

ELEC-E8730 - Design of Electronic Equipment

Harjoitustyö

Miika Lehtimäki, opn. 349800

Joulukuu 2019

1 Johdanto

Halusin valita harjoitustyöksi laitteen, jonka pystyisin itse rakentamaan ja jolle minulla olisi tarvetta. Päivitin hiljattain tietokoneeni kokoonpanoa, jonka johdosta nestekiertoinen jäähdytysjärjestelmä piti mitoittaa uudelleen. Päättinkin siis suunnitella jäähdytysjärjestelmän kuudelle tuulettimelle ohjaimen. (Ohjain ei ole toiminnallisuutensa puolesta sidottu kyseiseen sovelluskohteeseen, joten se toivottavasti täyttää vaatimuksen lisäksi olemattomuudesta.)

2 Järjestelmä

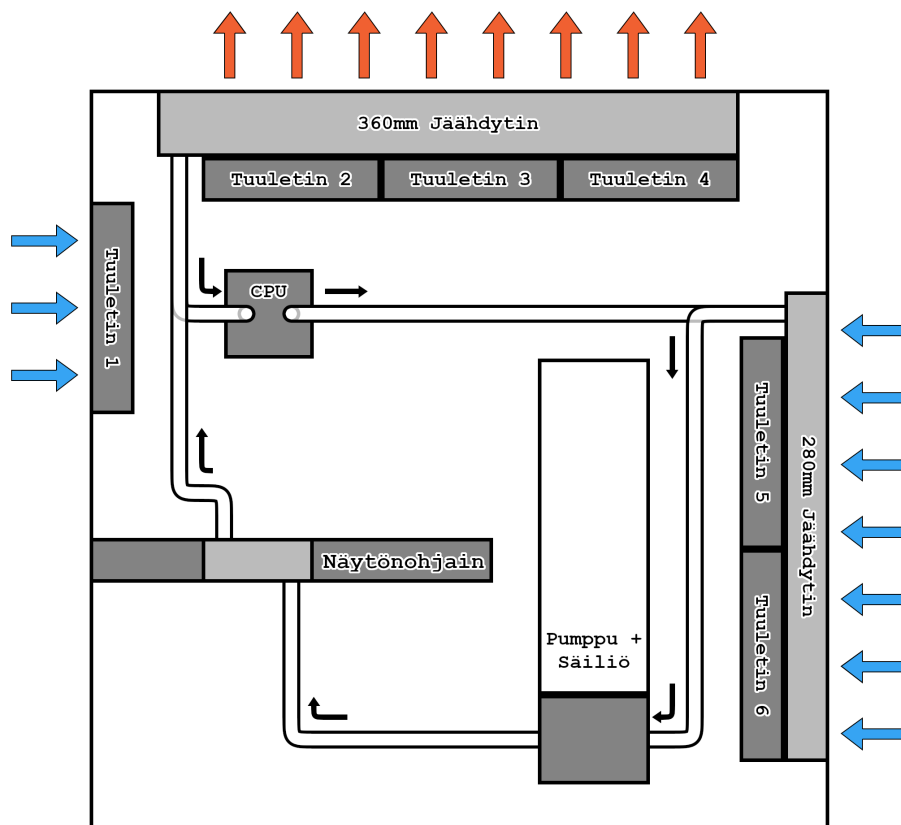
Jäähdytysjärjestelmä käsittää yhden suljetun nestekiertoisen silmukan, jossa komponentit ovat sarjassa kytkettynä. Lämmönlähteitä on kaksi: keskussuoritin sekä näytönohjain. Kumpaankin on asennettu rivastollinen blokki riittävän lämmönsiirron takaamiseksi. Vastaavasti jäähdytysyksiköitä on kaksi: ensimmäinen on asennettu kotelon kattoon ja koostuu $360\text{mm} \times 120\text{mm} \times 45\text{mm}$ rivastosta sekä kolmesta 120mm tuulettimesta. Toinen on asennettu kotelon etuosaan ja koostuu $280\text{mm} \times 140\text{mm} \times 30\text{mm}$ rivastosta sekä kahdesta 140mm tuulettimesta.

Havainnollistava yleiskuva on esitelty kuvassa 1. Edellä mainittujen komponenttien lisäksi järjestelmässä on yhdistetty pumppu + säiliö sekä yksi jäähdytysyksiköistä erillinen 140mm tuuletin. Kiertojärjestys on seuraava: pumppu $\rightarrow$ näytönohjain $\rightarrow 360\text{mm}$ jäähdytin $\rightarrow$ keskussuoritin $\rightarrow 280\text{mm}$ jäähdytin $\rightarrow$ pumppu. Täten lämmönlähdettä seuraa aina jäähdytysyksikkö. Etu- ja takaosaan asennetut tuulettimet imevät viileää ilmaa sisäänpäin ja kattoon asennetut tuulettimet lämmintä ilmaa ulos toimien linjassa luontaisen konvektion kanssa.

3 Toiminnallisuusmäärittely

Ohjaimen on täytettävä seuraavat toiminnallisuusvaatimukset:

1. Mittaa jäähdytysnesteen lämpötilaa



Kuva 1: Järjestelmän yleiskuva

2. Säättää tuulettimien kierrosnopeutta jäähdytysnesteen lämpötilasta riippuen
3. Pitää tuulettimien kierrosnopeuden tasaisena riippumatta ympäristön tai tuulettimen ominaisuuksista
4. Pitää tietokoneen kotelossa positiivisen paineen
5. Toimii autonomisesti ilman esim. sarjaportin välityksellä saapuvaa ulkoista ohjausta

Vaativuudet 1 ja 2 sisältävät ohjaimen toiminnallisuuden ytimen: tuulettimia tulee pyörittää mahdollisimman pienellä kierrosnopeudella melun sekä tuulettimien laakerien kulumisen minimoimiseksi. Mikäli tietokoneen lämmöntuotto

kuitenkin nousee laskentakuorman vuoksi, tulee kierrosnopeutta - ja täten jäähdytystehoa - nostaa.

Kahden samanmallisen tuulettimen ajaminen identtisellä PWM-signaalilla saattaa tuulettimen sijainnista (ympäristön ilmapirtausominaisuuksista) sekä valmistustoleransseista riippuen vaihdella. Tämä aiheuttaa virtausnopeuden muutoksia, turbulenssia sekä akustista interferenssiä. Vaatimuksella 3 pyritään korjaamaan asia.

Mikäli kotelossa on negatiivinen paine ympäristöön nähden, imee se aukoistaan sisään pölyä ympäristöstä. Vaatimuksella 4 tämä pyritään minimoimaan. Myös samasta syystä tuuletin 1 sekä 280mm jäähdytysyksikkö ovat asennettu puhaltamaan sisäänpäin.

Ohjaimen on toimittava tietokoneen käyttöjärjestelmästä (tai sen puutteesta) huolimatta, joten riippuvaisuus ulkoisesta ohjauksesta ei tule kyseeseen. Tästä johtuu vaatimus 5.

4 Elektronikka ja mitoitus

Tuulettimia ohjataan mikrokontrollerilla, joka mittaa tuulettimien kierrosnopeutta sekä nesteen lämpötilaa. Kontrollerilta vaaditaan siis kuusi PWM-ulostuloa sekä 7 analogisisääntuloa. Täten tehtävään valikoitui Arduino Nano v3, joka kahdeksalla analogisisääntulolla ja kuudella PWM-lähdöllään sopi tarkoitukseen mainiosti (allekirjoittaneella sattui myös olemaan niitä hyllyssä).

Piirissä on kuusi kanavaa - yksi jokaiselle tuulettimelle. Jokainen kanava käsittää neljä pinniä: 12V syöttöjännitteen, maan, takometrin sekä PWM-ohjaus-signaalin. Takometrille on RC-suodatin ja 5V ylösvetovastus sekä PWM:lle alasetovastus. Maasta on myös kytketty diodi 12V kiskoon suojaamaan mikrokontrolleria tuulettimien inertian synnyttämiltä jännitepiikeiltä. Jäähdytinnesteen lämpötilan mittausta on toteutettu yksinkertaisella jännitteenjakajalla. 12V käyttöjännite saadaan tavanomaisen koaksiaaliliittimen välityksellä. Piirin kytkentäkaavio on liitteenä.

4.1 RC-suodattimen mitoitus

Takometrisignaali sisältää huomattavan määrän korkeataajuuksista häiriötä, joka tulee suodattaa pois luotettavan kierrosnopeusmittauksen saavuttamiseksi. Käyttämieni tuulettimien maksimikierrosnopeus on 1500 kierrosta minuutissa ja takometri lähettää pulssin puolen kierroksen välein. Täten suodattimen kaistanleveys tulee olla n. 3000Hz.

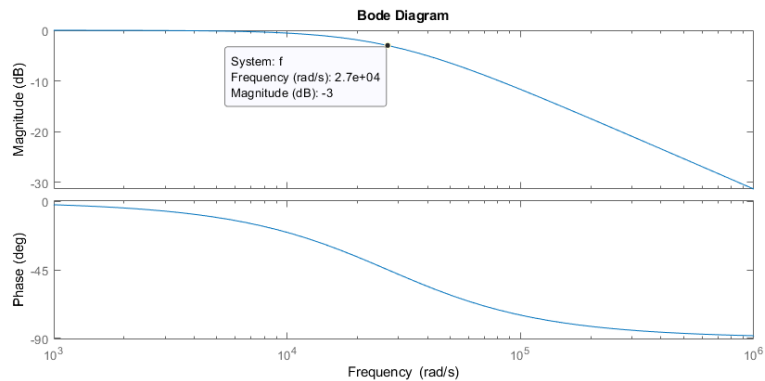
Suurin saatavilla oleva keraaminen kondensaattori on 100nF, joten vastuksen mitoitus tehtiin tätä faktaa vasten. 370Ω vastuksella siirtofunktiosta tulee:

$$F(s) = \frac{a}{s + a} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{\frac{1}{370 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}}{s + \frac{1}{370 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}} = \frac{27027,0}{s + 27027,0}$$

Ja puolen tehon (-3dB) kaistanleveydeksi:

$$\begin{aligned}
|F(j\omega)|^2 &= \frac{1}{2}|F(0)|^2 \\
\left| \frac{a}{j\omega + a} \right|^2 &= \frac{1}{2} \left| \frac{a}{0 + a} \right|^2 \\
\frac{|a|^2}{|j\omega + a|^2} &= \frac{1}{2} \\
|j\omega + a|^2 &= 2|a|^2 \\
\sqrt{\omega^2 + a^2}^2 &= 2a^2 \\
\omega^2 + a^2 &= 2a^2 \\
\omega &= a \\
&= 27027,0 \frac{rad}{s} \approx 4291,3 Hz
\end{aligned}$$

Koska häiriön taajuusalue on tämän kaistanleveyden yläpuolella, on suotimen mitoitus 100nF kondensaattorilla sekä 370Ω vastuksella riittävä. Kuvassa 2 on suodattimen Bode-diagrammi.

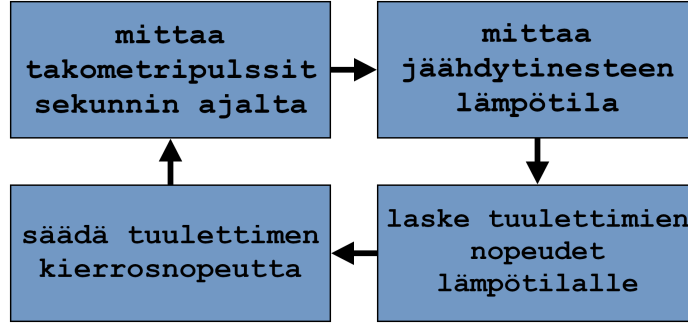


Kuva 2: RC-suodattimen Bode-diagrammi

5 Ohjelmisto

Ohjelmisto on toimintaperiaatteltaan varsin yksinkertainen: se mittaa tuulettimien kierrosnopeutta sekä jäähdytysnesteen lämpötilaa, laskee tuulettimien tavoitenopeuden kyseiselle lämpötilalle ja säättää tuulettimien kierrosnopeutta kohti tavoitetta. Tätä toistetaan loputtomassa syklissä, kuten havainnollistettu kuvassa 3. Suurin työ ohjelmiston implementoinnissa syntyikin tuuletinnopeuskäyrien määrittelystä.

Koska nestekierto alipäästösuodattaa lämpötilavaihteluita merkittävästi, oli tuuletinnopeuksien säätö riittävää toteuttaa hitaalla, diskreetillä PI-säädöllä, jossa näytteistystaajuus on 1Hz.



Kuva 3: Ohjelmiston lohkokaavio

5.1 Järjestelmän mallinnus

Optimaalisia nopeuskäyriä varten jäähdytysjärjestelmästä tehtiin malli, joka approksimoi järjestelmän termodynaamisia sekä akustisia ominaisuuksia. Koska mallinnus ei ole tässä harjoitustyössä keskeisessä osassa, esittelen menetelmän vain suurpiirteisesti.

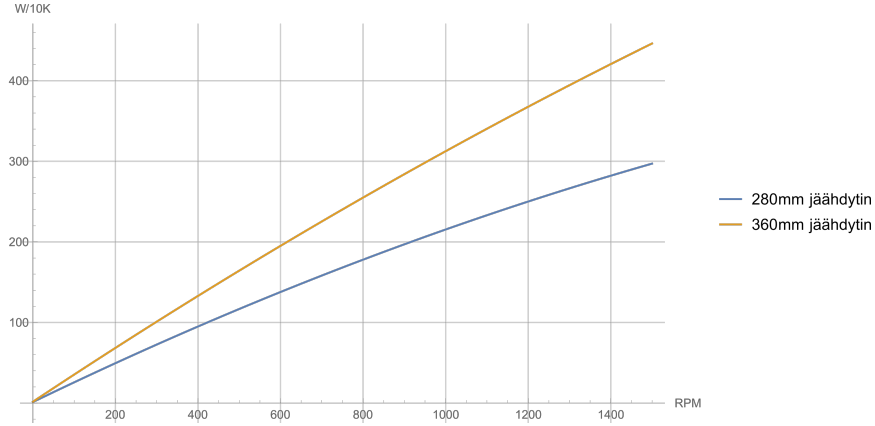
Jäähdyttimien teho riippuu jäähdytysnesteen ja huonelämpötilan erotuksesta sekä tuulettimien kierrosnopeudesta. Käyttämieni jäähdyttimien valmistajan sivuilta löytyi suuntaa antava taulukko jäähdytysteholle. Kuvassa 4 esitellään kummankin jäähdyttimen teho 10K lämpötilaerotusta kohti tuulettimien kierrosnopeuden funktiona.

Kokonaisjäähdytysteho watteina saadaan kaavalla

$$C(T_a, T_c, T_i, \mathbf{s}) = \frac{R_{280}(s_5) + R_{280}(s_6)}{2} \cdot \frac{T_c - T_a}{10} + \frac{R_{360}(s_2) + R_{360}(s_3) + R_{360}(s_4)}{3} \cdot \frac{T_c - T_i}{10},$$

jossa T_a on huonelämpötila, T_c jäähdytysnesteen lämpötila, T_i kotelon sisälämpötila, $\mathbf{s}$ tuulettimien kierrosnopeudet ja $R_{280}(s)$ sekä $R_{360}(s)$ jäähdyttimen tehot tuulettimien kierrosnopeuden funktiona. Koska teho sellaisenaan ei sisällä juurikaan merkityksellistä informaatiota, tulee se suhteuttaa haihdutettavan lämpöenergian määrään. Täten jäähdytyskertoimen funktioksi saadaan

$$K_c(T_a, T_c, T_i, \mathbf{s}) = \frac{1}{t_c} \frac{V_c c (T_c - T_a)}{C(T_a, T_c, T_i, \mathbf{s})},$$



Kuva 4: Jäähdyttimien teho

jossa V_c on jäähdytysnesteen tilavuus, c jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetti (ja täten $V_c c (T_c - T_a)$ jäähdytysnesteen varastoima lämpöenergia) ja t_c aika, jossa lämpö tulisi haihduttaa.

Akustiseen mallinnukseen käytettiin tuulettimien approksimatiivista kaavaa

$$N_i(s_i) = n_0 + 50 \cdot \log_{10} \left(\frac{s_i}{s_0} \right),$$

jossa n_0 on yksittäisen tuulettimen melu desibeleinä kierrosnopeudella s_0 . Kokonaismelu saadaan kaavalla

$$N(\mathbf{s}) = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_i 10^{\frac{N_i(s_i)}{10}} \right)$$

ja melukerroin

$$K_n(n_d, \mathbf{s}) = N(\mathbf{s})/n_d,$$

jossa n_d on toivottu melutaso desibeleinä.

Lopullinen kustannusfunktio saadaan jäähdytys- ja melukertoimen suhteellisella painotuksella

$$J(T_a, T_c, T_i, n_d, \mathbf{s}, \rho) = \rho K_c(T_a, T_c, T_i, \mathbf{s}) + \frac{1}{\rho} K_n(n_d, \mathbf{s}),$$

jossa ρ on painotusparametri: $\rho < 1$ tuottaa hiljaisempia ja $\rho > 1$ tehokkaampia toimintapisteitä.

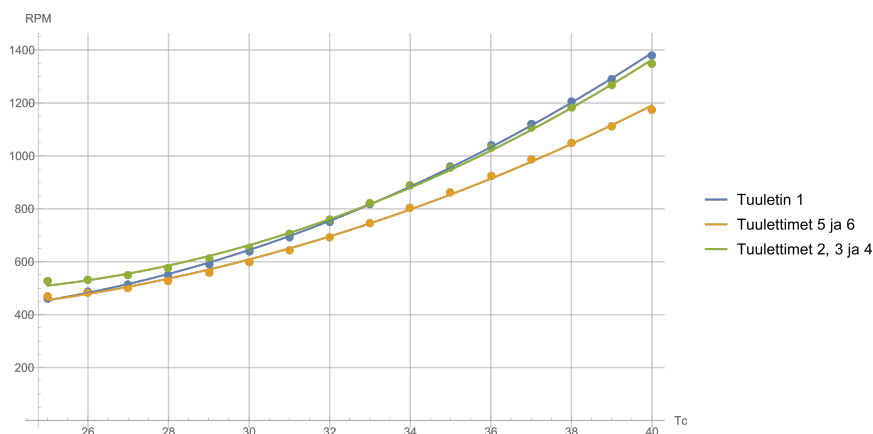
Näin optimaalinen toimintapiste löydetään minimoimalla J tuulettimien nopeuksien $\mathbf{s}$ suhteen ja rajoittamalla kotelon sisäpaine positiiviseksi:

$$P(\mathbf{s}_I, \mathbf{s}_O) > 0$$

$$P(\mathbf{s}_I, \mathbf{s}_O) = \sum_i p_{0i} \frac{s_i}{s_{0i}} - \sum_o p_{0o} \frac{s_o}{s_{0o}},$$

jossa s_I ovat sisäänpäin puhaltavien tuulettimien nopeudet, p_{0i} niiden staattiset paineet kierrosnopeudella s_{0i} , s_O ulospäin puhaltavien tuulettimien nopeudet ja p_{0o} niiden staattiset paineet kierrosnopeudella s_{0o} .

Optimisaatiossa huonelämpötilaksi T_a oletettiin $22^\circ C$ ja kotelon sisälämpötila T_i approksimoitiin jäähdytinnesteen lämpötilan ja sisäänpäin puhaltavien tuulettimien kierrosnopeuksien funktiona. Optimisaatio suoritettiin nostoen jäähdytynesteen lämpötilaa asteen välein. Näin saatuun dataan sovitettiin toisen asteen polynomikäyrät, kuten esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: Lopulliset tuuletinkäyrät

6 Piirilevy

Piirilevy on kaksikerroksinen, johon komponentit ovat kytketty PTH-tekniikalla. Liittiminä tuulettimille sekä lämpötila-anturille käytetään yleisiä Molex KK 254-sarjan liittimiä. Piirilevyn mitat ovat $43,81\text{mm} \times 68,58\text{mm}$. Piirilevyn kuvat ovat liitteenä.

7 Kotelointi

Kotelo valmistetaan sähköä johtamattomasta muovista. Koska laite tulee sijaitsemaan tietokoneen sisällä, etäällä lämpöä tuottavista komponenteista sekä valolta suojattuna, ei materiaalivalintaan kohdistu erityisiä vaatimuksia. ABS on edullisuutensa tähden johdonmukainen valinta.

Kotelo koostuu kahdesta osasta: itse kotelosta sekä ruuvilla kiinnitettävästä kannesta. Kotelo-osassa on urat, joihin piirilevy liu'utetaan ilman liimaa, ruuveja tai muutakaan kiinnikkeitä. Täten levy on helposti saatavilla ja huollettavissa. Sekä kotelossa että kannessa on läpiviennit tarvittaville liittimille. Tuulettimien sekä lämpötila-anturien liittimien on tarkoitus sijoittua myös kotelon sisäpuolelle tilan säästämiseksi. Kotelon piirustukset liitteenä.

8 Osaluettelo

Komponentti	Määrä	Hinta/Kpl	Hinta
DC-RUNKOLIITIN 2,1/5,5mm ERISTETTY	1	1,26	1,26
DC-LIITIN 2,1/5,5mm	1	1,34	1,34
SUOSITTU YLEISDIODI 1N4007 1A 1000V	1	0,11	0,11
MOLEX KK 4-NAPAINEN RUNKO	6	0,19	1,14
MOLEX KK 2-NAPAINEN RUNKO	1	0,15	0,15
KERAAMINEN KOND. 50V 100nF R2,5	6	0,15	0,9
METALLIKALVOVASTUS 0,6W	19	0,2	3,8
Arduino Nano	1	33,1	33,1
Yhteensä			41,8

Yllä oleva listaus on tehty Partco Oy:n tarjonnan perusteella. Kuten huomataan, ovat Arduino Nano käsittää valtaosan kustannuksista. Itse ostin kiinakopioita aikoinaan 20kpl, joille tuli hintaa n. 50 euroa. Näin lopullisen laitteen hintaa saa siis tiputettua huomattavasti.

9 Prototyyppi

Prototyyppi ohjaimesta rakennettiin reikälevylle ja kotelo modifioitiin umpinaisesta valmiiksi saatavilla olevasta muovikotelosta. Toiminallisuutensa puolesta prototyyppi toteuttaa kaikki tässä dokumentissa esitetyt vaatimukset, ja on toiminut jatkuvassa käytössä ainakin kahden kuukauden ajan. Prototyyppi esitellään kuvissa 6 ja 7.

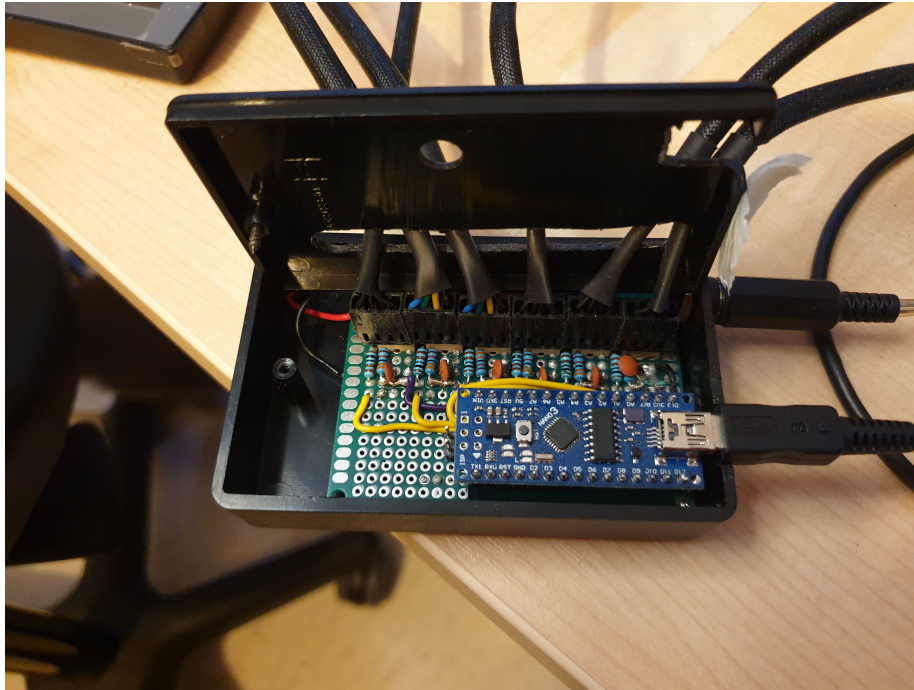
10 Jatkokehitys

Tuuletinohjaimen jatkokehityksen osalta mieleen tuli muutamia ideoita. Tärkeimpänä tulee mieleen sisääntulevan ilman lämpötilamittaus, joka mahdollistaisi nesteeseen varastoituneen lämpöenergian tarkan määrittämisen. Myös huonelämpötilan noustessa (kuten kesäaikaan on tapana) jäähdytysnesteeseen voisi antaa käydä lämpimämpänä, jotta pysyttäisiin toivotussa melutasossa.

Toinen, edelliseen ideaan jatkumona olisi kotelon sisäilman lämpötilan mittaaminen. Täten sitä ei tarvitsi approksimoida pelkän intuition pohjalta tehdyllä mallilla, vaan se voitaisiin ottaa mukaan toiseksi ohjausparametriksi. Toki ohjauskäyristä tulisi täten kaksiulotteisia ja vaatimukset optimisaatioprosessille neliöityisivät.

Kolmas kehitystoimenpide koskisi matalan kuorman tuuletinohjausta. Kevyellä käytöllä tietokone tuottaa niin vähän lämpöä, että kaikkien kuuden tuulettimen ei tarvitsisi pyöriä kerralla. Hyvänä puolena tässä olisi se, että käytännönpaneminen ei vaadi kuin ohjelmiston jatkokehittämistä. Implementaatio tulee tosin tehdä harkiten, jotta vältetään tuulettimien epätasaiselta kulumiselta.

Viimeinen, pitkälti tuntematon vaikutus olisi pumpun nopeuden ohjaamisella. Tällä hetkellä kuitenkin pumppu on eristetty kotelosta kumisilla tassuilla,

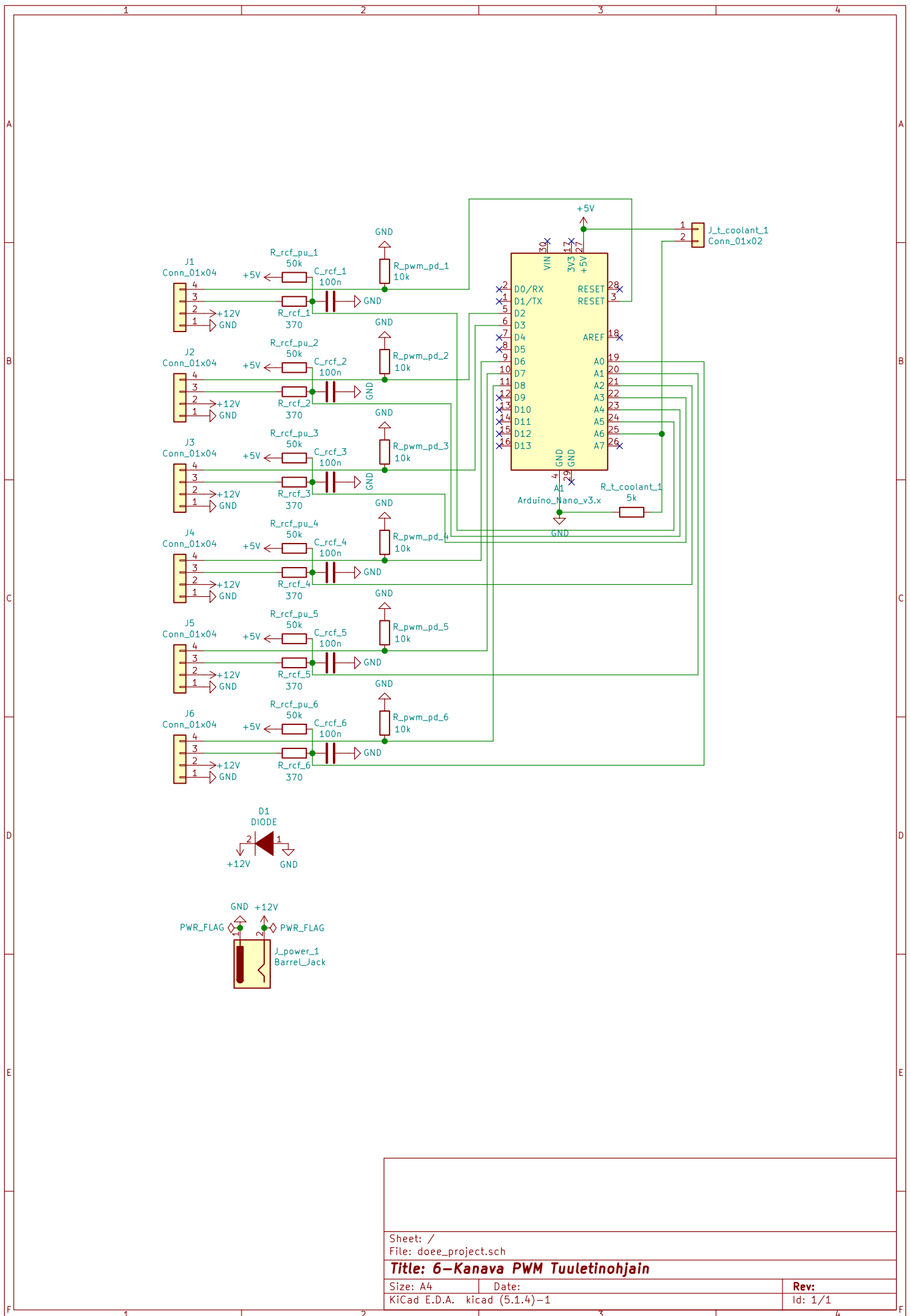


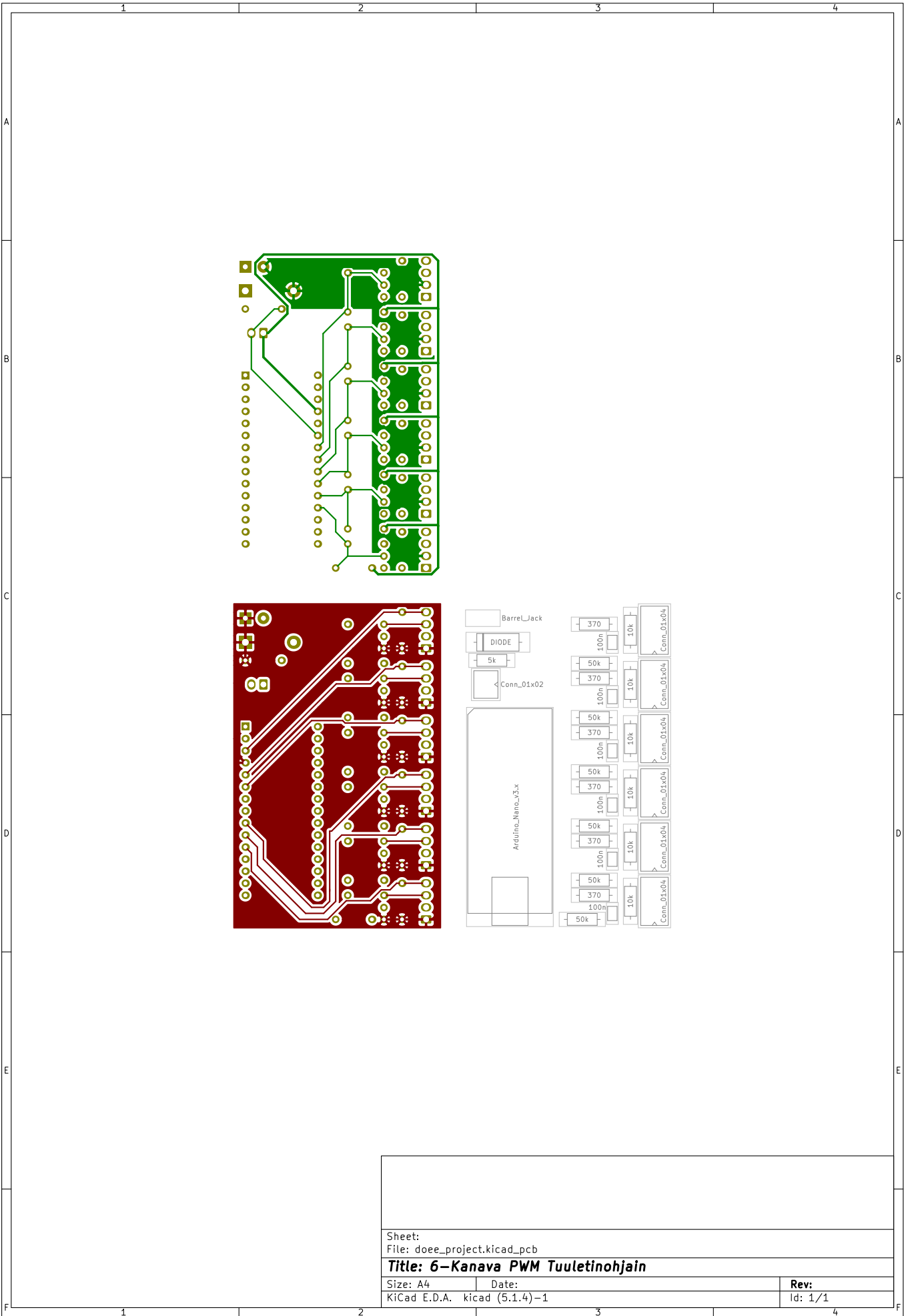
Kuva 6: Prototyyppi, piirilevy



Kuva 7: Prototyyppi tuulettimiseen

eikä täten välitä siihen juurikaan mekaanista värinää. Pumppu on myöskin niin tehokas, että lämmin neste poistuu viileän tieltä hyvin nopeasti. Asia olisi joka tapauksessa tutkimisen arvoinen.

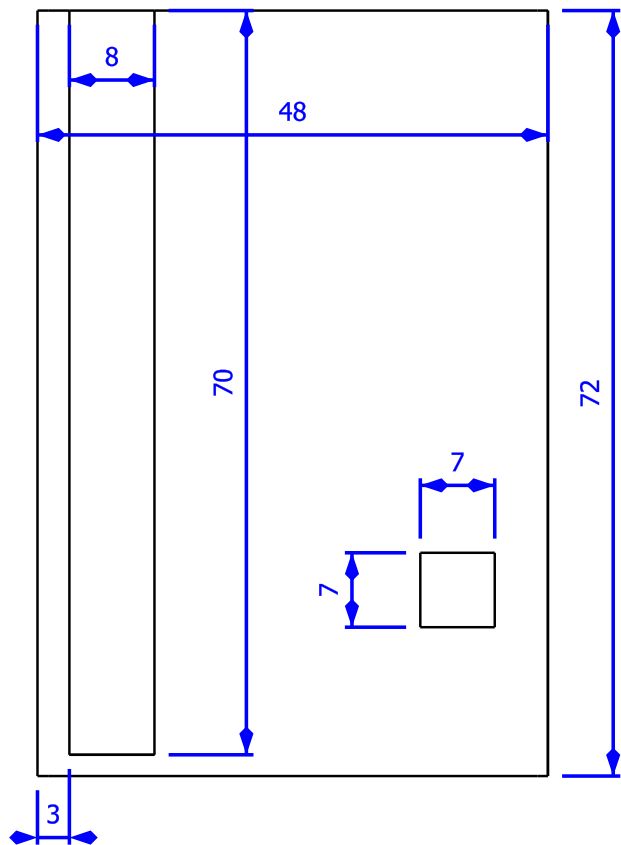
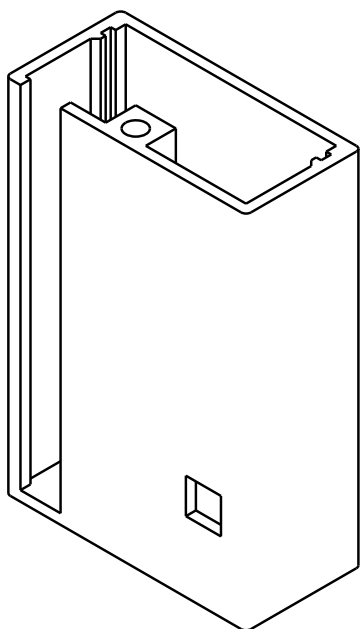
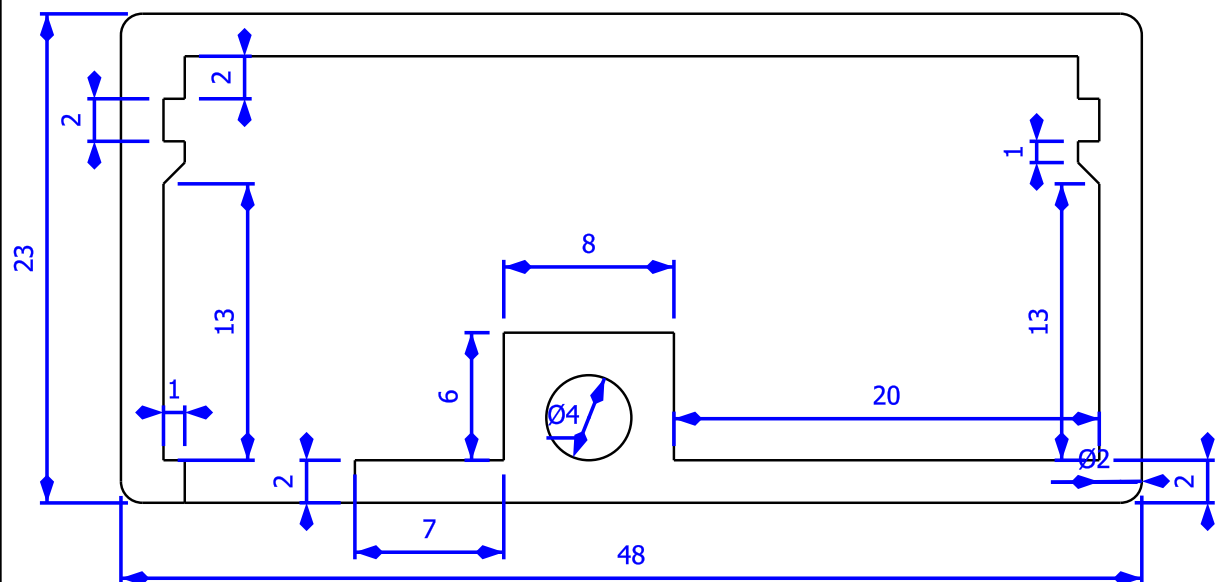




Sheet:
File: doee_project.kicad_pcb

Title: 6-Kanava PWM Tuuletinhjain

Size: A4	Date:	Rev:
KiCad E.D.A. kicad (5.1.4)-1		Id: 1/1



Created by:
Miika Lehtimäki

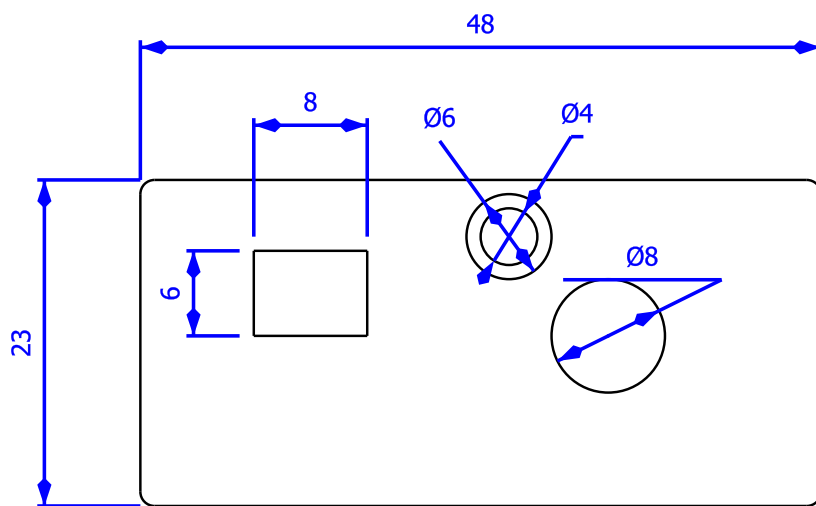
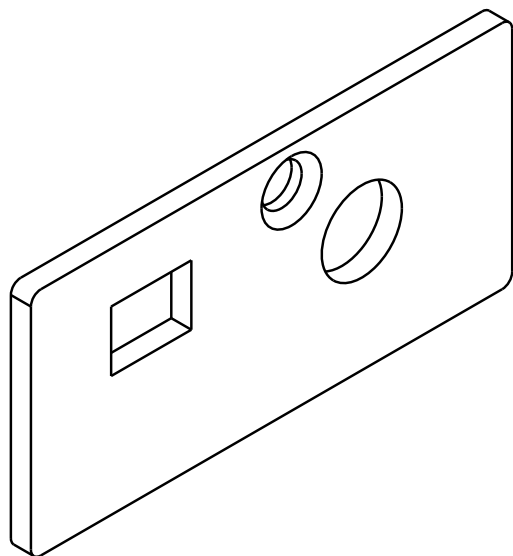
Title:
Tuuletinohjain - kotelo

Supplementary information:

Kotelo 6-Kanava PWM tuuletinohjaimelle

Size: A4	Sheet: X / Y	Scale:
Part number: 1		
Drawing number: 1		
Date: 06/12/2019	Revision: REV A	





Created by:
Miika Lehtimäki

Title:
Tuuletinohjain - kotelon kansi

Supplementary information:

Kotelon kansi 6-Kanava PWM tuuletinohjaimelle

Size:

A4

Sheet:

X / Y

Scale:

Part number:

2

Drawing number:

1

Date:

06/12/2019

Revision:

REV A

