen on helppo toimenpide, mikäli käytettävät moduulit vastaavat toisiaan. Hieman erilaisten moduuleiden yhteystyökin onnistui heti, kun uudempi ja raskaampi moduuli määrättiin hallitsemaan verkkoa.

Testeissä esiin tulleista ongelmista huolimatta näkyy tunnelin päässä valoa. Peltier-elementtiä voidaan siis helposti hyödyntää myös prosessorin jäähdytyksessä. Peltier tarvitsee ehdottomasti avukseen lämpötila-anturin, joka olisi mahdollisimman keskellä jäähdytettävää kohdetta. Tällöin lämpötilan seuranta on kokeiltua tapaa merkittävästi nopeampaa ja tarkempaa.

Kokeiluissa olleen peltierin käyttöjännite jäi hieman peltierin suositellun jännitteen alapuolelle, josta myös selittyy peltier-elementin tehottomuus. Testeissä peltier-elementille tarjottiin 14,3 V, 15,7 V ollessa tavoite. Pelkällä jännitteen puuttumisella peltier toimi todennäköisesti noin 92%:lla kapasiteetistaan. Tällöin peltier-elementin täydestä mahdollisesta lämmönsiirtokyvyssä on käytettävissä noin 82 W. 82 W:n teholla peltier-elementin muodostama maksimi lämpötilaero romahtaa noin 14°C , kun täydellä teholla toimiva peltier-elementti tarjoaa noin 19°C :n eron.

Arduino Uno:ssa pyörivä säädin tarvitsee kehittyneemmän ohjaustavan, jotta testeissä esiintyvä värähtely saataisiin vaimennettua.

Lähteet

2/3 Throttle on 3s or WOT on 2s?. 2010. Verkkodokumentti. Traxxas.com.
<<https://traxxas.com/forums/showthread.php?532243-2-3-Throttle-on-3s-or-WOT-on-2s>> Luettu 6.5.2014.

Arduino PWM. 2014. Verkkodokumentti. Arduino.cc.
<<http://arduino.cc/en/Tutorial/PWM>> Luettu 9.12.2014.

Arduino Uno. 2014. Verkkodokumentti. Arduino.cc.
<<http://arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>> Luettu 9.12.2014.

Arduino XBee shield.2014. Verkkodokumentti. Arduino.cc.
<<http://arduino.cc/en/Guide/ArduinoXbeeShield>> Luettu 15.12.2014.

Basic XBee ZB ZigBee (Series 2) Chat. 2014. Verkkodokumentti. Digi International Inc.
<<http://examples.digi.com/get-started/basic-xbee-zb-zigbee-chat/>> Luettu 15.12.2014.

Configuring XBee Radios with X-CTU. 2014. Verkkodokumentti. Digi International Inc.
<<http://examples.digi.com/get-started/configuring-xbee-radios-with-x-ctu/>> Luettu 15.12.2014.

Controlling LED brightness using PWM. 2010. Verkkodokumentti. WFFwiki.
<http://www.waitingforfriday.com/index.php/Controlling_LED_brightness_using_PWM> Luettu 10.12.2014.

Datasheet, AMD Athlon 64 x2 5000+. 2014. Verkkodokumentti. Cpu-world.com.
<<http://www.cpu-world.com/CPUs/K8/AMD-Athlon%2064%20X2%205000%2B%20-%20ADO5000IAA5DD%20%28ADO5000DDBOX%29.html>> Luettu 9.12.2014.

Datasheet, IRLU8743PBF. 2013. Verkkodokumentti. IR.
<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/irlu8743pbf_eng_tds.pdf> Luettu 2.9.2014.

Datasheet, NTCLE100E3. 2012. Verkkodokumentti. Vishay BCcomponents.
<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/ntcle100e-series_eng_tds.pdf> Luettu 10.9.2014.

Datasheet, PE-127-14-11-S. 2010. Verkkodokumentti. Laird Tehcnologies.
<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/jwThermoelectric-Mes_en.pdf> Luettu 10.9.2014.

Datasheet, SK 75/ 37,5/ SA 220. 2014. Verkkodokumentti. Fischer Elektronik.
<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/SK_75_eng_tds.pdf> Luettu 10.9.2014.

Datasheet, VNP35N07. 2004. Verkkodokumentti. ST.
<https://www1.elfa.se/data1/wwwroot/assets/datasheets/awVNP35N07_Data_En.pdf> Luettu 10.9.2014.

Dew Point. 2015. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Dew_point>. Luettu 10.4.2015.

Guide to Advanced Cooling: Peltier edition. 2014. Verkkodokumentti. Arstechnica.com.
<<http://archive.arstechnica.com/guide/cooling/peltier-1.html>> Luettu 15.12.2014.

High-Power Control: Arduino + N-channel MosFET. 2012. Verkkodokumentti. Bildr.org
<<http://bildr.org/2012/03/rfp30n06le-arduino/>>. Luettu 11.12.2014.

Mosfet as a switch. 2014. Verkkodokumentti. ElectronicsTutorials.
<http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html>. Luettu 10.12.2014.

Peltier Elements Generate Heat Cold or Electricity. 2015. Verkkodokumentti. Survival-manual.com. <<http://www.survival-manual.com/electricity/peltier-elements.php>>. Luettu 22.4.2015

Peltier Cooler Information. 2015. Verkkodokumentti. The Heatsink Guide.
<<http://www.heatsink-guide.com/peltier.htm>> Luettu 10.4.2015.

Pulse-width modulation. 2015. Verkkodokumentti. Sparkfun.com.
<<https://learn.sparkfun.com/tutorials/pulse-width-modulation>> Luettu 10.4.2015.

Raspberry Pi. 2015. Verkkodokumentti. Wikipedia.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi> Luettu 10.4.2015.

Secrets of Arduino PWM. 2009. Verkkodokumentti. Righto.com.
<<http://www.righto.com/2009/07/secrets-of-arduino-pwm.html>> Luettu 11.12.2014.

Simple High Quality 12Volt 100Amp Power Supply. 2012. Verkkodokumentti. RC Groups. <<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1005309&page=107>> Luettu 10.12.2014.

Thermoelectric Coolers FAQ. 2014. Verkkodokumentti. RMT Ltd.
<http://www.rmtltd.ru/downloads/TEC_FAQ_2014_EN.pdf> Luettu 10.4.2015.

To ZigBee or Not to Zigbee. 2009. Verkkodokumentti. EETimes.
<http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1276404> Luettu 10.3.2015.

Understanding Thermoelectric Cooling. 2015. Verkkodokumentti. Active Cool.
<<http://www.activecool.com/technotes/thermoelectric.html>> Luettu 10.4.2015.

Using NTC Thermistors with Arduino. 2013. Verkkodokumentti. GarageLab.
<<http://garagelab.com/profiles/blogs/tutorial-using-ntc-thermistors-with-arduino>> Luettu 10.11.2014.

XBee/XBee-PRO ZB (S2) Modules. 2014. Verkkodokumentti. Digi International Inc.
<<http://www.digi.com/support/productdetail?pid=3430&type=documentation>> Luettu 15.12.2014.

XBee Zigbee Howto. 2012. Verkkodokumentti. HCI-Lab.
<<http://blog.hcilab.org/gadgeteer/2012/12/xbee-zigbee-howto/>> Luettu 15.12.2014.

Testeissä tietojen keräämiseen käytetyt apuohjelmat

Apuohjelma, joka lukee sarjaportista tulevaa tietoa ja tallentaa sen helpommin scriptillä luettavaan tiedostoon, josta tiedot voidaan yhdistää muista lähteistä tuleviin tietoihin.

```
#!/usr/bin/perl -w

use strict;

my $PORT = "/dev/ttyUSB0";

open(SERIAL, "+>$PORT");

while (my $line = <SERIAL>) {

    open(my $SAVE, '>', '/dev/shm/serialLatest.txt');

    print $SAVE "$line";

    close $SAVE;

    print "$line" ;

}
```

Toinen, itse kirjauksen hoitava apuohjelma

```
#!/bin/bash

printf "BURNS\tROOM\tCOLD\tHOT\tPWM\tMBCPU\tCORE0\tCORE0\tCORE1\tCORE1\n"

while [ 1 ]; do

    PROCS=`pidof burnK7 | wc -w`

    MBCPU=`sensors atk0110-acpi-0 | grep "CPU Temperature" | sed -r s/[^0-9.\ ]//g | awk
{' printf $1 '}`

    CORE=`sensors k8temp-pci-00c3 | grep Core | sed s/[^0-9.\ ]//g`
```



```
COREAA=`printf "$CORE" | head -n 1 | tail -n 1 | sed s/[^0-9.\ ]//g | awk {' printf $2; '}`
```

```
COREAB=`printf "$CORE" | head -n 2 | tail -n 1 | sed s/[^0-9.\ ]//g | awk {' printf $2; '}`
```

```
COREBA=`printf "$CORE" | head -n 3 | tail -n 1 | sed s/[^0-9.\ ]//g | awk {' printf $2; '}`
```

```
COREBB=`printf "$CORE" | head -n 4 | tail -n 1 | sed s/[^0-9.\ ]//g | awk {' printf $2; '}`
```

```
ARDUINO=`cat /dev/shm/serialLatest.txt | sed -r s/[^0-9.\ ]//g`
```

```
ROOM=`echo $ARDUINO | awk {' printf $2; '}`
```

```
COLD=`echo $ARDUINO | awk {' printf $3; '}`
```

```
PWM=`echo $ARDUINO | awk {' printf $4; '}`
```

```
HOT=`echo $ARDUINO | awk {' printf $5; '}`
```

```
printf  
"$PROCS\t$ROOM\t$COLD\t$HOT\t$PWM\t$MBCPU\t$COREAA\t$COREAB\t$COREBA\t$COREBB\r\n"
```

```
sleep 1
```

```
done
```

Arduino Uno:ssa ajettu ohjelma

Ohjelman lähdekoodi löytyy osoitteesta

http://koti.mbnet.fi/hjylha/3xNTC_PWM.ino.txt