



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

TEMPERATUURIDIFERENTSIAALI RAKENDAV
SOOJUSVOO MÕÕTMISE SEADE

THERMAL FLOW MEASUREMENT DEVICE BASED ON TEMPERATURE DIFFERENCE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kaarel Koppel

Üliõpilaskood: 163613

Juhendaja: Lauri Kütt, professor

Tallinn 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 2019

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kaarel Koppel, 163163 AAAM

Õppekava, peeriala: Elektrialamid ja jõuelektronika, automatiseerimine ja robotitehnika

Juhendaja: Lauri Kütt, professor, 56451675

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Temperatuuridiferentsiaali rakendav soojusvoo mõõtmise seade

(inglise keeles) Thermal flow measurement device based on temperature difference

Lõputöö põhieesmärgid:

Olemasoleva seadme mõõtmistäpsuse analüüs ja konstruktsiooni täiendamine.

Andmehõive ja mõõtesüsteemi tarkvara väljatöötamine.

Soojusvoo mõõtmise seadme mõõtetäpsuse karakteristikute selgitamine.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Seadme valmimine	5.12.18
2.	Seadme katsetamine ja andmete analüüsimine	15.12.18
3.	Lõputöö vormistamise lõpetamine	2.1.19

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 03.01.2019

Üliõpilane: ".....".....2019..a

/allkiri/

Juhendaja: ".....".....2019..a

/allkiri/

Konsultant:

".....".....2019..a

/allkiri/

SISUKORD

EESSÖNA.....	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	7
SISSEJUHATUS	8
1. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED.....	9
1.1 Ülevaade termoelektrilistest efektist.....	9
1.2 Soojusvoolu mõõtmise põhimõte	10
1.3 Süsteemi abil katseobjekti soojusjuhtivusteguri leidmine.....	12
1.4 Ehitatava mõõteseadme soojuslik mudel	12
2. OLEMASOLEVA SÜSTEEMI ANALÜÜS	14
2.1 Võimekus ja piiritingimused	14
2.2 Konstruktsioon	15
2.3 Lõputöös lahendamist vajavad ülesanded.....	16
3. MÕÖTESÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE JA VALMISTAMINE.....	17
3.1 Mõõtesead ja selle ehitus	18
3.2 Seadme konstruktsioonimaterjalide valik.....	20
3.3 Jahutusmoodul.....	21
3.3.1 Veekulumõõturite katsetamine, valik ja kalibreerimine	23
3.4 Kalibreerimisplakk.....	25
3.5 Süsteemi temperatuuri tagasiside	26
3.5.1 Temperatuuriandurite valik, paigutus ja täpsuse analüüs	26
3.6 Peltier jahuti	28
3.7 Püsiva temperatuuriga soojusallikas.....	29
4. MÕÖTESÜSTEEMI JUURES KASUTATUD LISASEADMED.....	31
4.1 Agilent 34972A andmehõivesüsteem	33

4.2	TDK Lambda GEN 100-15 toiteallikas.....	34
4.3	Xantrex HPD toiteallikas.....	34
4.4	MC Power LBN-1990 toiteallikas.....	35
4.5	TC-48-20 termoelektrilise jahuti temperatuurikontroller.....	37
4.6	Väline jahutusplokk ja selle edasiarendus	39
5.	MÕÕTESÜSTEEMI KASUTAJALIIDES	42
5.1	APTP.vi.....	42
5.1.1	Pumpade juhtimise olekumasin	43
5.1.2	Toiteallikas TDK Lambda GEN-100-15 juhtimise olekumasin.....	44
5.1.3	Xantrex HPD toiteallikat juhtiv olekumasin.....	45
5.1.4	Agilent 34972A andmekogumist haldav olekumasin.....	46
5.1.5	Müra filtreerimine	48
5.2	TC4820 Rev1.vi.....	50
6.	SÜSTEEMI KATSETAMINE	51
6.1	Süsteemi karakteristikute määramine	51
6.2	Süsteemi abil soojusjuhtivusteguri määramine	53
6.2.1	Lineaarkarakteristik.....	55
6.2.2	Parandiga lineaarkarakteristik.....	57
6.2.3	Polünoomkarakteristik	59
6.3	Süsteemi täpsuse hinnang, lõplikud järeldused.....	61
	KOKKUVÕTE	63
	SUMMARY	64
	KASUTATUD KIRJANDUS.....	65
	LISAD	68

EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on seotud TTÜ inseneriteaduskonna professori Lauri Küti teadusprojektiga, mille põhiosaks on parabolpeegli päikesekollektor. Antud töö hõlmab sellest projektist ühte osa, milleks on päikesekollektoris energiatootmiseks kasutatavate termoelektriliste elementide parameetrite määramiseks mõeldud temperatuuridiferentsiaali rakendav soojusvoo mõõtmise seade. Töö raames ehitatud katseseadmega on võimalik mõõta katseobjektide, eeskätt termoelektrilise generaatorite, soojustakistust ning töökarakteristikuid.

Töö viidi läbi Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

Q – soojusvool [W]

P – võimsus [W]

W - soojusvoog [W/m²]

A – pindala [m²]

L – paksus [m]

λ - soojusjuhtivustegur [W/m·K]

m - mass [kg]

C - soojusmahtuvus [J/K]

ΔT - temperatuuridiferentsiaal (mõõtesillas) [C°]

T - temperatuur [C°]

σ - standardhälve

r - korrelatsioonitegur

PTFE - polütetrafluoreteen

PMMA - polümetüülmetakrülaat

TEG - termoelektriline generator

SISSEJUHATUS

Seoses alternatiivsete energiaallikate aktuaalsusega on tänapäeval oluline lahenduste otsimine, mis võimaldaksid taastuvatest allikatest võimalikult efektiivselt energiat toota. Käesolev töö on osaks päikeseenergiat koondava ning elektrienergiaks muundava süsteemi projektile, täpsemalt selle energiamuunduri termoelektriliste generaatorite omaduste määramisele.

Termoelektrilise generaatori (TEG) talitluse (sh. väljundvõimsus) määravad põhiparameetrid on elektriline takistus, soojusjuhtivus ja Seebecki koefitsent. Neist parameetritest on elektriline takistus ja Seebecki koefitsent suhteliselt lihtsalt määratavad. Raskem on määrata TEG-i soojusjuhtivust. Termoelektriliste elementide tootjate tootedokumentatsioon kirjeldab tihtipeale termoelektrilisi generaatoreid vaid nende optimaalsetel töötingimustel suurima võimsuspunkti lähedal - samas on vaja energiatootmissüsteemi loomisel teada, mis toimub TEG-iga vahepealsetes mitteoptimaalsetes tööpunktidest. Sellest probleemist tuleneski magistritöö teema, mille lahendamiseks oli vaja projekteerida ja valmistada temperatuuridiferentsiaali rakendav soojusjuhtivust mõõtev süsteem ning viia läbi selle katsetused.

Käesoleva töö eesmärgiks olev seade on mõeldud mõõtma elementide parameetreid reaalsetel töötingimustel ning seeläbi võimaldama süsteemi käitumise ennustamist. Seade peab suutma teostada mõõtmisi piisava täpsusega ning olema kergelt kasutatav.

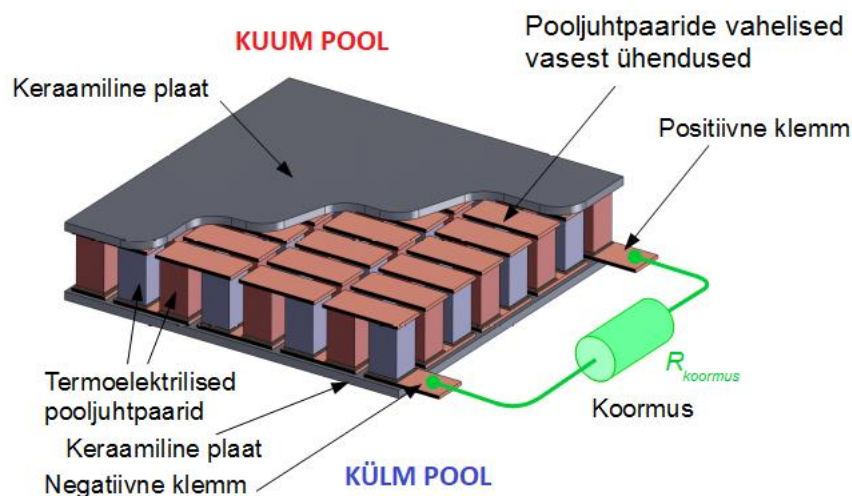
Töö koosneb kuuest peatükist. Esimeses peatükis on käsitletud seadme olemust ja tööpõhimõtte teoreetilisi aluseid. Teine osa käsitleb töö aluseks olnud süsteemi analüüsi. Kolmandas osas kirjeldatakse seadme füüsilise osa ehitusprotsessi ja lahenduste ning komponentide valiku kriteeriume ja kaalutlusi. Neljandas peatükis on toodud mõõteseadme süsteemi juures kasutatud lisaseadmete olulisemad näitajad ning ülevaade nende rakendusest ehitatud süsteemis. Viiendas peatükis on LabView kasutajaliidese ülevaade. Kuuendas peatükis viiakse läbi seadme kalibreerimine ja esitatakse seadme töötingimustel katsetamiste tulemused.

Mõõteseadme elementide projekteerimisel olid aluseks Karl Ingermanni õpikud *Soojustehnika mõõtevahendid* [24] ja *Temperatuuride mõõtmine* [23].

1. TÖÖ TEOREETILISED ALUSED

1.1 Ülevaade termoelektrilistest efektist

Termoelektriliseks efektiks nimetatakse füüsikalist nähtust, milles temperatuuride erinevusest tingitud soojusvool läbi materjali põhjustab elektromotoorjõu esinemise või vastupidiselt, elektrivool põhjustab soojusvoolu ja sellega temperatuuride erinevuse materjali otstel. Temperatuurierinevusest põhjustatud elektromotoorjõu esinemist nimetatakse Seebecki efektiks ja voolust põhjustatud soojusvoolu esinemise protsessi nimetatakse Peltieri efektiks. Termoelektrilist efekti rakendavaid seadmeid nimetatakse termoelektrilisteks elementideks (Sele 1.1). Käesolev töö rakendab termoelektrilist efekti kahes osas: töö eesmärgiks on luua seade, mis analüüsib Seebecki efektil põhinevaid elektrigeneraatoreid ning seadme konstruktsioonis on kasutatud Peltieri efektil põhinevaid jahuteid.



Sele 1.1 Termoelektrilise generaatori läbilõige [25]

TEG-ide tootmisprotsessi tehnoloogilise omapärana kasutatakse pooljuhtpaaride ühendamiseks TEG-i eri pooltel erineva sulamistemperatuuriga joodiseid. Seetõttu on termoelektrilise generaatori rakendustes oluline järgida selle kuuma ja külma poole paiknemist [25].

1.2 Soojusvoolu mõõtmise põhimõte

Soojusvoolu mõõdetakse pronksist etalon-soojusjuhtivusdetailis (edaspidi „soojusmõõtesild“) seda läbiva soojusvoo tõttu esineva temperatuurierinevuse suurust jälgides. Soojussilla mõlemale poolele on kinnitatud temperatuuriandurid, millega mõõdetakse silla kuuma ja külma poole temperatuurid. Soojusvoolu määramine toimub kasutades nende temperatuuride vahet ΔT . Soojussilla tööpõhimõte seisneb soojusjuhtivuse põhiprintsiibis, kus keha läbiva soojusvoolu tagamiseks on vaja rakendada teatud temperatuurivahet, mis on kirjeldatav läbi termilise takistuse.

Eeldades, et süsteemi soojusisolatsioon on ideaalne või reaalses olukorras ideaalsusele piisavalt lähedal, siis mõõtesilda sisenev soojusenergia on võrdne soojusenergiaga, mis suundub mõõtesillast välja.

(1.1)

$$Q'_{sild\ sisse} = Q'_{sild\ välja}$$

Valemi (1.1) järgi, teades soojussilla soojustakistust, on võimalik avaldada läbiv soojusvool kui

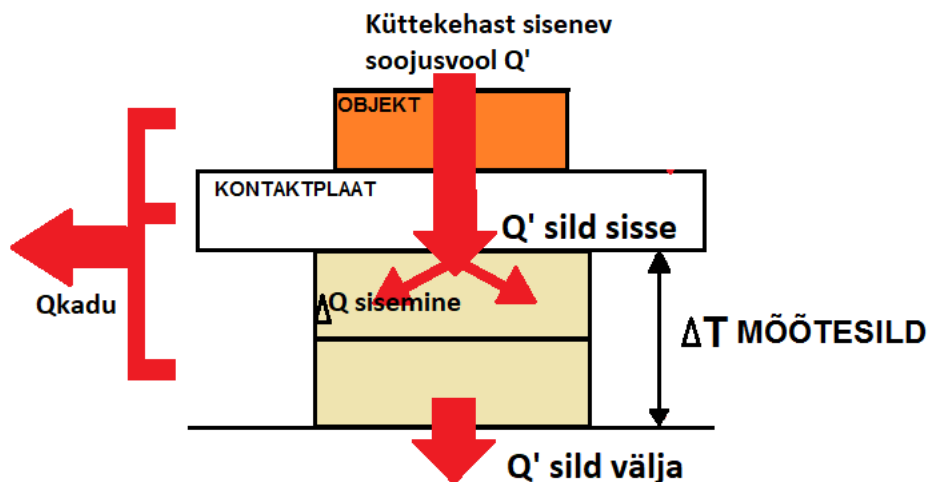
(1.2)

$$Q'_{sild\ sisse} = \frac{\Delta T}{R_{th\ soojussild}}$$

Sellele lisandub süsteemi temperatuuri muutumisel (näiteks käivitamisel) esialgne energiahulk, mis kulub antud töötemperatuuril silla komponentide soojusmahtuvuse täitmiseks ja termilise tasakaalu saavutamiseks. Protsessi (Sele 1.2) kirjeldab valem (1.3).

(1.3)

$$Q'_{sild\ sisse} = Q'_{sild\ v\alja} + \Delta Q_{sisemine} = Q'_{sild\ v\alja} + C_{pronks} * m_{pronks} * \frac{\Delta T}{\Delta t}$$



Sele 1.2 Mõõtesilla soojusvoolud

Muutuva temperatuuri korral on eeltoodud valemi viimase komponendi väärtus keeruliselt hinnatav ning nõuab eelneva temperatuurikäitumise mõõtmist ning integreerimist, mis muudab süsteemi juhtimise keerukaks. Lähenedes protsessile lihtsustatult vastavalt valemile (1.4).

(1.4)

$$\Delta T_{sild} = \frac{L_{sild}}{A_{sild} \lambda_{sild}} \left(Q'_{sild\ v\alja} + \frac{C_{pronks} * m_{pronks}}{2} * \frac{\Delta T_{sild}}{\Delta t} \right) = R_{th\ soojussild} \cdot Q'_{sild\ v\alja} + \Delta T_{viga}$$

ning lugedes siseenergia muutuse veaks, mida ei võeta analüüsis arvesse, uurime temperatuurivahet püsitingimustes, s.t kui temperatuuri graafik on paralleelne aja teljega ning ajast sõltuv komponent on minimaalne ning eiratav. Sellistel tingimustel kirjeldab süsteem valem (1.5).

(1.5)

$$\Delta T_{sild} = \frac{L_{sild}}{A_{sild} \lambda_{sild}} (Q'_{sild\ v\alja} - Q_{soojuskadu}) = k_{ekv} * Q'_{sild\ v\alja}$$

Mis teisendatuna avaldub kujul (1.6).

(1.6)

$$Q'_{sild\ välja} = \frac{\Delta T_{sild}}{k_{ekv}}$$

kus k_{eq} on ekvivalentne näivsoojusjuhtivus, mis sisaldab süsteemi soojuskadusid, sh. soojusenergiat, mis ei läbi soojussilda, vaid kulgeb läbi selle ümbritseva keskkonna.

1.3 Süsteemi abil katseobjekti soojusjuhtivusteguri leidmine

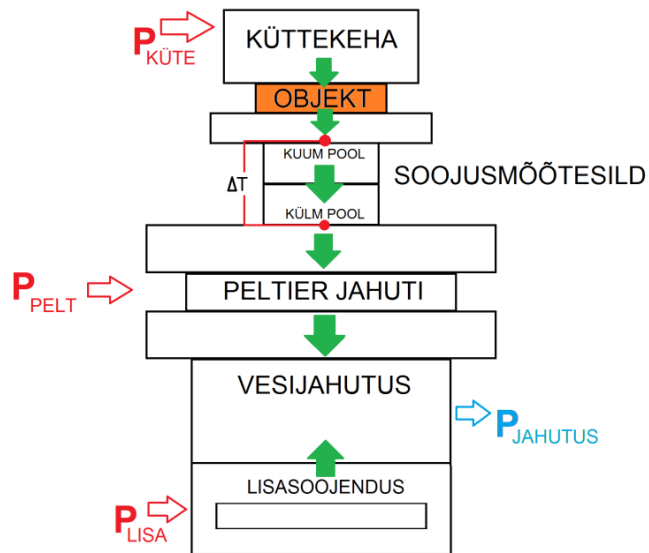
Olgu ülesandeks küttekeha ja soojusmõõtesilla vahele asetatud objekti soojusjuhtivusteguri λ määramine. Teada on $Q'_{sild\ välja}$, katseobjekti paksus d ja pindala A , küttekeha konstantne temperatuur t_1 ning soojusmõõtesilla kontaktplaadi konstantne temperatuur t_2 . Lähtudes eeldusest, et mõõtesillast väljuv soojusvool on võrdne katsekehasse sisenevaga, siis avaldub soojusjuhtivustegur kujul (1.7)

(1.7)

$$\lambda_{katsekeha} = \frac{Q'_{sild\ välja} * d}{A * (t_1 - t_2)}$$

1.4 Ehitatava mõõteseadme soojuslik mudel

Süsteem (Sele 1.3) koosneb küttekehast võimsusega $P_{KÜTE}$, pronksist valmistatud soojusmõõtesillast, Peltier jahutist võimsusega P_{PELT} , jahutist võimsusega $P_{JAHUTUS}$ ja lisasoojendusest võimsusega P_{LISA} . Süsteemi keskpunktiks on mõõdetava objekti all asuv soojusmõõtesild, mille kuuma ja külma poole temperatuuride erinevus ΔT on mõõtmiste aluseks.



Sele 1.3 Süsteem ja selle põhilised võimsused ja soojusvoolud (tähistatud roheliselt) ideaalses olukorras

Süsteemis oleva küttekeha temperatuur on täpselt juhitud. Selle abil pannakse paika mõõdetava objekti (antud rakenduses termoelektriline generaator) kuumale poolele temperatuur. Teisel objekti poolel tagatakse sarnaselt stabiilne ja täpne temperatuur Peltier jahuti poolt, mida juhib temperatuuri tagasiside järgi väline kontrollier. Peltieri jahuti kontrolleri tagasiside toimub objekti külma poolega kokku puutuval pinnal oleva sensori kaudu. Peltier jahuti kuumalt poolelt eemaldab soojuse vesijahutus. Süsteemi tööpunkti täiendava juhtimise võimaldamiseks on vesijahutuse alla paigutatud lisaküttevõimsus.

2. OLEMASOLEVA SÜSTEEMI ANALÜÜS

Seadme projekteerimise alguses analüüsiti varasemat süsteemi prototüüpi ning määrati tehnilised probleemid, millele uue mõõteseadme ehitus pidi leidma lahendused.

2.1 Võimekus ja piiritingimused

Soojusvoo mõõtmise seade oli ette nähtud mõõtma kommerts-TEGide [17], mille elektriline väljundvõimsus jääb alla 15 W ning neid läbiv soojusvool alla 150 W, parameetreid. Selliste TEGide olulisemad töötingimuste piirid on:

- Kuuma poole maksimaalne temperatuur kuni 300 °C;
- Külma poole nimi-töötemperatuur 30 °C;
- Kasutegur kuni 5,5 %;
- Välismõõtmete vahemik 30 x 30 mm – 50 x 50 mm, paksus 3,5 – 5 mm;
- Väljundpinge kuni 10 V (tühijooksul);
- Väljundvool kuni 5 A (lühisel).

Soojusvoo mõõtmise süsteem pidi töötama selliselt, et oleks võimalik kaardistada TEG-ide töö, kui nende

- Külma poole temperatuurid kuni 100 °C;
- Kuuma poole temperatuur kuni 300 °C;
- Läbiv soojusvool kuni 150 W.

Kuuma poole temperatuuri reguleerimise tagas täppis-reguleerimisega soojusallikas.

Olemasoleva seadme konstruktsioonis toimus temperatuuri mõõtmine täpsete tajuritega ainult mõõteobjekti suhtes külmal kontaktplaadi poolel viimase pinnal ning soojussilla kuumal ning külmal poolel.

Eelnevatest mõõtetulemustest oli selgitatud, et mõõtetulemuste juures oli võimalik täheldada mitmete teiste parameetrite mõju mõõtetulemustele, sh jahutusvee temperatuuri suhtes.

Puudusid andurid vesiradiaatorite, jahutusvee ning lisaküttekehade temperatuuride mõõtmiseks. Kuna seade oli lahti võetud olekus ja ilma paljude oluliste komponentideta, siis ei olnud olemasoleva süsteemi mõõtetäpsuse analüüsiks täiendavate katsete tegemine võimalik.

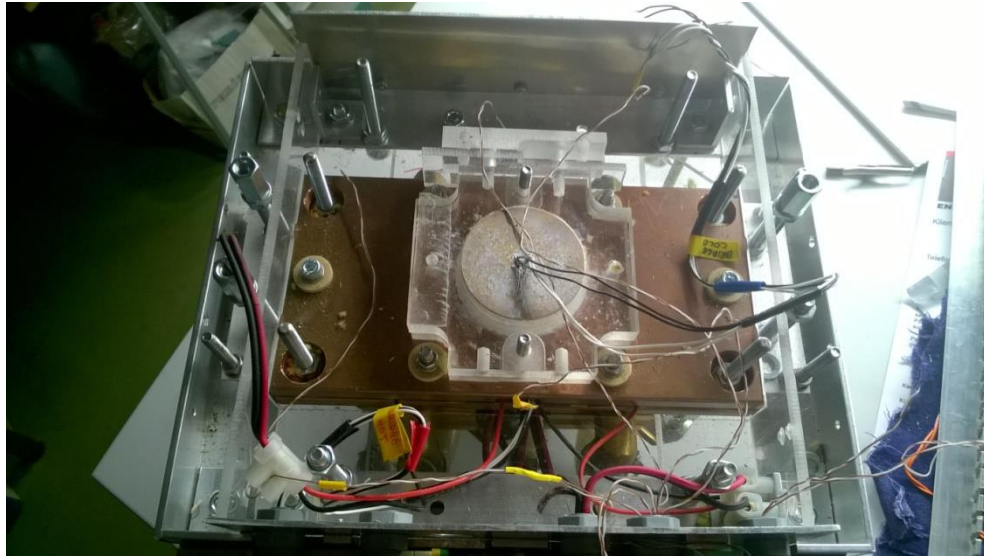
Eesmärgiks oli tagada süsteemi soojusvoo mõõtmine püsiva (eelseadistatud) külma kontaktpinna temperatuuri väärtuse juures, mõõtemääramatusega $\pm 5\%$.

2.2 Konstruktsioon

Mõõteseadme ehituse aluseks olid süsteemi varasema prototüübi osad. Nende osade juures oli kasutatud materjale nagu PMMA (Sele 2.1), mille temperatuuritaluvus jäi alla soovitud 250 C° . Osade lähemal uurimisel oli näha, et need olid varasemast katsetamisest saanud termokahjustusi. Lisaks oli süsteemi kõrge töötemperatuuriga osades kasutatud ebapiisava temperatuuritaluvusega juhtmeid, mille isolatsioonil olid samuti nähtavad kuumakahjutused. Eeltoodud põhjustel tuli süsteemi konstruktsioonis teha muudatusi.

Lähtudes prototüübil leitud puudustest, esitati uue seadme ehitusel kasutatavatele materjalidele järgmised nõuded:

- 1) Seade peab olema hea soojusisolatsiooniga, et vähendada soojuskadude ning väliskeskkonna mõju mõõtmistulemustele.
- 2) Seadme kuumade osade läheduses olevad konstruktsioonimaterjalid ning juhtmestik peavad püsivalt taluma temperatuuri 250 C° . Sama kehtib teistele kasutatud elektrimaterjalidele ning tarvikutele.



Sele 2.1 Seadme aluseks olnud prototüübi osad. Näha on PMMA-st valmistatud komponendid, mis töö käigus asendati.

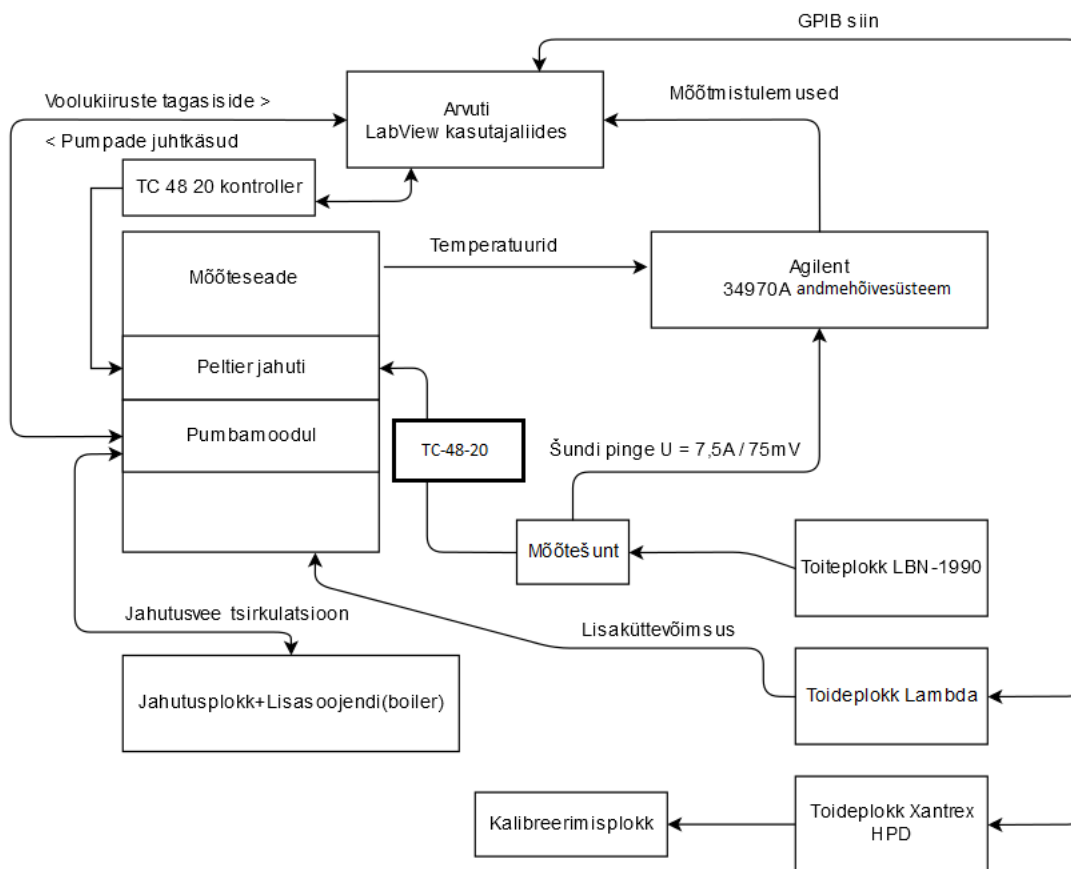
2.3 Lõputöös lahendamist vajavad ülesanded

Olemasoleva süsteemi analüüsi tulemusena võib välja tuua järgmised parendamist vajavad aspektid:

- 1) Soojussilla ehsitust tuleb parandada ja kasutada suurema temperatuuritaluvusega materjale.
- 2) Täiendamist vajab jahutussüsteem, mille koosseisu tuleb lisada täiendavad pubad ja jahutusvee parameetrite monitoorimine
- 3) Mõõtesüsteemi juhtimiseks tuleb luua uus (pool)automaatne mõõte- ja andmehõivesüsteem, mis võimaldaks seada ja jälgida mõõtesüsteemi talitlus- ja olekuparameetreid, sh.
 - a) – Toitallikate juhtimine läbi andmesideleideste personaalarvuti kaudu
 - b) – Andmehõivesüsteemi ühendamine ja tulemuste automaatne lugemine
 - c) - Soojusjuhtivusteguri automaatne määramine

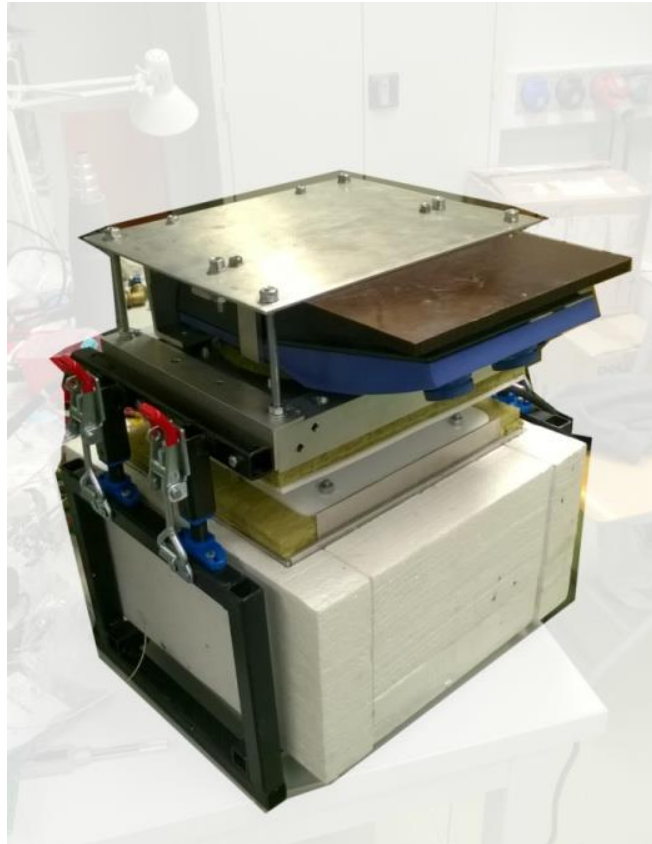
3. MÕÕTESÜSTEEMI PROJEKTEERIMINE JA VALMISTAMINE

Töö raames ehitati mõõtesüsteem (Sele 3.1), mis koosneb mõõteseadmest, jahutusploki, andmekogujast ning toitesüsteemist, mis on koordineeritud keskse kasutajaliidese poolt. Seadme valmistamiseks kasutati laboris olemasolevaid vahendeid ja materjale, 3D printerit ja CNC freespinkki.



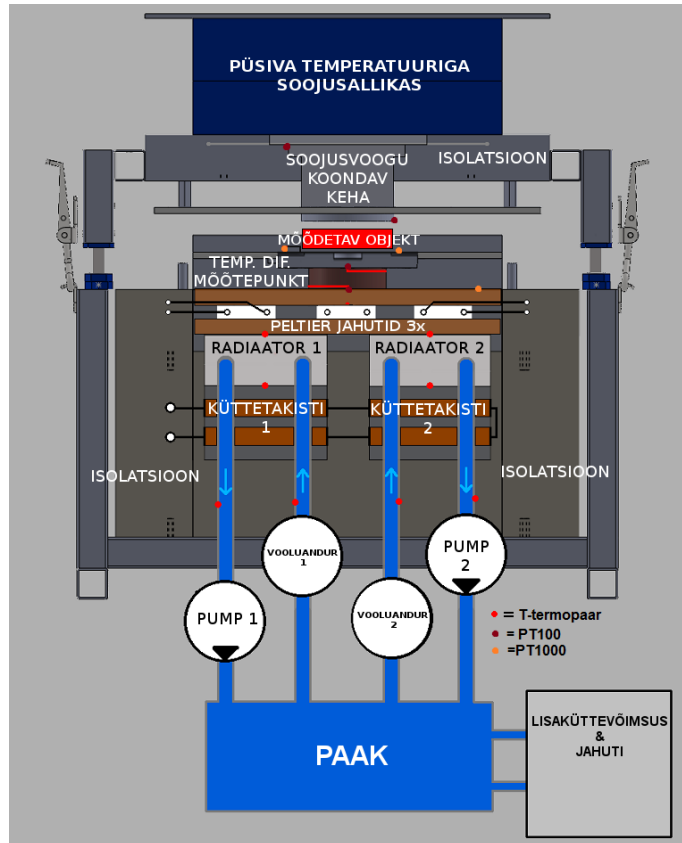
Sele 3.1 Süsteemi funktsionaalne diagramm

3.1 Mõõteseade ja selle ehitus



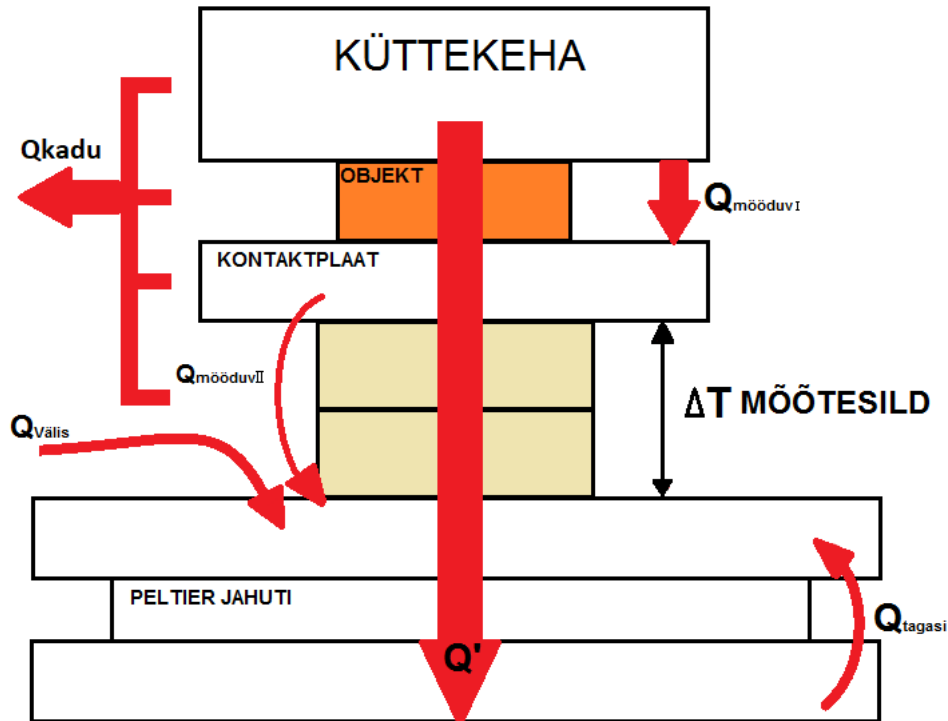
Sele 3.2 Mõõteseade

Töö peamiseks ülesandeks oli süsteemi keskmeks oleva mõõteseadme realiseerimine (Sele 3.2). See jagunes kaheks põhiosaks: mõõteseadme füüsiline osa - raam, elektrilised komponendid, jahutusmoodul, süsteemi protsesse (Sele 3.3) juhtivad mikrokontrollerid ning tarkvaraline osa ehk kasutajale arvutist tagasisidet andev kasutajaliides.



Sele 3.3 Mõõteseadme ülesehitus

Mõõtesead (Sele 3.3) koosneb kahest pooldest - ülemisest püsiva temperatuuriga soojusallikast ning alumisest püsiva võimsusega jahutist, mille tsirkulatsiooniga on jadamisi ühendatud eraldiseisev autotrafost reguleeritav lisaküttevõimsus (veeboiler), mis aitab süsteemil hoida püsivat jahutusvee temperatuuri, ning jahutusplokk. Mõõteseadme komponendid on ümbritsetud sisemise kõrgeid temperatuure taluva kivivillast isolatsiooniga ning välimise vahtpolüstüreenist isolatsiooniga, et vähendada soojuskadude ja kõrvaliste soojusvoolude (Sele 3.4) mõju mõõteprotsessile ning muuta protsess võimalikult lähedaseks teoreetilisele kadudeta mudelile.

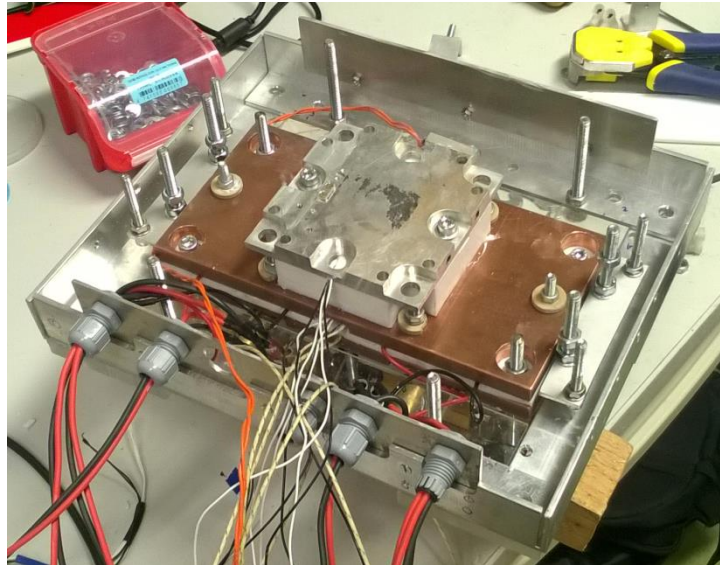


Sele 3.4 Mõõteseadme soojusvoolud kadusid ning hajuvust arvestades

3.2 Seadme konstruktsioonimaterjalide valik

Lähtudes seadme prototüübi konstruktsiooni analüüsist, tuli uue mõõteseadme ehituseks valida kõrge temperatuuritaluvusega materjalid. Konstruktsioonis tehtud muudatused olid järgnevad:

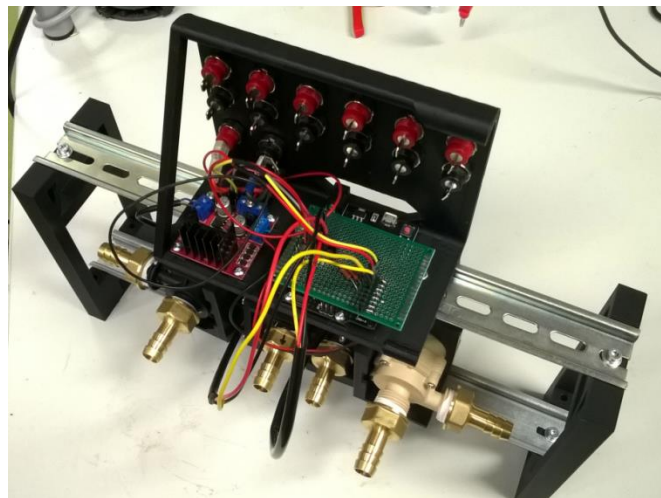
- 1) PMMA-st detailide asendamine püsivalt kuni 250 C° taluva PTFE-st valmistatud detailidega.
- 2) Kõrge töötemperatuuriga punktides kummisolatsiooniga juhtmete asendamine klaasfiiber ja PTFE isolatsiooniga juhtmetega.
- 3) 2,5mm² ristlõikega silikoonjuhtmete ning sobiva nimivooluga ühenduste kasutamine



Sele 3.5 Mõõteseadme enne soojusisolatsiooni paigaldust. Kontaktplaadi all on näha uus PTFE-st valmistatud pronksist mõõtesilda fikseeriv detail

3.3 Jahutusmoodul

Soojusvoo mõõteseadme Peltier jahutist eralduvat soojust ära juhtiva jahutusvee pumpamist, selle voolu mõõtmist jt. süsteemi jahutusega seotud funktsioone täidab jahutusmoodul (Sele 3.6).



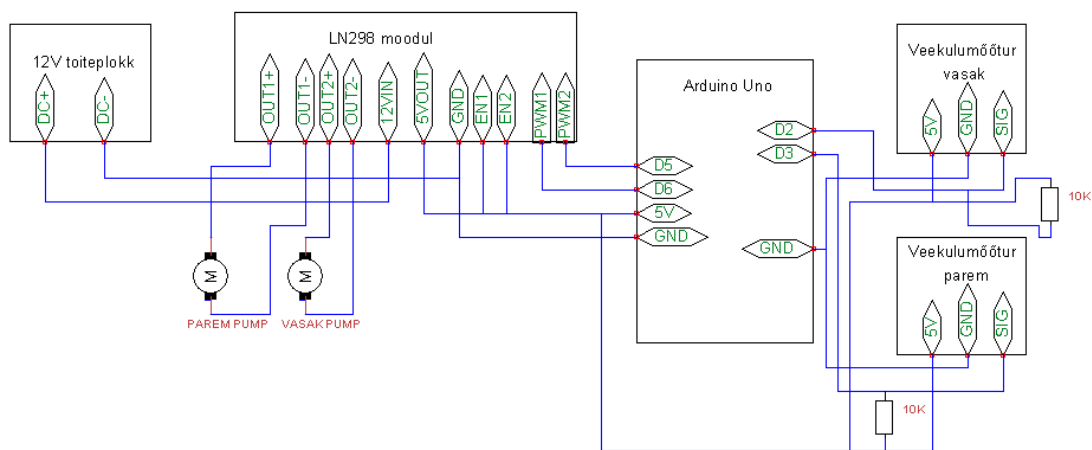
Sele 3.6 Jahutusmoodul seadme küljest lahti ühendatuna ning ilma TC-48-20 kontrolleri

Tagamaks läbiva jahutusvee koguse võrdsust mõlemas radiaatoris ning seeläbi süsteemi termilist sümmeetriat on jahutusmoodulis kaks eraldiseisvat pumpa ning veekulumõõturit. Pumbad [6] on Hiina tootjalt BLDC ning nende tehnilised andmed on toodud Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Valitud pumba tehnilised andmed

Mudel	DC40F-1240
Nimipinge	12 V
Nimivool	1,2 A
Tööiga	30000 tundi
Tüüp	Tsentrifugaalpump

Pumpade juhtimiseks kasutatakse Arduino Uno arendusplaati ning kahe kanaliga H silla moodulit [8], mis põhineb LN298N draiveril [9]. Lisaks on arendusplaadiga ühendatud veekulumõõturid, mis annavad kontrolleriile tagasisidet pumpade juhtimiseks. Pumbamooduli toiteks on kasutusel väline 12V toiteallikas. Arduino Uno arendusplaat saab toite LN298 mooduli 5 V väljundist (Sele 3.7).



Sele 3.7 Jahutusmooduli elektrilised ühendused

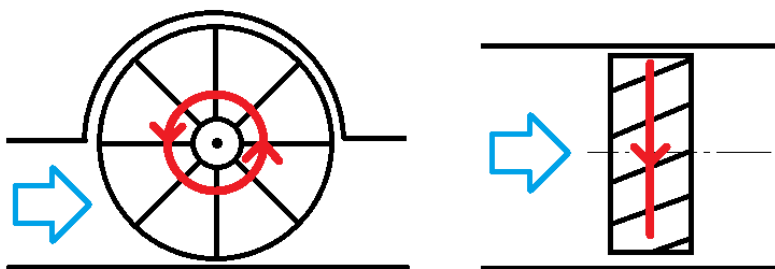
Jahutusmooduli kontroller saadab arvuti kasutajaliidesele tagasisidet USB ühenduse kaudu. Lisaks kinnitub jahutusmoodulile Peltier jahutit juhtiv TC-48-20 kontroller.

3.3.1 Veekulumõõturite katsetamine, valik ja kalibreerimine

Pumbamooduli veekulumõõturitele valikuks püstitati järgmised kriteeriumid:

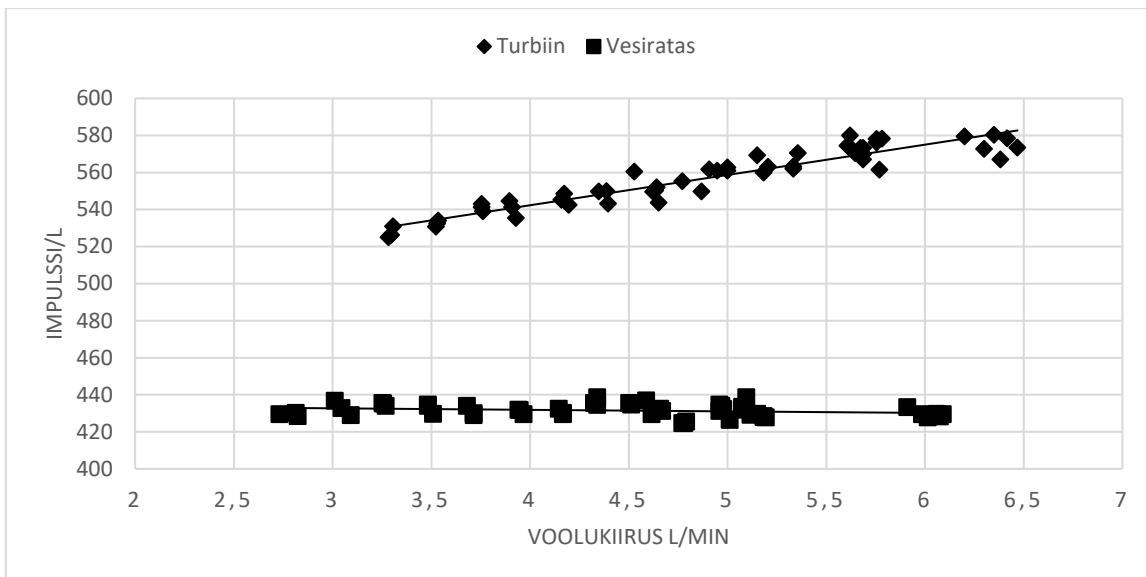
- 1) Väljundi lineaarsus üle erinevate veevoolukiiruste
- 2) Väljundi täpsus $\pm 0,2$ L/min
- 3) Ühilduvus 5 V TTL süsteemiga
- 4) Veetemperatuur kuni 80 C°

Saadaval olid kahte tüüpi turbiinveekulumõõturid - radiaalne ("vesiratas") YF-S201 (Sele 3.8 vasakul) ja aksiaalne ("turbiin") YF-B5 (Sele 3.8 paremal).



Sele 3.8 Veekulumõõturid. Veevool on näidatud siniselt, impulsse genereeriva mehaanilise elemendi pöörlemissuund punaselt.

Valimaks anduritest sobivaim korraldati seeria katseid erinevatel voolukiirustel, et hinnata veekulumõõturite täpsust ja lineaarsust. Katseprotsess oli järgmine: Pump käivitati soovitud kiirusel ning selle väljund suunati täitma 4 L mahuga anumad. Anuma täitmiseks kuluv aeg ning kulumõõturi impulsside arv märgiti katse lõpus üles. Igal kiiruse astmel viidi läbi 3 korduvat katset.



Sele 3.9 Veekulumõõturite katsetuste tulemused

Katsetulemustest selgus, et radiaalse “vesiratta” tüüpi veekulumõõturi impulsside arv voolava vee mahu suhtes püsib konstantne kõigil kiirustel, kusjuures impulsside arv liitri kohta on keskmiselt 432. Lähtudes katsetulemustest osutusid valituks "vesiratta" tüüpi YF-S201 veekulumõõturid [7].



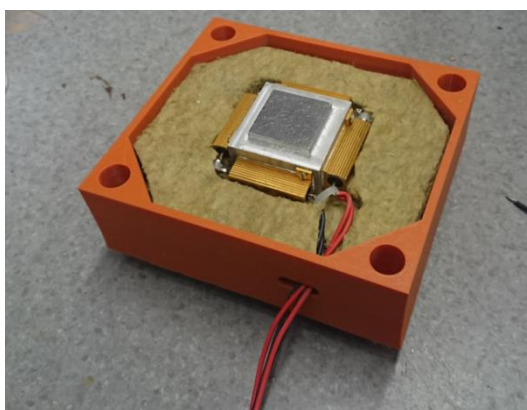
Sele 3.10 Turbiinkulumõõtur YF-S201

YF-S201 turbiinkulumõõturi andmed on toodud Tabel 3.2.

Tabel 3.2 YF-S201 turbiinkulumõõduri andmed

Tüüp	YF-S201
Voolukiiruse vahemik	1-30 L/min
Töörõhk	<1,75 MPa
Tööt temperatuur	<80 C°
Impulsside arv/L	432 imp/L

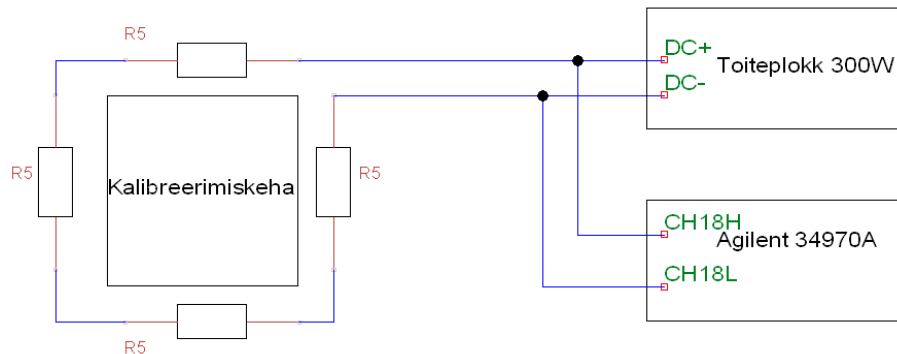
3.4 Kalibreerimisplakk



Sele 3.11 Kalibreerimisplakk

Süsteemi tööarakteristiku kaardistamiseks erinevatel temperatuuridel ja võimsustel valmistati kalibreerimisplakk (Sele 3.11) võimsusega kuni 300 W. Selle keskel asub küttekeha, mis koosneb alumiiniumist risttahukast, mille ümber on jadamisi ühendatud 4 takistit kogutakistusega 20 oomi (Sele 3.12). Küttekeha on ümbritsetud kivivillast isolatsioonmaterjaliga ning on asetatud 3D prinditud korpusesse. Kalibreerimise ajal kinnitub see soojusvoo mõõteseadmele püsiva temperatuuriga soojusallika asemel ning selle ülesandeks on tekitada soojusmõõtesillas teadaoleva suurusega

soojusvool. Lisaks toitejuhtmetele on takistitele kinnitatud kaks lisajuhet, et mõõta pinget otse takistite klemmidel, mis aitavad saada täpsema mõõtmistulemuse, võimaldades välistada kaod juhtmetes.



Sele 3.12 Kalibreerimisploki ühenduste skeem

3.5 Süsteemi temperatuuri tagasiside

3.5.1 Temperatuuriandurite valik, paigutus ja täpsuse analüüs

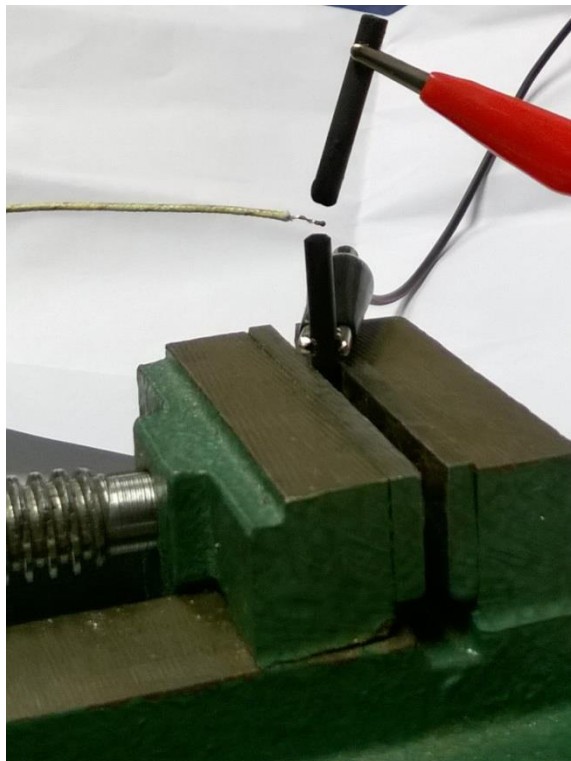
Saamaks süsteemi tööprotsessidest head ülevaadet, paigutati süsteemi mitmeid temperatuuriandureid. Nende paigutus ning tüüpide eristus on toodud Sele 3.3. Temperatuuriandurite ja nende ühenduste valik lähtus järgnevatest kriteeriumitest:

- 1) Tööpiirkond ühildub süsteemi töötemperatuuri maksimumiga
- 2) Ühilduvus olemasoleva Agilent 34972A andmekogujaga
- 3) Täpsus
- 4) Maksumus

Lähtudes eeltoodud tingimustest, valiti temperatuuri mõõtmiseks kahte tüüpi andurid: T-tüüpi klaasfiiberisolatsiooniga termopaarid nende odavuse ning hea kuumakindluse tõttu ning PT100 ja PT1000 termotundlikud takistid. PT-d on kasutusel süsteemi suuremat täpsust nõudvates punktides (temperatuurisild ja selle lähedased mõõtepunktid) ja on paigaldatuna 4 juhtme konfiguratsioonis.

Termopaare kasutatakse vähemtäpsetes, indikatiivse iseloomuga mõõtepunktides (veetemperatuur, Peltier jahuti korrektse funktsioneerimise kontroll).

Süsteemi kõrge töötemperatuur seadis ka andurite ühendustele suured nõuded. Jootmist ei olnud võimalik jootetina madala sulamistemperatuuri tõttu kasutada ning mehaaniline keerdpaar ei ole pikaajaliseks kasutamisel oksüdeerumisprotsesside tõttu piisavalt töökindel [21]. Seetõttu osutus valik ühenduste keevitamise (Sele 3.13) kasuks.



Sele 3.13 Termopaari keevitamine

Keevitusprotsessi jaoks hangiti AA tüüpi patarei seest kaks süsinikelektroodi, mis ühendati labori toiteploki. Ühendatavatest termopaari juhtmetest tehti keerdpaar läbi mille lühistati süsinikelektroodid. Selle käigus toimus keerdpaaril kahe juhtme vahel keevitusprotsess.

Pärast valmistamist kalibreeriti termopaarid jäävee keskkonnas (Sele 3.14), võrreldes neid teise kalibreeritud temperatuurianduri näidu ning täppistermomeetriga. Saadud andmeid kasutati hiljem LabView kasutajaliideses andurite näidu paranditena.



Sele 3.14 Termopaaride kalibreerimine jäävees

Vastavalt Agilent 34972A mõõtetäpsuse spetsifikatsioonile (Lisa 3) on paigaldatud termopaaride lugemistäpsus $\pm 1\text{ C}^\circ$ ja paigaldatud termotundlike takistite lugemistäpsuse $\pm 0,06\text{C}^\circ$.

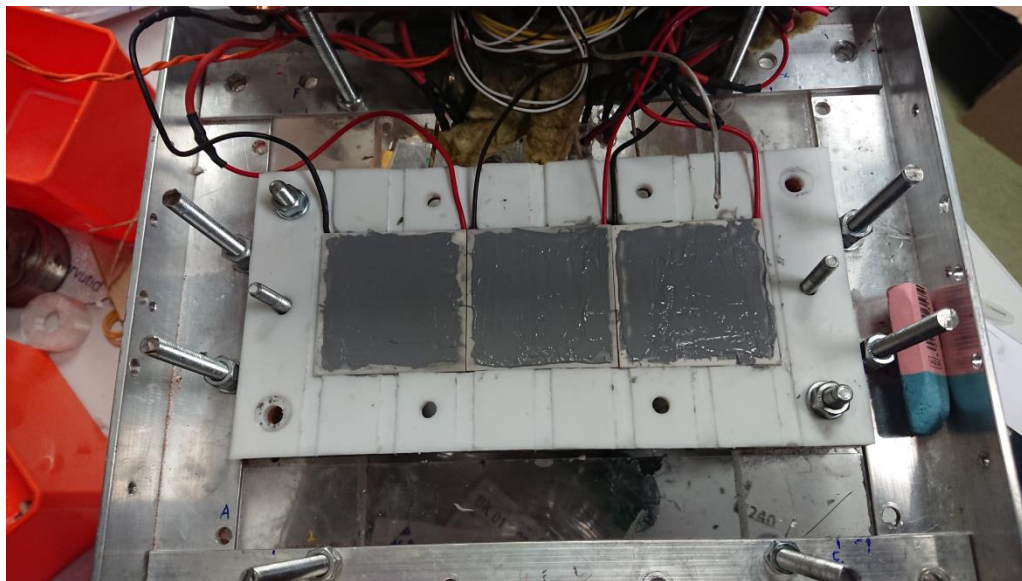
3.6 Peltier jahuti

Kompenseerimaks sojussillal temperatuuridiferentsiaali mõju ning võimaldamaks ka madalatel katseobjekti temperatuuridel piisavat soojusvoolu on süsteemis sojussilla külmal poolel Peltier elementidega töötav jahuti (Sele 3.15). See koosneb kahest vaskplaadist, mille vahele on paigutatud Peltier elemendid 12711-9P31-24CW tootjalt Custom Thermoelectric [1]. Peltier elementide andmeleht on toodud Lisas 4. Töö käigus täiustati varasema prototüübi jahutit, suurendades Peltier elementide arvu kahelt kolmeni ning jahutisse paigutati täiendavaid termopaare, et mõõta temperatuuridiferentsiaali, millest sõltub jahutuse efektiivsus (Lisa 4), Peltier elementide külma ja kuuma poole vahel. Lisaks asendati jahuti PMMA detailid PTFE-st valmistatuga.

Tabel 3.3 Peltier jahutuselement 12711-9P31-24CW andmed [1]

Tüüp	12711-9P31-24CW
Nimipinge	15,2 V
Nimivool	24 A

Vastavalt Tabel 3.3, on kolme Peltier elementi poolt rööpühenduses nimipingel 15,2 V maksimaalne tarbitav vool 72 A. Jadaühenduses on pinge üle kolme elemendi 45,6 V ning vool 24 A. Jahutit juhtides tuleb silmas pidada, et, vastavalt Lisas 4 toodud graafikule, väheneb elementide jahutuse efektiivsustegur voolu suurenedes. Katsete käigus selgus, et käesoleva töös ehitatud süsteemi jahuti suurim efektiivsus saavutatakse voolul 13,5 A ühe elemendi kohta.



Sele 3.15 Peltier jahuti sisu. Näha on 3 jahutuselementi, millele on kantud termopasta

3.7 Püsiva temperatuuriga soojusallikas

Püsiva temperatuuriga soojusallikana on kasutatud keemiliste reaktsioonide läbiviimiseks kasutatavat pliiti IKA RCT Basic [15] (Sele 3.16) võimsusega 600 W. Selle sisseehitatud termoregulatsioonisüsteem tagab väikese temperatuuri ülevise (suur ülevise võib katsetatavat objekti kahjustada).



Sele 3.16 IKA RCT Basic

Tagamaks suurelt pliidipinnalt väljuva soojusvoolu paremat koondumist läbi ettenähtud 50 x 50 mm (termoelektrilise generaatori tüüpilised mõõtmed) katsekeha pinna valmistati pliidile kinnituv alumiiniumist soojuvoogu koondav keha (Sele 3.17), millele on kinnitatud kaks PT100 temperatuuriandurit. Esimene neist paikneb pliidi kontaktpinnal ning teine katsekehaga kokku puutuval pinnal. Lähtudes soojusallika maksimaalsest töötemperatuurist 300 °C, tuli andurite ühendamiseks kasutada kõrge temperatuuritaluvusega klaasfiiber-vilgukivi isolatsiooniga juhet. Andurite ühendused juhtmetega on mehaanilised.



Sele 3.17 Soojusvoolu koondav keha

4. MÕÕTESÜSTEEMI JUURES KASUTATUD LISASEADMED

Käesolevas magistritöös on kasutatud ehitatud mõõteseadme energiaga varustamiseks, selle andmete kogumiseks ning protsessidele käitamiseks mitmeid lisaseadmeid, mis koos mõõteseadmega moodustavad tervikliku mõõtesüsteemi. Süsteemi parameetrid, mida tuli mõõta või juhtida, on loetletud Tabel 4.1, mis kirjeldab mõõteseadme juhitavad ning mõõdetavad suurused, energiatarvitid ja teised parameetrid, mille juhtimine on vajalik mõõtesüsteemi tööks.

Tabel 4.1 Mõõtesüsteemi juhitavad ning mõõdetavad suurused

Toitepinged			Märkused
Tarviti	Pinge	Vool	
Kalibreerimisplakk	0 ... 60 V reguleeritav	0... 5 A reguleeritav	Arvutiga juhitav allikas
Peltieri jahuti	0 ... 60 V reguleeritav	0 ... 60 A reguleeritav	Konst. pingega allikas
Jahutusmoodul	12 V	2 A	
Väline jahutusplakk	24 V	10 A	
Mõõdetavad elektrilised suurused			
Objekt	Mõõdetav suurus, vahemik		
	Pinge	Vool	
Kalibreerimisplakk	0 ... 60 V reguleeritav	0... 5 A reguleeritav	1 pinge, 1 vool
Peltieri kontrolleri	0 ... 60 V reguleeritav	0... 60 A reguleeritav	1 pinge, 1 šundi pinge
Mõõdetavad temperatuurid			
Asukoht	Andur	Temperatuurivahemik	
Soojussilla külm pool	PT100	0 ... 100 C°	4-juhtmeline mõõtmine
Soojussilla kuum pool	PT100	0 ... 300 C°	4-juhtmeline mõõtmine
Kontaktplaadi pind	PT1000	0 ... 300 C°	4-juhtmeline mõõtmine
Pliidi pind	PT100	0 ... 300 C°	4-juhtmeline mõõtmine
Soojust koondava keha otsapind	PT100	0 ... 300 C°	4-juhtmeline mõõtmine
Vasak radiaatori ja Peltier jahuti vaheline temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	

Vasak lisaküttetakisti ja radiaatori vaheline temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Peltier jahuti sisemine külma poole temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Parem Radiaatori ja Peltier jahuti vaheline temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Parem lisaküttetakisti ja radiaatori vaheline temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Peltier jahuti sisemine kuuma poole temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Parem radiaator siseneva vee temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Vasak radiaator väljuva vee temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Parem radiaator väljuva vee temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Vasak radiaator siseneva vee temperatuur	K-termopaar	0 ... 80 C°	
Peltier jahuti ääre temperatuur	PT1000	0 ... 80 C°	
Pinge voolumõõtesundil	Šunt	0 – 60 mV	

Muud mõõdetavad suurused			
Tüüp	Andur	Vahemik	
Veevool vasakus jahutusradiaatoris	Turbiinveekulumõõtur	3 - 6 L/min	
Veevool paremas jahutusradiaatoris	Turbiinveekulumõõtur	3 - 6 L/min	

Järgnevates alapeatükkides on toodud ülevaade lisaseadmete valikukriteeriumitest, nende põhiparameetritest, rakendusest mõõtesüsteemi töö kontekstis ja nende juures kasutatud tehnilistest lahendustest.

4.1 Agilent 34972A andmehõivesüsteem

Andmehõivesüsteem Agilent 34972A [2] on süsteemis kasutusel mõõteseadme peamise andmekogujana. See on universaalne mõõteriist ja kommutaator, millesse saab lisada kuni kolme vahetatavat kaarti. Süsteemis on sees on digitaalne täppismultimeeter (DMM), mille abil on võimalik mõõta täpselt temperatuuri, elektrilise takistuse- ja pingesuurusi ja nõrgemaid voolutugevuste väärtuseid. Seejuures on temperatuurimõõtesisendid väga paindlikud, konfigureerida saab mõõtmisteks termopaare, termistoreid jm.

Agilent 34901A tüüpi 20-kanalise multiplekser-kaardi abil on võimalik mõõta nii temperatuuride, pingete kui voolude väärtuseid. Multiplekser kommuteerib sisendkanalid kordamööda DMM-i ja seejärel teostatakse mõõtmine. Kuigi kanalitest suuruste mõõtmise ei ole siin samaaegne, kuid aeglaselt muutuvate suuruste jaoks on see piisav. Antud lõputöö objektiks oleva süsteemi juures on põhimõtteliselt kõik suurused aeglaselt muutuvad ja siirdeprotsessid kestavad kümneid minuteid, seega on piisav nende väärtuste lugemine näiteks kord sekundis.

Andmehõivesüsteemi on võimalik kasutada eraldiseisvana, salvestades andmed selle sisemisse mällu ning programmeerides seda esipaneelist või koos arvutiga, kus juhtimine ja andmevahetus toimub üle USB ühenduse. Agilent 34972A on ühilduv paljude andmetöötlusprogrammidega, käesolevas töös kasutatakse seda ühendatuna graafilise programmeerimiskeskonnaga LabView, mille jaoks on tootja poolt saadaval draiverid [10].



Sele 4.1 Agilent 34972A ja selle multiplexer kaart

Agilent 34972A tootjapoolset mõõtetäpsuste spetsifikatsiooni kirjeldab Lisa 3. Mõõteseadme andurite ühendused andmekogujaga on loetletud Lisa 9.

4.2 TDK Lambda GEN 100-15 toiteallikas

Toiteallikas TDK Lambda GEN-100-15 [3] toiteallikas on programmeeritav toiteallikas, mida iseloomustab suur võimsus ja suhtelised väikesed mõõtmed. Toiteallika (Sele 4.2) maksimaalne väljundvõimsus on 1500 W, väljundpinge 100 V ja väljundvool 15 A. Toiteallikas toetab mitmeid juhtimisviise, sh. RS-485, IEEE 488.2 ja 4 - 20 mA analoogsignaali. Selles töös on toiteallikas ühendatud arvutiga IEEE 488.2 GPIB liidese kaudu ning selle juhtimiseks kasutatakse tootjapoolseid LabView draivereid [11]. Toiteallika funktsioon mõõtesüsteemis on mõõteseadme Peltier jahutite radiaatorite juures paiknevate lisaküttetakistite toite tagamine.



Sele 4.2 Toiteallikas TDK Lambda GEN-100-15

4.3 Xantrex HPD toiteallikas

HPD 60-5 [4] on firma Xantrex valmistatud toiteallikas. Selles töös on see arvutiga ühendatud IEEE 488.2 GPIB kaudu ning seda juhitakse tootjapoolsete LabView draiverite [12] abil.



Sele 4.3 Xantrex HPD 60-5

Xantrex HPD 60-5 (ja ka HPD 30-10) kasutamiseks kaugjuhtimise režiimis tuleb toiteallika tagapaneelil rakendada lüliti "REM". Töös kasutatakse seda toiteallikat kalibreerimisploki toitenähtena. Katsetuste käigus selgus, et toiteallika juhtimiseks kasutatud tagasiside on võrdlemisi ebatäpne, põhjustades kalibreerimisvõimsuse kõikumise $\pm 1W$ piires seadesuurusest. See kompenseeriti osaliselt tagasiside filtreerimisega ning PID regulaatori täiendava häälestusega.

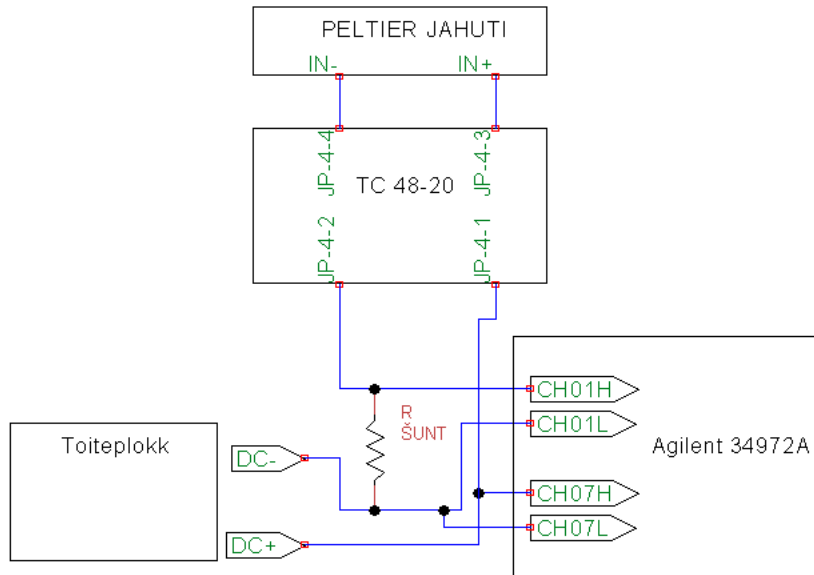
4.4 MC Power LBN-1990 toiteallikas



Sele 4.4 Toiteallika LBN-1990 esipaneel

Toiteallika väljundvõimsus on 900 W. Suurim väljundpinge on 60 V ning -vool 60 A. Sellel toiteallikal puudub sisseehitatud välise tagasiside funktsioon ja seepärast oli ta kasutuses püsiva pingega allikana. Antud toiteallika väljundit juhtis TC-48-20 termoelektrilise jahuti temperatuurikontroller.

Toiteallikaga on jadamisi ühendatud voolumõõtesünt 7,5 A / 75 mV, mille pinget mõõdetakse Agilent 34972A abil. Lisaks mõõdetakse pinget toiteallika väljundklemmidel.(Sele 4.5). Selle abil on võimalik jälgida Peliteri jahuti poolt tarbitavat elektrilist võimsust.



Sele 4.5 Toiteallika mõõteahel

Saadud tulemuste abil arvutatakse LabView keskkonnas välja toiteallika väljundvõimsus antud ajahetkel. Mõõteseadme Peltier jahutite poolt tarbitav maksimaalne vool ületab mõõtesundi nimivoolu, samas suurema nimivooluga šundi kasutamine vähendaks mõõtetäpsust (kasutatud šundi resolutsioon on $7,5/75 = 0,1$ A/mV). Järgmise saadaoleva suurusega 50 A šundi resolutsioon oli 0,66 A/mV). Seetõttu valmistati töö raames 7,5 A šundile õhkjahutus (Sele 4.6), mis võimaldab mõõta šundi nimivoolust suuremaid voole ilma ülekuumenemise ohuta. Õhkjahutuse korpus valmistati 3D printeri abil ning see kasutab ventilaatorit, mille nimipinge on 12 V. Jahutus on toitega ühendatav 4 mm banaapistikute abil.



Sele 4.6 Õhkjahutusega šunt

Šunti läbiva voolu suurus $I_{\text{šunt}}$ avaldub amprites sellel mõõdetud pingest järgmiselt:

$$I_{\text{šunt}} = \frac{7,5}{75 * 10^{-3}} * U_{\text{šunt}}$$

kus $U_{\text{šunt}}$ on mõõdetud pinge voltides üle šundi. Lähtudes Agilent 34972 tootjapoolsest mõõtetäpsuse spetsifikatsioonist (Lisa 3) ning šundi korpusele märgitud täpsusklassist 0,2 avaldub mõõteviga vastavalt liitmääramatuse valemile kujul (4.1).

(4.1)

$$1) 0 A \leq I_{\text{šunt}} < 10 A$$

$$I_{\text{viga}} = \pm \frac{7,5}{75 * 10^{-3}} * \sqrt{(0,003 * U_{\text{šunt}} + 0,0035 * 0,1)^2 + (0,002 * U_{\text{šunt}})^2}$$

$$2) 10 A \leq I_{\text{šunt}} < 100 A$$

$$I_{\text{viga}} = \pm \frac{7,5}{75 * 10^{-3}} * \sqrt{(0,002 * U_{\text{šunt}} + 0,0006)^2 + (0,002 * U_{\text{šunt}})^2}$$

4.5 TC-48-20 termoelektrilise jahuti temperatuurikontroller

Mõõteseadmes kasutatud Peltier jahuti juhtimiseks kasutatakse TC-48-20 kontrolleri [18], mis on valmistatud firma TE Technology poolt.



Sele 4.7 TC-48-20 kontrolleri korpuseta OEM konfiguratsioonis

Kontroller võimaldab termoelektriliste jahutite juhtimist PID algoritmiga ning sellel on tootja poolt saadaval LabView kasutajaliides. Lähtudes kontrolleri väljundi maksimaalsest voolust (Tabel 4.2), on Peltier elemendid ühendatud kontrolleriiga jadamisi. Kontrolleri elektriskeem on toodud Lisas 7.

Tabel 4.2 Kontrolleri TC-48-20 parameetrid [18]

Tüüp	TC-48-20
Tööpiirkond	-20 kuni 100 C°
Impulsslaiusmodulatsiooni sagedus	337 Hz
Toitepinge	9 kuni 50 V
Maks. väljundvool	20 A

Vastavalt tootja soovitusel, toimub TC-48-20 PID konstantide häälestamine Ziegler-Nicholsi heuristilisel meetodil [22].

- 1) Kõigepealt seatakse K_I ja K_D komponentide väärtused nulliks ning K_P komponenti vähendatakse kuni süsteemis ilmneb temperatuurikõikumine.
- 2) Seejärel K_P väärtust suurendatakse kuni võngete amplituud on minimaalne. Võnkeperiood T mõõdetakse.
- 3) PID juhtimiseks rakendatavad konstandid määratakse järgnevalt: $K_P = K_{P \text{ hetkväärtus}} \cdot 1,7$; $K_I = 1,2/T$; $K_D = 0,075/T$. Töös kasutati väärtusi $K_P = 32$; $K_I = 1$; $K_D = 0,23$.

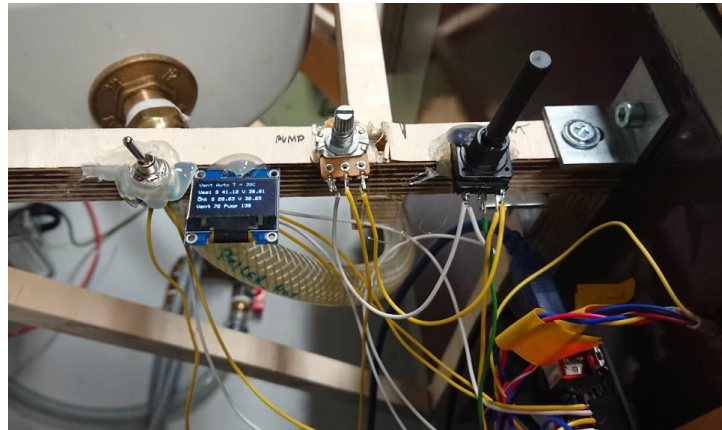
4.6 Väline jahutusplakk ja selle edasiarendus

Eemaldamaks mõõteseadmest soojusenergiat, sh kalibreerimisploki ja Peltieri elementide poolt toodetud soojusenergiat, on süsteemis kasutusel vesijahutus. Süsteemi jahutusvee temperatuuri juhtimiseks, sh jahutamiseks ning selle ühtlase temperatuuri hoidmiseks kasutatakse süsteemis välist jahutusplakki (Sele 4.8). Tegu on MsC *cum laude* Heigo Mäemuru 2018. aasta kevadsemestril valminud magistritöö [6] edasiarendusega.



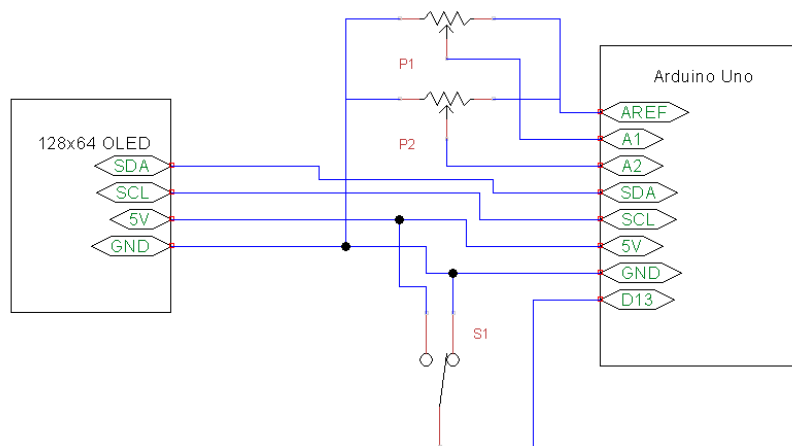
Sele 4.8 Väline jahutusplakk

Jahutusplokk oli eelnevalt juhtav läbi personaalarvuti. Jahutusplokkile lisati selle töö käigus täiendav kasutajaliides (Sele 4.9) ning selle jaoks kirjutati mõõteseadme vajadustega sobiv juhtimisprogramm (Sele 4.11), mis kasutab jahutusvõimsuse juhtimiseks ja jahutusvee püsitemperatuuri hoidmiseks PID algoritmi. Programm (Lisa 2) põhineb Arduino vabavaralistel teekidel.



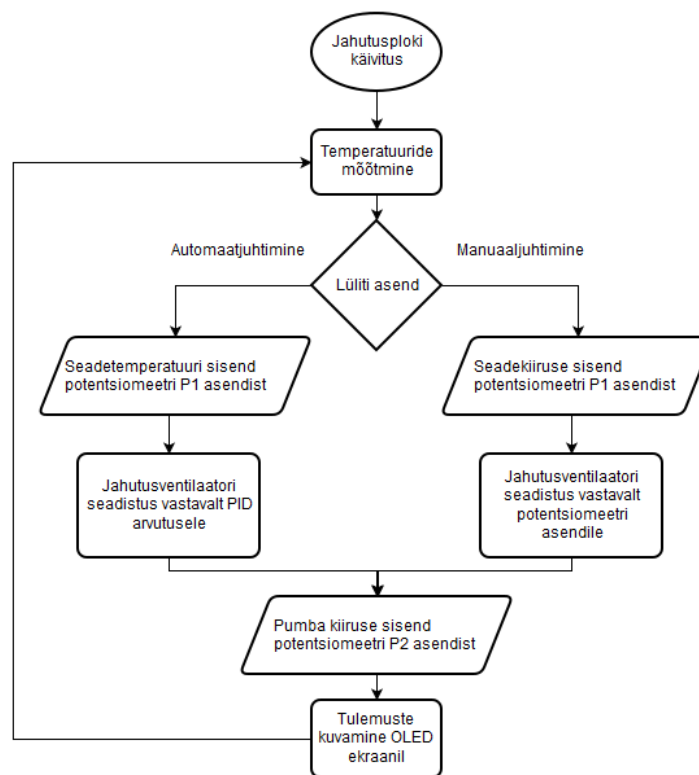
Sele 4.9 Jahutusploki kasutajaliides

Kasutajaliides (Sele 4.10) koosneb lülitist, I2C siini kaudu ühendatud OLED ekraanimoodulist ja kahest potentsiomeetrist.



Sele 4.10 Kasutajaliidese elektriline skeem

- Lülitist S1 on võimalik jahutusplokki lülitada automaatse, PID juhtimisega, režiimi ning käsitsijuhtimise vahel.
- Ekraanil on kuvatud süsteemi põhilised tööparameetrid:
 - Seadeväärtus (kas püsitemperatuur, või käsitsi seatud jahutusventilaatorite kiirus);
 - Siseneva ning väljuva vee ja õhu temperatuurid
 - Ventilaatori kiirusparameeter (0 ... 100%)
 - Pumba kiirusparameeter (0...100%).
- Potentsiomeetrite abil on võimalik reguleerida
 - Ventilaatori kiirust
 - Pumba kiirust
 - Jahutusvee seadetemperatuuri.



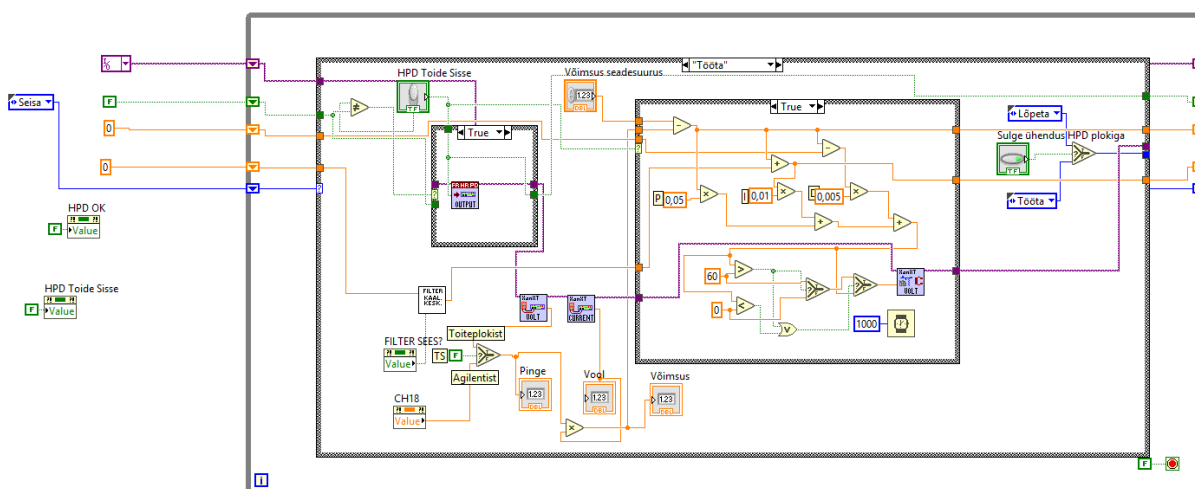
Sele 4.11 Jahutusploki programmi voodiagramm

5. MÕÕTESÜSTEEMI KASUTAJALIIDES

Kuna kõik süsteemi juures kasutatud ning automaatreguleerimist ja –jälgimist vajavad seadmed omasid tootjapoolset tuge ühildumiseks LabView andmehõive-programmeerimiskeskonnaga, osutus just see programmeerimiskeskond valituks seadme kasutajaliidese realiseerimiseks. Kasutajaliides koosneb kahest LabView alamprogrammist APTP.vi (*Andmed-Pumbad-TermoPaarid*) ja TC4820 Rev1.vi, mille omavaheline suhtlus on võimaldatud läbi LabView globaalse muutuja struktuuri kasutuse.

5.1 APTP.vi

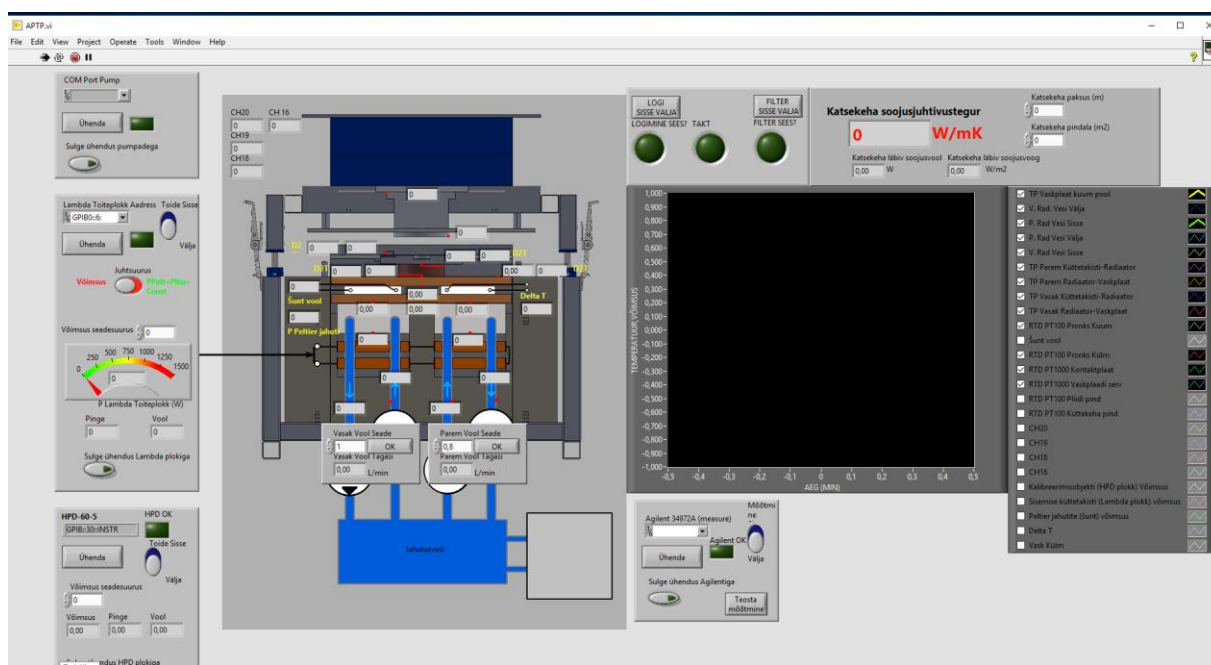
APTP.vi on käesoleva magistritöö raames loodud LabView programm, mis töötab süsteemi peamise kasutajaliideseana. See võimaldab juhtida süsteemi komponentide tööd ja teostada mõõtetulemuste kogumist ja salvestamist. Programm kasutab LabView olekumasina struktuuri[19]. Iga kasutajaliidese poolt juhitud seadme eest on vastutav eraldiseisev olekumasin (Sele 5.1).



Sele 5.1 Xantrex HPD toiteallikat haldava olekumasina üks olekutest LabView koodina

Kasutajaliidese graafiline paneel (Sele 5.2) annab kasutajale ülevaade süsteemi temperatuuridest, toiteplokkide ning pumbamooduli tööst. Kasutaja saab selle kaudu seadistada ning juhtida mõõtesüsteemi erinevaid komponente. Lisaks on reaajas näha paljud arvutuslikud suurused nagu näiteks temperatuuridiferentsiaal mõõtesillas. Andmed on esitatud graafiliselt temperatuuride

hetkeväärtusena ning ka ajalise graafikuna. Andmete üleviimine Exceli keskkonda on võimalik LabView sisseehitatud funktsioonide abil (Paremklõps graafikul > Export).

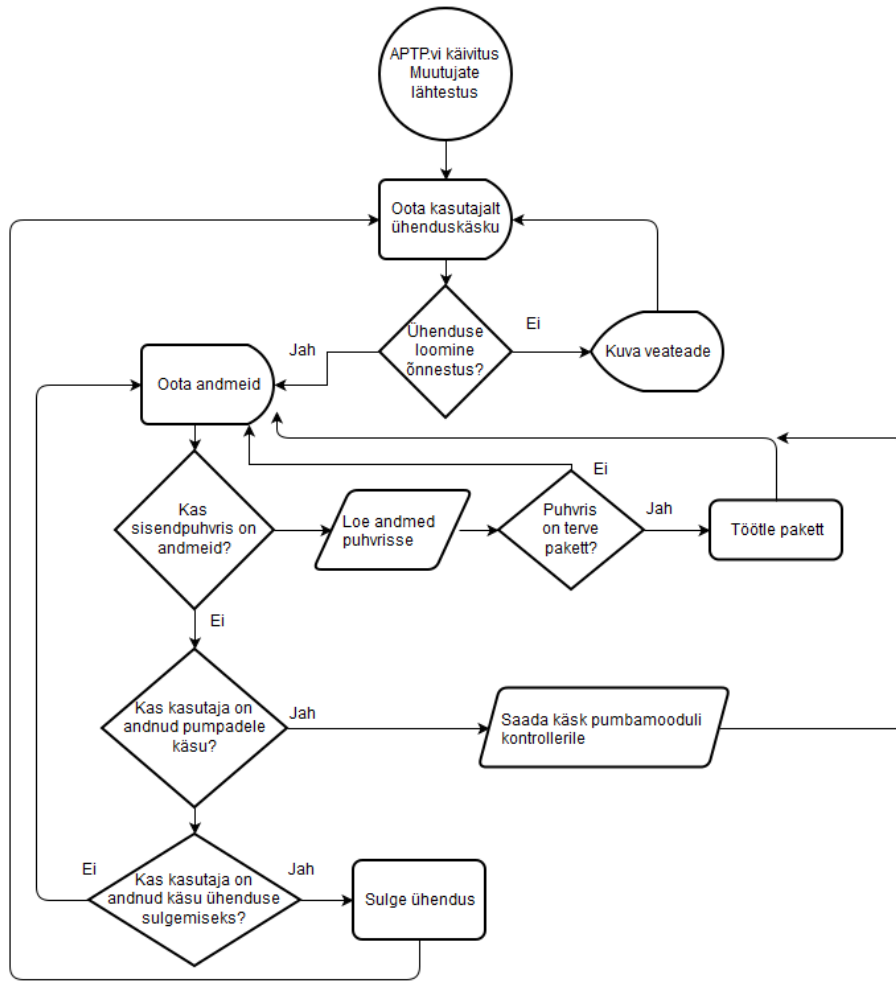


Sele 5.2 APTP.vi kasutajaliides

Kuna LabView graafiline kood on oma olemuselt suureformaadiline ja tekstidokumendis halvasti esitatav, on käesoleva töö kirjalikus osas ära toodud vaid programmi olekumasinate voodiagrammid. LabView programmifailid on saadaval töö digitaalse koopiaga kaasas olevates materjalides.

5.1.1 Pumpade juhtimise olekumasin

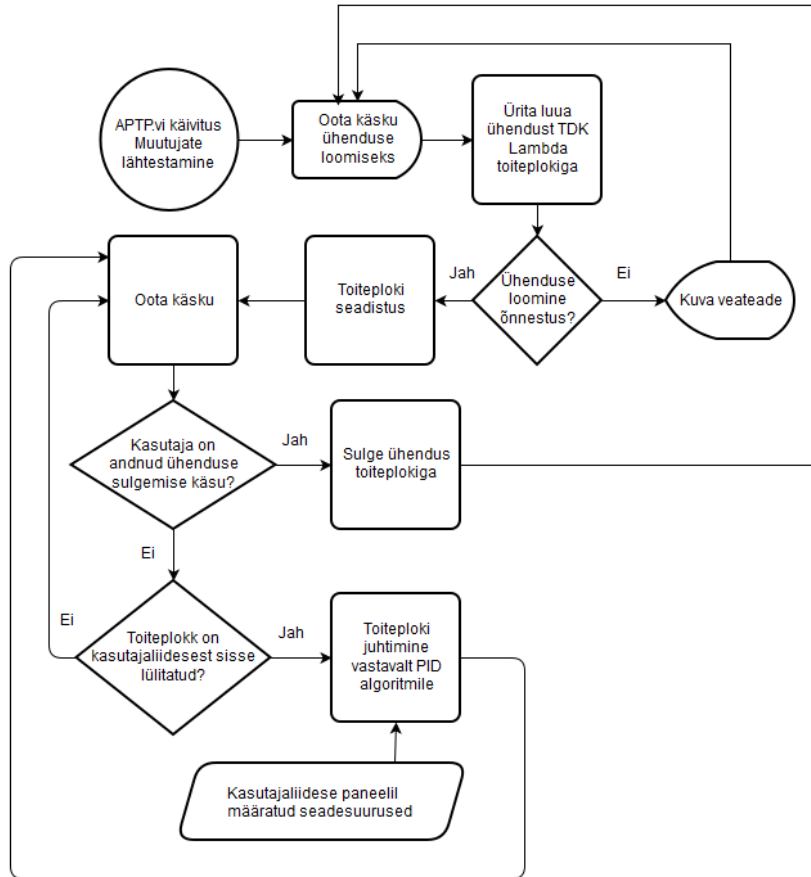
See olekumasin võimaldab saada tagasisidet mõõteseadme jahutusmooduli pumpade kontrollierilt. Olekumasin loeb sisse jahutusmooduli poolt üle USB virtuaalse jadapordi saadetud pumpade hetkekiiruse tagasiside, kuvab need kasutajaliidese esipaneelil ning edastab kasutaja määratud seadesuurused kontrollierile. Andmeside on teostatud NI VISA teegi abil (LabView instrumentid VISA Open, VISA Read ja VISA Write). Olekumasina tööd kirjeldab Sele 5.3.



Sele 5.3 Pumpasid juhtiva olekumasina voodiagramm

5.1.2 Toiteallikas TDK Lambda GEN-100-15 juhtimise olekumasin

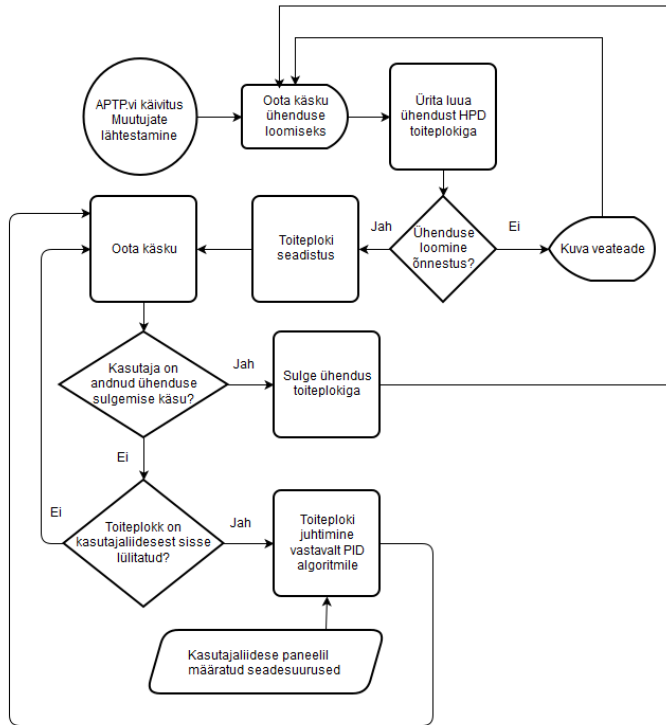
Olekumasina ülesandeks on GEN-100-15 toiteploki andmeside hoidmine ning selle juhtimine konstantsel võimsusel või $P_{lisa} + P_{pelt} = Konst.$ režiimis. Olekumasina teostuseks on kasutatud tootjapoolseid LabView draivereid. Olekumasina tööd kirjeldab Sele 5.4.



Sele 5.4 Lambda toiteallikat juhtiva olekumasina voodiagramm

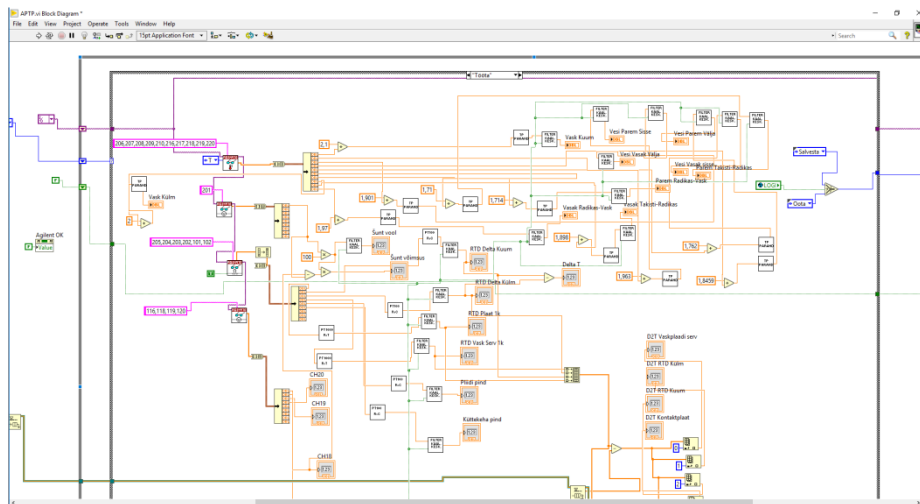
5.1.3 Xantrex HPD toiteallikat juhtiv olekumasin

Xantrex HPD toiteallikat juhtiv olekumasin võimaldab juhtimist püsiva väljundvõimsuse hoidmise režiimis. Kasutatud on tootjapoolseid LabView draivereid. Tööpõhimõttelt sarnaneb see suures osas Lambda TDK toiteallikat juhtiva olekumasinaga (nt. kasutab selle olekumasin sama Enum Type Def olekuid mahutavat muutujat). Olekumasina tööd kirjeldab Sele 5.5.



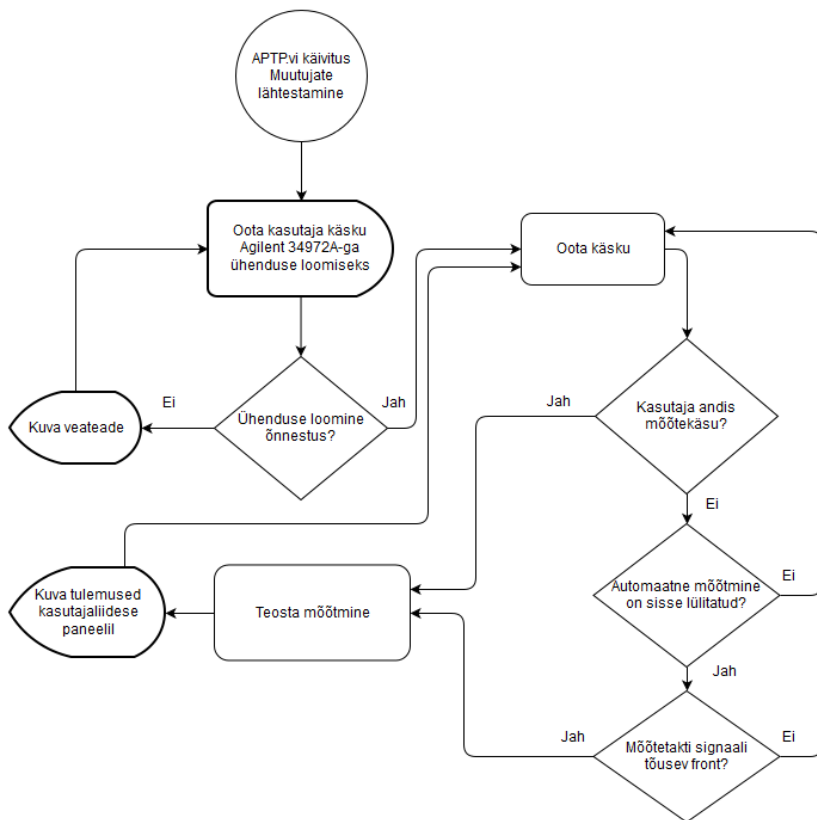
Sele 5.5 HPD toiteallika voodiagramm

5.1.4 Agilent 34972A andmekogumist haldav olekumasin



Sele 5.6 Agilent olekumasina mõõteolek

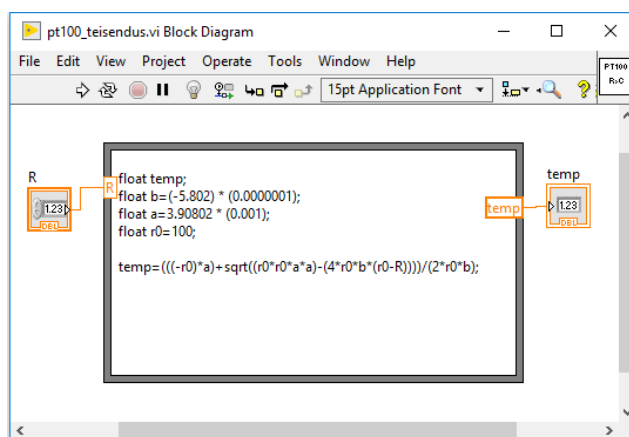
Andmekogumise olekumasin juhib Agilent 34972A logerit mõõteseadme temperatuuride jt. parameetrite mõõtmisel. Olekumasin kuvab kasutajaliidese mõõteseadet kujutaval graafilisel paneelil temperatuuride hetkeväärtused nende reaalsele asukohtale vastavates punktides ning salvestab andmed ajagraafikule, kui logimine (Sele 5.6) on kasutajaliidese sisse lülitatud. Andmete kogumistsükli juhib kas TC-48-20.vi töötsükkel või kasutaja manuaalne käsk üksiku mõõtmise teostamiseks. Olekumasina tööd kirjeldab Sele 5.7.



Sele 5.7 Agilent olekumasina voodiagramm

Agilent 34972A LabView draiverid ei paku otsest funktsiooni 4 juhtmega PT100 või PT1000 temperatuuri mõõtmiseks. Küll aga on saadaval funktsioon takistuse mõõtmiseks 4 juhtme režiimis (4-wire RTD). Soojusvoo mõõteseadme PT100 ja PT1000 andurite mõõtmiseks kasutab töös koostatud LabView programm 4-wire RTD funktsiooni, mille väärtus teisendatakse vastavalt anduritootja

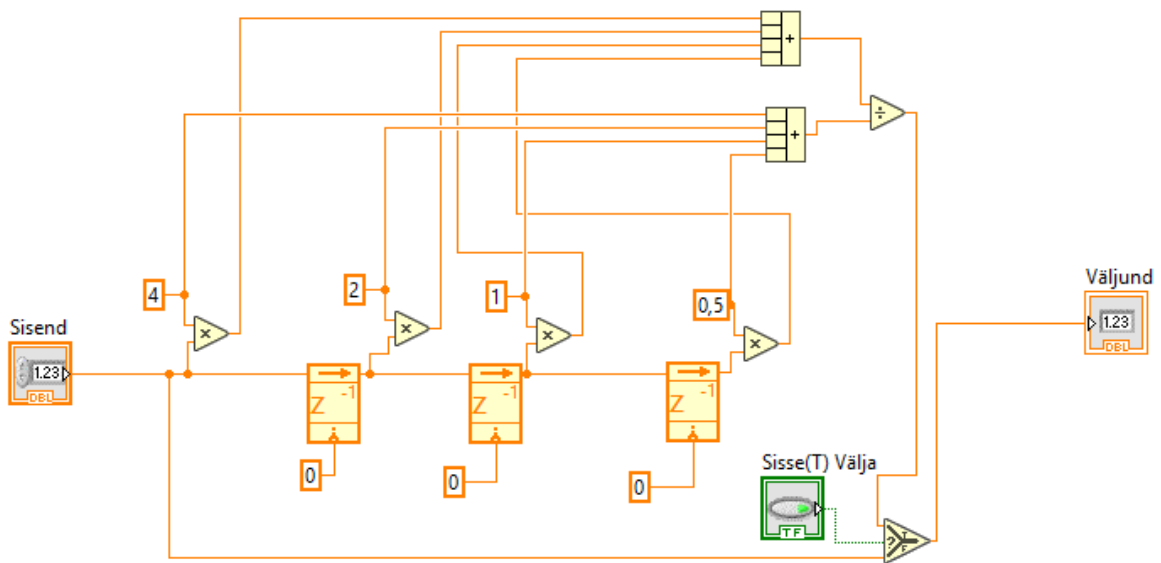
andmelehel toodud konstantide abiga. Teisenduse viivad läbi kaks eraldiseivat .vi plokki - pt100_teisendus.vi (Sele 5.8) ja pt1000_teisendus.vi.



Sele 5.8 Takistuse teisendus temperatuuriks LabView keskkonnas

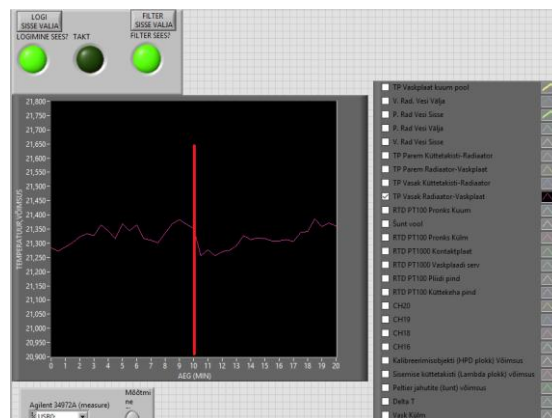
5.1.5 Mõra filtreerimine

Süsteemi temperatuuriandurite juhtmed on võrdlemisi pikad. Lisaks paiknevad nende läheduses mitmed impulsslaiusmodulatsiooni rakendavad jõuelektroonika komponendid. Seetõttu tuleb Agilent 34972A poolt kogutud andmetes arvestada häiringute võimalikke mõjusid, mis võivad raskendada süsteemi termilise stabiilsuspunkti määramist. Häiringute mõju vähendamiseks on APTP kasutajaliidesest võimalik sisse lülitada kaalutud keskmisel põhinev (Sele 5.9) sisendsignaali filtreerimine.



Sele 5.9 Kaalitud keskmisel põhineva filtri LabView skeem

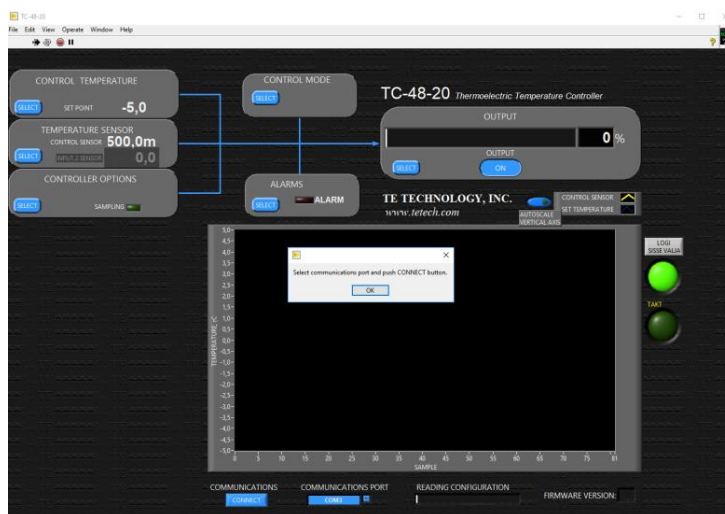
Filtri töö katsetamiseks teostati süsteemiga 20 mõõtmist ilma filtrita ning 20 mõõtmist filtriga. Filtri sisse lülitamisel suurenes andmesisendi tunnusjoone stabiilsus mõnevõrra (Sele 5.10).



Sele 5.10 Filtreerimine. Filtri sisse lülitamise moment on graafikul tähistatud punase joonega.

5.2 TC4820 Rev1.vi

TC4820 Rev1.vi (Sele 5.11) on Peltieri kontrolleri tootja poolt pakutava avatud lähtekoodiga tarkvara muudetud versioon, millele on lisatud täiendavad andmetöötlusfunktsioonid nagu logimise sisse-välja lülitamine ning ühilduvus süsteemi kasutajaliidesega läbi globaalse muutuja.



Sele 5.11 TC4820 Rev1.vi

Kasutajapaneelist on võimalik lülitada TC-48-20 Peltier jahuti kontrolleri väljundeid, määrata seadetemperatuur, näha temperatuuri tagasiside graafikut, seada jahutuse PID juhtimise konstantide väärtuseid.

6. SÜSTEEMI KATSETAMINE

Süsteemi ehitusele järgnes selle katsetamine. See koosnes järgmistest etappidest:

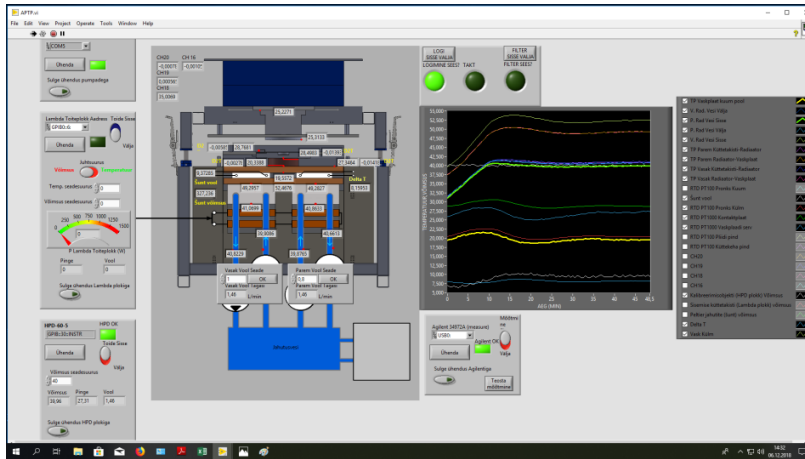
- 1) Süsteemi tööpunktide määramine erinevatel sisendvõimsustel ja jahutusvee temperatuuridel
- 2) Saadud andmete põhjal süsteemi töökarakteristikut kirjeldava funktsiooni arvutamine
- 3) Katsetulemuste paikapidavuse hindamine mõõtes süsteemiga teadaoleva soojusjuhtivusteguriga objekti

6.1 Süsteemi karakteristikute määramine

Süsteemi tööpunktide määramiseks viidi läbi katsed (Sele 6.1). Katseprotsess kulges järgnevalt:

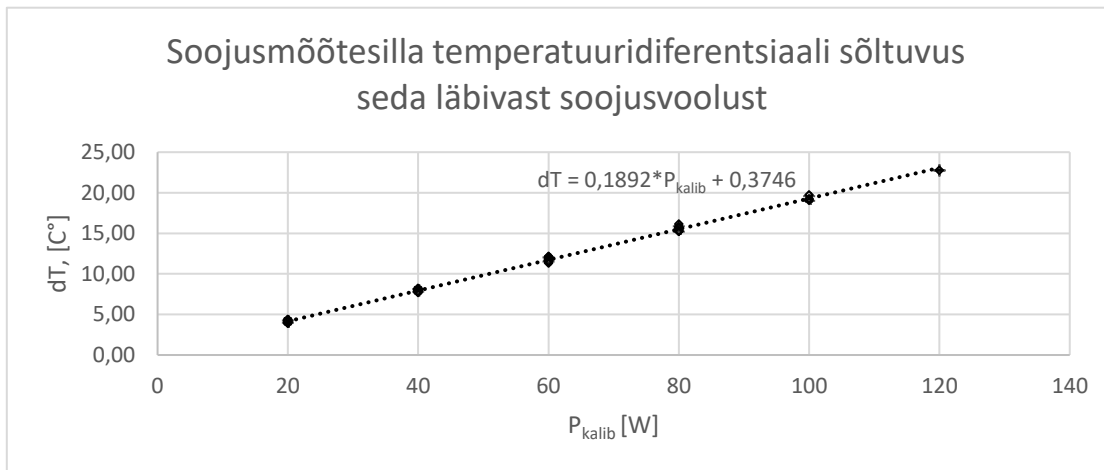
- 1) Kalibreerimisplakk seadistati nõutavale võimsusele.
- 2) LabView kasutajaliideses TC 48-20.vi seati paika mõõtesilla kuuma poole temperatuuri seadeväärtus, vahemikus 30 kuni 60 kraadi.
- 3) Jahutusplokist määrati jahutusvee temperatuur. Vajadusel kasutati süsteemiga ühendatud boilerit vee temperatuuri hoida aitava lisavõimsusena.
- 4) Oodati (tüüpiliselt 1 tund) kuni temperatuurid silla osades enam ei muutunud üle 0,05 kraadi minuti jooksul, ehk süsteem oli saavutanud termilise stabiilsuse.
- 5) Saadud tulemused kanti Exceli tabelisse

Tööpunktide määramisel tekitas mõningaid probleeme laboriruum, mille sisetemperatuur tõusis jahutusplokist eralduva soojuse tõttu üle 30 C°. Seetõttu ei olnud võimalik teostada katseid jahutusvee madalatel temperatuuridel. Katsetulemused on toodud Lisas 6.



Sele 6.1 Näide katsesüklist

Tulemusi kirjeldab Sele 6.2. Tulemustest järeldub, et mõõtesilla temperatuuridiferentsiaal dT ja seda läbiv soojusvool Q' ehk kalibreerimisploki väljundvõimsus P_{kalib} on omavahel lineaarses sõltuvuses. Tulemustelt on näha dT ja P_{kalib} lineaarse seose stabiilsus üle erinevate jahutusvee temperatuuride T_{vesi} ning kontaktplaadi temperatuuride $T_{kontakt}$.



Sele 6.2 Temperatuuridiferentsiaali sõltuvus soojusvoolust

Lineaarse seose leidmiseks on kasutatud vähemruutude meetodit, mille korral avaldub otsitav ülekandefunktsioon kujul

(6.1)

$$y_i = ax_i + \beta$$

milles

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

ning

$$b = \bar{y} - a \cdot \bar{x}$$

P_{kalib} ja dT omavahelist seost kirjeldav lineaarvõrrand (valem (6.2)) arvutati välja vähimruutude meetodil katsepunktide lähendamisega (valem (6.2))

(6.2)

$$dT = 0,1892 * P_{kalib} + 0,3746$$

Leitud lineaarvõrrandi ja katsepunktide vahelise kõrvalekalde ekstreemväärtusi kirjeldab Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Ekstreemumid

P_{kalib} [W]	ΔdT Min [C°]	ΔdT Max [C°]
20	-0,24	0,23
40	-0,24	0,27
60	-0,41	0,4
80	-0,32	0,59
100	-0,29	0,37
120	-0,38	-

6.2 Süsteemi abil soojusjuhtivusteguri määramine

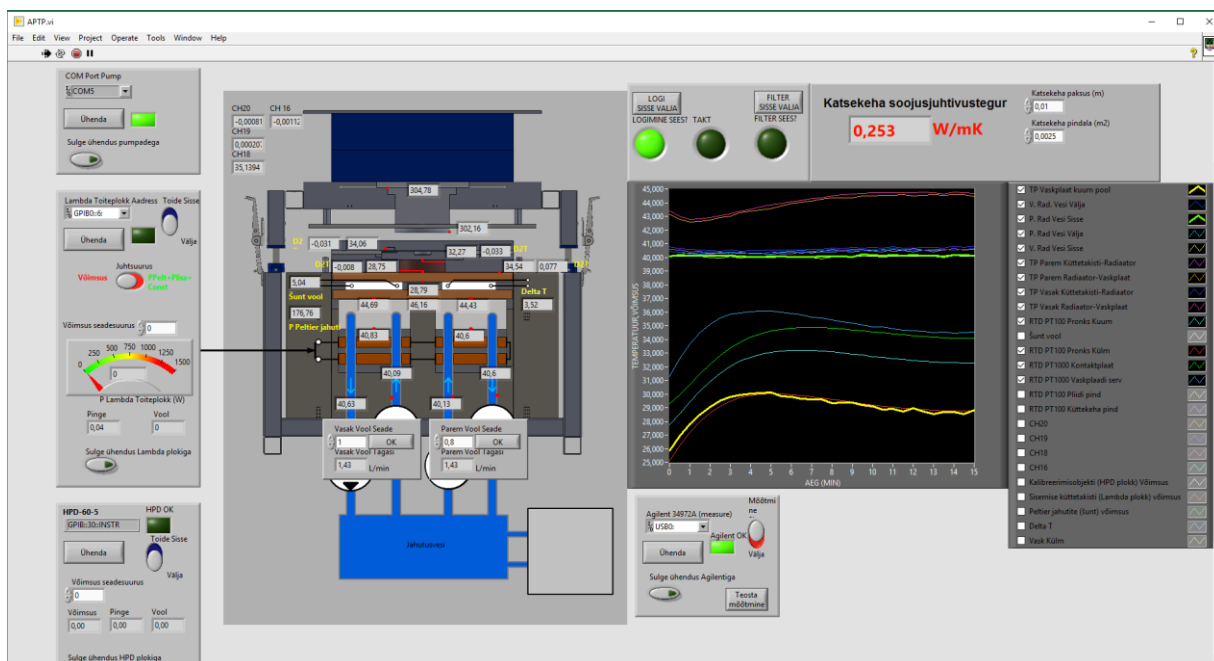
Soojusvoolu süsteemi peamine eesmärk oli soojusjuhtivusteguri määramine TEG moodulite jaoks. Peale soojussilla mõõtefunktsiooni kindlaks tegemist oli võimalik edasi liikuda soojusjuhtivusteguri

määramisele. Selleks oli vajalik rakendada ka kuuma poole soojusallikat, ning rakendada põhimõtteliselt kõiki soojusmõõtesüsteemi komponente.

Mõõteprotsess viidi läbi, kasutades PTFE-materjalist risttahukakujulist katsekeha, mille mõõtmed, 50 x 50 x 10 mm, sarnanevad lõppobjektile (TEG moodul). Soojusjuhtivusteguri määramiseks selles rakenduses oli vaja mõõta katsekeha läbiva soojusvoolu väärtus, kasutajaliidesesse on lisatud ka katsekeha mõõtmete sisestamise võimalus. Soojusjuhtivus leiti vastavalt valemile (6.3).

(6.3)

$$\lambda = \frac{Q'_{sild} \cdot L_{keha}}{A_{keha}}$$

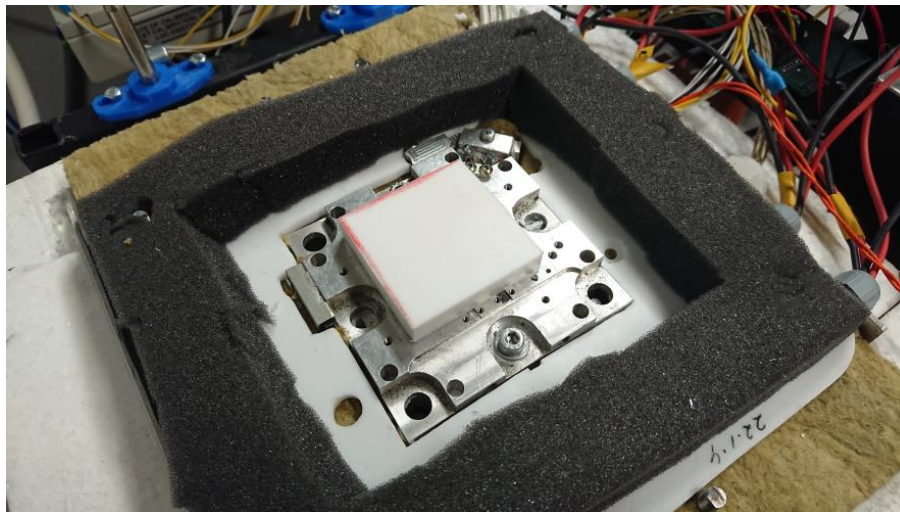


Sele 6.3 PTFE katsekeha soojusjuhtivusteguri mõõtmine

LabView kasutajaliides kuvab reaalaajas mõõtetulemustest ning süsteemi karakteristikust arvutatud katsekeha soojusjuhtivusteguri väärtuse APTP.vi esipaneelil (Sele 6.3). Kirjandusallikate [26] põhjal on PTFE soojusjuhtivustegur $\lambda_{PTFE} = 0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, mis seati mõõtmistel võrdlusväärtuseks ja esialgne süsteemi funktsioneerimise tõestusväärtuseks. See tähendab, et antud süsteemis leitud reaalse

katsekeha (Sele 6.4) λ_{PTFE} väärtuse lähedus kirjandusallikates toodud suurusele kinnitaks süsteemi töö korrektsust.

Kuna katsekeha eeldatav soojusjuhtivustegur on suhteliselt väike, siis märkimisväärse soojusvoolu tagamiseks läbi katsekeha tuleks rakendada võimalikult kõrget temperatuurivahet sooja ja külma poole vahel. Selleks seati küttekeha temperatuuri väärtuseks 300 °C. See on ka eeldatavalt TEGide maksimaalne töötemperatuur.



Sele 6.4 PTFE katsekeha mõõteseadme kontaktplaadil

Katsed viidi läbi 9 katsepunktis erinevatel jahutusvee ning kontaktplaadi temperatuuridel. Iga katse koosnes kolmest korduskatsesest. Katseprotsessi kujutab Sele 6.3.

Kokku viidi läbi kolm hüpoteesi kontrolli, millega uuriti mõõtmise aluseks võetud karakteristikute täpsust. Katsetati järgmisi karakteristikuid: lineaarfunktsioon, parandatud lineaarfunktsioon ja polünoom. Tulemuste põhjal valiti sobivaim karakteristik mõõtmiste teostamiseks.

6.2.1 Lineaarkarakteristik

Esimeses katseseerias teostati mõõtmised, püstitades esialgse hüpoteesi, et süsteemi arvutuskarakteristik on lineaarse seosega, sarnaselt dT ja P_{kalib} vahel (6.4). Katsetulemused on toodud

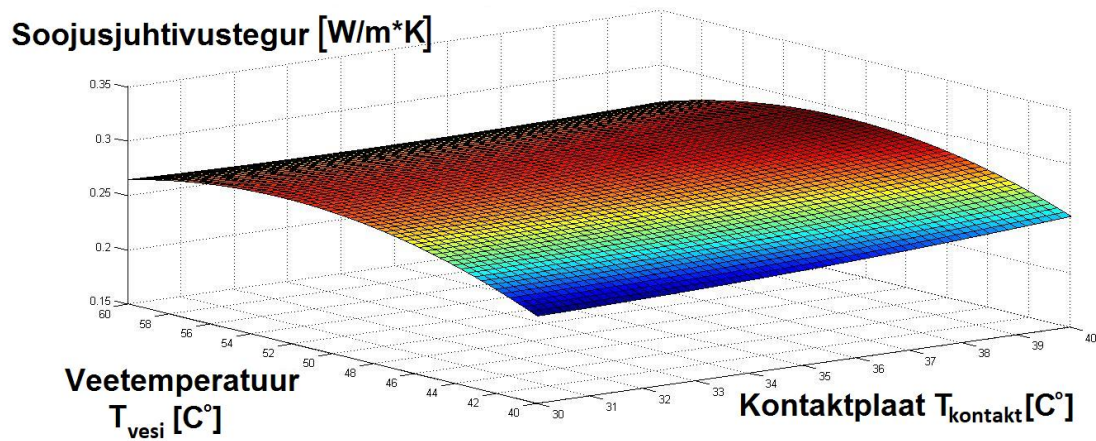
tabelis (vt Tabel 6.2), kus $\lambda_{kx,i}$ tähistab katsepunkti kx korduskatse i tulemust, λ_{kesk} on leitud katsete keskmine soojusjuhtivustegur. Tulemused on kujutatud graafiliselt vt Sele 6.5.

(6.4)

$$P_{kalib} = 5,2854 * dT - 1,9799$$

Tabel 6.2 Katsetulemused, lähtudes lineaarse seosega süsteemi karakteristikust.

$T_{kontakt} [C^{\circ}]$	$T_{vesi} [C^{\circ}]$	$\lambda 1$ [W/m·K]	$\lambda 2$ [W/m·K]	$\lambda 3$ [W/m·K]	λ keskmine [W/m·K]
30	40	0,229	0,235	0,232	0,232
30	50	0,279	0,279	0,281	0,280
30	60	0,262	0,264	0,259	0,262
35	40	0,234	0,235	0,232	0,234
35	50	0,284	0,281	0,279	0,281
35	60	0,267	0,265	0,262	0,265
40	40	0,252	0,256	0,252	0,253
40	50	0,289	0,292	0,296	0,292
40	60	0,261	0,265	0,264	0,263



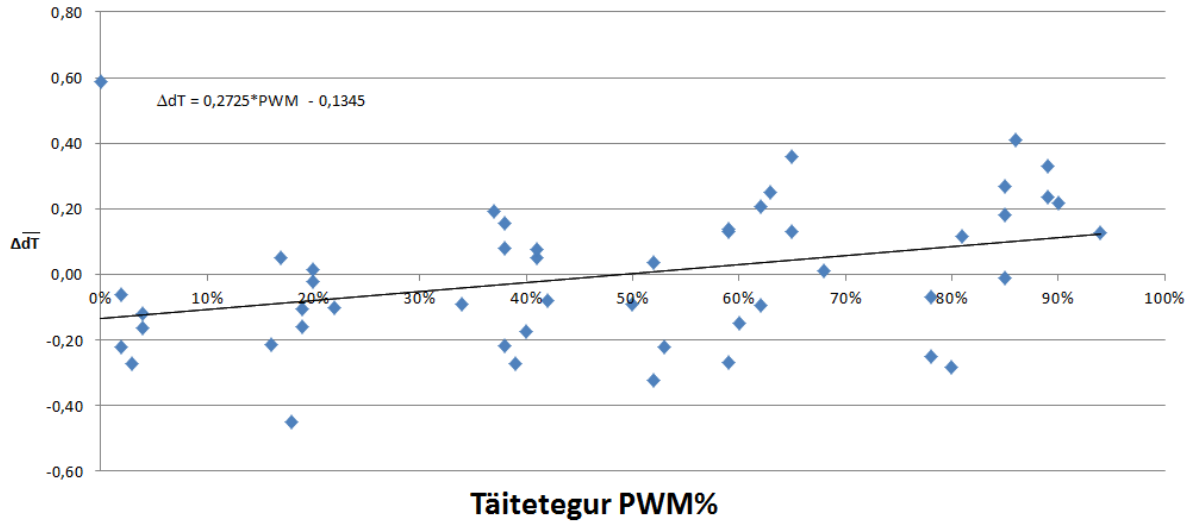
Sele 6.5 Lineaarkarakteristiku katseseeria tulemused

Katsetulemuste standardhälve $\sigma = 0,020$ ning suurim absoluutne mõõteviga λ_{PTFE} teoreetilise väärtuse suhtes 17%. Ühest küljest tähistavad tulemuste tabelis esitatud suurused süsteemi töö korrektsust, kuna leitud soojusjuhtivustegur vastab suhteliselt hästi kirjandusallikates toodule ($\lambda_{PTFE} = 0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ [26]). Teisalt muudeti süsteemis külma poole kontaktpinna temperatuuri T_{kontakt} ainult $10 \text{ }^\circ\text{C}$ võrra, mis tähendab soojusvoolu dikteeriva temperatuurierinevuse $T_{\text{kuum}} - T_{\text{kontakt}}$ varieerimist tasemelt $270 \text{ }^\circ\text{C}$ tasemele $260 \text{ }^\circ\text{C}$. Ideaaljuhul ei peaks selline tööolukorra muutus tooma kaasa soojusjuhtivusteguri väärtuse muutust. Tabelis (vt Tabel 6.2) aga on märgata tuntavat parameetri muutust, seda keskväertuste tasemel vahemikus $0,234$ kuni $0,292$ (ligi 25%).

6.2.2 Parandiga lineaarkarakteristik

Lineaarkarakteristiku katsetulemustest järeldus selle ebatäpsus soojusjuhtivusteguri määramisel. Lineaarkarakteristikule parandi leidmiseks otsustati esiteks uurida, milliste mõõteseadme tööparameetrite (nt. veetemperatuur) ning mõõtesilla temperatuuridiferentsiaali väärtuste vahel on märgatav korrelatsioon. Korrelatsiooni uuriti olukorras, kus ülejäänud tööparameetrid peale uuritava olid konstantsed.

Selgus, et korrelatsiooni omavaks muutujaks on Peltier kontrolleri impulsslaiusmodulatsiooni töötsükli täitetegurit väljendav muutuja *PWM*, mille korrelatsioonitegur temperatuuridiferentsiaali väärtuse erinevusega keskmisest oli kogu tulemuste ulatuses $0,35$ ning P_{kalib} väärtusi eraldi vaadates pöördvõrdeline P_{kalib} väärtuse kasvuga, omades suurimat väärtust $\sigma = 0,84$ kui $P_{\text{kalib}} = 20 \text{ W}$.



Sele 6.6 Parandi määramine täiteteguri suhtes

Parandi funktsiooni leidmiseks teostati funktsiooni $\Delta \overline{dT} = f(PWM)$ punktide lineaarne regressioon (Sele 6.6) ning saadi valem (6.5)

(6.5)

$$\Delta \overline{dT} = 0,2725 * PWM - 0,1345$$

Mille ühendamisel eelnevalt leitud lineaarkarakteristikuga saadi uus parandiga karakteristik

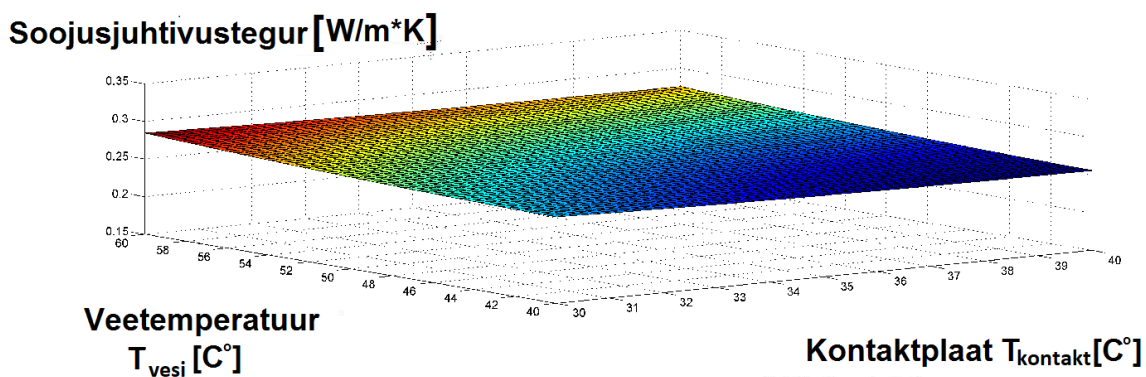
(6.6)

$$P_{kalib} = 5,2854 * (dT + 0,2725 * PWM - 0,1345) - 1,9799$$

Saadud karakteristikuga teostati katsed, mille tulemused on toodud Tabel 6.3 ja graafiliselt esitatud Sele 6.7.

Tabel 6.3 Parandiga lineaarkarakteristiku katsed

$T_{\text{kontakt}} [C^{\circ}]$	$T_{\text{vesi}} [C^{\circ}]$	$\lambda 1$ [W/m·K]	$\lambda 2$ [W/m·K]	$\lambda 3$ [W/m·K]	λ_{kesk} [W/m·K]
30	40	0,264	0,259	0,262	0,262
30	50	0,27	0,272	0,276	0,273
30	60	0,285	0,284	0,286	0,285
35	40	0,253	0,261	0,258	0,257
35	50	0,272	0,274	0,273	0,273
35	60	0,268	0,27	0,271	0,270
40	40	0,259	0,262	0,255	0,259
40	50	0,255	0,253	0,251	0,253
40	60	0,279	0,285	0,281	0,282



Sele 6.7 Parandiga lineaarkarakteristiku katse

Katsetulemuste standardhälve $\sigma = 0,011$, mis iseloomustab olulist hajuvuse vähenemist (eelnevalt $\sigma = 0,020$).

6.2.3 Polünoomkarakteristik

Katsetulemuste põhjal süsteemi polünoom karakteristiku arvutamiseks kasutati tarkvara MatLab ja selle teeki Polyfitntools [20]. Polünoom (6.7) on funktsioon parameetrist P_{kalib} , mis on kalibreerimiskeha küttevõimsus ehk mõõtesilda läbiva soojusvoolu suurus. Muutujateks on mõõtesilla

temperatuuridifferentsiaal dT , jahutusvee temperatuur T_{vesi} ja Peltier kontrolleri impulslaiusmodulatsiooni täitetegur % PWM , mis valiti eelnevalt tuvastatud korrelatsiooni tõttu.

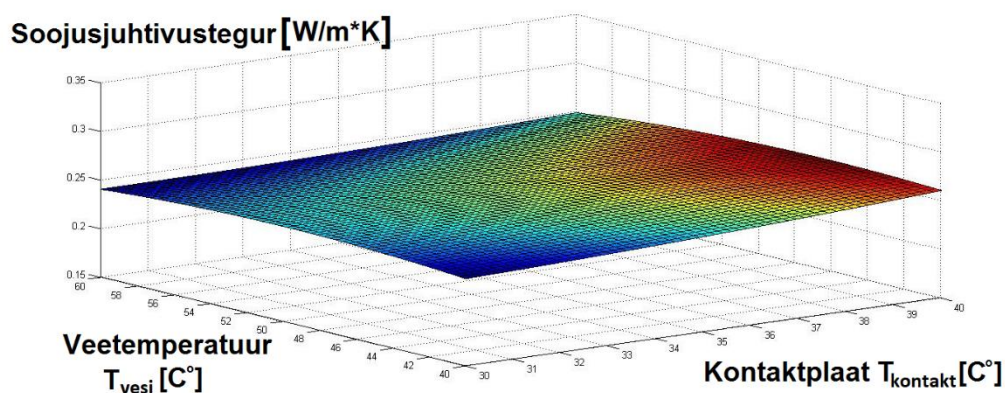
(6.7)

$$P_{kalib} = f(dT, PWM, T_{vesi})$$

Leitud polünoom on toodud Lisas 8. Teggu on neljandat järku polünoomiga. Katsetulemused on toodud Tabel 6.4 ning neid kirjeldab graafiliselt Sele 6.8.

Tabel 6.4 Katsekeha mõõtmised lähtudes polünoom karakteristikust

$T_{kontakt} [C^{\circ}]$	$T_{vesi} [C^{\circ}]$	$\lambda 1$ [W/m·K]	$\lambda 2$ [W/m·K]	$\lambda 3$ [W/m·K]	λ_{kesk} [W/m·K]
30	40	0,241	0,236	0,238	0,238
30	50	0,247	0,246	0,244	0,246
30	60	0,245	0,241	0,243	0,243
35	40	0,252	0,255	0,256	0,254
35	50	0,249	0,252	0,247	0,249
35	60	0,241	0,238	0,239	0,239
40	40	0,255	0,257	0,254	0,255
40	50	0,269	0,265	0,267	0,267
40	60	0,249	0,252	0,244	0,248



Sele 6.8 Polünoomkarakteristiku katse

Katsetulemuste standardhälve on $\sigma=0,009$ ning keskmine soojusjuhtivustegur $\lambda_{\text{kesk}} = 0,249 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Siin on tulemuste hajuvus veelgi väiksem kui eelnevalt.

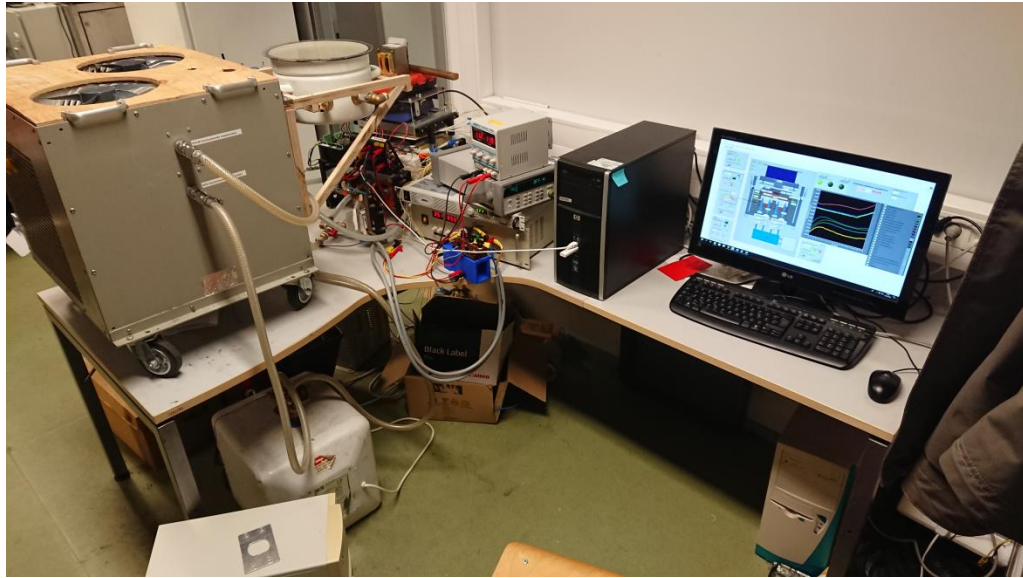
6.3 Süsteemi täpsuse hinnang, lõplikud järeldused

Kuna katseobjektina kasutatud PTFE tüki tegelik soojusjuhtivustegur ei olnud täpselt teada, osutus süsteemi karakteristik valikul tähtsaimaks näitajaks mõõtetulemuste hajuvus ehk väike standardhälve. Katsete tulemusena osutus süsteemi mõõteprotsessi aluseks oleva karakteristikuna valituks polünoomkarakteristik, kuna see omas madalaimat mõõtetulemuste standardhälvet (märkimist väärib, et see nõuab palju suuremat arvutusvõimsust, kui leitud parandiga lineaarkarakteristik). Süsteemi hinnanguline mõõteviga avaldub katsetulemuste põhjal järgmiselt:

$$Viga\% = \frac{\sigma_{\text{Polünoom}}}{\lambda_{\text{PTFE}}} = \frac{0,009 * 100}{0,25} = \sim 4\%$$

Kuigi mõõteriistade mõõteviga mõjutas tulemusi ka mõõtesilla kalibreerimisel, siis antud töö lõpuks leitud polünoomi hajuvus nendest vigadest põhjustatud ebatäpsusest siiski u. 4 korda suurem. Kuna mõõteehniliselt loetakse määravaks erinevaid veaallikaid, mis on suurimast kuni 3,3 korda väiksemad, siis käesolevas töös kasutatud mõõteriistade enda mõõtemääramatus osutub väheoluliseks. [27]

Katsetulemustest võib järeldada, et magistritöö eesmärgiks olnud mõõtesüsteemi ehitus õnnestus hästi. Süsteem on võimeline teostama soojustechnilisi mõõtmisi perspektiivse energiatootmissüsteemi uurimustöö rakenduse jaoks piisava täpsusega.



Sele 6.9 Mõõtesüsteem tervikuna töötamas. Toimub PTFE katsekeha soojusjuhtivusteguri määramine.

KOKKUVÕTE

Käesolevas töös projekteeriti ning valmistati termoelektriliste generaatorite parameetrite määramiseks kasutatav temperatuuridiferentsiaali rakendav soojusvoo mõõtmise seade. Töö oli seotud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis arendatava termoelektrilisi elemente kasutava päikesekollektori projektiga.

Käesoleva magistritöö teoreetilises osas käsitleti ehitatud süsteemi toimimise printsiipe ning anti ülevaade süsteemi põhilistest soojusvooludest ning nende seotusest süsteemi osadega. Töö praktilises osas on kirjeldatud mõõteseadme ehitusprotsessi, selle komponentide valikut, tervikliku mõõtesüsteemi kokkupanekut ja süsteemi kasutajaliidese loomist.

Seadme valmimise järel sooritati katsed, et leida süsteemi tööpunktid. Leitud punktide põhjal arvutati erinevatel meetoditel välja süsteemi tööarakteristikud, millest lähtudes viidi läbi järgnevad lõplikud mõõtekatsed, kus valiti neist sobivaim ning anti hinnang süsteemi mõõtetäpsusele. Koostatud süsteem oli hõlpsalt juhitav, eeskätt tänu kasutajaliidesele. Süsteemi katsetused tõestasid süsteemi täpsust ning stabiilsust üle laia temperatuuride vahemiku.

SUMMARY

The subject of this thesis was the design and realization of a thermal flow measurement device based on temperature difference. The work was connected with an ongoing research project in the Tallinn University of Technology Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics. The main subject of the research project is the development a solar power generator utilizing an energy focusing reflector and thermoelectric power generators.

The theoretical part of this work covers the working principles of the system and gives an overview of the primary energy flows within the system and their involvement with the main components. The practical part of the work describes the construction process of the measurement device - the criteria for choosing the components, assembly of the system and creation of the user interface.

Following the completion of the device, system calibration tests were carried out. Based on the collected data, the system characteristic curve was calculated, which was followed by final verification tests. The system created in this thesis work was easily controllable, especially thanks to the user interface. The calibration tests verified system stability and accuracy over a wide range of temperatures.

The objectives assigned at the beginning of the work were met with success and the created measuring device was proven to be functional.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Peltier element [WWW] <https://customthermoelectric.com/12711-9I31-24cw-thermoelectric-peltier-module.html> (26.11.2018)
2. Agilent34972A andmehõivesüsteem [WWW] <https://www.keysight.com/en/pd-1000001313%3Aepsg%3Apro-pn-34970A/data-acquisition-data-logger-switch-unit?cc=EE&lc=eng> (25.11.2018)
3. Lambda toiteallikas [WWW] https://www.us.tdk-lambda.com/hp/product_html/genesys1u.htm (25.11.2018)
4. Xantrex HPD toiteallikas [WWW] <https://www.bellnw.com/manufacture/Ametek/HPD-60-5.htm> (25.11.2018)
5. Mäemuru. H *Vesijahutus- ja küttekontuuri soojuskoormusseadme füüsilise simulaatori kujundamine*: magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn
6. Pump [WWW] https://www.aliexpress.com/store/product/Brand-New-12V-Micro-Pump-with-DC-Plug-Strong-780LPH-4M-Black-230g-Electric-Power-Drop/912512_1739623777.html
7. Veekulumõõtur [WWW] <https://www.aliexpress.com/item/1-30L-min-3Y-Water-Flow-Sensor-Flowmeter-Hall-Flow-Sensor-Water-Control-1-2-2/32866332495.html>
8. LN298N moodul [WWW] <https://www.aliexpress.com/item/Smart-Electronics-L298N-Stepper-DC-Motor-Driver-Shield-Expansion-Development-Board-for-Arduino-DIY-Car-Robot/32704610408.html>(25.11.2018)
9. LN298N driver [PDF] https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf(25.11.2018)
10. LabView draiverid [WWW] http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.model_page?p_model_id=5547(25.11.2018)
11. TDK-Lambda GPIB draiverid [WWW] http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.download_page?p_id_guid=F99373844D1A1050E0340003BA230ECF (25.11.2018)

12. Xantrex HPD draiverid [WWW]
http://sine.ni.com/apps/utf8/niid_web_display.download_page?p_id_guid=E3B19B3E9621659CE034080020E74861 (25.11.2018)
13. MC POWER Toiteallikas [WWW] <https://www.ett-online.de/Energie/Netzgeraete-und-Netzteile/Labornetzgeraet-einstellbar/Netzgeraet-McPower-LBN-1990-19-3-regelbare-Bereiche-0-15V-0-30V-0-60V-900W-max-60A.html> (25.11.2018)
14. Peltier jahuti elemendi andmeleht [PDF]
https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEC_spec_sheets/12711-9P31-24CW_spec_sht.pdf (26.11.2018)
15. IKA RCT Basic pliit [WWW] <https://www.ika.com/en/Products-Lab-Eq/Magnetic-Stirrers-Hot-Plate-Lab-Mixer-Stirrer-Blender-csp-188/RCT-basic-cpdt-3810000/> (26.11.2018)
16. Agilent 34972A manuaal [PDF]
http://www.me.umn.edu/courses/me4331/FILES/AgilentManual_34.pdf(26.11.2018)
17. TEG [WWW] https://customthermoelectric.com/media/wysiwyg/TEG_spec_sheets/1261G-7L31-05CQ_20140513_spec_sht.pdf (26.11.2018)
18. Termoelektriline kontrollor [WWW] <https://totech.com/product/tc-48-20/> (26.11.2018)
19. LabView olekumasin [PDF] http://www.physics.utah.edu/~bergman/3620-6620/supp/LV_Adv_Prog/2049ch03.pdf (26.11.2018)
20. MatLab polyfitn funktsioon [WWW]
<https://se.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34765-polyfitn> (28.11.2018)
21. Termopaariühenduste alused [PDF] <https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN6550.pdf>
(28.11.2018)
22. Ziegler-Nicholsi meetod [PDF] <http://chem.engr.utc.edu/Student-files/x2008-Fa/435-Blue/1942-paper.pdf> (28.11.2018)
23. Ingermann K. *Temperatuuri mõõtmise* Tallinn 2009
24. Ingermann K. *Soojustehnika mõõtevahendid* Tallinn 2015
25. Lauri Kütt, John Millar, Antti Karttunen, Matti Lehtonen, Maarit Karppinen *Thermoelectric applications for energy harvesting in domestic applications and micro-production units. Part I: Thermoelectric concepts, domestic boilers and biomass stoves* [WWW]
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117303593> (20.12.2018)

26. PTFE soojusjuhtivustegur, *Thermal Conductivity of PTFE components* [PDF]
<http://sump4.com/publications/conf015.pdf> (20.12.2018)
27. Vilipuu, M Füüsikaliste suuruste mõõtmine. mõõtmisvead, mõõtehälbed ja mõõtemääramatus füüsika praktikumides [PDF]
https://www.ttu.ee/public/m/Marek_Vilipuu/Fl_doks/FUUSIKALISTE_SUURUSTE_MOOTMINE_MOOTMISVEAD_MOOTEHALBED_J.pdf (02.01.2019)

LISAD

Lisa 1

Veekulumõõturite katsetuste tulemused

Maht=4L	Tüüp:	Turbiin	Vesiratas	
PWM	Aeg(s)	Imp arv	Aeg(s)	Imp arv
100%	37,4	2314	39,5	1713
100%	37,8	2321	39,6	1719
100%	37,1	2294	39,4	1718
96%	37,6	2268	39,9	1711
96%	38,7	2318	40,1	1718
96%	38,1	2291	40,6	1733
92%	41,7	2305	46,3	1714
92%	41,7	2312	46,2	1711
92%	41,5	2313	46,3	1712
88%	42,6	2289	47,3	1730
88%	42,2	2268	46,9	1717
88%	42,8	2298	46,6	1719
84%	42,2	2280	47,1	1755
84%	42,2	2293	47,3	1734
84%	42,7	2320	47,2	1728
80%	42,3	2293	48,4	1739
80%	41,6	2246	48,3	1736
80%	42,5	2282	48,3	1727
76%	44,8	2282	48,2	1729
76%	45	2248	47,9	1706
76%	45	2253	48,4	1725
73%	46,3	2240	50,3	1699
73%	46,6	2277	50,1	1702
73%	46,1	2252	50,2	1699
69%	48,5	2244	52	1718
69%	48	2244	51,5	1730
69%	48	2251	51,4	1725
65%	48,9	2247	53,2	1739
65%	50,3	2221	53,3	1742
65%	49,3	2199	52,3	1748
61%	51,6	2175	55,3	1755
61%	51,8	2202	55,3	1738

61%	51,9	2198	55,5	1742
57%	53	2242	57,9	1730
57%	51,8	2201	57,6	1721
57%	51,7	2208	57,6	1718
53%	54,7	2200	60,9	1728
53%	55,2	2199	60,5	1718
53%	54,6	2173	60,8	1727
49%	57,7	2181	64,6	1716
49%	57,5	2194	65,2	1736
49%	57,2	2170	64,6	1720
45%	61,1	2142	68,4	1719
45%	61,4	2165	68,9	1736
45%	61,6	2178	68,9	1739
41%	63,9	2172	73,8	1742
41%	63,8	2156	73,4	1736
41%	63,9	2165	73,7	1741
37%	68,1	2123	78,8	1731
37%	68	2130	79,7	1747
37%	67,9	2136	77,6	1716
33%	72,8	2105	87,9	1718
33%	72,6	2124	85,3	1721
33%	73,1	2100	85	1714

Lisa 2

Välise jahutusploki programm

```
//LED ekraani seaded

#include "SSD1306Ascii.h"
#include "SSD1306AsciiAvrI2c.h"
#define I2C_ADDRESS 0x3C
#define RST_PIN -1

SSD1306AsciiAvrI2c oled;
#define P 3
#define I 0.9
#define D 0.2

int ventpin = A0; //muutujad
int pumppin = A1;
int seadetemp = 0;
String oledstring = "";

int TEMPC = 0; //Temp suurus
int ventkpin = 10; // Ventilaatori kiirus PIN 10
int pumpkpin = 9; // pumba kiirus PIN 9
int ventKiirus = 100; // ventilaatori kiiruse muutuja
int pumpKiirus = 80; //pumba kiiruse muutuja
int nupp =13; //lüliti pin
int nuppm =0; //lüliti oleku muutuja
float temp1, temp2, temp3, temp4;
int i = 0; // tsükli loendur

#include <OneWire.h> //onewire temperatuuriandurite teegid
#include <DallasTemperature.h>
#define BUS 3 // Arduino väljundviik 3 määramine temperatuuriandurite siiniks
OneWire oneWire(BUS); // temperatuuriandurite lähtestamine
DallasTemperature s1(&oneWire); // Siseneva õhu temp
DallasTemperature s2(&oneWire); // Väljuva vee temp
DallasTemperature s3(&oneWire); // Siseneva vee temp
DallasTemperature s4(&oneWire); // Väljuva õhu temp

float viga=0;
float vigaeelmine=0;
float veaintegraal=0;
float deltaviga=0;
```

```

int juhtsuurus=0;

void setup() {

Serial.begin(9600);

#if RST_PIN >= 0
oled.begin(&Adafruit128x64, I2C_ADDRESS, RST_PIN);
#else // RST_PIN >= 0
oled.begin(&Adafruit128x64, I2C_ADDRESS);
#endif // RST_PIN >= 0

oled.setFont(Adafruit5x7);
oled.set1X();
oled.clear();

s1.begin();
s2.begin();
s3.begin();
s4.begin();

pinMode(ventkpin, OUTPUT);
pinMode(pumpkpin, OUTPUT);
pinMode(nupp, OUTPUT);
}

void loop() {

s1.requestTemperatures();
s2.requestTemperatures();
s3.requestTemperatures();
s4.requestTemperatures();

temp3 = (s1.getTempCByIndex(2)) -0.63; // siseneva õhu temperatuur koos parandiga
temp2 = (s2.getTempCByIndex(1)) + 0.13; // väljuv vesi
temp1 = s3.getTempCByIndex(0); // sisenev vesi
temp4 = s4.getTempCByIndex(3); //väljuv õhk

nuppm= digitalRead(nupp);
ventKiirus = analogRead(ventpin);
pumpKiirus = analogRead(pumppin);
analogWrite(pumpkpin, (pumpKiirus/4)); //pumba kiirus

```



```

if(nuppm == HIGH)
{
  analogWrite(ventkpin, (ventKiirus/4)); //ventilaatori kiiruse juhtväärtuse väljastamine
  oledstring = "Vent Manuaal";
  juhtsuurus=ventKiirus/4;
  veaintegraal=0;
  vigaeelmine=0;
}
else
{
  //PID tsükkel
  TEMPC = (ventKiirus*0.08);
  oledstring = String("Vent Auto T = "+String(TEMPC)+"C");
  viga=-(TEMPC-temp2);
  veaintegraal= veaintegraal + viga;
  deltaviga=viga-vigaeelmine;
  juhtsuurus=P*viga+I*veaintegraal+D*deltaviga + 20; //PID

  if (juhtsuurus>255)
  {
    juhtsuurus = 255;
    veaintegraal = veaintegraal - viga;
  }
  if (juhtsuurus<20)
  {
    juhtsuurus = 0;
    veaintegraal = veaintegraal - viga;
  }
  analogWrite(ventkpin, juhtsuurus);

}
//ekraanile kirjutamine
oled.clear();
oled.println(oledstring);
oled.println();
oledstring =String("Vesi S "+String(temp3)+" V "+String(temp2));
oled.println(oledstring);
oled.println("_");
oledstring =String("Ohk S "+String(temp1)+" V "+String(temp4));
oled.println(oledstring);
oledstring = String("Vent "+String(juhtsuurus)+" Pump "+ String(pumpKiirus/4));
oled.println();
oled.println(oledstring);
};

```

Lisa 3

Agilent 34972A mõõtmistäpsuste tabel [16]

■ DC, Resistance, and Temperature Accuracy Specifications

± (% of reading + % of range)^[1]

Includes measurement error, switching error, and transducer conversion error

Function	Range ^[3]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour ^[2] 23 °C ± 1 °C	90 Day 23 °C ± 5 °C	1 Year 23 °C ± 5 °C	Temperature Coefficient /°C 0 °C – 18 °C 28 °C – 55 °C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0035	0.0040 + 0.0040	0.0050 + 0.0040	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	300.000 V		0.0020 + 0.0020	0.0035 + 0.0030	0.0045 + 0.0030	0.0005 + 0.0003
Resistance ^[4]	100.0000 Ω	1 mA current source	0.0030 + 0.0035	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 kΩ	1 mA	0.0020 + 0.0006	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.00000 kΩ	100 µA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 kΩ	10 µA	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	1.000000 MΩ	5 µA	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 MΩ	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
	100.0000 MΩ	500 nA 10 MΩ	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
DC Current <i>34901A Only</i>	10.00000 mA	< 0.1 V burden	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	100.0000 mA	< 0.6 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.002 + 0.0005
	1.000000 A	< 2 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
Temperature	Type	Best Range Accuracy ^[5]		Extended Range Accuracy ^[5]		
Thermocouple ^[6]	B	1100°C to 1820°C	1.2°C	400°C to 1100°C	1.8°C	0.03°C
	E	-150°C to 1000°C	1.0°C	-200°C to -150°C	1.5°C	0.03°C
	J	-150°C to 1200°C	1.0°C	-210°C to -150°C	1.2°C	0.03°C
	K	-100°C to 1200°C	1.0°C	-200°C to -100°C	1.5°C	0.03°C
	N	-100°C to 1300°C	1.0°C	-200°C to -100°C	1.5°C	0.03°C
	R	300°C to 1760°C	1.2°C	-50°C to 300°C	1.8°C	0.03°C
	S	400°C to 1760°C	1.2°C	-50°C to 400°C	1.8°C	0.03°C
T	-100°C to 400°C	1.0°C	-200°C to -100°C	1.5°C	0.03°C	
RTD	R ₀ from 49Ω to 2.1 kΩ	-200°C to 600°C	0.06°C			0.003°C
Thermistor	2.2 k, 5 k, 10 k	-80°C to 150°C	0.08°C			0.002°C

[1] Specifications are for 1 hour warm up and 6½ digits

[2] Relative to calibration standards

[3] 20% over range on all ranges except 300 V dc and 1 Adc ranges

[4] Specifications are for 4-wire ohms function or 2-wire ohms using Scaling to remove the offset.

Without Scaling, add 4Ω additional error in 2-wire ohms function.

[5] 1 year accuracy. For total measurement accuracy, add temperature probe error.

[6] Thermocouple specifications not guaranteed when 34907A module is present

Lisa 4

Peltier jahuti 12711-9P31-24CW andmeleht [14]

TEC Specification Sheet



Part #	I _{max} (Amps)	Q _{max} (Watts)	V _{max} (Volts)	DT _{max} (°C)	T _{max} (°C)
12711-9P31-24CW	24.0	226.1	15.2	62°C	200°C



Lapped

Custom Options:

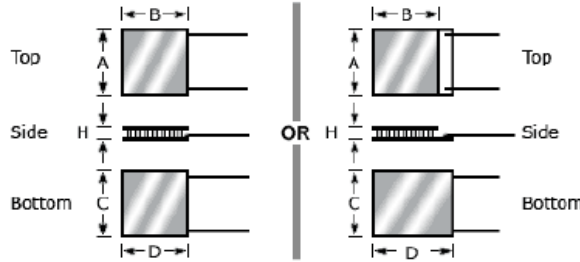
Call for custom wire types and other custom options.

Notes:

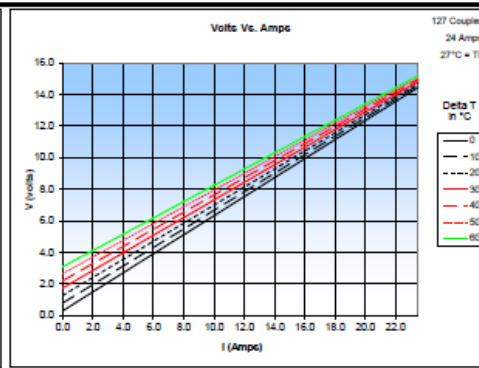
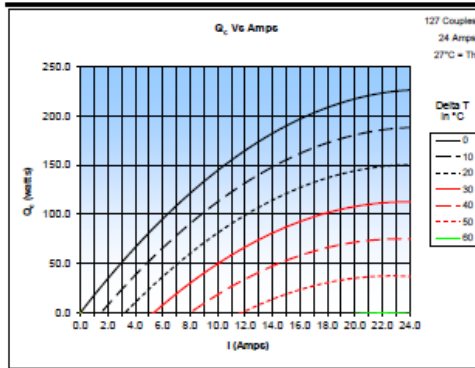
Typical power input is 40% to 80% of I_{max}
 Maximum Waste Heat (exiting the hot side) at 100% input power, I=I_{max}, V=V_{max} is;
 (I_{max} * V_{max}) + Q_{max} = 590.9 watts
 Use of a properly sized heat sink or water block is required.

Bottom Plate				Top Plate				Metallized Height		Lapped Height	
A		B		C		D		H		H	
mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in	mm	in
50.0	1.97	50.0	1.97	50.0	1.97	50.0	1.97	NA	NA	3.8	.150

Weight (w/o leads)
30 grams



Tolerances (typical)
 A, B, C, D = ±0.25mm (±0.01")
 H = ±0.15mm (±0.006")



Charts above are tested at a T_c=27°C. At higher T_c temperatures, TEC resistance increases. Since V=IR, expect amperage to decrease for a given fixed voltage.

Copyright © 2007-2018. All rights reserved. Custom Thermoelectric 11941 Industrial Park Road, STE 3, Bishopville, MD 21833 Tel: 443-926-9138 FAX: 443-926-9137 WEB: www.customthermoelectric.com
 E-mail: tech@customthermoelectric.com All technical information and data in this document is based on tests and measurements and is believed to be accurate and reliable. Product testing by the purchaser is recommended in order to confirm expected results for specific applications. Materials and specifications are subject to change without notice. REV: 6-07-2018

Lisa 5

Pumbamooduli programm

```
volatile int interv=0;
volatile int interp=0;

#define pp 0.2
#define pi 0.6
#define pd 0.1
float sigmap=0;
float deltap=0;

#define vp 0.2
#define vi 0.6
#define vd 0.1

float sigmav=0;
float deltav=0;

int hallsensorv = 2; //Vasak vooluandur sisend
int hallsensorp = 3; //Parem vooluandur sisend
int pumppp = 5; //Parem pump juhtsignaal
int pumppv = 6; //Vasak pump juhtsignaal
int summa=0;

int pwmv = 255;
int pwmp = 255;

float impl=863;

float lv=0;
float lp=0;

float slv=1.6;
float slp=1.6;

float vigav=0;
float vigap=0;

float evigav=0;
float evigap=0;
void rpmp () //
{
```

```

interp++;
}

void rpmv ()

{
interv++;
}

char inbyte=0;
String puhver="";
String kask="";
int kalgus=0;
int klopp=0;

void setup() //
{
pinMode(hallsensorv, INPUT);
pinMode(hallsensorp, INPUT);

pinMode(pumpp, OUTPUT);
pinMode(pumpv, OUTPUT);

Serial.begin(9600);
attachInterrupt(1, rpmp, RISING);
attachInterrupt(0, rpmv, RISING);
}
void loop ()
{

interp=0;
interv=0;

delay (2000); //ajaline viide, et katkestus jõuaks rohkem impulsse lugeda

cli();

```

```

vigav=(slv*impl/30)-interv;
vigap=(slp*impl/30)-interp;

sigmap=sigmap+vigap;
sigmav=sigmav+vigav;

deltap=vigap-evigap;
deltav=vigav-evigav;

pwmp=round(vigap*pp+sigmap*pi+deltap*pd);
pwmv=round(vigav*vp+sigmav*vi+deltav*vd);
if (pwmp>255) {pwmp=255;};
if (pwmp<0) {pwmp=0;};

if (pwmv>255) {pwmv=255;};
if (pwmv<0) {pwmv=0;};

analogWrite(pumpp, pwmp);
analogWrite(pumpv, pwmv);

lv=30*interv/impl;
lp=30*interp/impl;
evigav=vigav;
evigap=vigap;
sei(); //katkestuse lubamine

Serial.print("!P");
Serial.print (lp, 4);
Serial.print("#\n");
Serial.print("!V");
Serial.print (lv, 4);
Serial.print("#\n");

while (Serial.available(>0) {
  inbyte = Serial.read();
  puhver.concat(inbyte);
};

```

```

kalgus = puhver.indexOf("!");
klopp = puhver.indexOf("#");

if ((kalgus != -1) & (klopp != -1))
{
    kasutaitja(puhver.substring(kalgus+1,klopp));
    puhver="";
}

}

void kasutaitja (String kask)
{

    char tyyp = kask.charAt(0);
    String svaartus;
    svaartus = (kask.substring(1));

    switch(tyyp)
    {
        case 'V':
            slv=svaartus.toFloat();
            break;

        case 'P':
            slp=svaartus.toFloat();
            break;

    }

}

```

Lisa 6

Süsteemi kalibreerimiskatsete tulemused

	Tkon takt	Tbr_hot	Tbr_cold	Pkali b	Tvesi	Plisa	dT	P/dT (W/C)	dT/(10W)	Peltier kontroller PW M%	U pelt	Tkon takt_set	Pkalib_set	Tvesi_set	Trafo	Veevool 1 radiatori kohta
Seeria 30	29,51	29,41	25,24	20,01	30,1	0,00	4,17	4,80	2,08	17%	35,1	30	20	30	40%	1,4L/min
	29,4	29,27	25,07	20	40,1	0,00	4,20	4,76	2,10	38%	35,1	30	20	40	40%	1,4L/min
	29,2	29,05	24,68	20	49,5	0,00	4,37	4,58	2,19	63%	35,1	30	20	50	70%	1,4L/min
	29,2	28,96	24,62	20	59,2	0,00	4,34	4,61	2,17	90%	35,1	30	20	60	80%	1,4L/min
	28,79	28,55	20,43	40	30,15	0,00	8,12	4,93	2,03	38%	35,1	30	40	30	35%	1,4L/min
	28,76	28,49	20,32	40	39,8	0,00	8,17	4,90	2,04	62%	35,1	30	40	40	50%	1,4L/min
	28,61	28,3	20,1	40	49,5	0,00	8,20	4,88	2,05	89%	35,1	30	40	50	70%	1,4L/min
Kättesamatu							0,00									1,4L/min
	28,06	27,6	15,47	60	30,57	0,00	12,13	4,95	2,02		35,2	30	60	30	30%	1,4L/min
	28,17	27,74	15,64	60	40,15	0,00	12,10	4,96	2,02	89%	35,2	30	60	40	40%	1,4L/min
Kättesamatu																1,4L/min
																1,4L/min
Kättesamatu	27,63	27,12	11	80	30,2	0,00	16,12	4,96	2,02	0%		30	80	30	90%	1,4L/min
																1,4L/min
Kättesamatu																1,4L/min
																1,4L/min

See
ria
40

Tko nta kt	Tbr _h ot	Tbr _co ld	Pk ali b	Tv es i	Pli sa	d T	P/dT (W/ C)	dT/(10 W)	Peltier kontroller PWM%	U pe lt	Tkont akt_s et	Pkal ib_s et	Tve si_s et	Tr af o	Veevool 1 radiaatori kohta
39, 54	39, 52	35, 46	20 ,0 0	31 ,0 0	40 00	4, 06	4,93	2,03	2%	35 ,2	40	20	30	2 0 %	1,4L/min
39, 48	39, 42	35, 32	20 ,0 0	40 ,4 0	40 00	4, 10	4,88	2,05	20%	35 ,1	40	20	40	4 0 %	1,4L/min
39, 26	39, 13	34, 96	20 ,0 0	50 ,1 7	40 00	4, 17	4,80	2,09	41%	35 ,1	40	20	50	4 0 %	1,4L/min
39, 28	39, 13	34, 88	20 ,0 0	60 ,1 0	40 00	4, 25	4,71	2,13	65%	35 ,1	40	20	60	4 0 %	1,4L/min
38, 91	38, 75	30, 77	40 ,0 0	30 ,9 1	40 00	7, 98	5,01	2,00	20%	35 ,1	40	40	30	2 0 %	1,4L/min
38, 80	38, 58	30, 58	40 ,0 0	40 ,3 0	40 00	8, 00	5,00	2,00	52%	35 ,1	40	40	40	4 0 %	1,4L/min
38, 75	38, 52	30, 55	40 ,0 0	49 ,8 7	40 00	7, 98	5,02	1,99	68%	35 ,1	40	40	50	4 0 %	1,4L/min
38, 75	38, 34	30, 25	40 ,0 0	60 ,6 5	40 00	8, 09	4,94	2,02	94%	35 ,1	40	40	60	1 0 0 %	1,4L/min
38, 30	37, 98	26, 02	60 ,0 0	31 ,1 5	40 00	11 ,9 6	5,02	1,99	37%	35 ,1	40	60	30	0 %	1,4L/min
38, 15	37, 79	25, 89	60 ,0 0	40 ,4 3	40 00	11 ,9 0	5,04	1,98	59%	35 ,1	40	60	40	6 0 %	1,4L/min
38, 20	37, 80	25, 85	60 ,0 0	50 ,0 4	40 00	11 ,9 5	5,02	1,99	85%	35 ,1	40	60	50	6 0 %	1,4L/min
										35 ,1	40	60	60	8 0 %	1,4L/min
37, 68	37, 27	21, 60	80 ,0 0	30 ,0 7	40 00	15 ,6 7	5,11	1,96	59%	35 ,1	40	80	30	1 5 %	1,4L/min
37, 63	37, 18	21, 38	80 ,0 0	40 ,0 4	40 00	15 ,8 0	5,06	1,98	85%	35 ,1	40	80	40	3 0 %	1,4L/min
										35 ,1	40	80	50		1,4L/min
										35 ,1	40	80	60		1,4L/min
36, 91	36, 35	16, 65	10 ,0 00	30 ,3 4	40 00	19 ,7 0	5,08	1,97	86%	35 ,1	40	100	30	0 %	1,4L/min
										35 ,1	40	100	40		1,4L/min
										35 ,1	40	100	50		1,4L/min

See
ria
50

Tkon takt	Tbr_hot	Tbr_cold	Pkali b	Tves i	Plisa	dT	P/dT (W/C)	dT/(10W)	Peltier kontroller PW M%	U pelt	Tkon takt_set	Pkali b_set	Tves i_set	Trafo	Veevool 1 radi aatori koht a
										35,2	50	20	30	20%	1,4L/min
49,43	49,4	45,401	20	40,53	900,00	4,00	5,00	2,00	4%	35,1	50	20	40	40%	1,4L/min
49,26	49,18	45,16	20	50,22	900,00	4,02	4,98	2,01	22%	35,1	50	20	50	70%	1,4L/min
49,25	49,11	45,07	20	60,05	900,00	4,04	4,95	2,02	42%	35,1	50	20	60	80%	1,4L/min
48,77	48,61	40,81	40	31,94	600,00	7,80	5,13	1,95	4%	35,1	50	40	30	20%	1,4L/min
48,87	48,81	40,95	40	40,07	600,00	7,86	5,09	1,97	19%	35,1	50	40	40	40%	1,4L/min
48,54	48,21	40,17	40	50,51	600,00	8,04	4,98	2,01	41%	35,1	50	40	50	40%	1,4L/min
48,79	48,48	40,61	40	60,03	900,00	7,87	5,08	1,97	62%	35,1	50	40	60	100%	1,4L/min
										35,1	50	60	30		1,4L/min
48,32	48,02	36,47	60	40,23	600,00	11,55	5,19	1,93	38%	35,1	50	60	40	40%	1,4L/min
48,16	47,82	36,2	60	50,24	600,00	11,62	5,16	1,94	60%	35,1	50	60	50	70%	1,4L/min
48,07	47,65	35,89	60	59,90	400,00	11,76	5,10	1,96	85%	35,1	50	60	60	90%	1,4L/min
										35,1	50	80	30		1,4L/min
48,17	47,81	32,5	80	39,60	0,00	15,31	5,23	1,91	53%	35,1	50	80	40	50%	1,4L/min
47,446	46,93	31,28	80	50,25	0,00	15,65	5,11	1,96	81%	35,1	50	80	50	70%	1,4L/min
										35,1	50	80	60		1,4L/min
										35,1	50	100	30		1,4L/min
47,192	46,69	27,65	100	39,70	0,00	19,04	5,25	1,90	78%	35,1	50	100	40	50%	1,4L/min
										35,1	50	100	50		1,4L/min
										35,1	50	100	60		1,4L/min
										35,1	50	120	30		1,4L/min

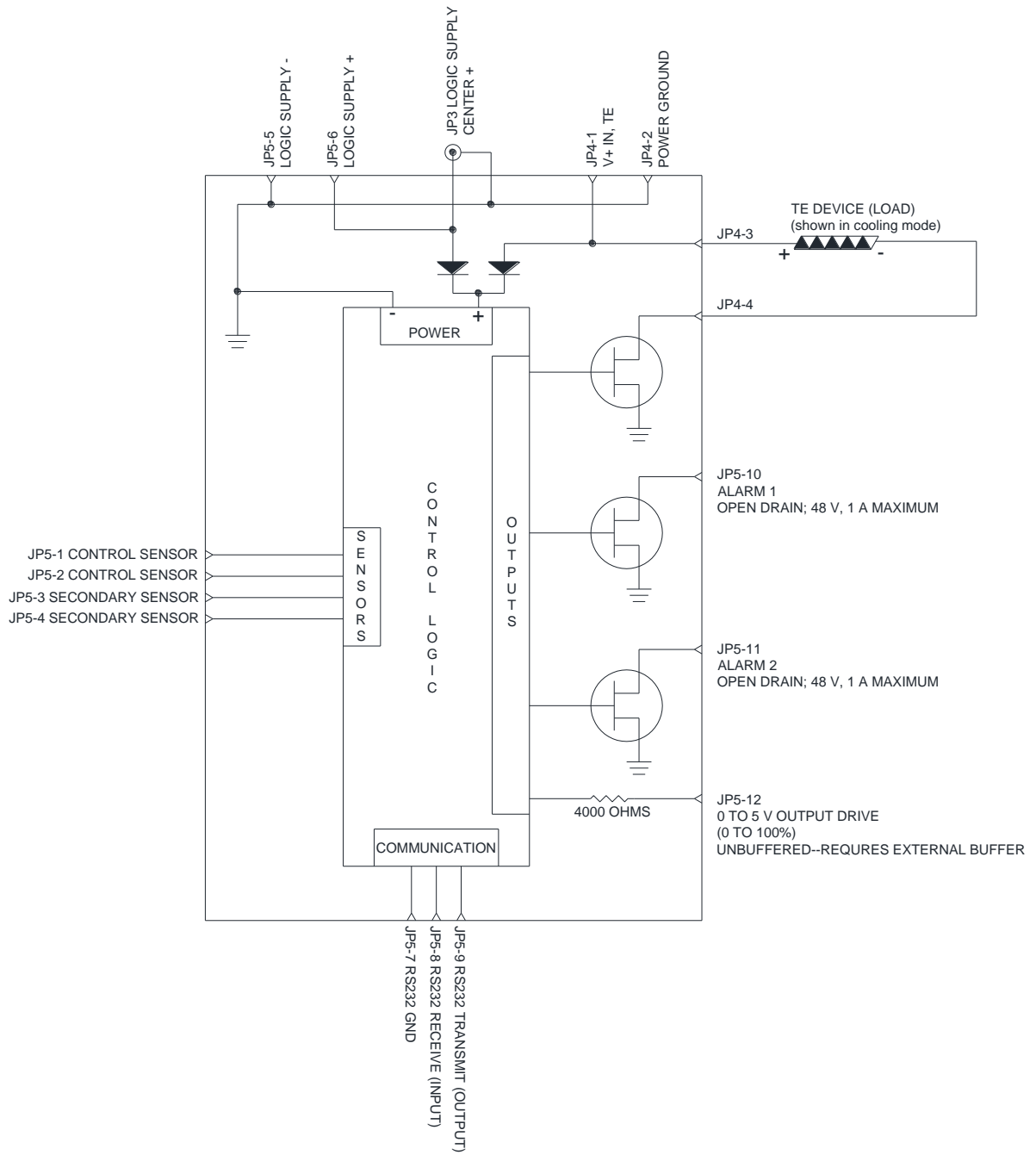
Seeria
60

Tko nta kt	Tbr _h ot	Tbr _co ld	Pk ali b	T v esi	Pli sa	d T	P/d T (W/ C)	dT/ (10 W)	Peltier kontrolleri PWM%	U pe lit	Tkon takt_ set	Pkal ib_ set	Tve si_ set	Tr af o	Veevool 1 radiaatori kohta
										35,2	60	20	30		1,4L/min
										35,1	60	20	40	40%	1,4L/min
59,4	59,43	55,53	20	50,20	70,00	3,90	5,13	1,95	2%	35,1	60	20	50	70%	1,4L/min
59,2	59,2	55,24	20	60,11	70,00	3,96	5,05	1,98	19%	35,1	60	20	60	80%	1,4L/min
										35,1	60	40	30		1,4L/min
59,02	58,81	51,12	40	40,23	80,00	7,69	5,20	1,92	3%	35,1	60	40	40	60%	1,4L/min
58,71	58,54	50,79	40	49,99	100,00	7,75	5,16	1,94	16%	35,1	60	40	50	40%	1,4L/min
58,56	58,28	50,49	40	60,04	70,00	7,79	5,13	1,95	40%	35,1	60	40	60	0%	1,4L/min
										35,1	60	60	30		1,4L/min
58,377	58	46,68	60	40,22	70,00	1,32	5,30	1,89	18%	35,1	60	60	40	60%	1,4L/min
58,18	57,73	46,05	60	49,88	0,00	1,68	5,14	1,95	34%	35,1	60	60	50	70%	1,4L/min
58,14	57,72	46,22	60	60,08	50,00	1,50	5,22	1,92	59%	35,1	60	60	60	80%	1,4L/min
										35,1	60	80	30		1,4L/min
57,66	57,09	41,83	80	44,11	70,00	1,56	5,24	1,91	39%	35,1	60	80	40	50%	1,4L/min
57,57	57,09	41,88	80	49,87	0,00	1,52	5,26	1,90	52%	35,1	60	80	50	70%	1,4L/min
57,52	56,98	41,73	80	60,04	30,00	1,52	5,25	1,91	80%	35,1	60	80	60	90%	1,4L/min

										35,1	60	100	30		1,4L/min
57,13	56,75	37,55	100	39,2	0,00	19,2	5,21	1,92	50%	35,1	60	100	40	90%	1,4L/min
57,01	56,34	37,12	100	49,75	0,00	19,2	5,20	1,92	78%	35,1	60	100	50	75%	1,4L/min
			100		0,00	0,0	#DIV/0!	#DIV/0!		35,1	60	100	60	90%	1,4L/min
										35,1	60	120	30		1,4L/min
56,45	55,64	32,89	120	40,05	70,00	2,75	5,27	1,90	83%	35,1	60	120	40	30%	1,4L/min
										35,1	60	120	50		1,4L/min
										35,1	60	120	60		1,4L/min

Lisa 7

TC-48-20 kontrolleri skeem [18]



Lisa 8

MATLAB abil arvutatud süsteemi töökarakteristikut kirjeldav polünoom

$$P_{kalib} = f(dT, PWM, T_{vesi})$$

$P_{kalib} =$

$$\begin{aligned} & (7384980959606609*dT^3*PWM)/72057594037927936 - (7065088757820237*dT^4)/4611686018427387904 - \\ & (5026892417453713*dT^3*Tvesi)/2305843009213693952 + (3821252080736335*dT^3)/36028797018963968 - \\ & (2661356752742757*dT^2*PWM^2)/1125899906842624 + \\ & (7412211026475501*dT^2*PWM*Tvesi)/72057594037927936 - \\ & (2978742726841153*dT^2*PWM)/562949953421312 - \\ & (345322287781727*dT^2*Tvesi^2)/288230376151711744 + \\ & (4357250703646013*dT^2*Tvesi)/36028797018963968 - (3234707952705921*dT^2)/1125899906842624 + \\ & (5939244888162461*dT*PWM^3)/281474976710656 - \\ & (1993877207060617*dT*PWM^2*Tvesi)/1125899906842624 + \\ & (1631357110652521*dT*PWM^2)/17592186044416 + \\ & (5944005096865285*dT*PWM*Tvesi^2)/144115188075855872 - \\ & (8882481636876719*dT*PWM*Tvesi)/2251799813685248 + (1635088673911909*dT*PWM)/17592186044416 \\ & - (2536406133157425*dT*Tvesi^3)/9223372036854775808 + \\ & (357931622481125*dT*Tvesi^2)/9007199254740992 - (2183841212848037*dT*Tvesi)/1125899906842624 + \\ & (5069081667090507*dT)/140737488355328 - (1105284210164399*PWM^4)/8796093022208 + \\ & (2855205155964837*PWM^3*Tvesi)/281474976710656 - (3693118437009357*PWM^3)/8796093022208 - \\ & (6615035735795339*PWM^2*Tvesi^2)/18014398509481984 + \\ & (1221684734835953*PWM^2*Tvesi)/35184372088832 - (7701050680059417*PWM^2)/8796093022208 + \\ & (6509395984524455*PWM*Tvesi^3)/1152921504606846976 - \\ & (7133705136755509*PWM*Tvesi^2)/9007199254740992 + \\ & (5171119535699657*PWM*Tvesi)/140737488355328 - (4865918481505965*PWM)/8796093022208 - \\ & (2460084374117187*Tvesi^4)/73786976294838206464 + \\ & (6970569886630693*Tvesi^3)/1152921504606846976 - (7358859509842519*Tvesi^2)/18014398509481984 + \\ & (3470923912690677*Tvesi)/281474976710656 - 4951515272152593/35184372088832 \end{aligned}$$

Lisa 9

Agilent 34972A temperatuuriandurite ühendused

Andur	Tüüp	Kanal	Pesa
Vasak radiaatori ja Peltier jahuti vaheline temperatuur	K-termopaar	CH20	2
Vasak lisaküttetakisti ja radiaatori vaheline temperatuur	K-termopaar	CH19	2
Peltier jahuti sisemine külma poole temperatuur	K-termopaar	CH18	2
Parem Radiaatori ja Peltier jahuti vaheline temperatuur	K-termopaar	CH17	2
Parem lisaküttetakisti ja radiaatori vaheline temperatuur	K-termopaar	CH16	2
Peltier jahuti sisemine kuuma poole temperatuur	K-termopaar	CH1	2
Parem radiaator siseneva vee temperatuur	K-termopaar	CH7	2
Vasak radiaator väljuva vee temperatuur	K-termopaar	CH8	2
Parem radiaator väljuva vee temperatuur	K-termopaar	CH9	2
Vasak radiaator siseneva vee temperatuur	K-termopaar	CH10	2
Kontaktplaadi temperatuur	PT1000	CH5-CH15	2
Soojusmõõtesilla kuuma poole temperatuur	PT100	CH4-CH14	2
Soojusmõõtesilla külma poole temperatuur	PT100	CH3-CH13	2
Peltier jahuti serva temperatuur	PT1000	CH2-CH12	2
Pinge voolumõõtesundil	Šunt	CH1	2
Pliidi pinna temperatuur	PT100	CH2	1
Soojust koondava keha otspinna temperatuur	PT100	CH1	1