

TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduse valdkond
Tehnoloogiainstituut

Kim Kitsik

Aerosoolikasvati temperatuurikontroller

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja(d): aerosoolifüüsika spetsialist Paap Koemets
aerosoolifüüsika teadur Sander Mirme

Tartu 2022

Resümee / Abstract

Aerosoolikasvati temperatuurikontroller

Lühikokkuvõte:

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on temperatuurikontrolleri arendamine aerosoolikasvatile, mille ülesandeks on hoida temperatuure süsteemi erinevates osades etteantud konstantsel nivool kasutades küttekehi või jahutuselemente.

Valminud seade on jälgitav ja juhitud üle USB pordi. Aerosoolikasvati on oluline osa suuremast kalibratsiooniaerosoolide genereerimise süsteemist. Bakalaureusetöö sisaldab riistvaralise osa projekteerimist ja komplekteerimist ning samuti tarkvara loomist ja testimist. Töö on valminud koostöös eraettevõttega ning annab ülevaate firma esitatud nõuetest ja vastavatest autori poolt tehtud lahendustest. Laboriseade, millele nimetatud plaat on mõeldud, on valmistatud kommertsliku eesmärgiga ning on mõeldud väga spetsiifilistele valdkondadele.

Võtmesõnad:

Kontroll, programmeerimine, elektroonika, mikrokontroller

CERCS: T170 Elektroonika, T120 Süsteemitehnoloogia, arvutitehnoloogia, T125 Automatiseerimine, robotika,

Temperature controller for aerosol condenser

Abstract:

The goal of this bachelor's thesis is to develop a temperature controller for aerosol condenser. The controller must be capable of keeping the temperature of different aerosol condenser's elements at a given constant level using heating or cooling elements.

The author's device is manageable and traceable over USB port. Aerosol condenser is an essential part of a larger calibration aerosol generating system. This bachelor's thesis includes projecting and developing of the hardware as well as developing code and testing the final solution. The project has been done in collaboration with a private company which produces measurement equipment, and this thesis shows author's cooperation with named company. The aerosol condenser is meant to be used in a specific field and is produced commercially.

Keywords:

Control, programming, electronics, microcontroller

CERCS: T170 Electronics, T120 Systems engineering, computer technology, T125 Automation, robotics, control engineering

Sisukord

Resümee / Abstract	2
Mõisted ja terminid	5
1 Sissejuhatus	6
1.1 Probleemi tutvustus	6
1.2 Töö eesmärk	6
1.3 Nõuded lahendusele	7
2 Olemasolevad lahendused	8
2.1 Turul olevad temperatuurikontrollerid	8
2.1.1 Omron E5CB seeria	8
2.1.2 West 6100+, 8100+ & 4100+	9
2.1.3 AUTONICS TAS-B4RJ2C	9
3 Süsteemi ülesehitus	10
3.2 Elektroonika	10
3.2.1 Juhtplaat	10
3.2.1 Mikrokontroller	11
3.2.2 Termopaarid	12
3.2.3 Küttekehad	13
3.2.4 Peltier' moodulid	13
3.2.5 MCKSL60D20-L releed	14
3.2.6 MAX31855KASA+ konverter	14
3.3 Aerosoolikasvati	15
4 Seadme tarkvara	17
4.1 Programmeerimiskeskonna seadistamine	17
4.2 Tarkvara tööalgoritm	18
4.2.1 PID kontroll	20
4.2.2 PDM	22
5 Seadme testimine	23
5.1 Katsete tulemused	23
5.2 Ilmnunud probleemid	26
Kokkuvõte	27
Viidatud kirjandus	28
Lisa 1. Trükkplaadi disain	1
Lisa 2. Trükkplaadi skeem	2
Lisa 3. Valminud lahendus	6

Lisa 4. Github repositooriumi link	1
Tänuavaldused	2
Litsents	3

Mõisted ja terminid

PDM (*Pulse-Density Modulation*) – pulsitihedusmodulatsioon. Modulatsiooni üks moodustest, kus pulsipikkus on alati konstantne, muudetav on vaid pulsside vaheline periood [1].

PID (*Proportional Integral Derivative*) – algoritm, mis põhineb tagasisidel ning toimib suletud tsüklis. Algoritmi eesmärk on saavutada ja hoida etteantud parameeter võimalikult ühtlaselt, mitte üle minnes etteantud nivoost. [2].

Termopaar – temperatuuri mõõtmise andur, mis koosneb kahest erinevast metalltraadist. Traadid on ühendatud omavahel kahest otsast. Sõltuvalt temperatuuris tekib anduris erinev pinge, mida mõõdetakse ja tõlgendatakse temperatuuriks [3].

Küttekeha - seade, mis muundab elektrienergiat soojuseks [4]

Peltier' moodul - on termoelektriline paar, mis koosneb kahest paralleelsest metallplaadist ning nende vahel asuvatest P ja N jadamis ühendatud pooljuhtide paaridest. Kasutatakse pindade jahutamiseks [5].

SPI (*Serial Peripheral Interface*) – sünkroonse järjestiksuhtluse standard, mis võimaldab kahe seadme vahelist andmete vahetust [6].

SWD (*Serial Wire Debug*) – liides, mida kasutatakse koodi laadimiseks ja silumiseks ARM-tüüpi protsessorites [7].

USB (*Universal Serial Bus*) – universaalne järjestiksiin, võimaldab seadmeid lahti ja külge ühendada ilma, et arvutit oleks vaja välja lülitada [8].

1 Sissejuhatus

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on TÜ keskkonnafüüsika laboris mikromeeter piirkonna aerosooliosakeste genereerimiseks kasutatava Sinclair-La Mer tüüpi aerosoolikasvati uuendamine koostöös ettevõttega AS Airel.

Aerosoolikasvati on oluline osa 100 nm - 10 µm aerosooliosakeste genereerimise süsteemis, mis on tarvilik aerosooli mõõteseadmete kaliibrimiseks ja testimiseks.

Temperatuurikontrolleri ülesandeks on juhtida küttekehi, Peltier' jahutuselemente ja ventilaatoreid, et tagada konstantne etteantud temperatuur aerosoolikasvati erinevates osades. Soovitud temperatuurid peavad olema seadistatavad üle USB pordi [8].

Töös käsitletakse temperatuurikontrolleri juhtplaadi ehitust ja seadistamist aerosoolikasvati jaoks.

1.1 Probleemi tutvustus

Käesolev bakalaureusetöö on tehtud koostöös firmaga Airel AS. Mainitud ettevõtte tegeleb aerosooliosakeste ja õhuioonide mõõteaparatuuri arendamise ja tootmisega, kusjuures nii mehhaanilise kui ka elektroonilise poolega. Bakalaureusetöö autoril (edaspidi autor) osales aerosoolikasvati arendamise töös ning tema ülesandeks sai mainitud seadmele temperatuurikontrolleri projekteerimine. Taolisi lahendusi on võimalik leida teistelt tootjatelt, kuid valmis lahendus ei pruugi vastata kõikidele nõuetele, võib osutuda liiga kulukaks või keerukaks ning üldise süsteemiga mitte ühilduvaks.

1.2 Töö eesmärk

Bakalaureusetöö eesmärgiks on luua töötav seade, mis mõõdab termopaaride abil temperatuuri ning vastavalt mõõtmiste tulemustele kuumutab küttekehade abil vajalikke aerosoolikasvati elemente etteantud temperatuurini ning tagab temperatuuri püsimine. Lisaks peab toimuma jahutamine Peltier' jahutuselemendi abil.

Termopaaride kasutamine on tingitud nende omaduste poolest – need peavad suurematele temperatuuridele vastu ning töötavad laias temperatuurivahemikus [3]. Peltier' jahutuselementide kanalite puhul peab arvestama suure vooluga madala pingega juures. Küttekehad töötavad 230VAC vahelduvast pingest ning nende kanalid peavad suutma seda juhtida.

Kontroller peab olema juhitav USB kaudu ning sama pordi kaudu ka olema võimeline andmeid edasi saatma.

Töö on tehtud mitmes etapis, mis tagasid eesmärkide saavutamist:

- Lahendusele sobivate komponentide otsimine ja võrdlemine
- Elektroonikaskeemi projekteerimine
- Trükiplaadi disainimine ja tellimine
- Elektroonika detailide monteerimine
- Tarkvara loomine
- Testimine ja silumine

1.3 Nõuded lahendusele

Lahendusele on juhendajate poolt seatud järgmised nõudmised:

- Trükkplaadi peamine toitepinge: 12VDC.
- Digitaalelektronika pinge: 3.3 VDC.
- Neli K-tüüpi termopaari mõõtekanalit.
- Kolm kanalit 230VAC 345W küttekehade juhtimiseks.
- Kaks kanalit kuni 12VDC 13A Peltier' elementide juhtimiseks.
- Juhtimisalgoritm temperatuuri viimiseks etteantud temperatuurini ja konstantsena ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) hoidmiseks.
- Kaks kanalit 12VDC 0.48A jahutusventilaatorite juhtimiseks.
- USB-C port jooksvate mõõtmistulemuste ja juhtimissignaali edastamiseks ja käskude vastuvõtmiseks ning vastav tarkvaraline lahendus.

2 Olemasolevad lahendused

Turul on saadaval mitmeid sarnaseid tooteid. Kuna antud töös on kontrolleri osa suuremast aerosoolide genereerimissüsteemist, siis on oluline, et temperatuurikontroller integreeruks hästi ülejäänud komponentidega. Kommertslikel seadmetel on tihti ainult üks juhitav kanal. Samuti on turul olevatel seadmetel suhteliselt kõrge hind, mis on tähtis faktor antud kontekstis, sest eraldi ostetud komponendid tõstavad lõpp-produkti hinda. Sama tähtis on ka asjaolu, et enda loodud elektroonika on seadistatav täpselt vastava ülesande jaoks, mis annab paindlikkuse. Lisaks on selliste seadmete hooldus ja parandus oluliselt lihtsam, kui muu tootja poolt toodetud seadmetel.

Allpool on ülevaade turul olevatest toodetest koos nende kirjeldusega, millest on näha, et antud projektiga ei ole need ühilduvad.

2.1 Turul olevad temperatuurikontrollerid

2.1.1 Omron E5CB seeria

Omron E5CB seeria on üks mitmest antud tootja poolt pakutavaid temperatuurikontrollerist. Nimetatud seerias on 8 erinevat varianti toodetest, mis erinevad sisendi, toite ja väljundite poolest. Seade sisaldab lihtsat valgusdiodi displeid, kust on võimalik lugeda temperatuuri ning ka nuppe seadme juhtimiseks ja seadistamiseks. Väljundiks on pakutud kas väljund rele juhtimiseks pingega kuni 250 VAC ning vooluga kuni 3A või 12 VDC pingega 21 mA vooluga, mida saab lugeda muu seadmega (loogiline väljund). Eraldi on väljund alarmi jaoks, kusjuures alarmil on 11 erinevat režiimi. Sisendiks sobivad kas levinud termopaarid (K, J, T, R, S tüüpi) või siis plaatinum takistuslik termoandur. Juhtimine toimub PID funktsiooniga. Sõltuvalt mudelist on temperatuurikontrolleri sisendpinge kas 100-240 VAC või 24 V kas AC või DC. Mõõtmise täpsus on ± 1 kraad C. Seadet on võimalik ühendada arvutiga USB pordi kaudu, selleks kasutatakse spetsiaalset tootjapoolset kaablit, mida müüakse eraldi [9-10].

Antud seade ei sobi aerosoolikasvati jaoks kuna sellel on ainult üks anduri sisend ja üks väljund. Lahendus toimiks, kui kasutada mitut sellist toodet koos, kuid selline süsteem oleks liiga kallis. Lõputöö kirjutamise hetkel oli Omron E5CB seeria seadmete tükihind 167,50€ [11].

2.1.2 West 6100+, 8100+ & 4100+

West 6100+, 8100+ & 4100+ on seeria temperatuurikontrolleritest, mis on laialdase funktsionaalsusega. Juhtimine toimub samuti PID funktsiooniga, mida saab seadistada automaatselt või manuaalselt. Juhtimist saab seadistada ka On/Off režiimi, mis on PID funktsioonist lihtsam ning temperatuur kõigub soovitud temperatuuri ümber.

Antud seadmed toetavad nii soojendamist kui ka jahutamist. Sisaldab LED ekraani ja nuppe juhtimiseks. Seadmed saavad suhelda arvutiga USB kaudu.

Sisendiks sobivad väga paljud erinevad termopaarid, samuti võtavad seadmed sisendiks ka mujalt saadetud digitaalset signaali, millega on võimalik kaugelt soovitud temperatuuri määrata.

Väljundeid on kuni kolm ning need on seadistatavad nii relee ja alarmi väljunditeks kui ka digitaalse signaali väljunditeks. Suhtlemine muude seadmetega toimub RS-485 standardi [8] järgi. Seadmetega tuleb kaasa ka tarkvara Plus Series Configurator.

Pingeallikaks sobib valikuliselt 110-230 VAC või 24-48 V AC/DC.

Seadmel on mugav korpus kinnitustega, mis muudab seame mugavaks mooduliks, mida lisada suuremale süsteemile [12].

Mainitud seeria seadmetel ei ole piisavalt sisendeid ja väljundeid, et sobida aerosoolikasvatile. Antud lahendus toimiks kui kasutada mitut taolist seadet, mis tõstab projektihinna ebamõistlikult kõrgele.

Näitena West Instruments P6100+ ühe seadme hind on 277€ [13].

2.1.3 AUTONICS TAS-B4RJ2C

Autonics TAS-B4RJ2C on odavama klassi PID ja On/Off temperatuurikontroller. Valikus on kas PT100 (plaatinum takistuslik termoandur) või J/K tüüpi termopaar. Väljundiks on kaks varianti: üks väljund relee jaoks (240 VAC või 3A/30 VDC 1A) või digitaalne signaal 12V 20mA. Mõõdetavate temperatuuride vahemik sõltub valitud mudelist ning võib olla vahemikus -55 kuni 1200°C.

Seadmel ei ole ekraani. Temperatuuri seadistatakse potentsiomeetriga koos noolindikaatoriga, valgusdiodide abil kuvatakse informatsiooni temperatuuri kohta. Kas temperatuur on soovitud temperatuurist kõrgem või madalam ning kui palju. Eraldi valgusdiod näitab, kas väljund on aktiivne. [14].

Ka antud seade ei rahulda projekti nõudmisi sisendite ja väljundite poolest. Seadme tükihind on 26.47€ [15].

3 Süsteemi ülesehitus

Seade koosneb trükkplaadist ja aerosoolikasvatist. Kasvati küljes asuvatest komponentidest oli lõputöö autori kasutada termopaarid, küttekehad, Peltier moodul ning ventilaator.

3.2 Elektroonika

Elektroonikakomponentide valik oli tingitud ehitatava seadme oodatud parameetritest ning tihti ka komponentide kättesaadavusest. Võimalusel kasutati trükkplaadil SMD komponente. Järgmistes alampeatükkides on välja toodud olulisemad komponendid koos nende kirjeldustega.

3.2.1 Juhtplaat

Juhtplaat sisaldab tööks vajalikke elektroonikakomponente ning sisendeid/väljundeid. Plaadi mõõdud on 108x101mm. Tegemist on kahepoolse trükkplaadiga. Projekteeritud on tarkvaraga Altium Designer, mille litsentsi sai autor ajutiselt kasutada ning mis oli antud ettevõtte poolt. Füüsilise trükkplaadi valmistamine on tellitud väliselt teenusepakkujalt Eurocircuits.

Komponentide jootmine toimus kahes etapis:

- SMD komponendid joodeti infrapunaahjus.
- Suuremad komponendid joodeti käsitsi jootekolvi abil.

Trükkplaadil on järgmised komponendid ja osad:

- STM32F405RGT6 mikrokontroller
- Neli MAX31855KASA+ termopaari kontrollerit.
- Kaks MCKSL60D20-L releed Peltier moodulite juhtimiseks.
- Traco Power TMR 1210 pingeregulaator 12VDC sisendiga ning-3.3VDC väljundiga.
- MPSA06 NPN-transistorid küttekehade juhtimiseks, 3 tükki.
- AQY212GS võtmed ehk loogilised lülitid, 3 tükki.
- Recom R12-100B DC/DC pinge muundur. Teisendab 12V sisendpinge 100V väljundpingeks. Selle komponendi väljundpinge seadistamiseks on kõrval 5 kOhm potentsiomeeter. Muundurit esialgu ei kasutata ja algselt peale ei joodetud.
- USB-C pesa.

- 2 nuppu, RESET ja BOOT. RESET nupp võimaldab teha kontrolleri taaskäivituse ning BOOT nuppu all hoides saab ligi *bootloaderile*.
- Kuue auguga SWD pesa, mille kaudu on trükkplaat ühendatav Nucleo programmeerimisega
- Kaheksa kruvitermini jämedamate juhtmega perifeeria ühendamiseks.
- Kuus isast Molex terminali, millega on ühendatud termopaarid ja ventilaatorid.
- 16 auguga pesa, millest kaks auku on 3.3VDC pingega väljundid, kaks auku on 0VDC (GND) ning 12 auku on sisend/väljund pordid, mis on ühendatud otse kontrolleri pordidega.
- Passiivsed elemendid – takistid ja kondensaatorid.
- Neli auku läbimõõduga 3.5mm, mis võimaldab plaadi kinnitamist aerosoolikasvatikuga külge.

Suhtlus arvutiga toimub USB pordi kaudu. Antud lahenduses on kasutatud USB-C pesa USB 1.0 *Full Speed* režiimis, kus kasutati ainult D+ ja D- liinid. USB liidest tulevat +5VDC toidet ei kasutata ja see on trükkplaadiga ühendamata. Kasutatakse USB CDC klassi ning arvutis näeb seade välja kui virtuaalne jadaliides (*serial port*) [16].

3.2.1 Mikrokontroller

Mikrokontrolleriks on projekti jaoks valitud STM32F405RGT6. Tegemist on STMicroelectronics firma poolt toodetud protsessoriga, mis on ARM Cortex-M4 arhitektuuriga ning on 32-bitine. Sisemine taktsagedus kuni 168 MHz (projektis kasutusel 48MHz), vahemälu on kuni 192 KB, välmälu on kuni 1 MB. Tööpinge on 3.3V. Toetatud on USB OTG, integreeritud on kuni 3 SPI-d ning sõltuvalt kontrolleri pakendist kokku kuni 140 sisend-väljund liini. Selle projekti puhul on kasutatud 64 jalaga protsessorit ning I/O jalgu on 51. Kontrolleri jaoks on võimalik kasutada 4-26 MHz kristalli, autor kasutas 8 MHz kristalli. Välise kristallostsilaatori kasutamine tagab stabiilsema takti ja seetõttu ka stabiilsema töö [17].

Juhtplaadile on eraldi välja toodud ka 12 sisend/väljund liini, et vajadusel saaks plaati funktsionaalsust laiendada.

Protsessori programmeerimine ja silumine toimus antud lõputöös läbi SWD liidese, mis on trükkplaadil eraldi välja toodud. SWD pesa on kaabliga ühendatud STMicroelectronics STLink V2 programmeerimisega, mis on omakorda ühendatud USB kaabli abil arvutiga. Kasutatud protsessorit on võimalik programmeerida ka USB liidese kaudu kasutades DFU (*Device*

Firmware Update) [18] režiimi, kuid SWD oli antud töös arenduse ajal eelistatud variant, sest võimaldab paremat silumist (ingl. *debugging*).

Kontrolleri valik on tingitud suuresti sellest, et ettevõttes on antud protsessor või selle modifikatsioonid laialt kasutuses. Antud kontrolleri vastab igati käesoleva projekti tehnilistele tingimustele, sest sellel on vastavad funktsionaalsused (SPI, USB-OTG, katkestused jm), see on mõistliku hinnaga ning on kättesaadav. Kontrollerial on palju muid sisseehitatud funktsioone, mida antud projektis ei kasutata, kuid mida võib tulevikus vaja minna.

3.2.2 Termopaarid

Termopaar on andur, mida kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks. Termopaar koosneb kahest erinevast metallist valmistatud traadist, mis on omavahel ühendatud kahest otsast, moodustades nn külma ja sooja ühendust. Soe ühenduskoht asetatakse temperatuuri mõõtmise piirkonda ning külm ühenduskoht on mingi teadaoleva temperatuuri juures. Temperatuuride erinevus tekitab elektromotoorjõudu, samuti tuntud kui Seebeck efekt. Pinge on ligikaudu proportsionaalne kahe ühenduskoha temperatuuridele [3].

K-tüüpi termopaar, mida on kasutatud antud töös, on üks mitmest termopaaride tüübist. Sellise termopaari üks elektrijuht on valmistatud sulamist nimega *chromel* (90% nikkel, 10% kroom) [19] ning teine sulamist *alumel* (95% nikkel, 2% alumiinium, 1% räni) [20]. K-tüüpi termopaaride töötemperatuuri vahemik on keskmiselt 200...1260°C [21].

Kasutatud on nelja samasugust K-tüüpi termopaari. Joonisel 1 on näidatud üks kasutuses olevatest termopaaridest.



Joonis 1: lõputöös kasutatud K-tüüpi termopaar

3.2.3 Küttekehad

Küttekeha on seade, mis muundab elektrienergiat soojuseks. Seda kasutades Joule efekti. Soojus tekib, sest laengukandjad põrkavad kokku elektrijuhi kristallstruktuuriga [4].

Kasutusel on RS Pro poolt toodetud küttekehad. Tegemist on ümbritseva küttekehaga, mis käib silindri ümber, antud lõputöö puhul alumiiniumist auruti ja kuumuti ümber. Toide on 230VAC ning võimsus on 345W, diameeter on 40mm ning maksimaalne temperatuur on 1000°F (umbes 538°C) [22]. Joonisel 2 on näidatud küttekehad aerosoolikasvati elementide küljes.



Joonis 2: küttekeha aerosoolikasvati elemendi ümber.

3.2.4 Peltier' moodulid

Peltier' moodul on termoelektriline paar, mis koosneb kahest paralleelsest metallplaadist ning nende vahel asuvatest P ja N jadamsi ühendatud pooljuhtide paaridest. Rakendades pooljuhtidele elektrilist pinget, tekib elektrivool ning toimub ühe plaadi jahutamine ja teise plaadi soojenemine Peltier' efekti tõttu. Peltier' mooduleid kasutatakse laialdaselt just jahutava efekti tõttu [5].

Antud lõputöös on kasutusel kaks 200W Peltier' elementi MCTE1-19913L-S, tootja Multicomp Pro. Üks element tarbib 13A voolu ning maksimaalne pinge on 24VDC[23]

3.2.5 MCKSL60D20-L releed

MCKSL60D20-L releed on toodetud Multicomp Pro firma poolt. [] Relee ülesandeks on suure alalisvoolu juhtimine madala pingega juures. Töö jaoks oli vaja releed, mis kannatab kuni 24VDC ning kuni 13A voolu. Antud releed osutus valituks, sest sellega saab juhtida koormust kuni 60VDC 20A [24]. Nimetatud mudel on ka ettevõttele varasemalt tuttav ning ka seetõttu oli selle valik õigustatud.

Lõputöös on kasutusel kaks sellist releed. Nendega toimub Peltier' moodulite juhtimine.

3.2.6 MAX31855KASA+ konverter

Lõputöös on vaja mõõta temperatuure termopaaride abil. Kuna termopaarid tekitavad erinevate temperatuuride juures erinevat pinget, on võimalik saadud pinget mõõta ja tõlgendada temperatuuriks. Seda on võimalik teha ADC (*Analog to Digital Converter*) [8] abil. Mikrokontrollerites on reeglina ADC juba sisse ehitatud, kuid antud töö jaoks otsustati valida väline integraalskeem, sest selline detail sisaldab endas kõrge täpsusega ADC-d, sobiliku signaali võimendamist ning külma ühenduse temperatuuri kompenseerimist [25].

Maxim Integrated poolt toodetud MAX31855KASA+ konverter teisendab termopaarilt saadud analoogsignaali digitaalseks signaaliks. Saadud väljund on 14-bitine, suhtlus toimub SPI kaudu. Signaal on *read-only* ehk toimub vaid ühepoolne suhtlus.

MAX31855 konvertereid toodetakse paljude erinevate termopaari tüüpide jaoks. Kiip kasutab ühesuunalist SPI andmesidet, taksagedus on kuni MHz. Vajab CS (*chip select*), SDO (*serial data out*) ning SCL (*system clock*) liine. Pärast CS digitaalse signaali muutust ühest nulliks, väljastab 32 bitise andmepaketi, mis sisaldab 14 bitise termopaari temperatuuri täiendkoodi, 12 bitise kiibi sisemise temperatuuri koodi ning veabitte. Viimased 4 bitti on: reserveeritud (alati 0), termopaari lühis Vcc-ga (SCV), termopaari lühis GND-ga (SCG) ning termopaari puudumise bitt OC (*open circuit*) [26].

Tabelis 1 on täpsem ülevaade 32-bitisest andmepaketist.

Antud komponente on lõputöös kasutusel neli tükki, üks element iga termopaari kohta. Mainitud konverter osutus valituks oma populaarsuse ja kasutusmugavuse tõttu.

	14 bitti termopaari andmeid				Res	Fault	12 bitti sisemise temperatuuri andmeid				Res	SCV bitt	SCG bitt	OC bitt
bitt	D31	D30	...	D18	D17	D16	D15	D14	...	D4	D3	D2	D1	D0
väärtus	Sign	MSB 2^{10} (1024 C)	...	LSB 2^{-2} (0.25 C)	Reserveeritud	1 = viga	Sign	MSB 2^6 (64 C)	...	LSB 2^{-4} (0.0685 C)	Reserveeritud	1 = lühis Vcc- ga	1 = lühis GND- ga	1 = termopaar ühendamata

Tabel 1: vastuvõetud andmete formaat.

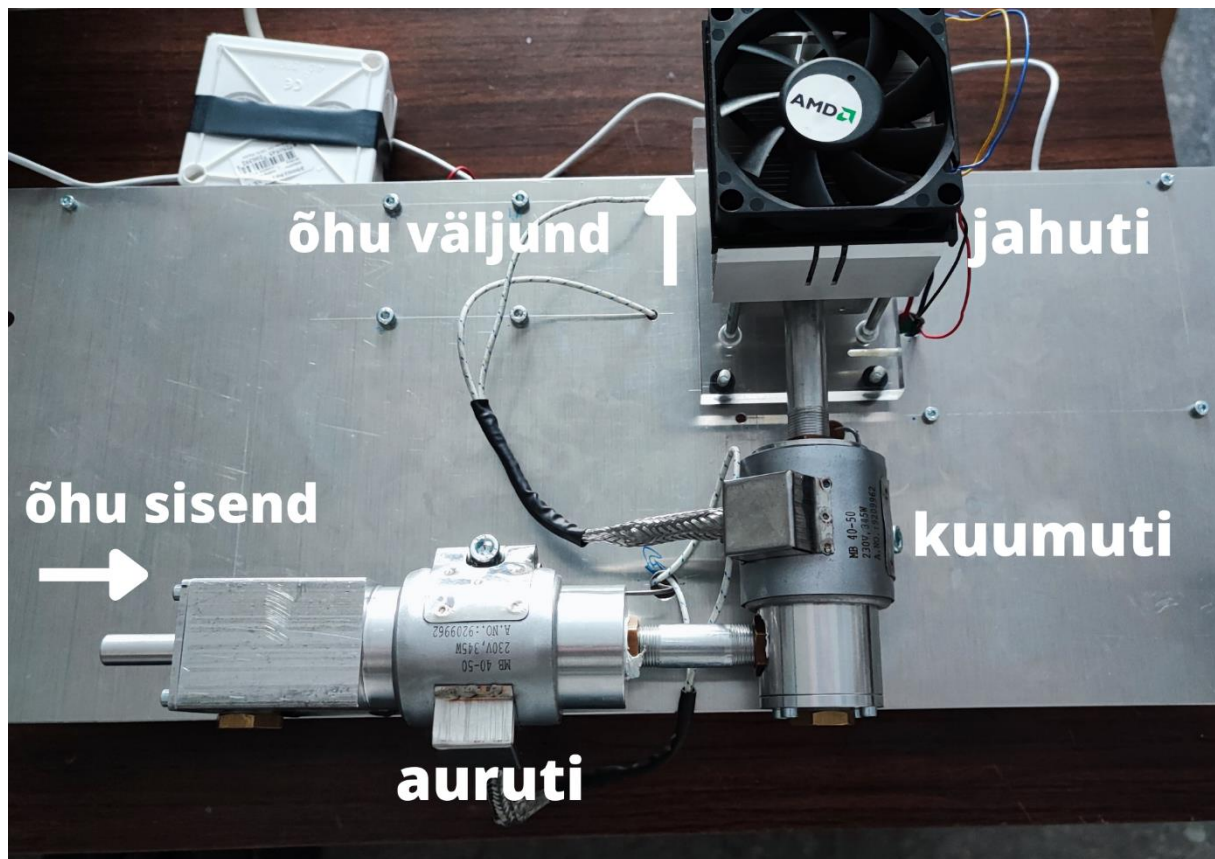
3.3 Aerosoolikasvati

Aerosoolikasvati, mida antud lõputöö raames aitas autor ehitada, on seade, mida kasutatakse kalibratsiooniaerosooli genereerimiseks. Antud seadmega kalibreeritakse ettevõtte poolt toodetavat aerosoolispektromeetrit [27].

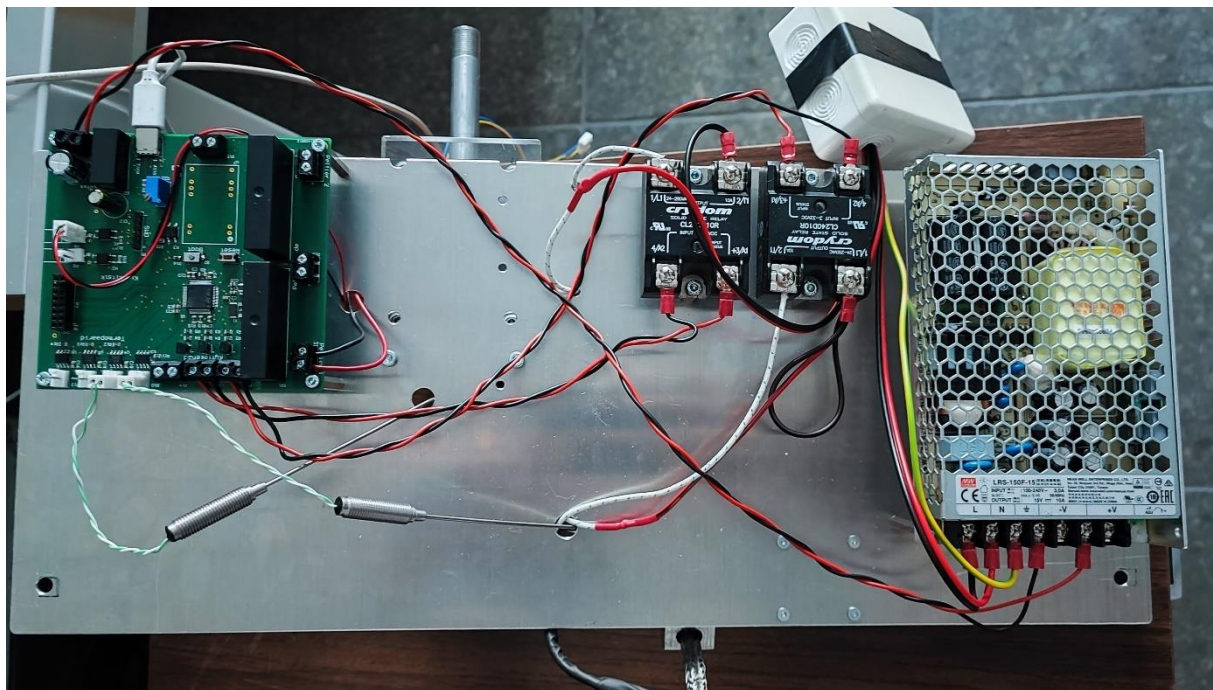
Kasvatisse sisestatakse töövedelik, mida soojendatakse aurutis küttekeha abil vahemikus 100 kuni 220°C. Temperatuur määrab kui palju töövedelikku auru gaasivoole lisandub. Vedelik aurustub ning liigub ahelas edasi kuumutisse, mis toimib aurutile sarnaselt ja on mõeldud aurude ja tuumade segunemise parandamiseks. Kuumuti töötemperatuur jääb vahemikku 150-220°C. Seejärel liigub gaas jahutisse, kus toimub jahutamine toatemperatuurini, mille tulemusel kondenseerub töövedelik aerosoolituumadele. Jahutamine toimub Peltier' mooduliga. Aerosool liigub edasi DMA-sse (*Differential Mobility Analyzer*), kus toimub aerosooli osakeste separeerimine vastavalt suurusele. DMA-st väljub monodispersne, e. väga kitsa suurusjaotusega aerosool, mida kasutatakse aerosooli-spektromeetri kalibreerimiseks.

Joonisel 3 on pilt päris lahendusest, kus on kujutatud töös käsitletud elemendid ning õhu suund.

Joonisel 4 on pilt antud ploki teisest poolest



Joonis 3: aerosoolikasvati tööpõhimõtet selgitav skeem



Joonis 4: temperatuurikontroller, küttekehade releed ja toiteplokk.

4 Seadme tarkvara

Juhendaja soovitusel kasutati püsivara kirjutamiseks Rust programmeerimiskeelt. See keel on ettevõttes varem selliste protsessorite puhul kasutusel osutunud alternatiivsetest lahendustest mugavamaks ja probleemivabamaks. Rust keeles on antud protsessorimudeli jaoks olemas eraldi teek *stm32f4xx_hal* [28] ja *cortex-m* [29], mis võimaldab kasutada kõiki protsessori funktsioone ja alamsüsteeme. Samuti oli Rust seadistatud manussüsteemi programmeerimiseks. Rust keel oli autori jaoks töö alguse hetkeks täiesti võõras ning seetõttu oli keele kasutus mõnevõrra raskendatud ja võttis aega.

Projektis kasutati Github versioonikontrolli tarkvara [30] ning autori kood muude vajalikke failidega on leitav Lisast 4.

4.1 Programmeerimiskeskonna seadistamine

Rust keele kasutamiseks tuli lõputöö autoril teha mõningaid seadistusi. Kompilaatorina kasutati Rust Nightly versioon 1.62.0 ning lisaks ka *Cargo* funktsionaalsus. Nightly kasutus on tingitud sellest, et see sisaldab mõningaid vajalikke uuendusi, mis avaldatud „stable“ versiooni pole veel jõudnud [31]. Programmeerimine toimus JetBrains CLion (versioon 2022.1) integreeritud programmeerimiskeskonnas (ingl. *IDE*) [8]. Püsivara protsessorisse laadimiseks ja silumiseks kasutati OpenOCD tarkvara versioon 0.11.0, mis oli CLion keskkonnas integreeritud pistikprogrammi näol. OpenOCD tarkvara võimaldab mikrokontrollerite programmeerimist ja silumist SWD/JTAG pordi kaudu [36]. Joonisel 5 on näidatud OpenOCD abil koodilaadimise sessiooni algusest lõpuni.

Kasutatud teegid:

- *cortex_m* – ligipääs Cortex M tüüpi protsessorite funktsioonidele, näiteks katkestus;
- *panic_halt* – määrab programmi käitumise vigade puhul;
- *stm32f4xx_hal* – konkreetse mikrokontrolleri seeria funktsioonidele ligipääs. Antud projektis kasutati alamteeke:
 - *rcc* – taktsageduste konfigureerimine;
 - *gpio* – protsessori sisendite/väljundite juhtimine;
 - *otg_fs* – USB;
 - *spi* – SPI funktsionaalsuse kasutamine;
- *arrayvec::ArrayString* – *stackis* hoitav muudetav sõne;
- *embedded_hal* – teek, mis muudab manussüsteemi kasutamist mugavamaks;
- *usb_device* – USB kasutamise funktsioonid.

Koodis kasutati RTIC lisafunktsionaalsust, mis kergendas oluliselt interruptide kasutust [1].

```
Ø[0mOpen On-Chip Debugger 0.11.0 (2021-11-18) [https://github.com/sysprogs/openocd]  
Ø[0mLicensed under GNU GPL v2  
libusb1 09e75e98b4d9ea7909e8837b7a3f00dda4589dc3  
For bug reports, read  
    http://openocd.org/doc/doxygen/bugs.html  
Info : auto-selecting first available session transport "hla_swd". To override u  
se 'transport select <transport>'.  
Info : The selected transport took over low-level target control. The results mi  
ght differ compared to plain JTAG/SWD  
Info : clock speed 2000 kHz  
Info : STLINK V2J28M18 (API v2) VID:PID 0483:374B  
Info : Target voltage: 3.248915  
Info : stm32f4x.cpu: Cortex-M4 r0p1 processor detected  
Info : stm32f4x.cpu: target has 6 breakpoints, 4 watchpoints  
Info : gdb port disabled  
Info : Unable to match requested speed 2000 kHz, using 1800 kHz  
Info : Unable to match requested speed 2000 kHz, using 1800 kHz  
target halted due to debug-request, current mode: Thread  
xPSR: 0x01000000 pc: 0x080001a8 msp: 0x20020000  
Info : Unable to match requested speed 8000 kHz, using 4000 kHz  
Info : Unable to match requested speed 8000 kHz, using 4000 kHz  
** Programming Started **  
Info : device id = 0x10076413  
Info : flash size = 1024 kbytes  
Info : Padding image section 1 at 0x0802a158 with 8 bytes  
** Programming Finished **  
Info : Unable to match requested speed 2000 kHz, using 1800 kHz  
Info : Unable to match requested speed 2000 kHz, using 1800 kHz  
shutdown command invoked
```

Joonis 5: koodi laadimine mikrokontrollerisse OpenOCD abil

4.2 Tarkvara tööalgoritm

Tarkvara ülesandeks on pidev termopaaride näitude lugemine ning saadud näitude põhjal küttekehade temperatuuritaseme stabiilsena hoidmine. Samal ajal on programm valmis üle USB vastu võtma juhtsignaale, mille abil määratakse küttekehade uued soovitud temperatuurid. USB kaudu andmete saatmiseks ja vastuvõtmiseks kirjutas autor programmi Python keeles.

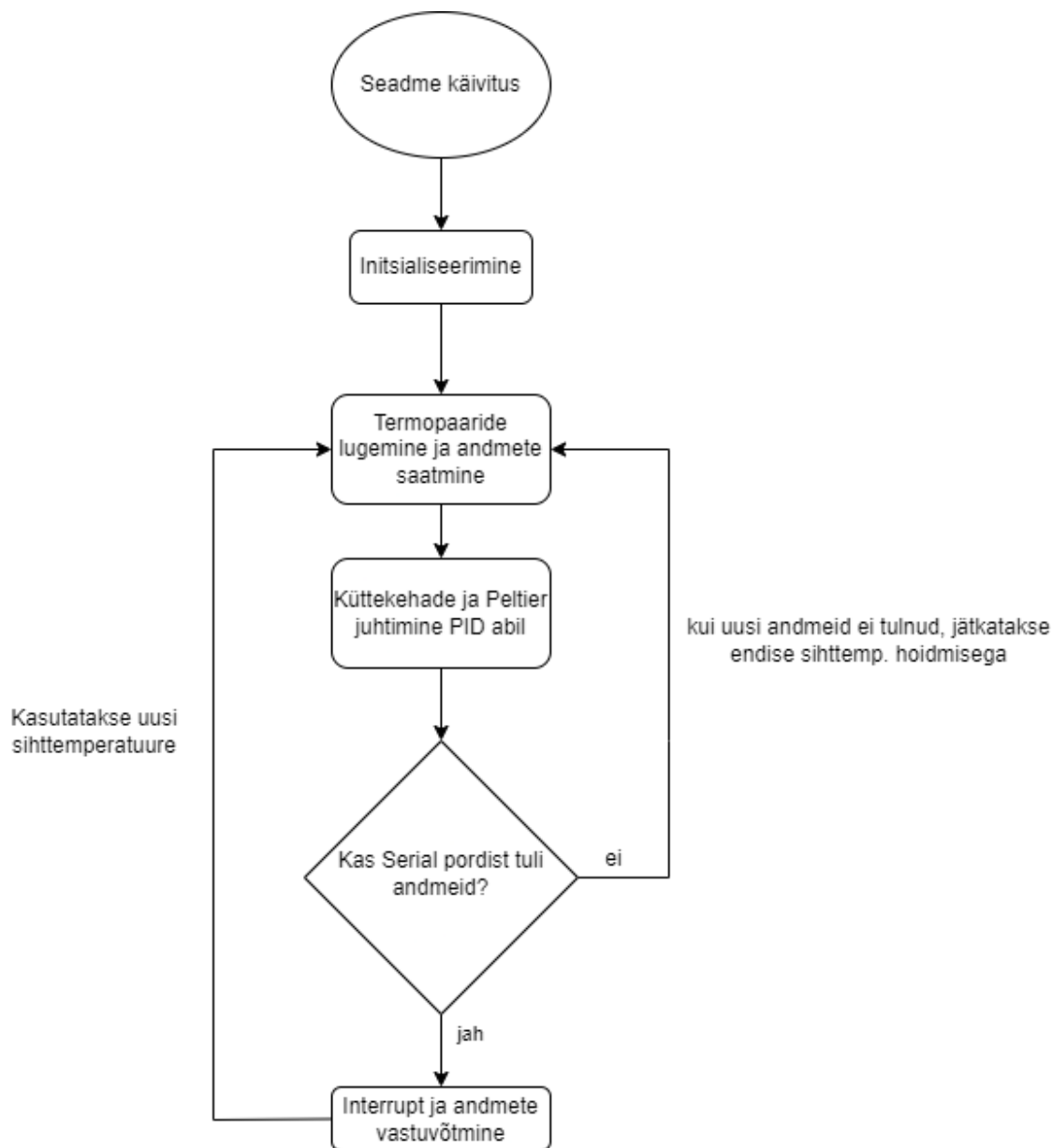
Temperatuuri hoidmiseks rakendas töö autor PID algoritmi. See on tagasisidel põhinev tsükliline algoritm, mille ülesandeks on etteantud parameetri (*set point*) nivoo saavutamine ja hoidmine viisil, kus süsteem jääb stabiilseks ehk ei teki võnkumist, ei teki ülevõnget ja parameetri saavutamine ei võta liialt palju aega [2].

Küttekehade ja jahutuselementide võimsuse reguleerimiseks kasutati pulsitihedusmodulatsiooni PDM [1].

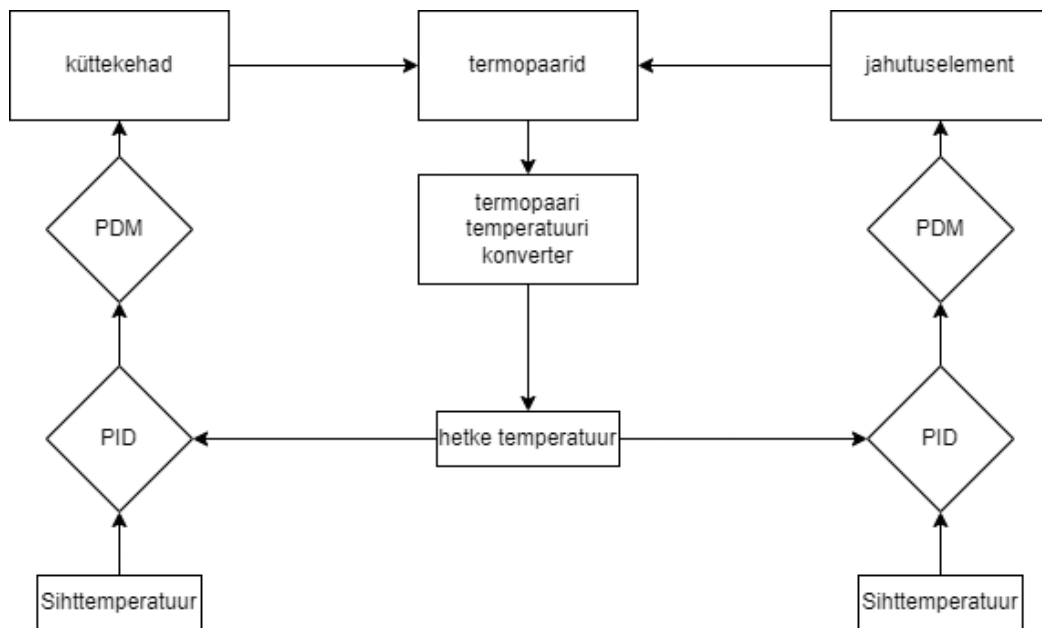
Termopaaride mõõtmine, küttekehade juhtimine ning ühtlasi ka andmete edastamine toimub peatsüklis 10 korda sekundi jooksul. Intervall on valitud katse-eksitus meetodil.

Joonisel 6 on visuaalselt näidatud programmi algoritmi struktuur.

Joonisel 7 on kujutatud andmevoog. Joonisel on näha, kuidas liiguvad signaalid süsteemis.



Joonis 6: tarkvara tööalgoritm.



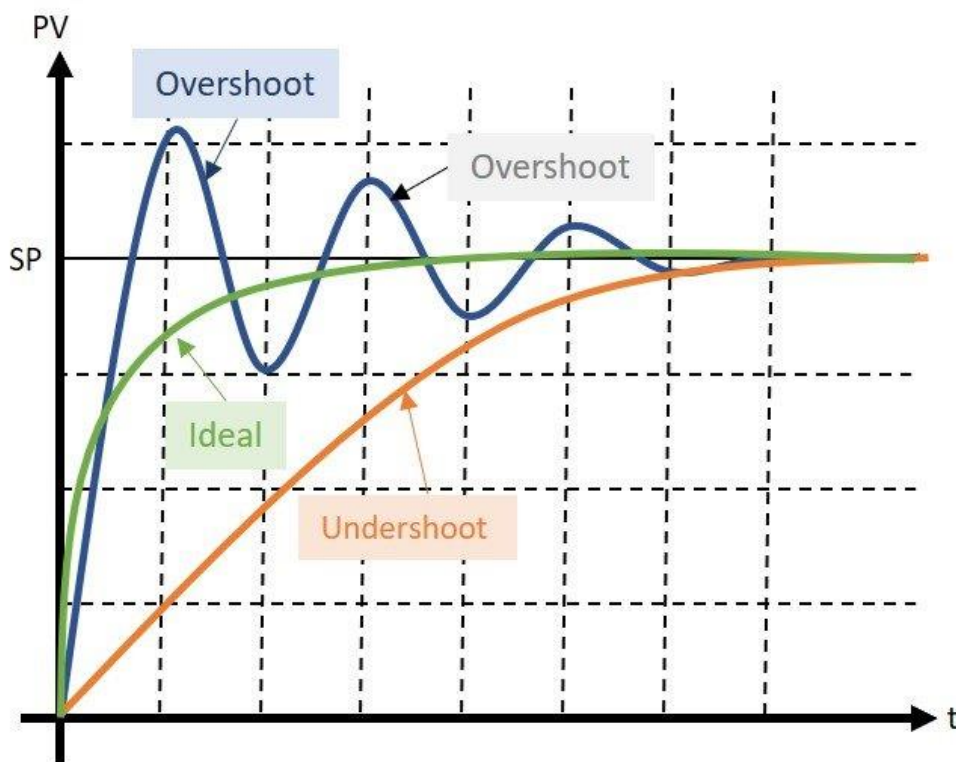
Joonis 7: andmete voo plokkiagramm.

4.2.1 PID kontroll

PID (ingl. *Proportional Integral Derivative*) kontroll on automaatselt optimeeritav ning täpne kontrollsüsteem, mida rakendatakse erinevate parameetrite reguleerimiseks sobival tasemel, näiteks temperatuur, rõhk ja kiirus. Kontrolleri töö põhineb tagasisidel, kus tsüklis pidevalt arvutatakse vea, milleks on soovitud parameetri ja hetke parameetri vahe. Kontrolleri püüab saadud vea põhjal teostada protsessi korrigeerimist. Protsessi kontroll toimub läbi kolme parameetri: proportsionaalne parameeter, integraal ja tuletis. Iga parameetri koefitsient peab olema eraldi defineeritud ning PID funktsiooni tulemus on kolme parameetri summa [2, 32, 33, 34].

Süsteemi häälestamisel tuleb eelkõige kontrollida, et tulemus, antud töös küttekehade temperatuur, oleks stabiilne. Ebastabiilses olekus toimub võnkumine ehk temperatuur ei ole konstantne. Samuti tähtis on minimeerida ülevõnget (ingl. k. *overshoot*). Ülevõnge võib tekkida pärast sihttemperatuuri muutmist kui süsteem peab stabiliseeruma uuel temperatuurinivool. Teatud süsteemides ei ole ülevõnge kriitiline, antud lõputöö lahenduses on soovitatav ülevõnget mitte tekitada, nii et sihttemperatuuri muutmisel muutuks süsteemi temperatuur monotoonselt. Selleks on vaja valida õiged PID parameetrid. Ülevõnge vastand on liiga aeglane soojenemine. Sellise nähtuse miinuseks on kulunud aeg, mis võib olla kriitiline mõõteaparatuuris [33]. Nimetatud protsessid on näidatud joonisel 5, kus on toodud lisaks ülaltoodule ka ideaalne olukord.

Joonisel 8 on graafik, mis näitab nimetatud erinevusi sõltuvalt koefitsientidest.



Joonis 8: tulemise sõltuvus P, I ja D koefitsientide suurusest [33].

Antud lõputöö projektis kasutati P ja D parameetreid, integraal jäi konstantselt nulliks. Tarkvaras toimub pidev PID näitaja arvutamine, mille olulised muutujad on p ja d koefitsiendid, soovitud temperatuur, hetke temperatuur, viga (soovitud temperatuur miinus hetke temperatuur) ning eelmise katse viga. PD näitaja võimalikud väärtused on antud lahenduses 0.0 kuni 1.0 vahemikus, kus 0.0 tähendab relee pidevat suletud olekut, 1.0 tähendab relee pidevat avatud olekut ning vahepealsed väärtused muudavad lineaarselt relee avatud aja pikkust. Proportsionaalne parameeter on vea ja proportsionaalse koefitsiendi korrutis ning diferentsiaallüli on diferentsiaali koefitsient korrutatud vea tuletisega. Tuletist arvutatakse lahutades hetke katse veast eelmise katse vea suurus. Kogu funktsiooni väljundi tulemus on kahe nimetatud lüli summa. Käesolevas töös PD kontrollfunktsiooni saab kirja panna alloleva valemiga.

$$c(t) = kp * e(t) + kd * (T(t) - T_{eelmine})$$

Valem 1: PID funktsioon

, kus kp ja kd on vastavalt proportsionaalne ja diferentsiaalne koefitsient, $T(t)$ on hetke temperatuur ning $T_{eelmine}$ on eelmise mõõtmise temperatuur.

4.2.2 PDM

PDM ehk *Pulse Density Modulation* on modulatsiooni variant, mida kasutatakse analoogsignaali kujutamiseks digitaalsignaalina. PDM signaal on sarnane PWM (*Pulse Width Modulation*) signaaliga, kuid erineb selle poolest, et ühe pulsi pikkus on alati konstantne ja reguleeritakse pulsside vahelist perioodi []. Mõlemad PWM ja PDM funktsioonid on digitaalsüsteemides väga levinud [4, 35].

Autori lõputöös kasutatakse PDM algoritmi küttekehade ja Peltier' elemendi juhtimiseks. Juhtimine on teostatud läbi releede, mida omakorda juhivad NPN transistorid (lülitati rollis). Selline ahel on vajalik, sest küttekehad vajavad 230VAC pinget ja mitu ampri voolu. PDM signaali põhjal lülitatakse releed vastavalt sisse ja välja, kusjuures vajaliku täiteteguri arvutab PID funktsioon.

5 Seadme testimine

Lõputöö raames ehitatud seadme testimine algas kokkupanemise hetkel. Peale komponentide jootmist alustas autor visuaalse kontrolliga, milleks kasutati mikroskoopi. Visuaalsel kontrollil vigu ei ilmunud ning seejärel kontrolliti trükkplaati multimeetriga. Kontrollimise sihiks olid eelkõige mikrokontrolleri jalad, kuna need asuvad üksteisele väga ligidal ning oli suur oht, et need on kokku joodetud. Multimeetriga testis autor lühiste olemasolu. Ühtegi taolist probleemi ei tuvastatud, seda ka mitte teiste komponentide puhul.

Järgmisena ühendati plaat toiteadaptoriga. Plaadi voolutarve oli ligikaudu 20 mA, mis oli ootuspärane. Nii testimisel kui ka edaspidises töös kasutati laboratoorset toiteplokki AIM-TTI EX355P, millega oli võimalik piirata voolu, valida pinget ning näha hetke voolutarvet.

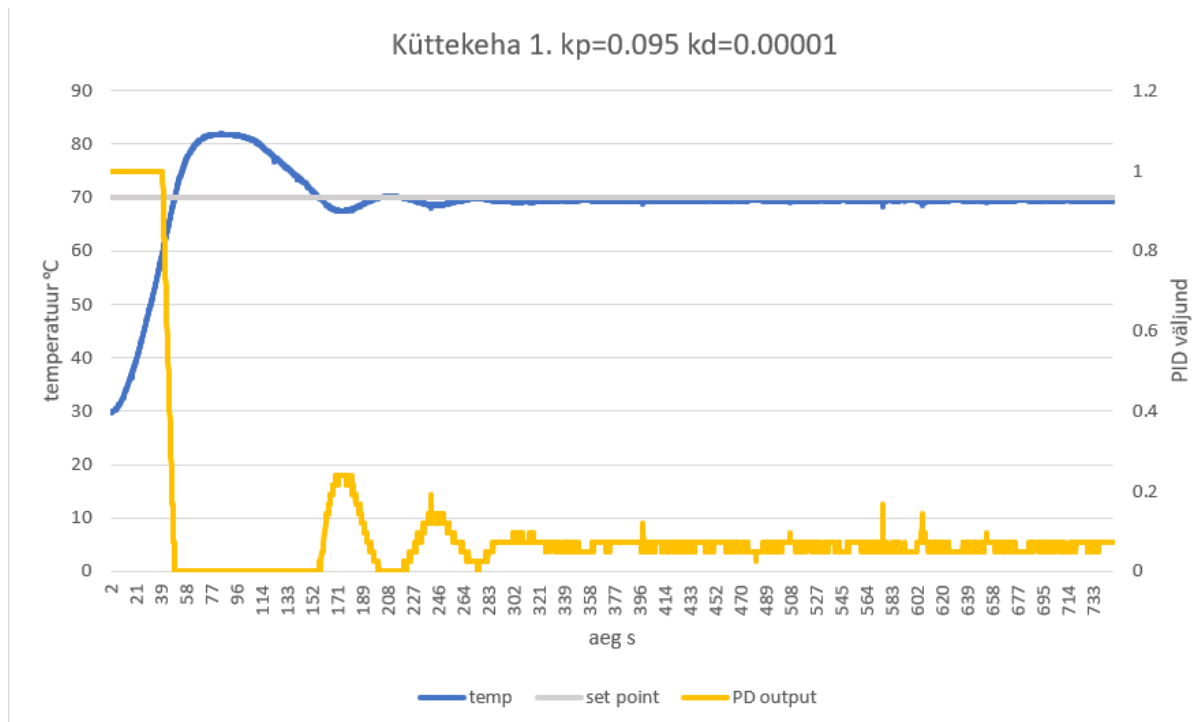
Edaspidises testimises kasutati ostsilloskoopi Rigol DS2102, millega oli võimalik kontrollida koodi toimimist, näiteks soovitud mikrokontrolleri jala loogilist olekut ning-ka teatud sagedusi, näiteks MAX38155 mikrokiibi tööks vajalikku taktsagedust.

5.1 Katsete tulemused

Süsteemi stabiilsuse tagamiseks ja õigete tulemuste saamiseks tuli teostada mitmeid katseid. Katsete jooksul oli tähtsamaks osaks PID funktsiooni häälestus, täpsemalt p ja d erinevate koefitsientide läbiproovimine ning saadud tulemuste põhjal järelduse tegemine. Katsete jaoks kirjutas autor Pythoni keeles skripti, mis loeb kontrollerist saadud andmed ning peale töötlemist kirjutab .csv formaadiga faili ja kuvab andmed jooksvalt ekraanile. Skript võimaldab ka sihttemperatuuri muutmist.

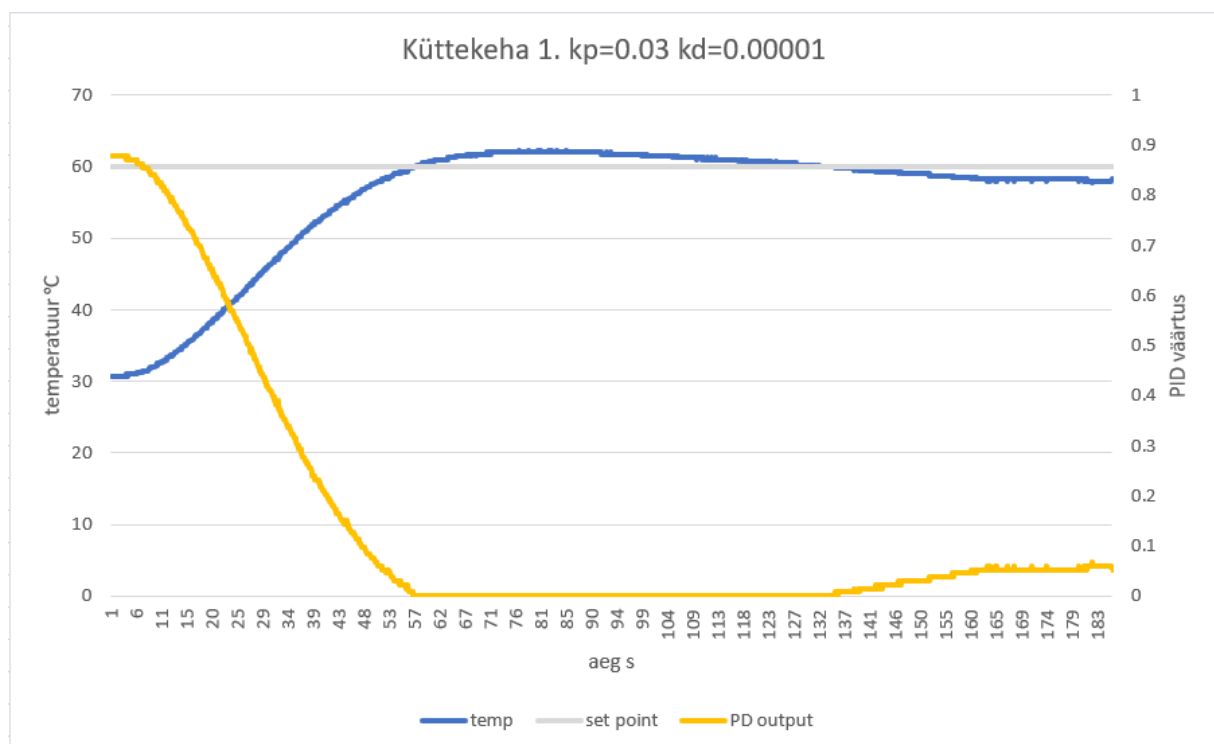
Katsetamisel üritati saavutada olukord, kus ülevõnked oleksid minimaalsed. Katsete ajal oli süsteemis õhuvool läbi auruti, kuumuti ja jahuti (joonis 3) kiirusega 1 l/min, mis vastab õhuvoolule kasvati reaalse töö ajal. Allpool on kujutatud graafikud erinevate katsetulemustega.

Joonisel 9 on näha ülevõnget. Ülevõnge oli ligikaudu 12°C soovitust suurem, mis on liialt suur hälve.



Joonis 9: ülevõnkega katsetulemus

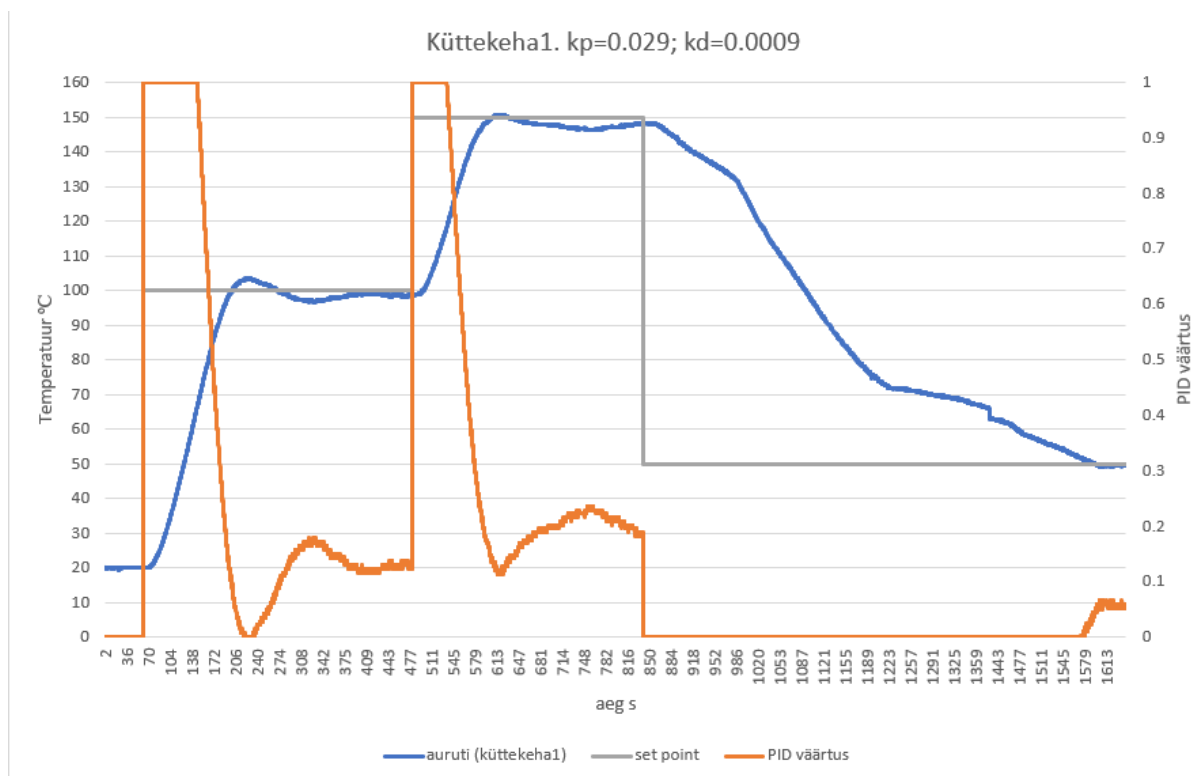
Joonisel 10 on näha head tulemust, kus temperatuur ulatus vaid mõne kraadi üle nivoo.



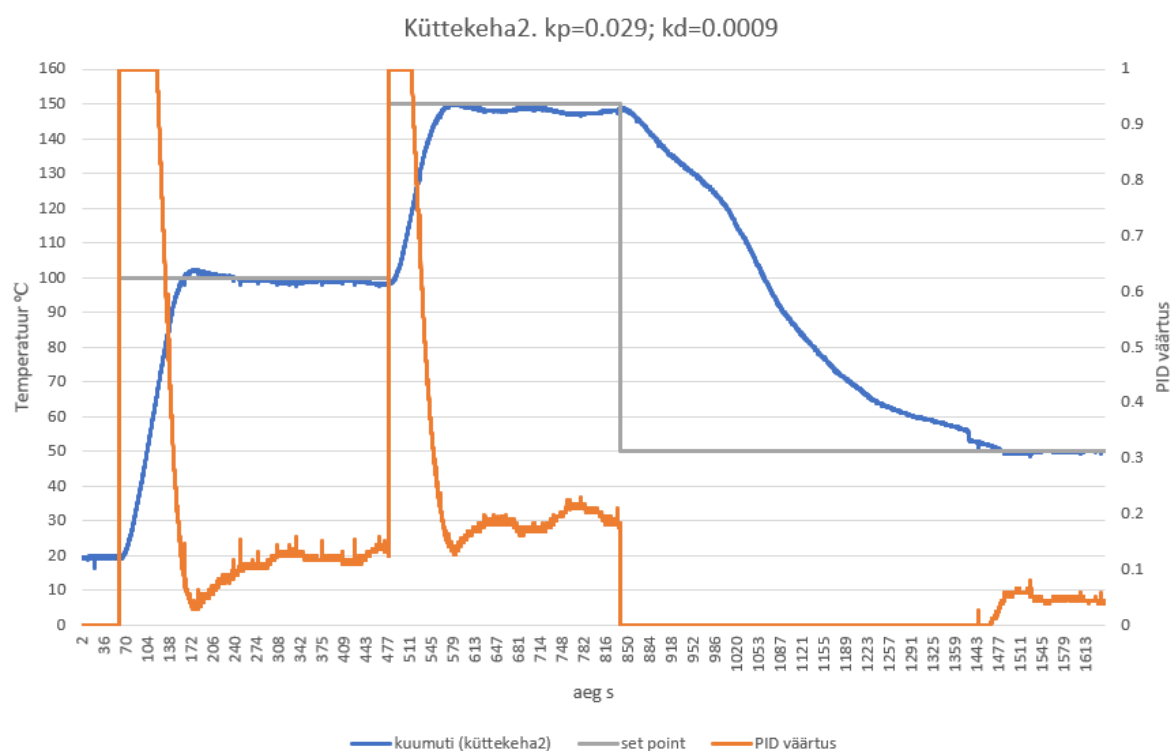
Joonis 10: hea katsetulemus

Viimaks teostas autor katset, kus temperatuur pidi muutuma katse jooksul. Samaaegselt töötasid mõlemad küttekehad ning ka jahuti. Joonistel 11 ja 12 on kujutatud vastavalt esimese ja teise

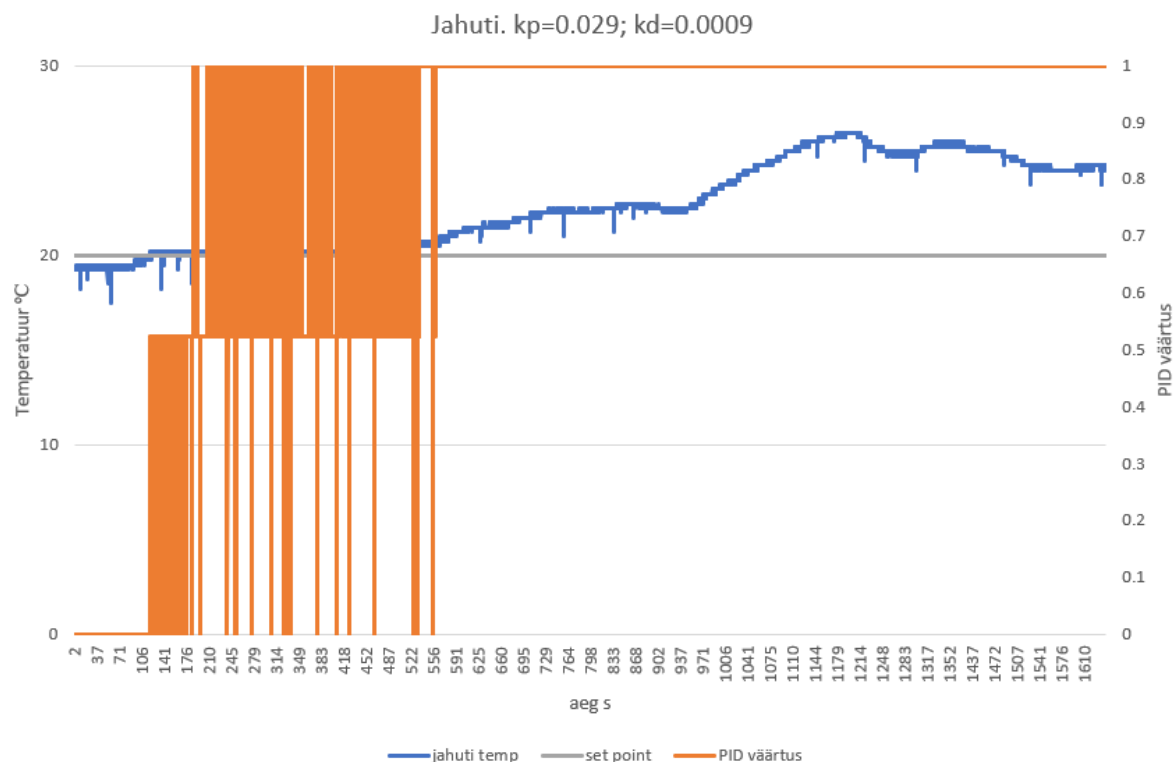
küttekeha temperatuurid. Joonisel 13 on näha jahuti temperatuuri, mis jäi tõusis mõne kraadi võrra, kuid see oli lubatud piirkonnas ja katset ei seganud.



Joonis 11: viimane katse, küttekeha 1.



Joonis 12: viimane katse, küttekeha 2



Joonis 13: jahuti temperatuuri käitumine viimases katses.

Katsetest on näha, et süsteem käitub erinevate sihttemperatuuride puhul erinevalt. Viimane katse näitab hästi, et kui 100°C temperatuuri juures toimus väike ülevõnge, siis 150°C juures oli tulemus parem. Jahuti puhul valiti sihttemperatuuriks 20°C, mis lõpuks tõusis ligikaudu 25°C-ni. Selline tulemus näitab, et jahuti võimsust jääb antud lahendusele väheks, jahutamine toimub aeglaselt, kuid mitte kriitiliselt.

5.2 Ilmnenud probleemid

Üldiselt sujusid lõputöö etapid hästi ning projekt ei nõudnud olulisi muudatusi ja täiendusi. Eraldi väärib märkimist üks viga, mis ilmus programmeerimise alguse hetkeks. Nimelt üks nuppudest (BOOT) ei toiminud õigesti. BOOT nupp on ühendatud protsessori BOOT0 jalaga ning protsessor tuvastab käivitamisel või taaskäivitamisel BOOT0 jala oleku kõrgel nivool, siis käivitatakse püsivara DFU (*Direct Firmware Update*) bootloader, mis võimaldab püsivara kirjutamist protsessori FLASH mällu. Katsetamisel selgus, et loodud skeemis töötas nupp eeldatust tagurpidi ja vajab protsessori normaalseks käivitamiseks vajutamist, vaikimisi läks protsessor alati DFU režiimi. Probleem lahendati asendades lüliti variandiga, mis vajutamisel katkestab ühenduse ja muidu ühendab liinid.

Kokkuvõte

Käesolev bakalaureusetöö kirjeldab temperatuurikontrolleri loomist aerosoolikasvati jaoks. Seadme eesmärgiks on etteantud tasemel temperatuuri hoidmine aerosoolikasvati erinevates osades. Kontroller saadab jooksvaid mõõtmistulemusi ja võtab vastu juhtimissignaale üle USB liidese.

Eesmärgid on suures osas täidetud. Küttekehade soojenemisel toimub väike võnge üle etteantud nivoo, mis on oodatud nähtus ning paari kraadi ulatuses on lubatud. Eksperimentide jooksul selgus, et võnke ulatus sõltub soovitud temperatuurist ehk erineval etteantud nivool käitub temperatuur erinevalt. Jahuti toimib toatemperatuuril ootuspäraselt. Eksperimentaalselt leiti parimad sobilikud PID funktsiooni parameetrid.

Trükkplaadi disaini võib üldjoontes pidada õnnestunuks. Probleemiks oli vaid ootuspärasest vastupidiselt toimiv nupp ning see probleem on kõrvaldatud.

Süsteemi parandamiseks on võimalik tulevikus rakendada andmeedastuse üle Etherneti, näiteks kasutades vahelülina teist kontrollerit.

Töö toimus mitmes etapis ning iga etapp oli autori jaoks arendav. Autor disainis juhtplaadi ning programmeeris selle. Omandas teadmisi ARM arhitektuuriga protsessorite programmeerimises, õppis tundma Rust keele ning soojuselementide juhtimist.

Viidatud kirjandus

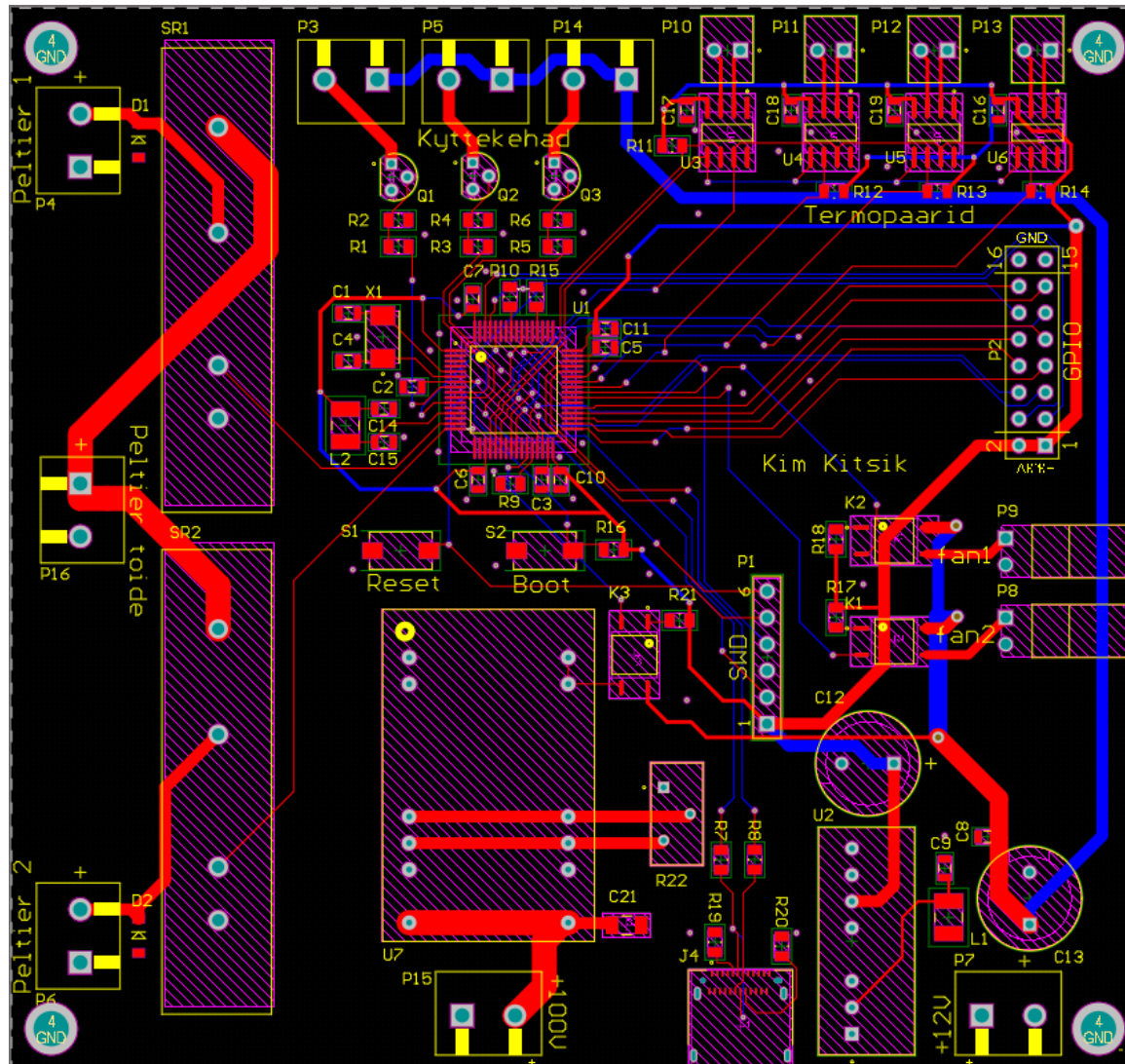
- [1] Pulse Width Modulation [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://www.realdigital.org/doc/333049590c67cb553fc7f9880b2f79c3>
- [2] PID Theory Explained [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/06/pid-theory-explained.html>
- [3] Thermocouple probes [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-hub>
- [4] Heating Elements [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://www.iqsdirectory.com/articles/heating-element.html>
- [5] Thermoelectric cooling [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_cooling
- [6] SPI [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://et.wikipedia.org/wiki/SPI>
- [7] SWD – ARM’S ALTERNATIVE TO JTAG [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://research.kudelskisecurity.com/2019/05/16/swd-arms-alternative-to-jtag/>
- [8] Vallaste e-teatmik [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <http://www.vallaste.ee>
- [9] Omron E5CB [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://industrial.omron.eu/en/products/e5cb>
- [10] Omron E5CB datasheet [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] https://assets.omron.eu/downloads/datasheet/en/v3/h09e_e5cb_temperature_controller_datasheet_en.pdf
- [11] E5CB-R1P AC100-240 [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://ee.farnell.com/omron-industrial-automation/e5cb-r1p-ac100-240/controller-temp-1-16-din-100-240vac/dp/1973877?st=omron%20e5cb>
- [12] West Control Solution Product Catalog [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://www.west-cs.com/assets/Brochures/BR-PC-2-US-1906-web-1.4.pdf>
- [13] West Instruments P6100 PID Temperature Controller [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://uk.rs-online.com/web/p/temperature-controllers/4542205>
- [14] TA Series, Autonics [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://www.tme.eu/Document/090b7073e22d085242dff5d5785de713/TA-SERIES-EN.pdf>
- [15] TAS-B4RJ2C AUTONICS [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://www.tme.eu/ee/details/tas-b4rj2c/temperatuuri-regulaatorid/autonics/>
- [16] Universal Serial Bus Class Definitions for Communication Devices [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] https://cscott.net/usb_dev/data/devclass/usbcdc11.pdf

- [17] STM32F405xx STM32F407xx datasheet [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/dm00037051.pdf>
- [18] USB DFU - The USB Device Firmware Upgrade standard [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] [https://wiki.openmoko.org/wiki/USB_DFU -
The USB Device Firmware Upgrade standard](https://wiki.openmoko.org/wiki/USB_DFU_-_The_USB_Device_Firmware_Upgrade_standard)
- [19] Chromel [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromel>
- [20] Aludel [Võrgumaterjal] [Vaadatud 10.05.2022] <https://en.wikipedia.org/wiki/Aludel>
- [21] What is a type K Thermocouple? [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://www.omega.com/en-us/resources/k-type-thermocouples>
- [22] RS Pro Heating Element, 345 W, 230 V ac [Võrgumaterjal] [Vaadatud 12.05.2022] <https://export.rsdelivers.com/product/rs-pro/heating-element-345-w-230-v-ac/9209962>
- [23] MCTE1-19913L-S Thermoelectric Module [Võrgumaterjal] [Vaadatud 13.05.2022] <https://www.farnell.com/datasheets/3180753.pdf>
- [24] MCKSL60D20-L Solid State Relay [Võrgumaterjal] [Vaadatud 13.05.2022] <https://www.farnell.com/datasheets/3157355.pdf>
- [25] Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples [Võrgumaterjal] [Vaadatud 14.05.2022] <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/measuring-temp-using-thermocouples.html>
- [26] MAX31855 [Võrgumaterjal] [Vaadatud 15.05.2022] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>
- [27] EAS - Electrical Aerosol Spectrometer [Võrgumaterjal] [Vaadatud 15.05.2022] <https://www.airel.ee/products/eas/>
- [28] Crate stm32f4xx_hal [Võrgumaterjal] [Vaadatud 15.05.2022] https://docs.rs/stm32f4xx-hal/0.13.1/stm32f4xx_hal/index.html
- [29] Crate cortex_m [Võrgumaterjal] [Vaadatud 16.05.2022] https://docs.rs/cortex-m/0.7.4/cortex_m/index.html
- [30] Github [Võrgumaterjal] [Vaadatud 16.05.2022] <https://github.com/>
- [31] How Rust is Made and “Nightly Rust” [Võrgumaterjal] [Vaadatud 17.05.2022] <https://doc.rust-lang.org/book/appendix-07-nightly-rust.html>
- [32] 9.2: P, I, D, PI, PD, and PID Control [Võrgumaterjal] [Vaadatud 17.05.2022] [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial and Systems Engineering/Book%3A Chemical
Process Dynamics and Controls \(Woolf\)/09%3A Proportional-Integral-
Derivative \(PID\) Control/9.02%3A P%2C I%2C D%2C PI%2C PD%2C and PID control](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.02%3A_P%2CI%2CD%2CPI%2CPD%2C_and_PID_control)

- [33] What is a pid controller and how it works? [Võrgumaterjal] [Vaadatud 17.05.2022]
<https://plcynergy.com/pid-controller/>
- [34] PID Temperature Controller [Võrgumaterjal] [Vaadatud 17.05.2022]
<https://www.instructables.com/PID-Temperature-Controller/>
- [35] Pulse-density modulation [Võrgumaterjal] [Vaadatud 17.05.2022]
https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-density_modulation
- [36] Open On-Chip Debugger (OpenOCD) at Linaro [Võrgumaterjal] [Vaadatud 18.05.2022]
<https://www.linaro.org/blog/open-on-chip-debugger-ocd-at-linaro/>

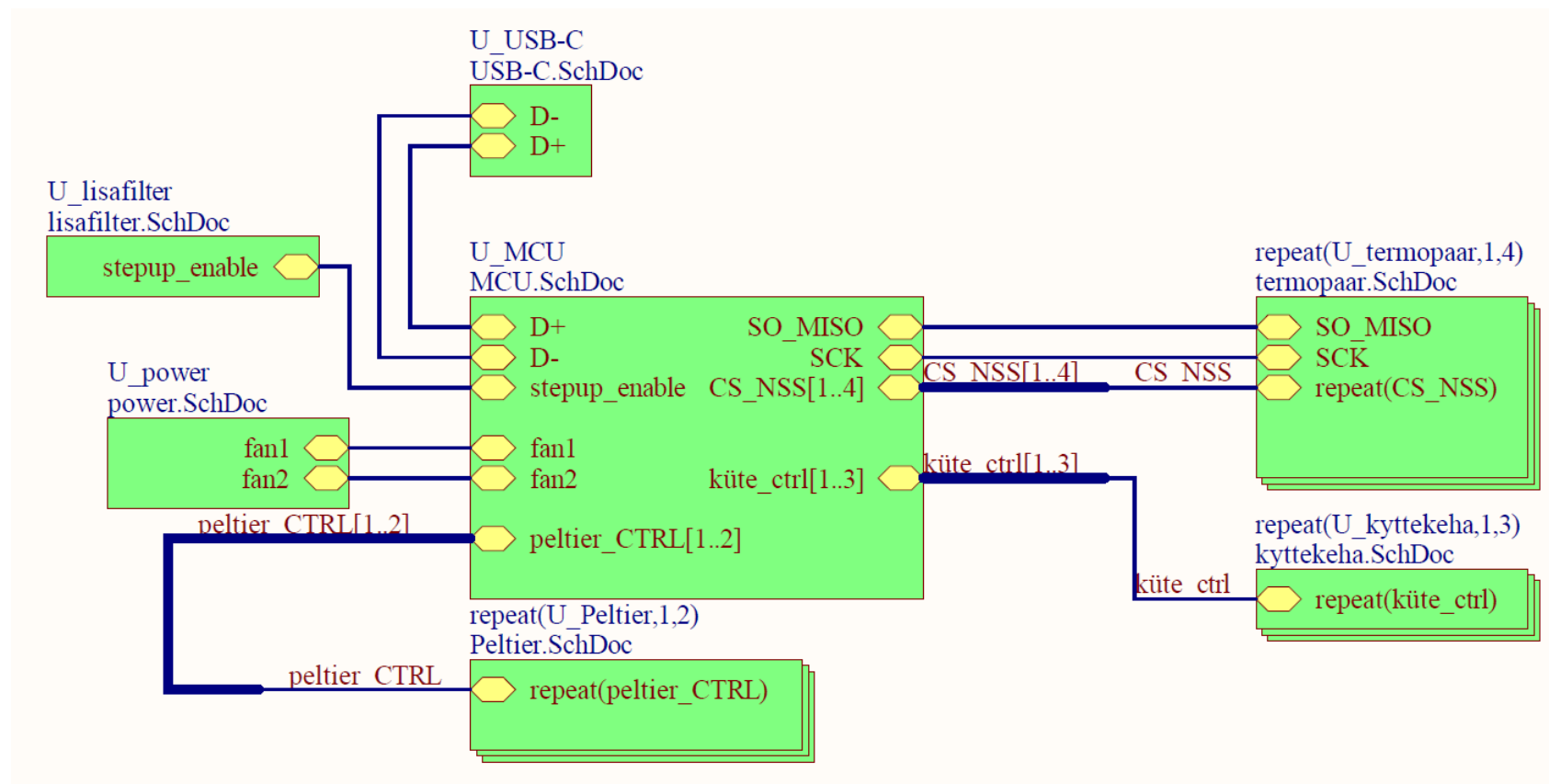
Lisa 1. Trükkplaadi disain

Antud joonisel on kujutatud trükkplaadi joonis ilma GND ja +12V polügoonideta, et oleksid nähtavad ka teise poole rajad.



Lisa 2. Trükkplaadi skeem

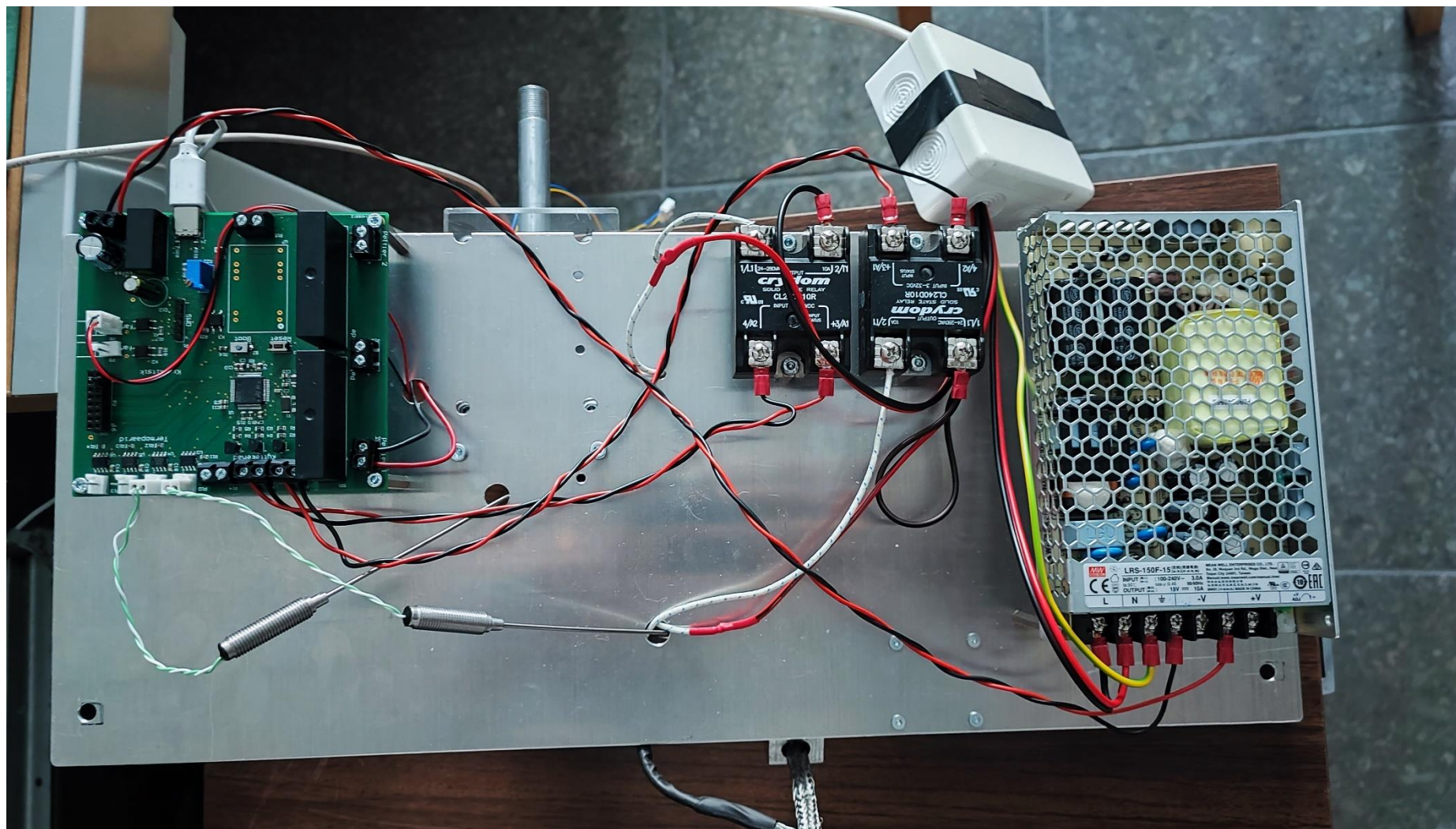
Skeemi struktuur







Lisa 3. Valminud lahendus



Lisa 4. Github repositooriumi link

Autori Github antud lõputöö repositoorium:
https://github.com/kimkitsik/aerosol/tree/aerosolikasvati_temperatuuri_kontroller/src

Tänuavaldused

Soovin tänada lõputöö juhendajaid Paap Koemetsa ja Sander Mirmet, et pakkusid mulle sellist arendavat, huvitavat ja õpetlikku bakalaureusetöö teema ning aitasid selle teostada.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Sander Mirmet', located in the upper right area of the page.

Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kim Kitsik,

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
„Aerosoolikasvati temperatuurikontroller“,
(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on Paap Koemets ja Sander Mirme,

(juhendaja nimi)

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Kim Kitsik

25.05.2022