

**MITTAUSAUTOMAATION SUUNNITTELU JA TOTEUTUS
LÄMPÖVUOANTUREIDEN TESTAAMISEEN**

**Design and implementation of a measurement
automation system for testing heat flux sensors**

Henri Tulla

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Henri Tulla

Mittausautomaation suunnittelu ja toteutus lämpövoantureiden testaamiseen

2021

Kandidaatintyö.

32 s.

Tarkastaja: TkT Mikko Kuisma

asia-/hakusanat: lämpövoanturi, mittausautomaatio, mittausautomaatiojärjestelmä

Lämpövoantureille on olemassa useita sovelluskohteita eri tieteen-, tekniikan ja teollisuuden aloilla. Yleisesti saatavilla olevien lämpövoantureiden mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet kuitenkin rajoittavat niiden käyttöä monissa potentiaalisissa sovelluskohteissa, mikä aiheuttaa tarpeen uudentyyppisten antureiden kehittämiseksi.

Tässä kandidaatintyössä suunnitellaan mittausautomaatiojärjestelmä LUT-Yliopistolla suunniteltujen uudentyyppisten lämpövoantureiden testaamisen helpottamiseksi. Suunnittelun lisäksi toteutetaan järjestelmän datankeräysosio, ja varmennetaan sen toiminta käytännön mittauksin. Vaatimukset järjestelmälle määritetään kyseisille antureille aikaisemmin tehtyjen alustavien mittausten perusteella. Mittausautomaatiojärjestelmällä on tarkoitus kyetä mittaamaan yhteensä noin kymmentä lämpötila- ja jännitekanavaa, sekä samanaikaisesti ohjata mittausjärjestelyssä olevia muita laitteita.

Järjestelmä suunnitellaan hyödyntäen mahdollisimman paljon yliopistolta jo löytyviä mittaja muita laitteita, jotta ylimääräisiltä laitehankinnoilta vältytään. Mittalaitteita vertaillaan järjestelmän mittauskanaville asetettujen vaatimusten, sekä laitteista muodostuvan kokonaisuuden näkökulmasta ja valitaan järjestelmään parhaiten soveltuvat laitteet.

Mittalaittevertailun perusteella päädyttiin toteuttamaan järjestelmä National Instruments CompactDAQ-9189 -alustan ympärille, johon liitettiin valitut I/O-moduulit tarvittavien mittauskanavien saavuttamiseksi. Vertailutulosten perusteella havaittiin, että kaikkia alkuperäisiä vaatimuksia ei kyetä täyttämään käytettävissä olevilla mittalaitteilla, mutta vaatimuksista joustaminen todettiin tässä tapauksessa järkevämmäksi ratkaisuksi kuin uusien mittalaitteiden hankkiminen.

Työn tuloksena syntyi MATLAB:lla ohjattava modulaarinen DAQ-järjestelmä, jonka todettiin soveltuvan lämpövo- ja lämpötila-antureiden signaaleiden mittaamiseen. Järjestelmän toimintaa testattiin näytteistämällä sekä signaaligeneraattorilla luotua jännitesignaalia, että lämpövo- ja lämpötila-antureiden tuottamia signaaleja. Tehtyjen testien perusteella havaittiin järjestelmän toimivan, ja alkuperäisten vaatimusten täyttyvän muuten paitsi jänniteresoluution osalta. Modulaarisuudestaan johtuen järjestelmää on tulevaisuudessa mahdollista laajentaa helposti erilaisten mittausjärjestelyjen tarpeisiin ja lisätä toteutus mittausjärjestelyn laitteiden ohjaamiseen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Henri Tulla

Design and implementation of a measurement automation system for testing heat flux sensors

2021

Bachelor's Thesis.

32 p.

Examiner: D.Sc. (Tech.) Mikko Kuisma

There are several applications for heat flux sensors in different fields of science, technology, and industry. Commonly available heat flux sensors are however unsuitable for many applications because of their mechanical or electrical properties. That creates the need for development of new types of heat flux sensors.

In this bachelor's Thesis, a measurement automation system for testing new types of heat flux sensors developed in LUT-University is designed. The data acquisition part of the system is also implemented and tested by practical measurements. Requirements for measurement automation system are defined based on previous tests conducted on the sensors. The system is required to have about ten temperature and voltage measurement channels in total and to be able to control other devices in the test setup.

The system will be designed using as much of the measurement equipment already available at LUT-University as possible. Available instruments are compared based on requirements defined for different measurement channels and the best-suited instruments are chosen for the system.

Based on the comparison results National Instruments CompactDAQ-9189 chassis and compatible I/O modules are selected. The original requirement for voltage resolution could not be achieved with available instruments but decreasing the original requirement was found to be a better option instead of getting new equipment.

The result of this Thesis was a modular DAQ-system which is controlled by MATLAB. The system tested by measuring voltage signal generated with function generator as well as signals generated by temperature and heat flux sensors. Based on the conducted tests was found that the data acquisition system works, and the original requirements are met apart from the voltage resolution.

The system was found to be suitable for heat flux and temperature measurements. The designed system is modular, so it is possible to easily add new measurement channels later if needed. Also, implementing the control for other devices in the test setup is possible in the future based on the current system.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Lämpövuoantureiden testaaminen.....	7
2.1	Testausjärjestelyn rakenne.....	8
2.2	Aikaisempi testausprosessi ja DAQ-järjestelmä	9
3.	Mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelu.....	10
3.1	Mittauskanaville asetetut vaatimukset.....	10
3.2	Muut vaatimukset	10
4.	Mittalaitteiden vertailu	12
4.1	Mittauskanavien ominaisuuksien vertailu	12
4.1.1	Jännitteenmittauskanavien vertailu.....	12
4.1.2	RTD-kanavien vertailu	13
4.2	Ulkoisten rajapintojen vertailu	14
4.2.1	Liitäntöjen vertailu	14
4.2.2	Ohjelmistojen vertailu	15
5.	Mittausautomaatiojärjestelmän Suunnittelu	17
5.1	Muiden laitteiden ohjaaminen	17
5.2	Mittalaitteiden valinta.....	17
5.3	Käytettävän ohjelmiston valinta	20
6.	Mittausautomaatiojärjestelmän toteuttaminen.....	21
6.1	DAQ-järjestelmän rakentaminen.....	21
6.2	Järjestelmän ohjelmointi ja alustava testaus.....	22
7.	Järjestelmän testaaminen	24
7.1	Jänniteresoluution testaaminen.....	24
7.2	Käytännön testaaminen.....	25
8.	Yhteenveto.....	28
	Lähteet	30

Liitteet

1. Mittalaitteiden mittausresoluutioiden laskeminen

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

ADC	Analog to Digital Converter, analogia-digitaalimuunnin
A/D	Analog/Digital, Analoginen/Digitaalinen
cDAQ	CompactDAQ, National Instruments:in DAQ-alusta
cRIO	CompactRIO, National Instruments:in automaatioalusta
DAQ	Data Acquisition System, datankeräysjärjestelmä
DUT	Device Under Test, testattava laite/-anturi
FPGA	Field-Programmable Gate Array, ohjelmoitava porttimatriisi
HF	Heat Flux, lämpövuoto
I/O	Input/Output, Sisään-/Ulostulo
IR	Infra-Red, infrapuna
LAN	Local Area Network, lähiverkko
LXI	Lan eXtension for Instrumentation
MTP	Media Transfer Protocol, tiedonsiirtoprotokolla
NI	National Instruments, laitevalmistaja
NI MAX	NI Measurement & Automation Explorer, ohjelmisto
RS-232	Recommended Standard 232, tietoliikenneväylä-standardi
RTD	Resistance Temperature Detector, vastuslämpötila-anturi
USB	Universal Serial Bus, tietoliikenneväylä-standardi
USBTMC	USB Test and Measurement Class

1. JOHDANTO

Mittausautomaatiojärjestelmällä tarkoitetaan järjestelmää, joka suorittaa tutkittavalle laitteelle jonkin mittauksen tai mittaussarjan automaattisesti. Usein mittauksen suorittamiseen liittyy joidenkin suureiden mittaamisen lisäksi herätesignaalien antaminen mittausjärjestelyyn kuuluville laitteille, jotta tutkittavan laitteen toimintaa voidaan tarkastella muuttuvissa olosuhteissa. Yleensä mittausautomaatiojärjestelmä koostuu tietokoneesta ja sillä ajettavasta ohjelmasta, sekä siihen liitetystä laitteistosta, joka muuntaa mittausjärjestelyltä luetut signaalit tietokoneen ymmärtämään muotoon. (Di Paolo Emilio 2014, s. 131–136.)

LUT-yliopiston tutkimusprojektissa on kehitetty uudentyyppisiä piilastu-lämpövuoauntureita, joiden rakenne ja ominaisuudet poikkeavat yleisemmin käytössä olevista anturityypeistä. Eräs kehitettyjen antureiden mahdollisista käyttökohteista ovat puettavat laitteet, kuten älykellot, joissa niiden avulla voitaisiin saavuttaa esimerkiksi nykyistä parempia arvioita ihmisen energiankulutuksesta (Levikari ym. 2021).

Ennen suunniteltujen antureiden toiminnan kokeilemistä varsinaisissa sovelluskohteissa, täytyy niiden toimintaa testata testausympäristössä. Testauksen tarkoituksena on varmistaa antureiden toiminta odotetulla tavalla ja karsia pois huonot yksilöt. Testauksen perusteella saadaan myös tietoa anturien ominaisuuksista, kuten herkkyudesta ja vasteajasta, sekä pystytään vertaamaan erilaisia anturirakenteita toisiinsa.

LUT-yliopistolla on aikaisemmin toteutettu mittausjärjestely, jonka avulla yksittäisten lämpövuoauntureiden testaaminen on mahdollista. Testausprosessin aikana täytyy mitata dataa samanaikaisesti noin kymmeneltä kanavalta ja ohjata muita järjestelyn laitteita tahdistetusti. Aikaisemmin tehdyissä testeissä on ohjattu testausjärjestelyn laitteita manuaalisesti, mikä tekee suurempien anturimäärien testaamisen työlääksi ja heikentää toistettavuutta mittauskertojen välillä. Lisäksi mittausjärjestelyn alkuperäinen datankeräysjärjestelmä (Data Acquisition System, DAQ) ei ole paras mahdollinen ratkaisu käyttötarkoitukseensa. Sen mittausresoluutio ja näytteistystaajuus ovat liian pieniä tarkasteltaviin signaaleihin nähden, ja lisäksi järjestelmän rakenne on tarpeettoman monimutkainen.

Testausprosessiin ja DAQ-järjestelmään liittyvät ongelmat pyritään ratkaisemaan mittausautomaatiojärjestelmän avulla. Mittausautomaatiojärjestelmän tehtävänä tulee olemaan testattavan lämpövuoaunturin (Device Under Test, DUT) ja muiden mittausjärjestelyssä olevien anturien signaalien näytteistäminen ja tallentaminen, sekä mittausjärjestelyyn kuuluvien laitteiden ohjaaminen.

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena on suunnitella mittausautomaatiojärjestelmä lämpövuoaunturi-sarjan testaamista varten. Lisäksi järjestelmästä toteutetaan sen DAQ-osio. Mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelun lähtökohtana käytetään jo olemassa oleva mittausjärjestelyä, ja sen tarkoituksena on nopeuttaa suurempien anturisarjojen testaamista, sekä parantaa testauksen toistettavuutta eri antureiden välillä.

Työn tavoitetta tukevat tutkimuskysymykset:

- Minkälaisia järjestelmiä on aikaisemmin käytetty vastaavanlaisissa mittauksissa?
- Mitkä ovat vaatimukset lämpövuoa- ja lämpötilamittauksissa?
- Mitkä käytettävissä olevista mittalaitteista soveltuvat mittaukseen?
- Miten kommunikointi järjestelmän laitteiden välillä toteutetaan?

2. LÄMPÖVUOANTUREIDEN TESTAAMINEN

Lämpövuoto on suure, joka kuvaa jonkin pinta-alan lävitse siirtyvän lämpöenergian määrää aikayksikköä kohden (Cirimele ym. 2012, s. 7). Lämpövuonon mittaamiselle löytyy useita sovelluskohteita eri tieteen- ja tekniikan aloilta, esimerkiksi poltto-, ja sähkömoottoreissa (Sumin 2013; Niukkanen 2013), puettavissa laitteissa (Härkönen 2018), prosessi- ja bioteollisuudessa (Cirimele ym. 2012), sekä teollisuuskattiloissa (Sapozhnikov ym. 2020).

Useissa tilanteissa lämpövuonon mittaaminen antaa tarkempaa tietoa tutkittavasta kohteesta kuin pelkän lämpötilan mittaaminen (Sapozhnikov ym. 2020; Levikari ym. 2021). Tästä, ja monista potentiaalisista sovelluskohteista huolimatta lämpövuonon mittaaminen on toistaiseksi vähäistä verrattuna lämpötilan mittaamiseen. Yhtenä merkittävänä syynä voidaan pitää yleisesti saatavilla olevien lämpövuotoantureiden sopimattomuutta moneen kohteeseen, esimerkiksi heikon mekaanisen kestävyytensä tai liian hitaan vasteensa vuoksi. (Sapozhnikov ym. 2020.)

LUT-yliopistolla on kehitetty uudentyyppisiä, tavanomaisista lämpövuotoantureista rakenteensa ja ominaisuuksiensa puolesta poikkeavia, lämpövuotoantureita. Yksi suunniteltujen antureiden mahdollisista sovelluskohteista ovat erilaiset puettavat laitteet (Levikari ym. 2021). Ennen antureiden toiminnan tarkastelua erilaisissa sovelluskohteissa, niiden toimintaa täytyy kuitenkin kokeilla testausympäristössä, jotta varmistetaan antureiden toiminnasta ja saadaan tietoa niiden suorituskyvystä.

Antureiden testaamiseen on aikaisemmin toteutettu mittausjärjestely, joka on suunniteltu lämpövuotoanturien suhteelliseen kalibrointiin. Testauksessa DUT-anturi, sekä kaupalliset referenssilämpövuotoanturit altistetaan niiden lävitse kulkevalle lämpövuolle, ja niiden tuottamia jännitesignaaleita verrataan toisiinsa jatkuvuus- ja transienttitilanteissa. Mittausjärjestelyn tarkoituksena on ollut mahdollistaa anturien ajallisesti tehokas ja hyvin toistettavissa oleva testaaminen. (Immonen, 2019, s. 28.)

Mittausjärjestelyä on aikaisemmin käytetty yksittäisten lämpövuotoanturien testaamiseen, ja käytetty testausprosessi sisältää paljon manuaalisia työvaiheita. Mittausautomaatiojärjestelmän avulla on tarkoitus vähentää testausprosessiin kuuluvia manuaalisia työvaiheita, jolloin toistettavuus eri antureille suoritettavien testien välillä paranee. Valmistettuja antureita on yhteensä useita tuhansia, joten testausprosessista kannattaa tehdä mahdollisimman automaattinen ennen suurempien anturimäärien testaamista.

Mittausautomaatiojärjestelmän on myös tarkoitus korvata mittausjärjestelyn aiempi DAQ-järjestelmä, joka soveltuu käyttötarkoitukseensa huonosti. Alkuperäisen DAQ-järjestelmän mittausresoluutio ja näytteistystaajuus ovat liian pieniä tarkasteltaviin signaaleihin nähden, ja lisäksi järjestelmän rakenne on tarpeettoman monimutkainen.

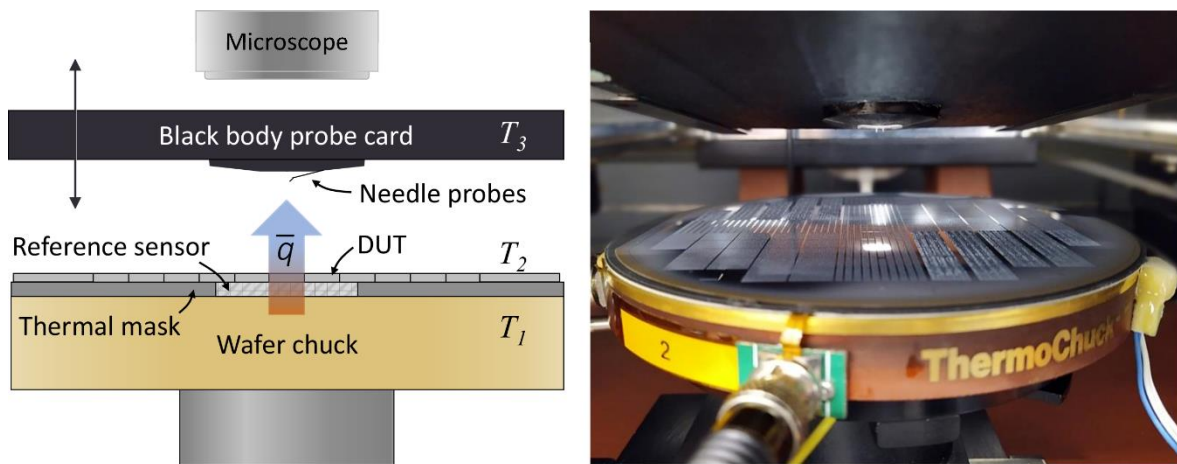
Tässä osiossa on kuvattu olemassa olevan testausjärjestelyn rakenne ja aikaisemmin käytetty testausprosessi pääpiirteittäin. Näitä tietoja käytetään saatujen testatulosten kanssa lähtökohtana mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelussa. Testausjärjestelyn suunnittelu, rakentaminen ja testaaminen on kuvattu kokonaisuudessaan Immosen (2019) diplomityössä.

2.1 Testausjärjestelyn rakenne

Antureiden alustavaan testaamiseen tarkoitettu testausjärjestely on rakennettu Signatone S1160-probe-aseman ympärille. Probe-asema mahdollistaa suuren anturimäärän alustavan testaamisen sujuvasti, kun piikiekolle valmistetut anturit voidaan testata suoraan kiekolta. Aseman yhteydessä on käytetty Temptronic TP03000 – ThermoChuck® -lämpöalustajärjestelmää, jolla piikiekon alustan lämpötilaa voidaan säätää testauksen aikana lämpövuohäritteen luomiseksi. (Immonen 2019, s. 29, 31.)

Testausjärjestelyssä piikiekon yläpuolelle on asemoitu niin kutsuttu musta kappale, joka koostuu kahden jäähdityslevyn väliin asemoiduista peltier-elementeistä. Kappaleen tarkoituksena on tarjota piikiekon yläpuolelle pinta, jonka lämpötila on tunnettu ja poikkeava ympäristön lämpötilasta. Kiekon lämpöalustan ja mustan kappaleen lämpötilojen eron seurauksena syntyy lämpöalustan ja mustan kappaleen välille lämpövuoto, joka kulkee piikiekolla olevan DUT-anturin, ja kiekon alla olevien referenssiantureiden lävitse. Musta kappale toimii mittausjärjestelyssä myös probe-aseman probe-korttina, DUT-anturiin liitettävät mittapäätt on kiinnitetty mustan kappaleen alapintaan. (Immonen 2019, s. 32.)

Mittausjärjestelyn neljä referenssilämpövuointuria on asetettu lämpöalustan ja piikiekon väliin ja ympäröity antureiden kanssa samankaltaisen lämpöresistanssin omaavasta materiaalista valmistetulla maskilla. (Immonen 2019, s. 32). Kuvassa 2.1 on esitetty piirros ja valokuva osasta testiasetelmaa. Kuvissa on esitetty piikiekon lämpöalusta, piikiekko ja musta kappale. Piirroskuvaan on lisäksi havainnollistettu joitain yksityiskohtia, kuten pääreferenssi- ja DUT-anturit, sekä probeneulat.



Kuva 2.1 Vasemmallä piirros testiasetelma rakenteesta. Pohjalla lämpöalusta, sen päällä referenssilämpövuointurit sekä niitä ympäröivä maskikerros ja niiden päällä piikiekko, jolla on DUT-anturi. Piikiekon yläpuolelle on piirretty musta kappale, jonka alapinnassa on DUT-anturin pinnalle laskettavat mittaprobet. Oikealla valokuva, jossa keskellä piikiekko lämpöalustan päällä ja sen yläpuolella mustan kappaleen alapinta. (Immonen ym. 2020).

Kuvassa 2.1 esitetyssä piirroksessa on kuvattu neljästä referenssilämpövuointurista selkeyden vuoksi ainoastaan suoraan DUT-anturin alapuolelle sijoitettu pääreferenssianturi. Nuoli piirroksen keskellä kuvaa anturit läpäisevää lämpövuotoa, kun lämpöalustan lämpötila on mustan kappaleen lämpötilaa suurempi.

2.2 Aikaisempi testausprosessi ja DAQ-järjestelmä

Testijakson aikana mustan kappaleen lämpötila pidettiin vakiona noin 43 °C ja lämpöalustan lämpötilaa vaihdeltiin 38 ja 48 °C välillä. Näin lämpövuoanturit altistettiin vuorotellen positiiviselle ja negatiiviselle lämpövuolle 3 minuutin jaksoissa, testin kokonaiskeston ollessa 12 minuuttia. Näin saatiin testattua lämpövuoanturien käyttäytyminen sekä jatkuvuus-, että transienttitilanteissa. (Immonen 2019, s. 40.)

Piikiekon lämpöalustan lämpötilan säätäminen testijakson aikana tapahtui syöttämällä haluttu lämpötila manuaalisesti Temptronic TP03000 – ThermoChuck® -järjestelmän ohjausyksikköön. Kolmen minuutin jaksojen ajastaminen tapahtui käyttäen sekuntikelloa. Tästä aiheutui jonkin verran eroja eri mittauskertojen välille, kun lämpötilan vaihtaminen tapahtui hieman eri aikaan eri mittauskerroilla.

Testauksen aikana mitattiin piikiekon lävitse kulkevaa lämpövuota referenssi- ja DUT-antureilla. Lisäksi piikiekon lämpöalustan ja mustan kappaleen lämpötiloja mitattiin PT100-lämpötila-antureilla. Näiden antureiden lukemiseen on testausjärjestelyssä käytetty aikaisemmin yhteensä seitsemää Keysight 34465A ja Keysight 34461A penkkiyleismittaria. Lisäksi ympäristön lämpötilaa testijärjestelyn lähistöllä on mitattu neljällä termoparianturilla, jotka oli kytketty Keysight U1242C käsiyleismittareihin. (Immonen 2019, s. 35.)

Mittausjärjestelyn alkuperäisessä datankeräysjärjestelmässä oli useiden yleismittareiden lisäksi penkkiyleismittarien tahdistamiseen käytetty signaaligeneraattori, joka antoi kellopulsin viiden sekunnin välein. Käsiyleismittareilla mitatut termoparien lämpötilat tallennettiin puolestaan sekunnin välein. (Immonen 2019, s. 35). Penkki- ja käsiyleismittareilta saatavan mittausdatan tallentamiseksi järjestelmässä oli lisäksi kaksi tietokonetta, joista toinen tallensi penkkiyleismittareilta ja toinen käsiyleismittareilta saatua mittausdataa.

3. MITTAUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelun lähtökohtana käytetään osiossa 2 esiteltyä aikaisempaa testausjärjestelyä. Mittausautomaatiojärjestelmän vaatimuksia määritettäessä huomioidaan aiempien mittausten tulosten perusteella järjestelmässä havaitut puutteet, sekä suurempien anturimäärien sujuvan testaamisen asettamat tarpeet.

Mittausautomaatiojärjestelmä tulee koostumaan DAQ-osiosta, jonka avulla luetaan ja tallennetaan mittausjärjestelyssä olevien anturien tuottamia signaaleita, sekä osiosta, jolla ohjataan muita järjestelyyn kuuluvia laitteita. Vaikka mittausautomaatiojärjestelmä suunnitellaan pääosin osiossa 2 kuvatun testausjärjestelyn ja -prosessin pohjalta, huomioidaan järjestelmän suunnittelussa mahdollisuus käyttää sitä joustavasti myös muissa testiasetelmissä.

Tässä osiossa esitetään mittausautomaatiojärjestelmän mittauskanaville asetetut vaatimukset. Lisäksi tarkastellaan muita vaatimuksia, liittyen mittausautomaatiojärjestelmän ulkoisten laitteiden ohjaamiseen, sekä järjestelmän yleiseen rakenteeseen.

3.1 Mittauskanaville asetetut vaatimukset

Mittauskanavien mittausalue-, resoluutio- ja näytteistystaajuusvaatimukset määritettiin vanhalla järjestelmällä saatujen mittaustulosten tarkastelun perusteella. Taulukossa 3.1 on esitetty järjestelmän DAQ-osalta vaadittavat erityyppiset kanavat, sekä niiden lukumäärät, mittausalueet ja -resoluutiot. Ylimmällä rivillä on esitetty vaatimukset DUT-anturin ja keskimäisellä rivillä kaupallisten referenssilämpövuointureiden (Heat Flux, HF) jännitteitä mittaaville kanaville. Alimmalla rivillä on esitetty vaatimukset PT100 -vastuslämpötila-anturien (Resistance Temperature Detector, RTD) kanaville.

Taulukko 3.1 Mittausautomaatiojärjestelmän kanavat ja niille asetetut mittausalue- ja resoluutiovaatimukset.

Kanava	Lukumäärä	Mittausalue	Resoluutio
DUT	1	± 1 mV	10 nV
HF ref.	4	± 100 mV	1 μ V
PT100	3	-50...100 °C	10 mK

Järjestelmän näytteistystaajuudeksi määritettiin kaikille kanaville vähintään 1 Hz. Aikaisemmissa mittauksissa käytetty 1/5 Hz todettiin riittämättömäksi transienttilanteissa, kun lämpövuossa esiintyy kapea ja korkea transienttipiikki.

3.2 Muut vaatimukset

Taulukossa 3.1 esitetyt erityyppisten kanavien lukumäärät on määritetty osiossa 2 kuvatun testausjärjestelyn kanavien perusteella. Mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelussa otetaan huomioon myös mahdollisuus muokata järjestelmää erilaisten mittausjärjestelyjen tarpeeseen, joten suunnitteluvaiheessa huomioidaan mahdollisuus lisätä järjestelmän kanavamäärää tarvittaessa tulevaisuudessa. Mittalaitteiden vertailemisessa ja valitsemisessa täytyy huomioida myös mahdollisuus liittää ne osaksi mittausautomaatiojärjestelmää, joka tarkoittaa käytännössä laitteissa olevien ohjausliitäntöjen, sekä laitteiden ohjelmistotukien tarkastelua.

Aikaisemmin testausjärjestelyssä käytetty DAQ-järjestelmä on rakenteeltaan tarpeettoman monimutkainen. Jokaisella mittauskanavalla on oma yleismittari, ja lisäksi yleismittareiden ohjaamiseen ja niiden datan tallentamiseen käytetään kahta tietokonetta. Mittausautomaatiojärjestelmästä pyritään tekemään rakenteeltaan mahdollisimman yksinkertainen, heikentämättä kuitenkaan järjestelmän suorituskykyä tai mahdollisuudesta tarvittaessa laajentaa järjestelmää tulevaisuudessa.

DAQ-osion lisäksi mittausautomaatiojärjestelmään kuuluu muiden mittausjärjestelyn laitteiden ohjaamiseen tarvittava osa. Aiemmin käytetyn testausjärjestelyn ja -prosessin kannalta oleellisin ohjausta vaativa laite on piikiekon lämpöalustan lämpötilaa säätävä Temptronic TP03000 – ThermoChuck® -järjestelmä. Lämpöalustajärjestelmää täytyy ohjata testausprosessin aikana, joten työssä tarkastellaan mahdollisuuksia sen liittämiseksi mittausautomaatiojärjestelmään.

Mittausjärjestelyyn kuuluvaa mustaa kappaletta on aikaisemmissa testeissä syötetty vakiovirralla ja -jännitteellä, mutta järjestelmän suunnittelussa tarkastellaan mahdollisuutta lisätä tulevaisuudessa ohjaus myös sille. Järjestelmän yleiskäyttöisyyden kannalta tarkastellaan lisäksi ulkoisten laitteiden ohjausta myös yleisemmällä tasolla.

4. MITTALAITTEIDEN VERTAILU

Järjestelmän toteutuksessa pyritään hyödyntämään mahdollisimman paljon LUT-yliopistolta jo löytyviä mittalaitteita ja muita välineitä. Järjestelmän suunnittelu aloitetaan kartoittamalla käytettävissä olevat mittalaitteet, sekä tarkastelemalla niiden ominaisuuksia ja vertaamalla niitä järjestelmälle asetettuihin vaatimuksiin.

Suurin osa vertailussa mukana olevista laitteista on 6½ numeron näytöllä varustettuja penkkiyleismittareita. Lisäksi mukana on yksi penkkiyleismittarimallinen DAQ-järjestelmä ja muutama erilainen National Instruments:in C Series:n moduuli. C Series on National Instruments:in (NI) tuoteperhe, joka sisältää erilaisia I/O (Input/Output) -moduuleja, jotka on suunniteltu ensisijaisesti mittaus-, automaatio- ja kommunikaatiojärjestelmien toteuttamiseen (NI 2016a, s. 2).

Mittalaitteita vertaillaan jännite- ja RTD-kanavien lukumäärän, mittausalueen, mittausresoluution ja näytteistystaajuuden näkökulmasta aikaisemmin määritettyjen vaatimusten perusteella. Lisäksi tarkastellaan mittalaitteiden tarjoamia etäohjausrajapintoja, joiden avulla laitteet voidaan liittää osaksi mittausautomaatiojärjestelmää.

4.1 Mittauskanavien ominaisuuksien vertailu

Varsinaisen testausyökin aikana mitataan referenssilämpövoantureilta, DUT-anturilta, sekä PT100-lämpötila-antureilta saatavia jännitesignaaleja. Lämpövoanturien jännitteiden mittaamiseen käytettävillä jännitekanavilla ja lämpötila-anturien jännitteiden mittaamiseen käytettävillä RTD-kanavilla on esitetty vaatimukset taulukossa 3.1. Mittalaitteiden mittauskanavien vertailussa keskitytään mittausalueiden, -resoluutioiden ja näytteistystaajuuksien vertailuun.

Eri valmistajat ilmoittavat mittalaitteidensa mittaustarkkuudet eri muodoissa, joten eri valmistajien mittalaitteiden mittaustarkkuuksien vertailu suoraan on hankalaa. Vertailun hankaluuden vuoksi laitteiden mittaustarkkuuksia ei tässä vaiheessa tarkastella.

4.1.1 Jännitteenmittauskanavien vertailu

Mittausautomaatiojärjestelmän jännitekanavia on taulukkoon 3.1 kirjattujen vaatimusten mukaisesti tarkoitus käyttää enintään ± 100 mV jännitteiden mittaamiseen. Tämän vuoksi mittalaitteiden jännitteenmittauskanavien vertailussa keskitytään tarkastelemaan mittausalueita, joilla maksimissaan ± 100 mV jännitteet voidaan mitata parhaalla mahdollisella resoluutiolla. Kaikki valmistajat eivät ilmoittaneet laitteilleen jänniteresoluutiota, joten joidenkin laitteiden kohdalla se laskettiin itse muista ilmoitetuista arvoista.

Taulukossa 4.1 on esitetty mittalaitteiden jännitemittauskanavien lukumäärä, mittausalue, mittausresoluutio, sekä suurin käytettävissä oleva näytteistystaajuus tarkasteltavalla resoluutiolla. Taulukkoon kirjattu näytteistystaajuus on laitteille ilmoitettu suurin näytteistystaajuus tarkasteltavalla mittausalueella ja -resoluutiolla, laitteen ollessa kytkettynä sähköverkkoon, jonka taajuus on 50 Hz. Tiedot on kerätty pääosin valmistajien datalehdistä. Kaikki valmistajat eivät ilmoittaneet laitteilleen jänniteresoluutiota, jolloin se laskettiin muista ilmoitetuista arvoista. Laskenta on esitetty liitteessä 1 ja itse lasketut arvot on merkitty taulukossa asteriskilla.

Taulukko 4.1 Käytettävissä olevien mittalaitteiden jännitemittausalueiden kanavamäärät, mittausalueet, resoluutiot, sekä näytteistystaajuudet. Tiedot on kerätty valmistajien datalehdistä. (Keithley 2019, s. 8; Keithley 2020a, s. 12; Keysight 2020, s. 13, 15, 22, 23; NI 2016a, s. 8, 9).

Mittalaite	Kanava-määrä	Mittausalue	Resoluutio [nV]	Näytteistystaajuus [Hz]
Keysight 34465A	1	± 100 mV	100 *	5
Keysight 34461A	1	± 100 mV	100 *	5
Keithley DMM6500	1	± 100 mV	100	50
Keithley DAQ6510	1	± 100 mV	100	50
NI 9219	4	± 125 mV	15 *	2 (all channels)

*) Laskettu muista valmistajan ilmoittamista arvoista.

Vertaamalla taulukkoon 4.1 koottuja ominaisuuksia kanavien resoluutiolle taulukossa 3.1 esitettyihin vaatimuksiin, havaitaan että lämpövuon referenssiantureiden kanavien 1 µV resoluutiovaatimuksen täyttävät kaikki vertailussa mukana olleet laitteet. DUT-kanavan 10 nV resoluutiovaatimusta ei puolestaan täytä yksikään vertailun laitteista. Lähimmäksi DUT-kanavan resoluutiovaatimusta pääsee NI 9219, jonka pienin jänniteresoluutio on 15 nV.

Osiassa 3.1 mittausautomaatiojärjestelmän näytteistystaajuudeksi määritettiin vähintään 1 Hz. Havaitaan, että kaikilla tässä tarkastelluilla mittalaitteilla saavutetaan vaadittu näytteistystaajuus tarkastellulla mittausalueella ja -resoluutiolla.

4.1.2 RTD-kanavien vertailu

Taulukossa 3.1 on esitetty lämpötilakanavien mittausaluevaatimukseksi -50–100 °C ja resoluutiovaatimukseksi 10 mK. Näytteistystaajuusvaatimukseksi on muiden kanavien tapaan määritetty 1 Hz. Mittausjärjestelyssä käytetään osion 2.22.1 mukaisesti PT100 tyyppisiä RTD-antureita. Taulukkoon 4.2 on kerätty käytettävissä olevien mittalaitteiden RTD-kanaville ilmoitetut mittausalueet, resoluutiot ja näytteistystaajuudet. Mikäli laitteessa on useita eri mittausalueita RTD-antureille, on taulukkoon valittu se, joka täyttää mittausalue- ja resoluutiovaatimukset parhaiten.

Taulukkoon 4.2 kirjattu näytteistystaajuus on laitteille ilmoitettu suurin näytteistystaajuus tarkasteltavalla mittausalueella ja resoluutiolla, laitteen ollessa kytkettynä sähköverkkoon, jonka taajuus on 50 Hz. Kaikille laitteille ei ilmoitettu lämpötilaresoluutiota PT100-anturia käytettäessä. Näissä tapauksissa resoluutio laskettiin laitteelle ilmoitetusta lämpötilamittausalueesta RTD-anturilla ja A/D-muuntimen bittimäärästä. Resoluutioiden laskeminen on esitetty liitteessä 1 ja itse lasketut arvot on merkattu taulukossa asteriskilla.

Taulukko 4.2 Käytettävissä olevien mittalaitteiden RTD-kanavien kanavamäärät, mittausalueet, resoluutiot ja näytteistystaajuudet. Tiedot on kerätty valmistajien datalehdistä. (Keithley 2019, s. 11, 17; Keithley 2020a, s. 15, 21; Keysight 2020, s. 22, 23; NI 2016a, s. 8, 9; NI 2018, s. 5).

Mittalaite	Kanava- määrä	Mittausalue [°C]	Resoluutio [mK]	Näytteistystaajuus [Hz]
Keysight 34465A	1	-200–600	0,4 *	5
Keysight 34461A	1	-200–600	0,4 *	5
Keithley DMM6500	1	-200–600	10	4
Keithley DAQ6510	1	-200–600	10	4
NI 9216	8	-200–660	0,05 *	5 (1 ch); 0,625 (8 ch)
NI 9219	4	-200–660	0,05 *	2 (all channels)

*) Laskettu muista valmistajan ilmoittamista arvoista.

Taulukkoon 4.2 kerättyjä RTD-kanavien ominaisuuksia tarkastelemalla huomataan, että kaikki vertailut laitteet täyttävät vaatimuksen -50–100 °C mittausalueesta ja 10 mK resoluutiosta. Myös vaadittuun 1 Hz näytteistystaajuuteen päästään kaikilla vertailussa mukana olleilla laitteilla vertailuilla mittausalueilla ja -resoluutioilla. NI 9216:lla vaatimukseen päästään, kun käytetään maksimissaan viittä laitteessa olevasta kahdeksasta kanavasta, muilla laitteilla käyttäen kanavamäärä-sarakkeeseen kirjattua kanavamäärää.

4.2 Ulkoisten rajapintojen vertailu

Jotta mittalaitteita voi käyttää osana mittausautomaatiojärjestelmää, niistä täytyy löytyä jonkinlainen rajapinta, jonka kautta niiden kanssa voi kommunikoida. Yleensä mittausautomaatiojärjestelmässä on tietokone, joka hoitaa mitta- ja muiden laitteiden ohjauksen ja datan tallennuksen, mutta myös joillakin mittalaitteilla itsessään on mahdollista ohjelmoida testisekvenssejä ja ohjata ulkoisia laitteita (Di Paolo Emilio 2013, s. 12; Keithley 2020a). Tässä vertailussa keskitytään tarkastelemaan mittalaitteita ja niiden tarjoamia rajapintoja siitä lähtökohdasta, että mittausautomaatiojärjestelmä rakentuu tietokoneen ja jonkin sillä ajettavan ohjelman ympärille.

Fyysisen liitännän lisäksi mittalaitteen etäohjaamiseen tarvitaan laitteen kanssa yhteensopiva ohjelmisto. Useissa tapauksissa laitevalmistajilta löytyy jokin ohjelmisto omien mittalaitteidensa ohjaamiseen, kuten Keithley:n KickStart ja Keysight'in BenchVue (Keithley 2020b; Keysight 2019, s. 22). Lisäksi esimerkiksi MathWorks:n MATLAB ja National Instruments'in LabVIEW-ohjelmistoille on saatavilla kirjastoja useiden eri valmistajien mittalaitteiden ohjaamiseen (MathWorks 2021b; NI 2021b).

4.2.1 Liitännöiden vertailu

Mittauskanavien vertailussa mukana olleet National Instruments'in C Series:n moduulit tarvitsevat alustakseen joko NI CompactDAQ (cDAQ) tai NI CompactRIO (cRIO) -alustan (NI 2021a), joten mittauskanavien vertailussa mukana olleiden moduulien sijaan tähän vertailuun otettiin saatavilla olevat cDAQ ja cRIO -alustat. Muuten vertailussa mukana olevat laitteet ovat samat kuin aikaisemmin.

Taulukossa 4.3 on esitetty vertailussa mukana olevissa mittalaitteissa olevat liitännät ja laitteiden käyttämät protokollat. Vertailussa tarkastellaan ainoastaan laitteista oletuksena löyty-

viin liitäntöjä, eli erilaisilla laajennusratkaisuilla lisättävissä olevat liitännät jätettiin vertailun ulkopuolelle. Rajaus tehtiin, koska kaikki laitteet tarjosivat oletuksena ainakin jonkin ohjausliitännän, jolloin lisämoduulien hankkiminen ei ole välttämätöntä laitteen liittämiseksi mittausautomaatiojärjestelmään.

Taulukko 4.3 Käytettävissä olevien mittalaitteiden ulkoiset liitännät ja niiden tukemat protokollat. Tiedot on kerätty valmistajien datalehdistä. (Keithley 2019, s. 24; Keithley 2020a, s. 20; Keysight 2020, s. 26; NI 2017, s. 7; NI, 2016b, s. 9, 12, 13, 18).

Mittalaite	RJ45	USB (Device)	Muut liitännät
Keysight 34465A	LXI (rev 1.4)	USB-TMC488, MTP	USB A (Host)
Keysight 34461A	LXI (rev 1.4)	USB-TMC488, MTP	USB A (Host)
Keithley DMM6500	LAN/LXI (1.4)	USBTMC	USB A (Host)
Keithley DAQ6510	LAN/LXI (1.4)	USBTMC	USB A (Host)
NI cDAQ-9189	LAN	-	-
NI cRIO-9074	LAN	-	RS-232

Taulukosta 4.3 havaitaan, että kaikista vertailussa mukana olleista laitteista löytyy RJ45-liitäntä, joka tukee jotain internet-protokollaa. Osa laitteista tukee tavallista LAN (Local Area Network, lähiverkko) -protokollaa ja osa LXI (Lan eXtension for Instrumentation) -protokollaa, joka on LAN-standardin pohjalta tehty mittalaitteikäyttöön tarkoitettu protokolla (LXIStandard 2021).

Lisäksi kaikista tarkastelluista penkkiyleismittareista löytyy USB (Universal Serial Bus) -liitäntä, joka tukee USBTMC (USB Test and Measurement Class) -protokollaa. Lisäksi penkkiyleismittareista löytyy myös USB A -tyyppinen liitäntä, joka on tarkoitettu mittausdatan tallentamiseksi suoraan yleismittarista USB-tallennusvälineelle, esimerkiksi muistitikulle. Tarkastellusta cRIO-alustasta löytyy lisäksi RS-232 (Recommended Standard 232) -tyyppinen sarjaportti, joka on tarkoitettu ulkoisten laitteiden liittämiseen.

4.2.2 Ohjelmistojen vertailu

Ohjelmistojen vertailuun otettiin vertailussa mukana olevien mittalaitteiden valmistajien omat ohjelmistot, koska ne on lähtökohtaisesti suunniteltu yhteensopiviksi valmistajan omien laitteiden kanssa. Vertailun mittalaitteiden valmistajien omat ohjelmistot ovat Keysight BenchVue, Keithley KickStart ja National Instruments LabVIEW. Lisäksi vertailuun otettiin MathWorksin MATLAB-ohjelmisto, jota käytetään antureiden testauksesta saatavan mittausdatan analysointiin ja visualisointiin ja joka tukee joidenkin mittalaitteiden ohjaamista.

Keysight'in BenchVue ja Keithley:n KickStart ovat melko pelkistettyjä ohjelmia, jotka on tarkoitettu kyseisten valmistajien omien mittalaitteiden etäohjaamiseen ja niiltä luetun mittausdatan tallentamiseen. Ohjelmien tarkoitus on tarjota yksinkertainen tapa laitteiden liittämiseksi tietokoneeseen ja mittausdatan tallentamiseksi. Niiden heikkouksia ovat rajoittuneet ominaisuudet laajempien mittausautomaatiojärjestelmien toteuttamiseen ja sekavat lisensioimallit, joissa ohjelmistoihin voi ostaa erillisiä moduuleita erityyppisten laitteiden liittämiseksi. (Keithley 2020b, s. 1, 2, 3, 10; Keysight 2019, s. 2, 3, 8, 20.)

LabVIEW on National Instruments:in kehittämä graafinen kehitysympäristö, jota käytetään laajasti erilaisten testaus- ja mittaus- ja automaatio-sovellusten toteuttamiseen useilla teollisuuden aloilla (Ehsani 2016, s. 8; Ponce Cruz ym. 2010, s. 15). Se on huomattavasti monipuolisempi verrattuna aiemmin käsiteltyihin ohjelmiin, mutta toisaalta yksinkertaisten sovellusten luominen sillä on työläämpää. LabVIEW:lle löytyy laiteajureita NI:n omien laitteiden lisäksi useiden eri valmistajien mittalaitteille (NI 2021b).

MATLAB on MathWorks:in ohjelmisto, jota käytetään mm. numeeriseen laskentaan, mitausdatan analysointiin ja visualisointiin, sekä erilaisten järjestelmien mallintamiseen ja simuloimiseen (Lindfield ym 2012, s. 1). Ohjelmistoon on saatavilla lukuisia erilaisia laajennuksia (Toolbox), esimerkiksi Data Acquisition Toolbox™ -lisäosa antaa mahdollisuuden ohjata useita erilaisia mittalaitteita (MathWorks 2021a). LabVIEW ja MATLAB ovat muiden käsiteltyjen ohjelmistojen tapaan maksullisia, mutta LUT-yliopistolla on niille akateemiset lisenssit.

Taulukossa 4.4 on esitetty tarkasteltavien ohjelmistojen tuki vertailussa mukana oleville mittalaitteille.

Taulukko 4.4 Tarkasteltavien ohjelmistojen tuki vertailtaville mittalaitteille. (Keithley 2020b; Keysight 2019, s. 22; MathWorks 2021b; NI 2021b; NI 2020).

Mittalaite	BenchVue	KickStart	LabVIEW	MATLAB
Keysight 34465A	x	-	x	x
Keysight 34461A	x	-	x	x
Keithley DMM6500	-	x	x	x
Keithley DAQ6510	-	x	x	x
NI cDAQ-9189	-	-	x	x
NI cRIO-9074	-	-	x*	-

*) Tuki poistunut ohjelmiston viimeisimmässä versiossa (20.0).

Taulukkoon 4.4 kerätyistä tiedoista huomataan, että Keysight:in ja Keithley:n ohjelmat tukevat ainoastaan valmistajien omia laitteita. MATLAB tukee Data Acquisition Toolbox:n avulla vertailussa mukana olleita penkkimallisia yleismittareita, sekä cDAQ-9189-alustaa. LabVIEW tukee kaikkia vertailun mittalaitteita, mutta ohjelman viimeisimmästä 20.0-versiosta on poistunut tuki NI cRIO-9074-alustalle (NI 2020).

5. MITTAUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelu aloitetaan tarkastelemalla mittausjärjestelyssä olevien muiden laitteiden ohjaustarvetta ja ohjaukseen käytettävissä olevia menetelmiä. Tämän jälkeen valitaan käytettävät mittalaitteet osiossa 4.1 esitettyjen vertailujen tulosten perusteella. Laitteiden valinnassa tarkastellaan mittauskanaville asetettujen vaatimusten täytymistä, valituista laitteista muodostuvaa mittausautomaatiojärjestelmää kokonaisuutena, sekä mahdollisuuksia mittausjärjestelyn muiden laitteiden ohjaamiseen.

Mittalaitteiden valinnan jälkeen valitaan mittausautomaatiojärjestelmän ohjaamisessa käytettävä ohjelmisto. Ohjelmistoja tarkastellaan osiossa 4.2.2 esitettyjen eri ohjelmistojen mittalaitetukien näkökulmasta. Lisäksi tarkastellaan ohjelmistojen tarjoamia mahdollisuuksia muiden mittausjärjestelyn laitteiden ohjaamiseen.

5.1 Muiden laitteiden ohjaaminen

Mittalaitteiden ohjaamisen ja mittausdatan tallentamisen lisäksi mittausjärjestelmän tehtävänä on ohjata muita testausjärjestelyssä olevia laitteita. Lämpövuointurien testaamiseen aikaisemmin käytetyssä järjestelmässä oleellimmat ohjausta vaativat laitteet ovat piikiekon alustan lämpötilaa säätävä Temptronic TP03000 – ThermoChuck® -lämpöalustajärjestelmä ja piikiekon yläpuolella oleva musta kappale. Testausasetelmasta riippuen ohjattavat laitteet ja niiden vaatimat ohjausrajapinnat voivat kuitenkin vaihdella.

Mittausjärjestelyssä piikiekon yläpuolella oleva musta kappale koostuu kahden jäähdytyslevyn väliin asetetuista peltier-elementeistä. Aiemmissa testeissä mustaa kappaletta on ajettu vakiovirralla ja -jännitteellä laboratorioteholähteestä, jolloin sen alapinta asettuu lämpötilaan, jossa kappaleesta poistuva lämpöteho on yhtä suuri kuin siihen syötettävä sähköteho. Mittalaitteiden valinnan ja mittausautomaatiojärjestelmän toteutuksen yhteydessä tarkastellaan mahdollisuutta antaa mustalle kappaleelle digitaalinen ohjaussignaali digitaalista I/O:ta käyttäen. Vastaavia digitaalisia ohjaussignaaleja voidaan tarpeen mukaan hyödyntää myös muiden laitteiden ohjaamisessa.

TP03000-lämpöalustajärjestelmää on aikaisemmin tehdyissä testeissä ohjattu manuaalisesti laitteiston ohjauspaneelista. Sekuntikellon avulla ajastetut manuaaliset lämpötilan asetusarvon muuttamiset ovat tuoneet testausprosessiin manuaalisia työvaiheita, ja heikentäneet testauksen toistettavuutta eri testikertojen välillä.

Lämpöalustan ohjauksen automatisoinnilla voitaisiin oleellisesti vähentää testausprosessin manuaalisia työvaiheita ja samalla parantaa mittauksen toistettavuutta, jotka olivat mittausautomaation suunnittelun ja toteuttamisen tavoitteita. Lämpöalustajärjestelmää on mahdollista etäohjata GPIB- ja RS-232-väylien välityksellä (Temptronic 2011, s. 36), joten sen liittäminen mittausautomaatiojärjestelmään on sen puolesta mahdollista. Haasteena lämpöalustan ohjauksessa on ohjaukseen käytettävien komentojen puutteellinen dokumentointi.

5.2 Mittalaitteiden valinta

Mittalaitteiden valinnassa painotetaan mittausautomaatiojärjestelmän mittauskanaville asetettujen mittausalue-, resoluutio- ja näytteistystaajuusvaatimusten täyttymistä, joita on tarkasteltu osiossa 4.1. Lisäksi osiossa 3.2 asetettiin yhdeksi suunnittelutavoitteeksi mahdolli-

simman yksinkertainen rakenne säilyttäen kuitenkin mahdollisuus tarvittaessa laajentaa järjestelmää myöhemmin, mikä otetaan myös huomioon käytettävien mittalaitteiden valinnassa.

Osiossa 4.1.1 esitetyn jännitteenmittauskanavien ominaisuuksien vertailun perusteella havaitaan, että lähimmäs DUT-kanavalle asetettua resoluutiovaatimusta päästään NI 9219-moduulilla. Alkuperäinen 10 nV vaatimus ei aivan täyty, mutta moduulin tarjoama 15 nV resoluutio on riittävän lähellä alkuperäistä vaatimusta, joten uusien mittalaitteiden hankkiminen ei ole tässä vaiheessa järkevää. Valitaan kyseinen moduuli DUT-kanavan jännitteen mittamiseen.

Kuten osiossa 4.2.1 on todettu, National Instruments:in C Series:n moduulit tarvitsevat toimiakseen jonkin cDAQ tai cRIO -alustan. Kyseiset alustat tukevat yleensä useiden C Series:n I/O-moduulien liittämistä samanaikaisesti (NI 2016b; NI 2017). Kun järjestelmään on valittu yksi kyseinen moduuli ja sille soveltuva alusta, voidaan järjestelmän kokonaisrakenne pitää yksinkertaisempänä ja hinta matalampana, kun valitaan järjestelmään useampia saman alustan kanssa yhteensopivia moduuleja sen sijaan että jokaiselle kanavalle valittaisiin oma kokonaan erillinen mittalaite.

Referenssilämpövoantureiden kanavien resoluutiovaatimus on 100 nV. NI 9219-moduuli täyttää myös tämän vaatimuksen, joten valitaan myös näiden kanavien jännitteiden mittamiseen. Kyseessä on nelikanavainen moduuli, joten DUT-anturin ja neljän referenssilämpövoanturin jännitteiden mittaamiseen tarvitaan yhteensä kaksi moduulia. Näin järjestelmään jää vapaaksi vielä kolme lämpövoanturien signaalien mittaamiseen soveltuva kanavaa, joita voidaan mahdollisesti tarvita joissain testausjärjestelyissä.

Mittalaitteiden RTD-kanavien vertailussa oli mukana C Series:n moduuli NI 9216, joka on kahdeksankanavainen lämpötilanmittausmoduuli. Moduuli täyttää RTD-kanaville asetetut vaatimukset mittaalueen ja -resoluution osalta. Myös vaatimus 1 Hz näytteistystaajuudesta täyttyy, kun käytetään korkeintaan viittä kanavaa. RTD-kanavien lukumääräksi asetettiin järjestelmän vaatimuksissa kolme, jolloin vaatimus näytteistystaajuudesta täyttyy. Valitaan kyseinen moduuli RTD-anturien signaalien mittaamiseen.

Moduulien alustaksi on valittavissa joko cDAQ-9189 tai cRIO-9074-alusta, jotka tukevat molemmat enintään kahdeksan erillisen moduulin liittämistä. Alustojen suurin eroavaisuus on, että cRIO-9074-alustasta löytyy sisäinen FPGA (Field-programmable gate array), ja se on suunniteltu erityisesti sovellutuksiin, joissa järjestelmältä vaaditaan nopeaa vastetta. Toinen tarkasteltavista alustoista, cDAQ-9189, on puolestaan tarkoitettu ensisijaisesti DAQ-järjestelmien toteuttamiseen. (NI 2016b; NI 2017.)

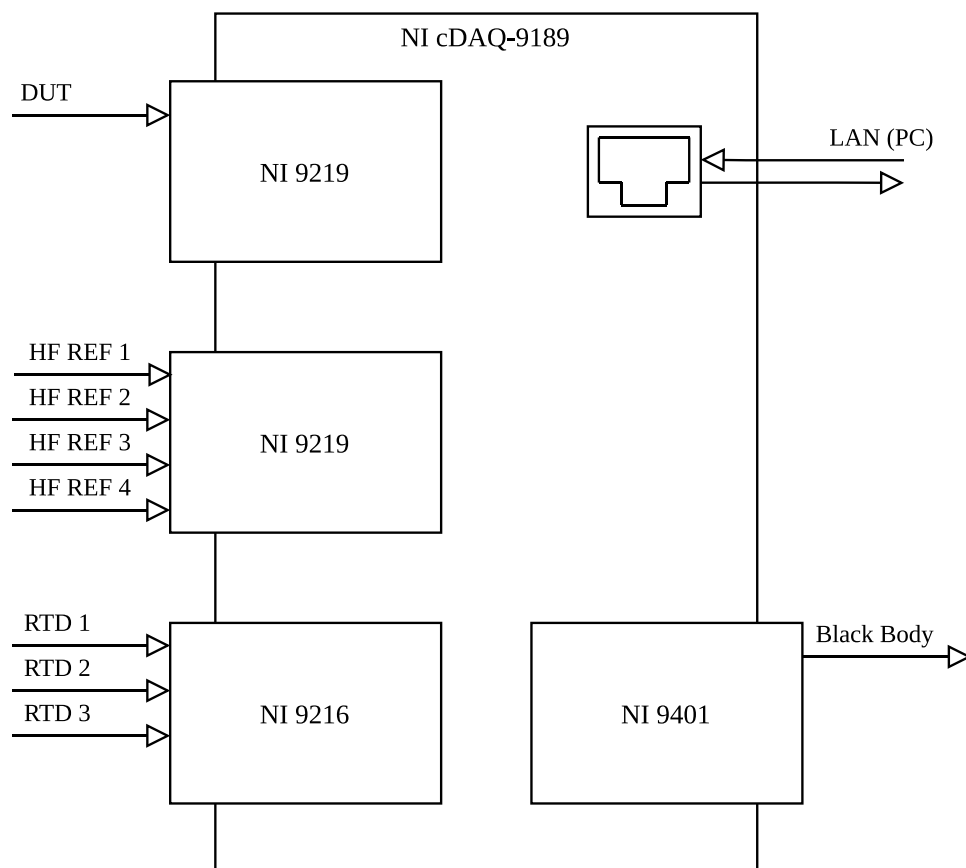
Toteutettavan mittausautomaatiojärjestelmän kannalta cRIO-9074-alustan etuna on RS-232-sarjaportti, jota voitaisiin käyttää esimerkiksi alkuperäiseen testausjärjestelyyn kuuluvan lämpöalustajärjestelmän ohjaamiseen, kuten osiossa 5.1 on käsitelty. Kyseisen cRIO-alustan heikkoutena on kuitenkin laitteen iästä johtuva huono ohjelmatuki. Laitteen valmistajan oman ohjelmiston, LabVIEW:n, uusimmassa 20.0-versiossa on poistettu ajurituki kyseiselle laitteelle, kuten osiossa 4.2.2 on esitetty.

cDAQ-9189-alustan etuna on cRIO-alustaa parempi ohjelmatuki. Kuten osiossa 4.2.2 on esitetty, sille löytyvät ajurit uusimmasta LabVIEW-versiosta, ja lisäksi sille löytyy tuki

Mathworks:in MATLAB-ohjelmistosta. Paremman ohjelmistotuen perusteella valitaan järjestelmän rungoksi cDAQ-9189, jotta järjestelmässä ei tarvitse alusta alkaen käyttää vanhentunutta ohjelmistoversiota.

Osiassa 2 kuvatussa mittausjärjestelyssä olevaa mustaa kappaletta voidaan ohjata digitaalisella ohjaussignaaleilla. Digitaalisia ohjaussignaaleja voidaan hyödyntää myös muiden laitteiden ohjauksessa. Käsiteltävän järjestelmän tapauksessa digitaalinen ohjaussignaali voidaan toteuttaa lisäämällä järjestelmään NI 9401-moduuli. Kyseessä on kahdekskanavainen digitaalinen I/O-moduuli, jonka nimellinen jännitetaso on 5 V ja jonka kaikkia kanavia voidaan käyttää joko sisään- tai ulostuloina (NI 2015).

Kuvassa 5.1 on esitetty kaaviokuva cDAQ-alustasta ja siihen liitetyistä moduuleista, sekä niiden ulkoiset liitännät ja mittauskanavat.



Kuva 5.1 cDAQ-alusta ja siihen liitetyt moduulit. Iso nelikulmio keskellä kuvaa NI cDAQ-9189-alustaa, vasemmalla sisääntulojen lukemiseen käytettävät I/O-moduulit ja niiden käytössä olevat kanavat. Oikealla RJ45-liitäntä järjestelmän liittämiseksi tietokoneeseen, sekä digitaalisen ohjaussignaalin antamiseen soveltuva I/O-moduuli.

Mittauskanavien ja digitaalisen I/O:n tarvitsemien moduulien liittämisen jälkeen cDAQ-9189-alustaan jää vapaaksi neljä siinä olevista kahdeksasta moduulipaikasta. Lisäksi liitetyissä moduuleissa on vielä jäljellä vapaita jännite- ja lämpötilanmittaus-, sekä digitaalisia I/O-kanavia. Järjestelmässä on siis hyvät mahdollisuudet laajentaa sitä tarvittaessa myöhemmin. Kuvasta 5.1 on selkeyden vuoksi jätetty pois käyttämättömät kanavat ja moduulipaikat, sekä laitteen tehonsyöttö.

Koska valitussa cDAQ-alustassa ei ole sarjaporttia, täytyy esimerkiksi TP03000-lämpöalustajärjestelmä liittää suoraan tietokoneeseen. Tämä onnistuu joko suoraan sarjaporttikaapelilla, jos tietokoneessa on RS-232-sarjaportti, tai vaihtoehtoisesti käyttäen esimerkiksi USB-RS232-adapterikaapelia.

5.3 Käytettävän ohjelmiston valinta

Mittausautomaatiojärjestelmän ohjaamiseen käytettävän ohjelmiston valinnassa tarkastellaan osiossa 4.2.2 esitettyjä eri ohjelmistojen mittalaitetukia edellisessä kohdassa valittujen mittalaitteiden osalta.

Valitulle NI cDAQ-9189-alustalle löytyy taulukkoon 4.4 kirjattujen tietojen mukaisesti tuki LabVIEW ja MATLAB-ohjelmistoista. LabVIEW National Instruments:in oma ohjelmisto, jolloin se todennäköisesti tarjoaa kattavimman tuen alustalle. Toisaalta MATLAB:ia käytetään antureiden testausprosessissa jo mittausdatan analysointiin ja visualisointiin, joten se olisi luonnollinen valinta myös mittausjärjestelyn ohjaamiseen.

Valitaan mittausautomaatiojärjestelmän toteuttamiseen ohjelmistoksi MATLAB. Näin testausprosessista saadaan ohjelmistojen osalta mahdollisimman yksinkertainen, kun kaikki tapahtuu yhden ohjelman sisällä. Tällöin ohjelmistoa ei tarvitse vaihtaa kesken testausprosessin, jolloin vältetään mm. mittausdatan siirtämiseltä eri ohjelmien välillä.

Mittausjärjestelyssä olevan mustan kappaleen ohjaus suunniteltiin hoidettavan cDAQ-9189-alustaan liitetyn digitaalisen I/O-moduulin kautta, jolloin sille tulee ohjelmistotuki cDAQ-alustan ohjelmistotuen mukana. Samalla moduulilla voidaan tarpeen mukaan ohjata myös muita digitaalisen ohjaussignaalin tarvitsevia laitteita ja samaa moduulia voidaan tarvittaessa hyödyntää myös digitaalisten tulosignaalien lukemisessa (NI 2015).

TP03000-lämpöalustajärjestelmän ohjaus tapahtuu tietokoneen sarjaportin kautta. MATLAB:lle löytyy tarvittavat työkalut sarjaporttiliitäntäisten laitteiden kanssa kommunikointiin (MathWorks 2021c), joten lämpöalustajärjestelmän ja muiden sarjaliitäntäisten laitteiden ohjaaminen MATLAB:lla on mahdollista.

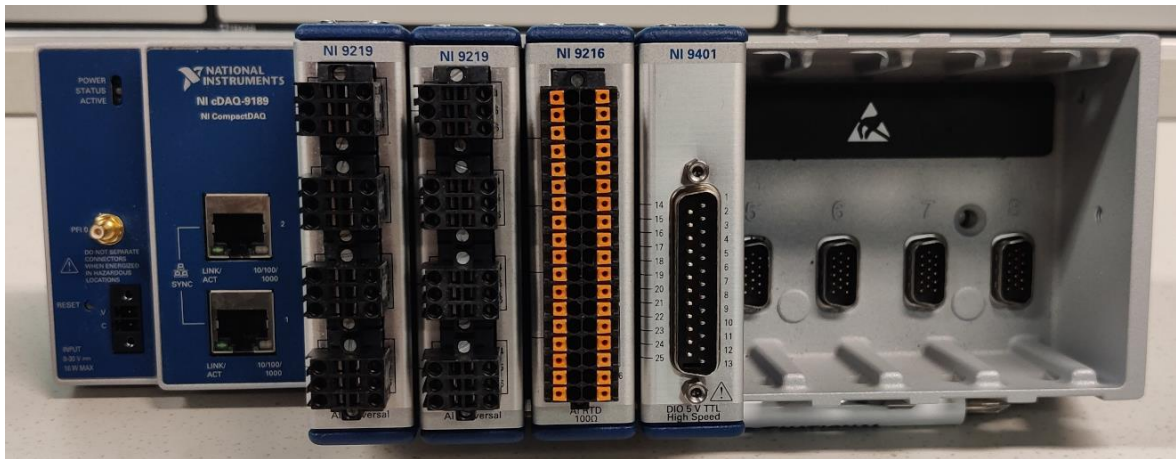
MATLAB tarjoaa useita erilaisia tapoja luoja ohjelmia. Perinteisten, puhtaasti tekstistä koostuvien, skriptien lisäksi on mahdollista luoda graafisia käyttöliittymiä useilla eri tavoilla (MathWorks 2021d). Tämän työn puitteissa mittausautomaatiojärjestelmän ohjelmaosan toteutustavaksi valittiin perinteinen MATLAB-skripti. Näin ohjelma on rakenteeltaan mahdollisimman yksinkertainen ja siten mahdollisimman helposti ymmärrettävissä ja muokattavissa eri tarkoituksiin kaikille testausjärjestelyä käyttäville henkilöille. Erilaisilla graafisilla käyttöliittymillä voitaisiin todennäköisesti saavuttaa ulkoasullisesti ja toiminnallisesti vii-meistellympiä lopputuloksia, mutta koska rakennettava järjestelmä on vielä kehitys- ja testausvaiheessa, tätä ei katsottu oleelliseksi tekijäksi.

6. MITTAUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN TOTEUTTAMINEN

Kun käytettävät mittalaitteet ja ohjelmisto on valittu, vuorossa on mittausautomaatiojärjestelmän toteuttaminen. Tämän kandidaatintyön puitteissa toteutetaan järjestelmän DAQ-osio, jonka toteuttaminen koostuu järjestelmän rakentamisesta valittujen mittalaitteiden pohjalta, sekä järjestelmän ohjelmoinnista. Järjestelmän ohjelmoinnin ohessa tehdään myös jonkin verran alustavaa testaamista, koska järjestelmää on järkevä testata jo toteuttamisen aikana, jolloin mahdolliset ongelmat voidaan ratkaista mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.

6.1 DAQ-järjestelmän rakentaminen

Mittausautomaatiojärjestelmän DAQ-osion toteuttaminen aloitettiin osiossa 5.2 valittujen mittalaitteiden yhdistämisellä yhdeksi järjestelmäksi. Koska valitut mittalaitteet kuuluvat National Instruments'in modulaariseen DAQ-järjestelmään, laitteiden yhdistäminen toisiinsa oli yksinkertaista. Valitut I/O-moduulit liitettiin cDAQ-9189-alustaan ja järjestelmän mekaaninen toteutus oli valmis. Kuvassa 6.1 on esitetty valokuva cDAQ-alustasta I/O-moduuleineen.



Kuva 6.1 cDAQ 9189-alusta ja valitut I/O-moduulit. Vasemmassa laidassa cDAQ-alustan virtaliitin ja RJ45-verkkoliitännät, näiden oikealla puolella alustaan liitetyt I/O-moduulit ja oikeassa laidassa vapaat moduulipaikat.

Valmistaja ilmoittaa cDAQ-9189-alustan käyttöjännitealueeksi 9–30 V tasajännitettä ja suurimmaksi tehonkulutukseksi 16 W. Ilmoitettuun tehonkulutukseen on laskettu mukaan 1 W jokaiselle järjestelmään liitettävissä olevalle kahdeksalle moduulille, joten itse cDAQ-alustan maksimitehokulutukseksi saadaan 8 W. (NI 2017, s. 8.) NI 9219-moduulille ilmoitetaan tehontarpeeksi maksimissaan 750 mW (NI 2016a, s. 13), NI 9216-moduulille 517 mW (NI, 2018, s. 7) ja NI 9401-moduulille 580 mW (NI 2015, s. 6). Järjestelmän kokonaistehonkulutukseksi saadaan näin maksimissaan hieman alle 11 W.

Alustan tehonsyöttöön käytetään alustan mukana tullutta hakkuriteholähdettä, jolle ilmoitettiin nimellisjännitteeksi 12 V ja nimellisvirraksi 1,25 A. Teholähteen lähtötehoksi saadaan laskettua 15 W, joten teholähde soveltuu nimellisjännitteensä ja -tehonsa puolesta cDAQ-järjestelmän syöttämiseen, kun käytetään osiossa 5.2 valittuja I/O-moduuleja. Teholähteen puolesta järjestelmään jää myös vielä jonkin verran laajennusvaraa.

Tehonsyötön kytkemisen jälkeen järjestelmä yhdistettiin LAN-kaapelilla tietokoneeseen ja varmistettiin alustan ja moduulien toiminta. Ensimmäisenä tarkistettiin NI Measurement &

Automation Explorer (NI MAX):n avulla, että tietokone tunnistaa yhdistetyn cDAQ-alustan ja siihen liitetyt moduulit. Samalla alustalle annettiin uusi nimi, jotta se erottuu muista vastaavista alustoista.

6.2 Järjestelmän ohjelmointi ja alustava testaus

Kun NI MAX:n avulla oli varmistettu, että tietokone tunnistaa cDAQ-laitteiston, laitteistoon yhdistämistä kokeiltiin MATLAB:n avulla. MATLAB tunnisti cDAQ-alustan ja kaikki siihen liitetyt I/O-moduulit ilman ongelmia, joten seuraavaksi kokeiltiin alustan ja siihen liitettyjen moduulien mittauskanavien asetusten määrittämistä. Alustalle asetettiin näytteistystaajuudeksi vaatimusten mukainen 1 Hz ja mittauskanaville asetettiin mittausalueet taulukoiden 4.1 ja 4.2 mukaisesti. Jännitekanavien mittausalueiksi määritettiin ± 125 mV ja lämpötilakanavien tyypiksi määritettiin RTD. Lisäksi kaikkien moduulien ADC:t määritettiin toimimaan korkean resoluution tilassa, jolloin saavutetaan paras mahdollinen mittausresoluutio.

Asetusten määrittämisen jälkeen kokeiltiin mittauskanavien lukemista. Ensimmäisenä luettiin yksittäisiltä kanavilta yksittäisiä näytteitä, minkä jälkeen lisättiin kanavien ja otettavien näytteiden määrää. Tarkoituksena oli ensimmäiseksi varmistaa, että järjestelmän eri kanavia on mahdollista käyttää mittaamiseen MATLAB:n avulla, ja sen jälkeen kokeilla järjestelmältä vaadittujen kanavien näytteistämistä samanaikaisesti vaaditulla 1 Hz:n taajuudella.

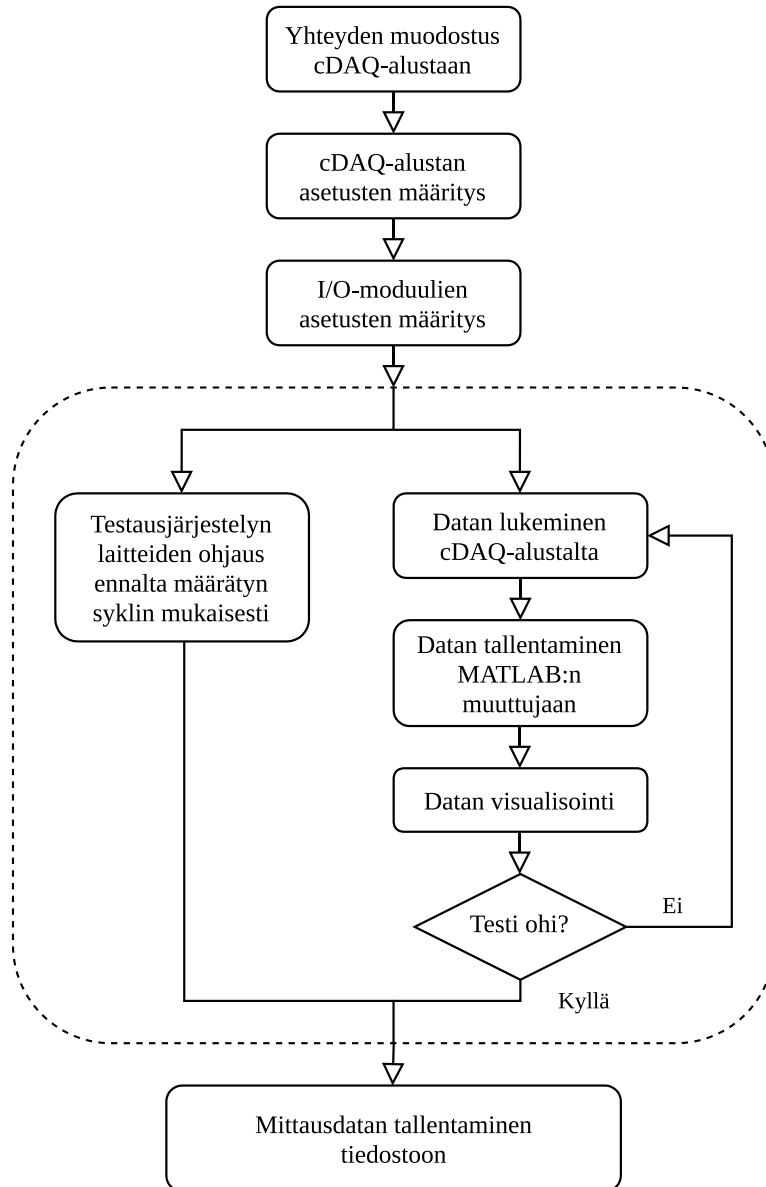
Ensimmäisissä testeissä järjestelmän mittauskanaviin ei kytketty signaalilähteitä, koska se ei ollut tarpeellista eri kanavien näytteistämisen testaamiseksi. Alustavien testien perusteella todettiin, että kaikkien taulukossa 3.1 esitettyjen kanavien yhtäaikainen näytteistäminen vaaditulla 1 Hz taajuudella onnistuu.

Kun vaadittujen kanavien yhtäaikaisen mittaamisen oli todettu onnistuvan, alettiin ohjelmoidaan tämän työn näkökulmasta lopullista ohjelmaversiota. Ohjelma toteutettiin siten, että ohjelman alussa muodostetaan yhteys cDAQ-alustan kanssa ja asetetaan alustan näytteistystaajuus. Tämän jälkeen ohjelma määrittää käytettäville mittauskanaville kanavatyyppin ja mittausalueen, sekä analogisille input -moduuleille ADC:n toimintatilan.

Kun tarvittavat asetukset on määritetty, ohjelmassa on vuorossa varsinainen mittausprosessi, johon kuuluu kanavien näytteistäminen halutulla taajuudella, sekä mahdollisesti ohjaussignaalien antaminen muille laitteille. Mittausdatan lukeminen cDAQ-järjestelmältä toteutetaan varsinaisesta MATLAB-ohjelmasta erillään omassa taustaprosessissaan, jolloin MATLAB-ohjelmaa voidaan käyttää muiden laitteiden ohjaamiseen. Mittausdatan lukemisen yhteydessä dataa on myös mahdollista visualisoida jo mittauksen aikana, jolloin mahdolliset anturiviat ja muut ongelmat voidaan havaita jo testauksen aikana.

Kun testausprosessi on saatu suoritettua ja sen aikana kerätty mittausdata on tallennettu väliaikaisesti ohjelman muuttuinaan, kirjoitetaan data tiedostoon. cDAQ-järjestelmältä kerätty data on MATLAB:n timetable-muodossa, joka on käytännössä matriisi, jonka jokaiselle riville on määritetty ajanhetki ja jonka sarakkeissa on kyseisenä ajanhetkenä eri kanavilta mitatut arvot. Timetable-muotoisen datan tallentamiseen ja lukemiseen tiedostoista voidaan käyttää siihen tarkoitettuja MATLAB-funktioita. (MathWorks 2021e.)

Kuvassa 6.2 on esitetty ohjelman rakenne tärkeimpien osioiden osalta. Suorakulmiot kuvaavat ohjelman eri vaiheita ja niiden väliset nuolet ohjelman etenemistä. Katkoviivalla rajattu osio kuvaa varsinaista antureiden testausprosessia.



Kuva 6.2 Järjestelmän ohjauksessa käytettävän MATLAB-ohjelman rakenne pääpiirteissään. Suorakulmiot kuvaavat erillisiä koodiosioita, joilla kaikilla on oma tehtävänsä ja nuolet kuvaavat etenemistä osiosta toiseen. Katkoviivalla rajattu alue kuvaa varsinaista testausprosessia, jonka aikana ohjataan testausjärjestelyn laitteita halutun testisyklin mukaisesti ja tallennetaan cDAQ-alustalta luettavaa mittausdataa.

Kuvasta 6.2 havaitaan myös kaksi erillistä ohjelmahaaraa varsinaisen testausprosessin aikana, joista toinen hoitaa mittausdatan lukemisen ja tallentamisen, ja toinen mittausjärjestelyn muiden laitteiden ohjaamisen.

7. JÄRJESTELMÄN TESTAAMINEN

Aikaisemmin ohjelmoinnin yhteydessä cDAQ-järjestelmälle tehtiin yleisen tason testausta, jotta voitiin varmistua käytettävien laitteiden toiminnasta MATLAB:n kanssa. Kun ohjelmoinnissa oli päästy vaiheeseen, jossa kaikkien vaadittujen kanavien näytteistäminen vaaditulla näytteistystaajuudella onnistuu, ja mittausdata saadaan tallennettua tiedostoon, testattiin järjestelmän mittausresoluutiota.

Mittausresoluution testaamisen jälkeen kokeiltiin järjestelmän toimintaa lämpövuointureiden testaamisessa käytännössä. Käytännön testausta ei tehty osioissa 2 kuvatulla testausjärjestelyllä ja -prosessilla, mutta testattavat anturit ovat molemmissa testausjärjestelyissä samoja. Käytännön testaukseen valittiin toinen testausjärjestely, koska mittausautomaatiojärjestelmän liittäminen kyseiseen järjestelyyn oli yksinkertaisempaa, ja koska tarkoituksena oli tarkastella mittausautomaatiojärjestelmän, ei niinkään yksittäisen testausjärjestelyn, toimintaa.

7.1 Jänniteresoluution testaaminen

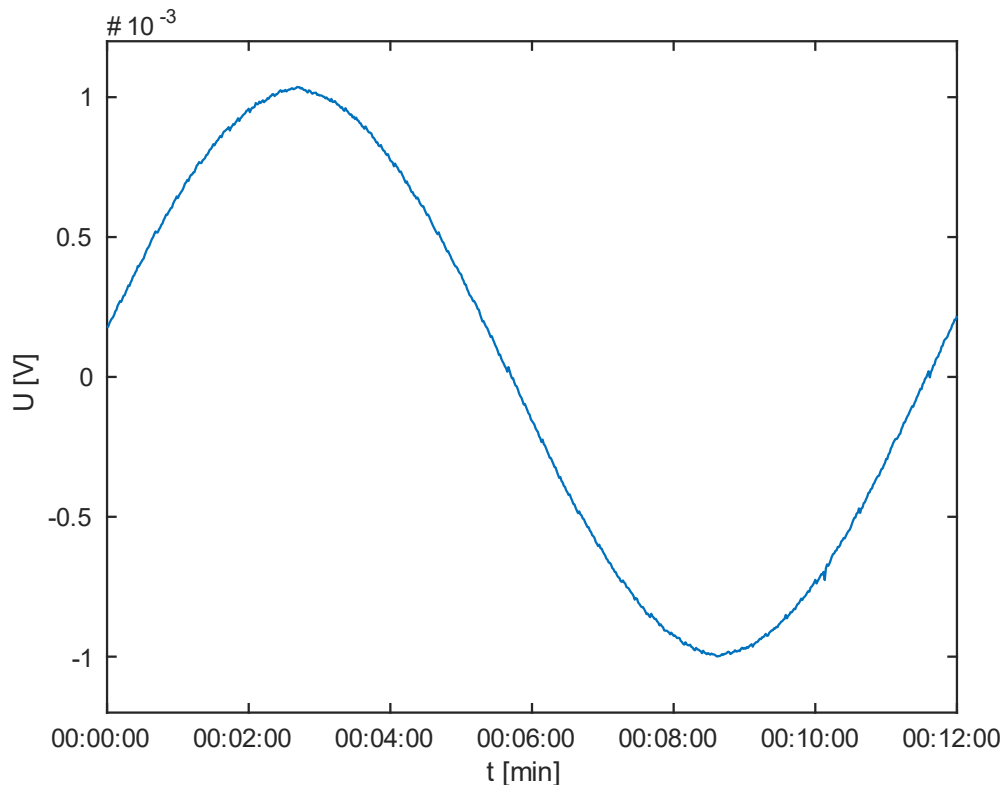
Lämpövuointurien jännitteiden mittaamiseen käytettävien jännitekanavien mittausresoluutiota testataan syöttämällä kanavalle signaalia Agilent 33250A-signaaligeneraattorilla. Mittauksen tavoitteena on määrittää mittauskanavan jänniteresoluutio ensin näytteistämällä jännitesignaalia, ja sen jälkeen tarkastelemalla, mikä on pienin ero kahden A/D-muunnetussa signaalissa esiintyvän arvon välillä. Jännitekanavien resoluutiota tarkastellaan lämpötilakanavista poiketen erikseen, koska jännitekanaville on asetettu tiukemmat vaatimukset. Lisäksi testisignaalin luominen jännitekanaville on helpompaa kuin lämpötilakanaville.

Kaikkien A/D-muuntimen lävitse kulkeneessa signaalissa esiintyvien, keskenään erisuurten, arvojen etäisyys toisistaan on käytetyn A/D-muuntimen resoluution monikerta. Tutkimalla, mikä on pienin nollasta poikkeava etäisyys kahden eri näytteen välillä, saadaan arvio järjestelmän resoluutiosta. Kyseinen pienin etäisyys voi kuitenkin signaalista riippuen olla edelleen mittausresoluution monikerta, eli tällä menetelmällä ei välttämättä löydetä järjestelmän todellista resoluutiota.

Jotta todennäköisyys havaita järjestelmän todellinen mittausresoluutio näytteistetyssä signaalissa olisi mahdollisimman suuri, testaukseen käytettävän signaalin amplitudi valittiin pieneksi ja taajuus matalaksi. Näin mitattavassa signaalissa tapahtuva amplitudin muutos otettavien näytteiden välillä saadaan pieneksi.

Syötettäväksi signaaliksi valittiin siniaalto, jonka jaksonajaksi asetettiin 12 minuuttia ja amplitudiksi 2 mVpp. 12 minuutin jaksonaika valittiin aikaisemmin tehtyjen testien keston perusteella ja jännitteeksi valittiin pienin mahdollinen, joka käytetyllä signaaligeneraattorilla oli mahdollista saavuttaa. Aaltomuodoksi valittiin siniaalto, koska käytännön testaamisella havaittiin, että käytetty signaaligeneraattori tuottaa valitulla amplitudilla ja taajuudella siisteimmän signaalin, kun aaltomuodoksi on valittu siniaalto.

Tarkastellun mittauskanavan mittausalueeksi asetettiin ± 125 mV, joka on sama mittausalue, jota tullaan käyttämään antureiden signaalien mittaamiseen. Järjestelmällä näytteistetty signaali on esitetty ajan funktiona kuvassa 7.1.



Kuva 7.1 cDAQ-järjestelmällä näytteistetty siniaalto. Signaalilähteenä käytettiin signaaligeneraattoria, johon asetettiin jaksonajaksi 12 minuuttia ja jännitteeksi 2 mVpp.

Näytteistetyistä signaaleista etsittiin pienin ero mitattujen arvojen välillä käyttäen MATLAB:ia. Tulokseksi saatiin noin 15 nV, joka on sama, kuin käytetylle mittauskanavalle osiossa 4.1.1 esitetty laskennallinen resoluutio. Teoriassa havaittu 15 nV voisi olla myös järjestelmän mittausresoluution moninkertaina, mutta koska havaittu resoluutio vastaa aiemmin esitettyä järjestelmän nimellistä resoluutiota, tämä ei ole todennäköistä.

7.2 Käytännön testaaminen

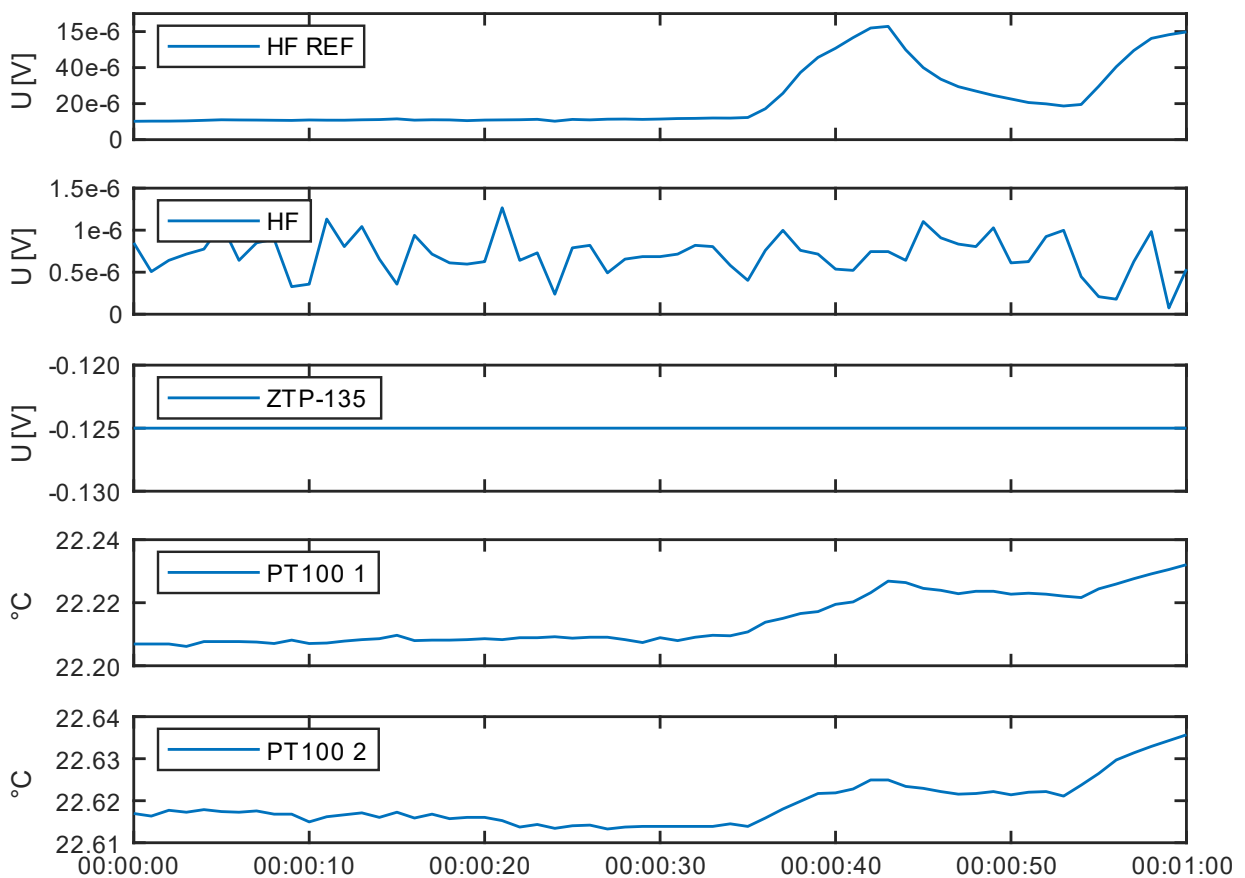
Käytännön testaamisen tarkoituksena oli kokeilla järjestelmän toimintaa varsinaisten lämpövuo- ja lämpötila-antureiden tuottamien signaalien mittaamisessa. Lisäksi tarkastellaan kanavien mittausresoluutioita, sekä useiden kanavien samanaikaista näytteistämistä ja mittaustulosten tallentamista käytännön testiasetelmassa.

Käytetty testausjärjestely on tarkoitettu lämpövuoantureiden testaamiseen infrapunasäteilyn (Infra Red, IR) havaitsemisessa. Järjestelyssä on osiossa 2 esitetyn testausjärjestelyn tavoin tarve mitata useita jännite- ja lämpötilakanavia yhtäaikaaisesti. Järjestelyyn kuuluu erilaisten antureiden lisäksi myös herätteen antamiseen käytettäviä ledejä, mutta niiden ohjaamista järjestelmällä ei vielä tässä vaiheessa kokeiltu.

Testauksessa järjestelmän jännitekanaviin kytkettiin yksi varsinaisista testattavista lämpövuoantureista, yksi referenssilämpövuoanturi, sekä ZTP-135 -tyyppinen IR-anturi. Lämpötilakanaviin kytkettiin kaksi PT100 -tyyppistä lämpötila-anturia nelijohdinmittausta käyttäen. Jännitekanavien mittausalueeksi asetettiin ± 125 mV ja lämpötilakanaville määritettiin antureiden herkkyys ja nimellisresistanssi käytettyjen antureiden mukaisesti. Käytetyn mittaajakson pituus oli 1 minuutti ja näytteistystaajuus 1 Hz.

Järjestelmän testauksessa herätteenä antureille käytettiin kynttilää, koska se oli yksinkertainen tapa tuottaa antureille IR-heräte. Säteilyn voimakkuutta säädettiin testin aikana muuttamalla kynttilän etäisyyttä antureista. Varsinaiseen antureiden testaamiseen kynttilä ei ole hyvä IR-säteilyn lähde, koska sen tuottaman säteilyn voimakkuutta on hankala säätää tarkasti tai pitää vakiona, mutta DAQ-järjestelmän testaamiseen sen tuottama heräte soveltui hyvin.

Testauksesta saadut mittausdatat on esitetty kuvassa 7.2. Kaksi ylimmäistä kuvaajaa esittävät lämpövuoantureiden ja keskimäinen kuvaaja ZTP-135 -IR-anturin jännitesignaaleja. Kahdessa alimmaisessa kuvaajassa on esitetty PT100-lämpötila-antureilla mitatut lämpötilat kahdesta eri testausjärjestelyn kohdasta.



Kuva 7.2 Käytännön testauksesta saadut mittausdatat ajan funktiona, kaikilla kuvaajilla on sama aika-akseli. Ylimmäisenä referenssilämpövuoanturin signaali, josta huomataan kohdasta 30 s eteenpäin kaksi kumpua lämpövuossa, jotka aiheutuivat IR-säteilylähteenä toimineen kynttilän siirtämisestä lähemmäs antureita. Toisena ja kolmantena olevista lämpövuoanturin ja IR-anturin signaaleista ei puolestaan havaita mitään oleellista. Kahdesta alimmaisena olevasta lämpötilasignaaleista havaitaan testausjärjestelyn lämpötilan nouseminen, kun lämmönlähdettä tuodaan lähemmäs. Lämpötilan nousun voidaan havaita tapahtuvan samanaikaisesti ylimmässä kuvaajassa havaittavan lämpövuon kasvun kanssa.

Kuvassa 7.2 esitetyistä mittaus tuloksista huomataan, että mittausautomaatiojärjestelmällä onnistuu jännite- ja lämpötilakanavien mittaaminen. Kuvassa ylimpänä esitetyssä lämpövuoanturin signaalissa havaitaan kaksi kumpua lämpövuossa, kun testissä

lämpösäteilyn lähteenä käytettyä kynttilää siirrettiin hetkellisesti lähemmäs. Samanaikaisesti lämpövuon kasvaessa voidaan kahdesta alimmaisesta kuvaajasta havaita mittausjärjestelyn lämpötilan kasvavan.

Toisessa kuvaajassa esitetystä lämpövuoanturin signaalista ei juuri havaita muuta kuin satunnaista kohinaa. Kolmannessa kuvaajassa esitetyllä ZTP-135-IR-anturin signaalilla on koko mittauksen ajan vakioarvo, mikä johtuu todennäköisesti viallisesta anturista, tai huonosta liitoksesta anturin ja siihen liitetyn johdon välillä.

Tuloksista havaitaan myös, että useiden erillisten ja erityyppisten kanavien näytteistäminen samanaikaisesti vaaditulla 1 Hz:n taajuudella onnistuu. Lisäksi testauksen aikana todettiin mittausdatan tallentamisen tiedostoon toimivan suunnitellusti.

Jännite- ja lämpötilakanavien resoluutioita tarkasteltiin osiossa 7.1 kuvatulla menetelmällä, eli laskemalla pienin ero kahden mitatun arvon välillä. Tulokseksi saatiin jännitekanaville noin 15 nV, joka on sama, kuin aikaisemmassa testissä saatu tulos ja vastaa lisäksi jännitekanavien teoreettista resoluutiota.

Lämpötilakanaville pienimmäksi kahden mitatun arvon erotukseksi saatiin noin 153 μ K, joka on noin kolminkertainen osiossa 4.1.2 esitettyyn laskennalliseen resoluutioon verrattuna. Järjestelmän todellinen lämpötilaresoluutio voi kuitenkin olla mittaustulosten perusteella määritettyä kahden mitatun arvon välistä minimiero pienempi. Määritetty 153 μ K väli mitattujen arvojen välillä on kuitenkin jo alle yksi kuudeskymmenesosa järjestelmältä vaaditusta 10 mK lämpötilaresoluutiosta. Eli vaikka järjestelmällä ei todellisuudessa päästäisi laskennalliseen lämpötilaresoluutioon, järjestelmän lämpötilaresoluutiolle asetettu vaatimus täyttyy.

8. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin mittausautomaatiojärjestelmän suunnittelua ja toteuttamista lämpövuointureiden testaamiseen. Työn tuloksena syntyi modulaarinen DAQ-järjestelmä, jota ohjataan käyttäen MATLAB:ia. Järjestelmän mittaus- ja ohjauskanavien määrää ja ominaisuuksia on tarvittaessa mahdollista muokata erilaisten mittausasetelmien tarpeisiin. Lisäksi järjestelmän suorittaman mittausyökin rakennetta ja esimerkiksi järjestelmän näytteistystaajuutta voidaan muuttaa muokkaamalla käytettyä MATLAB-ohjelmaa.

Työssä käsitellylle järjestelmälle asetettiin vaatimukset aikaisemmin tehtyjen mittausten tuloksiin ja käytettyyn mittausjärjestelyyn tutustumisen perusteella. Vaatimusten asettamisen jälkeen vertailtiin jo käytettävissä olevia mittalaitteita kyseisten vaatimusten näkökulmasta ja valittiin järjestelmässä käytettävät mittalaitteet. Valinnassa tarkasteltiin mittausalue-, resoluutio- ja näytteistystaajuusvaatimusten lisäksi mahdollisuuksia mittalaitteiden liittämiseksi osaksi mittausautomaatiojärjestelmää, ulkoisten laitteiden ohjaustarvetta, sekä järjestelmän laajennusmahdollisuuksia.

Järjestelmän mittalaitteiksi valittiin National Instruments cDAQ-9189-alusta ja siihen liitettävät I/O-moduulit tarvittavien mittauskanavien saavuttamiseksi. Laitteiden valinnan jälkeen rakennettiin ja ohjelmoitiin DAQ-järjestelmä. Järjestelmän ohjelmointiin käytettiin Matlab-ympäristöä, joka valittiin eri ohjelmistojen mittalaitetukien ja muiden ominaisuuksien vertailun perusteella. Ohjelmoinnin jälkeen testattiin toteutetun DAQ-osan toimintaa ja vaatimustenmukaisuutta mittaamalla erilaisia jännite- ja lämpötilasignaaleja yhtäaikaaisesti useilla kanavilla.

Saatujen testitulosten ja valituille laitteille ilmoitettujen ominaisuuksien perusteella tarkasteltiin järjestelmälle asetettujen vaatimusten täyttymistä sekä teoriassa, että käytännössä. Alkuperäisiin vaatimuksiin päästiin kanavamäärän, näytteistystaajuuden, mittausalueen, sekä lämpötilaresoluution osalta. Jotta alun perin asetettuun 10 nV jänniteresoluutiovaatimukseen olisi päästy, olisi vaadittu uusia mittalaitteita, joita haluttiin välttää. Mittalaitteiden valinnan yhteydessä todettiin 15 nV jänniteresoluution olevan tässä tapauksessa riittävä, ja kyseinen vaatimus täyttyi myös käytännössä.

Testausjärjestelyn muiden laitteiden ohjauksen toteuttamista tarkasteltiin tässä työssä ainoastaan teoriatasolla. Laitteiden ohjausta ei toteutettu käytännössä, koska ohjaustarve vaihtelee huomattavasti eri mittausjärjestelyjen välillä riippuen ohjattavista laitteista, ja useiden erilaisten ohjausrajoitusten testaaminen käytännössä olisi ollut turhan laaja aihe käsiteltäväksi tässä työssä.

Yksi oleellisista jatkokehityskohteista järjestelmän monikäyttöisyyden kannalta on järjestelmän ohjaamiseen käytettävän MATLAB-ohjelman kehittäminen nykyistä selkeämmäksi ja helpommin muokattavaksi. Näin järjestelmän soveltaminen erilaisten testausjärjestelyjen tarpeeseen, esimerkiksi kanavamäärän ja näytteistystaajuuden osalta, saataisiin mahdollisimman yksinkertaiseksi ja käyttäjäystävälliseksi. Lisäksi tulevaisuudessa täytyy tarkastella järjestelmän toimintaa tässä työssä tarkasteltua 1 Hz suuremmilla näytteistystaajuuksilla.

Myös ulkoisten laitteiden ohjaamista täytyy tulevaisuudessa tarkastella käytännössä. Tätä joutuu kuitenkin lähes aina tarkastelemaan testiasetelmakohtaisesti, koska laitteiden ohjaustarve voi vaihdella suurestikin eri testiasetelmien välillä. Lisäksi nykyistä kattavamman dokumentaation tuottaminen varsinkin laitteiston konfiguroinnista ja käytämisestä on tarpeen,

jotta sen käyttäminen onnistuu myös järjestelmään syvällisemmin perehtymättömiltä henkilöiltä.

Suunniteltu mittausautomaatiojärjestelmä ja siitä toteutettu DAQ-osio täyttivät valtaosan niille asetetuista vaatimuksista, ja käytännön mittausten perusteella järjestelmän todettiin soveltuvan useiden lämpövu- ja lämpötila-anturien signaalien samanaikaiseen mittaamiseen. DAQ-järjestelmälle on jo tiedossa tarvetta erilaisissa testiasetelmissa liittyen useisiin erilaisiin tutkimusprojekteihin.

LÄHTEET

Cirimele, G. & D'Elia, M. 2012. Heat flux processes, measurement techniques and applications. New York: Nova Science Publishers.

Di Paolo Emilio, M. 2013. Data Acquisition Systems From Fundamentals to Applied Design. New York, NY: Springer New York.

Di Paolo Emilio, M. 2014. Features of High-Speed Data Acquisition and Control System. Cham: Springer International Publishing.

Ehsani, B. 2016. Data Acquisition Using LabVIEW. Birmingham: Packt Publishing, Limited.

Härkönen, P. 2018. Heat Flux Sensor Measurement Electronics System Design for Wearable Electronics Application. Diplomityö. LUT-yliopisto. Lappeenranta.

Immonen, A. 2019. A heat flux sensor test setup. Diplomityö. LUT-yliopisto. Lappeenranta.

Immonen, A., Levikari, S., Gao, F., Silventoinen, P., Kuisma, M., 2020. Development of a Vertically Configured MEMS Heat Flux Sensor. IEEE Transactions of Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-9, 2021, Art no. 9502309, doi: 10.1109/TIM.2020.3034961.

Keithley, 2019. DMM6500 6½-Digit Bench/System Digital Multimeter Datasheet. https://download.tek.com/datasheet/1KW-61315-0_DMM6500_Datasheet_052119.pdf. Viitattu 12.12.2020.

Keithley, 2020a. DAQ6510 Data Acquisition and Logging, Multimeter System Datasheet. https://download.tek.com/datasheet/DAQ6510_Datasheet_1KW-61317-0_102120.pdf. Viitattu 12.12.2020.

Keithley, 2020b. KickStart Datasheet. https://download.tek.com/datasheet/1KW-60965-6_KickStart_Datasheet_110420.pdf. Viitattu 13.01.2021.

Keysight, 2019. BenchVue Software. Keysight Technologies. <https://www.keysight.com/fi/en/assets/7018-04245/technical-overviews/5991-3850.pdf>. Viitattu 13.01.2021.

Keysight, 2020. Digital Multimeters Datasheet. Keysight Technologies. <https://www.keysight.com/fi/en/assets/7018-03846/data-sheets/5991-1983.pdf>. Viitattu 04.12.2020.

Levikari, S., Immonen, A., Kuisma, M., Peltonen, H., Silvennoinen, M., Kyröläinen, H., Silventoinen, P. 2021. Improving Energy Expenditure Estimation in Wrist-Worn Wearables by Augmenting Heart Rate Data With Heat Flux Measurement," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-8, 2021, Art no. 4003108, doi: 10.1109/TIM.2021.3053070.

Lindfield, G., Penny, J. 2012. Numerical methods using MATLAB. 3rd edition. Waltham, Mass: Academic Press.

LXIStandard, 2021. LXI Ports, Protocols, and Services. <https://www.lxistandard.org/About/LXI-Protocols.aspx>. Verkkosivu. Viitattu 11.01.2021.

MathWorks, 2021a. Data Acquisition Toolbox. <https://se.mathworks.com/products/data-acquisition.html>. Verkkosivu. Viitattu 17.01.2021.

MathWorks, 2021b. Hardware Support from Data Acquisition Toolbox. <https://se.mathworks.com/hardware-support/data-acquisition-software.html>. Verkkosivu. Viitattu 27.01.2021.

MathWorks, 2021c. Serialport. MATLAB Documentation. <https://se.mathworks.com/help/matlab/ref/serialport.html>. Viitattu 11.02.2021.

MathWorks, 2021d. MATLAB GUI. MATLAB Documentation. <https://se.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>. Viitattu 15.02.2020.

MathWorks, 2021e. Timetables. MATLAB Documentation. <https://se.mathworks.com/help/matlab/timetables.html>. Viitattu 19.02.2021.

NI, 2015. NI 9401 Datasheet. National Instruments. https://www.ni.com/pdf/manuals/374068a_02.pdf. Viitattu 24.01.2021.

NI, 2016a. NI 9219 Datasheet. National Instruments. https://www.ni.com/pdf/manuals/374473a_02.pdf. Viitattu 10.12.2020.

NI, 2016b. NI CompactRIO-9072/9073/9074 User Manual and Specifications. <https://www.ni.com/pdf/manuals/374639f.pdf>. Viitattu 11.01.2021.

NI, 2017. CompactDAQ-9189 Specifications. <https://www.ni.com/pdf/manuals/376607a.pdf>. Viitattu 11.01.2021.

NI, 2018. NI 9216 Datasheet. National Instruments. https://www.ni.com/pdf/manuals/376921c_02.pdf. Viitattu 13.12.2020.

NI, 2020. NI CompactRIO 20.0 and Drivers Readme. <https://www.ni.com/pdf/manuals/375022p.html>. Viitattu 27.01.2021.

NI, 2021a. C Series Module and CompactDAQ or CompactRIO Hardware Compatibility with LabVIEW. <https://www.ni.com/en-us/support/documentation/supplemental/08/c-series-module-and-compactdaq-compactrio-hardware-compatibility.html>. Verkkosivu. Viitattu 11.01.2021.

NI, 2021b. Instrument Driver Network (IDNet). <https://www.ni.com/fi-fi/support/downloads/instrument-drivers.html>. Verkkosivu. Viitattu 17.01.2021.

Niukkanen, M. 2013. Design of an amplifier and an instrumentation setup for a harsh environment heat flux measurement application – case axial flux electric machine. Diplomityö. LUT-yliopisto. Lappeenranta.

Ponce Cruz, P. & Ramírez-Figueroa, F. D. 2010. Intelligent Control Systems with LabVIEW™. London: Springer London.

Sapozhnikov, S., Mityakov, V., Mityakov, A. 2020. Heatmetry: the science and practice of heat flux measurement. 1st ed. 2020. Cham, Switzerland: Springer.

Sumin, M. 2013. Heat flux measurement inside internal combustion engine with gradient heat flux sensor. Diplomityö. LUT-yliopisto. Lappeenranta.

Temptronic, 2011. TP03000 ThermoChuck® System Operator's Guide. https://seabough.nd.edu/assets/413694/temptronics_tpo3000_thermochucksystem_operatorsguide_lm02350_rev.d.pdf. Viitattu 24.01.2021.

Liite 1. Mittalaitteiden resoluutioiden laskeminen

Kaikkien laitteiden valmistajat eivät ilmoittaneet datalehdissään resoluutioita mittausalueille. Resoluutioiden tarkasteleminen oli kuitenkin osa mittalaitteiden vertailua, joten puuttuvilta osin resoluutiot laskettiin itse tässä liitteessä esitetyillä tavoilla.

Jännitekanavien resoluutiot:

Keysight 34465A ja 34461A

Keysightin penkkiyleismittareiden resoluutio laskettiin Keysightin oman dokumentin (Keysight 2019) mukaisesti. Datalehtensä (Keysight 2020) perusteella molemmissa yleismittareissa on $6\frac{1}{2}$ -numeron näyttö, jolloin niiden jännitetasojen määrä on 2 000 000 (Keysight 2019).

Vertailussa tarkastellaan molemmista mittareista mittausaluetta ± 100 mV. Kun tiedetään mittaalue ja jännitetasojen määrä, voidaan jänniteresoluutio laskea yhtälöllä

$$Q = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{N}, \quad (1)$$

missä Q on resoluutio, V_{\max} on jännitealueen yläraja, V_{\min} jännitealueen alaraja ja N jännitetasojen määrä. Käyttäen yhtälöä 1 voidaan resoluutioksi laskea

$$Q = \frac{100 \text{ mV} - (-100 \text{ mV})}{2\,000\,000} = 100 \text{ nV}. \quad (2)$$

NI 9219

National instruments ilmoittaa NI 9219-moduulin ADC:n resoluutioksi 24 bittiä (NI 2016). Tarkasteltava mittaalue on ± 125 mV. Kun tiedetään mittaalue ja ADC:n resoluutio, voidaan jänniteresoluutio laskea yhtälöllä

$$Q = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2^M - 1}, \quad (3)$$

missä M on ADC:n bittien määrä. Yhtälöä 3 käyttäen voidaan jänniteresoluutioksi laskea

$$Q = \frac{125 \text{ mV} - (-125 \text{ mV})}{2^{24} - 1} = 14,90 \dots \text{ nV} \approx 15 \text{ nV}. \quad (4)$$

RTD-kanavien resoluutiot:

Keysight 34465A ja 34461A

Valmistaja ilmoittaa laitteille RTD-antureiden mittausalueeksi -200...600 °C ja A/D-muuntimen tasojen määräksi 2 000 000 (Keysight 2019; Keysight 2020, s. 22, 23). Soveltaen yhtälöä 1 voidaan lämpötilaresoluutioksi laskea

$$Q = \frac{600 \text{ °C} - (-200 \text{ °C})}{2\,000\,000} = 0,4 \text{ mK.} \quad (5)$$

NI 9216 ja NI 9219

Valmistaja ilmoittaa laitteille RTD-antureiden mittausalueeksi -200...660 °C ja A/D-muuntimen resoluutioksi 24 bittiä. Kun tiedetään mittausalue ja A/D-muuntimen bittien määrä, voidaan yhtälöä 3 soveltaen lämpötilaresoluutioksi laskea

$$Q = \frac{660 \text{ °C} - (-200 \text{ °C})}{2^{24} - 1} = 0,051 \dots \text{ mK} \approx 0,05 \text{ mK.} \quad (6)$$

Käytetyt lähteet

Keysight, 2019. What are digits, accuracy, and resolution with a DMM. https://blogs.keysight.com/blogs/tech/bench.entry.html/2019/01/02/what_are_digits_accuracy.html. Viitattu 09.01.2021.

Keysight, 2020. Digital Multimeters Datasheet. Keysight Technologies. <https://www.keysight.com/fi/en/assets/7018-03846/data-sheets/5991-1983.pdf>. Viitattu 09.01.2021.

NI, 2016. NI 9219 Datasheet. National Instruments. https://www.ni.com/pdf/manuals/374473a_02.pdf. Viitattu 10.12.2020.

NI, 2018. NI 9216 Datasheet. National Instruments. https://www.ni.com/pdf/manuals/376921c_02.pdf. Viitattu 13.12.2020.