

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Kaarel Kõomägi
**Peltier' elemendi juhtimine
alalisvoolumootori draiveriga**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika eriala

Juhendaja:
teadur Andrus Punning

Tartu 2024

Resümee/Abstract

Peltier' elemendi juhtimine alalisvoolumootori draiveriga

Käesolevas töös uurime kahte probleemi:

1. Kas ja kui võimast Peltier' elementi saab juhtida ST alalisvoolumootori draiveritega. Kahtlust äratav asjaolu, et need mikroskeemid on väga väikeses korpuses – SO-16 ja PowerSSO-36. Näitame, et saab juhtida vastavalt kuni 60W ja kuni 200W Peltier' elemente.
2. Kas on võimalik korraldada soojusülekanne tasapinnalise Peltier' elemendi ja silindrikujulise objekti vahel kasutades äärmiselt õhukest ülihea soojusjuhtivusega materjali. Katsed näitavad, et hoolimata soojusjuhtivusest on reaalne soojusülekanne ikkagi nigel.

CERCS: T170, elektroonika

Märksõnad: Peltier' element, H-sild, RTD, PGS grafiitleht

Peltier device control with a direct current motor driver

In this paper, we investigate two problems:

1. Whether and how powerful a Peltier device could be controlled using an ST direct current motor driver. The fact that both microcircuits are in very small packages – SO-16 and PowerSSO 36, makes it seem suspicious. We show that it is possible to drive up to 60 W and 200 W Peltier devices, respectively.
2. Is it possible to arrange a heat transfer between a planar Peltier device and a cylindrical object using an extremely thin material with excellent thermal conductivity? Tests show that, despite the thermal conductivity, real heat transfer is still poor.

CERCS: T170, electronics

Märksõnad: Peltier device, H-bridge, RTD, PGS graphite sheet

Sisukord

Resümee/Abstract	2
Sisukord.....	3
Jooniste loetelu.....	5
Tabelite loetelu.....	6
Lühendid, konstandid, mõisted	7
1 Sissejuhatus	8
1.1 Eelnev lahendus	8
1.2 Ülesande püstitus	8
1.3 Peltier' elemendi tööpõhimõte	9
1.4 Peltier' elemendi juhtimine	9
1.5 Temperatuuri mõõtmine	9
1.6 Grafiitleht	10
2 Eksperimenti ülesehitus.....	11
2.1 Peltier' elemendi vastaskülg	11
2.2 Soojusülekande korraldamine	11
2.3 Temperatuuriandurite paigutus	13
3 Metoodika, elektroonika.....	14
3.1 Peltier' element	14
3.2 Mikrokontroller	15
3.3 Süsteemi lihtsustatud elektriskeem	15
3.3.1 Toiteallikas	16
3.4 Alalisvoolumootori draiver	16
3.4.1 LC-filtri.....	16
3.4.2 H-silla sisse-, välja- ja ümberlülitamine	17
3.4.3 Voolupeegli mõõtmine	18
3.5 Temperatuuride mõõtmine	19
3.5.1 AD-7124-8.....	19
3.5.2 AD7124-8 ühendused	20
3.5.3 Temperatuuri arvutamine	21
4 Andmete analüüs	22
4.1 Tehtud mõõtmised.....	22
4.2 LC-filtri analoogmõõtmised.....	23

4.3	Temperatuurimõõtmised	24
4.4	H-silla temperatuur.....	27
4.5	H-silla voolupeegel	29
5	Kokkuvõte.....	31
5.1	Järeldused.....	31
	Viited.....	33
	Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....	35

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: Materjalide soojusjuhtivused	10
Joonis 2.2: Soojusülekanne korraldus	12
Joonis 2.3: Temperatuuriandurite paigutus	13
Joonis 3.1 Süsteemi elektriskeem.....	15
Joonis 3.2: LC- filter	17
Joonis 3.3: H-silla lülituste loogika.....	18
Joonis 3.4: Voolupeegli mõõtmine.....	19
Joonis 3.5 AD7124-8 elektriskeem	20
Joonis 3.6: RTD takistuse sõltuvus temperatuurist	21
Joonis 4.1: Analoogmõõtmiste skeem.....	22
Joonis 4.2: Analoogmõõtmised	23
Joonis 4.3: PE pingelang	24
Joonis 4.4 PE võimsus.....	24
Joonis 4.5 Konfiguratsioon 1 mõõtetulemused	25
Joonis 4.6 Konfiguratsioon 2 mõõtetulemused	26
Joonis 4.7: Konfiguratsioon 2, soojendamine	27
Joonis 4.8: H-sildade temperatuur ja täitetegur.....	28
Joonis 4.9 Konfiguratsioon 3, Voolutugevus	30

Tabelite loetelu

Tabel 3.1: PE-de andmed	14
Tabel 3.2: LC- filtri komponendid	17
Tabel 4.1: temperatuuri muut toatemperatuurist	26
Tabel 4.2 H-silla MOSFET-ide poolt arendatav võimsus ja korpuse temperatuur	29
Tabel 4.3 Voolupeegli ja takistil mõõdetud voolu tugevuse võrdlus	29

Lühendid, konstandid, mõisted

PWM - pulsilaiusmodulatsioon

PE - Peltier' element

MOSFET - isoleeritud paisuga väljatransistor

RTD – *resistance temperature detector*, takistusepõhine temperatuuriandur

ADC - analoog-digitaalmuundur, seadeldis mõõtmaks analoog signaale

USART – *universal synchronous asynchronous reciever-transmitter*, asünkroonse ja sünkroonse jadasuhtluse standard

SPI - *Serial Peripheral Interface*, ühe ülema ja mitme alluvaga sünkroonne jadasiini standard

1 Sissejuhatus

Taimede gaasivahetuse mõõtmine pakub võimaluse hinnata taime tervist, kasvu ning reaktsiooni väliskeskkonna muutustele. Taimedele tähtsaid omadusi nagu fotosüntees, hingamissagedus ja aurumiskiirus, saab määratleda läbi süsinikdioksiidi (CO_2) ja veeauru (H_2O) gaasivahetuse mõõtmise. Lisaks saab osooni (O_3) mõõtmise kaudu hinnata keskkonna kahjulikku mõju taimedele. Seetõttu on need mõõtmised tähtsad uurijatele, ökoloogidele, taimekasvatajatele ning seepärast on Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis loodud süsteem, tegemaks selliseid mõõtmisi.

1.1 Eelnev lahendus

Taime hoidmiseks on sobiva suurusega kamber ning selle sisese õhu temperatuuri tuleb hoida konstantsena vahemikus $15\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$ mõõtmisaja (1–10 tunni) jooksul sõltumata toatemperatuurist, mis võib olla umbes samas vahemikus. Kambrid on temperatuuri hoidmiseks topeltseina ja veesärgiga, millest voolab läbi termostaadist tulev konstantse temperatuuriga vesi. Kambrisse lastakse gaase, mille CO_2 , H_2O ja O_3 kontsentratsioonid on ette määratud. Osooni kasutamisel peab kamber olema materjalist, mis ei oksüdeeru O_3 mõjul, reaalselt kasutatavad materjalid on teflon, klaas, ja roostevaba teras. Kambrid on valmistatud seega roostevabast terasest, nende valmistamine hõlmab endast täppistreimist, freesimist ja keevitamist, mistõttu on kambri valmistamine kallis.

Gaasivahetust mõõdetakse kahe gaasianalüsaatoriga, üks O_3 mõõtmiseks ning teine mõõtmaks CO_2 ja H_2O . Nende abil mõõdetakse kambrisse siseneva gaasi sisaldust ning kambrist väljuva gaasi sisaldust. Kuna mõõteriistad on kallid, siis mõõtmaks mitmeid kambreid ning nii sisenevat kui ka väljuvat gaasi, lülitatakse gaasianalüsaatoreid elektriliste klappide abil kambrite sisenevate ja väljuvate torude vahel.

See lahendus on kallis ning mitte skaleeruv: teistsuguse suurusega taime jaoks tuleb teha täielikult uus mõõteaparatuur või vähemalt täielikult uus kamber.

1.2 Ülesande püstitus

Töö eesmärgiks on uurida alalisvoolumootori kontrolleri sobivust Peltier' elemendi juhtimisel. Lisaks uurida, kas ja kui efektiivset soojusülekannet õnnestub korraldada kambrile hea soojusjuhi (PGS grafiitlehtede) abil Peltier' elemendilt (edaspidi ka PE). Sellisel juhul saaks kambrina hakata kasutama lihtsalt roostevabast terasest toru.

1.3 Peltier' elemendi tööpõhimõte

Peltier' element on pooljuhtseade, mis kasutab ära Peltier' efekti, muutmaks temperatuure enda kahel küljel. Peltier' efekt seisneb selles, et kui vool liigub läbi termopaari, siis ühel termopaari sõlmel eraldub soojus ning teisel sõlmel neeldub soojus [1]. Temperatuuri absoluutne erinevus keskkonna temperatuurist on mõlemal elemendi küljel sama suur. Muutes Peltier' elementi läbiva voolu polaarsust, vahetuvad ka küljed: kül, mis enne tootis sooja, hakkab tootma külma.

1.4 Peltier' elemendi juhtimine

Lihtsaim kasutusviis on ühendada PE konstantse vooluallikaga, sel juhul PE soojendab-jahutab nii palju nagu toiteallikas võimaldab. Antud töö kontekstis pole see mõeldav: tahame hoida temperatuuri kindlal väärtusel, selleks vajalik soojushulk sõltub toatemperatuurist. Lisaks pole soovitud temperatuur alati madalam kui toatemperatuur. Loodav süsteem nõuab, et oleks võimalik muuta PE-d läbiva voolu nii suurust kui ka polaarsust.

PE juhtimiseks sobiks näiteks reguleeritav toiteplokk, mille väljundit saame PE ühelt viigult teisele lülitada. Oleks võimalik kasutada ka võimsusvõimendit, see võimaldab nõrga signaaliga tüürida suurt võimsust, helitööstuses rakendatakse seda seadmetel, mille takistused on PE-ga samas suurusjärgus. Loodavas süsteemis kasutatakse Peltier' elemendi juhtimiseks H-silda, see võimaldab toita PE-d konstantse pingeallikaga ning muuta voolu tugevust ning polaarsust, kusjuures kogu süsteemi juhib mikrokontroller.

H-sillad on kasutusel näiteks elektrimootorite kontrollerites ning võimaldavad kontrollida ka koormust läbivat voolutugevust, rakendades PWM-i silla lülititel.

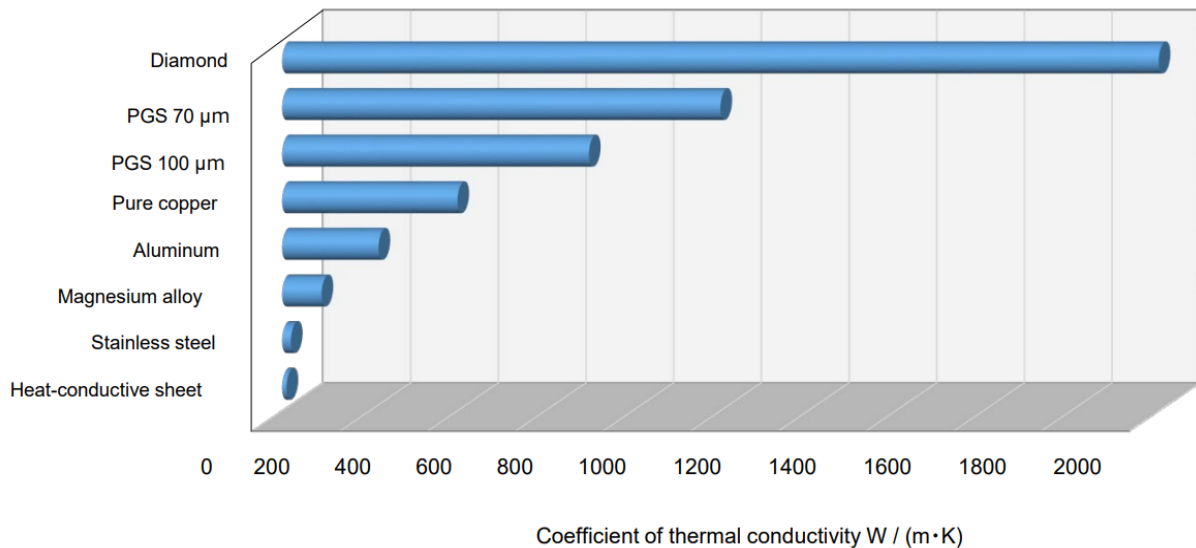
Kaitsmaks PWM-ist tuleneva vahelduvvoolulise müra eest kasutatakse LC-filtrit. Kontrollerit valides tuleb pöörata tähelepanu lülitussagedusele (*switching frequency*): mida kõrgema sagedusega PWM-i on võimalik kasutada, seda väiksemaid mahtuvusi ja juhtivusi on vaja [2]. Kuigi müra ei kahjusta PE-d, enam kui 5% müra vähendab PE kasutegurit [3].

1.5 Temperatuuri mõõtmine

Hindamaks soojusülekande efektiivsust on vajalik mõõta Peltier' elemendi temperatuuri ning ka kambri temperatuuri. Lahenduses kasutati selleks temperatuuriandureid ehk RTD-sid (*Resistance Temperature Detector*), nende temperatuurimuut on lineaarsem ning täpsem lahenduse mõõtevahemikus (0–135 °C). Süsteemis kasutati NB-PTCO-170 marki Pt1000 [4] RTD-sid. Pt1000: Pt tähistab plaatina, takistus on 1000 Ω, kui temperatuur on 0 °C. Ehkki tüüpilisemad on Pt100-d, võimaldab Pt1000-de kasutamine süsteemi väikse mõttepiirkonna tõttu kõrgemat täpsust: takistuse muut kraadi kohta on 10 korda suurem.

1.6 Grafiitleht

Korraldamaks soojusülekannet Peltier' elemendilt kambrile, kasutame pürolüütilisel meetodil valmistatud PGS grafiitlehti Panasonic EYG-S121807 [5]. Grafiitlehed on ülimalt hea soojusjuhtivusega ning on loodud vahendamaks soojust elektroonilistelt seadmetelt. Materjal on õhuke – 70 μm - ja suhteliselt habras, mistõttu peab selle käsitlemisel olema ettevaatlik. Jooniselt 1.1 [6] on näha, et PGS materjali soojusjuhtivus on kordades parem kui klaasil, terasel või vasel, ning jääb alla ainult teemantile.



Joonis 1.1: Materjalide soojusjuhtivused

2 Eksperimendi ülesehitus

Loodav süsteem hõlmab endast Peltier' elementi, soojusülekanne, temperatuurisensoreid ning kambrit, mille heaks lähenduseks on 1 mm seinapaksusega roostevabast terasest tops või torujupp. Temperatuuriandurite andmeid kasutatakse Peltier' elemendi juhtimiseks ning soojusülekanne tõhususe hindamiseks. Kõiki seadmeid kontrollitakse STM32 Nucleo-G431KB arendusplaadi abil. Süsteemi peamine eesmärk on võimaldada temperatuuri reguleerimist kambri.

Tõestamist vajavad küsimused on:

1. kas selline soojusülekanne meetod vastab nõuetele piisavalt hästi?
2. kas ja kui võimast Peltier' elementi saab juhtida ST alalisvoolumootori draiveritega, ilma et draiver üle kuumeneks?

2.1 Peltier' elemendi vastaskülg

Kui PE-d läbiv vool kasvab, siis kasvab PE külgede temperatuurivahe. Juhtides külma PE ühelt küljelt kambri, kasvab teise külje temperatuur. See tähendab, et ka külm PE külg soojeneb, sest temperatuurivahe jääb sama voolutugevuse juures sama suureks. Lisaks on PE-l väike parasiitakistus, mis soojendab tervet elementi. Nendel kahel põhjusel on vaja hoida PE vastaskülje temperatuuri stabiilsena. Seepärast kinnitati vastasküljele arvutiprotsessori radiaatori ventilaatoriga, mis puhub toaõhku radiaatori peale.

2.2 Soojusülekanne korraldamine

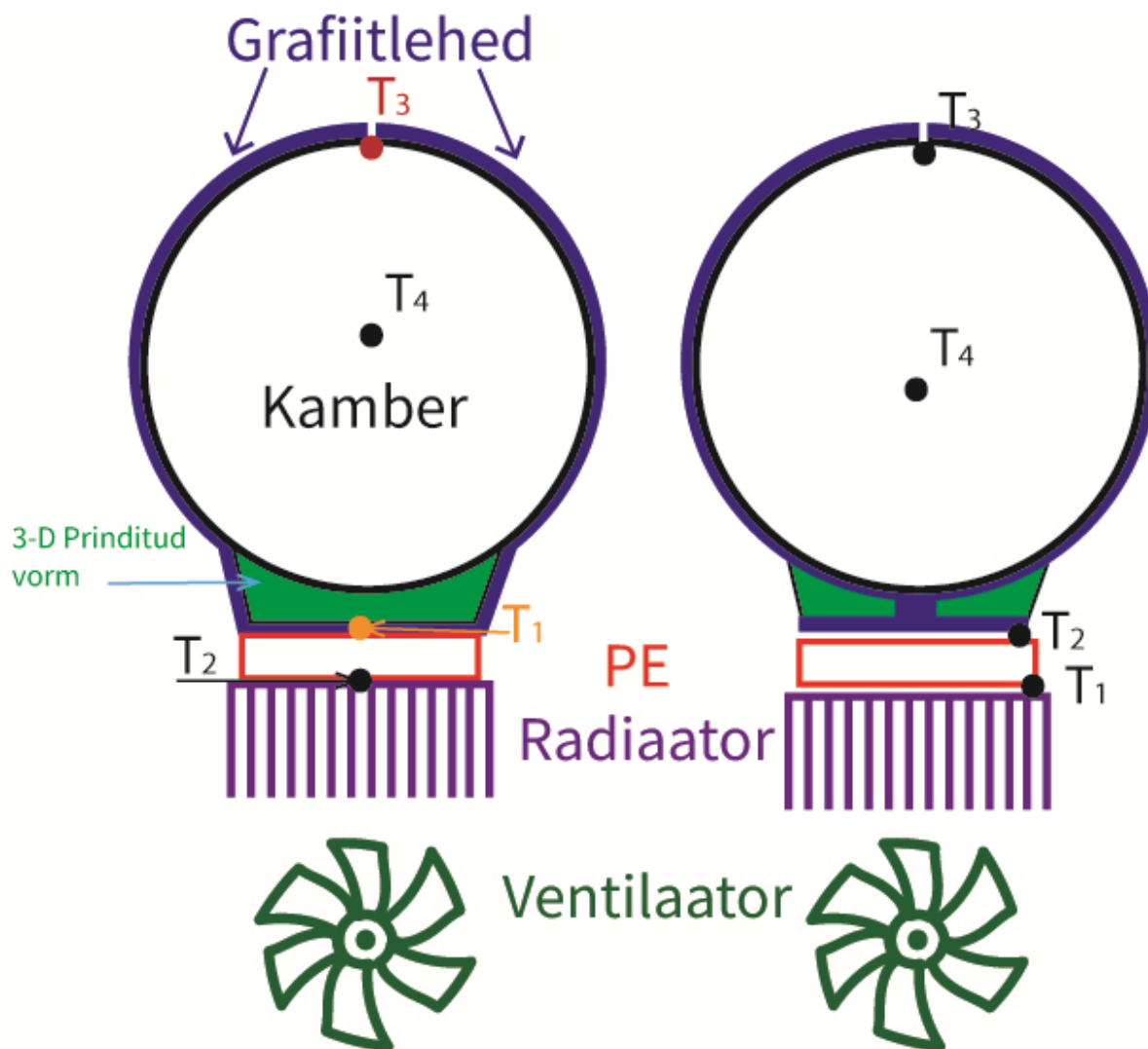
Kamber on roostevabast terasest silindriline purk. Selle kõrgus ja diameeter on 10 cm. Peltier' elemendi pindala on 25 cm^2 , grafiitlehe ja kambri kokkupuutepindala on 262 cm^2 .

Et oleks võimalik Peltier' elementi kambri võimalikult lähedale seada, valmistati 3D-printimise teel vormi, mille üks külg on lapik Peltier' elemendi jaoks ja teine külg selliselt nõgus, et saab vormi vastu kambrit suruda.

Vähendamaks soojuskadusid läbi kambri välisseina, valmistati makrofleksist vorm ning tehti kambri pleksiklaasist kate. Parandamaks soojusvahetust kambri ja kambri sisese õhu vahel, kinnitati kaane külge ka väike 5 V 0.165 A ventilaator CFM-4010V-070-273.

Töö käigus tehti kaks veidi erinevat soojusülekanne korraldust: erinevad on 3D-prinditud vormid eesmärgiga optimeerida grafiitlehede ja kambri kokkupuutepindala (joonis 2.2).

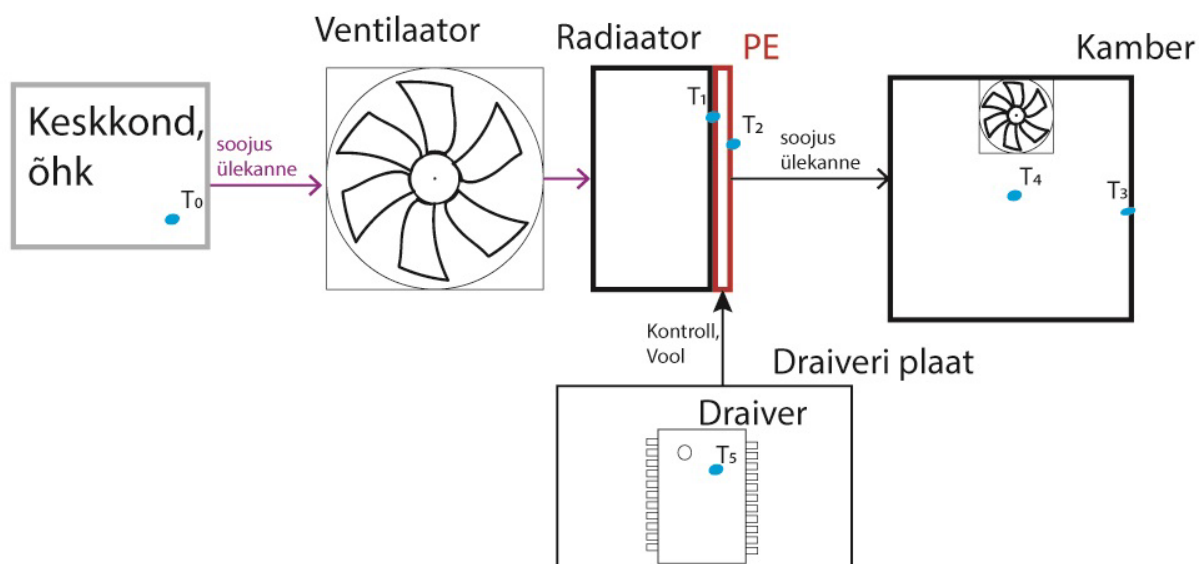
Lõpuks pandi süsteem kokku, nagu on näidatud joonisel 2.2: vorm vastu kambrit, grafiitlehed ümber vormi ja kambri, PE vastu vormi, radiaator ja vorm kambri külge. Temperatuuriandurid T_3 ja T_5 on liimitud vastava pinna külge.



Joonis 2.1: Soojusülekanne korraldus

2.3 Temperatuuriandurite paigutus

Jälgimaks süsteemi tööd, paigutati temperatuuriandurid nagu on näha joonisel 2.3: kambris seinale (T_3), kambris õhku (T_4), Peltier' elemendi mõlemale küljele (T_1 , T_2), alalisvoolu draiveri põhikorpusele (T_5) ning toatemperatuuri (T_0) mõõdeti termomeetriga OKY3065-3.



Joonis 2.2: Temperatuuriandurite paigutus

3 Metoodika, elektroonika

Tegime töö vältel kolm erinevat süsteemi. Vahetasime nii Peltier' elemente, H-sildasid kui ka kambrit ja soojusülekaneks kasutatavat materjali. Esimese konfiguratsiooni loomine on töös kõige detailsemalt kirjeldatud. Kuna saime mitterahuldavad tulemused, siis proovisime kahel viisil veel.

1. Kasutasime EV-VNH7070AS H-silla moodulit, soojusülekaneks grafiitlehti ning 130 W jahutusvõimega PE-d.
2. Kasutasime EV-VNHD7008AY H-silla moodulit, soojusülekaneks grafiitlehti ning 200 W jahutusvõimega PE-d.
3. Kasutasime EV-VNHD7008AY H-silla moodulit, soojusülekaneks vaskplekki ning 200 W jahutusvõimega PE-d.

3.1 Peltier' element

PE on väike risttahukas, mille mõõtmed on tavaliselt kuni 5 cm ning paksus on tüüpiliselt 3 – 5 mm. Mõlemad töö vältel kasutatud PE-d on 3.5 mm paksusega 5x5 cm risttahukad.

PE takistus R on suurusjärgus 1 Ω . Olulisteks parameetriteks on ka maksimaalne pinge U_{max} , maksimaalne voolutugevus I_{max} , maksimaalne jahutusvõimsus Q_{max} ja suurim saavutatav külgede temperatuurivahe ΔT_{max} .

Tabelis 3.1 on esitatud andmed Peltier' elementide kohta, mida töö käigus kasutati. PE 1-te [7] kasutati esimeses konfiguratsioonis ning PE 2-te [8] teises ja kolmandas konfiguratsioonis. Nagu näha on PE 2 jahutusvõimsus märkimisväärselt suurem PE 1 omast.

Tabel 3.1: PE-de andmed

Tüüp	MARK	$R (\Omega)$	$I_{max} (A)$	$U_{max} (V)$	$Q_{max} (W)$	$\Delta T_{max} (^\circ C)$
PE 1	MCTE1-12715L-S	0.80	15.00	15.40	130.0	68.0
PE 2	MCTE1-19913L-S	1.40	13.00	24.10	200.0	68.0

3.2 Mikrokontroller

Süsteemi kontroll toimub STM32G431KBTx Nucleo mikrokontrolleri arendusplaadiga. See saab toidet otse läbi arvuti USB pesa. Kasutades USART liidestust saame läbi USB ka andmed. Püsivara kirjutasime STM32 CubeIDE abil.

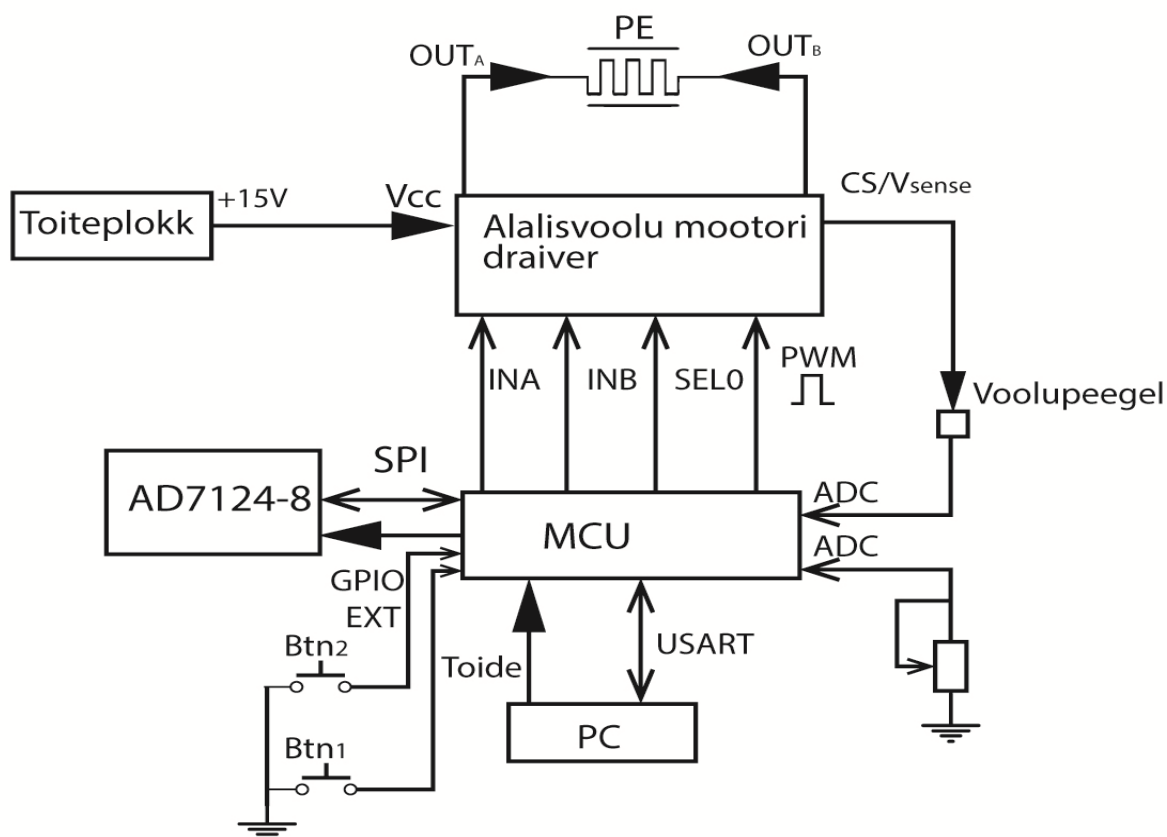
Mikrokontrollerist kasutame:

- 2 ADC kanalit: potentsiomeeter PWM muutmiseks ja H-silla voolupeegli lugemiseks,
- 1 PWM viik H-silla juhtimiseks, sätestatud 10 kHz sagedusele,
- 3 GPIO-d H-silla juhtimiseks,
- 2 katkestusega GPIO-d lülitite jaoks, et jooksvalt muuta H-silla töörežiimi,
- 1 SPI AD7124-8 juhtimiseks,
- 1 USART PC-ga suhtlemiseks.

3.3 Süsteemi lihtsustatud elektriskeem

Joonisel 3.1 on näha süsteemi lihtsustatud elektriskeemi. H-silla kontrollviigud: INA ja INB juhivad ülemiste lülitite avatust, SEL0 valib kummalt ülemiselt lülitilt voolupeegel tekitatakse. Lisaks ühendasime H-silla CS (VNH7070AS) või V_{sense} (VNHD7008AY) viigu mikrokontrolleri viiguga, mis on seadistatud töötamaks ADC-na.

Peltier' element ühendati H-silla väljundviikudeg OUTA ja OUTB.



Joonis 3.1 Süsteemi elektriskeem

3.3.1 Toiteallikas

Kasutasime H-silla ja koormuse toiteallikana 348 W toiteplokki VGS-350C-15, mis muundab 230 V vahelduvvoolu 15 V alalisvooluks. PE radiaatori küljes olev ventilaator JMC 9025-12HS saab toidet samast toiteplokkist, kusjuures ületame seeläbi ventilaatori 12 V nominaalpinget. Kogu ülejäänud elektroonika saab toite arvuti USB liidestest.

3.4 Alalisvoolumootori draiver

Kasutasime töö vältel PE juhtimiseks kahte H-silla moodulit: EV-VNH7070AS ning EV-VNHD7008AY. Nende abil oli H-silla ülejäänud elektroonikaga ühendamine lihtsustatud. Mõlema H-silla tööpõhimõtted, viigud ja ühendused on väga sarnased. Seejuures kasutavad mõlemad lülititena n-kanaliga küllustüüpi MOS-transistoreid, mis on rööbiti kaitsediodiga. Transistorite pn-siiretel on nullist erinevad takistused, mistõttu need soojenevad töö käigus. Seega üle aja lülitid kuumenevad, mis põhjustab ka H-silla kuumenemist. Mida suuremat voolu juhime läbi vooluringi, seda suurem on ka transistoritelt hajuv soojushulk ning seda kiiremini H-sild kuumeneb. Mõlemal H-sillal on selle vastu ülekuumenemise kaitsed: kui H-silla temperatuur ületab 175 °C, lülitatakse ülemine lüliti lahti ning vooluring katkeb. Lülitit saab uuesti kasutada, kui korpuse sisene temperatuur langeb alla T_{TR_HSD} (135 °C).

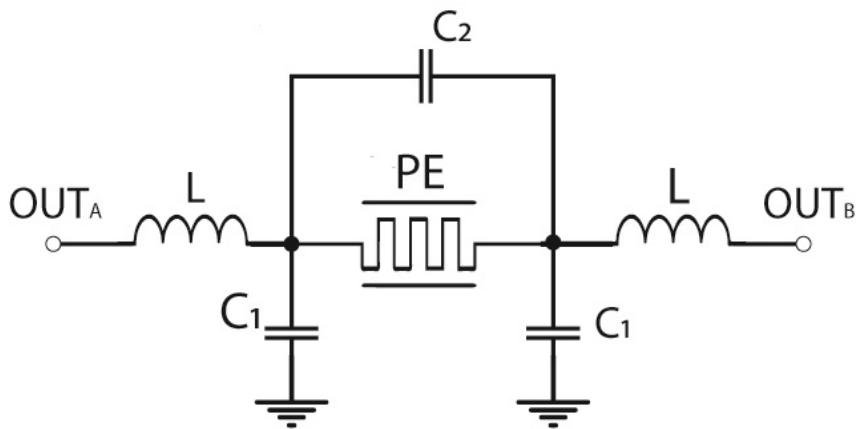
VNHD7008AY [9] on võimeline juhtima suurema tugevusega voolu (38 A) kui VNH7070AS (15 A) [10]. Mõlemad H-sillad võimaldavad mõõta voolutugevust ülemisel transistoril, kuid VNHD7008AY saab lisaks mõõta veel korpuse temperatuuri ja ka toitepinget. VNH7070AS voolupeegli viiku nimetatakse CS-iks, VNHD7008AY voolupeegli viiku V_{sense} -iks ning sellelt andmete saamiseks peab V_{Sense_En} viik olema kõrge.

H-sildade tähtsaim erinevus on kuumenemise osas: VNHD7070AS-l on kõik 4 MOSFET-i ühes korpuses, VNHD7008AY-l on alumised MOSFET-id korpusevälised. VNH7070AS ülemise ja alumise transistori kogutakistus on 72–145 mΩ, VNHD7008AY-l on vaid ülemised transistorid H-silla korpuse sisesed ning nende takistus on 8–16 mΩ. Teades, et võimsus $P = I^2 \cdot R$ ning nähes, et takistuste erinevus on üheksa kordne, saame järeldada, et keskeltläbi soojeneb VNHD7008AY korpus üheksa korda vähem.

3.4.1 LC-filiter

Ühendades Peltier' elementi otse VNH7070AS väljundviikude OUTA ja OUTB-ga, lakkas H-sild hetkega voolu juhtimast, sest selle korpus kuumenes üle ning temperatuurikaitse lülitas ülemise MOSFET-i lahti. Madala takistusega PE juhtimiseks H-sillaga on vaja filtrit. Filter summutab signaali kõrgsageduslikud komponendid ning jätab alles ainult madalasageduslikud võnkumised.

Parim võimalik filter on seega LC- madalpääs filter. Induktiivpooli valikul tuleb silmas pidada, et koormust läbiv vool ei tohi ületada induktiivpooli küllastusvoolu, vastasel juhul kahaneb suurte voolutugevuste korral pooli induktiivsus. Lisaks ei tohi koormust läbiv vool ületada suurimat lubatud alalisvoolu, muidu hakkab induktiivpool üle kuumenema.



Joonis 3.2: LC- filter

Tabel 3.2: LC- filtri komponendid

H-sild	Pooli mark	L (μH)	max DC(A)	Küllastusvool (A)	C1 (μF)	C2 (μF)	R (Ω)
VNH 7070AS	673-PA4344. 563NLT	56	7.8	9	1.05	4.7	0.8
VNHD 7008AY	652-SRP2313 AA-101M	100	11	9	1.05	22.6	1.4

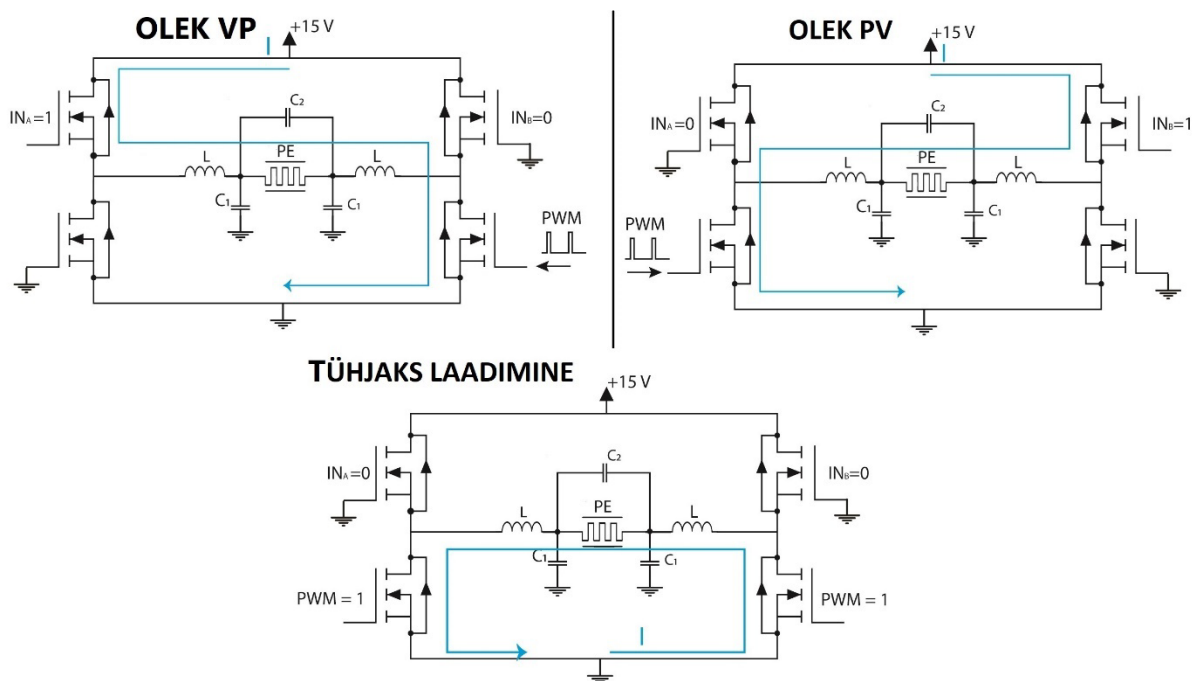
$$\omega_n^2 = \frac{1}{LC_1 + 2LC_2} \quad (3.1)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \omega_n \quad (3.2)$$

Filtri loomisel juhendusime David M. Alteri [9] raportist termoelektrilise jahutusüsteemi kohta, seal lähtestati valem 3.1. Valemite 3.1 ja 3.2 abil saame VNH7070AS H-silla filtri loomulikuks sageduseks 6579 Hz ja VNHD7008AY filtri f_n 2340 Hz. Mõlemad arvutatud sagedused on madalamad kui süsteemis kasutatav PWM-i lülitussagedus, milleks on 10 kHz.

3.4.2 H-silla sisse-, välja- ja ümberlülitamine

Kaks STM32 viiku on ühendatud nuppudega, neid rakendatakse püsivara abil GPIO katkestusviikudena, lülitamaks H-silda sisse ja välja ning vahetamaks ahelat läbiva voolu polaarsust.



Joonis 3.3: H-silla lülituste loogika

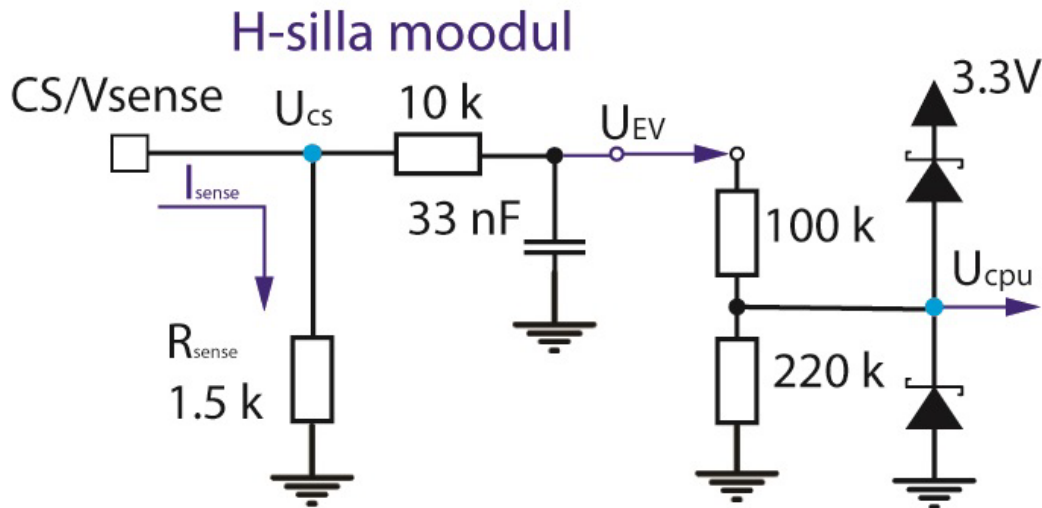
H-silla välja lülitamine tähendab ülemiste lülitite avamise ning alumiste sulgemise abil PE ja kõigi kondensaatorite tühjaks laadimist, nagu on näha joonisel 3.3.

Vool saab läbida koormust kahel viisil: vasakult paremale (VP) või paremalt vasakule (PV). Välja lülitamine on vajalik ka ümberlülitamisel (voolu polaarsuse muutmisel), kuna peame filtri enne polaarsuse muutmist ka tühjaks laadima. Näiteks soovides minna olekust VP olekusse PV, peab H-sild läbima tsükli VP -> tühjaks laadimine -> PV.

3.4.3 Voolupeegli mõõtmine

Jooniselt 3.4 on näha H-silla voolupeegli liidestamist. H-sild tekitab CS (või V_{sense} VNH7008AY puhul) viigule voolu I_{sense} , mis on proportsionaalne H-silla ülemist lülitit läbiva voolu tugevusega. Koefitsiendid I_{out}/I_{sense} on 1540 (VNH7070) ja 11000 (VNHD7008). Joonisel 3.4 on näidatud voolupeegli mõõtmist.

I_{sense} tekitab takistil R_{sense} pingelangu U_{CS} , mis on kuni 5 V. H-silla mooduli voolupeegli väljund oli juba ühendatud R_{sense} ja RC-filtriga. H-silla moodulilt saame seega mõõta pinget punktist U_{EV} . Muutes R_{sense} on võimalik muuta U_{CS} , kuid me ei soovinud H-silla moodulit ümber joosta, selle asemel tekitasime pingejaguri. Kuna STM32-e ADC kannatab pinget vahemikus 0 kuni 3.3 V, siis tekitasime $\frac{2}{3}$ pingejaguri ning mõõtsime pinget punktist U_{cpu} . Kaitsmaks mikrokontrolleri ADC sisendit ülepinge ja negatiivsete pinge eest ühendasime sisendviiguga rööbiti 2 Schottky diodi.



Joonis 3.4: Voolupeegli mõõtmine

3.5 Temperatuuride mõõtmine

3.5.1 AD-7124-8

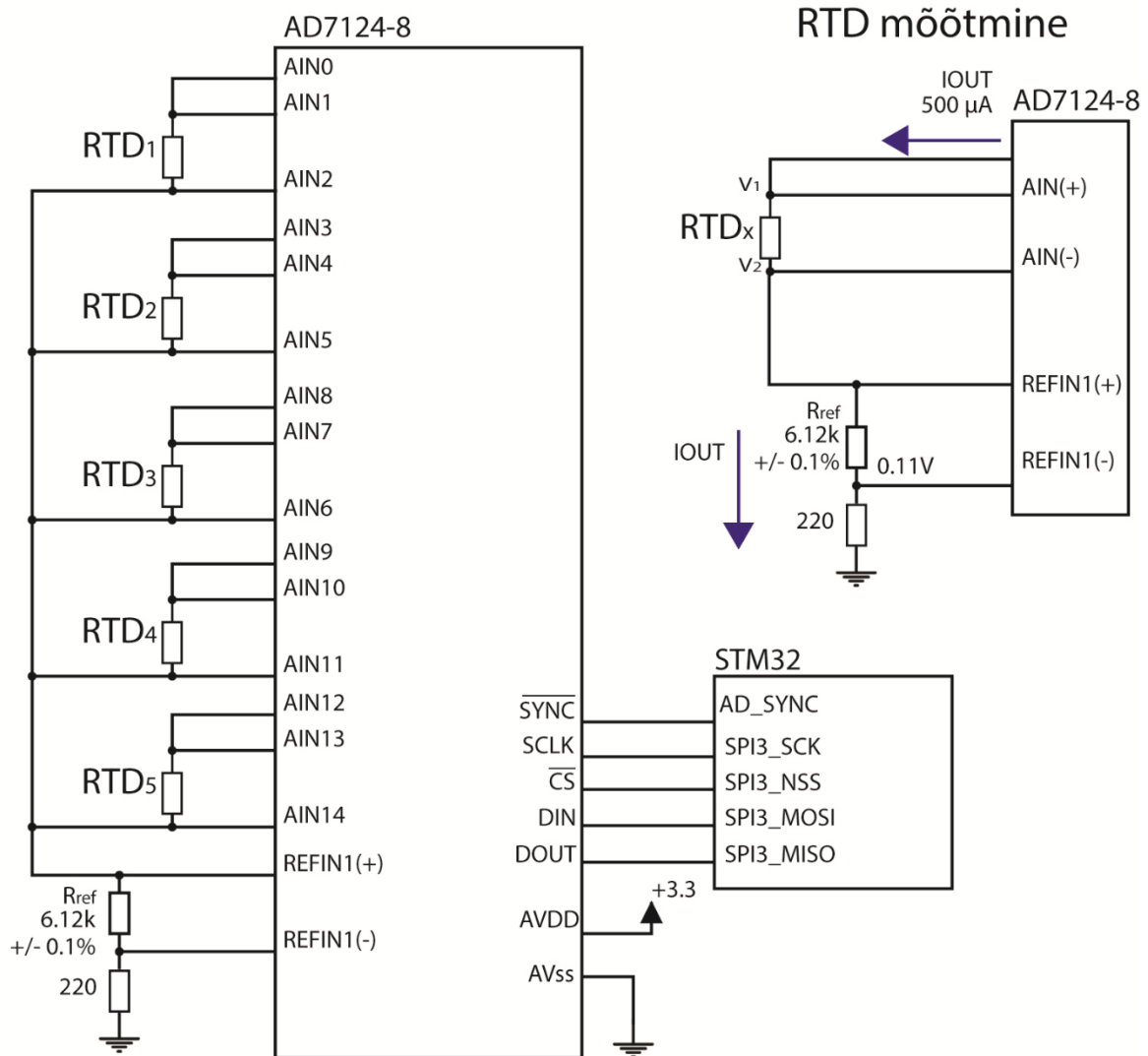
AD-7124-8 liidestamisel võtsime juhiseks näiteskeemi [11]. Kõik 5 temperatuuriandurit on ühendatud kontrolloriga AD7124-8 [12]. Sellelt toimub suhtlus STM32-ga läbi SPI protokoll. Kasutame ADC-d *Single Conversion Mode*-is see tähendab seda, et ADC hakkab mõõtma kui sellelt loetakse vanad andmed ja antakse uus kanal. Kanal on ühele mõõtmisele omane konfiguratsioon, selle põhiselt valitakse üks hulk eelnevalt seatud mõõtesätetest ning positiivne ja negatiivne mõõteviik. Mõõtesätteid seatakse neljast registrist ning need määravad tähtsamalt: milline mõõteviik ühendatakse vooluallikaga, pingevahe kordaja, millist filtrit kasutatakse.

Tegime mõõtmisi *Single Conversion Mode*-is kuna loodavas süsteemis pole andmete kogumine sugugi ajakriitiline ning katkestuste kasutamiseks on vaja eraldi loogikakomponente.

Kiirus, millega AD7124-8 andmeid meile ette valmistab määratlevad: registri FS sisu, valitud filter ja AD7124-8 sisemise kella sagedusest. Teeme mõõtmisi *Full Power Mode*'is, kasutades sinc^4 filtrit ja selliselt, et *Filter output data rate select bits* FS[10:0] = 384. Andmelehes [12] (tabel 56) on toodud välja valitud sätteid kui tüüpjuht. Tehtud mõõtmiste puhul on sãmplimiskiiruseks 50 SPS ja t_{settle} on 80.16 ms. SPS ehk sãmplit sekundis, oleks sãmplite arv, mida AD7124-8 suudaks väljastada kui see teeks järjest ainult mõõtmisi, seega saame ühe sãmpli 20 ms-iga, kuid iga mõõtmise järel peab ootama ka t_{settle} ehk 80 ms, seega iga ühe RTD mõõtmise vahel on vähemalt 100 ms.

3.5.2 AD7124-8 ühendused

Mõõtmisi tehti unipolaarse mõõteviisiga, see tähendab, et ADC-ga mõõdetakse vaid positiivseid pingeid. Takistusi mõõdeti *2-wire* meetodil. See tähendab, et ühel AIN viigul tekitatakse vooluallikas, mis läbib RTD-d. RTD-ga ühendatakse rööbiti AIN(+) ja AIN(-), ning pingelangu võimendatakse sõltuvalt sätestatud GAIN-ist, lahenduses 4 kordselt. Seda võrreldakse REF1N(+) ja REF1N(-) pingevahega. Lahenduses kasutati *2-wire* mõõtemeetodit, kuna see on lihtsaim ning juhtmete takistuse mõju on juba minimiseeritud läbi selle, et nad pole väga pikad ning, et kasutati PT1000 mitte PT100 RTD-sid.



Joonis 3.5 AD7124-8 elektriskeem

3.5.3 Temperatuuri arvutamine

$$R_T = \frac{Code * R_{ref}}{Gain * 2^{24}} \quad (3.5)$$

Kasutades ADC-d unipolaarses mõõterežiimis, on RTD takistus (R_T) arvutatav valemiga 3.5 [11], bipolaarsel mõõteviisil oleks üks bitt reserveeritud märgi jaoks. *Code* viitab ADC lugemile, 2^{24} on ADC resolutsioon, R_{ref} on joonisel 3.5 kujutatud REF viikude vaheline takistus ning suurim *Code* väärtus on $2^{24}-1$. Seega, valides R_{ref} ja *Gain* on võimalik valida mõõtevahemiku ülempiiri, kuna *Code* on suurima lugemi puhul põhimõtteliselt 2^{24} , siis saame lihtsustada:

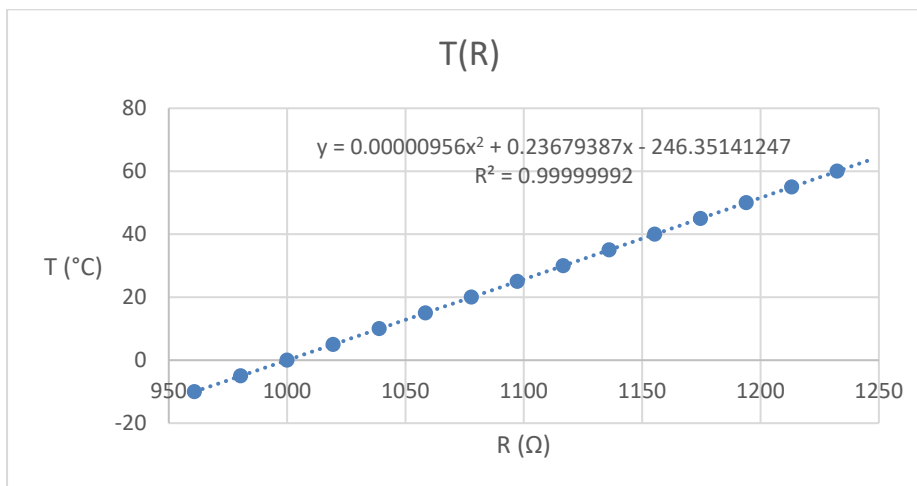
$$R_{T(MAX)} = \frac{R_{ref}}{Gain} \quad (3.6)$$

Loodud lahenduses on $R_{ref} = 6120 \, \Omega$, $Gain = 4$, seega $R_{T(MAX)} = 1530$. Valisime seega mõõdetava temperatuuri ülempiiriks $\sim 138 \, ^\circ\text{C}$, RTD temperatuuri takistuse põhiselt saab mugavalt vaadata tabelilt [13].

$$R(T) = \begin{cases} R(0)[1 + a * T + b * T^2] & \text{kui } T \geq 0^\circ\text{C} \\ R(0)[1 + a * T + b * T^2 + c * (T - 100)T^3] & \text{kui } T < 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3.7)$$

RTD takistuse sõltuvust temperatuurist kirjeldab valem 3.7, mis on Callendar-Van Dusen'i võrrand [14]. See on saanud RTD-de standardiks ning RTD andmelehest [4] on võimalik leida koefitsientide a , b ja c väärtused.

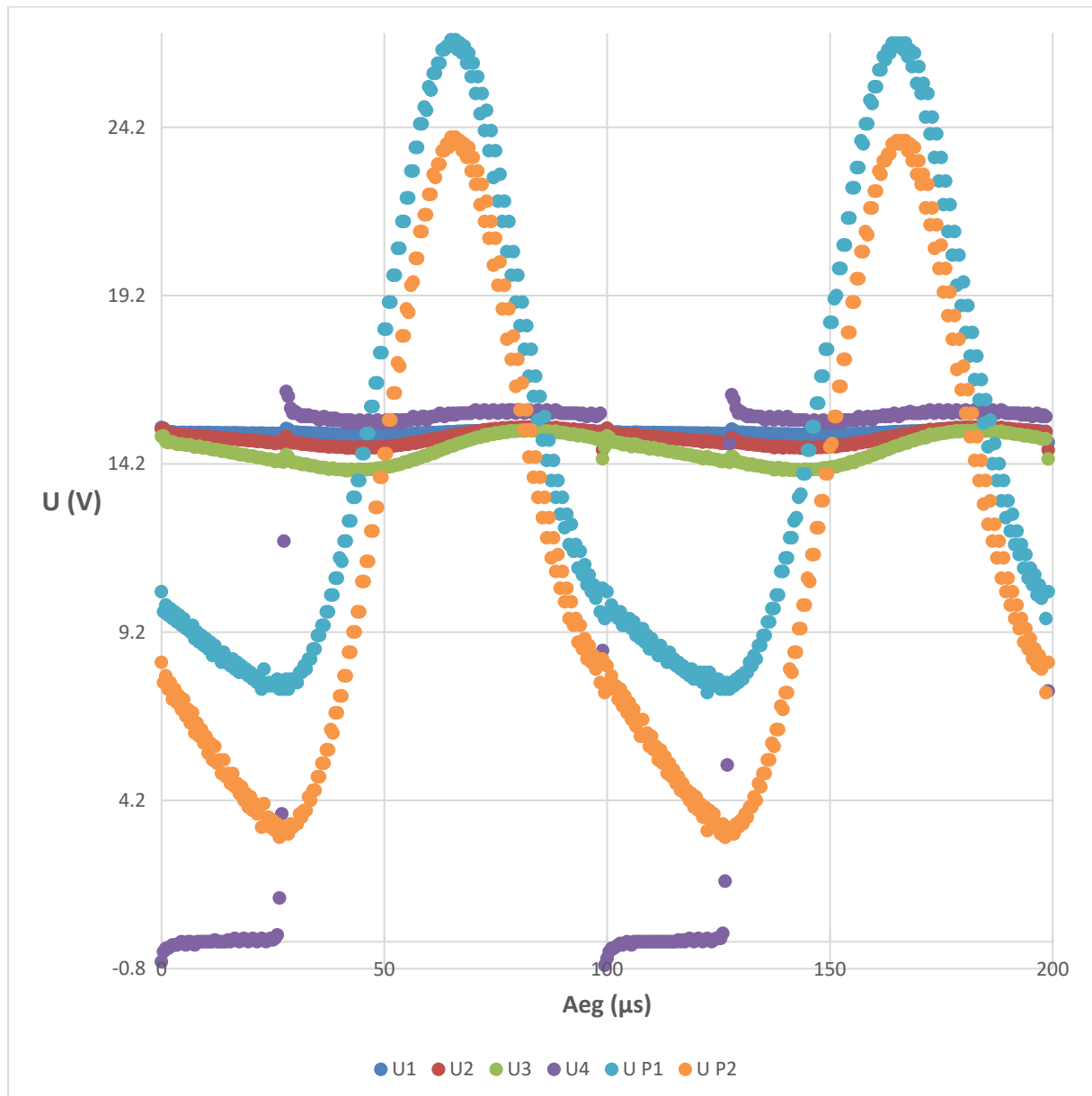
Mikrokontrolleriga saab mugavalt arvutada RTD takistust, kuid avaldamaks $R(T)$ -st temperatuuri, peaksime mikrokontrolleril lahendama teise või kolmanda järgu polünoomi. Selle asemel kasutasime püsivaras oleva lahenduse jaoks ära taaskord tabelis [13] esitatud andmeid ning konstrueerisime enda $T(R)$ kõvera, mis on esitatud joonisel 3.6. Selline lähtestamine on sobilik, kuna salvestame mõõtetulemeid vaid $0.01 \, ^\circ\text{C}$ täpsusega.



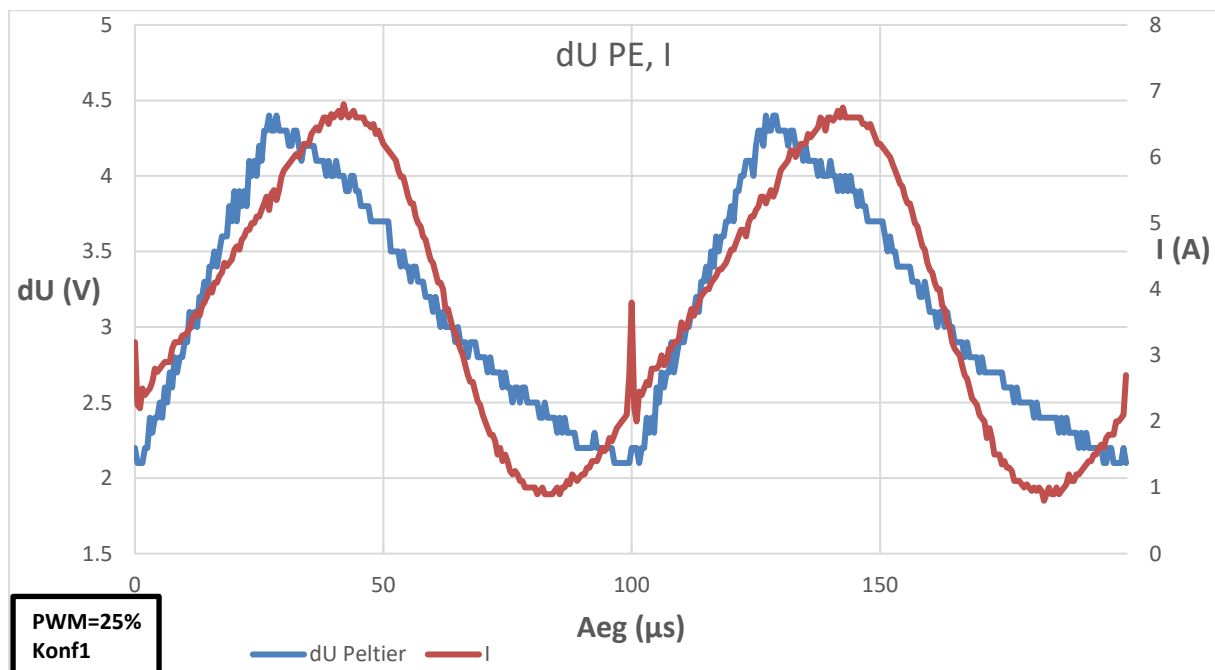
Joonis 3.6: RTD takistuse sõltuvus temperatuurist

4.2 LC-filtri analoogmõõtmised

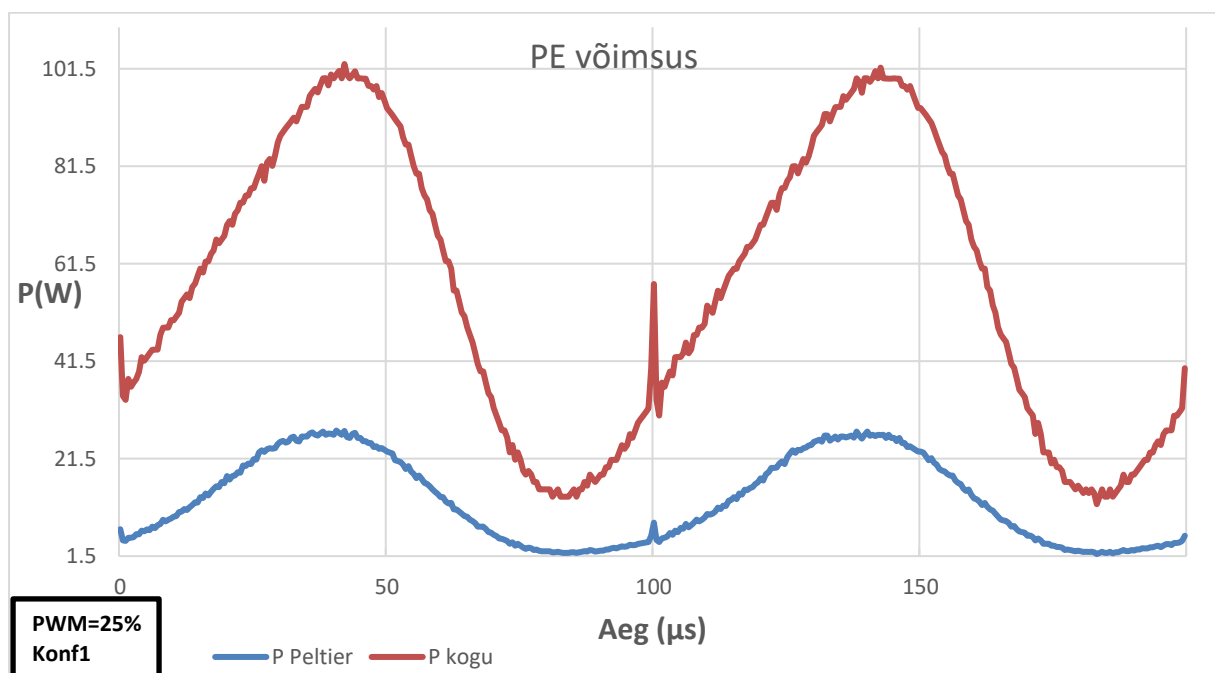
Joonisel 4.2 on kujutatud kõik andmed, mis koguti VNH-7070AS-il, ostsilloskoobi abil. Sellelt on näha muuhulgas ka punkti U_4 pinget, mille alla -0.7 voldised ja üle 15.7 voldised tipud tähendavad, et vool läbib vastavalt alumise lüliti kaitsediiodi (GND suunas) või ülemise lüliti kaitsediiodi (15 V suunas). Joonistel 4.3 ja 4.4 on kujutatud joonise 4.2 põhiselt tuletatud andmeid, kõigil kolmel graafikul eraldavad x-telge vertikaalsed jooned iga poolperioodi tagant. Pingelang PE-l on punktidest U_{PE1} ja U_{PE2} mõõdetud pingete vahe. Jooniselt 4.3 on näha, et LC-filter tagab stabiilse pinget ning, mis on oluline: selle polaarsus ei muutu. Joonisel 4.4 on kujutatud võimsused, mis on arvutatud kui voolutugevuse korrutis U_1 -e ja PE pingelanguga vastavalt.



Joonis 4.2: Analooomõõtmised



Joonis 4.3: PE pingelang

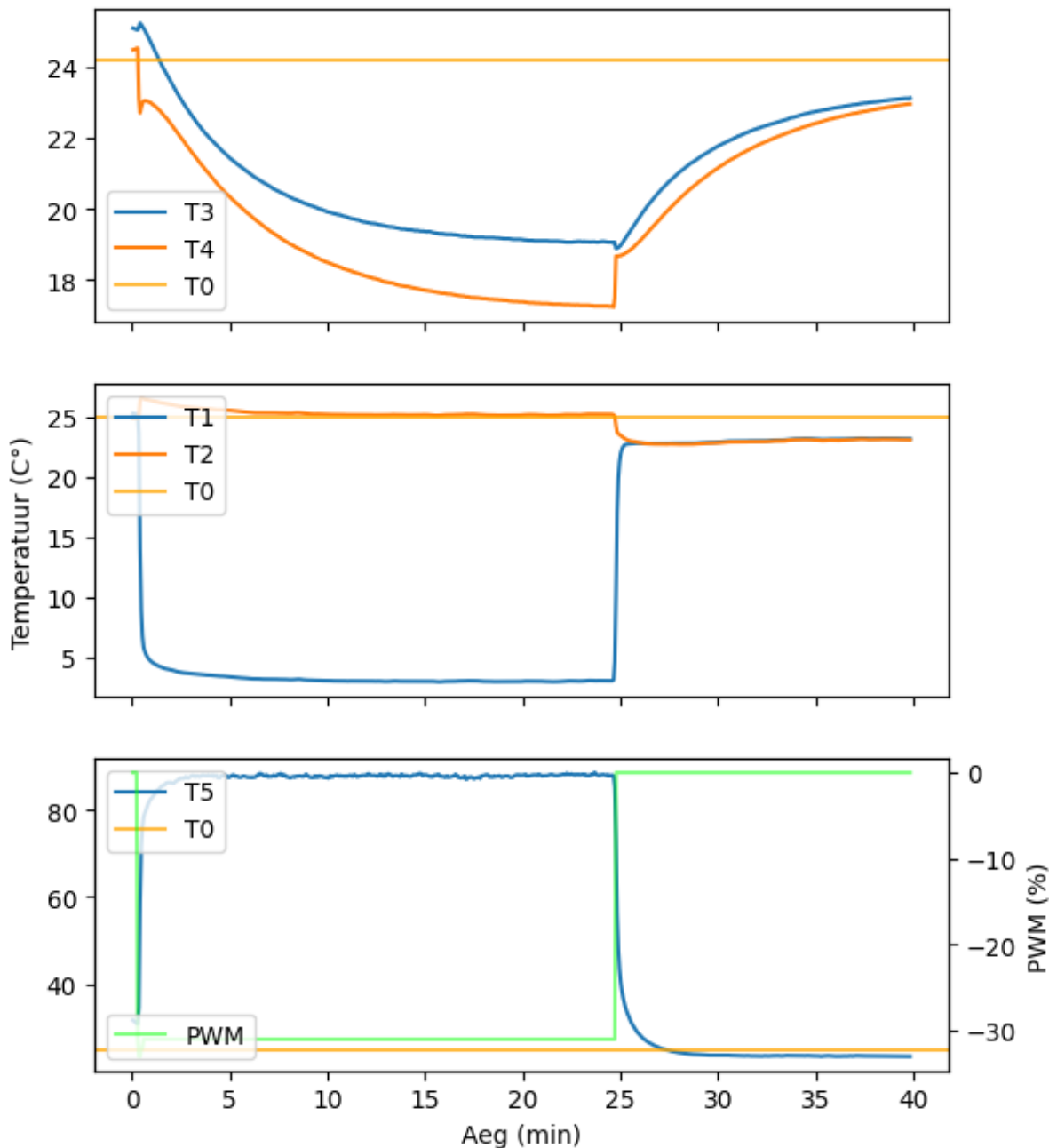


Joonis 4.4 PE võimsus

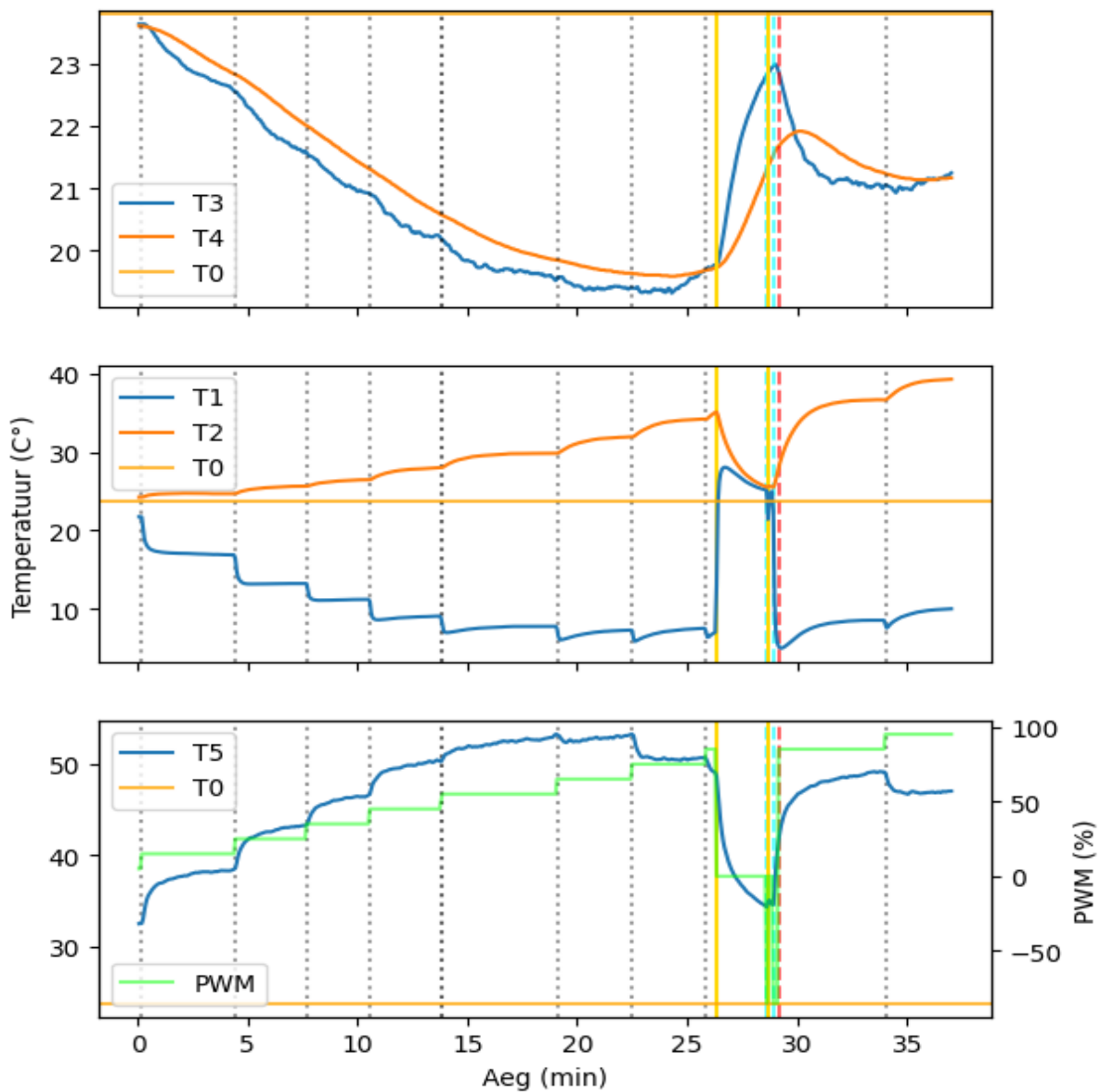
4.3 Temperatuurimõõtmised

Temperatuurimõõtmistes, T_0 on toatemperatuur, T_1 on PE külma külje temperatuur, T_2 on radiaatori temperatuur, T_3 on kambri temperatuur, T_4 on kambri õhu temperatuur T_5 on H-silla korpuse pealt mõõdetud temperatuur.

Joonistel 4.5 ja 4.6 on näha kahes konfiguratsioonis tehtud temperatuurimõõtmisi, x- ehk ajatelg on joonise graafikutel ühised. Kolme graafiku abil on kujutatud kõik mõõdetud temperatuurid. Graafikud annavad seeläbi aimduse temperatuuri muutuse kiirusest ning sõltuvusest PWM-ist. Joonisel 4.5 kujutatud testi vältel oli PWM täitetegur ühtlane, joonisel 4.6, muutub PWM üle aja, selle kujutamiseks kasutame jooni, kus must punktiirjoon tähistab PWM muutust, punane kriips- joon ümberlülitust, kollane joon väljalülitust ning sinine sisselülitust.



Joonis 4.5 Konfiguratsioon 1 mõõdetulemused



Joonis 4.6 Konfiguratsioon 2 mõõtetulemused

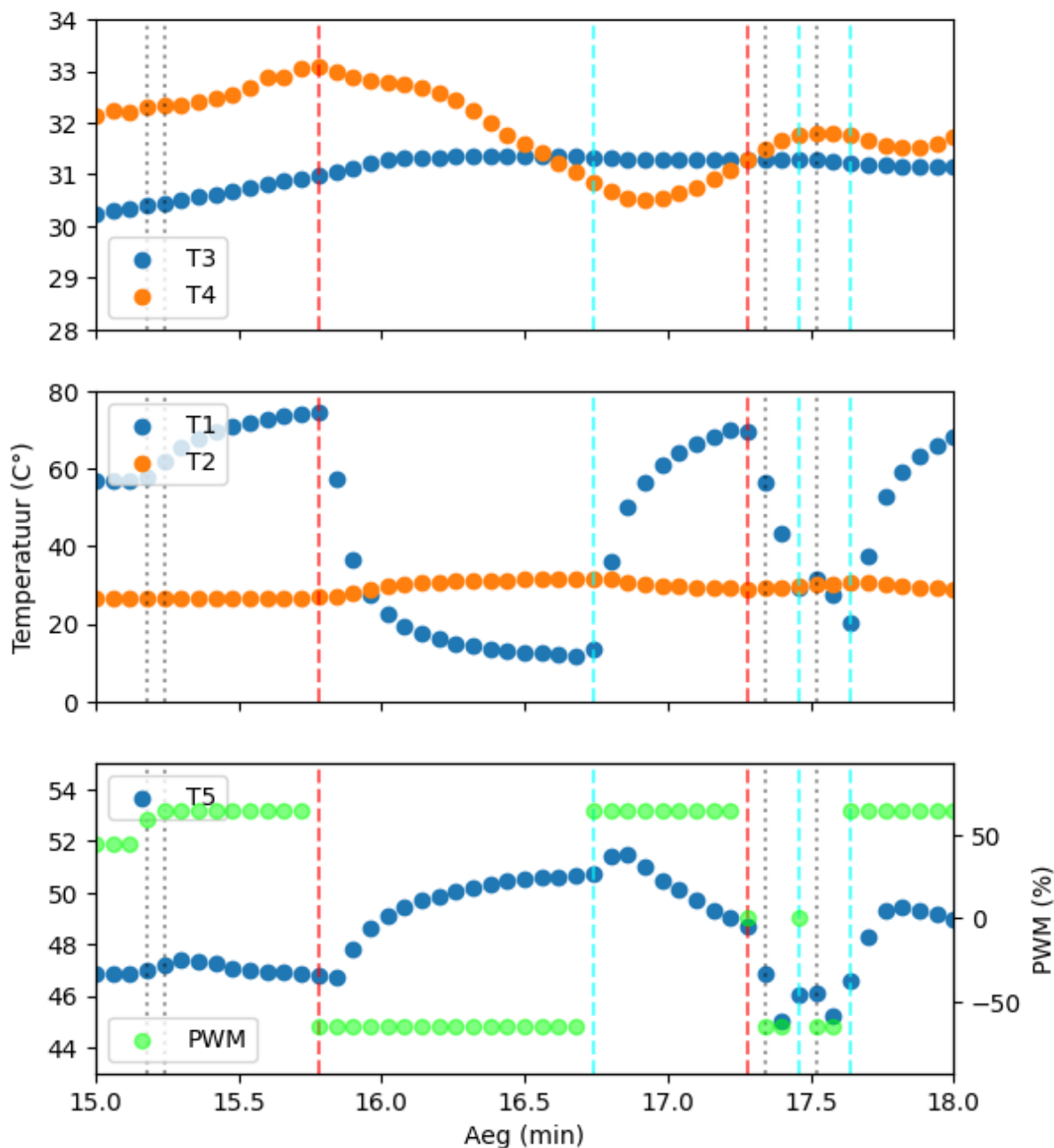
Tabelis 4.1 on välja toodud kõikide mõõtmiste vältel suurimad saavutatud kambri temperatuuride erinevused toatemperatuurist (T_0). Esimeses konfiguratsioonis saavutati suurim temperatuurierinevus nii kambri seinal (T_3) kui ka kambri õhus (T_4) 31% PWM-i täiteteguriga. Konfiguratsioonide 3 ja 2 läbiviidud testide vältel täitetegurid muutuvad. Tabelis on noteeritud suurim vahe toatemperatuurist ühelgi ajahetkel.

Tabel 4.1: temperatuuri muut toatemperatuurist

Konfiguratsioon	T_0 (°C)	$T_3 - T_0$ (°C)	$T_4 - T_0$ (°C)	dt (min)
Konf 1	24.20	-6.97	-5.32	24.7
Konf 1	24.50	6.04	5.96	25.4
Konf 3	24.51	-11.82	-7.33	17.0
Konf 2	23.50	24.78	21.14	30.8

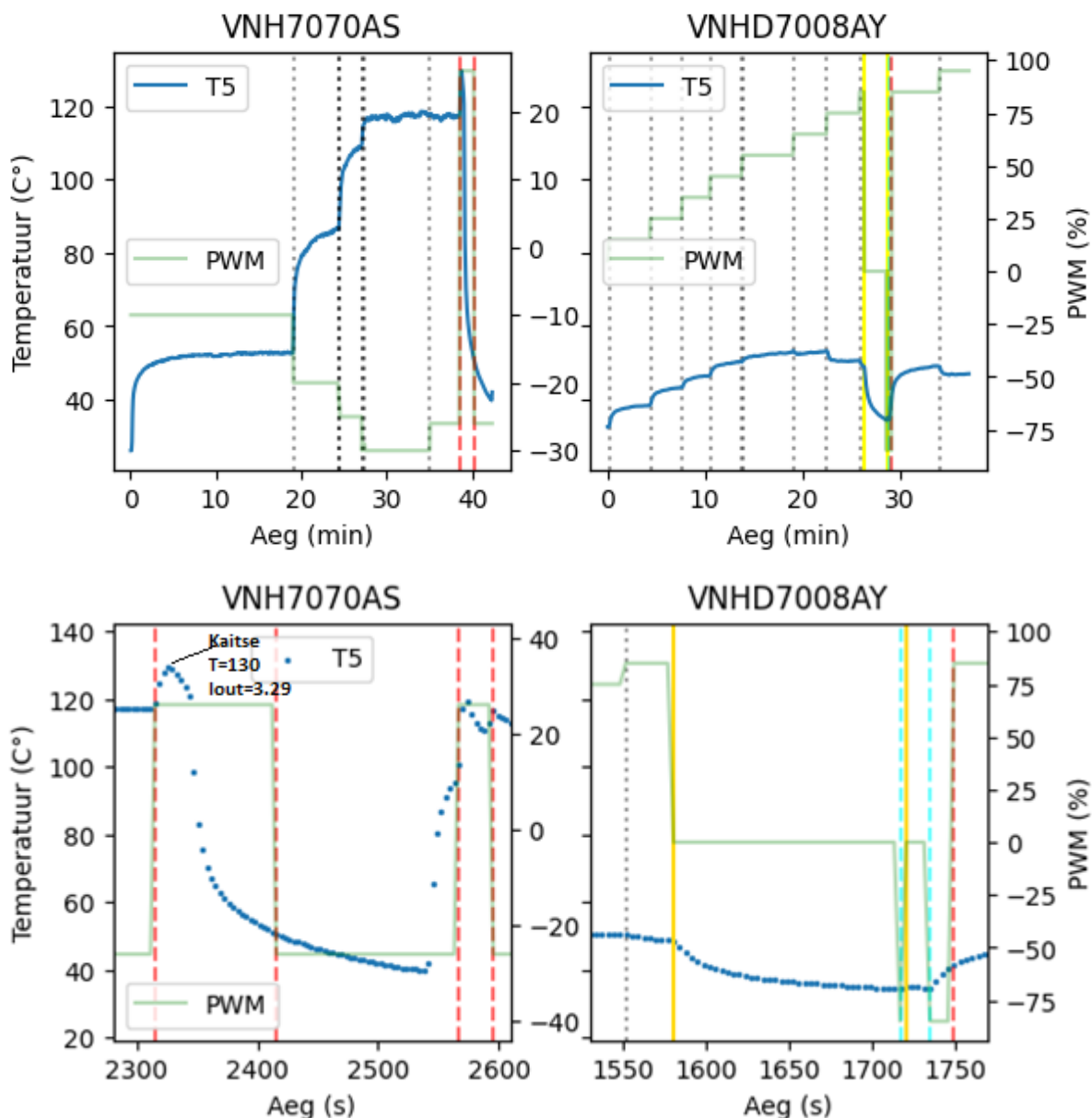
4.4 H-silla temperatuur

Jooniselt 4.7 näeme, et temperatuur muutub H-silla ümberlülitamisel (punane joon), kiiresti. Algselt rakendati H-silda soojendamiseks, pärast ümberlülitust näeme, et H-silla temperatuur hakkab stabiliseeruma kõrgemal väärtusel, mis näitlikustab ka seda, et jahutamisel on H-silla temperatuur kõrgem kui soojendamisel.



Joonis 4.7: Konfiguratsioon 2, soojendamine

Joonisel 4.8 on kujutatud kahe H-silla temperatuurid üle ajatelje, seejuures on vasakpoolne, temperatuuride telg ühine. Lisaks on ka parempoolne telg täiteteguri jaoks. Mustad punktiirid tähistavad PWM-i muutust, punased jooned tähistavad ümberlülitust, sinised jooned tähistavad sisselülitust ning kollased jooned väljalülitust. Alumistel graafikutel on näha täpsemalt, kuidas H-silla temperatuur muutub -sisse, -välja ja ümberlülitades. Alumisel vasakpoolsel graafikul on näha kuidas VNH7070AS-il põhjustas ümberlülitus ülekuumenemise, seeläbi aktiveerus H-silla termokaitse.



Joonis 4.8: H-sildade temperatuur ja täitetegur

Tabelis 4.2 on toodud välja H-silla korpuse temperatuurid, mis on arvutatud ostsilloskoobi mõõtmiste abil. U_1 , U_2 , U_3 ja U_4 abil arvutasime voolu ning pingelangud transistoritel, seeläbi leidsime võimsused. H-silla moodulite andmelehtedel on toodud välja H-sildade termilised takistused: VNH7070AS puhul HSD (55 °C/W) ja LSD (75 °C/W) [15], VNHD7008AY puhul HSD (28 °C/W) [16] ning LSD on korpuse väline, seega seda arvutustel ei arvesta. Selliselt ei saavutanud nähtavasti väga täpseid tulemeid, kuid RTD-ga me tegelikult mõõdame H-silla korpuse pealset temperatuuri, mitte seesmist.

Tabel 4.2 H-silla MOSFET-ide poolt arendatav võimsus ja korpuse temperatuur

H-sild	PWM (%)	I (A)	P HSD (W)	P LSD (W)	ΔT (°C)	$\Delta T + T_0$ (°C)	T_5 (°C)
VNH7070AS	10	2.11	0.11	0.20	20.6	45.6	53.0
VNH7070AS	20	3.14	0.50	0.17	40.2	65.2	84.0
VNH7070AS	25	3.74	0.93	0.20	66.0	91.0	109.0
VNH7070AS	30	4.46	1.53	0.52	123.5	148.5	118.0
VNHD7008AY	25	4.03	0.09	0.75	2.4	27.4	40.7
VNHD7008AY	45	5.73	0.18	0.13	5.1	30.1	46.7
VNHD7008AY	65	7.53	0.35	0.25	9.9	34.9	47.2
VNHD7008AY	85	8.95	0.57	0.43	15.9	40.9	40.8

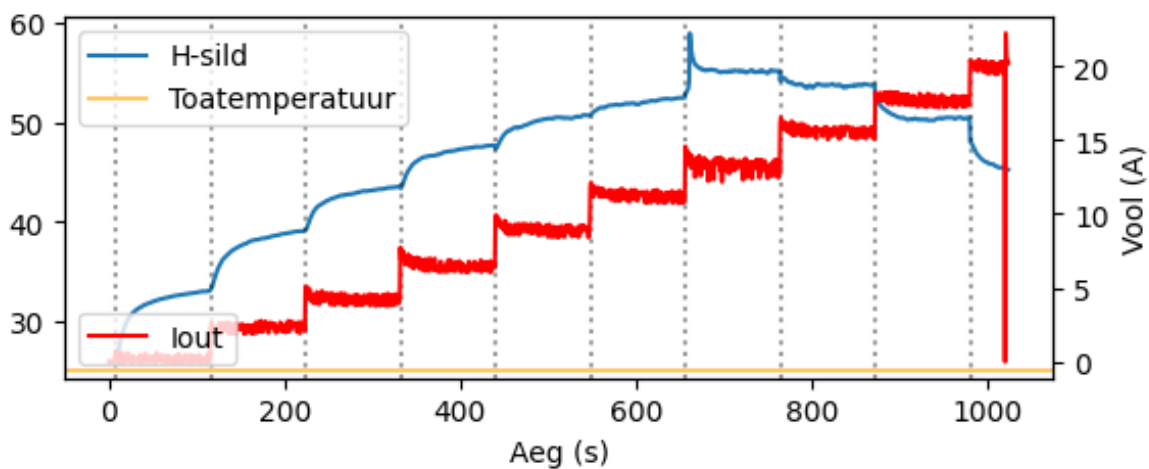
4.5 H-silla voolupeegel

Tabelis 4.3 on esitatud H-silla voolupeegli lugem ning ostsilloskoobiga mõõdetud vool. Nähtavasti on voolupeegel kõrgematel voolutugevustel täpsem, see on dokumenteeritud ka H-sildade andmelehtedes. Kõrgematel voolutugevustel võime öelda, et viga pole, kuna I_{R1} on ühe perioodi keskmine voolutugevus, kuid I_{out} on mõõdetud iga 3.6 sekundi tagant ning esitame tabelis kuni 100 mõõtmise keskmise. Lisaks I_{out} muutub üle aja, PWM-i muutusel, sisse või ümberlülitusel on see tüüpiliselt suurem.

Tabel 4.3 Voolupeegli ja takistil mõõdetud voolu tugevuse võrdlus

H-sild	PWM(%)	$I_{out}(A)$	$I_{R1}(A)$
VNH7070AS	-10	ei tuvasta	2.11
VNH7070AS	-20	0.77	3.14
VNH7070AS	-25	3.04	3.74
VNH7070AS	-30	4.02	4.46
VNHD7008AY	25	2.52	4.03
VNHD7008AY	45	4.78	5.73
VNHD7008AY	65	6.98	7.53
VNHD7008AY	85	9.40	8.95

Joonisel 4.9 on näha kolmandas konfiguratsioonis läbiviidud standardiseeritud testi, PWM muutub 10% võrra iga punktiirijoone tagant. On näha, et 100% täiteteguri juures läheneb voolutugevus toiteploki I max-ile: 23.2 A[14].



Joonis 4.9 Konfiguratsioon 3, Voolutugevus

5 Kokkuvõte

Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua süsteem, millega saaks mõõta taimede gaasivahetust, seejuures jahutada taime kambrit testtingimustele vajalikul määral, kasutades alternatiivset küttelahendust. Selleks loodi süsteem, mis juhib alalisvoolumootori draiveriga Peltier' elementi ning mõjutab läbi soojusülekanne grafiitlehtedelt kambri temperatuuri. Vahetades töö vältel erinevaid süsteemi osasid nagu alalisvoolulist draiverit, soojusülekannet ning ka Peltier' elemente, ei õnnestunud siiski saavutada piisavaid vahesid toatemperatuurist.

Selle töö tulem on uue H-silla sobivuse kinnitamine. Ka eelnevas, veesärgiga lahenduses, kasutati vee temperatuuri reguleerimiseks H-silda ja Peltier' elementi ning H-silla ülekuumenemine on ka seal tüüp-probleem, mis on seeläbi lahendatud.

5.1 Järeldused

1. Suurim saavutatud erinevus toatemperatuurist on võimsama H-silla ja Peltier' elemendiga samas suurusjärgus nagu vähem võimsaga.
2. Grafiitlehega soojusülekanne ei ole piisavalt efektiivne, võimaldab kambrit jahutada mitte rohkem kui 5 kraadi alla ümbritseva keskkonna temperatuuri
3. Vaskplekiga saavutatud soojusülekanne ei ole oluliselt halvem kui grafiitlehega.
4. H-sillaga VNHD7070 saab juhtida Peltier' elementi vooluga ~ 4.5 A ning võimsusega kuni ~ 60 W
5. H-sillaga VNHD7008 saab juhtida Peltier' elementi vooluga ~ 20 A (seejuures täis, 100% täiteteguriga) ning võimsusega kuni

Tänuavaldused

Andrus Punning

Kõõm

Viited

- [1] „The Peltier Effect and Thermoelectric Cooling“. https://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2007.web.dir/sedona_price/phys_212_webproj_peltier.html (vaadatud 13. mai 2024).
- [2] „[FAQ] What motor drivers should be considered for driving Thermoelectric cooling (TEC) elements, or Peltier devices?“, Motor drivers forum <https://e2e.ti.com/support/motor-drivers-group/motor-drivers/f/motor-drivers-forum/967858/faq-what-motor-drivers-should-be-considered-for-driving-thermoelectric-cooling-tec-elements-or-peltier-devices> (vaadatud 12. mai 2024).
- [3] „How to Design a Peltier Module System“, CUI Devices. <https://www.cuidevices.com/blog/how-to-design-a-peltier-module-system> (vaadatud 14. mai 2024)
- [4] „TE CONNECTIVITY SENSORS PTF TEMPERATURE ELEMENTS REV 7 02/2024“. <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchrtv&DocNm=PTF-FAMILY&DocType=Data+Sheet&DocLang=English&DocFormat=pdf&PartCntxt=NB-PTCO-168> (vaadatud 12. mai 2024).
- [5] „“GraphiteTIM (Compressible Type)” PGS with low thermal resistance“, Mouser Electronics. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Panasonic/EYG-S121807?qs=WwqriLBepZtfJIR4CZ4abQ%3D%3D> (vaadatud 12. mai 2024).
- [6] „Thermal Management Solutions“, Panasonic. <https://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/AYA0000/AYA0000COL24.pdf> (lk 34, vaadatud 14. mai 2024).
- [7] „MCTE1-12715L-S“, Farnell. <https://www.farnell.com/datasheets/3178947.pdf> (vaadatud 12. mai 2024).
- [8] „MCTE1-19913L-S“, Farnell. <https://www.farnell.com/datasheets/3986568.pdf> (vaadatud 12. mai 2024).
- [9] „VNHD7008AY“, STMicroelectronics. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vnhd7008ay.pdf> (vaadatud 13. mai 2024).
- [10] „VNH7070AS“, STMicroelectronics. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/vnh7070as.pdf> (vaadatud 12. mai 2024).
- [11] „CN0383 Circuit Note“, Analog Devices. <https://www.analog.com/en/resources/reference-designs/circuits-from-the-lab/CN0383.html> (vaadatud 16. mai 2024).

- [12] „AD7124-8“, Analog Devices. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad7124-8.pdf> (vaadatud 16. mai 2024).
- [13] „Platinum resistance temperature sensors Pt100 (Pt1000)“, kongsberg. https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/tsiec751_ce.pdf (vaadatud 16. mai 2024).
- [14] „Callendar–Van Dusen equation“, Wikipedia. 29. mai 2023. Vaadatud: 20. mai 2024. . https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Callendar%E2%80%93Van_Dusen_equation&oldid=1157534678 (vaadatud 20. mai 2024).
- [15] „EV-VNH7070AS Evaluation Board“, STMicroelectronics. https://www.st.com/resource/en/data_brief/ev-vnh7070as.pdf (vaadatud 18. mai 2024).
- [16] „EV-VNHD7008AY Evaluation Board“, STMicroelectronics. https://www.st.com/resource/en/data_brief/ev-vnhd7008ay.pdf (vaadatud 18. mai 2024).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Kaarel Kõomägi

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
„Peltier’ elemendi juhtimine alalisvoolumootori draiveriga”
mille juhendaja on Andrus Punning
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’i kaudu Creative Commons
litsentsiga CC BY NC ND 3.0, 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.

Kaarel Kõomägi

20.05.2024