



Jesse Hartikainen

Mikrokontrolleriohjattu PWM -tuuletinhubi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

5.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Jesse Hartikainen
Otsikko: Mikrokontrolleriohjattu PWM-tuuletinhubi
Sivumäärä: 40 sivua + 3 liitettä
Aika: 5.5.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine: Elektroniikka
Ohjaajat: Janne Mäntykoski, Lehtori

Insinöörityön tavoitteena on suunnitella, rakentaa ja testata mikrokontrolleriohjattu PWM-tuuletinhubi. Tavoitteena on rakentaa laite, jonka avulla pystyy laskemaan käyttöympäristön lämpötilaa.

Työssä käsitellään myös IEC 60297 Mechanical structures for electronics equipment – Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series -standardia sekä Intelin 4-Wire Pulse Width Modulation (PWM) Controlled Fans -spesifikaatiota ja nämä otetaan myös huomioon laitteen suunnittelussa.

Työssä käytiin aluksi läpi laitekaappeja ja laitetuulettimia sekä niiden ominaisuuksia. Sen jälkeen käytiin läpi työhön tulevia komponentteja ja perusteluita niiden valinnalle. Tämän jälkeen alkoi koekytkentälevyn testaaminen, joka suoritettiin Metropolian elektroniikan laboratorion tiloissa ja samalla päivitettiin ja viimeisteltiin piirikaavio sekä piirilevyn layout. Seuraavaksi oli komponenttien juottaminen piirilevyyn ja suojakoteloinnin suunnittelu. Koteloinnin valmistuttua piirilevy asennettiin koteloon ja aloitettiin laitteen lopullinen testaus.

Tuloksena tästä syntyi toimiva laite, jonka avulla pystyy hallitsemaan laitekaapin sisälämpötiloja, jotta laitteiden käyttöikä olisi mahdollisimman pitkä. Työstä hyötyvät ihmiset, jotka haluavat helpon tee se itse -projektin ja haluavat vähentää lämpötilojen aiheuttamaa haittaa erilaisille laitteille.

Avainsanat: mikrokontrolleri, PWM, piirilevy

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Jesse Hartikainen
Title: Microcontroller controlled PWM fan hub
Number of Pages: 40 pages + 3 appendices
Date: 5 May 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Professional Major: Electronics
Supervisors: Janne Mäntykoski, Senior Lecturer

The purpose of this thesis work was to design, build and test microcontroller controlled PWM fan hub. The goal was to build a device that allows the user to lower the temperatures in its use environment.

IEC 60297 Mechanical structures for electronics equipment – Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series standard and Intel 4-Wire Pulse Width Modulation (PWM) Controlled Fans specification is also discussed in the thesis.

This thesis starts by explaining electronics cabinets, also known as racks, and device fans and their features. After this, components used in the work and the reason for choosing these are clarified. Then, the breadboard testing and prototyping that was performed at the Metropolia electronics lab are explained. During the prototyping the circuit diagram and layout were updated and finally finished. This was followed by the soldering of the components to the circuit board and designing the enclosure for the circuit board. After the enclosure was finished and produced, it was time to install the circuit board to the enclosure and start the final testing.

As a result of this work, a functioning device that allows the user to control the temperatures in equipment cabinets to prolong the equipment's lifespan was created. This work benefits people that like to do DIY projects and want to decrease the temperature in their equipment cabinets, so that the temperatures do not cause harm to devices in those cabinets.

Keywords: microcontroller, PWM, circuit board

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Laitekaapit ja laitetuulettimet	1
2.1	Laitekaappi	1
2.2	Laitetuulettimet	4
2.2.1	Spesifikaatio	5
2.2.2	Tuuletintyytit	7
2.2.3	Ominaisuudet	8
2.2.4	Laakerityypit	10
3	Komponentit	13
3.1	Mikrokontrolleri	13
3.2	Virtalähde ja tuuletinliittimet	15
3.3	Muut komponentit	17
4	Koekytkenälevyn testaus ja ohjelmointi	18
4.1	Testauksen alkumetrit	19
4.2	Toimintojen lisääminen	21
4.2.1	Tallennusominaisuus	22
4.2.2	Herätesignaali ja led-indikaattorit	22
4.2.3	25 kHz:n PWM-ohjaussignaali	23
5	Piirilevyn valmistus ja 3D-tulostus	27
5.1	Piirikaavio	27
5.2	Layout	28
5.3	Piirilevyn valmistus	29
5.4	3D-tulostus	33
6	Testaus	35
7	Yhteenveto	39
	Lähteet	40

Liitteet

Liite 1: Piirikaavio V1.1

Liite 2: BOM (Bill of materials)

Liite 3: Ohjelmakoodi

Lyhenteet

- BOM: *Bill of materials*. Materiaaliluettelo.
- EIA: *Electronic Industries Alliance*. Amerikkalainen standardi- ja kauppajärjestö.
- IEC: *International Electrotechnical Commission*. Kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio.
- IO: *Input and Output*. Sisään- ja ulostulo.
- PWM: *Pulse width modulation*. Pulssinleveysmodulaatio on modulointitapa, jossa säädetään signaalin keskiarvon voimakkuutta.
- SMD: *Surface-mount device*. Pinta-asennuskomponentti.
- THT: *Through Hole Technology*. Läpireikäkomponentti.

1 Johdanto

Insinööriyössä perehdytään mikrokontrolleriohjatun PWM-tuuletinhubin suunnitteluun, rakentamiseen ja testaukseen. Insinööriyön tavoitteena on luoda laite, jonka avulla käyttäjä pystyy hallitsemaan käyttöympäristön lämpötilaa käyttämällä yleismallisia tietokoneen kotelotuulettimia.

Käyttöympäristöihin lukeutuvat TV-tasot ja laitekaapit, joihin usein sijoitetaan lämpökuormaa aiheuttavia laitteita ja jotka ovat useimmiten passiivisesti jäähdytettyjä. Tästä voi aiheutua ongelmia, jos laitteita on paljon pienessä tilassa tai ilma ei pääse vaihtumaan tarpeeksi tehokkaasti. Tuuletinhubi tulee itselleni käyttöön TV-tason lämpötilojen hallintaan.

Työssä käsitellään myös IEC 60297 Mechanical structures for electronics equipment – Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series -standardia sekä Intelin 4-Wire Pulse Width Modulation (PWM) Controlled Fans -spesifikaatiota ja nämä otetaan myös huomioon laitteen suunnittelussa.

Insinööriyön ohjelmointityövaiheessa on käytetty OpenAI:n ChatGPT:n versiota GPT4. Insinööriyön tekijä on vastuussa kaikesta insinööriyön sisällöstä ja sen muotoilusta.

2 Laitekaapit ja laitetuulettimet

Luvussa käsitellään laitekaappeja ja laitetuulettimia sekä niihin liittyviä standardeja, ominaisuuksia ja käyttökohteita. Kyseisiä asioita käsitellään erittäin pintapuolisesti aiheiden laajan mittakaavan takia.

2.1 Laitekaappi

Laitekaappi tai yleisemmältä nimitykseltään tuttu 19 tuuman räkki (19" Rack) on standardisoitu (EIA 310-D, IEC 60297 ja DIN 41494 SC48D) laiteteline tai

-kaappi. Pystysuuntaisten reikien etäisyys noudattaa toistuvaa kuviota, jossa reiät on sijoitettu räkkiyksiköittäin (1U). Yksi räkkiyksikö vastaa 1,75 tuumaa eli 44,45 mm kuten kuvasta 1 näkyy. Laitteiden ja laitekaappien mittoja voidaan myös ilmoittaa räkkiyksikön mittoina. Yhden räkkiyksikön korkuista laitetta merkitään merkinnällä "1U", kahden yksikön korkuista laitetta merkinnällä "2U", jne.



Kuva 1. Räkkiyksikölle määritetyt mitat [1].

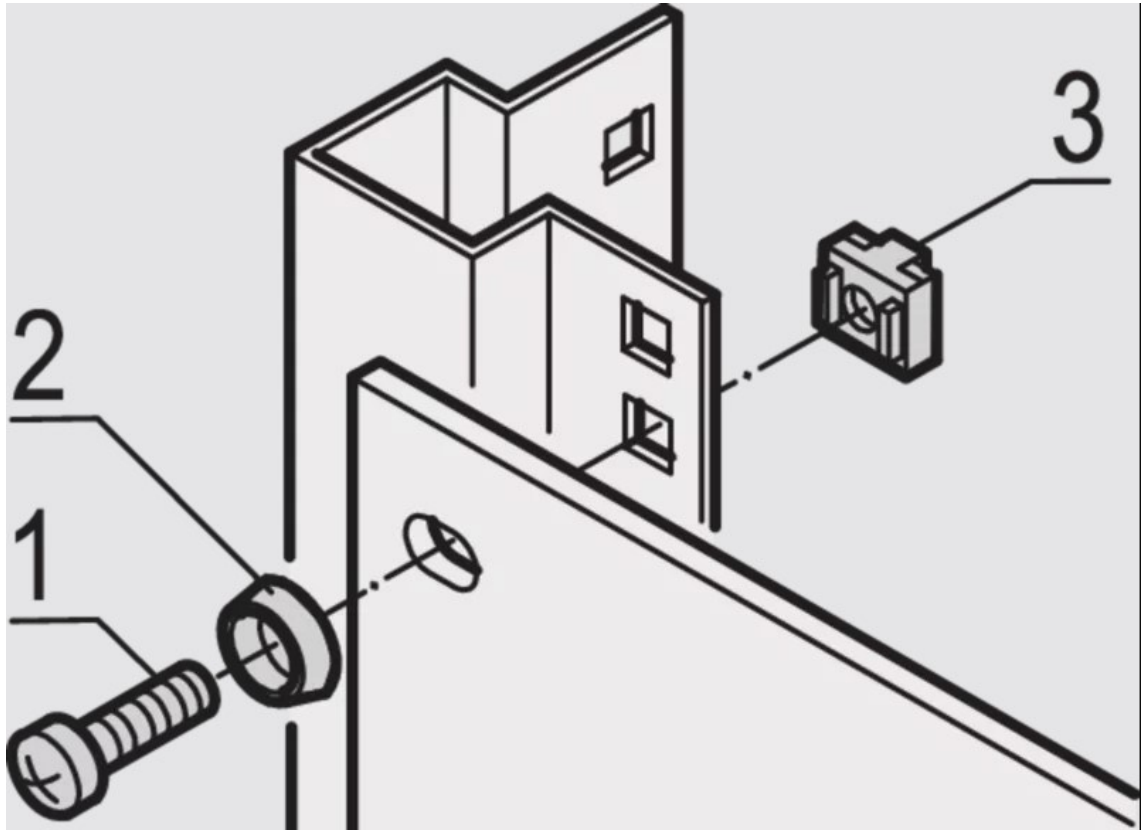
Pystysuorien rivien vaakaväli on $18\frac{5}{16}$ tuumaa eli 465,1 mm leveä. Tämä mitta saattaa hieman vaihdella eri laitekaappivalmistajien kesken, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia asennuksen yhteydessä. Tästä syystä useat laitevalmistajat käyttävät ovaaleja asennusreikiä pyöreiden sijasta, jotta asennettava laitteisto olisi yhteensopiva mahdollisimman monen laitekaapin kanssa. Reunakiskojen asennusväli on minimissään $17\frac{3}{4}$ tuumaa eli 450 mm leveä kuten kuvasta 2 näkyy. [1.]



Kuva 2. 19":n räkkin leveysmitat [1].

Laitteet kiinnitetään laitekaappiin korimuttereita (Cage nut) ja ruuveja käyttäen, mutta servereitä ja kytkimiä kiinnitetään usein liukukiskojen avulla. Liukukiskot

mahdollistavat helpon pääsyn laitteeseen, sillä kiskojen avulla laitteen pystyy vetämään ulos kaapista huolto- ja päivitystoimenpiteitä varten. Liukukiskot kiinnitetään laitekaappiin silti korimuttereita käyttäen, tai niistä saattaa löytyä asennuskoukut, jolla ne kiinnittyvät asennuskiskoihin. Kuvassa 3 on esitelty, kuinka kiinnittäminen toimii korimuttereiden avulla.



Kuva 3. Laitteen asennus korimuttereilla [2].

Liukukiskojen avulla voidaan asentaa jopa erittäin painavia laitteita, mutta liukukiskoja käyttäessä laitekaapissa pitää olla myös takapuolella asennuskiskot, sillä liukukiskot tulee kiinnittää edestä ja takaa.

Laitekaapin koko ja ulkonäkö on yleensä riippuvainen käyttökohteesta. Tuleeko laite suojattuun tilaan, joten kaappia ei tarvitse erikseen lukita tai suojata seinillä? Pitääkö laitekaappi asentaa seinälle tai sokkelin päälle, jos asennustilassa tai sen läheisyydessä on mahdollisuus vesivuodoille? Laitekaappeja tehdään eri kokoisina, asennustyyllisinä, ja ne ovat erittäin modulaarisia ja muokattavissa tarpeen mukaan.

Yleisin on laitekaappirunko, joka on 2000 x 600 x 600 mm:n kokoinen ja sisältää 1 parin 19":n asennuskiskoja, 6 kappaletta c-kiskoja sivuilla ja rungon. Kuvassa 4 on esimerkki tämäntapaisesta laitekaapista.



Kuva 4. Perinteinen 19":n räkki [3].

Edellä mainittuun laitekaappityyppiin useimmiten voidaan jälkikäteen asentaa ovet ja seinät, jos tarve niin vaatii, jolloin koko laitekaappia ei tarvitse uusia.

2.2 Laitetuulettimet

Laitetuulettimia käytetään monissa eri laitteissa ja käyttötarkoituksissa niiden laajan valikoiman takia. Opinnäytetyössä keskitytään tietokoneisiin tarkoitettuihin kotelotuulettimiin ja niiden ominaisuuksiin.

Suurin osa nykypäivänä saatavilla olevista kotelotuulettimista ovat 4-pinnisiä PWM-ohjattuja tuulettimia, mutta ennen kyseisiä malleja suurin osa oli 3-pinnisiä jänniteohjattuja tuulettimia. PWM-ohjaus mahdollistaa tarkan ja portaattoman nopeuden säädön tuulettimille.

2.2.1 Spesifikaatio

Intel on luonut spesifikaation 4-pinnisten PWM-ohjattujen tuulettimien hallinnasta: 4-Wire Pulse Width Modulation (PWM) Controlled Fans. Kyseistä spesifikaatiota on käytetty ohjeena opinnäytetyössä, jotta tuulettimien PWM-hallinta onnistuisi mahdollisimman oikeaoppisesti ja tarkasti.

Tuulettimien vähimmäisvaatimukset on määritelty seuraavasti:

Käyttöjännite:

- 12 V \pm 5 %.

Virranotto:

- enintään 1,5 A, kun käyttöjännite on 12,6 V.

Käynnistysvirta:

- enintään 2,2 A 1,0 sekunnin ajan, kun käyttöjännite on 12,6 V.

Kierrosluvun lähtösignaali:

- 2 pulssia kierrosta kohden
- lähtösignaaliin tyyppi Open-collector tai open-drain-tyyppinen
- emolevyllä ylös veto 12 V:iin saakka (enintään 12,6 V).

PWM-taajuus:

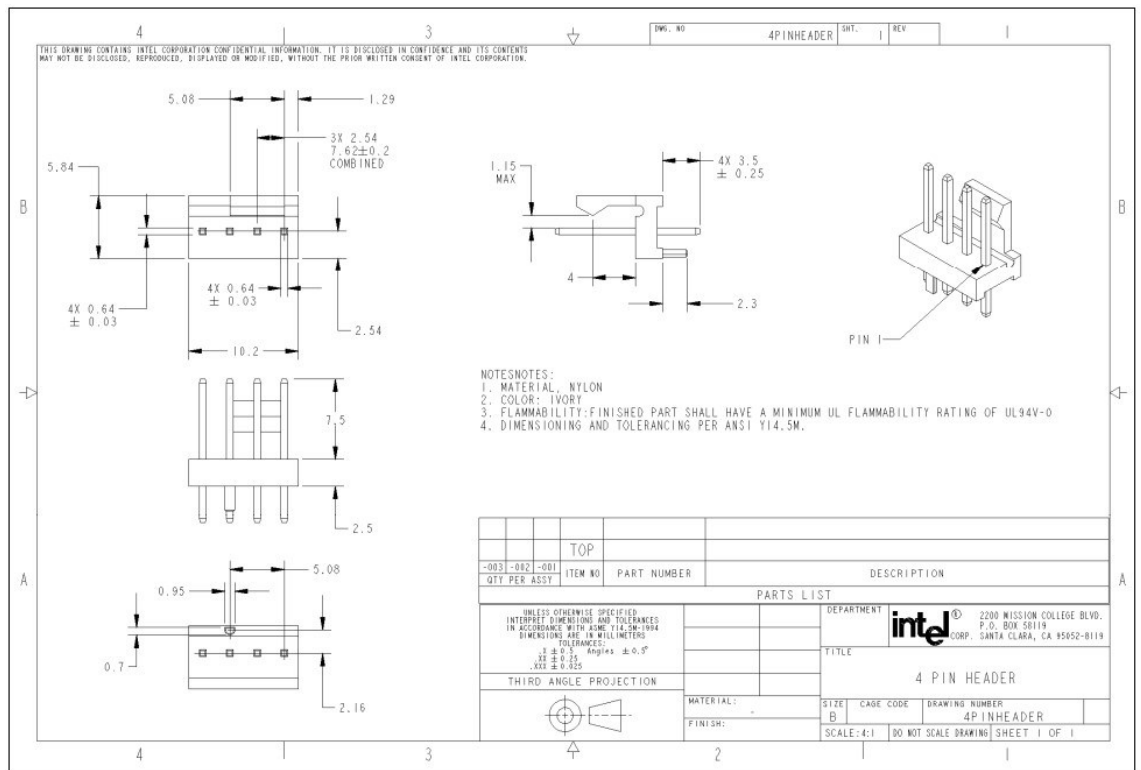
- tavoitesignaali: 25 kHz
- hyväksyttävä signaali: 21–28 kHz
- loogisen 0-tason maksimijännite: 0,8 V
- virranotto: enintään 5 mA
- jännite: max. 5,25 V. [4, s. 9.]

Spesifikaatiossa määritellään myös tuulettimien nopeuden vastetta PWM -ohjaussignaaliin ja toimintaa minimikierrosluvun alapuolella, mutta opinnäytetyössä näitä asioita ei käsitellä. Myös liittimien pinnijärjestys ja johdotuksen värit on määritelty spesifikaatiossa, mikä on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. Liittimen pinnijärjestys [4, s. 19].

Pinni	Toiminta	Johdon väri
1	Maa	Musta
2	12 V	Keltainen
3	Kierrosnopeuden tunnistus (Sense)	Vihreä
4	Ohjaus	Sininen

Osassa tuulettimissa käytetään mainittua värijärjestystä, mutta osa valmistajia käyttää vain mustia johdinvärejä esteettisistä syistä. Kuvassa 5 on 4-pinniselle tuuletinliittimelle määritellyt mitat.



Kuva 5. 4-pinninen tuuletinliitin [4, s. 25].

4- ja 3-pinniset tuuletinliittimet ovat muuten samanlaisia, mutta 3-pinnisestä puuttuu 1 pinni ja se on täten hieman lyhyempi. Eri pistokkeilla olevat tuulettimet voidaan kytkeä kumpaakin tuuletinliittimeen, mutta ohjaustapa rajoittuu kyseisessä tapauksessa pelkästään jänniteohjaukseen. [4.]

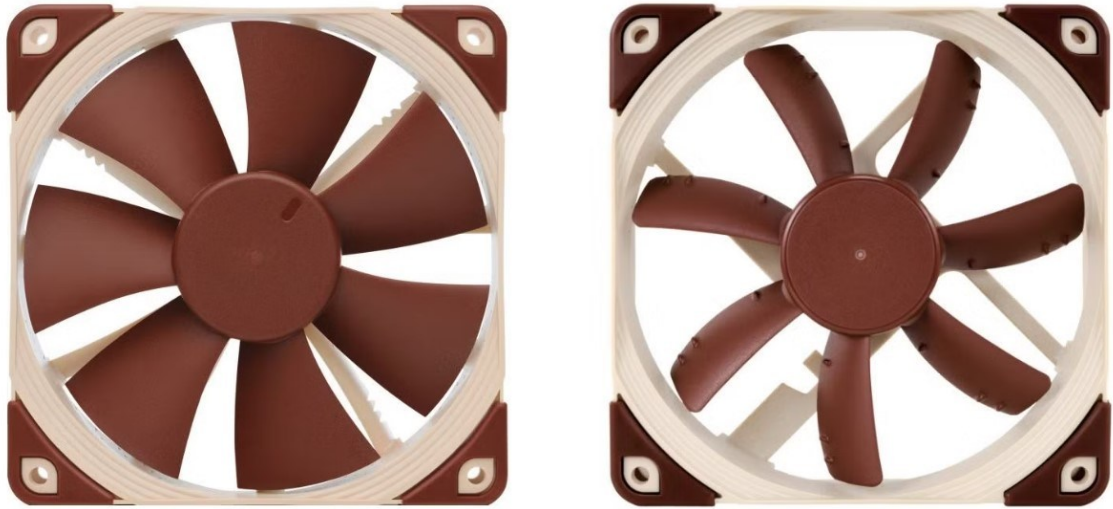
2.2.2 Tuuletintyyppit

Tietokonekotelotuulettimet voidaan jakaa kahteen kategoriaan:

ilmavirtausoptimoidut tuulettimet ja korkeaan staattiseen paineeseen optimoidut tuulettimet (Airflow optimized & High static pressure optimized).

Ilmavirtausoptimoidut tuulettimet on suunniteltu liikuttamaan ilmaa vapaassa tilassa ilman esteitä. Korkeaan staattiseen paineeseen optimoidut tuulettimet on suunniteltu tuottamaan korkea staattinen paine, jotta ne pystyvät puhaltamaan ilmaa jäähdytysrivaston tai suodattimien läpi. Nimitykset on käännetty vapaasti eikä ne ole vakiintuneita termejä.

Kyseiset tuuletintyyppit on suhteellisen helppo eritellä toisistaan ulkonäön perusteella. Korkeaan staattiseen paineeseen optimoiduissa tuulettimissa lavat ovat lähempänä toisiaan ja leveämmät. Sen sijaan ilmavirtausoptimoiduissa tuulettimissa lavat ovat erillään toisistaan ja kapeammat, kuten kuvasta 6 voi huomata.



Kuva 6. Vasemmalla korkean paineen optimoitu tuuletin ja oikealla ilmavirtausoptimoitu tuuletin [5].

Tuulettimien erot on helppo huomata, vaikka ne ovatkin samalta valmistajalta. Vasemmalla lavat ovat paljon leveämmät, joten tuuletin pystyy tuottamaan enemmän ilmanpainetta.

2.2.3 Ominaisuudet

Kotelotuulettimilla on lukuisia ominaisuuksia, mikä vaikuttaa niiden toimintaan ja ulkonäköön. Nämä ominaisuudet tulee ottaa huomioon käyttötarkoitusta ajatellessa, jotta toiminta olisi optimaalista. Näihin ominaisuuksiin lukeutuvat:

- tuulettimen koko (halkaisija ja paksuus)
- tuulettimen pyörintänopeus
- tuulettimen lapojen ja rungon suunnittelu
- tuulettimen laakerityypit
- tuulettimen väri ja valaistus
- tuulettimen pistokkeen tyyppi.

Kotelotuulettimia on useita eri kokoja yleensä 40–200 mm halkaisijaltaan ja 10–30 mm paksuudeltaan. Tämä mahdollistaa, että jokaiseen käyttötarkoitukseen löytyy sopiva tuuletin. Kuvassa 7 on yleisimpiä tuulettinkokoja, joita käytetään tietokoneissa.



Kuva 7. Eri tuulettinkokoja [6].

Kooltaan 40 mm:n tuulettimet ovat usein käytössä 1U-räkkilaitteissa, sillä ne mahtuvat huomattavan pieneen tilaan, mutta huonona puolena näissä on suuri meluhaitta.

Erikokoisilla tuulettimilla on erilaiset maksimipyörintänopeudet, ja mitä pienempi tuuletin, sitä suurempi pyörintänopeus sillä pitää olla, jotta tuuletin pystyy tuottamaan tarpeeksi ilmavirtaa. Pyörintänopeudella on myös vaikutus ääneen, ja valmistajat pyrkivät minimoimaan äänen tuottoa erilaisilla tavoilla, esimerkiksi materiaali- ja moottorivalinnoilla ja lavan suunnittelulla. Kuvassa 8 on nähtävillä

Noctuan käyttämä Inner Surface Microstructure -teknologia, joka heidän mukaansa parantaa tuulettimen tehokkuutta positiivisella tavalla [7].



Kuva 8. Noctuan käyttämä (Inner Surface Microstructure) -teknologia [7].

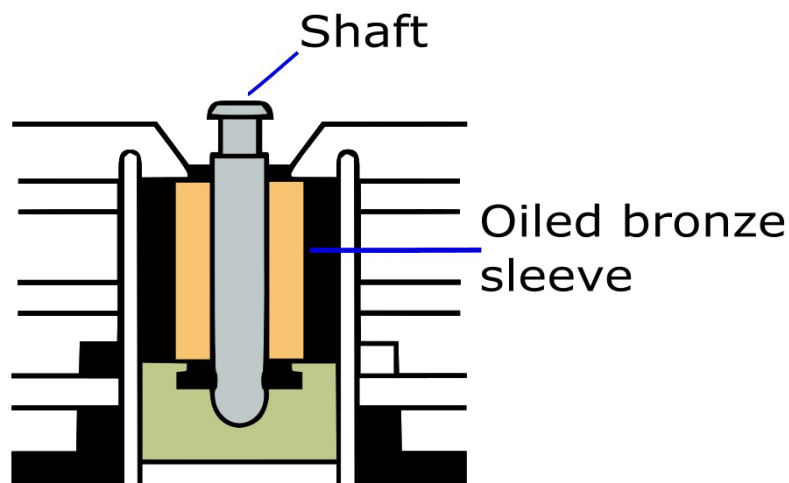
Tuulettimet on usein valmistettu muovista ja sen sekoitteista.

Materiaalivalinnalla voidaan vaikuttaa tuulettimen ominaisuuksiin esimerkiksi, joustavuuteen ja lavan epämuodostumiseen korkeilla pyörimisnopeuksilla. Markkinoilla on myös metallisia tuulettimia, mutta nämä ovat todella kalliita ja harvinaisia.

2.2.4 Laakerityypit

Erilaisilla laakerityypeillä on myös vaikutus tuulettimen äänentasaan ja käyttöikään. Eniten käytetyt laakerityypit kotelotuulettimissa on liukulaakeroitu, urakuulalaakeroitu ja hydrodynaaminen laakeroitu. On myös erikoisempia laakerointitapoja kuten magneettilaakeroitu, jossa akselia kannatellaan magneettien avulla.

Liukulaakerointi on kustannustehokas valinta. Liukulaakeri koostuu kahdesta osasta: kiinteästä korirenkaasta (ulkorengas) ja pyörivästä akselista (sisärenkas), ja näiden kahden renkaan välissä on ohut voitelukalvo, joka koostuu öljystä tai rasvasta. [8.] Kuvassa 9 on esimerkki liukulaakeroidusta tuulettimesta.

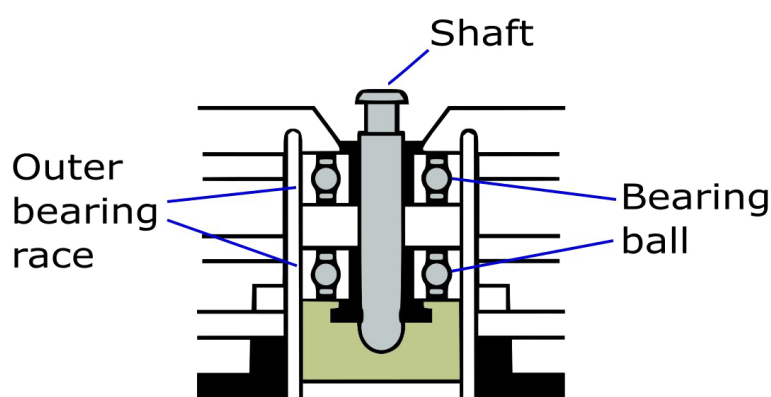


Kuva 9. Liukulaakeroidun tuulettimen läpileikkaus [9].

Liukulaakeroidun tuulettimen käyttöikä on noin 30 000–40 000 tuntia ja käytön alussa saattavat olla jopa äänettämiä. Kun käyttötunnit alkavat kasvamaan, niiden äänitaso saattaa nousta. Liukulaakeroidut tuulettimet saattavat olla myös herkkiä asennustavalle, mutta yleisesti niitä suositellaan asennettavaksi pystysuuntaisesti. [10.]

Kuulalaakeri koostuu pienistä kuulista, jotka pyörivät kahden laakeripesän välissä, ja kuvassa 10 on esimerkki kuulalaakeroidusta tuulettimesta. Kuulien tarkoitus on vähentää kitkaa ja tarjota tukea radiaalisille ja aksiaalisille kuormille. Kuulalaakeri koostuu viidestä osasta:

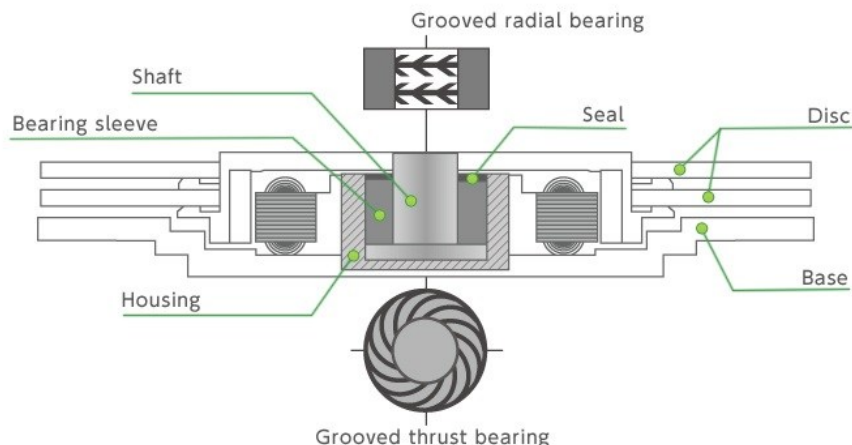
- sisärenkas, pyörivä osa, johon kiinnittyy akseli
- ulkorengas, ura kuulia varten
- pidike, joka erottaa kuulat ja estää niiden putoamisen laakerista
- kuulat, erottaa ulko- ja sisärenkaan toisistaan
- voiteluaine, joka vähentää kitkaa, kulumaa ja estää ruosteen muodostumisen [11].



Kuva 10. Kuulalaakeroidun tuulettimen läpileikkaus [9].

Kuulalaakeroidun tuulettimen käyttöikä on noin 60 000–75 000 tuntia, ja kuulalaakerointi on hyvä valinta tuulettimen laakeroinniksi. Kuulalaakerit ovat monikäyttöisiä, ja ne voidaan asentaa mihin asentoon tahansa. [10.]

Hydrodynaamisten laakereiden toiminta perustuu siihen, että ohut nestekalvo, yleensä öljy, luo voitelevan kerroksen pyörivän akselin ja laakeripinnan välille, toisin kuin normaalit laakerit, jotka nojautuvat pyörivien elementtien käyttöön. Akseli ja laakeripinta eivät tule kosketuksiin keskenään, mikä vähentää kitkaa ja kulumista. Tämä parantaa käyttöikää ja suorituskykyä. [12.] Kuvassa 11 on esimerkki hydrodynaamisesta laakerista.



Kuva 11. Hydrodynaamisen laakerin läpileikkaus [13].

Hydrodynaamiset laakerit vaativat erittäin tarkkoja valmistustoleransseja ja täten ovat kalliimpia valmistaa kuin muut laakerityypit. Hydrodynaamisilla laakeroiduilla tuulettimilla on pisin käyttöikä arviolta 300 000 tuntia, ne ovat hiljaisempia kuin muut laakerit, ja ne voidaan asentaa mihin asentoon tahansa. [10.]

3 Komponentit

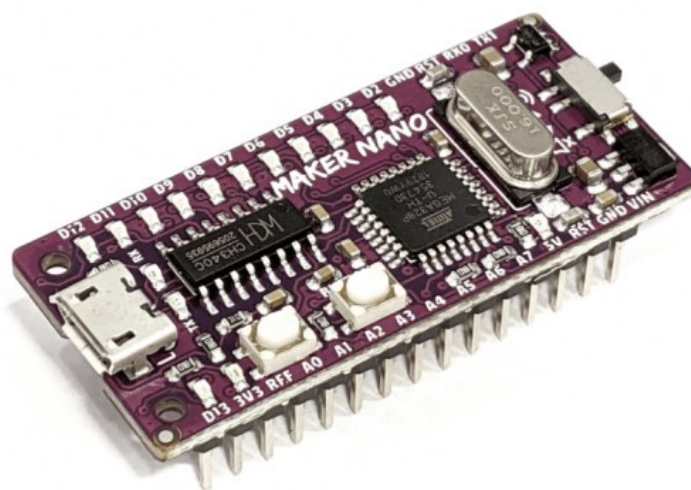
Luvussa käydään läpi projektiin valitut komponentit ja syyt niiden valintaan. Tavoitteena on tehdä projekti mahdollisimman halvalla ja käyttää komponentteja, joita löytyy koulun laboratoriosta, suomalaisista verkkokaupoista tai kivijalkaliikkeistä. Suurin osa komponenteista on hankittu Partco-liikkeestä riittävän valikoiman, nopean toimituksen ja kilpailukykyisten hintojen takia. Loput komponenteista on saatu käyttöön Metropolian elektroniikan laboratorion varastosta.

3.1 Mikrokontrolleri

Mikrokontrollerille asetettiin muutamia vaatimuksia, kun projektille etsittiin sopivaa mallia. Sen pitäisi olla mahdollisimman halpa, pieni, sisältää tarpeeksi IO-pinnejä ja olla yleisessä käytössä, jolloin vianselvitys ja käytettävyys olisi

mahdollisimman helppoa. Tämä rajasi vaihtoehtoja Arduino-tuoteperheeseen ja sen klooneihin.

Mikrokontrolleriksi valikoitui Cytron ARDUINO NANO: Maker Nanon. Maker Nano käyttää samaa IO-pinni layoutia, mikrokontrolleria (ATmega328P) ja ohjelmointiympäristöä (Arduino IDE:tä) kuin Arduino Nano. Kuvasta 12 voi tarkastella Maker Nanon ulkonäköä.



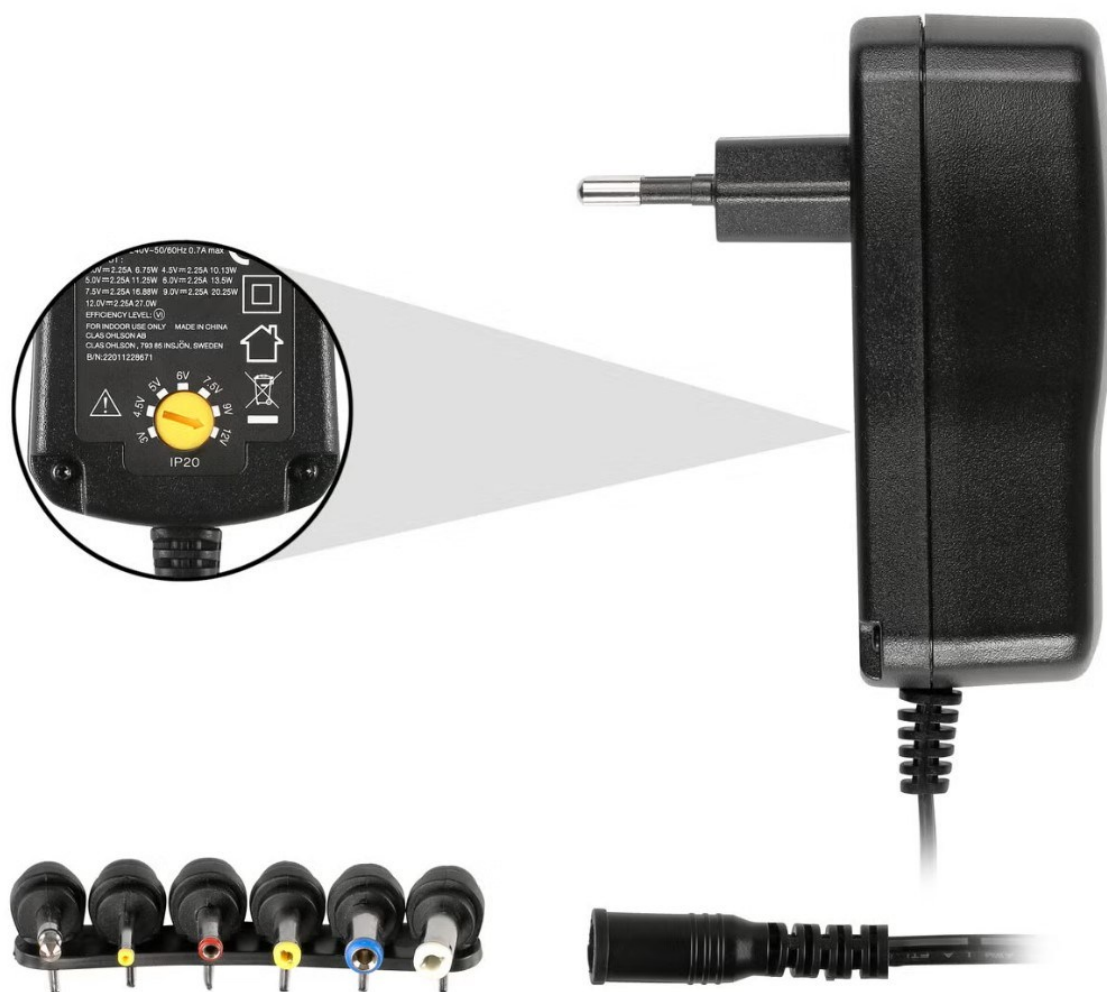
Kuva 12. Cytron ARDUINO NANO: Maker Nano [14].

Parannuksia verrattuna Arduino Nanoon ovat 5 V:n jänniteregulaattori laajemmalla sisääntulojännitealueella (7–30 V versus 7–12 V), 12 integroitua lediä pinneissä D2–D13, ohjelmitava painike sekä piezo-summeri. Integroidut ledit osoittautuivat erittäin hyväksi ominaisuudeksi koekytkentälevyn ja ohjelmointitestauksen aikana, sillä ledien avulla oli helppo selvittää, onko haluttu IO-pinni aktivoituna ja kuinka suurella käytöllä. Maker Nano on Arduino Nanoa hieman suurempi, mutta sillä ei ole vaikutusta piikkirimojen sijaintiin,

joten Arduino Nanolle tehdyt lisälevyt ja luodut mallit piirilevy-suunnittelusovelluksissa toimivat myös Maker Nanolle.

3.2 Virtalähde ja tuuletinliittimet

PWM-tuuletinhubi saa käyttöjännitteensä yleismallisen 12 V:n virtalähteen avulla, josta on myös mahdollista valita lähtöjännitteen taso ja DC-pistokkeiden kokoa. Kuvassa 13 on esitelty valittu virtalähde.

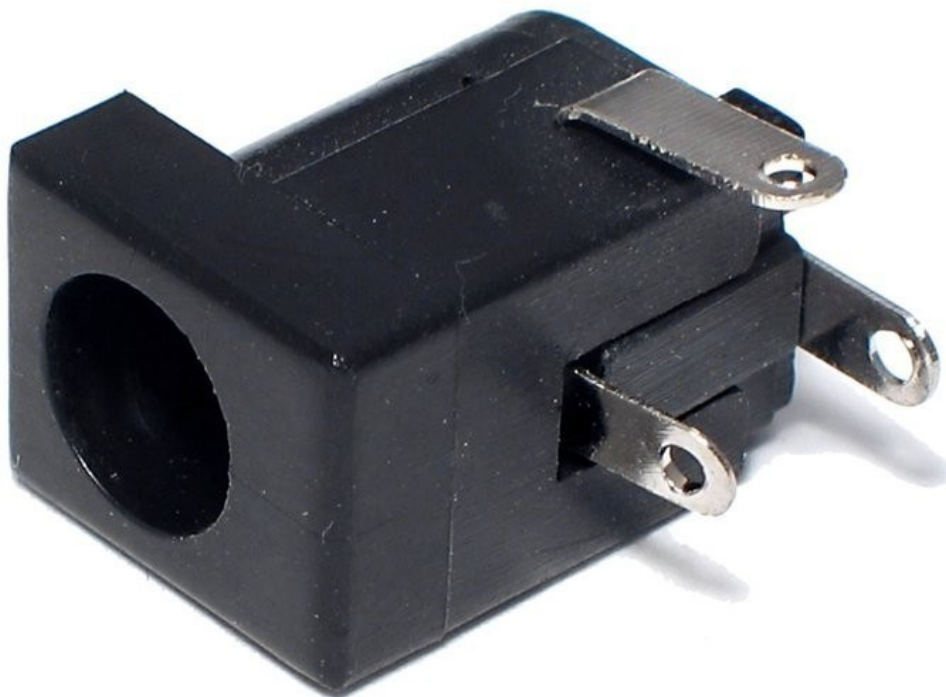


Kuva 13. 12 V:n virtalähde. [15].

Markkinoilta löytyy todella paljon eri tehoisia virtalähteitä, mutta valitsemani virtalähde oli parhaalla teho-hintasuhteella. Virtalähteen enimmäisteho on 27 W

riippumatta valitusta käyttöjännitteestä, ja tämä riittää projektin käyttötarkoituksen huomioiden erittäin hyvin.

Piirilevylle asennetaan tätä varten 12 V:n DC-runkoliitin. Kuvassa 14 valittu malli on suunniteltu juotettavaksi piirilevyyn kiinni.

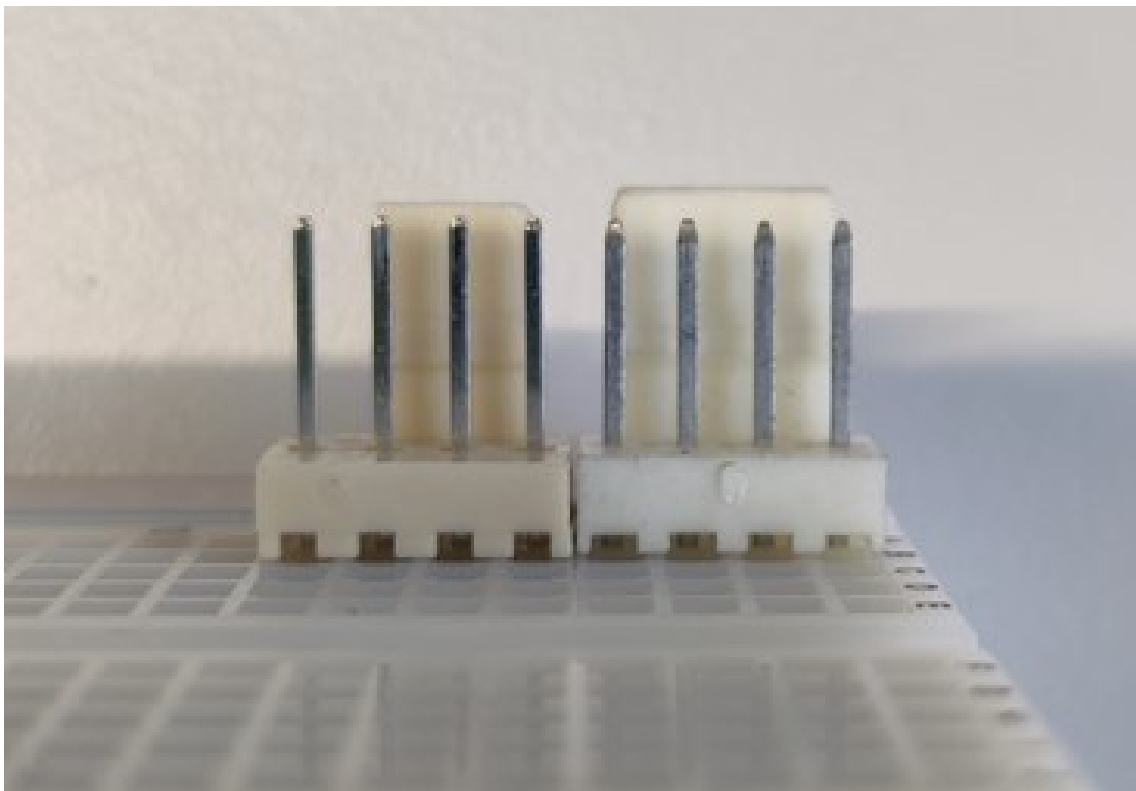


Kuva 14. DC-runkoliitin [16].

Runkoliittimiä ja pistokkeita on erikokoisia, ja tässä projektissa päädyin 2,5/5,5 mm:n kokoiseen liittimeen, sillä virtalähde ja runkoliitin olivat samaa kokoa.

PWM-tuuletinhubissa on tarkoitus käyttää tietokoneisiin tarkoitettuja kotelotuulettimia. Intelin spesifikaatiossa on mainittu, että Molex 47053–1000 tai muu vastaava on sopiva liittintyyppi 4-pinniselle tuuletinpistokkeelle. Kyseisiä liittimiä löytyy verkkokaupoista, mutta niiden toimitusajat olivat vähintään neljä kuukautta, joten niiden tilaaminen oli poissuljettu vaihtoehto. Partcolta löytyi melkein vastaava liitin, mutta lukitussalpa oli koko liittimen pituinen eikä 5,08 mm:n pituinen kuten spesifikaatiossa vaaditaan. Muuten liittimet olivat identtisiä Intelin spesifikaation kanssa, joten päätin edetä kyseisillä liittimillä ja muokata

niitä, jotta niistä tulee yhteensopivat tuuletinpistokkeille. Kuvasta 15 voi tarkastella liittimien eroja muokatun ja alkuperäisen välillä.



Kuva 15. Muokattu liitin vasemmalla ja muokkaamaton liitin oikealla.

Liitintä piti muokata lukitussalpa lyhentämällä noin 2 mm, ja tämä onnistui mattopuukon avulla. Tuuletinpistoke istui liittimeen todella napakasti, ja samalla pistokkeen orientaatio pysyy aina samoin päin, joten pinnijärjestys ei muutu ja näin tuuletinpistoketta ei pysty asentamaan väärinpäin.

3.3 Muut komponentit

Muut komponentit ovat projektia tukevia osia, ja näihin lukeutuvat vaakatrimmeri, vastukset, ledit, lämpötila-anturi, valinta-painike, sulakepesä ja micro USB-liitin. Kyseisiä osia löytyy läpireikäkomponentteina sekä pinta-asennuskomponentteina, ja päätin käyttää läpireikäkomponentteja, jolloin kaikki käyttämäni komponentit käyttävät samaa asennustapaa. Etuna oli myös, että monia komponentteja löytyi myös koulun laboratoriosta suurina määrinä. Kuvassa

16 on esitelty osa edellä mainituista komponenteista.



Kuva 16. Muita komponentteja.

Lopullinen osamäärä varmistuu vasta kun koekytkentälevyn testaus on valmis, ja BOM (Bill of materials) löytyy liitteestä 2.

4 Koekytkentälevyn testaus ja ohjelmointi

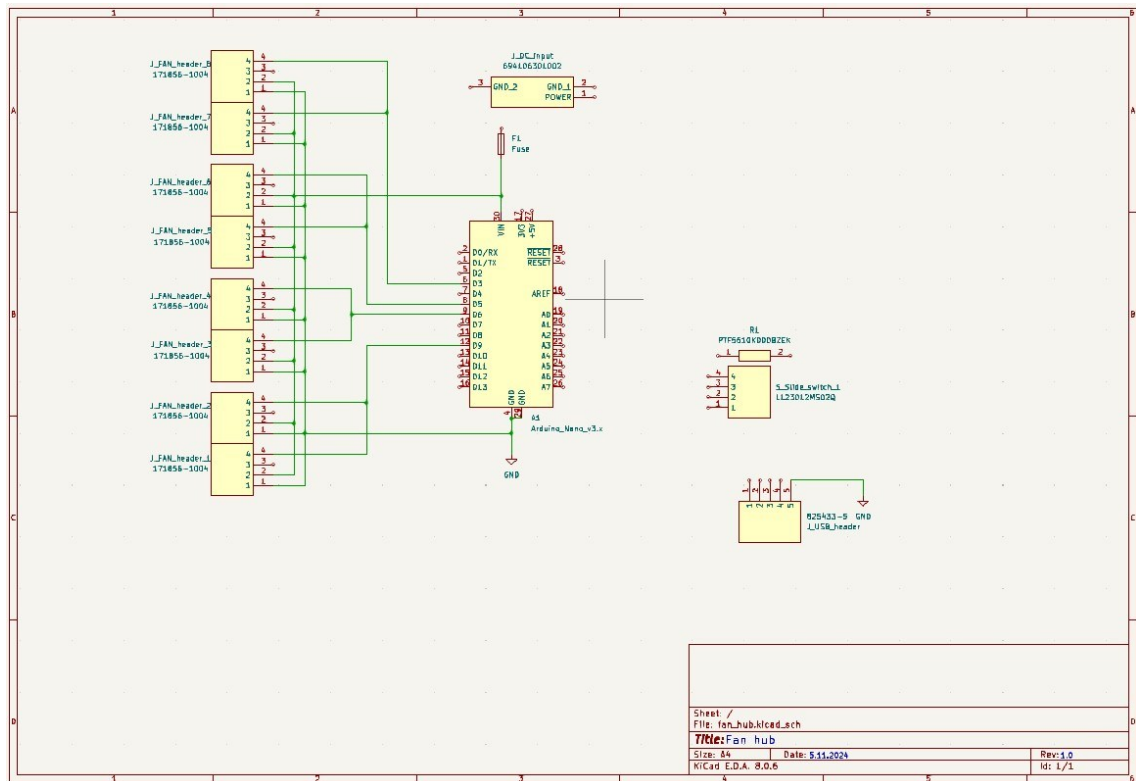
Luvussa käydään läpi koekytkentälevyn testausta ja siihen liittyvää ohjelmointia. Piirikaaviosta ja koodista oli lukemattomia eri revisioita, mutta näitä ei dokumentoitu riittävän tarkasti kuten hyviin toimintatapoihin kuuluisi ja tulevaisuudessa tähän pitää kiinnittää enemmän huomioita. Ohjelmoinnissa on hyödynnetty tekoälyä (ChatGPT), joka auttoi minua saavuttamaan haluamani funktiot ja toiminnallisuuden.

Koekytkentälevyn testausta suoritettiin Metropolian elektroniikkalaboratoriossa ja käytettyjä apuvälineitä olivat:

- DC-virtalähde ja tarvittavat kytkentäjohdot
- oskilloskooppi ja mittausjohto
- kaksi kappaletta koekytkentälevyjä
- tarvittavat komponentit.

4.1 Testauksen alkumetriit

Koekytkentälevyn testaus alkoi alustavan piirikaavion tekemisellä, jota lähdettiin jatkojalostamaan ja muokkaamaan. Kuvassa 17 on esitelty piirikaavion ensimmäinen versio.

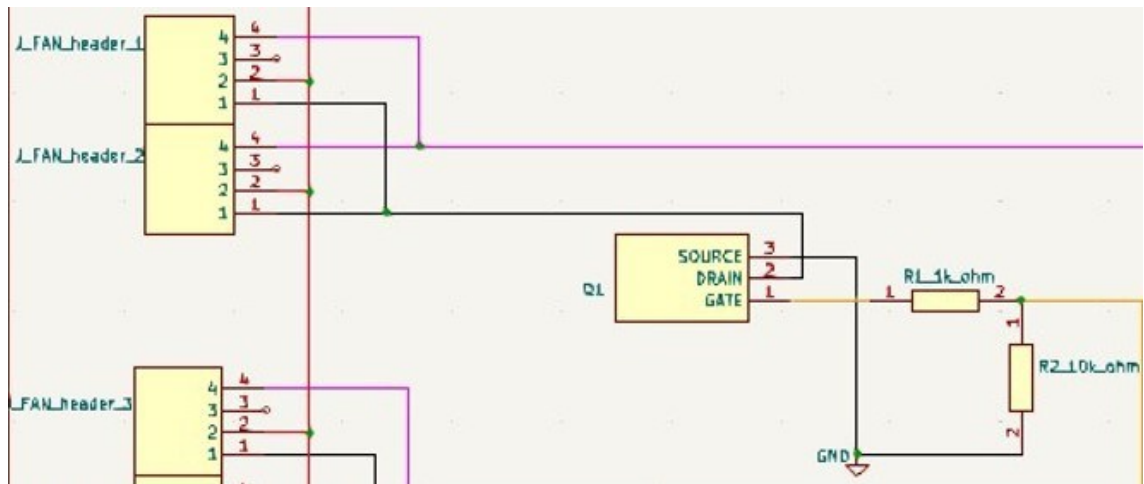


Kuva 17. Piirikaavio v.1.0.

Piirikaaviosta poiketen PWM-käyttöastetta ohjattiin trimmerillä, jota mikrokontrolleri ajoi halutuista ulostulo-pinneistä. Ajatuksena oli ohjata tuulettimia pelkästään PWM-signaalin avulla, mutta ongelmaksi ilmeni se, että kun PWM-signaalin taso laski alle 20 %:iin, tuulettimet jäivät silti pyörimään niiden pienimmälle nopeudelle, joka on noin 20 % nopeudelle ja eivät sammuneet.

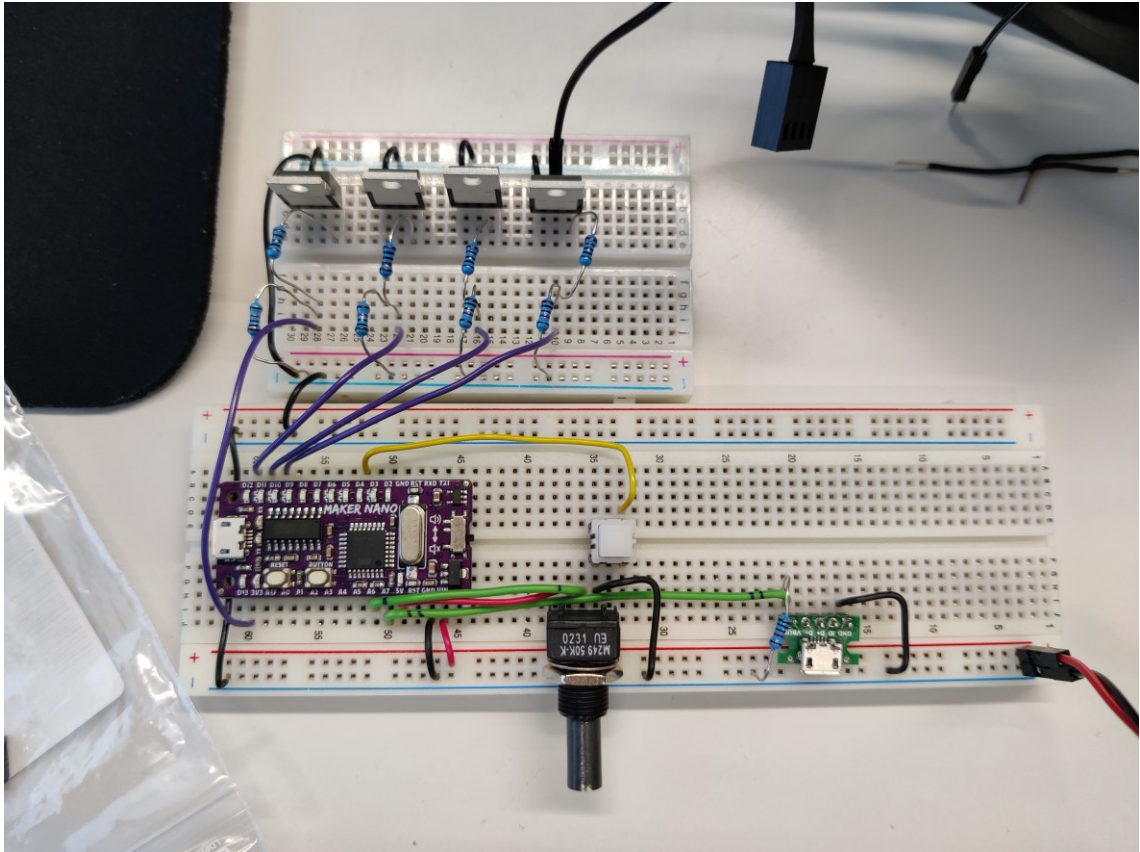
Ratkaisuna tähän ongelmaan päätin käyttää MOS-transistoria eli MOSFETiä kytkimenä, jolloin tuulettimilta katkeaisi maadoitus, kun PWM-ohjaus menee alle 20 %:n. Tämä lisää käytettäviä ulostulopinnejä, johdotusta ja muutoksia koodiin. MOSFET saa 5 voltin ohjaussignaalin mikrokontrollerilta sen GATE-pinniin,

jolloin DRAIN- ja SOURCE-pinnin välille muodostuu kanava, jota kautta virta voi kulkea ja virtapiiri sulkeutuu. Kuvassa 18 on esitelty virtapiiri MOSFET-ohjauksen osalta.



Kuva 18. Toteutettu MOSFET-ohjaus.

MOSFETin ohjauksessa on varmistuttava, että signaali ei jää kellumaan, vaan on joko looginen 1 tai 0. Tämä onnistuu alavetovastuksen avulla R2 10 kΩ, kun signaalitaso on matala eli 0, niin alavetovastus varmistaa, että piiri on maan tasossa. Täten varmistuu looginen 0, kun MOSFETiä ohjataan. Samalla on lisätty virtaa rajoittava vastus ohjauspiiriin R1 1 kΩ, jotta mikrokontrollerin ulostulopinnin maksimivirran anto, joka on 20 mA, ei ylitä. Kuvasta 19 voi tarkastella koekytkentälevyä muokattujen kytkentöjen jälkeen.



Kuva 19. Koekytkentälevy muokatuilla kytkennöillä.

Piirilevy toimii halutulla tavalla MOSFET:tien lisäämisen jälkeen. kun PWM-signaali on alle 20 %, niin MOSFET ei enää johda ja tuulettimien virtapiiri on auki. Kun PWM-ohjaus ylittää 20 %, MOSFET sulkee virtapiirin tuuletin käynnistyy ja PWM-ohjauksen avulla pystymme säätämään portaattomasti tuulettimen nopeutta.

4.2 Toimintojen lisääminen

Nyt kun perustoiminnot on saatu toimimaan, oli aika lisätä enemmän toimintoja, ja näihin lukeutuu tallennusominaisuuden lisäys, herätesignaalin vastaanotto käynnistystä varten, led-indikaattorit valitulle kanavalle ja 25 kHz:n PWM-ohjaussignaalin tuottaminen spesifikaation mukaisesti. Kyseisien ominaisuuksien integroimiseksi ChatGPT:tä käytettiin apuna ohjelmoinnissa.

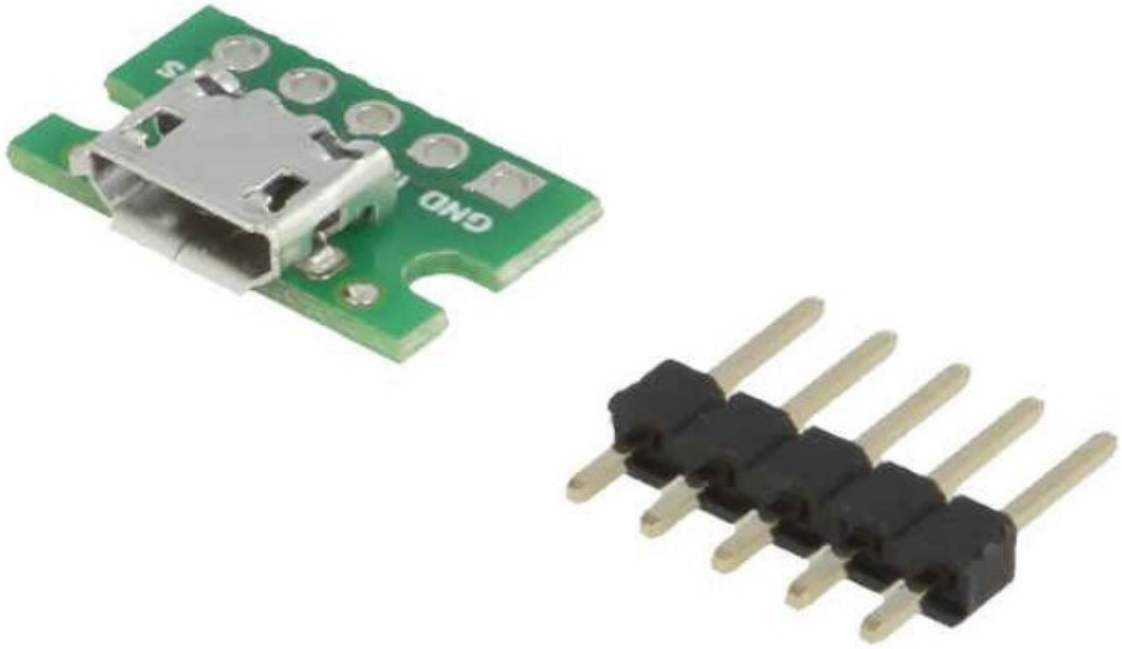
4.2.1 Tallennusominaisuus

Mikrokontrollerille oli lisättävä tallennusominaisuus, jotta se muistaisi kanavien viimeisimmän tilan ja osaisi käynnistyksen yhteydessä asettaa nämä arvot kyseisille kanaville. Tämä onnistuu tuomalla EEPROM.h-kirjasto Arduino IDE:stä. Kirjaston avulla voidaan tallentaa ohjattujen kanavien viimeisin tila ja ottaa ne arvot käyttöön, kun mikrokontrolleri käynnistyy. Tämä mahdollistaa sen, että laitteeseen voi määrittää staattisen kierrosnopeuden tietyille tuulettimille ja kanaville aina, kun laite on päällä.

4.2.2 Herätesignaali ja led-indikaattorit

Herätesignaalista käynnistyminen on tärkeä ominaisuus, sillä se mahdollistaa tuuletinhubin käynnistymisen aina kun jokin haluttu laite käynnistyy ja lämpökuorma alkaa kasvamaan käyttökohteessa. Esimerkiksi omalla kohdallani TV-tason sisällä oleva AV-vahvistin on aina päällä, kun TV:tä katsotaan, ja kyseinen laite on huomattava lämpökuorma. Järjestelmä toimii niin, että yksi osa ohjaa ja toinen toimii ohjattuna. Ominaisuus on valittavissa päälle tai pois Cytron Nanolla olevan D2-painikkeen avulla.

Helpoin tapa toteuttaa tämä oli USB-liittimellä, jonka pystyy juottamaan levyille, sillä suurimmasta osasta AV-laitteita löytyy USB-liitin ja kyseinen USB-liitin yleensä menee päälle vasta laitteen käynnistyessä. Kuvassa 20 on esiteltä valittu USB-liitin.



Kuva 20. USB-liitin piikkirimoilla [16].

Kyseinen liitin on helppo asentaa levyllä piikkirimojen ansiosta, ja käyttöön tulevat ainoastaan maadoituspinni (GND), ja jännitepinni (VBUS). Kun USB-liittimeen syötetään 5 voltia halutulta laitteelta, niin mikrokontrolleri käynnistyy ja kanavien aikaisempi tila otetaan käyttöön. Kun 5 voltin syöttö lakkaa, niin mikrokontrolleri sammuttaa ohjatut kanavat.

Led-indikaattorit kanavien valintaa varten ovat käyttöä helpottava ominaisuus. Levyllä on painike paikalla A5 kanavan vaihtoa varten, ja ledit osoittavat, minkä kanavan ohjausta ollaan muuttamassa.

4.2.3 25 kHz:n PWM-ohjaussignaali

Vaikein lisättävä ominaisuus näistä kaikista oli 25 kHz:n PWM-ohjaussignaalin luominen. Tutkiessani aihetta löysin blogikirjoituksen siitä, miten tämä 25 kHz:n PWM-signaalin aikaansaaminen onnistuu Arduinin avulla ja siihen liittyvät vaiheet ja rajoitukset. Maker Nano käyttää ATmega328p-mikrokontrolleria, ja PWM-signaali luodaan kolmen sisäisen ajastimen (Timer) avulla ja analogWrite-toiminnon avulla arvolla 127, jolloin taajuus on 490 Hz. Tämä on liian matala

ohjaustaajuus, sillä osassa testaamiani tuulettimia tämä aiheutti moottorin nakutusta. Jotta mikrokontrolleri pystyy luomaan 25 kHz:n PWM-signaalia, niin tämä vaatii sisäisten ajastimien konfigurointia rekisterien avulla. Rekisterit on konfiguroitu seuraavanlaisesti:

Timer 1 on 16 bittinen, korkearesoluutioinen PWM-timer

- peruskellontaajuus: 16 MHz
- käytetyt pinnit: 9 ja 10
- resoluutio: 16-bittinen (0–65535)
- kellokonfiguraatio: ei esiskaalausta, kellontaajuus syötetään suoraan laskurille
- korkein arvo (ICR1): 320 (65535 sijasta)
- käyttöasteen hallinta: OCR1A = pinni 9, OCR1B = pinni 10
- 25 kHz:n PWM-signaalin luominen:

$$Jakso = \frac{2 * ICR1}{kellontaajuus} = \frac{2 * 320}{16\,000\,000} = 40\mu s$$

$$Taaajuus = \frac{1}{jakso} = \frac{1}{40 * 10^{-6}} = 25\,kHz$$

Timer 1:n kohdalla käytetään Mode 10 (Phase correct PWM with ICR1 as TOP) -toimintoa. Laskuri laskee ICR1 saakka eli 320, jonka jälkeen takaisin alas, ja tämä mahdollistaa tarkan PWM-aaltomuodon.

Timer 2 on 8-bittinen, matalaresoluutioinen PWM-timer

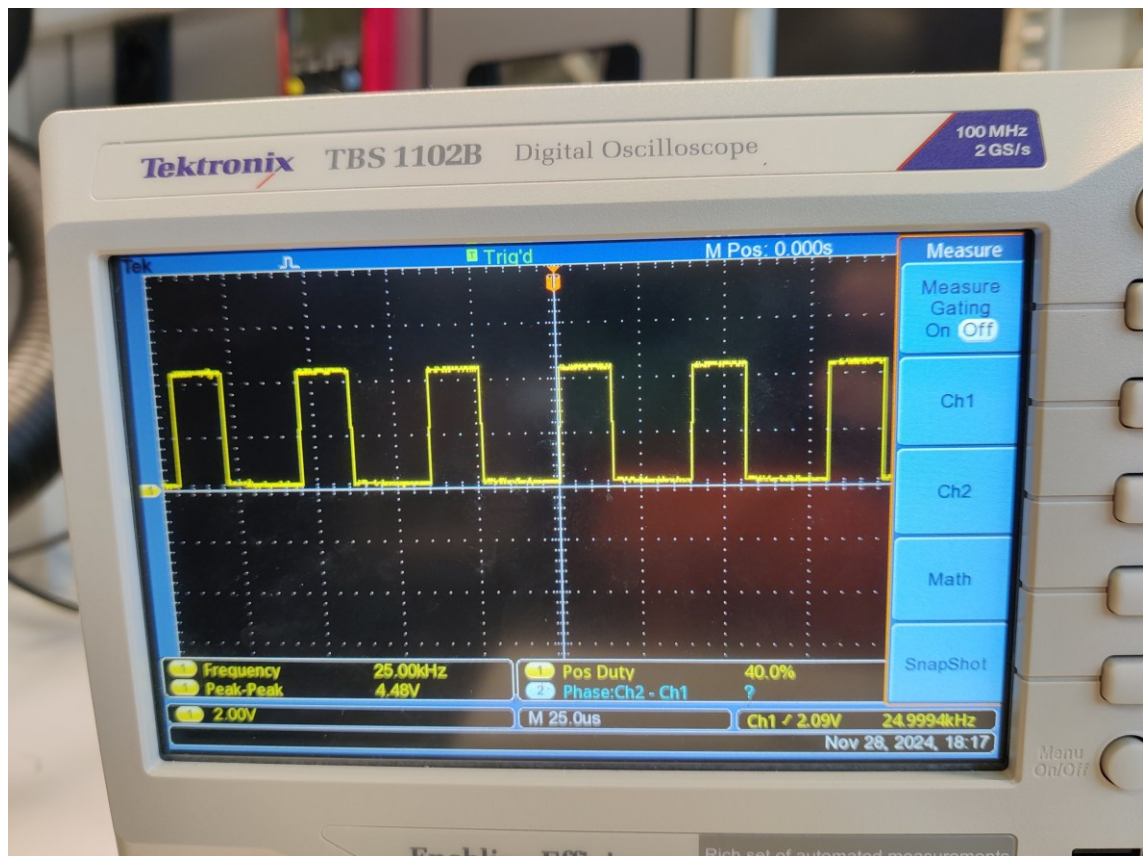
- peruskellontaajuus 16 MHz
- käytetyt pinnit: 3, pinni 11 on pois käytöstä
- resoluutio: 8-bittinen (0–255)
- kellokonfiguraatio: Esiskaalain luvulla 8
- korkein arvo (OCR2A): 79 (255 sijasta)
- käyttöasteen hallinta: OCR2B (0–79 pinni 3)
- 25 kHz:n PWM-signaalin luominen:

$$Jakso = \frac{(79 + 1)}{kellontaajuus} = \frac{80}{2\,000\,000} = 40\mu s$$

$$Taajuus = \frac{1}{jakso} = \frac{1}{40 * 10^{-6}} = 25 \text{ kHz}$$

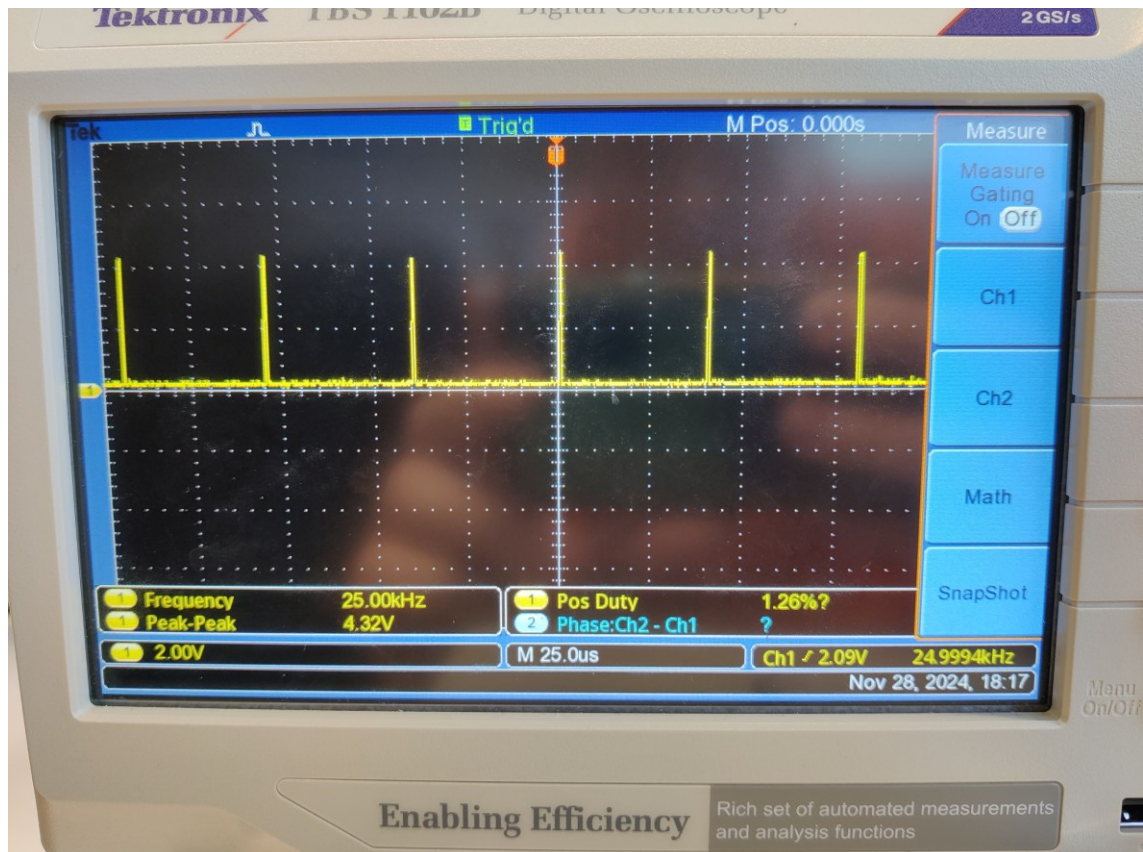
Timer 2:n kohdalla käytetään Mode 7 (Fast PWM with OCRA as TOP), joka nolaa laskurin, kun se vastaa OCR2A lukua, ja tämä mahdollistaa kustomoidun PWM-taajuuden. Peruskellontaajuus 16 MHz jaetaan esiskaalaimen luvun 8 mukaan, jolloin saadaan 2 MHz. Laskuri laskee 0–79 ja tämän jälkeen nolautuu. Timer 2:n avulla saamme myös 25 kHz:n PWM-signaalin, mutta se ei ole niin tarkka johtuen siitä, että Timer 2 laskee vain 79 saakka eikä 320 kuten Timer 1.

Huonona puolena tässä toteutuksessa on se, että siinä ei ole mahdollista käyttää pinniä 11 PWM-signaalin ulostulona, sillä Timer 2:ssa käytetyn tilan takia. Tämä ratkaisu ei haittaa käytännössä, sillä PWM-signaali jaetaan kahdelle tuuletinliittimelle. [17.] Kuvasta 21 voi tarkastella PWM-signaalin muotoa oskilloskoopilla mitatessa.



Kuva 21. 25 kHz:n PWM-signaali pinnistä D3.

Pinnit D3, D9 ja D10 ovat käytössä PWM-ulostulosignaalin ulostuloina, ja kaikista pinneistä tuli samanlaatuista signaalia. Jatkaessani testausta huomasin, että D3-pinni ledi ei sammunut koskaan täysin, vaikka PWM-signaalin arvo olisi 0 % tai ajastin olisi konfiguroitu manuaalisesti 0 %:iin. Kuvasta 22 voi tarkastella häiriösignaalia oskilloskoopilla mitatessa.



Kuva 22. D3-pinnin häiriösignaali.

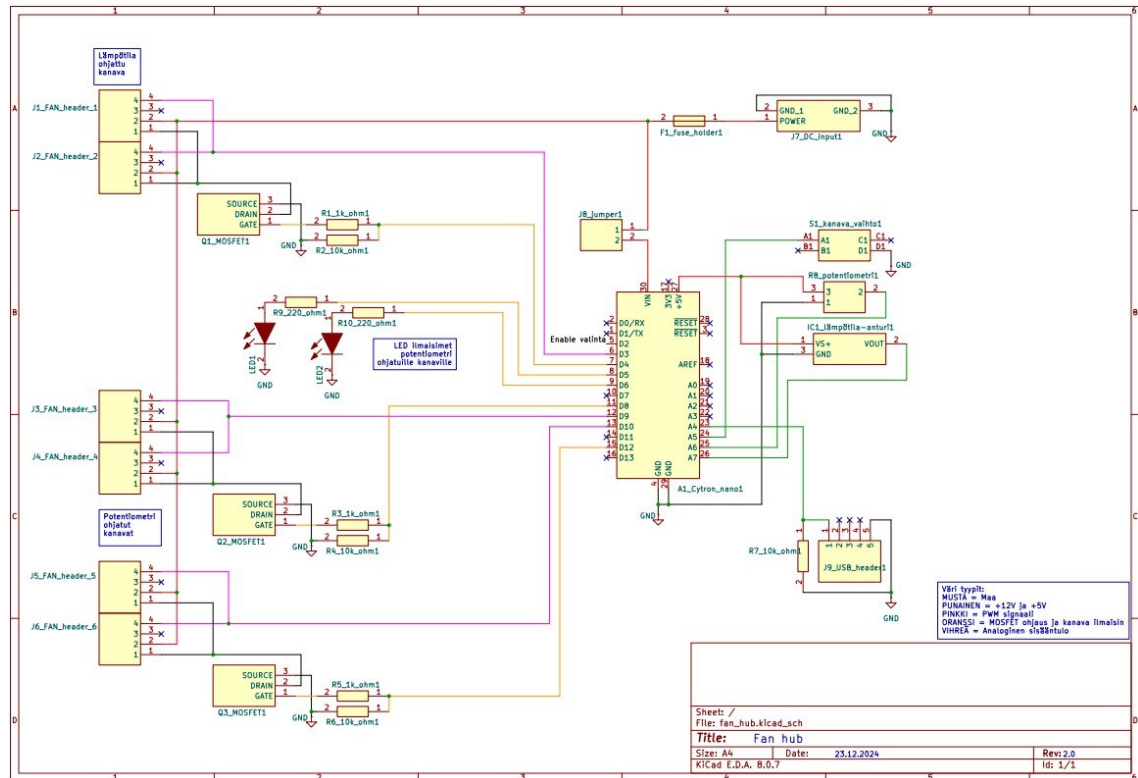
Testasin mikrokontrolleria pelkästään itsenäisesti ilman muita komponentteja, mutta häiriösignaali ei silti poistunut. Tämä luultavasti johtuu ajastimen manipulaatiosta rekisterin avulla. Tästä ei ole haittaa piirilevyn toiminnalle, sillä PWM-signaalin pyynti pitää olla vähintään 20 %, jotta MOSFET sulkee virtapiirin ja kanavassa olevat tuulettimet käynnistyvät. Lopullinen versio ohjelmakoodista löytyy liitteestä 3.

5 Piirilevyn valmistus ja 3D-tulostus

Luvussa esitellään viimeistely piirikaavio ja layout sekä käydään läpi koteloinnin suunnittelua Autodesk Fusionin avulla ja 3D-tulostamista. Koekytkentälevyn testauksen valmistuttua piirikaavio päivittyi lopulliseen versioonsa, ja jouduin tekemään kompromisseja tuuletinliittimien määrän kanssa. Mielestäni levyllä on riittävästi tuuletinliittimiä ja ne on järkevästi jaoteltu toimintojen kesken: kaksi kanavaa manuaaliseen PWM-säätöön ja yksi kanava automaattiseen lämpötilan mukaan säätävään PWM-säätöön.

5.1 Piirikaavio

Lisätoimintojen lisääminen vaikutti input- ja output-signaalien pinneihin, ja piirikaaviota piti muokata huomattavasti tämän takia. Piirikaavio onnistui mielestäni hyvin ja on selkeästi luettavissa, sillä signaalilinjat on värikoodattu, mikä parantaa luettavuutta ja toiminnalliset osat on jaettu omiin lohkoihin, kuten kuvasta 23 voi nähdä.



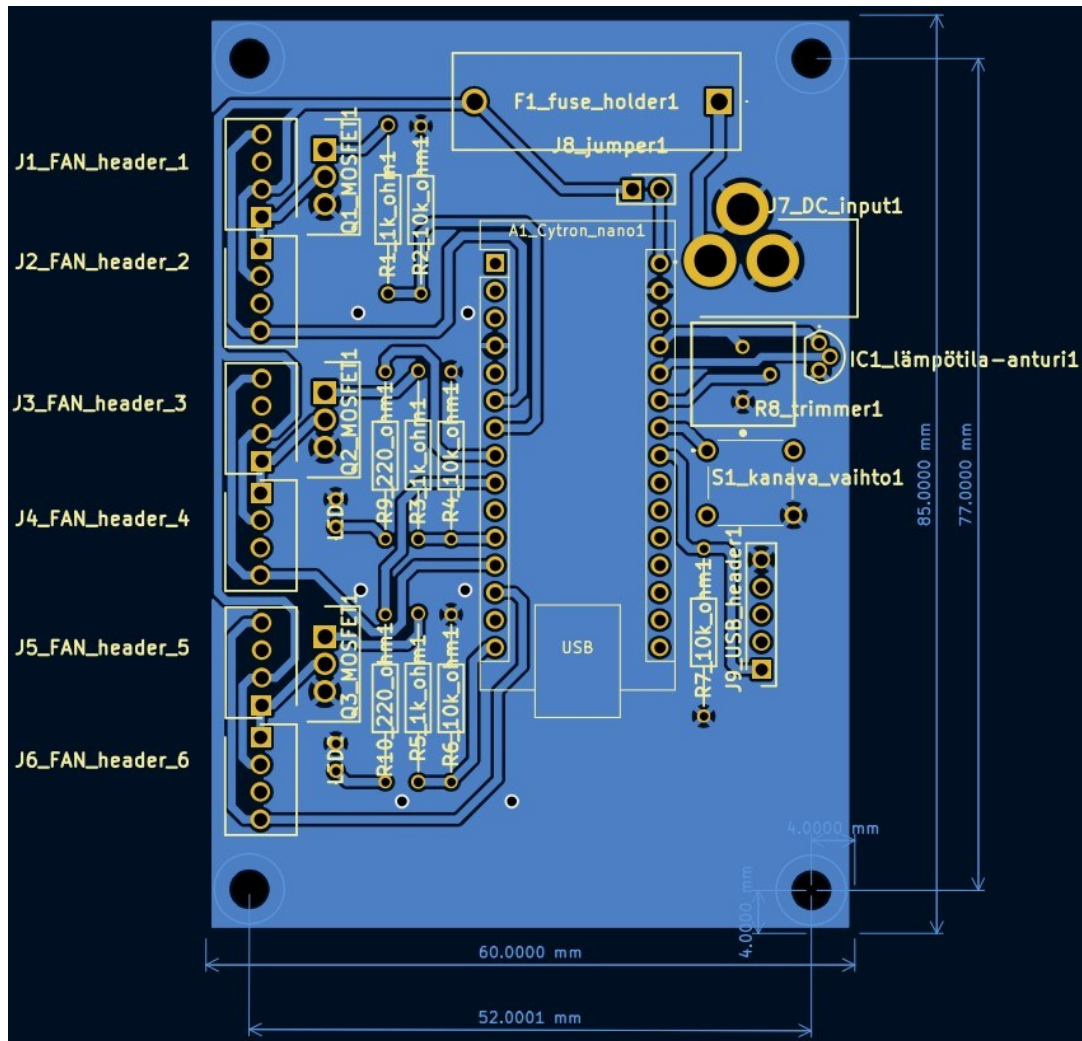
Kuva 23. Lopullinen piirikaavio, piirikaavio V1.1 löytyy myös liitteestä 1.

Piirikaavio on jaoteltu muutamaan kokonaisuuteen. Vasemmalla on tuuletinliittimet, jotka ovat ulosmenevää signaalia, keskellä on mikrokontrolleri, joka ohjaa levyn toimintoja ja oikealla on sisään tulevat signaalit piirilevylle ja mikrokontrollerille. Piirikaavion ylälaudassa on DC-sisääntulo, jonka avulla piirilevy saa tarvittavan toimintajännitteen.

5.2 Layout

Piirikaavion valmistuttua seuraava vaihe oli suunnitella piirilevyn layout eli komponenttien sijoitukset. Käytin layoutin kanssa samaa ajattelua kuin piirikaaviossa. Se on selkeästi luettavissa, sillä eri toiminnalliset osat on selkeästi lohkottu omille paikoilleen ja osakokonaisuudet on aseteltu vasemmalta oikealle samassa järjestyksessä kuin piirikaaviossa.

Layoutin kanssa haasteina olivat linjavedot muutamien osuuksien kanssa, PWM-ohjaussignaali, 12 V:n jännite ja maadoitus. Halusin erotella 12 V:n osuuden piirilevyn uloimpaan osaan ja mahdollisimman kauas muista signaalilinjoista, mutta tämä osoittautui erittäin haastavaksi, ja yhtenäisen maadoitustason aikaansaamisessa oli myös haasteita. Yhtenäisen maadoitustason aikaansaamiseksi jouduttiin käyttämään 0 Ω vastuksia tasojen yhteen liittämiseksi. Myöhemmin piirilevyä tarkasteltaessa huomattiin, että tämä oli aivan turhaa, sillä mikrokontrollerin pinnien välistä maatasot yhdistyivät yhtenäiseksi, kuten kuvasta 24 voi nähdä.



Kuva 24. Lopullinen layout.

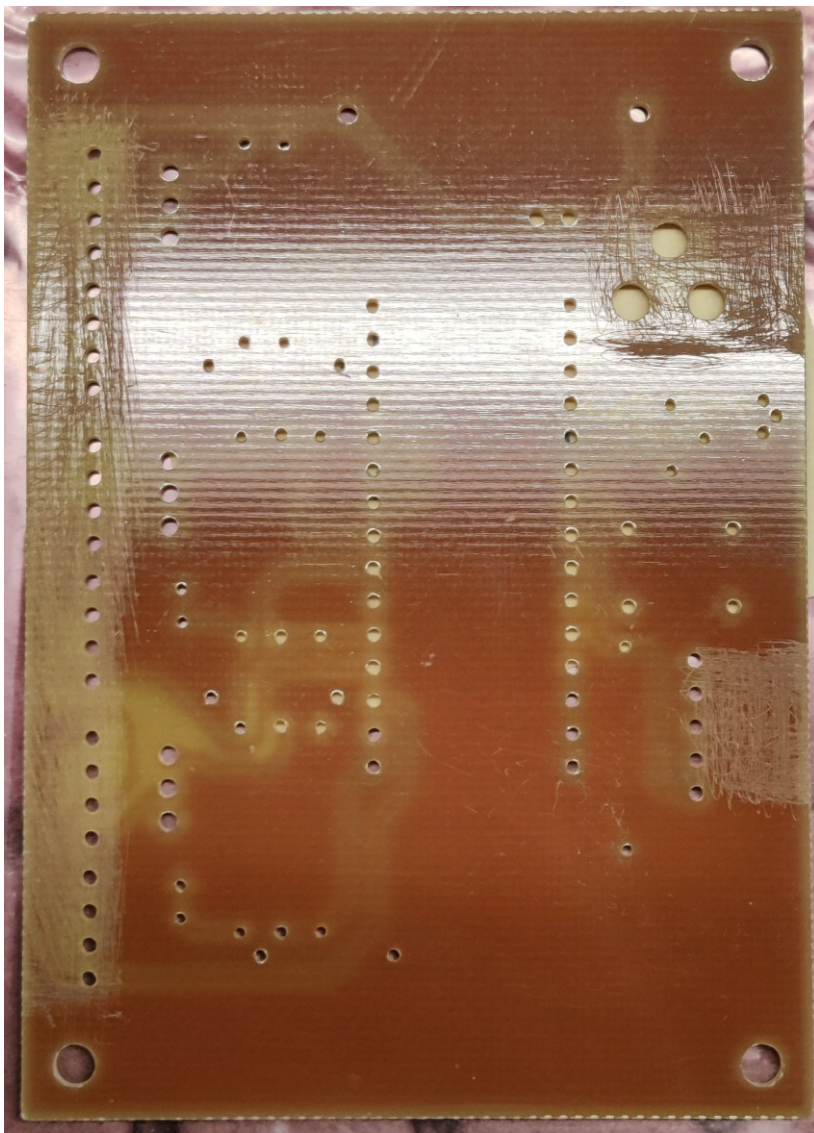
Pohjatasoa käytin maadoitustasona, ja signaalilinjat on jyrstetty tämän sisään. Tämä ratkaisu ei ole ihanteellinen, sillä suositeltavaa olisi, että maadoitustaso olisi erillinen ja mahdollisimman yhtenäinen. Joidenkin lämpöreikäkomponenttien maadoituksista olisi mahdoton juottaa kiinni komponentin alla ja täten vaatisi läpivientiä tasojen välillä maadoituksen yhdistämiseksi.

5.3 Piirilevyn valmistus

Piirilevy jyrstettiin Metropolian elektroniikan laboratorion jyrstintä käyttäen. Kiitokset kuuluvat laboratorioinsinöörille, joka suoritti jyrstinnän, sillä työaikojen vuoksi jyrstintää ei ollut mahdollista toteuttaa itse. Piirilevy on yksipuoleinen, eli

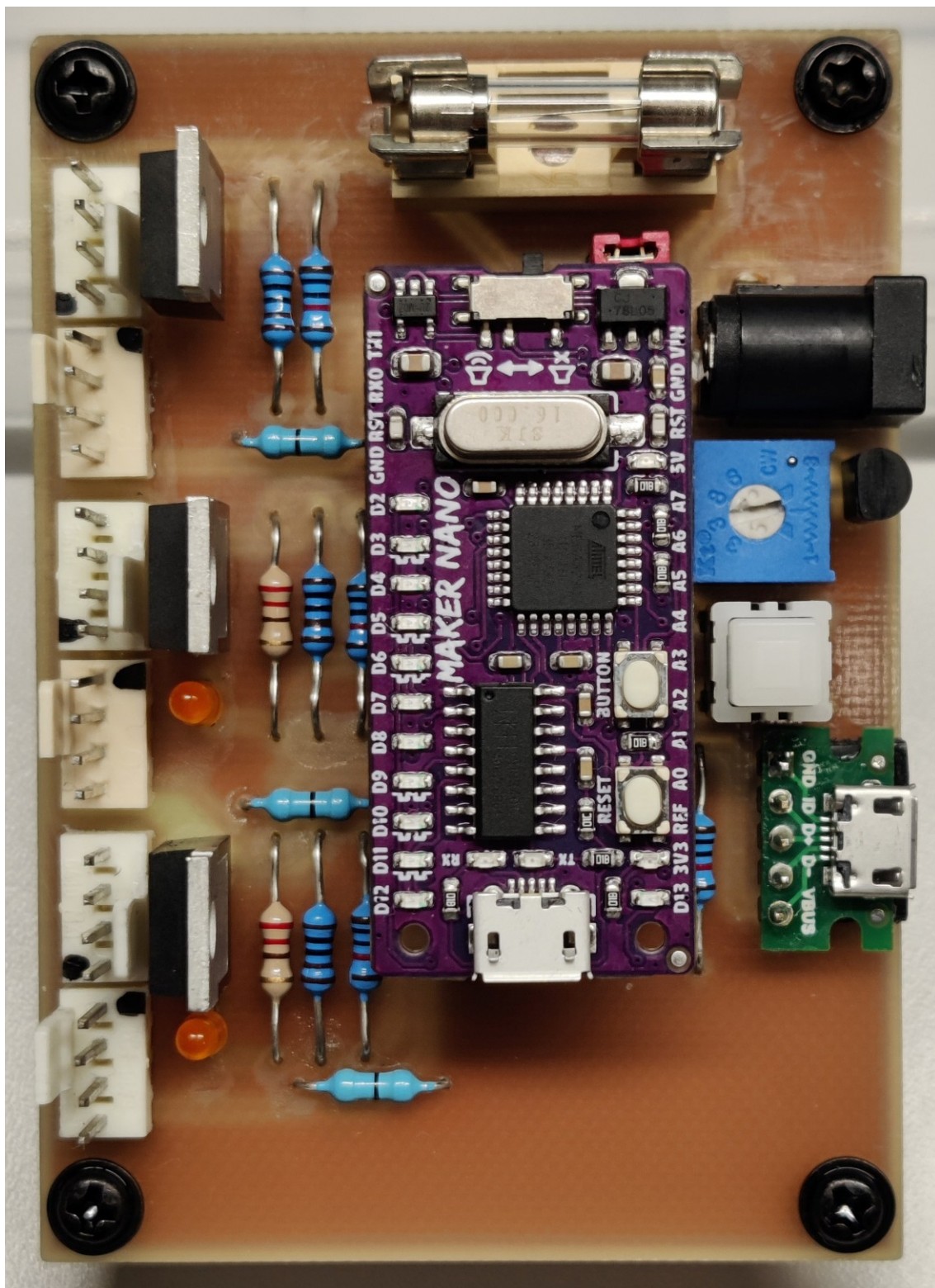
vain toisella puolella levyä on johtava kuparikerros ja toinen puoli on pinnoitettu muovilla. Piirilevyn vastaanottamisen ja alustavan tarkastelun jälkeen havaittiin useita ongelmia. USB-liitin J9 oli väärinpäin layoutissa, lämpötila-anturi IC1 signaalilinjojen varoetäisyys oli liian pieni, DC-liittimen reikiä pitää hieman pienentää juottamisen helpottamiseksi ja 0 Ω vastuksien reikien sijainteja hieman muuttaa. Mainittujen syiden vuoksi layoutista tehtiin uusi versio, ja piirilevy jrsittiin uudelleen. Laboratorioinsinööri toteutti jrsinnän saman päivän aikana.

Uuden piirilevyn vastaanottamisen jälkeen sen rakenne tarkastettiin, ja todettiin, että kaikki komponentit asettuivat oikeille paikoilleen ja juottaminen oli mahdollista ilman lisämuutoksia. Ennen juottamista haluttiin varmistaa, että komponentit, joihin kohdistuu usein mekaanista rasitusta tai vetoa, pysyvät luotettavasti kiinni piirilevyssä. Tällaisia komponentteja ovat tuuletinliittimet, DC-liitin ja USB-liitin. Kuvasta 25 näkee karhennetut pinnat ennen komponenttien liimausta.



Kuva 25. Karhennettu pinta ennen komponenttien liimaamista.

Muovipinta karhennettiin hiomapaperilla, se putsattiin isopropanolia käyttäen ja Loctite 435-pikaliimaa käytettiin komponenttien kiinnitykseen. On epätodennäköistä, että liittimet tulevat irtoamaan piirilevystä, sillä nyt ne eivät ole pelkästään juotoksen varassa. Kun liima oli kuivunut, aloitin komponenttien juottamisen piirilevyyn. Kuvasta 26 ei näy, että mikrokontrolleri ja oikosulkupala on kiinnitetty naaraspiikkirimoihin, jotta niiden käyttäminen ja vaihtaminen on helppoa, jos tarve vaatii.



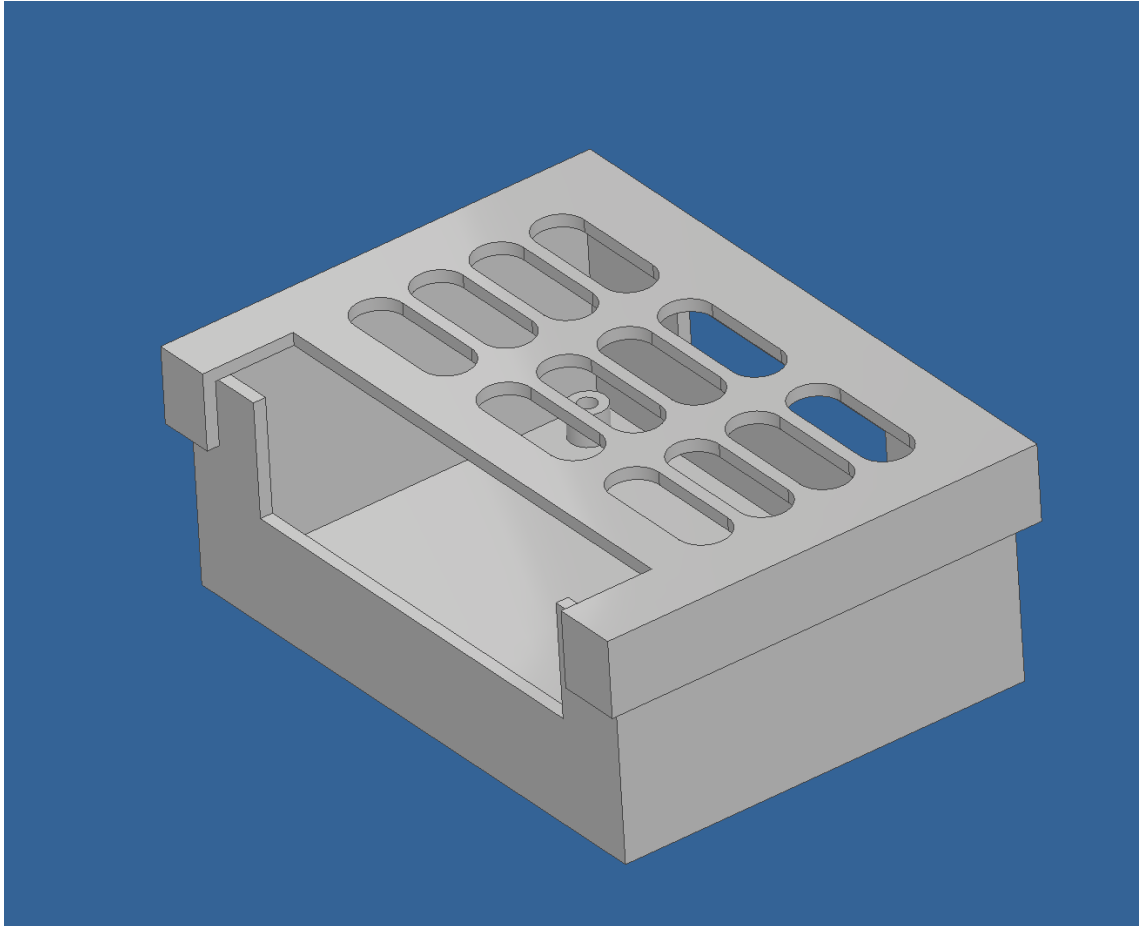
Kuva 26. Valmis piirilevy.

Kun kaikki komponentit oli juotettu piirilevyyn kiinni, oli aika testata levyn toimivuus. Aluksi irroitettiin oikosulkupala, joka erottaa mikrokontrollerin syöttöjännitteestä, ja virtakaapeli kytkettiin piirilevyyn. Tämän jälkeen tarkistettiin, että 12 V:n jännite jakautui oikein tuuletinliittimien ja piikkirimaliitännän pinneille. Kun jännitteet oli varmistettu, oikosulkupala asetettiin takaisin paikalleen, minkä seurauksena mikrokontrolleri käynnistyi onnistuneesti. Pikaisten toiminnallisuustestien perusteella voitiin todeta, että piirilevy toimii samalla tavalla kuin koekytkentälevyllä suoritetuissa aiemmissa testeissä.

5.4 3D-tulostus

Kun piirilevy oli juotettu ja alustava testaus suoritettu onnistuneesti, koteloinnin suunnittelu aloitettiin Autodesk Fusionin avulla. Koska aiempaa kokemusta 3D-suunnittelusta ei ollut, alku oli hieman hankalaa.

Kotelo koostuu kahdesta eri osasta: pohjasta ja kannesta. Pohjaan ja kanteen tulee tarvittavat aukot kaapelien kytkemisen mahdollistamiseksi ja kanteen tuuletusaukkoja, jotta piirilevy ei lämmittäisi lämpötila-anturia ja painikkeita pystyy käyttämään kannen ollessa paikallaan. Valmistunut suunnitelma on esitelty kuvassa 27.



Kuva 27. Valmis suunniteltu kotelo.

Pohjassa on neljä sylinterin muotoista kiinnityspaikkaa, joihin ruuvataan messinkiset M3-korotusruuvit, joihin piirilevy kiinnitetään M3-ruuveilla. Korotusruuvien päälle liimataan nylon-aluslevyt, jotta ei syntyisi oikosulkuja. Kannen ja pohjan välissä on jokaisella sivulla 0,5 mm:n toleranssi, jotta kansi saadaan paikalleen sen olematta liian väljä.

Kotelo tulostettiin Ultimakerin 3D-tulostimella ja käyttäen PLA-muovia. Materiaalia kului noin 50 g ja tulostusaikaa 3,5 tuntia. Tulostuksen laatuun voidaan olla tyytyväinen, sillä kaikki aukot olivat oikeilla kohdilla, piirilevy saatiin kiinnitettyä halutulla tavalla, eikä rakenteessa ollut liiallisia toleransseja tai hukkatilaa. Muutamia aukkoja jouduttiin hieman käsin muokkaamaan, mutta kyseessä oli maksimissaan 2 mm:n lisätilan tekeminen johtuen liittimien suojiin

ja vedonpoistojen koosta. Kannen kiinnitykseen käytettävät reiät porattiin myös käsin.

6 Testaus

Testaus aloitettiin varmistamalla, että piirilevy toimii asennettuna koteloon ja mikrokontrolleri kytkettynä tietokoneeseen, jolloin pystyttiin tarkastelemaan lämpötila-anturin toimintaa Arduino IDE:ssä. Piirilevy toimi pääpiirteittäin oikein, mutta toiminnassa ilmeni ongelma. Lämpötila-anturin lukemat heittelivät todella paljon, ja toisinaan lukemat olivat järkeviä. Lämpötila-anturin toimintaan vaikutti potentiometrin pyynti, ja päädyttiin tulokseen, että signaalilinja menee liian lähellä potentiometrin signaalilinjaa ja anturi ottaa todennäköisesti siitä häiriötä. Lämpötila-anturin signaalilinja todennäköisesti vaatisi suodattimen, jotta anturi toimisi luotettavasti. Tässä kohtaa insinööriyötä ongelmaa ei ehditä tutkimaan sen enempää tai tekemään toista levyä, joten käytännön testit suoritetaan tehdyllä levyllä.

Käytännön testit suoritettiin kotona tuuletinhubin tulevaa käyttöympäristöä vastaten, eli TV-tason laitteiden jäähdytyksessä. TV-tason laitteet ovat kahdessa eri tilassa: alemmassa tilassa on AV-vahvistin ja ylemmässä tilassa on PS4-pelikonsoli, kuten kuvasta 28 voi nähdä.



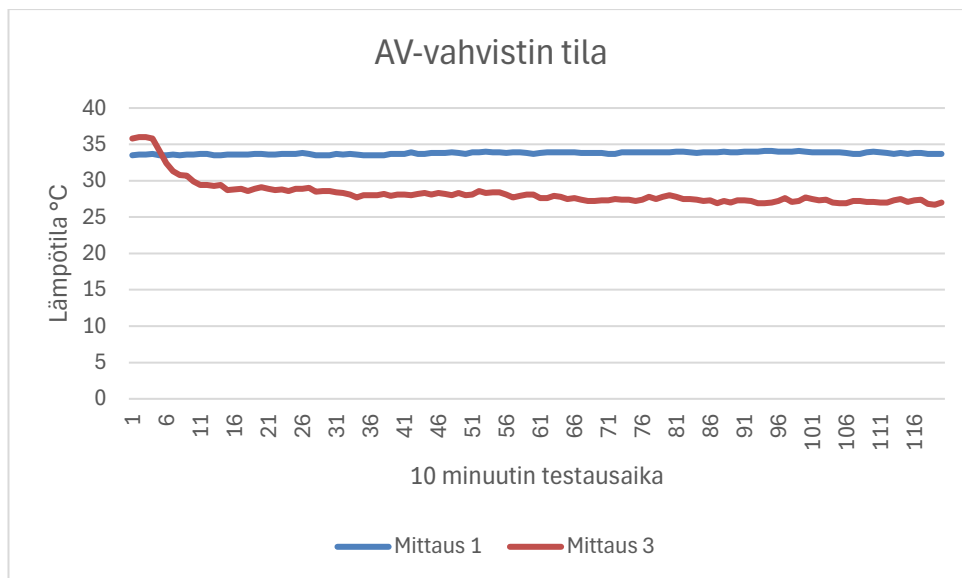
Kuva 28. Tuulettimet asennettuna TV-tasoon.

Tuulettimia varten tehtiin reiät TV-tason takaseinään käyttäen 125 mm:n reikäsahaa, ja tuulettimet kiinnitettiin käyttäen siihen tarkoitettuja ruuveja. Kumpaankin osioon asennettiin omat tuulettimet ja ne asennettiin mahdollisimman keskelle.

Seuraavaksi aloitettiin käytännön testaus ja päätettiin tehdä testit kahdella eri kuormalla. Mittaus 1 ja 3 suoritettiin katsomalla TV:tä ja lämpötila-anturi AV-vahvistimen päällä. Mittaus 2 ja 4 tehtiin pelaamalla peliä PS4-pelikonsolilla ja lämpötila-anturi PS4-pelikonsolin yläpuolella. Testit toteutettiin peräkkäisinä päivinä ilman aktiivista jäähdytystä ja aktiivisen jäähdytyksen kanssa seuraavanlaisesti:

- Laitteita käytettiin normaaliin tapaan 20 minuuttia ennen mittauksien aloitusta.
- Lämpötila-anturi teipattiin kattoon mahdollisimman keskelle ja mittapää noin 1 cm etäisyydelle katosta.
- Äänenvoimakkuus pidettiin vakiona.
- Testausaika oli 10 minuuttia ja mittausvälinä 0,5 sekuntia.
- Kun tuulettimet olivat käytössä, niiden kierrosnopeus oli asetettu noin 40 %:n käytölle / 700–800 rpm. Tuulettimien ääni ei ole havaittavissa näillä kierrosnopeuksilla.
- Huoneen lämpötila oli ennen mittauksia 21–22 °C.
- Mittalaitteena toimi UNI-T 161D -yleismittari lämpötila-anturilla.
- Mittausdata tallennettiin CSV-tiedostoon UNI-T työkalun avulla.

Mittaukset 1 ja 3 vastaavat normaali TV:n katselua, jossa lämpötila-anturi on sijoitettu AV-vahvistin tilaan. Sininen viiva on ilman aktiivista jäähdytystä ja punainen aktiivisen jäähdytyksen kanssa. Kuvassa 29 mittaustulokset on esitelty viivakaaviona.

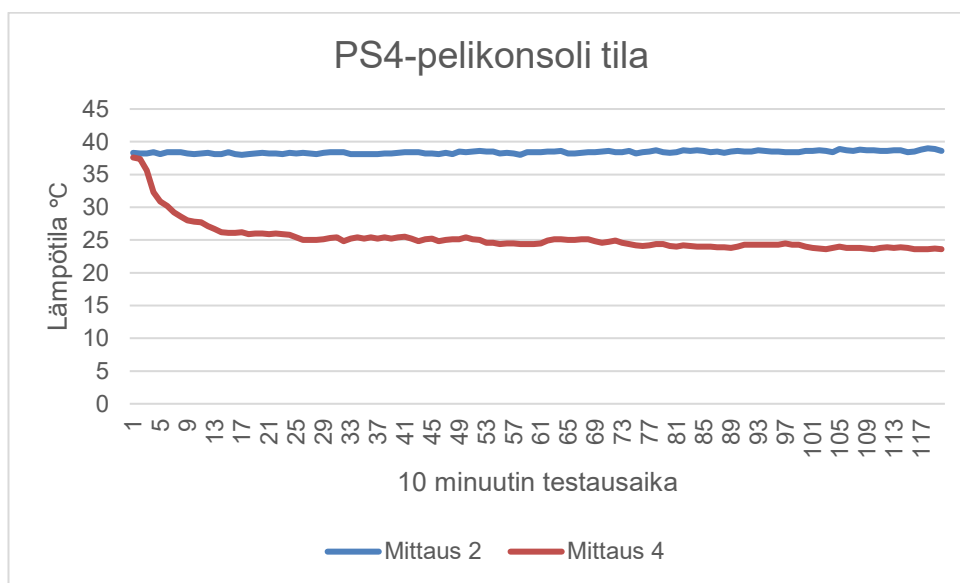


Kuva 29. AV-vahvistin tilan mittaustulos.

Kuvassa 29 näemme lämpötilan AV-vahvistin tilassa, ja lähtölämpötilojen ero johtuu todennäköisesti siitä, että mittaukset suoritettiin eri päivinä tai anturi oli hieman eri kohdassa. Lämpötilat eivät ole vaarallisen korkeita, mutta silti

huomattavasti korkeampia kuin huoneen lämpötila. Kun tuulettimet menevät päälle, lämpötila putoaa tasaisesti melkein huoneen lämpötilaan jo 10 minuutin aikana.

Mittaukset 2 ja 4 vastaavat pelin pelaamista PS4-pelikonsolilla, jossa lämpötilanturi on PS4-pelikonsoli tilassa. Sininen viiva kuvastaa tuloksia ilman aktiivista jäähdytystä ja punainen aktiivisen jäähdytyksen kanssa. Kuvassa 30 on mittaustulokset esitelty viivakaaviona.



Kuva 30. PS4-pelikonsoli tilan mittaustulos.

Kuvassa 30 näemme lämpötilan PS4-pelikonsoli tilassa. Lämpötilat ovat korkeammat, jos niitä vertaa AV-vahvistin tilaan johtuen PS4-pelikonsolin isommasta lämpökuormasta sekä pienemmästä tilasta, ja pidemmällä käytöllä lämpötila todennäköisesti olisi vieläkin korkeampi. Kun tuulettimet menevät päälle, lämpötila putoaa tasaisesti lähelle huoneen lämpötilaa, ja samalla huomattiin, että PS4-pelikonsolin sisäinen tuuletin kuulosti jopa hieman siltä, että se pyörisi pienemmällä kierrosnopeudella.

7 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella, rakentaa ja testata mikrokontrolleriohjattu PWM-tuuletinhubi, jonka avulla käyttäjä pystyisi hallitsemaan käyttöympäristön lämpötilaa käyttämällä yleismallisia tietokoneen kotelotuulettimia. PWM-tuuletinhubi saatiin rakennettua ja testattua onnistuneesti. Parhaimmassa tapauksessa testattujen tilojen lämpötilaa saatiin laskettua yli 10 °C:lla kun PWM-tuuletinhubi oli käytössä.

Insinööriyön voidaan katsoa olevan kokonaisuudessaan onnistunut, vaikka siinä esiintyy joitakin puutteita. Testaus osoitti, että tuuletinhubi toimii odotetulla tavalla ja laskee lämpötiloja tehokkaasti. Herätesignaalin kautta käynnistyminen varmistaa sen, että tuulettimet eivät kuluta energiaa turhaan vaan jäähdytys on käytössä silloin kun sitä halutaan. Testejä ei katsottu tarpeelliseksi suorittaa suuremmilla pyörintänopeuksilla, koska tavoitteena oli, että tuulettimet pysyisivät äänettömänä käytön aikana. Tämänhetkiset lämpötilat ylittävät huoneenlämpötilan vain muutamalla asteella. Parannettavaa työlle kumminkin jäi. Kehityskohteita ovat muun muassa tuuletinhubin lämpötila-anturin toiminnan parantaminen, D3-pinnan päälle jäävä häiriösignaalin selvitys ja mahdollisesti kompaktimman mallin luominen käyttäen enimmäkseen SMD-komponentteja.

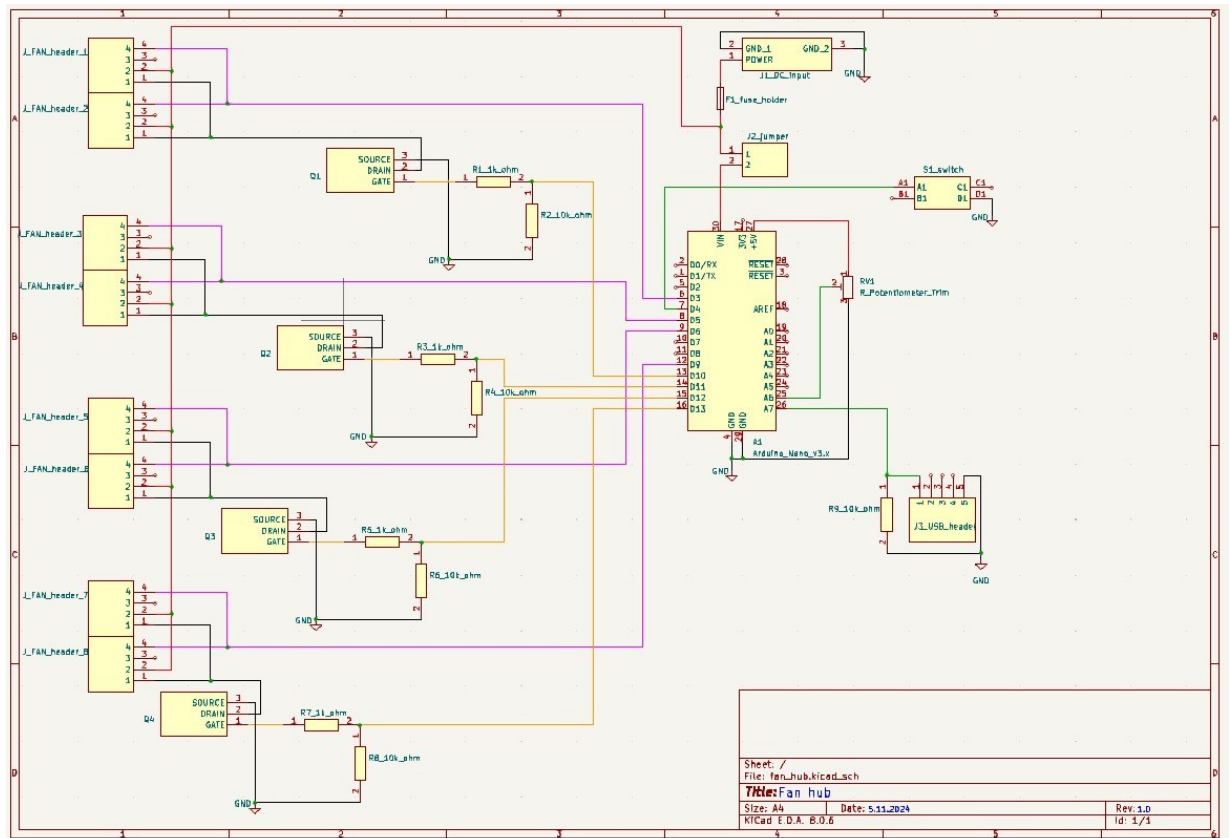
Tuuletinhubin komponenttien lopulliseksi hinnaksi muodostuu 67,27 €, jos kaikki komponentit tilataan tämänhetkisillä hinnoilla Partcolta ja Clas Ohlsonilta. Hinta osoittautui hieman odotettua korkeammaksi, mutta hintaa pystyisi todennäköisesti tiputtamaan, jos osia tilaisi muista verkkokaupoista. Tässä työssä suositettiin kuitenkin Partcoa nopean toimitusajan vuoksi.

Lähteet

- 1 EIA-310: What Does It Mean and is It Still Relevant? 2018. Verkkoaineisto. Rack Solutions. <<https://www.racksolutions.com/news/data-center-optimization/eia-310-definition/?srsltid=AfmBOoq04w0aR1ZpWTFPmoLP6kUG5RVXkGG6dnC30XyTsZ1Yncz6LTxU>>. 1.5.2018. Luettu 21.11.2024.
- 2 Cage Nut Kit. Verkkoaineisto. Nvent. <<https://www.nvent.com/fi-fi/schroff/products/enc21100-003>>. Luettu 8.12.2024.
- 3 STE-RUNGOT. Verkkoaineisto. Stera. <<https://www.stera.com/tuotteet-ja-palvelut/laite-ja-jakokaapit/ste-rungot/?productid=7215245>>. Luettu 10.12.2024.
- 4 4-Wire Pulse Width Modulation (PWM) Controlled Fans. Verkkoaineisto. Intel. <<https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/intel-nuc/intel-4wire-pwm-fans-specs.pdf>>. Luettu 5.11.2024.
- 5 Mhatre, Nachiket. 2021. How to choose the best case fans for your custom PC. Verkkoaineisto. Make Use Of. <<https://www.makeuseof.com/how-to-choose-the-best-case-fans-for-your-custom-pc/>>. 9.11.2021. Luettu 13.12.2024.
- 6 Khaliq, Azzief. 2022. PC case fan sizes explained. Verkkoaineisto. Voltcave. <<https://voltcave.com/case-fan-sizes/>>. Päivitetty 11.6.2022. Luettu 13.12.2024.
- 7 Inner surface microstructures. Verkkoaineisto. Noctua. <<https://noctua.at/en/inner-surface-microstructures>>. Luettu 13.11.2024.
- 8 What is a sleeve bearing. Verkkoaineisto. GGB. <<https://www.ggbearings.com/en/why-choose-ggb/faq/bearings-faq/what-sleeve-bearing>>. Luettu 12.12.2024.
- 9 McAnally, Shane. 2021. Water cooling components – fans. Verkkoaineisto. Titan Rig. <https://www.titanrig.com/blog/post/water-cooling-components-fans?srsltid=AfmBOopBH9ie20FB8iejjWpkK45Ehf6bJZh4pfAiQZuFS394Via_OL1W>. 17.5.2021. Luettu 12.12.2024.
- 10 A comprehensive guide to different types of fan bearings. 2023. Verkkoaineisto. be quiet! <<https://www.bequiet.com/en/insidebequiet/4452>>. 25.5.2023. Luettu 13.12.2024.

- 11 How ball bearing work. 2023. Verkkoaineisto. ISK BEARINGS. <<https://iskbearing.com/news/knowledge/how-ball-bearing-works>>. 26.6.2023. Luettu 13.12.2024.
- 12 Evan. 2024. Hydrodynamic bearings. Verkkoaineisto. FHD Bearings. <<https://fhdbearings.com/blog/hydrodynamic-bearings/>>. 29.2.2024. Luettu 13.12.2024.
- 13 Fluid Dynamic Bearing (FBD) Technology. Verkkoaineisto. Nidec Corporation. <<https://www.nidec.com/en/technology/capability/fdb/>>. Luettu 14.12.2024.
- 14 Maker Nano: Simplifying Arduino for Projects. Verkkoaineisto. Cytron Technologies. <<https://www.cytron.io/p-maker-nano-simplifying-arduino-for-projects?srsId=AfmBOorj6FE09UTpymTBUSRsxz1rOclTjhoKI14t5V1OS-iADU1dyKcU>>. Luettu 4.11.2024.
- 15 Muuntaja 27W. Verkkoaineisto. Clas Ohlson. <<https://www.clasohlson.com/fi/Muuntaja-27-W/p/39-1512>>. Luettu 5.11.2024
- 16 microUSB NAARAS ADAPTERIKORTTI. Verkkoaineisto. Partco. <<https://www.partco.fi/fi/tietokonetarvikkeet/vaeylaet/usb/usb-adapterit/2343-usb-microbnpr.html>>. Luettu 8.11.2024.
- 17 Dossena, Frederico. How to properly control pwm fans with arduino. Verkkoaineisto. Frederico Dossena. <<https://fdossena.com/?p=ArduinoFanControl/i.md>>. Luettu 24.11.2024.

Piirikaavio V1.1



BOM (Bill of materials)

Tuote	Määrä	Hinta	Linkki
Tuuletin liittin	6	1.26 €	https://www.partco.fi/fi/liittimet/moninapaiset-virtaliittimet/molex-virtaliittimet/15524-molex-kk-4rp.html
Mosfet	3	7.83 €	https://www.partco.fi/fi/elektronikan-komponentit/aktiivit/transistorifetit/kytkinfetit-n-kanava/5061-irf1010n.html
Led	2	0.66 €	https://www.partco.fi/fi/ledit/perusledit/6742-led-10k.html
220Q vastus	2	0.56 €	https://www.partco.fi/fi/elektronikan-komponentit/passiivit/vastukset/metallikalvovastukset/normaalit-06w/12467-vastus-06w-220r.html
1kQ vastus	3	0.84 €	https://www.partco.fi/fi/elektronikan-komponentit/passiivit/vastukset/metallikalvovastukset/normaalit-06w/12501-vastus-06w-1k.html
10kQ vastus	4	1.12 €	https://www.partco.fi/fi/elektronikan-komponentit/passiivit/vastukset/metallikalvovastukset/normaalit-06w/12552-vastus-06w-10k.html
Mikrokontrolleri	1	14.60 €	https://www.partco.fi/fi/arduino/arduino-kloonit/24086-ard-makernano.html
Sulakepesä	1	0.60 €	https://www.partco.fi/fi/saehkoemekaniikka/sulakkeet/sulakepesaet/6699-sulpid-520p.html
2A sulake	1	0.28 €	https://www.partco.fi/fi/saehkoemekaniikka/sulakkeet/lasiputkisulakkeet/5x20mm-hिताat-t/6325-sue-2a.html
Jumper	1	0.17 €	https://www.partco.fi/fi/liittimet/piikkirima-liittimet/piikkirimat-tuumarasterilla/21556-oikosulkupala-pun.html
DCrunkoliitin	1	1.06 €	https://www.partco.fi/fi/liittimet/virtaliittimet/dc-liitinrungot/8697-dcr25p.html
Vaakatrimmeri	1	1.90 €	https://www.partco.fi/fi/elektronikan-komponentit/passiivit/trimmerivastukset/vaakatrimmerit/13486-trim-vaaka-10k.html
Lämpötila-antur	1	9.57 €	https://www.partco.fi/fi/elektronikan-komponentit/anturit/laem্পoetila/6292-lm35cz.html
Kytkin	1	1.67 €	https://www.partco.fi/fi/saehkoemekaniikka/kytkimet/kalvokytkimet/7223-kyt-dt6-har.html
Micro-sub liittin	1	4.02 €	https://www.partco.fi/fi/vaelitysmyynti/robotikka-ja-protoulu/muut-moduulit/liitinmoduulit/28319-polulu-2586tt.html
Piikkirima 1x40	1	1.14 €	https://www.partco.fi/fi/liittimet/piikkirima-liittimet/piikkirimat-tuumarasterilla/15939-pr-1x40-n.html
12V muuntaja	1	19.99 €	https://www.clasohlson.com/fi/Muuntaja-27-W/p/39-1512
Yhteensä	31	67.27 €	

Ohjelmakoodi

```
#include <EEPROM.h>

// Pin määrittely
const int inputPin = A4;           // Pin A4, heräte 5V
sisääntulo (erillisen micro usb liittimen kautta)
const int channelButtonPin = A5;   // Pin A5, kanavan vaihto painike
const int potentiometerPin = A6;   // Pin A6, potentiometri signaali
const int tempSensorPin = A7;      // Pin A7, LM35 lämpötila-anturi
signaali
const int latchButtonPin = 2;      // Pin D2, heräte valinta / 5v
input startup levyn sisäinen painike

const int numTempChannels = 1;     // Lämpötila ohjattujen kanavien
alustaminen
const int numManualChannels = 2;   // Potentiometri ohjattujen
kanavien alustaminen
int currentManualChannel = 0;

const int tempPwmPins[] = {3};     // Lämpötilan ohjatun
kanavan PWM ulostulo
const int manualPwmPins[] = {9, 10}; // Potentiometri ohjattujen
kanavien ulostulo
const int tempMosfetPins[] = {4};  // MOSFET gaten ohjauksen
signaali
const int manualMosfetPins[] = {8, 12}; // MOSFET gaten ohjauksen
signaali
const int ledPins[] = {5, 6};      // Kanavan valinta LED indi-
kaattorit

bool latchEnabled = false;
bool lastButtonStateLatch = HIGH;
bool lastButtonStateChannel = HIGH;

int manualPwmValues[numManualChannels] = {0, 0};
const int pwmThreshold = 51;
const int eepromLatchAddr = 0;
const int eepromPwmAddr[numManualChannels] = {1, 2};

float temperatureC = 0.0;
unsigned long lastTempReadTime = 0;
const unsigned long tempReadInterval = 2000;

float tempThresholds[5] = {50.0, 55.0, 60.0, 65.0, 70.0}; //
Lämpötilat jossa PWM ohjauksen taso muuttuu
int pwmValues[5] = {51, 102, 153, 204, 255};           // Tuulett-
imen kierrosnopeuden ohjaus taso, 20%, 40%, 60%, 80% ja 100%
```

```
// Timerien konfigurointi
void setupTimer1() {
    TCCR1A = (1 << COM1A1) | (1 << COM1B1) | (1 << WGM11);
    TCCR1B = (1 << CS10) | (1 << WGM13);
    ICR1 = 320;
    OCR1A = 0;
    OCR1B = 0;
}

void setupTimer2() {
    // Konfiguroi Timer2 Fast PWM varten, esiskaala 8
    TCCR2A = (1 << COM2B1) | (1 << WGM21) | (1 << WGM20);
    TCCR2B = (1 << WGM22) | (1 << CS21);
    OCR2A = 79; // Aseta max arvo 25kHz
    OCR2B = 0; // Alusta käyttömäärä aluksi 0
}

// Korkea taajuuksinen PWM vastaavat
void setPWM1A(float f) {
    f = f < 0 ? 0 : f > 1 ? 1 : f;
    OCR1A = (uint16_t)(320 * f);
}

void setPWM1B(float f) {
    f = f < 0 ? 0 : f > 1 ? 1 : f;
    OCR1B = (uint16_t)(320 * f);
}

void setPWM2(float f) {
    f = f < 0 ? 0 : f > 1 ? 1 : f;
    OCR2B = (uint8_t)(79 * f);
}

void setup() {
    pinMode(9, OUTPUT); // Timer1, Pin 9
    pinMode(10, OUTPUT); // Timer1, Pin 10
    setupTimer1();

    pinMode(3, OUTPUT); // Timer2, Pin 3
    setupTimer2();

    pinMode(inputPin, INPUT);
    pinMode(latchButtonPin, INPUT_PULLUP);
    pinMode(channelButtonPin, INPUT_PULLUP);

    for (int i = 0; i < numTempChannels; i++) {
        pinMode(tempMosfetPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(tempMosfetPins[i], LOW);
    }

    for (int i = 0; i < numManualChannels; i++) {
        pinMode(manualMosfetPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(manualMosfetPins[i], LOW);
        pinMode(ledPins[i], OUTPUT);
        digitalWrite(ledPins[i], LOW);
    }

    Serial.begin(9600);
}
```

```
latchEnabled = EEPROM.read(eepromLatchAddr);
for (int i = 0; i < numManualChannels; i++) {
    manualPwmValues[i] = EEPROM.read(eepromPwmAddr[i]);
    if (i == 0) {
        setPWM1A((float)manualPwmValues[i] / 255.0);
    } else if (i == 1) {
        setPWM1B((float)manualPwmValues[i] / 255.0);
    }
}

digitalWrite(ledPins[currentManualChannel], HIGH);
}

void loop() {
    unsigned long currentTime = millis();

    // Lämpötila ohjaus
    if (currentTime - lastTempReadTime >= tempReadInterval) {
        lastTempReadTime = currentTime;

        // Lämpötilan luku LM35 sensorilta
        int sensorValue = analogRead(tempSensorPin);
        temperatureC = (sensorValue * 480 / 1023.0); // Muunna lukema
        celsius asteiksi
        Serial.print("Temperature: ");
        Serial.print(temperatureC);
        Serial.println(" °C");

        int appliedPwm = 0;
        for (int j = 0; j < 5; j++) {
            if (temperatureC >= tempThresholds[j]) {
                appliedPwm = pwmValues[j];
            } else {
                break;
            }
        }

        if (appliedPwm > 0) {
            digitalWrite(tempMosfetPins[0], HIGH);
            setPWM2((float)appliedPwm / 255.0);
        } else {
            digitalWrite(tempMosfetPins[0], LOW);
            setPWM2(0);
        }
    }

    // Potentiometri ohjaus
    int potValue = analogRead(potentiometerPin);
    int pwmValue = map(potValue, 0, 1023, 0, 255);

    bool currentButtonStateLatch = digitalRead(latchButtonPin);
    if (lastButtonStateLatch == HIGH && currentButtonStateLatch ==
LOW) {
        latchEnabled = !latchEnabled;
        EEPROM.write(eepromLatchAddr, latchEnabled);
    }
    lastButtonStateLatch = currentButtonStateLatch;

    bool currentButtonStateChannel = digitalRead(channelButtonPin);
```

```
    if (lastButtonStateChannel == HIGH && currentButtonStateChannel ==
LOW) {
        digitalWrite(ledPins[currentManualChannel], LOW);
        currentManualChannel = (currentManualChannel + 1) % numManual-
Channels;
        digitalWrite(ledPins[currentManualChannel], HIGH);
    }
    lastButtonStateChannel = currentButtonStateChannel;

    for (int i = 0; i < numManualChannels; i++) {
        if (latchEnabled || analogRead(inputPin) > 512) {
            if (i == currentManualChannel) {
                manualPwmValues[i] = pwmValue;
                EEPROM.write(eepromPwmAddr[i], pwmValue);
            }

            if (manualPwmValues[i] >= pwmThreshold) {
                digitalWrite(manualMosfetPins[i], HIGH);
                if (i == 0) {
                    setPWM1A((float)manualPwmValues[i] / 255.0);
                } else if (i == 1) {
                    setPWM1B((float)manualPwmValues[i] / 255.0);
                }
            } else {
                digitalWrite(manualMosfetPins[i], LOW);
                if (i == 0) {
                    setPWM1A(0);
                } else if (i == 1) {
                    setPWM1B(0);
                }
            }
        } else {
            digitalWrite(manualMosfetPins[i], LOW);
            if (i == 0) setPWM1A(0);
            if (i == 1) setPWM1B(0);
        }
    }

    delay(100);
}
```