

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietokonetekniikka

Tutkintotyö

Jorma Heinänen

**KAKSIJOHTIMISEN HART®-LÄMPÖTILALÄHETTIMEN SPESIFIOINTI JA
TUOTANNON SUUNNITTELU**

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2007

Yliopettaja Kai Poutanen
Satron Instruments Oy, valvojana projektipäällikkö Jorma Liikanen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Tietotekniikka

Tietokonetekniikka

Heinänen, Jorma

Kaksijohtimisen Hart®-lämpötilalähtetimen spesifointi ja
tuotannon suunnittelu

Tutkintotyö

44 sivua + 30 liitesivua

Työn ohjaaja

Yliopettaja Kai Poutanen

Työn teettäjä

Satron Instruments Oy, valvojana projektipäällikkö Jorma Liikanen

Lokakuu 2007

TIIVISTELMÄ

Automaatioteollisuuden prosessimittauksista lämpötilanmittaus on yleisimpiä ja tärkeimpiä. Prosessilämpötilan seurannan lisäksi luotettavaa lämpötilanmittausta hyödynnetään apusuurena toisten prosessisuureiden valvonnassa ja diagnosoinnissa. Aiemmin lämpötilanmittaukseen on käytetty kiinteän alueen analogisia lähtetimiä. Nykyaikaisessa prosessilämpötilamittauksessa arvostetaan lämpötilalähtetimen tarkkuutta, jälleenviritettävyyttä, soveltuvuutta laajoille lämpötila-alueille, digitaalista tiedonsiirtoa ja -keruuta sekä yhteensopivuutta vanhojen asennusjärjestelmien kanssa. Tässä työssä on pyritty perustellen kokoamaan tekninen ja matemaattinen yhteenveto uuden digitaalisen, älykkään kaksijohtiminen Hart®-lämpötilalähtetimen tuote- ja tuotannonkehitysprojektille, jonka lopputuloksena syntyisi teollisuuden tarpeita vastaava kilpailukyinen lämpötilalähtetin Satron Instruments Oy:lle. Työssä on selvitetty suunniteltavan lähtetimen fyysinen ja tekninen laitekuvaus ja toiminnan tavoitearvot. Teoreettisella laskennalla ja toisen valmistajan lähtetimellä tehdyillä mittauksilla on selvitetty lähtetimen tavoitearvoja tuotekehitystä varten. Lähtetimen suunnittelussa on keskitytty erityisesti lähtetimen mittausviestin linearisointitapoihin ja lähtetimen lämpökompensointiin. Lämpökompensoinnin mittauksien toteutusta ja tulosten analysointia on työssä selvitetty vertailulähtetimen mittauksien avulla. Mittaustuloksista on koottu tarkkuustarkastelut teoreettisiin arvoihin vertaamalla. Työssä on esitelty tuotannon ja tuotekehitysvaiheen vaatimat mittalaitteet ja niillä tehtävät mittaukset. Lähtetimelle asetetut toimintatavoitteet täytettiin suunnittelutasolla ja todettiin toteutuskelpoisiksi käytännön tasolla.

TAMPERE POLYTECHNIC
Computer Systems Engineering
Computer Engineering

Heinänen, Jorma Specifications of 2-wire Hart® temperature transmitter and its
production line

Engineering Thesis 44 pages, 30 appendices

Thesis Supervisor Senior Lecturer Kai Poutanen

Commissioning Company Satron Instruments Oy. Supervisor: Project Manager Jorma
Liikanen

October 2007

ABSTRACT

Temperature measurement is one of the most important basic measurements in the field of process automation industry. Temperature measurements are being used in the evaluation and diagnosis of a variety of different kinds of other process measurement applications. Previously, fixed range temperature transmitters have been the only choice in process temperature measurements. Readjust ability, higher accuracy, applicability for wide temperature ranges, digital communication and compatibility with already existing mounting solutions are nowadays highly appreciated new qualities in temperature transmitter. This engineering thesis commissioned by Satron Instruments Inc. is a documentation of the technical and mathematical design work needed in the project developing a digital smart 2-wire Hart® temperature transmitter. This engineering thesis aims to meet the level of quality in its design work that the automation industry requires. This thesis also contains descriptions of all the physical and technical measures concerning the new transmitter and it provides all the theoretical design work in order to achieve the level of measurement accuracy needed. This thesis focuses in its theoretical design on different error correction methods such as sensor value linearization techniques and transmitter's temperature compensation of the input and output stages. This work demonstrates the measurements conducted with an equivalent transmitter as a part of the design work for the production line. The measurement results are compared with the theoretical values in order to achieve an understanding of the new transmitter's competitiveness. The measurement results are set as target values that need to be met with the new transmitter in practice. Due to this thesis it was decided that the theoretical accuracy was adequate enough and the new transmitter's development work will start in a near future.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO	4
LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
2 OHJELMOITAVA KAKSIJOHTIMINEN HART®-LÄMPÖTILALÄHETIN	9
3 LÄMPÖTILALÄHETTIMEN TOIMINTAVAATIMUKSET	10
3.1 Toimintojen valintakriteerit ja toimintatavoitteiden määrittäminen	10
3.2 Toimintavaatimusten kehityssuunnitelmat	11
4 LÄHETTIMEN FYYSINEN RAKENNE JA PROSESSIASENNUS	11
4.1 Kotelointi ja asennus prosessiin	11
4.2 Galvaaninen erotus	12
5 OHJELMISTOT JA TIEDONSIIRTO	13
5.1 Lähettimen käyttäjäliitynnät	13
5.2 Käyttöliittymä	13
5.3 USER-funktio	14
5.4 Hart-tiedonsiirtoprotokolla	15
5.5 Tuotannon ohjelmistot	17
6 ANTURITYYPIT	17
6.1 Vastusanturit (RTD)	17
6.2 RTD:n kytkentätavat	18
6.3 Termoelementit (TC)	19
6.4 TC:n kytkentätavat	20
7 LÄHETTIMEN VIRHEKORJAUKSET	20
7.1 Virhekorjauksen lohko-kaavio	21
7.2 Elektroniikan lämpökompensointi	22
7.3 Termoelementin kylmäpisteen kompensointi	23
8 ANTURIVIESTIN LINEARISOINTI	24
8.1 Anturimittauksen muunnos lähtöviestiksi	24
8.2 Vastusanturin (RTD) linearisointi	24

8.2.1	RTD:n lämpötilamuunnoksen toteutusvaihtoehdot	25
8.2.2	Vastusanturin linearisointitarkkuus	26
8.3	Termoelementin (TC) linearisointi	26
8.3.1	TC:n linearisointi korkean asteen polynomiapproksimaatiolla	27
8.3.2	TC:n linearisointitarkkuus	28
9	TUOTANTO	29
9.1	Tuotannon vaiheet	29
9.1.1	Ohjelmointi	29
9.1.2	Elektroniikan testaus	29
9.1.3	Kokoonpano	30
9.1.4	Kompensointi	30
9.1.5	Viritys	31
9.2	Tuotannon vaiheiden tehostaminen	31
10	MITTAUKSET	32
10.1	Mittaukset huoneenlämmössä	32
10.2	Mittaukset lämpökaapissa	33
10.3	Mittauslaitteet	33
11	MITTAUSTULOSTEN ARVIOINTI JA PÄÄTELMÄT	34
11.1	Pt100-vastusanturin mittaustulokset	34
11.2	RTD:n linearisointilaskennan tarkkuuden arviointi	35
11.3	K-tyypin termoelementin mittaustulokset	35
11.4	TC:n kylmäpisteen kompensoinnin vaikutus	36
11.5	TC:n linearisointilaskennan tarkkuuden arviointi	37
11.6	Millivolttimittauksen tulokset	37
11.7	Lineaarisen resistanssimittauksen tulokset	38
11.8	Vertailulähtimen lähtöasteen mittaukset	39
11.9	Vertailulähtimen nolapisteen ja aluelevyden stabiilisuus	40
11.10	Vahvistus ja A/D-muuntimen erottelukyky	40
11.10.1	Vahvistus	40
11.10.2	Erottelukyky	41
12	YHTEENVETO	41
	LÄHDELUETTELO	43

LIITTEET

- 1 Lämpötilalähettimen laitekuvaus
- 2 Käyttöliittymän valikkorakenne
- 3 Lämpötila-asteikot
- 4 Lämpökompensointi
- 5 Anturiviestin linearisointi
- 6 7. asteen polynomisovitus Eureka Solver-ohjelmalla
- 7 RTD-kertoimet
- 8 K-tyyppin termoelementin 5. asteen polynomisovitus välille 420 - 500 °C
- 9 Mittaustulokset
- 10 Mittauslaitteisto

LYHENTEET

HART	Highway Addressable Remote Transducer
RTD	Resistance Thermometer Detector, vastusanturi
TC	Thermocouple, termoelementtianturi, termopari
CJ	Cold Junction, kylmäpiste
IEC	International Electrotechnical Commission
JIS	Japanese Industrial Standard
DIN	Deutsches Institut für Normung, the German Institute for Standardization
NBS	National Bureau of Standards
NIST	National Institute of Standards and Technology
ADC	Analog to Digital Converter

1 JOHDANTO

Tämä insinöörityö on tehty Satron Instruments Oy:ssä osana uuden, anturikoppaan asennettavan 4..20 mA:n kaksijohtimisen Hart®-lämpötilalähtetimen tuote- ja tuotannonkehitysprojektia.

Satron Instruments Oy:llä on pitkä historia erilaisten automaatioinstrumenttien suunnittelijana ja valmistajana. Satron toimi aiemmin osana silloista Valmet Automation Oy:tä ja sen merkittävin tuoteryhmä on aina ollut paine- ja paine-erolähetinsovellukset. Lämpötilalähetinkaupassa Satron on mukana analogisilla kiinteän alueen lähtetimillä. Lämpötilalähtetimen maailmanmarkkinat ovat painelähtetimen suuruusluokkaa, satoja tuhansia vuodessa.

Hart-liityntä on yleistynyt myös lämpötilalähtetimissä ja on korvaamassa 4...20 mA:n vakiovirtaviestilähtetimet. Tämä opinnäytetyö tehtiin osana tuotekehitysprojektia, jonka ideana on suunnitella uusi prosessoriohjattu Hart-liitäntäinen lämpötilalähtetin ja sen vaatimat tuotannon laitteet vahvistamaan Satronin kattavaa Hart-pohjaista painelähtetimen tuoteperhettä.

Työn lähtökohdaksi on olla selvitys sekä uuden lähtetinmallin tekniikasta ja ohjelmien matematiikasta että jo olemassa olevan tuotantolaitteiston soveltuvuudesta uuden lähtetintyyppin valmistukseen. Työn lähtökohdaksi selvitettiin markkinoilla olevien vastaavien tuotteiden perusteella lähtetimen toimintatavoitteet. Tuotekehitysprojektin tuotantolaitteiden suunnitteluosiota varten työssä selvitetään eri tuotantovaiheet. Työssä selvitetään vastaavan lähtetimen vertailumittauksien ja lähtetimelle asetettujen toimintavaatimusten perusteella tuotannon eri vaiheille asetettavia tarkkuus- ja toimintavaatimuksia sekä lämpökompensointiin tarvittavaa matematiikkaa.

Työ toimii tuotekehitysprojektin alustavana yhteenvedona ja suunnitelmaehdotuksena, jonka pohjalta arvioidaan projektin kannattavuus.

2 OHJELMOITAVA KAKSIJOHTIMINEN HART®-LÄMPÖTILALÄHETIN

Lämpötilalähettimen toimintaperiaatteena on mitata fysikaalinen suure eli lämpötila ja muuttaa se siihen verrannolliseksi sähköiseksi, kahdella johtimella prosessiarvoja seuraavalle laitteistolle siirrettäväksi, 4...20 mA:n virtaviestiksi. Prosessoriohjatussa digitaalisessa ohjelmoitavassa Hart® (Hart)-lähettimessä analogisen 4...20 mA:n vakiovirtalähdön rinnalla käytetään digitaalista Hart-protokollaa, joka on vakiinnuttanut asemansa prosessiteollisuuden tiedonsiirtostandardina. Hart-protokollaa on jo pitkään pidetty vanhentuneena ja alun perinkin väliaikaisena ratkaisuna matkalla kehittyneempiin väyläratkaisuihin, mutta sen luotettavuus ja laaja käyttäjäkunta takaavat sen suosion vielä pitkään.

Hart-protokollan myötä mahdollistuu lähettimen asiakasviritys useille mittausalueille. Aiemmat kiinteän alueen lähettimet voidaan korvata yhdellä monelle anturityypille valmiiksi määritellyllä lähettimellä, jonka viritys on helppoa uudelle lämpötila-alueelle. Hart-protokollan avulla voidaan yhteen 2-johdinvirtasilmukkaan kytkeä useita yhtäaikaan prosessia tutkivia erityyppisiä lähettämiä.

Toinen tärkeä tekijä Hart-väylän rinnalla uudessa lämpötilalähettimessä on sen prosessorin laskentateho. Analogisen kiinteän alueen lähettimen tarkkuus on riippunut elektroniikan ja sen komponenttien asettamista tarkkuuksista. Niitä ei ole voitu sijoittaa korkeampaa tarkkuutta vaativissa mittauksissa tilanteisiin, joissa ympäristön lämpötila pääsee liiaksi vaikuttamaan elektroniikan lämpötilaan ja näin mittaustarkkuuteen. Laskennallisesti suoritettu lämpötilakompensaatio on kuitenkin mahdollista toteuttaa prosessoriohjatulla lämpötilalähettimellä.

3 LÄMPÖTILALÄHETTIMEN TOIMINTAVAATIMUKSET

Lähettimeen valittiin toimintavaatimuksiksi lämpötilanmittaukset Pt100-, Pt200, Pt500-, Pt1000-, Ni20- ja Cu10-vastusantureilla, yleisimmillä termoelementtityypeillä sekä millivolttimittaus ja lineaarinen resistanssimittaus. Lähettimeen toteutetaan myös USER-funktio, jonka avulla asiakas voi itse konfiguroida valitsemansa anturityypin, jota ei ole valmiiksi määriteltynä lähettimen muistissa. Liitteessä 1 on esitelty tarkempi listaus lähettimeen määriteltävistä anturityypeistä ja eri mittauksille asetetuista tarkkuustavoitteista. Millivolttimittauksessa lähetintä voidaan käyttää muuntamaan millivolttiviesti 4...20 mA:n viestiksi. Linearisessa resistanssimittauksessa voidaan lähetintä hyödyntää venttiilien ja pinta-anturien mittaukseen ja resistanssinviestin muuttamiseen 4...20 mA:n viestiksi. Lähettimen kaikilla mittaustavoilla voidaan toteuttaa kahden kanavan differentiaalimittaus. Lähettimen lähtöviestin muoto voi olla joko lineaarinen, logaritminen tai eksponentiaalinen (liite 2).

3.1 Toimintojen valintakriteerit ja toimintatavoitteiden määrittäminen

Lähettimeen valittiin tässä vaiheessa ainoastaan sen toiminnan kannalta oleellimmat mittaustoiminnot. USER-funktio haluttiin mukaan kilpailuvaltiksi, sillä läheskään jokainen kilpailija ei tarjoa tätä toimintoa. Käytettävien antureiden mittaus perustuu mV- ja resistanssimittaukseen. Millivolttimittaus ja lineaarinen resistanssimittaus suunnitellaan siis lämpötilamittauksen sivutuotteina.

Lähettimeen valitut anturityypit ja elektroniikan toimintatavoitteet päätettiin tutkimalla vastaavien tuotteiden valmistajien datalehtiä. Niistä koostettiin kilpailukykyiset toimintatavoitteet uudelle lähettimeelle. Tarkemmat tiedot on esitelty liitteessä 1. Tärkeiksi tavoitteiksi asetettiin, että uuden lähettimen elektroniikka ja ohjelmarunko muokataan tuotannossa jo olevasta painelähetinsarjasta ja lähettimestä tulee tarkkuudessaan ja monipuolisuudessaan kilpailukykyinen kokonaisuus verrattuna markkinoilla jo oleviin kilpailijoihin.

3.2 Toimintavaatimusten kehityssuunnitelmat

Alun perin lähettimen viidenneksi päätoiminnoksi päätettiin pH-mittaus. PH-lähettimen viritys vaatisi kuitenkin aiemmista tuotesarjoista poikkeavan tuotantolaitteiston.

Riittävän tarkan ja luotettavan referenssi-pH-arvon tuottaminen lähettimen viritystä varten todettiin hankalaksi. Sen vuoksi pH-mittauksen tarkkuuden uskottiin jäävän liian kauas tavoitteesta. PH-mittauksen poiketessa huomattavasti lähettimen muista toiminnoista jätettiin se pois liian kalliina yksittäisenä projektin osa-alueena. Valmius pH-mittaukselle toteutettiin kuitenkin elektroniikan tasolla. Se saatetaan ottaa käyttöön, jos kysynnän todetaan kattavan sen kehityskuluja.

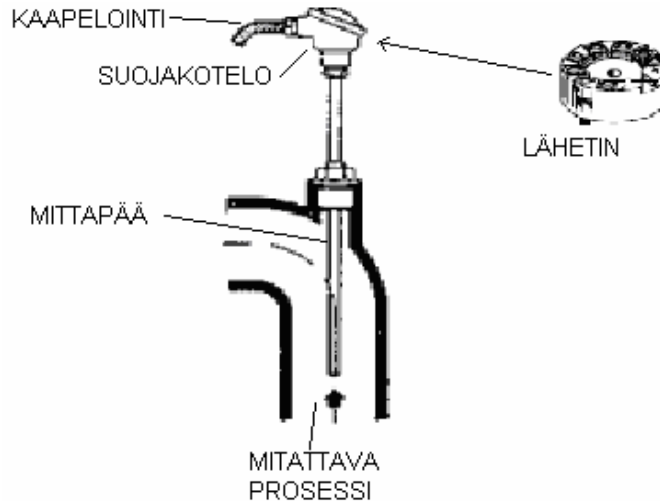
Tulevan lähettimen kysynnän ja asiakkaiden toiveiden mukaan, lähettimelle haetaan **Ex**-laitehyväksyntä. Kun tämä saadaan, lähetintä voidaan käyttää räjähdysvaarallisissa tiloissa.

4 LÄHETTIMEN FYYSINEN RAKENNE JA PROSESSIASENNUS

4.1 Kotelointi ja asennus prosessiin

Lähettimen elektroniikka valetaan muoviseen koteloon epoksihartsiin. Elektroniikka saadaan näin suojattua ympäristön vaikutuksilta, kuten mekaaniselta rasitukselta ja kosteudelta. Piirilevyn yläpuolella on liittimet antureille ja käyttösjähkölle sekä testipistokkeet analogiselle lähtö- ja Hart-viestille. Lähettimen kiekon muotoisen kotelon keskellä on reikä, jonka kautta mittauselimen johtimet tuodaan liittimille. Lähettimen tarkemmat kuvat, mitat ja sähköiset tavoitearvot on esitelty liitteessä 1. Lähetin asetetaan DIN-standardin mukaiseen anturipäähän, joka muodostuu suojakotelosta lähettimelle ja mittauselimestä, joka on mittapään sisällä (kuva 1). Anturipää asennetaan haluttuun positioon eli kohtaan prosessissa, positio nimetään ja positiotunnusta

käytetään kuvaamaan kyseistä lähetintä. Kuvassa 1 esitetään mittausjärjestely, jossa mitataan putkessa kulkevan nesteen tai kaasun lämpötilaa.



Kuva 1. Lähettimen asennus /7/

4.2 Galvaaninen erotus

Mittaelinten rakenteen vuoksi, jossa mittaelin (kuva 2) on suorassa kosketuksessa mittapään metalliseen vaippaan, joudutaan lähettimen piirilevyllä käyttöjännite erottamaan galvaanisesti mittausjännitteestä. Erotuksella päästään eroon anturipäästä ja sen koteloitavasta syntyvistä häiriöjännitteistä. Mitattavan prosessin putkistot ja muut metallipinnat ovat eri potentiaalissa käyttöjännitteen kanssa ja aiheuttavat muuten suuria virheitä mittausjännitteisiin. Koska mittausjännitteet ovat millivolttiluokkaa termoelementtiantureilla, jo hyvinkin pienet heilahdukset mitätöisivät mittaustuloksen. Muiden valmistajien datalehtien perusteella elektronikan galvaaniselle erotukselle todettiin hetkellisen läpilyöntijännitteen riittäväksi arvoksi 0,5 - 1,0 kV. Yleisimmin käytetyt alarajat olivat 0,5 - 1,5 kV.



Kuva 2. Mittaelin /3/

5 OHJELMISTOT JA TIEDONSIIRTO

Tässä luvussa esitetään lähettimen ohjelmistoon ja tiedonsiirtoon liittyvät alustavat määritykset lämpötilalähettimen ohjelmistosta, käyttäjäliityntävaihtoehdoista, käyttöliittymästä, luetellaan tuotannon vaatimat ohjelmistot ja selvitetään tiedonsiirtoon käytettävän Hart-protokollan periaate. Lähettimen ohjelmarunko muokataan lämpötilalähettimen toimintaa vastaavaksi painelähettimenohjelmarungosta. Lähettimen ohjelman ja tuotannon lämpökompensointiohjelman matematiikka esitellään omissa luvuissaan.

5.1 Lähettimen käyttäjäliitynnät

Lähettimeen liitytään Hart-väylän kautta kahdella seuraavaksi esitettävällä tavalla. Ensimmäinen vaihtoehto on käyttää tiedonsiirtoon Satron iTool Hart-modeemia /7/. Toinen vaihtoehto käyttäjäliitynnäksi on kannettavan valmistajasta riippumaton Hart-kenttäterminaalin käyttäminen. Kenttäterminaaliin ladataan laitekohtaiset tiedot ja tiedonsiirto tapahtuu terminaalin sisäisen Hart-modeemin avulla ja avoimilla Hart-standardin mukaisilla käskyillä.

5.2 Käyttöliittymä

Lähettimestä ei suunnitella näytöllistä mallia, mutta sen konfigurointi on mahdollista kahdella eri käyttöliittymällä Hart-väylän kautta. Kun käytetään Satron iTool Hart-modeemia, tarvitaan käyttöliittymäksi Satron Advisor-käyttöliittymäohjelma ja kannettavan kenttäterminaalin käytössä sen oma käyttöliittymä, johon on talletettu lähettimen laitekuvaus. Satron Advisor-käyttöliittymästä muokataan versiot tuotantokäyttöä ja asiakaskäyttöä varten. Asiakaskäyttöön tarkoitettulla käyttöliittymällä muutetaan lähettimen toiminnan kannalta oleellisia parametreja mutta ei voida vaikuttaa lähetinkohtaisiin tehdasasetuksiin. Nämä muutokset tehdään tuotantokäyttöön suunniteltavalla

käyttöliittymällä. Satron Advisorin ja kenttäterminaalien käyttöliittymät mahdollistavat samat asiakasmääritykset.

Uuden lähettimen laitekuvauksen mukaisen käyttöliittymän valikkorakenteen toiminta ja sisältö kannettavassa kenttäterminaalissa on esitelty pääkohdissaan liitteessä 2. Kilpailuvaltiksi arvioitu USER-funktio muokattiin painelähettimen vastaavasta lämpötilälähettimelle sopivaksi.

5.3 USER-funktio

Valmiiksi määriteltyjen anturityyppien lisäksi lähettimeen suunniteltiin USER-funktio asiakkaan valitseman anturityypin omatoimiseen määrittelyyn konfigurointi-valikossa (liite 2). Anturin tiedot asiakas selvittää joko anturivalmistajakohtaisista datakirjoista tai anturia mittaamalla. Halutun anturin toiminta määritellään ja tallennetaan lähettimen muistiin vähintään kahden ja korkeintaan 16 pisteen taulukkoon. Taulukon arvot interpoloidaan pienimmän neliösumman menetelmän polynomiapproksimaatiolla mittausviestistä ja sovitetaan vakiovirtaviestiksi. Tarvittavat määritykset konfigurointi-valikon USER-funktiossa on esitetty seuraavassa:

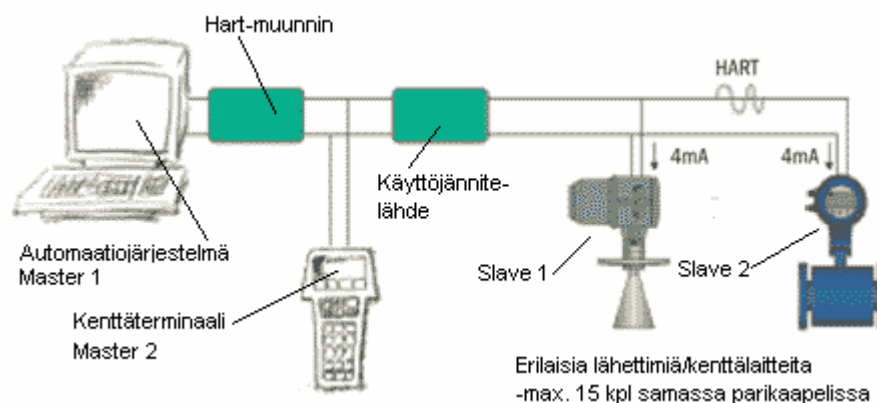
USER

Points	pisteparien määrä
Sensor	resistanssi- vai millivolttitulo
Units	lämpötilayksikkö
Input 0	1. tuloarvo
Output 0	1. lähtöarvo
...	
Input 15	16. tuloarvo
Output 15	16. lähtöarvo
LTV	skaalattavan alueen pienin tuloarvo
HTL	skaalattavan alueen suurin tuloarvo
LTL	ehdoton alaraja luettavalle tuloarvolle
UTL	ehdoton yläraja luettavalle tuloarvolle
Min. Span	pienin sallittu alue eli sadasosa anturityypin maksimialueesta
Name	anturin tunnistetieto

5.4 Hart-tiedonsiirtoprotokolla

Kaikki Satron Instrumentsin valmistamat digitaaliset lähettimet hyödyntävät kommunikoinnissa Hart-kenttäväyläprotokollaa. Satron Instruments on Hart® User Groupin jäsen ja uuden lähettimen päätoimintavaatimuksena on, että se tukee Hart-protokollaa 4...20 mA:n virtaviestin rinnalla.

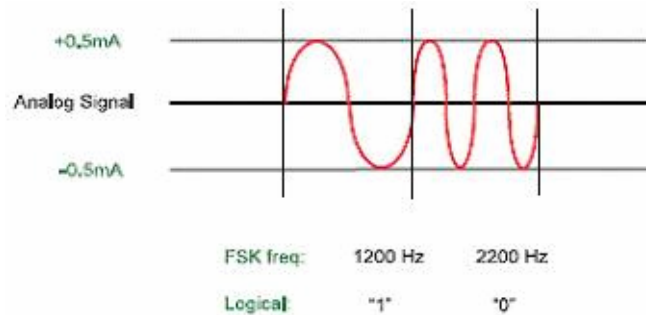
4...20 mA:n virtaviesti on vanha, teollisuuteen vakiintunut analoginen tiedonsiirtostandardi. Hart-protokolla mahdollistaa analogisen 4...20 mA:n virtaviestin ja digitaalisen tiedonsiirron samassa 2-johdinjärjestelmässä. Tämän tiedonsiirtotavan avulla voidaan toteuttaa kuvan 3 esittämällä tavalla korkeintaan 15 lähettimen liittäminen samaan virtasilmuksaan, koska jokaiselle laitteelle annetaan oma tunnisteosoite. Kuva 3 esittää usean lähettimen Multidrop-toiminnon, jossa master-laitteilla osoitetaan slave-laitteina toimivia lähettämiä niiden tunnisteosoitteilla. Multidrop-toiminnossa on käytössä vain digitaalinen Hart-tiedonsiirto ja analoginen signaali on vakio 4 mA. Tiedonsiirto on digitaalisesti mahdollista kahteen suuntaan. Digitaalinen signaali voi näin sisältää sekä laite- että mittausinformaatiota.



Kuva 3. Useamman lähettimen liittäminen samaan parikaapeliin /13/

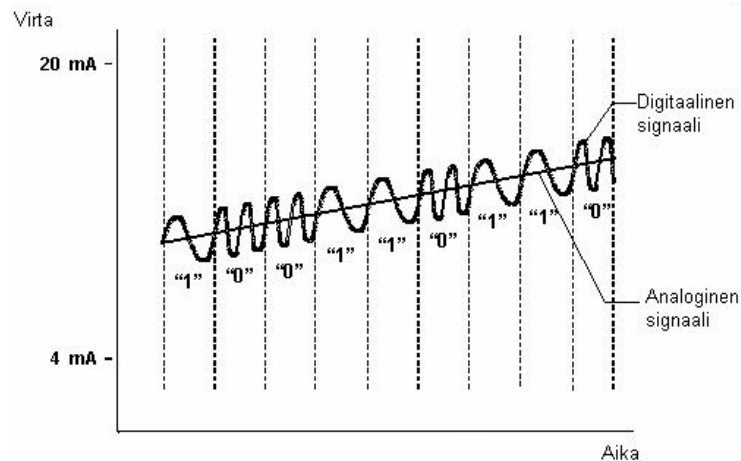
Hart-protokollan mukaisesti analoginen signaali muunnetaan digitaaliseksi. Hart-protokollan käyttämä Frequency Shift Key (FSK)-taajuusmodulaatiossa moduloidaan digitaalisella signaalilla 1 mA_{pp} sinimuotoista kanta-aaltosignaalia

kuvan 4 esittämällä tavalla /6/. Matalampi 1,2 kHz:n taajuus vastaa loogista ykköstä ja korkeampi 2,2 kHz:n taajuus puolestaan loogista nollaa kuvassa 4. Hart-protokollan tiedonsiirtonopeus on 1200 bit/s.



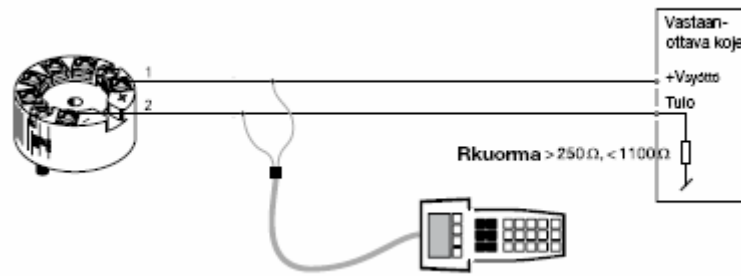
Kuva 4. Yhtäaikainen analoginen ja digitaalinen tiedonsiirto Hart-protokollalla /6/

Moduloitu signaali summataan virtasilmuksaan kuvan 5 esittämällä tavalla. Summatun signaalin keskiarvo on nolla, joten se ei aiheuta häiriöitä virtasilmuksaan.



Kuva 5. Summattu Hart-signaali /12/

Lähettimen konfigurointi ja prosessiarvojen luku onnistuu joko kuvan 6 mukaisella kenttäkäsiterminaalilla tai Hart-modeemin, PC:n ja valmistajakohtaisen yleisiä Hart-komentoja käyttävän ohjelmiston avulla. Kenttäterminaalit sisältävät kattavia kirjastoja eri valmistajien lähetintiedoista.



Kuva 6. Hart-liityntä kenttäterminaalilla /8/

5.5 Tuotannon ohjelmistot

Tuotantoprosessia varten tarvitaan omat ohjelmat, joilla päästään käsiksi kaikkiin toimintaan liittyviin parametreihin. Ohjelmat muokataan painelähttimen tuotannossa käytettävistä ohjelmista vastaamaan lämpötilalähttimen tarpeita. Elektroniikan testaukseen käytetään samaa ohjelmistoa ja testauslaitteistoa kuin muidenkin tuotteiden elektroniikan testauksessa, mutta tuotantoa varten muokataan ohjelmat lähttimen kompensointiin, viritykseen ja lopputestaukseen. Tuotannon ohjelmat toteutetaan Microsoft Visual Basic-ohjelmointityökalulla. Tuotannon vaiheet on esitelty Tuotanto-kappaleessa.

6 ANTURITYYPIT

Lähttimeen valittiin kahden tärkeimmän lämpötila-anturiryhmän mitta-antureita. Valitut vastus- ja termoelementtityypit ovat hyvin yleisiä ja niiden valmistajia on paljon. Tästä syystä mitta-anturien kohdalla päätettiin tyytyä alihankintaan, eikä lähdetty itse kehittämään niiden tuotantoa. Tähän todettiin syiksi mitta-anturien halpa hinta, varma saatavuus ja yleisten standardien mukaan valmistettavien mitta-anturien riippumattomuus valmistajasta.

6.1 Vastusanturit (RTD)

Vastusanturien (RTD) toiminta perustuu niiden resistanssiarvon lämpötilariippuvuuteen /2 s.147 - 180/. Vastuksessa käytettyä materiaalia

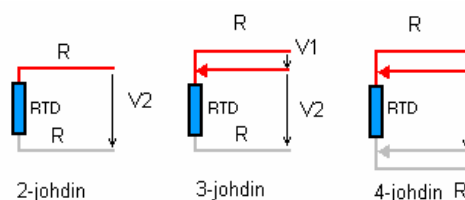
käytetään nimeämään eri vastustyyppisiä. Yleisimpiä vastustyyppisiä ovat platina-, nikkeli- ja kuparianturit sekä monet eri sekoitukset. Liitteessä 1 on esitelty lähettimeen valitut anturityypit.

RTD:t jaetaan tarkkuutensa perusteella IEC 751-standardin tarkkuusluokkiin A ja B /4/. Tarkkuusluokat C ja D eivät ole virallisia mutta paljon käytettyjä anturin tarkkuuksista puhuttaessa. A- ja B-luokan vastusanturit ovat suhteellisen tarkkoja verrattuna termoelementteihin mutta eivät sovellu korkeisiin lämpötiloihin. A-luokan anturien toiminta-alue on $-200...+650\text{ °C}$ ja B-luokan $-200...+850\text{ °C}$. A-luokan tarkkuus vaihtelee toiminta-alueen mukaan $\pm 0,15 - 1,45\text{ °C}$ ja B-luokan $\pm 0,30 - 4,6\text{ °C}$ välillä /5/.

Lähettimeen valitut vastusanturit ovat suurimmaksi osaksi platina-antureita. Lähettimessä Pt100-antureita käytetään sekä prosessisuureen että lämpötilakompensoinnin vaatiman elektroniikan lämmön mittaukseen. On erittäin tärkeää, että vastusanturimittaukset antavat luotettavaa lämpöinformaatiota. Tämän vuoksi tässä työssä keskitytään myöhemmin laajemmin RTD-anturien linearisointiin ja lämpökompensointiin.

6.2 RTD:n kytkentätavat

Tarvittavan mittaustarkkuuden mukaan vastusanturit kytketään lähettimeen seuraavilla tavoilla (kuva 7).



Kuva 7. Eri RTD-mittaustavat /3/

2-johdin mittauksessa tarkkuuteen vaikuttavat liitinjohtimien lisäresistanssit, jotka vaihtelevat lämpötilanmuutoksien mukana. Laskennallisesti asia on todistettu yhtälöllä 1.

$$V_2 = (RTD + 2 \cdot R) \cdot I \quad (1)$$

3-johdinmittauksessa tarkkuutta on parannettu lisäämällä yksi johdin. Tarkka referenssivirta syötetään uloimpia johtimia pitkin ja syntyvää jännitehäviötä mitataan RTD:n yli. Laskennallisesti haluttu jännitehäviö saadaan yhtälön 2 mukaisesti.

$$V_2 - V_1 = (RTD + R) \cdot I - R \cdot I = RTD \cdot I \quad (2)$$

4-johdinmittaus on mittaustavoista tarkin. Siinä uloimpia johtimia pitkin syötetään tarkka referenssivirta ja mitataan RTD:n yli olevaa jännitehäviötä keskimmaisista. Keskimmaisissa johtimissa ei kulje virta, joten niistä ei synny lisäjännitehäviöitä. Haluttu jännitehäviö saadaan suoraan yhtälön 3 mukaisesti.

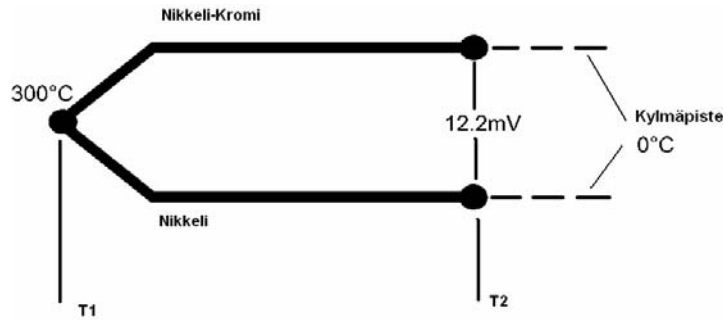
$$V_2 = RTD \cdot I \quad (3)$$

Kahden RTD-anturin differentiaalimittaus toteutetaan kahdella 2-johdinmittauksella kahdella mittakanavalla.

6.3 Termoelementit (TC)

Termoelementtien (TC) eli termoparien toiminta perustuu kahdesta eri sähköä johtavasta materiaalista, yleensä metallista ja metalliseoksesta valmistettuun johtimeen. Kun nämä johtimet yhdistetään, syntyy termopari (kuva 8). Jos liitoskohdan ja johtimien päiden eli kylmäpisteen välillä on lämpötilaero, saa se aikaan virran suljetussa virtapiirissä. Virran synnyttämä jännite johtimien päissä on verrannollinen liitoksen ja johtimien päiden väliseen lämpötilaeroon /1 s. 21 - 31/. Termoelementtien lämpötilanmuutoksen synnyttämää jännitettä kutsutaan termosähköiseksi Seebeck-jännitteeksi. Termoelementtien toiminta-alueet kattavat jopa yli 2000 °C:n lämpötilat ja niiden tarkkuudet vaihtelevat ± 1,5 - 2,5 °C kolmessa eri tarkkuusluokassa /3/. Termoelementtien pääasiallinen käyttöalue

on yli 500 °C:n lämpötila-alue, johon tarkemman A-luokan vastusanturit eivät sovellu.



Kuva 8. K- tyypin termoelementti

6.4 TC:n kytkentätavat

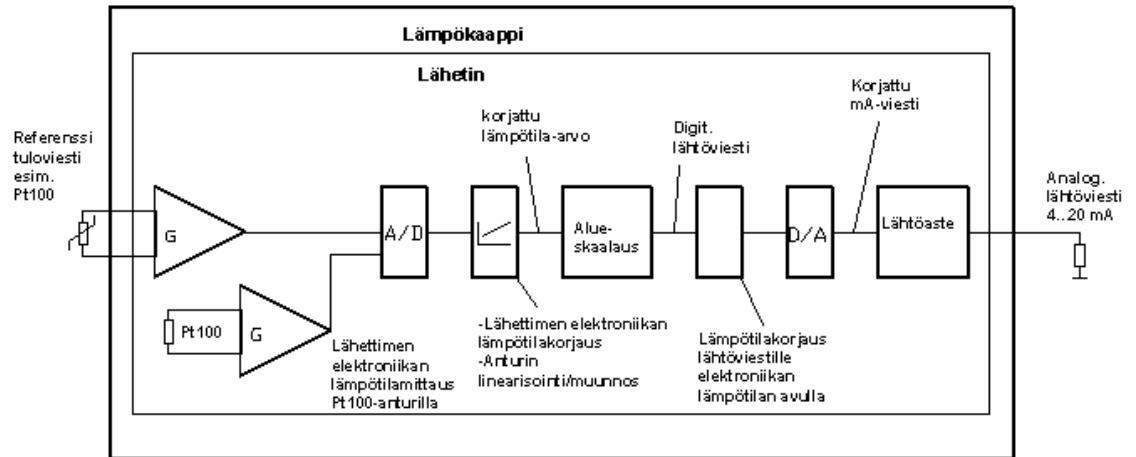
TC:n kytkentään lämpötilalähtettiin tarvitaan vain yksi kaksijohtiminen mittaussisääntulo. Kahden TC-anturin differentiaalimittaus on mahdollista kahdella mittakanavalla.

7 LÄHETTIMEN VIRHEKORJAUKSET

Tässä luvussa selvitetään lämpötilalähtettimen ympäröivästä lämpötilasta ja lähtettimen sisäisestä lämpenemisestä aiheutuvien virhetekijöiden korjausta.

Lähtettimen kokonaistarkkuuteen eniten vaikuttavat tekijät ovat elektroniikan lämpötilariippuvuus ja anturin epälineaarisuus sekä epätarkkuus. Lähtettimen elektroniikan lämpötilariippuvuutta korjataan elektroniikan lämpökompensoinnilla, joka suoritetaan tuotannon kompensointivaiheessa.

7.1 Virhekorjauksen lohkokaavio



Kuva 9. Elektroniikan lämpökompensoinnin lohkot

Lähtimen elektronikan lämpökompensointia varten lähtin sijoitetaan lämpökaappiin, jolla vaikutetaan lähtimen toimintalämpötilaan.

Kuvassa 9 esitetyllä tavalla elektroniikan lämpökompensoinnissa A/D-muuntimella mitataan lähtimen referenssituloviestiä ja sisäisen Pt100-vastusanturin avulla elektroniikan lämpötilaa. Pt100-vastusanturi sopii tarkoitukseen termoelementtiä paremmin korkeamman tarkkuutensa sekä matalan ja kapean mitattavan lämpötila-alueen (-20...+80 °C) vuoksi. Vahvistuksella parannetaan A/D-muuntimen erottelukykä mikrovolttitason jännitemuutoksien havaitsemiseksi. Samasta lämpötilasta mitattu korjaamaton mittausarvojoukko A/D-muunnetaan ja siitä lasketaan mittauksen keskiarvo, minkä jälkeen suoritetaan linearisointi anturityyppikohtaisilla lämpötilamuunnoskaavoilla ja niille määritellyillä korjauskertoimilla. Anturitiedot on tallennettu EEPROM-muistiin ohjelmointivaiheessa. Tarvittaessa suoritetaan vielä muunnos lämpötila-asteikkojen välillä (liite 3). Linearisointia käsitellään myöhemmin omassa luvussaan laajemmin.

Linearisoituja mittauslämpötila-arvoja verrataan referenssiarvoon, josta lasketaan testattavan lähtimen lämpötilasta johtuva virhe. Liitteessä 4 on esitelty laskennan periaate. Virheestä määritellään korjauskertoimet korkean asteen

polynomilausekkeeseen, jolla tuloasteen elektroniikka lämpökompensoidaan. Lasketut kertoimet tallennetaan lähetinkohtaisesti Hart-väylän kautta lähettimen muistiin. Lähetin käyttää kertoimia sisäisessä mittauksen virhekorjauksessaan. Seuraavaksi sovitetaan mitattava lämpötila-alue korjatuilla arvoilla 4...20 mA:n lähtöviestiksi.

Digitaalinen lähtöviesti mitataan ennen lähtöasteen D/A-muunnosta. Lopullinen lähtöviesti mitataan ja sitä verrataan edellä mitattuun digitaaliseen lähtöviestiin. Näiden poikkeamasta lasketaan kertoimet polynomilausekkeella suoritettavaan korjaukseen.

7.2 Elektroniikan lämpökompensointi

Suunniteltavan lähettimen ADC-mittauskortilla on useita tarkkuusvastuksia, joita käytetään mittaustulosten muodostuksessa ja laskennassa. Ympäristölämpötilan vaihtelut ja vastuksien tuottama lämpö aiheuttavat niiden resistansseihin muutoksia. Mittakortilla käytetään korkean tarkkuusluokan vastuksia, jotka kuitenkin vaativat korjauksen millivolttimittauksen pienien signaalierojen mittaamiseksi tarkasti. Esimerkiksi K-tyypin termoelementin mittaamisessa 0,1 °C asteen muutoksen havaitsemiseen tulee voida havaita 4 µV:n luokkaa olevia signaalieroja. Termoelementtimittauksessa suoritetaan myös kylmäpisteen kompensointi.

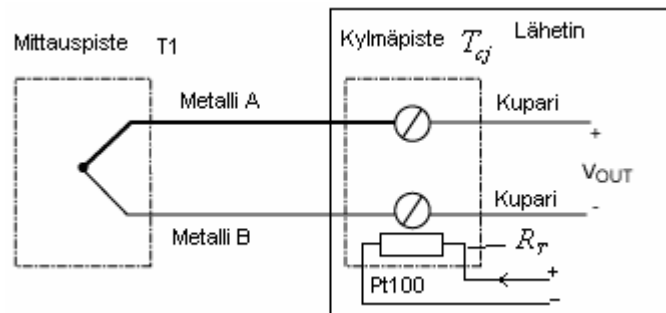
Yksittäisten komponenttien lämpötilariippuvuuden lisäksi virhettä syntyy A/D- ja D/A-muuntimissa kapeilla alueilla niiden resoluution takia. Elektroniikan lämpötila vaikuttaa myös muuntimien tarkkuuteen. Yksittäisten virhelähteiden erottelun vaikeuden vuoksi uuden lähettimen kompensoinnissa korjataan monen osatekijän virhesummia. Lähetinyksilön kompensoinnissa referenssianturimittaukset mitataan yhdellä simuloitulla anturityypillä, sillä anturin ja elektroniikan virhekorjaus ovat erillisiä toimenpiteitä. Lämpötilakorjaus suoritetaan tuotannossa kompensointivaiheessa.

Kompensoinnissa lämpökaappiin voidaan kerralla sijoittaa 1 - 40 lähetintä. Jokaiselle lähettimelle tehdään yksilölliset virheenkorjaustoimenpiteet.

7.3 Termoelementin kylmäpisteen kompensointi

Termoelementtimittauksissa täytyy huomioida termoelementin kylmäpisteen vaikutus mittaustulokseen. Termoelementin kylmäpisteen eli lähettimen elektroniikan lämpötilan muutos vaikuttaa kylmäpisteen ja termoelementin mittapään välisen lämpötilaeron suuruuteen (kuva 10). Tämä vaikuttaa mitattavaan millivolttijännitteeseen eli aiheuttaa mittaukseen virhettä /1 s.23/. Virhettä korjataan kylmäpisteen kompensoinnilla (kuva 10).

ADC-kortin lämpökorjauksien jälkeen kompensoinnissa mitataan kylmänpään (CJ) lämpötilanmittausta varten lisätyn Pt100-vastusanturin resistanssi R_T . Sen lämpökompensoidusta arvosta lasketaan vastusanturien linearisoinnin yhteydessä esitetyllä tavalla kylmänpään lämpötila T_{cj} .



Kuva 10. Termoelementin kylmäpistekompensointi

Seuraavaksi mitataan termoelementin jännite. Lämpökompensoitu lämpötila lasketaan siten, että termoelementin jännitteeseen lisätään se jännite, joka samalla termoelementillä saadaan siinä lämpötilassa, missä vastusanturilla mitattu kylmäpää T_{cj} on. Näin kylmäpisteen ja mitattavan kohteen välinen lämpötilaero saadaan riippumattomaksi elektroniikan lämpötilan vaihteluista.

Lämpötila T_{cj} muutetaan sitä vastaavaksi jännitteeksi käänteisellä kaavalla 4:

$$U_{cj} = a_0 + a_1 T_{cj} + a_2 T_{cj}^2 + \dots + a_n T_{cj}^n \quad (4)$$

$$U_c = U_{mitattu} + U_{cj} \quad (5)$$

Saatu kompensoitu kanavajännite U_c (kaava 5) muunnetaan anturityyppiä vastaavalla linearisointikaavalla (kaava 7) ja muistiin tallennetuilla polynomikertoimilla lämpötila-asteiksi.

8 ANTURIVIESTIN LINEARISOINTI

8.1 Anturimittauksen muunnos lähtöviestiksi

Lämpötilälähtetimen perusidea on muodostaa mitattavaan lämpötilaan verrannollisesta sähköisestä anturisuureesta tarkka 4...20 mA:n vakiovirtaviesti. Anturityypistä riippuen mittaus perustuu mV- tai resistanssimittaukseen. Ennen vakiovirtaviestin muodostusta lasketaan muunnos mitattavan anturisuureen ja lämpötilan välillä. Muunnoksen jälkeen lämpötila-arvo sovitetaan lähtöviestiksi. Anturityypeillä on yhteistä, että niistä mitattavan sähköisen suureen muutos lämpötilan muutoksen seurauksena ei ole lineaarinen. Tässä luvussa käsitellään eri anturityyppien laskennalliset epälineaarisuuden korjaustavat.

8.2 Vastusanturin (RTD) linearisointi

Vastusantureiden toiminta perustuu resistanssin kasvuun epälineaarisesti lämpötilan kasvun mukaan. Vastusantureiden lämpötilasta riippuvan resistanssin epälineaarisuuden korjauksen laskentaan käytetään Callendar-Van Dusen-kaavaa (kaava 6) /2 s.153/.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad , \text{ jossa } \quad (6)$$

R_T = resistanssi lämpötilassa T

R_0 = resistanssi lämpötilassa $T = 0 \text{ °C}$

$A...C$ = anturikohtaiset vakiokertoimet, kun $T < 0 \text{ °C} \Rightarrow C = 0$

Liitteessä 7 on esitelty lähettimeen valittujen vastusanturityyppien vakiokertoimet.

8.2.1 RTD:n lämpötilamuunnoksen toteutusvaihtoehdot

Lämpötilamuunnoksen laskennassa käytetään Callendar-Van Dusen-kaavalla linearisoituja R_T -arvoja. Linearisointilaskenta voidaan ohittaa käyttämällä valmiita kaavalla 6 laskettuja R_T -taulukkoita /6/. Vastusanturille asetetun tarkkuuden perusteella tutkituista lämpötilamuunnostavoista vain kaksi seuraavassa esitettävää tapaa todettiin tarkkuusluokaltaan tarkemman käsittelyn arvoisiksi.

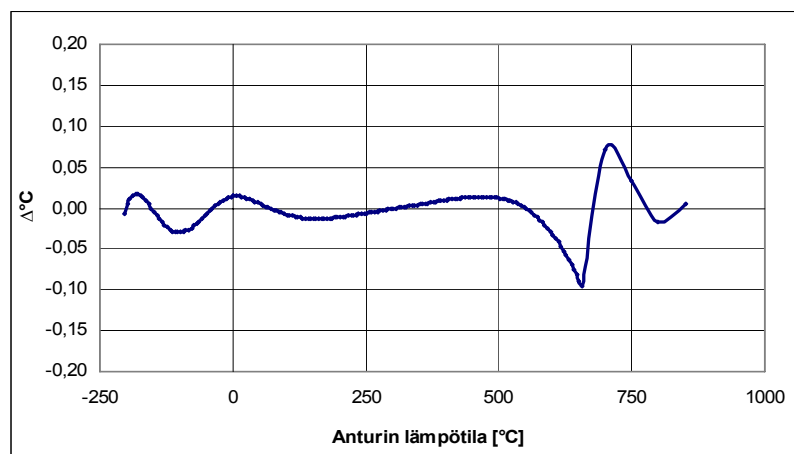
Ensimmäinen vaihtoehto on sovittaa polynomiapproksimaatiota käyttäen R_T -arvoihin koko anturin toiminta-alueen kattava korkean asteen polynomilauseke (liite 6), jonka kertoimet talletetaan anturikohtaisesti muistiin. Toinen vaihtoehto on ratkaista lämpötila T Callendar-Van Dusen-kaavasta toisen asteen yhtälön ratkaisukaavalla nollan asteen yläpuolisella toiminta-alueella ja sovittaa nollan asteen alapuolelle polynomiapproksimaatiolla toisen asteen polynomilauseke, jonka kertoimet talletetaan muistiin (liite 5).

Tarkkuuksia vertailtaessa todettiin ensimmäinen tapa tarkemmaksi. Tavalla yksi virhe on $\leq \pm 0,1 \text{ °C}$ tutkitun Pt100-vastusanturin koko toiminta-alueella.

Liitteessä 5 on esitelty molempien tapojen toteutusmallit Pt100-vastusanturilla, niiden suunnittelu ja perustelut miksi suunnittelu toteutetaan ensimmäisellä vaihtoehdolla.

8.2.2 Vastusanturin linearisointitarkkuus

Kuvassa 11 on esitelty vaihtoehdolla yksi laskettu virhekuvaaja Pt100-vastusanturille koko sen toiminta-alueella. Suurin sovituksen laskentaan käytetyn Eureka Solver-laskentaohjelman laskema lineaarisuusvirhe on $+0,096\text{ °C}$ toiminta-alueen yläpäässä 700 °C :n kohdalla. Virheen keskiarvo koko alueella on vain $\pm 0,005\text{ °C}$ ja jättää marginaalia muille virhelähteille.



Kuva 11. Linearisoinnin jälkeinen Pt100-vastusanturin poikkeama lämpötila-alueella $-200\dots 850\text{ °C}$

8.3 Termoelementin (TC) linearisointi

Termoelementtian turin mittajohtimien välinen millivolttiluokan jännite-ero kasvaa epälineaarisesti mittauspisteen lämpötilan kasvun myötä. Epälineaarisen lämpötilariippuvuuden muunnos mahdollisimman lineaariseksi lähtöviestiksi voidaan toteuttaa esimerkiksi seuraavilla kahdella tavalla.

Tapa 1:

Millivolttimittaus suoritetaan A/D-muuntimella. A/D-muunnoksen ja mittaustuloksen lämpökompensoinnin jälkeen anturiarvoa vastaava lämpötila interpoloidaan EEPROM-muistiin tallennetusta kurkistustaulusta, johon on tallennettu tihein välein millivolttiarvoja vastaavat lämpötilat.

Tapa 2:

Linearisointi suoritetaan korkean asteen polynomiapproksimaatiolla (kaava 7).

Lähettimen toimintatavoitteisiin on määritelty (liite 1) kahdeksan termoelementtityyppiä. Niitä varten tyyppikohtaiset pienin välein tallennetut kurkistustaulut veisivät liikaa muistia, jotta päästäisiin tarpeeksi pieneen muunnosvirheeseen. Kurkistustaulujen sisältämien pisteiden välien laskeminen lineaarisella interpoloinnilla arvioitiin liian epätarkaksi laskentatavaksi, jos ei voida jakaa toiminta-aluetta hyvin pieniin interpolointiväleihin. Lämpötilan muutosnopeus on suhteellisen hidas fysikaalinen ilmiö. Muutosnopeuden hitauden vuoksi lähettimen vasteajan ei tarvitse olla lyhyt. Rajallisen muistin säästämiseksi ja käytettävissä olevan prosessorin laskenta-ajan ja -tehon perusteella edellä esitetyistä linearisointitavoista valittiin jälkimmäinen.

8.3.1 TC:n linearisointi korkean asteen polynomiapproksimaatiolla

Termoelementtien linearisointi suoritetaan kaavalla /1 s.96/:

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \text{ jossa (7)}$$

T = lämpötila

a = polynomikerroin

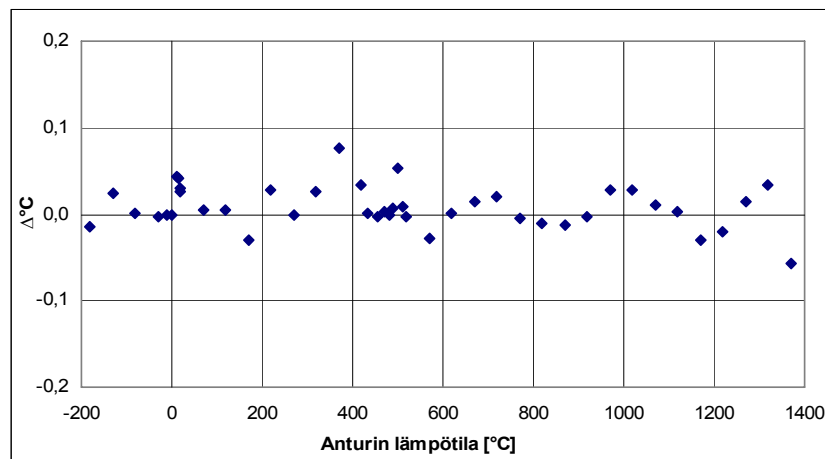
x = anturiarvo (mV)

n = suurin polynomiaste

Termoelementtityypin epälineaarisuudesta riippuu, kuinka monennen asteen polynomilauseke tarvitaan sen linearisointiin. Tyypillisesti tarvitaan n. 7. - 9. asteen lauseke. Jokaiselle tyyppille on määritelty IEC-standardin mukaiset polynomikerroin /9/. Termoelementtien linearisointi ja käänteinen muunnos lämpötilasta millivolteiksi on esitelty liitteessä 5 sivulla 6. Käänteistä muunnosta käytetään termoelementtien kylmäpistekompensoinnissa.

8.3.2 TC:n linearisointitarkkuus

Termoelementtien laajasta toiminta-alueesta hyödynnetään yleisesti vain niiden yläpäättä, joissa vastusantureita ei voida hyödyntää. Kuvassa 12 on esitetty yleisimmän K-tyyppin termoelementin (Ni-NiCr) linearisoinnin tarkkuustarkastelun koko toiminta-alueella $-180\dots+1370\text{ °C}$.



Kuva 12. K-tyyppin TC:n linearisoinnin jälkeinen poikkeama lämpötila-alueella $-180\dots+1370\text{ °C}$

Kuva 12 esittää K-tyyppin termoelementin laskennallisen linearisoinnin poikkeamaa koko sen toiminta-alueella. Linearisointi on jaettu neljään osa-alueeseen (liite 5 s.7.). Osa-alueet ovat $-20\dots 0$, $0\dots 420$, $420\dots 500$ ja $500\dots 1370\text{ °C}$. Liitteessä 5 on esitelty perustelu toiminta-alueen jakamiseen neljään osa-alueeseen kolmen standardialueen sijasta.

Matalissa lämpötiloissa $-200\dots+600\text{ °C}$ käytetään yleisesti vastusantureita, jolloin ei jouduta turvautumaan edellä esitettyyn moniosaiseen laskentaan. Yli $+600\text{ °C}$:n lämpötiloissa termoelementin tarkkuus on kuitenkin parempi ja siksi käytetympi.

Linearisointilaskennassa päästään K-tyypillä alle $\pm 0,1$ °C virheeseen. Termoelementin käyttö sovitetaan tyyppikohtaisesti tarkimpaan toiminta-alueeseen, K-tyypin tapauksessa välille 500 - 1300 °C.

9 TUOTANTO

9.1 Tuotannon vaiheet

Tuotanto jakautuu viiteen eri vaiheeseen seuraavassa järjestyksessä:

1. Ohjelmointi
2. Elektroniikan testaus
3. Kokoonpano
4. Kompensointi
5. Viritys

9.1.1 Ohjelmointi

Ohjelmointivaiheen ainoa toimenpide on tarkastaa alihankkijalla teetetyt kortit yksitellen ulkoisesti ja siirtää lähettimen ohjelma Flash Programmer-ohjelmointilaitteella CPU-kortin EEPROM-muistiin.

9.1.2 Elektroniikan testaus

Elektroniikan testauksessa testataan alustavasti CPU-kortit. Testauksessa tarkistetaan Hart-tiedonsiirron sekä A/D- ja D/A-muuntimien toiminta. Kerralla CPU-kortteja testataan sadan kappaleen erä. Testin perusteella erästä poistetaan sallituista rajoista poikkeavat, jotka korjataan ja laitetaan uuteen testiin. Kortit, joita ei voida korjata itse, lähetetään takaisin alihankkijalle reklamaatioineen.

Testaus suoritetaan sitä varten suunnitellulla ohjelmistolla, jota käytetään PC:ltä. Ohjelma ohjaa dataloggeria, jolla valitaan vuorotellen mittauskanava 1 - 100 ja

ohjataan lämpökaappia. Mittauskanavaa pitkin luetaan ja lähetetään Hart-väylällä tietoja testattavan kortin ja PC:n välillä. Useista eri lämpötilatestauksista ja lämpökaapin asettumisajoista johtuen elektroniikan testaukseen kuuluu yhteensä n. vuorokausi. Uuden lähettimen tuotantoa varten ei tarvita muutoksia elektroniikan testaukseen. Sama testausohjelma ja laitteet sopivat tuotantovälineiksi, koska uusi lämpötilalähetin ei aiheuta elektroniikkasuunnitteluun muutoksia.

9.1.3 Kokoonpano

Kokoonpanossa CPU- ja ADC-kortit asetetaan muovikoteloon ja kotelo valetaan täyteen epoksihartsia suojaamaan elektroniikkaa ilmasta kondensoituvalta kosteudelta. Lähettimen toiminta tarkistetaan tämän jälkeen testaamalla sen käynnistyminen ja CPU-kortin galvaaninen erotus.

9.1.4 Kompensointi

Kompensoinnissa lähettimen elektroniikalle suoritetaan lämpötilakorjaus. Lämpökompensoinnin periaate on esitelty kappaleessa Lähettimen virhekorjaukset ja tarkemmin liitteessä 4. PC:ltä käytettävä kompensointiohjelma muokataan painelähettimen kompensointiohjelmasta. Anturisimulointia varten tarvitaan tarkka referenssilähde sekä millivolteille että resistanssille painelähettimien tuotannossa käytettävän painereferenssin tilalle. Kompensointia varten hankitaan myös korkeantarkkuusluokan yleismittari tulo- ja lähtöarvojen mittaukseen. Muilta osin tuotannon laitteina käytetään painelähettimien tuotannossa käytettävää laitteistoa.

Yhdellä elektroniikan lämpökompensointikierröksellä lämpökaappiin sijoitetaan 1 - 40 lähetintä. Tiedonsiirto PC:n ja lähettimien välillä tapahtuu samoin kuin elektroniikan testauksessa.

Kompensointi on tuotannon kriittisin ja aikaa vievin vaihe. Lämpökaapin lämpötilojen asettumisajoista ja kaikille lähettimille suoritettavista korjauskertoimien määrittämisestä johtuen kompensointi vie n. 2,5 vuorokautta. Lämpökompensoinnin tavoitteena on, että viallisia lähettimiä kompensoitavasta erästä on alle 5 % ja kompensoinnin jälkeisissä tuotantovaiheissa alle 1 %.

9.1.5 Viritys

Viimeisenä tuotannon vaiheena edelliset vaiheet läpäisseet lähettimet viritetään. Viritys suoritetaan joko asiakkaan tilauksessa määrittämille alueille tai eri anturityypit viritetään perusviritysalueilleen. Viritys tehdään yksilöllisesti tai 1-10 kappaleen automaattivirityksenä. Virityksessä lähettimiä testataan, mistä tulostetaan viritystodistus asiakkaalle, jossa näkyvät lähettimen toiminnalle asetetut lineaarisuus- ja lämpötilavirherajat, lähettimen viritysalue, lähetinkohtaiset tunnistetiedot ja lähettimen toiminta viritysalueellaan graafisena kuvaajana. Viritystä varten tehdään tarvittavat muutokset painelähettimien viritysohjelmiin vastaamaan lämpötilalähettimen toimintaa. Virityslaitteiston päivitykseen tarvitaan vastaavat referenssisignaali-lähteet kuin kompensointivaiheessa ja korkeantarkkuusluokan yleismittari.

9.2 Tuotannon vaiheiden tehostaminen

Virityksen ja kompensoinnin yhdistäminen yhdeksi vaiheeksi on mahdollinen muutostoimenpide tuotannon vaiheisiin. Kompensointi- ja automaattiviritysohjelmat yhdistämällä saadaan suoraan kompensoinnin jälkeen myyntivarastoon perusalueviritteisiä lähettimiä. Suurin osa lähettimistä todennäköisesti toimitetaan perusviritteisenä ja Hart-liitynnän mahdollistama asiakkaan jälkiviritys tukee tätä olettamusta.

Kahden rinnakkaisjärjestelmän samanaikainen laitteistopäivitys ei ole perusteltua tuotekehitysbudjetin kannalta, jos ne voidaan ohjelmallisesti yhdistää.

Yksittäisviritykseen tarvittava ohjelmalohko päivitetään samalla kun tehdään lämpötilalähteen virityksen vaatimat muutokset automaattiviritysohjelmaan.

10 MITTAUKSET

Tässä kappaleessa esitetään mittaukset, jotka suoritettiin vastaavalle toisen valmistajan lähtemelle kuin suunniteltava lämpötilalähteen. Käytännön mittauksilla testattiin tarvittavien mittausten käytännön toteutusta ja soveltuvuutta uuden lähteen kehitysohjelmaan ja tulevaan tuotantoon. Saatujen mittaustuloksia verrattiin vertailulähtemelle luvattuihin arvoihin ja tulokset asetettiin suunniteltavan lähteen vähimmäistavoitearvoiksi mittauksiin. Mittaustulokset on esitelty liitteessä 9. Mittaustuloksia verrattiin suunniteltavan lähteen teoreettisiin arvoihin sen kilpailukykyä arvioimiseksi.

Mittaukset tehtiin kahdessa osassa. Ensimmäiseksi mitattiin vertailulähteen toimintaa huoneenlämmössä ja sen jälkeen lämpökaapissa neljässä lämpötilassa -20, 0, +40 ja +80 °C. Mittauksissa käytetyt laitteet ja niiden tarkkuudet on esitelty liitteessä 10.

10.1 Mittaukset huoneenlämmössä

Huoneenlämmössä mitattiin vertailulähtemeltä seuraavat arvot:

- Pt100:n lineaarisuus -200...+850 °C, 4-johdinmittauksena
- K-tyypin termoelementin lineaarisuus -180...+1370 °C
- mV-mittauksen tarkkuus -10...+110 mV
- Lineaarisen resistanssimittauksen tarkkuus 0...1000 Ω
- Lähteen milliampeerilähtö 4...20 mA

Edellä esitettyjen mittausten lisäksi tutkittiin A/D-muuntimen esivahvistusta ja resoluution riittävyyttä. Huonelämpötila vaihteli mittauksen aikana +21,3...+22,4 °C välillä.

10.2 Mittaukset lämpökaapissa

Lämpökaapissa mitattiin vertailulähtimestä lämpötiloissa -20, 0, +40 ja +80 °C seuraavat arvot:

- Pt100:n lineaarisuus pisteissä -200, 0, +100, +200, +300, +500, +700 ja +850 °C, 4-johdinmittauksena
- K-tyypin termoelementin lineaarisuus pisteissä -180, -100, 0, +120, +320, +470, +670, +870, +970, +1100 ja +1370 °C
- Lähettimen milliampeerilähtö 4..20 mA

Lämpökaappimittauksissa lähetin asennettiin metalliseen DIN-suojakoteloon lämpökaapin lämpötilaheilahtelujen ja sähkömagneettisten häiriöiden vaikutusten vähentämiseksi. Pt100- ja termoelementtisimulointiin käytetyt instrumentit sijoitettiin lämpökaapin ulkopuolelle huoneenlämpöön.

10.3 Mittauslaitteet

Mittauksissa käytetyt laitteet on lueteltu liitteessä 10 tarkkuuksineen. Laitteet ovat laboratoriokäyttöön tarkoitettuja ja kalibroituja. Anturisimuloinnissa käytettyjen resistanssi- ja millivolttiestilähteiden virhetoleranssit, jotka on esitelty liitteessä 10, ovat suuruusluokaltaan kymmenesosia tai korkeintaan samaa suuruusluokkaa anturivalmistajan ilmoittamien virhetoleranssien kanssa tarkimmilla anturityypeillä /5/. Simulointilaitteiden tarkkuudet riittävät siten vertailumittauksiin ja niitä käytetään uuden lähettimen kehityksessä ja tuotannossa.

11 MITTAUSTULOSTEN ARVIOINTI JA PÄÄTELMÄT

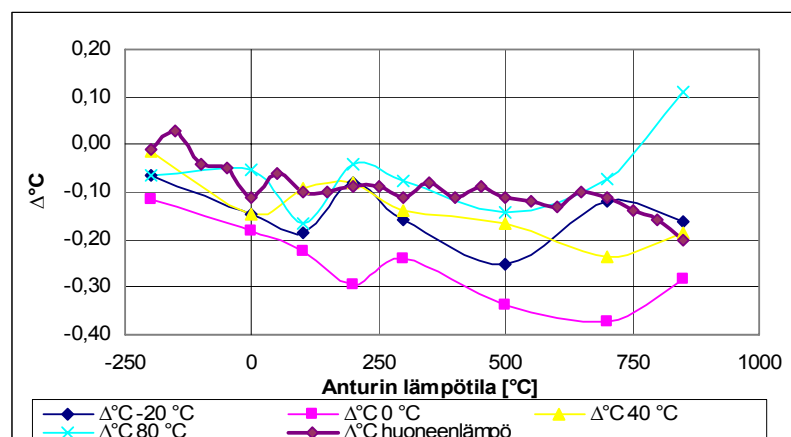
11.1 Pt100-vastusanturin mittaustulokset

Kuvassa 13 on esitetty vertailulähettimellä mitattu Pt100-vastusanturimittauksen linearisoinnin poikkeama lämpökompensoinnin jälkeen neljässä lämpökaapin lämmössä ja referenssilämpötilana toimivassa huoneenlämmössä + 22 °C.

Kuvaajista voidaan arvioida lähettimen lämpötilariippuvuutta lämpökompensoinnin jälkeen.

Huoneenlämmössä tehtyyn referenssimittaukseen nähden eniten virhettä syntyi lähettimen elektroniikan ollessa nollan asteen lämpötilassa. Vertailulähettimen tuloasteen lämpötilariippuvuuden korjauslaskenta on parempi lähempänä lähettimen sallitun toimintalämpötila-alueen ylä- ja alarajoja, joissa virhe pysyy pienempänä. Kaikille tuloksille on yhteistä että mittaustarkkuus heikkenee Pt100-anturille ominaisesti yli 500 °C:n mittauksessa.

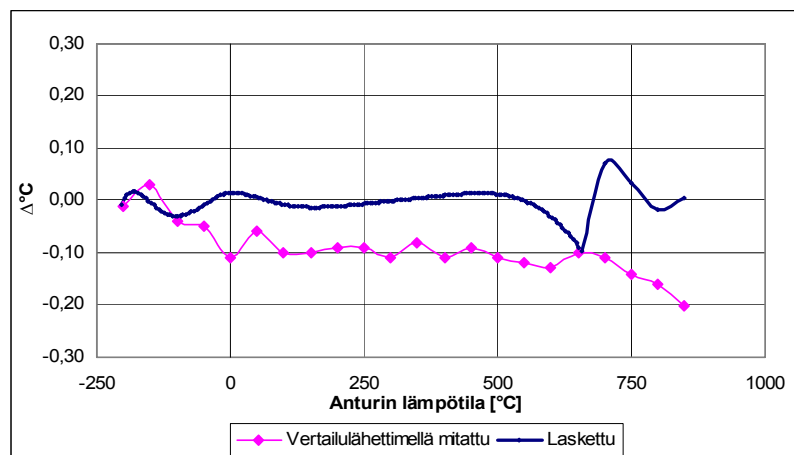
Vertailulähettimen lämpökompensoinnin toimivuus on heikointa lähettimen elektroniikan ollessa nollan asteen lämpötilassa. Asetettuihin toimintatavoitteisiin verrattuna vertailulähettimen mittaustulokset asetetaan korkeintaan alarajoiksi lämpökompensoinnille.



Kuva 13. Vertailulähettimen lämpötilariippuvuus Pt100-anturilla tehdyssä mittauksessa

11.2 RTD:n linearisointilaskennan tarkkuuden arviointi

Kuvassa 14 on esitetty uuden lähettimen teoreettinen ja vertailulähettimen huoneenlämmössä mitattu lineaarisuustarkkuus. Linearisointilaskentamenetelmä todettiin tarpeeksi tarkaksi verrattuna vastaavan lähettimen mittaustarkkuuteen. Lämpökompensointiin jää keskimäärin $0,1\text{ °C}$:n virhemarginaali, ilman että käytännön mittaustarkkuus laskisi vielä vertailulähettimen tasolle. Vertailulähettimelle luvataan $< \pm 0,1\text{ °C}$ tarkkuutta Pt100-mittauksessa. Mitattu ja laskettu lineaarisuus asetetaan ala- ja ylärajoiksi uuden lähettimen kehitystyössä.



Kuva 14. Teoreettinen ja vertailulähettimellä mitattu Pt100 linearisointi

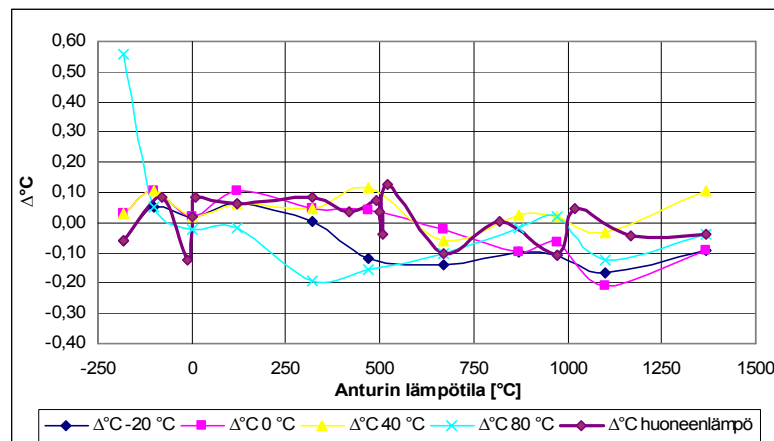
Pt100-vastusanturin linearisointitarkkuuden parantaminen entisestään olisi mahdollista polynomiapproksimaatiolla mittausalueen yläpäässä. Tämä ei ole kuitenkaan perusteltua, sillä alue on vastusantureilla hyvin vähän käytetty ja tarkemman laskennan etu menetetään käytännön vastusanturin huononevan tarkkuuden vuoksi korkeissa lämpötiloissa.

11.3 K-tyyppin termoelementin mittaustulokset

K-tyyppin termoelementillä tehtiin samat mittaukset kuin edellä Pt100-vastusanturilla. Mittauksissa käytettiin useampia simuloituja mittauspisteitä kattamaan termoelementin laajempi toiminta-alue tasaisesti. Kuvassa 15 on

esitetty vertailulähettimellä mitattu K-tyyppin linearisoinnin poikkeama lämpökompensoinnin jälkeen.

Kuvan 15 mukaan ympäröivän lämpötilan kasvaessa huononee termoelementin mittaustarkkuus erityisesti matalilla lämpötila-alueilla, joille sitä ei ole tarkoitettu. Verrattuna vastusanturin lämpötilariippuvuus mittaukseen, voidaan todeta termoelementtimittauksen olevan hieman riippumattomampi ympäröivän lämpötilan muutoksista vertailulähettimellä.



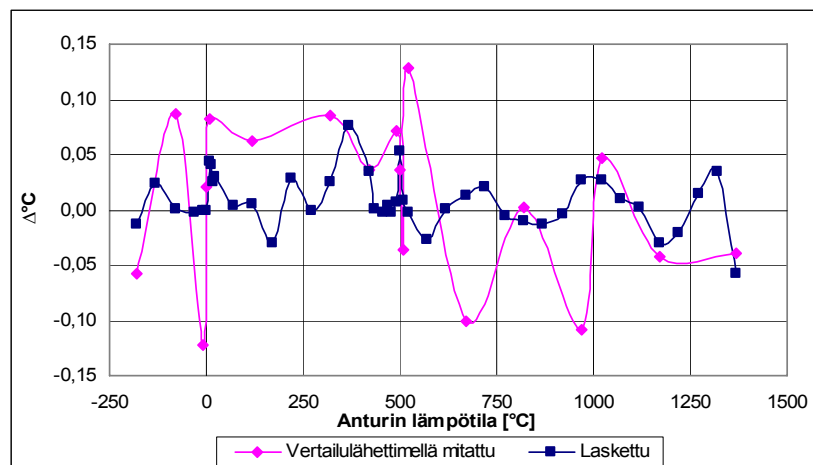
Kuva 15. Vertailulähettimen lämpötilariippuvuus K-tyyppin termoelementtianturilla tehdyssä mittauksessa

11.4 TC:n kylmäpisteen kompensoinnin vaikutus

Mittauksissa ei ollut käytössä termoelementin kylmäpisteen kompensointia, koska anturin simuloinnissa Beamex-termoparisimulaattorilla (liite 10) käytettiin mittajohtimina simulaattorin ja lähettimen välillä kuparijohtimia. Käytännön mittauksessa eri metalliset anturijohtimet tarvitsevat kylmäpisteen kompensoinnin. Kylmäpisteen lämpötilan mittaukseen käytetään Pt100-vastusanturia ja kuten edellä todettiin, on sen lämpötilariippuvuus suhteellisen suuri, joka puolestaan kasvattaa mittauksen epätarkkuutta. Suunniteltavan lähettimen tarkkuuden kannalta lämpökompensoitu A-tarkkuusluokan vastusanturi on vähimmäisvaatimus kylmäpistemittaukseen /2/.

11.5 TC:n linearisointilaskennan tarkkuuden arviointi

Kuvassa 16 nähdään vertailulähettimellä mitatussa K-tyypin termoelementin kuvaajassa standardin mukaisen polynomikaavan kertoimien vaihtumiskohtia, joissa virheet kasvavat jyrkästi (liite 5 s.7.).



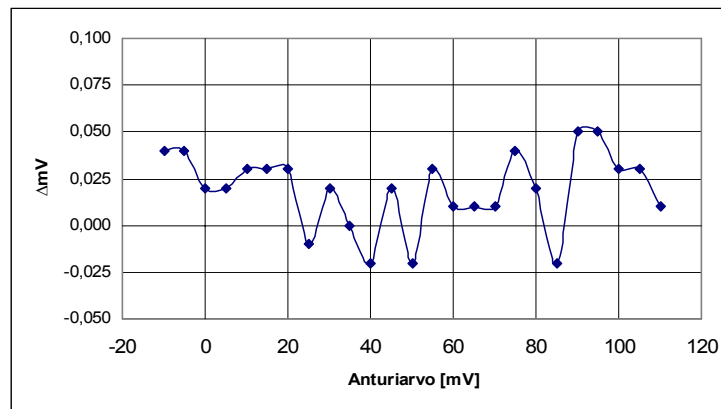
Kuva 16. Teoreettinen ja vertailulähettimellä mitattu K-tyypin termoelementin poikkeama linearisoinnin jälkeen

Vertailulähettimen linearisointi on jaettu useampaan osa-alueeseen, kuten uuden lähettimen linearisointisuunnittelussa tehtiin. Todennäköisesti vertailulähettimen laskennassa on käytetty matalamman asteen polynomia paikkaamaan epäjatkuvuuskohtia tai se on sovitettu harvemmillä pisteillä. Tämä pääteltiin virhekuvaajasta, jonka mittauspisteiden väliset vaihtelut ovat hyvin jyrkkiä. Vertailulähettimen tarkkuus pysyy kuitenkin lähes koko alueella luvatussa $< \pm 0,1$ °C:ssa. Tästä päätellen uuden lähettimen selvästi tarkempi lineaarisuuslaskennan suunnittelu on onnistunut.

11.6 Millivolttimittauksen tulokset

Vertailulähettimen millivolttimittauksella mitattiin huoneenlämmössä Beamexin millivolttigeneraattorin koko ulostuloalue $-10 \dots +110$ mV. Millivolttimittaus mahdollistaisi $-800 \dots +800$ mV:n alueen mittauksen. Kuvan 17 mitatun alueen mittausvirhe on keskimäärin alle 0,02 mV. Vertailulähettimen valmistaja lupaa

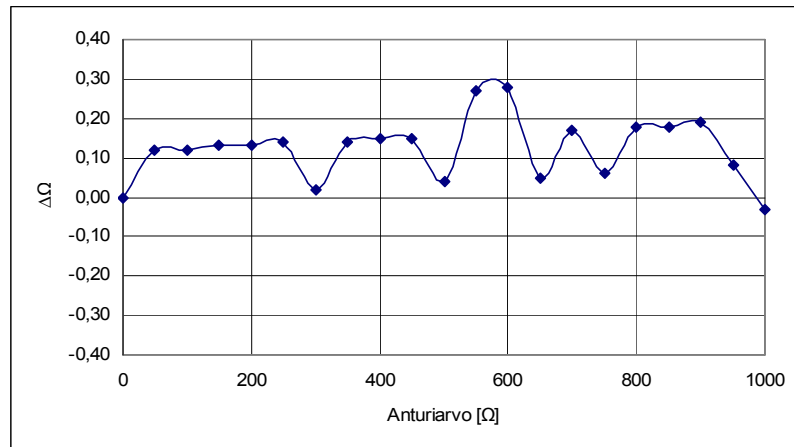
millivolttimittauksen tarkkuudeksi $< \pm 0,01$ mV. Mittaustarkkuus kuitenkin pysyy luvatussa absoluuttisessa tarkkuudessa $< \pm 0,05$ % aluelevydestä. Absoluuttinen tarkkuus sallii siis $\pm 0,8$ mV virheen suurimmalla aluelevydeillä $-800 \dots +800$ mV, jolla mittaus tehtiin. Mittauksen virheestä osa syntyy Beamexin millivolttikalibraattorin $\pm 6 \mu\text{V}$:n virheestä, joka pitää ottaa huomioon laitteen käytössä.



Kuva 17. Millivolttimittauksen virhekuvaaja välillä $-10 \dots +110$ mV

11.7 Lineaarisen resistanssimittauksen tulokset

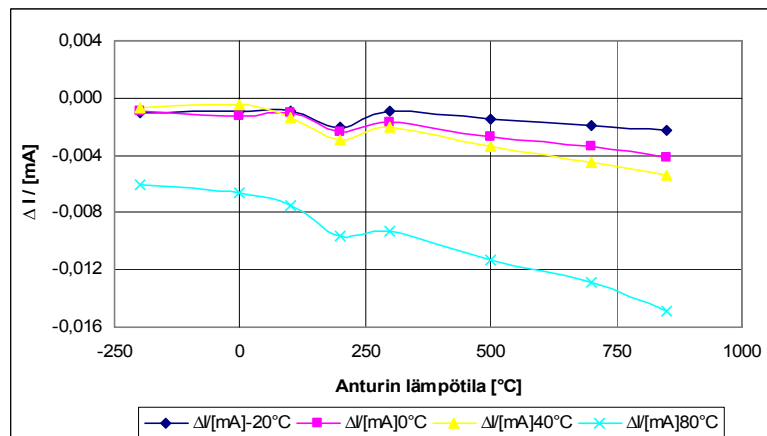
Vertailulähtetimen lineaarisella vastusmittauksella mitattiin Lloyd Instrumentsin Pt100-vastusdekadin alue $0 - 1000 \Omega$. Vertailulähtetimen resistanssimittauksella voidaan mitata alue $0 - 7 \text{ k}\Omega$. Kuva 18 esittää mitatun osa-alueen virhekuvaajan. Mittaus on koko alueella alle valmistajan lupaaman absoluuttisen virheen $\pm 0,05$ % aluelevydestä mutta ei $\pm 0,1 \Omega$ perustarkkuudessa. Aluelevytenä käytettiin suurinta aluelevyettä $0 - 7 \text{ k}\Omega$, joka sallii $\pm 3,5 \Omega$:n virheen.



Kuva 18. Lineaarisen resistanssimittauksen virhekuvaaja välillä 0 - 1000 Ω

11.8 Vertailulähtetimen lähtöasteen mittaukset

Vertailulähtetimen lähtöasteen lämpötilariippuvuutta tutkittiin lukemalla Pt100-vastusanturimittauksissa lähtetimen ulostulon milliampeerilähtöviesti ja CPU:n laskema lähtöviestin ohjaus. Niiden erotuksesta arvioitiin lähtöasteen D/A-muuntimen ja vakiovirtaviestigeneraattorin tarkkuutta ja lämpötilariippuvuutta.



Kuva 19. Lähtöasteen lämpötilariippuvuus

Kuvasta 19 havaitaan lähtöasteen selvä lämpötilariippuvuus sille suoritettujen lämpökompensoinnin jälkeen. Lämpötilan kasvaessa kasvaa lähtöasteessa syntyvä virhe. Suurimmillaan 80 °C:ssa mitattuna lähtöasteen virhe on reilu milliampeerin sadasosa eli virhettä on reilu prosentti. Alle 40 °C:n lämpötilassa

virhettä on reilu puoli prosenttia. Nämä arvot asetettiin uuden lähettimen tavoitearvoiksi lähtöasteen lämpökompensoinnissa.

11.9 Vertailulähettimen nollapisteen ja aluelevyden stabiilisuus

Vertailulähettimen milliampeerilähtöviestin lämpötilariippuvuuden todettiin olevan taulukon 1 mukainen. Taulukon 1 arvot asetettiin uuden lähettimen vertailuarvoiksi.

Taulukko 1. Vertailulähettimen nollapisteen ja aluelevyden muutokset

Lämpökaapin lämpötila [°C]	Alueveys [mA]	0-piste [mA]
-20,0	15,991	4,000
0,0	15,995	4,000
40,0	15,995	4,000
80,0	16,005	3,995
Suurin virhe %	-0,06	-0,03

11.10 Vahvistus ja A/D-muuntimen erottelukyky

Anturiviestin vahvistuksen tarvetta ja A/D-muuntimen erottelukyvyn riittävyyttä tutkittiin mittaamalla vertailulähetintä ja vertaamalla A/D-muuntimen resoluutioita.

11.10.1 Vahvistus

Vertailulähettimellä mitattiin vakiona pidettyä 50 Ω :n anturiviestiä lineaarisella resistanssimittauksella ja mittausalueita vaihdettiin taulukon 2 mukaisesti. Mittaustarkkuus oli selvästi parempi alle 1000 Ω :n aluelevydeillä. Yleisimpien ja tarkimpien vastusanturien Pt100 - Pt500 resistanssimittaukset sijoittuvat juuri tähän alueeseen. Alueen tarkkuutta on parannettu vahvistuksella. Vahvistus on toteutettu joko kiinteällä vahvistuksella tai valitun aluelevyden mukaan ohjelmallisesti säädettävällä A/D-muuntimen sisäisellä vahvistimella.

Taulukko 2. Mittaustarkkuuden riippuvuus mitta-alueesta

Mitta-alue (Ω)	Mittaustulos (Ω)	Virhe %
0 - 50	50,02	-0,040
0 - 100	50,02	-0,040
0 - 500	50,07	-0,140
0 - 1000	50,08	-0,160
0 - 2000	49,77	0,462
0 - 3000	49,77	0,462
0 - 4000	49,77	0,462
0 - 5000	49,88	0,241
0 - 6000	49,88	0,241
0 - 7000	49,77	0,462

Resistanssin mittaaminen perustuu millivolttimittaukseen. Vertailulähtimen mV-mitta-alue on -800...+800 mV:iin. Termoelementtimitta-alue, joka vaatii luotettavan μ V-luokan erottelukyvyn, on n. -10...+80 mV. Tämän kiinteän alueen signaalitasoja on vahvistettu A/D-muuntimen erottelukyvyn ja siten mittaustarkkuuden parantamiseksi halutulle tasolle myös pienillä alueveyksillä. Lähettimeltä vaadittu tarkkuus vaatii siis tämän mitta-alueen signaalitasojen vahvistuksen.

11.10.2 Erottelukyky

Vertailulähtimen ja suunniteltavan lähtimen erottelukykyjä vertailtiin laskennallisesti. K-tyypin termoelementillä havaitaan 0,1 °C:n lämpötilanmuutos 4 μ V:n jännitteen muutoksena. Tätä arvoa pidettiin erottelukyvyn mittana. Vertailulähtimen 22 bitin A/D-muunnin pystyy jakamaan 4 μ V:n signaalitason kymmeneen ja suunniteltavan lähtimen 24 bitin muunnin 26 eri osatasoon. Esivahvistuksen kanssa suunniteltavan lähtimen resoluutio arvioitiin riittäväksi.

12 YHTEENVETO

Satron Instruments Oy:n kattavan painelähetintuoteperheen täydennykseksi suunniteltava uusi lämpötilalähetin todettiin kysynnän suuruuden ja tämän työn teknisen selvityksen pohjalta kannattavaksi tuotekehitysprojektiksi. Uuden

lähetinmallin tavoitetarkkuus, laaja valmis kirjasto eri anturityypeistä ja Hart-protokollan mahdollistama lämpötilalähttimen asiakaskonfigurointi tekevät siitä kilpailukykyisen verrattuna vastaaviin muiden valmistajien tuotteisiin. Uuden lähttimen myötä Satron Instruments Oy pääsee automaatioinstrumenttien toimittajana eroon toimituksissa painelähttimien rinnalla myytävistä, aiemmin muilta valmistajilta hankituista lämpötilalähttimistä ja vanhoista hankalasti tuotettavista usean eri kiinteän mitta-alueen lähttimille. Tässä työssä esitetyillä suunnittelutavoilla saavutetaan tarkkuusrajat ja toimintatavoitteet, jotka lähttimellä asetettiin. Työn vaativin osuus oli teoreettisten laskentatapojen testaus ja vertailu tarkkuudeltaan soveltuvimpien ratkaisujen löytämiseksi. Lähttimen ja tuotantolaitteiston hardware- ja softwarepuolen muokkaus painelähttimien tuotannon pohjalta todettiin mahdolliseksi, mikä laskee tuotekehityskuluja. Työn tuloksena syntyi myös selvitys vertailumittauksista vastaavasta toisen valmistajan tuotteesta, joista saatiin käytännön vertailuarvoja teoreettisten tavoitteiden rinnalle uuden lähttimen tuotekehitykseen.

Lämpötilalähttimen tuotekehitys jatkuu prototyypipiirilevyjen testauksella ja loppujen RTD- ja TC-anturityyppien lineaarisointisuunnittelulla työssä esitetyillä tavoilla.

LÄHDELUETTELO

Painetut lähteet

- 1 Weckström, Thua: Lämpötilan mittaus. Mittatekniikan keskus. Julkaisu J1/2002.
- 2 Kerlin, Thomas W.- Shepard, Robert L: Industrial Temperature Measurement. Instrument Society of America (ISA) 1982.

Sähköiset lähteet

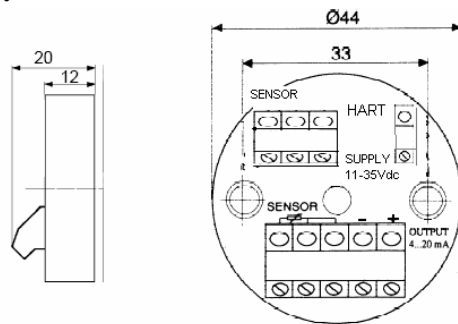
- 3 Capgo Pty Ltd. [www-sivu].[viitattu 23.9.2007] Saatavissa:
<http://www.capgo.com/Resources/Temperature/RTDs/RTD.html>
- 4 Therm-X of California. [www-sivu].[viitattu 26.9.2007] Saatavissa:
http://www.therm-x.com/assets/5/rtd%20dap_dsp.pdf
- 5 Sks Group Oy. [www-sivu].[viitattu 30.9.2007] Saatavissa:
[http://www.sks.fi/inet/sks/contman.nsf/documents/4BC6292820AFC837C22571F70029F926/\\$file/lampotila_anturit_tuotehinnasto_1091500_210207.pdf](http://www.sks.fi/inet/sks/contman.nsf/documents/4BC6292820AFC837C22571F70029F926/$file/lampotila_anturit_tuotehinnasto_1091500_210207.pdf)
- 6 Smar Corp. [www-sivu].[viitattu 15.9.2007] Saatavissa:
<http://www.smar.com/hart.asp>
- 7 Satron Instruments Oy. [www-sivu].[viitattu 15.9.2007] Saatavissa:
http://www.satron.com/data/fin/ilmoitus_230407.pdf
- 8 PR Electronics Ltd. [www-sivu].[viitattu 1.10.2007] Saatavissa:
<http://www.prelectronics.co.uk/filer/5335V.pdf>
- 9 NIST ITS-90 Thermocouple Database. [www-sivu].[viitattu 11.3.2007] Saatavissa:
<http://srdata.nist.gov/its90/download/allcoeff.tab>
- 10 Pyromation Inc. [www-sivu].[viitattu 1.10.2007] Saatavissa:
<http://www.pyromation.com/Downloads/tables.asp>

- 11 Pienimmän neliösumman laskentaohjelma. [www-sivu].[viitattu 5.10.2007] Saatavissa:
<http://www3.sympatico.ca/mcomeau/webpublic/javapage/reg/reg.htm>
- 12 Hart Communication Foundation. [www-sivu].[viitattu 12.10.2007] Saatavissa: <http://www.hartcomm2.org/index.html>
- 13 Krohne. [www-sivu].[viitattu 12.10.2007] Saatavissa:
http://www.krohnemar.com/HART_Communications_en.4417.0.html

Lämpötilalähettimelle asetetut tavoitearvot

Mekaaniset tiedot:

Anturipää.....	DIN43729 Form B (kuva) (tai vastaava)
Lähettimen kotelon mitat.....	Ø 44 mm, korkeus 20mm, keskireikä Ø 5,5 mm
Kiinnitys asennusalustaan.....	M4 x 25 mm ruuvit + 18 mm jouset Ø 6 mm
Liittimet.....	3 + 3 riviliitintä ja 2 kpl riviliitäntöjä 4...20 mA virtaviestille

Mitat:**Sähköiset tiedot:****Toimintalämpötila:**

-30...+80 °C, virhevaikutus $\leq 0,0015 \% / ^\circ\text{C}$

Yleiset:

Syöttöjännite.....	11 - 35 Vdc
Anturivirta.....	0,4 mA
Eristysjännite koemittaus.....	$\geq 0,5 \text{ kVrms } 50 \text{ Hz}$
Ympäristölämpötila.....	-30...+80 °C, virhevaikutus $\geq 0,0015 \% / ^\circ\text{C}$
Syöttöjännitteen vaikutus.....	$\leq 0,01 \% / \text{V}$ aluelevydestä
Pitkäaikaisstabiilisuus alle isompi näistä:..	0,1 % / alueveys / 12 kk tai 0,1 °C/ 12 kk
Radiohäiriöiden vaikutus.....	$\leq 0,1 \%$ aluelevydestä
Johtuvien häiriöiden vaikutus alle	0,01 % aluelevydestä
Kommunikointiliitäntä.....	Hart®, 4...20 mA virtasilmuksella
Säädettävyys.....	1:100
Mittausviive.....	100 ms
Mittausliitännät.....	RTD: 2-johdin, 3-johdin ja 4-johdin TC, mV ja lin. res.: 2-johdin ja kahden anturin differentiaaliliitäntä

Mittaukset:

Vastusanturimittaus	-50...+800 °C
Termoelementtimittaus	-200...+1800 °C
Millivolttimittaus	-1,25 V...+1,25 V
Lineaarinen vastusmittaus	0...10 kΩ

Valitut anturityypit:

Vastusanturit	Termoelementit (NBS / NIST)
Pt100(IEC)	B
Pt100(JIS)	E
Pt200(IEC)	J
Pt500(IEC)	K
Pt1000(IEC)	N
Ni20	R
Cu10	S
	T

Tarkkuudet:

Tarkkuudeksi valitaan suurempi yleisestä tai perusarvosta:

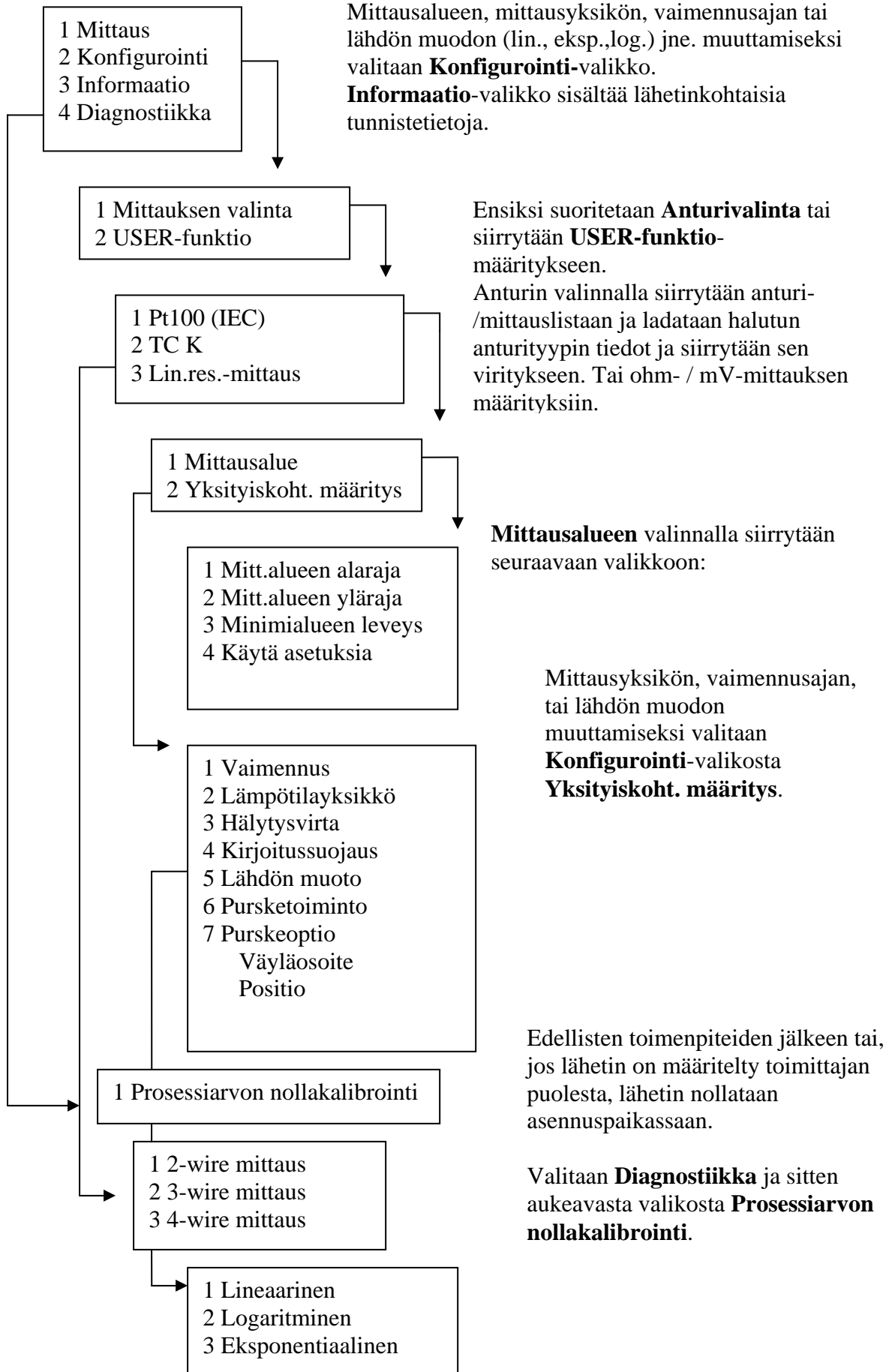
Yleiset:

Tulotyyppi	Absoluuttinen tarkkuus
Kaikki	alle 0,05 % alueesta

Perusarvot:

Mittaus	Perustarkkuus
Vastusanturit	$\leq \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Termoelementit	$\leq \pm 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Millivolttimittaus	$\leq \pm 2,0 \text{ } \mu\text{V}$
Lin.vastusmittaus	$\leq \pm 0,01 \text{ } \Omega$

Päävalikko



Paluu valikosta edelliseen BACKSPACE-nuolinäppäimellä.

Lämpötila-asteikko muunnokset

Muutokset eri lämpötila-asteikkojen avulla suoritetaan seuraavilla kaavoilla 1 - 4:

Celsius-Kelvin muunnokset.

$$t = K - 273,15 \quad (1)$$

$$K = t + 273,15 \quad (2)$$

, jossa

t = Celsiusaste

K = Kelvin

Celsius-Fahrenheit muunnokset:

$$t = 5/9 (F - 32) \quad (3)$$

$$F = 9/5 t + 32 \quad (4)$$

, jossa

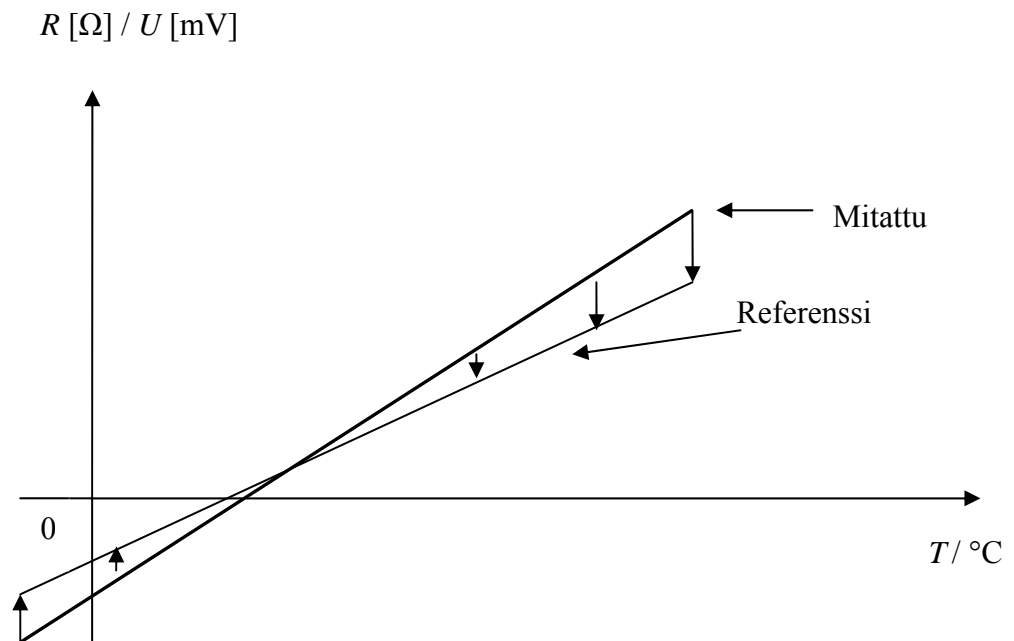
t = Celsiusaste

F = Fahrenheitaste

Lämpökompensointi

Kompensointijärjestelyt:

Anturia simuloidaan haluttuja lämpötiloja vastaavilla Pt100-vastusanturin resistanssiarvoilla. Lähettimen elektroniikkaan vaikuttavaa lämpötilaa muutetaan sijoittamalla lähetin lämpökaappiin. Sille suoritetaan mittaukset usealla eri Pt100-arvolla eri elektroniikan lämpötiloissa. Resistanssiarvot mitataan oikealta mittakanavalta MUX:n avulla ja A/D-muunnetaan. Digitalisoitu viesti linearisoidaan. Linearisoitu anturiarvo luetaan Hart-väylän kautta kompensointiohjelman muistiin. Mittauksista muodostuvat kuvan 1 mukaiset käyrät, jotka eroavat toisistaan elektroniikan lämpötilasta johtuen. Esimerkin selvyuden vuoksi käyrät ovat piirretty lineaarisiksi suoriksi.

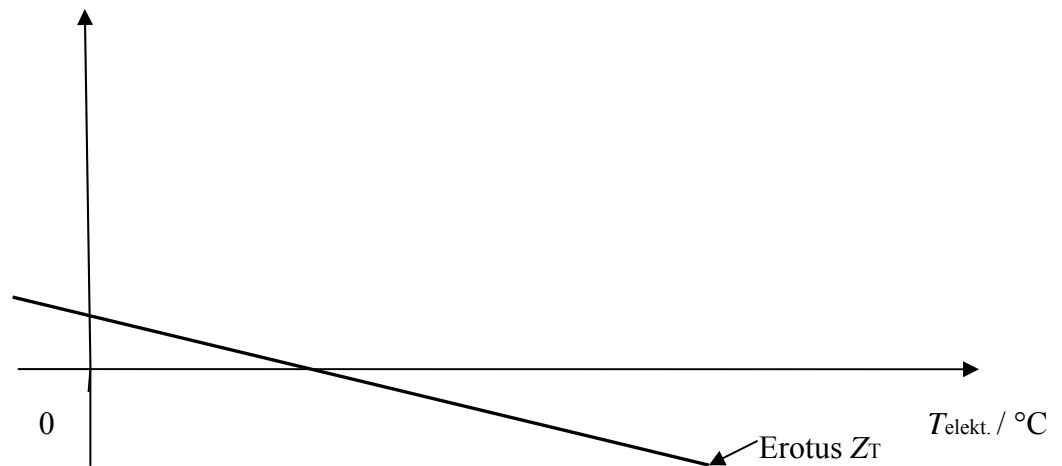


Kuva 1. Elektroniikan lämpötilan aiheuttama poikkeama mittaukseen

Mitatun anturiarvon ja simuloitua referenssilämpötilaa vastaavan resistanssi- tai mV-arvon erotuksesta muodostettuun pistejoukkoon sovitetaan toisen asteen polynomikäyrä (kuva 2).

Käyrän sovitukset lasketaan kompensointiohjelman oman laskenta-algoritmin avulla. Sovituksen tuloksena saadaan $A_T \dots C_T$ polynomikertoimet, joita käytetään lähettimen sisäisessä virheenkorjaus laskennassa.

$$\Delta R [\Omega] / \Delta U [\text{mV}]$$



Kuva 2. Kompensointimittauksen poikkeamakäyrä

Korjauksessa käytetään saatua polynomilauseetta Z_T (kaava 1).

$$Z_T = A_T + B_T T_{elekt} + C_T T_{elekt}^2 \quad , \text{jossa} \quad (1)$$

$A_T \dots C_T =$ polynomikertoimet

$T_{elekt} =$ Lähettimen elektroniikan lämpötila

Kertoimet tallennetaan yksilöllisesti lähettimien EEPROM-muisteihin Hart-väylän kautta. Lopullinen korjattu lämpötila-arvo lasketaan lähettimessä kaavasta 2 ennen alueskaalausta ja D/A-muunnosta.

Korjaus lisätään virheen sisältävään mitattuun anturiarvoon:

$$A_C = A_{mitattu} + Z_T \quad , \text{jossa} \quad (2)$$

$A_{mitattu} =$ Mitattu anturiarvo

$A_C =$ Kompensoitu anturiarvo

Laskenta-algoritmi

Kompensointiohjelman laskenta-algoritmi pienimmän neliösumman menetelmällä:

Talletetaan anturiarvot $A_{mitattu}$ ja $A_{referenssi}$ omiin matriiseihinsa:

$$\begin{bmatrix} A_{m1} \\ A_{m2} \\ A_{m3} \\ A_{m4} \\ A_{m5} \end{bmatrix} = A_{mitattu}, \quad \begin{bmatrix} A_{r1} \\ A_{r2} \\ A_{r3} \\ A_{r4} \\ A_{r5} \end{bmatrix} = A_{referenssi}$$

Lasketaan lämpötilariippuvuudesta johtuvat alkioiden erotukset matriisiin A_{erotus} :

$$A_{erotus} = A_{referenssi} - A_{mitattu} = \begin{bmatrix} A_{r1} \\ A_{r2} \\ A_{r3} \\ A_{r4} \\ A_{r5} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} A_{m1} \\ A_{m2} \\ A_{m3} \\ A_{m4} \\ A_{m5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{r1} - A_{m1} \\ A_{r2} - A_{m2} \\ A_{r3} - A_{m3} \\ A_{r4} - A_{m4} \\ A_{r5} - A_{m5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{er1} \\ A_{er2} \\ A_{er3} \\ A_{er4} \\ A_{er5} \end{bmatrix}$$

Ratkaistaan jokaisen lämpökaapin lämmön mittausten keskiarvot ja sijoitetaan ne matriisiin $A_{erotusav}$:

$$A_{erotusav} = \begin{bmatrix} A_{erav1} \\ A_{erav2} \\ A_{erav3} \\ A_{erav4} \\ A_{erav5} \end{bmatrix}$$

Halutaan ratkaista polynomikertoimet seuraavasta kaavasta (1) edellä laskettujen toimintapisteiden avulla.

$$Z_T = A_T + B_T T_{elekt} + C_T T_{elekt}^2 \quad (1)$$

Kaava yksi matriisitulona:

$$Z_T = A_T + B_T T_{elekt} + C_T T_{elekt}^2 = \begin{bmatrix} 1 & T_{elekt} & T_{elekt}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_T \\ B_T \\ C_T \end{bmatrix}$$

$$\text{Muuttujamatriisi } M = \begin{bmatrix} 1_1 & T_{\text{elekt}1} & T_{\text{elekt}1}^2 \\ 1_2 & T_{\text{elekt}2} & T_{\text{elekt}2}^2 \\ 1_3 & T_{\text{elekt}3} & T_{\text{elekt}3}^2 \\ 1_4 & T_{\text{elekt}4} & T_{\text{elekt}4}^2 \\ 1_5 & T_{\text{elekt}5} & T_{\text{elekt}5}^2 \end{bmatrix}$$

Kertoimet:

$$K = \begin{bmatrix} A_T \\ B_T \\ C_T \end{bmatrix}$$

Lämpökaapin lämpötilat ovat olleet mittauksissa matriisiin T mukaiset:

$$T = \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \\ T4 \\ T5 \end{bmatrix}$$

Kaavaan yksi lisätään virhetekijä e esittämään mittauspisteen ja sovitettavan suoran etäisyyttä y-akselin suunnassa.

$$Z_T = A_T + B_T T_{\text{elekt}} + C_T T_{\text{elekt}}^2 + e$$

Virhetekijä matriisi E :

$$E = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_5 \end{bmatrix} \Rightarrow E^T = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_5]$$

E^T on matriisi E transpoosi, jossa sarake on käännetty riviksi.

Virheiden neliösumma lasketaan matriisina J :

$$J = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & \dots & e_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ e_5 \end{bmatrix} = E^T E$$

Yhtälöryhmä matriisien avulla:

$$T = MK + E$$

Ratkaistaan E :n suhteen:

$$E = T - MK$$

$$J = E^T E = (T - MK)^T (T - MK) = (T^T - M^T K^T)(T - MK)$$

$$J = T^T T - T^T MK - K^T M^T T + K^T M^T MK$$

Transponointisääntöjen avulla yhtälöä muokkaamalla saadaan:

$$J = T^T T - 2T^T MK + K^T M^T MK$$

Derivoidaan saatu neliösumman lauseke haluttujen K -parametrien suhteen ja asetetaan derivaatta nolllaksi:

$$\frac{dJ}{dK} = \frac{d}{dK} (T^T T - 2T^T MK + K^T M^T MK) = -2T^T M + 2K^T M^T M = 0$$

$$\Leftrightarrow K = \underline{\underline{(M^T M)^{-1} M^T T}}$$

\Leftrightarrow Merkintä $(\dots)^{-1}$ tarkoittaa käänteismatriisia, jonka ratkaisemiseksi tarvitaan determinantin ratkaisua.

Matriisista K saadaan kertoimet $\begin{bmatrix} A_T \\ B_T \\ C_T \end{bmatrix}$

Esimerkki: Referenssinä Pt100-vastusdekadi

Mittaustuloksia lämpötiloissa -20, 0 20, 50 80 °C:

$$\text{Aerotus } -20 \text{ °C} = \text{Areferenssi} - \text{Amitattu} = \begin{bmatrix} 18,53 \\ 100,00 \\ 175,84 \\ 247,06 \\ 329,57 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 18,49 \\ 99,99 \\ 175,89 \\ 247,20 \\ 329,72 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,04 \\ 0,01 \\ -0,05 \\ -0,14 \\ -0,15 \end{bmatrix}$$

Mittaustulosten virheet sisältävästä matriisista Aerotus -20 °C lasketaan keskiarvo:

$$\text{Aerotus } -20 \text{ °Caverage} = -0,058 \text{ (}\Omega\text{)}$$

Muut vastaavasti:

$$\text{Aerotus } 0 \text{ °Caverage} = 0,012 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\text{Aerotus } 20 \text{ °Caverage} = -0,10 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\text{Aerotus } 50 \text{ °Caverage} = 0,21 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\text{Aerotus } 80 \text{ °Caverage} = 0,16 \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$\Rightarrow \text{Aerotusav} = \begin{bmatrix} -0,058 \\ 0,012 \\ -0,10 \\ 0,21 \\ 0,16 \end{bmatrix}$$

Matriisialgoritmissa matriisia T vastaa nyt matriisi Aerotusav.

Suoritetaan aiemmin esitetty matriisilaskenta-algoritmi pienimmän neliösumman menetelmällä ja saadaan matriisin K alkioiksi seuraavat kertoimet 2. - 4. asteen polynomilausekkeille laskettuna malliksi pienimmän neliösumman ratkaisuohjelmalla /11/:

 POLYNOMIAL SMOOTHING OF DATA

DEGREE = 2

Expansion Coefficients of X^i

X^2	X^1	Constant
3.493962E-05	-3.393617E-04	0.009041

	Input X	Input Y	Estimated Y
1	-20.0	0.058	0.029804
2	0.000000	0.012	0.009041
3	20.0	-0.1	0.016229
4	50.0	0.21	0.079422
5	80.0	0.16	0.205505

Standard Deviation = 0.129295
 R-squared = 0.443575

 POLYNOMIAL SMOOTHING OF DATA

DEGREE = 3

Expansion Coefficients of X^i

X^3	X^2	X^1	Constant
-1.585613E-06	1.477192E-04	0.001408	-0.076369

	Input X	Input Y	Estimated Y
1	-20.0	-0.058	-0.032752
2	0.000000	0.012	-0.076369
3	20.0	-0.1	-0.001812
4	50.0	0.21	0.165114
5	80.0	0.16	0.169819

Standard Deviation = 0.142122
 R-squared = 0.723959

 POLYNOMIAL SMOOTHING OF DATA

DEGREE = 4

Expansion Coefficients of X^i

X^4	X^3	X^2	X^1	Constant
-1.428571E-07	1.494524E-05	-1.703571E-04	-0.007028	0.012000

	Input X	Input Y	Estimated Y
1	-20.0	-0.058	-0.058000
2	0.000000	0.012	0.012000
3	20.0	-0.1	-0.100000
4	50.0	0.21	0.210000
5	80.0	0.16	0.160000

Standard Deviation = Undefined
 R-squared = 1.000000

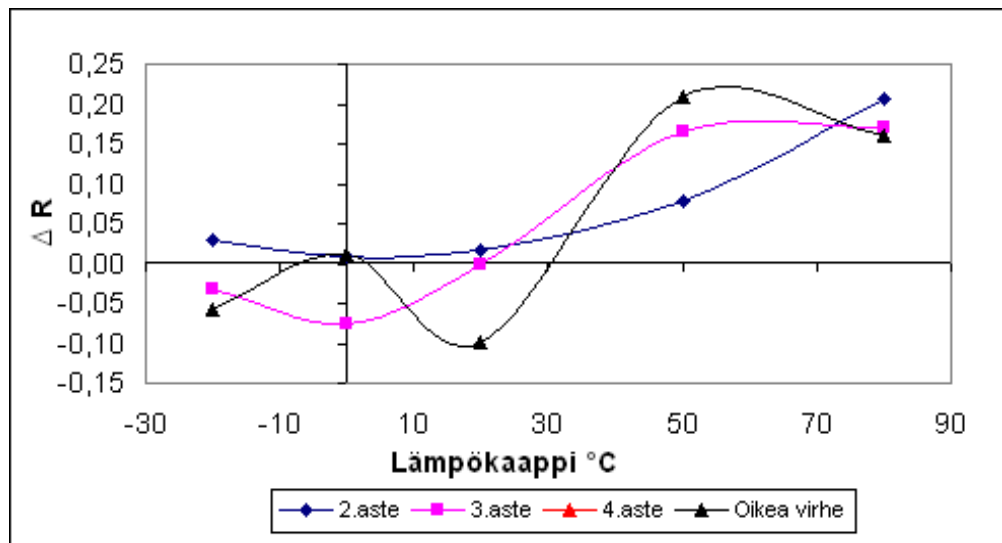
Polynomisovitusastelukujen vertailu:**Polynomisovitukset:**

X ²	X ¹	Constant
3.493962E-05	-3.393617E-04	0.009041

X ³	X ²	X ¹	Constant
-1.585613E-06	1.477192E-04	0.001408	-0.076369

X ⁴	X ³	X ²	X ¹
-1.428571E-07	1.494524E-05	-1.703571E-04	-0.007028
Constant			
0.012000			

Lämpötila °C	2.aste	3.aste	4.aste	Mitattu virhe ΔR
-20	0,030	-0,033	-0,058	- 0,058
0	0,009	-0,076	0,012	0,012
20	0,016	-0,002	-0,100	-0,10
50	0,079	0,165	0,210	0,21
80	0,206	0,170	0,160	0,16



Kuva 3. Polynomiasteiden vertailu

Neljannen asteen sovitus on jo niin tarkka, ettei oikeaa virhettä voida erottaa kuvasta 3.

Anturiviestin linearisointi

RTD- vastusanturien linearisoinnin ja lämpötilamuunnoksen matematiikka

Callendar-Van Dusen-kaava lämpötilasta resistanssiksi:

$$R_T = R_0 + R_0 \cdot \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T^3}{100} \right) \right] \quad \text{jossa} \quad (1)$$

α = lämpötilavakio 0,00385055 (Ω/Ω)/ $^{\circ}\text{C}$

δ = 1,49

β = 0, kun $T > 0$ ja 0,11, kun $T < 0$

Kaavasta 1 lasketaan mitattavaan lämpötilaan nähden verrannollinen linearisoitu resistanssiarvo. Kaavassa tarvitaan lähtötiedoiksi vastusanturin resistanssi lämpötilassa 0 $^{\circ}\text{C}$ ja anturityyppikohtaiset standardin mukaiset vakiot α , δ ja β . Kaava on usein esitetty yksinkertaisemmassa muodossa (kaava 2), johon on ratkaistu vakiokertoimet A , B ja C .

Kaavassa tulee ottaa huomioon myös seuraava piirre:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad (2) \text{ esim. } T_{\text{range1}} = -200 \dots 0 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2) \quad \text{esim. } T_{\text{range2}} = 0 \dots +850 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

HUOM! Kun $R_T/R_0 < 1 \Rightarrow T_{\text{range1}}$ ja kun $R_T/R_0 > 1 \Rightarrow T_{\text{range2}}$

Lämpötilamuunnos**Vaihtoehto 1.**

Ensimmäinen vaihtoehto perustuu Callendar-Van Dusen-kaavalla linearisoituihin

R_T -arvoihin, joita lasketaan tarpeeksi suuri määrä kattamaan tasaisesti koko käytössä oleva lämpötila-alue. Muodostuvaan pistejoukkoon sovitetaan polynomiaprosimaatiolla useamman asteen polynomikäyrä, jonka kertoimet talletetaan muistiin vastusanturityyppikohtaisesti. Suunnittelussa todettiin seitsemännen asteen polynomilauseen, joka sovitettiin 14 toimintapisteellä, olevan riittävän tarkka. Sovitus tehtiin Eureka Solver-laskentaohjelmalla, joka on esitetty ohjelman tulostustiedostossa liitteessä 6.

Nikkeli ja kupari antureille sovitukset tehdään samoin kuin platina-antureille.

Vaihtoehto 2.

Toinen vaihtoehto perustuu kahteen yhdistettyyn muunnoslaskentatapaan. Positiivisten lämpötilojen muunnokseen käytetään toisen asteen yhtälön ratkaisukaavaa kaavaan 1 ja negatiivisten toisen asteen polynomisovitusta.

$$R_T = R_0 + R_0 \cdot \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T^3}{100} \right) \right] \quad (1)$$

$\beta = 0$, siis

$$\Rightarrow \frac{R_T}{R_0} = 1 + \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) \right]$$

$$\Rightarrow \frac{R_T}{R_0} = 1 + \alpha T - \frac{\alpha \delta T^2}{10000} + \frac{\alpha \delta T}{100}$$

...

$$\Rightarrow 0 = T^2 - \left(\frac{10000}{\delta} + 100 \right) T + \left(\frac{10000}{\alpha \delta} \right) \left(\frac{R_T}{R_0} - 1 \right)$$

Saatu lauseke on toisen asteen yhtälö muotoa:

$$T^2 + BT + C = 0$$

, jossa

$$B = -\left(\frac{10000}{\delta} + 100\right)$$

$$C = \left(\frac{10000}{\alpha \delta}\right)\left(\frac{R_T}{R_0} - 1\right)$$

Ratkaisuksi saadaan:

$$T = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4C}}{2} \quad (3)$$

Toisen asteen yhtälön ratkaisu onnistuu helposti (kaava 3), mutta nollan alapuolisella lämpötila-alueella tarvittaisiin kolmannen asteen yhtälön ratkaisua T :n suhteen. Nollan alapuolinen alue on koko Pt100:n aluevevyyteen nähden kapea. Nollan alapuolinen toiminta-alue on anturin toiminnan puolesta $-200 \dots 0$ °C mutta uudelle lähettimelle asetettu toiminnan alaraja on vain -50 °C. Nollan alapuoliselle alueelle sovitetaan polynomiapproksimaatiolla toisen asteen polynomilauseke laskemalla sille pistejoukko aluetta varten tarkoitettulla kaavalla 1. Polynomilauseke ja sen kertoimet talletetaan lähettimen muistiin.

Laskuesimerkki: Kertoimet laskutoimitukseen IEC 751-standardin mukaiselle Pt100-anturityypille

Pt100 (IEC 751):

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad ,jossa \quad (1)$$

$$R_0 = 100 \, \Omega$$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ alle } 0 \text{ } ^\circ\text{C ja } 0,0 \text{ yli } 0 \text{ } ^\circ\text{C:n}$$

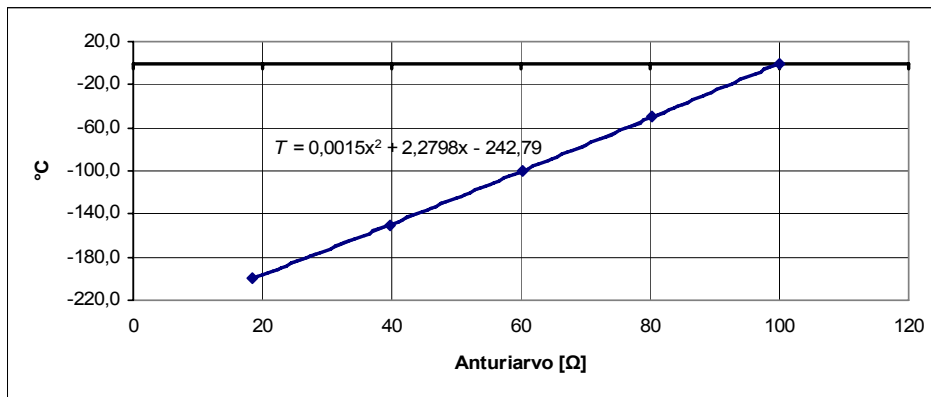
Lämpötila-alue: -200...+ 850 °C

Lasketaan nollan yläpuoliset lämpötilat kaavalla 3. Nollan alapuolen lämpötilamuunnokseen tarvittavat kaavalla 1 lasketut linearisoidut pisteparit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Nollan asteen alapuolen pistepareja

R_T /[Ω]	Lämpötila/[$^\circ\text{C}$]
18,520	-200,000
39,720	-150,000
60,260	-100,000
80,310	-50,000
100,000	0,000

Taulukon 1 koordinaattipisteisiin sovitetaan toisen asteen polynomikäyrä kuvan 1 esittämällä tavalla.



Kuva 1. Polynomisovitus 0 °C:n alapuolelle

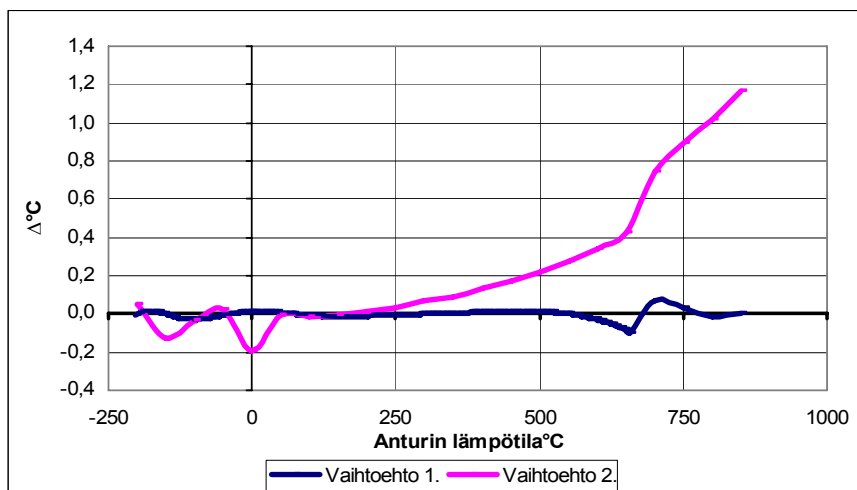
Kaikkien muiden vastusanturien linearisointi suoritetaan samoin.

Vaihtoehtojen vertailu

Vaihtoehdolla kaksi saavutetaan kuvan 2 esittämä teoreettinen tarkkuus koko Pt100-anturin toiminta-alueella. Käytetyimmällä alueella $-50\dots+250\text{ °C}$:een laskenta on lähellä haluttua tarkkuutta, koska virhe on $< \pm 0,1 - 0,3\text{ °C}$. Negatiivisen lämpötila-alueen lämpötilamuunnos saataisiin lineaarisemmaksi sovittamalla siihen korkeamman kuin toisen asteen polynomilauseke useammalla pisteparilla.

Koko toiminta-alueella tarkkuus todettiin kuitenkin riittämättömäksi. Laskennan tasolla pitää päästä tarkempaan muunnokseen, jotta muille virhetekijöille jää marginaalia.

Kuvassa 2 esitetään molempien laskentatapojen poikkeamakuvaajat. Kuvaajista nähdään vaihtoehdon yksi olevan selvästi tarkempi, selkeämmin yhdellä polynomilauseella laskettavissa, kattavan koko alueen ja jättävän tärkeimmällä käyttöalueellaan $-50\dots400\text{ °C}$ marginaalia muille virhetekijöille. Vaihtoehdolla yksi tarkkuus on haluttu $< \pm 0,1\text{ °C}$.



Kuva 2. Linearisoinnin laskentatapojen poikkeamat koko toiminta-alueella

Huomioitavaa vastusanturien lämpötilamuunnoksessa

1. Eri RTD-tyypeillä omat taulukkonsa ja ne määritellään edellä esitetyllä tavalla jokaiselle tyypille erikseen. Eri standardien (JIS, IEC) määrittelyt ja sovitukset tehdään siis aivan samoin, huomioon otetaan standardikohtaisesti poikkeavat kertoimet ja niistä johtuvat eri kerrointaulukot.

Ero saman standardien ja samasta metalliseoksesta valmistetuilla vastusantureilla on ainoastaan siinä, että taulukoitu arvo R_T kerrotaan nimellisresistanssiarvojen osamäärällä.

Esim. Pt100 ja Pt500:

$$\text{Kerroin on } \frac{500}{100} = 5$$

2. Cu10- ja Ni20-antureille ei ole standardin mukaista Callendar-Van Dusen-kaavaa (kaava 1) varten kertoimia A, B ja C, mutta valmiiksi koottu resistanssi vs. lämpötila- taulukko on olemassa /10/.

3. Laskentaan tarvittavat tiedot löytyvät liitteestä 7 lueteltuna anturi- ja standardikohtaisesti.

Termoelementit TC:

Termoelementtien linearisointikaava 2:

$$T = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad , \text{ jossa } \quad (2)$$

T = lämpötila

a = polynomikerroin

x = anturiarvo (mV)

n = suurin polynomiaste

Käänteinen muunnos lämpötilasta T sitä vastaavaksi jännitteeksi kaavalla 3:

$$U = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots + a_nT^n \quad \text{jossa} \quad (3)$$

U = jännite (mV)

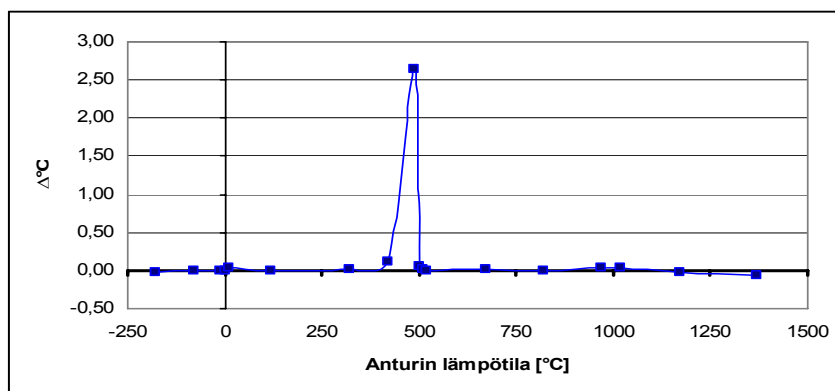
$a_0 \dots a_n$ = standardikertoimia

T = lämpötila

n = suurin polynomiaste

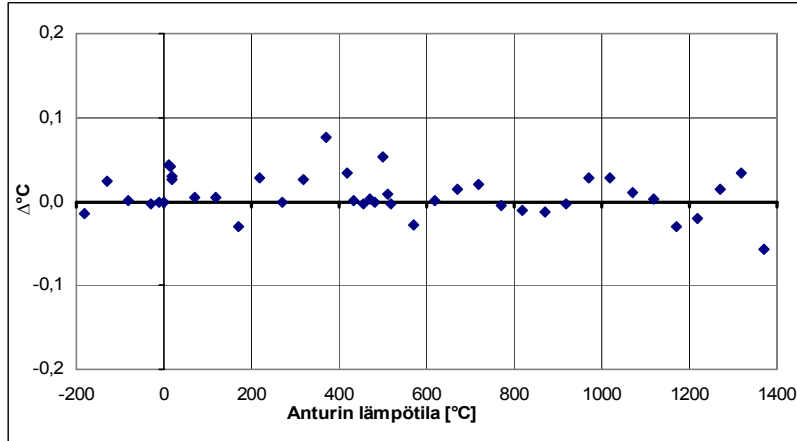
Termoelementin linearisoinnin tarkkuuden parantaminen

Valmiilla standardin mukaisilla linearisointikaavoilla päästään hyvään muunnostarkkuuteen lähes koko toiminta-alueella. Toiminta-alueet on jaettu termoelementeillä pienempiin osa-alueisiin, joille on määritelty omat korjauskertoimensa. Polynomilauseet eivät kuitenkaan aina kata tarvittavalla tarkkuudella koko aluettaan. Kuvassa 3 on esitetty K-tyypin termoelementin tarkkuuden koko toiminta-alueella $-200 \dots +850 \text{ }^\circ\text{C}$. Alue on laskettu kolmessa osassa kaavalla 2 eri alueiden omilla standardikertoimilla. Toisen alueen loppupuolella välillä $450 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ virhe kasvaa jyrkästi. Alueen epälineaarisuus korjattiin sovittamalla Eureka Solver-laskentaohjelmalla välille $420 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$ viidennen asteen polynomilause kuudella pisteellä. Sovitus on esitetty Eureka tulostustiedostossa liitteessä 8.



Kuva 3. K-tyypin linearisoinnin poikkeama koko toiminta-alueella

Ylimääräisen polynomilauseen sovituksella K-tyyppin toiminta-alue jaettiin neljanteen osa-alueeseen, jolle talletettiin omat kertoimensa. Lisäsovituksella saavutettiin kuvan 4 tarkkuus.



Kuva 4. Neljään osaan jaetun K-tyyppin termoelementin linearisointilaskennan poikkeama koko toiminta-alueella

Lisäsovituksella virhe on koko alueella laskennallisesti alle $\pm 0,1$ °C.

Kaikille muillekin termoelementtiantureille tehdään edellä esitetty tarkkuustarkastelu ja tarvittavat korjaukset.

Anturityyppien kertoimet:

Kattava listaus polynomikertoimista on haettu IEC standardin mukaisesta NIST ITS-90 Thermocouple Database:sta /9/. Listassa kertoimet tyypeille B, E, J, K, N, R, S, T. Polynomikerroin listasta löytyy jokaiselle termoelementtityypille omat kertoimet niin nollan asteen ylä- kuin alapuolelle ja monen termoelementin toiminta-alue on jaettu vielä pienempiin osa-alueisiin lineaarisointitarkkuuden parantamiseksi. Kaikille alueille on määritetty omat kertoimet.

7. asteen polynomisovitus Eureka Solver

```

*****
Eureka: The Solver, Version 1.0
Thursday September 27, 2007, 1:11 pm.
Name of input file: #####
*****

```

```

; 7. asteen sovitus 14 pisteella
; PT100, -200... +850C

```

$$F(x) = a \cdot x^7 + b \cdot x^6 + c \cdot x^5 + d \cdot x^4 + e \cdot x^3 + f \cdot x^2 + g \cdot x + h$$

```

F(17.1564)=-203.15
F(30.003)=-173.15
F(40.4935)=-148.15
F(75.072)=-63.15
F(98.768)=-3.150
F(122.032)=56.85
F(180.2055)=211.85
F(237.345)=371.850
F(289.879)=526.850
F(331.8)=656.85
F(338.990)=680.00
F(369.62)=780.00
F(375.610)=800.00
F(390.38)=850.00

```

```

*****

```

Solution:

Variables	Values
a	= -3.2627937e-16
b	= 5.1807582e-13
c	= -3.4082271e-10
d	= 1.2189735e-07
e	= -.000024687934
f	= .0038188221
g	= 2.1893206
h	= -241.71367

Maximum error is **.095869998**

RTD-anturityypit ja vakiokertoimet

Kaikille IEC 751 platina-antureille pätee Callendar-Van Dusen-kaavan seuraavat muodot:

$$R_T = R_0 + R_0 \cdot \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right] \quad , \text{jossa}$$

α = lämpötilavakio 0,00385055 (Ω/Ω)/ $^{\circ}\text{C}$

δ = 1,49

β = 0, kun $T > 0$ ja 0,11, kun $T < 0$

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3) \quad , \text{jossa}$$

$A...B$ = vakiokerroin

Pt100 (IEC 751):

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \quad \text{alle } 0 \text{ } ^{\circ}\text{C} \text{ ja } 0,0 \text{ yli } 0 \text{ } ^{\circ}\text{C:n}$$

Lämpötila-alue: -200...+850 $^{\circ}\text{C}$

Pt200 (IEC 751):

$$R_0 = 200 \Omega$$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \quad \text{alle } 0 \text{ } ^{\circ}\text{C} \text{ ja } 0,0 \text{ yli } 0 \text{ } ^{\circ}\text{C:n}$$

Lämpötila-alue: -200...+850 $^{\circ}\text{C}$

Pt500 (IEC 751):

$$R_0 = 500 \Omega$$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ alle } 0 \text{ } ^\circ\text{C ja } 0,0 \text{ yli } 0 \text{ } ^\circ\text{C:n}$$

Lämpötila-alue: -200...+ 850 °C

Pt1000 (IEC 751):

$$R_0 = 1000 \Omega$$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ alle } 0 \text{ } ^\circ\text{C ja } 0,0 \text{ yli } 0 \text{ } ^\circ\text{C:n}$$

Lämpötila-alue: -200...+350 °C

Pt100 (JIS 1604):

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$\alpha = 0,003916 (\Omega/\Omega)/^\circ\text{C}$$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = 0,0$$

Lämpötila-alue: -200...+650 °C

NIKKELI Ni120:

Ei olemassa olevaa standardia /3//10/.

Yleinen käytössä oleva linearisointikaava:

$$R_T = R_0 \cdot (1 + AT + BT^2 + DT^4 + FT^6) \quad , \text{ jossa}$$

$$R_0 = 120 \Omega$$

$$\alpha = 0,00672 (\Omega/\Omega) / ^\circ\text{C}$$

$$A = 5,485 \cdot 10^{-3}$$

$$B = 6,650 \cdot 10^{-6}$$

$$D = 2,805 \cdot 10^{-11}$$

$$F = -2,000 \cdot 10^{-17}$$

Halvempi vaihtoehto:

$$\text{Ni-Fe: } \alpha = 0,00518 (\Omega/\Omega) / ^\circ\text{C}$$

Lämpötila-alue: -80...+260 °C

KUPARI Cu10:

Ei ole olemassa olevaa standardia. Voidaan käyttää, kun lämpötila-alue pieni, esim. 0...+180 °C. Lämpötilan mittausta on Cu10 vastusanturilla yleisesti sekundäärinen ja matalan tarkkuuden toiminto. Käytetään sähkömoottoreiden ja muuntajien kuparikäämityksien lämpötilanmittauksissa ja muiden antureiden lämpökompensoinnissa /3/.

$$R_T = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad , \text{ jossa}$$

$$R_0 = 10 \, \Omega$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100} = 0,00427 \, (\Omega/\Omega) / ^\circ\text{C}$$

Tulokset löytyvät Cu10:lle valmiina taulukkona /10/.

Lämpötila-alue: 0...+180 °C

5. asteen polynomisovitus 420 - 500 °C Eureka Solver

```
*****
Eureka:   The      Solver      Version   1.0
Friday    September 28          2007     1:40      pm.
Name      of      input      file:
*****
```

$ax^5+bx^4+cx^3+dx^2+ex+f$ 6 pisteella

TC K-type 419.866...+500C

$F(x)=a*x^5+b*x^4+c*x^3+d*x^2+e*x^1+f$

$F(17.243)=419.865584$

$F(17.879)=435$

$F(18.728)=455$

$F(19.366)=470$

$F(19.792)=480$

$F(20.644)=499.9473$

```
*****
```

Solution:

Variables Values

a	=	0,000538177
b	=	-0,066027919
c	=	3,0854476
d	=	-69,777954
e	=	794,38691
f	=	-3332,9553

Maximum error is **.0036156134**

```
*****
```

mV	Laskettu C
17,243	419,8657163
17,879	434,9988504
18,728	455,0023368
19,366	469,9962039
19,792	480,0018674
20,644	499,9470801

Mittaustulokset

Lämpökaappimittaukset

-20astettapt100	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	39	Tp
Uuni_temp	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
-19,400	-200,000	-199,936	4,000	4,001
-19,200	0,000	0,146	7,045	7,046
-19,200	100,000	100,186	8,572	8,573
-19,400	200,000	200,081	10,092	10,094
-19,200	300,000	300,159	11,623	11,624
-19,100	500,000	500,252	14,668	14,669
-19,200	700,000	700,119	17,716	17,718
-19,00	850,000	850,161	19,999	20,001
0astettapt100	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	35	Tp
Uuni_temp	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
0,700	-200,000	-199,886	3,999	4,000
0,400	0,000	0,183	7,046	7,047
0,600	100,000	100,224	8,573	8,574
0,500	200,000	200,297	10,095	10,098
0,700	300,000	300,240	11,623	11,625
0,400	500,000	500,339	14,667	14,670
0,500	700,000	700,375	17,719	17,723
0,600	850,000	850,284	19,999	20,003
40astettapt100	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	34	Tp
Uuni_temp	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
40,800	-200,000	-199,986	3,997	3,997
40,800	0,000	0,146	7,050	7,050
40,700	100,000	100,091	8,570	8,571
40,700	200,000	200,081	10,092	10,095
40,800	300,000	300,139	11,622	11,624
40,700	500,000	500,166	14,662	14,665
40,700	700,000	700,235	17,714	17,718
40,700	850,000	850,186	19,996	20,002
80astettaPt100	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	29	Tp
Uuni_temp	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
81,000	-200,000	-199,936	3,994	4,000
80,900	0,000	0,054	7,040	7,047
81,100	100,000	100,167	8,565	8,572
81,000	200,000	200,042	10,085	10,095
81,000	300,000	300,079	11,610	11,619
81,000	500,000	500,144	14,655	14,666
81,000	700,000	700,073	17,702	17,715
81,000	850,000	849,891	19,982	19,997
-20astettaTCK	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	38	Tp
Uuni_temp	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
-19,00	-180,000	-179,943	3,999	4,000
-19,100	-100,000	-100,050	4,826	4,827
-19,100	0,000	-0,021	5,857	5,858
-19,400	120,000	119,937	7,090	7,092
-19,00	320,000	319,994	9,156	9,158
-19,400	470,000	470,117	10,716	10,715
-19,200	670,000	670,140	12,780	12,781

-19,100	870,000	870,099	14,833	14,836
-19,300	970,000	970,108	15,870	15,871
-19,200	1100,000	1100,165	17,210	17,212
-19,200	1370,000	1370,089	19,991	19,994
0astettaTCK	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	36	
	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
0,500	-180,000	-180,030	3,998	4,000
0,700	-100,000	-100,104	4,822	4,823
0,500	0,000	-0,021	5,857	5,858
0,600	120,000	119,897	7,092	7,093
0,700	320,000	319,954	9,155	9,157
0,700	470,000	469,961	10,703	10,705
0,400	670,000	670,022	12,770	12,772
0,600	870,000	870,099	14,832	14,835
0,600	970,000	970,066	15,869	15,872
0,500	1100,000	1100,209	17,206	17,209
0,600	1370,000	1370,089	19,990	19,995
40astettaTC	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	33	
	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
40,800	-180,000	-180,030	3,998	4,000
40,800	-100,000	-100,104	4,822	4,823
40,800	0,000	-0,021	5,857	5,857
40,800	120,000	119,937	7,093	7,094
40,800	320,000	319,954	9,157	9,158
40,800	470,000	469,883	10,702	10,705
40,800	670,000	670,061	12,770	12,773
40,800	870,000	869,976	14,834	14,838
40,800	970,000	969,982	15,866	15,870
40,900	1100,000	1100,034	17,207	17,211
40,900	1370,000	1369,893	19,989	19,995
80astettaTC	C:\LAB_TEST\Tr_test\702494.trt	Ajo_no	31	
	Ref_Arvo	PriVal	loutDVM	PrVCurrent
81,000	-180,000	-180,555	3,989	3,995
81,000	-100,000	-100,050	4,822	4,827
81,000	0,000	0,021	5,850	5,857
80,900	120,000	120,019	7,090	7,096
81,000	320,000	320,193	9,157	9,165
81,000	470,000	470,156	10,706	10,715
81,100	670,000	670,101	12,763	12,773
81,100	870,000	870,017	14,826	14,837
81,000	970,000	969,982	15,858	15,870
81,100	1100,000	1100,121	20,483	17,217
81,000	1370,000	1370,040	19,986	20,000

Huoneenlämpömittaukset

Pt100
Suurin alue -
200...+850°C

Resistanssi	Input °C	Output mitattu °C	Poikkeama
18,530	-200,0	-199,990	-0,010
39,650	-150,0	-150,030	0,030
60,200	-100,0	-99,960	-0,040
80,250	-50,0	-49,950	-0,050

100,000	0,0	0,110	-0,110
119,400	50,0	50,060	-0,060
138,500	100,0	100,100	-0,100
157,320	150,0	150,100	-0,100
175,840	200,0	200,090	-0,090
194,080	250,0	250,090	-0,090
212,030	300,0	300,110	-0,110
229,690	350,0	350,080	-0,080
247,060	400,0	400,110	-0,110
264,140	450,0	450,090	-0,090
280,930	500,0	500,110	-0,110
297,430	550,0	550,120	-0,120
313,650	600,0	600,130	-0,130
329,640	650,0	650,100	-0,100
345,210	700,0	700,110	-0,110
360,550	750,0	750,140	-0,140
375,610	800,0	800,160	-0,160
390,380	850,0	850,200	-0,200

TCK

Suurin alue -180...+ 1370°C

Input °C	Output °C	Poikkeama	mA-ohjaus	mA output	mA poikkeama
-180,0	-179,943	-0,057	4,000	4,000	-0,001
-80,0	-80,086	0,086	5,028	5,028	0,000
-10,0	-9,878	-0,122	5,756	5,756	0,000
0,0	-0,021	0,021	5,853	5,854	0,000
10,0	9,918	0,082	5,957	5,957	0,000
120,0	119,937	0,063	7,092	7,093	-0,001
320,0	319,914	0,086	9,156	9,156	-0,001
420,0	419,964	0,036	10,189	10,190	-0,001
490,0	489,929	0,071	10,907	10,913	-0,006
500,0	499,965	0,035	11,015	11,016	-0,001
510,0	510,036	-0,036	11,119	11,120	-0,001
520,0	519,872	0,128	11,220	11,221	-0,001
670,0	670,101	-0,101	12,770	12,772	-0,002
820,0	819,997	0,003	14,316	14,318	-0,002
970,0	970,108	-0,108	15,867	15,869	-0,002
1020,0	1019,953	0,047	16,380	16,382	-0,003
1170,0	1170,043	-0,043	17,930	17,933	-0,003
1370,0	1370,040	-0,040	19,995	19,998	-0,003

mV-mittaus

Suurin alue -10...+ 110 mV

Input mV	Output mV	Poikkeama
-10,0	-10,040	0,040
-5,0	-5,040	0,040
0,0	-0,020	0,020
5,0	4,980	0,020
10,0	9,970	0,030
15,0	14,970	0,030
20,0	19,970	0,030
25,0	25,010	-0,010
30,0	29,980	0,020
35,0	35,000	0,000
40,0	40,020	-0,020

45,0	44,980	0,020
50,0	50,020	-0,020
55,0	54,970	0,030
60,0	59,990	0,010
65,0	64,990	0,010
70,0	69,990	0,010
75,0	74,960	0,040
80,0	79,980	0,020
85,0	85,020	-0,020
90,0	89,950	0,050
95,0	94,950	0,050
100,0	99,970	0,030
105,0	104,970	0,030
110,0	109,990	0,010

Lineaarinen resistanssimittaus

Suurin alue 0...1000 Ω

Input Ω	Output Ω	Poikkeama
0,0	0,000	0,000
50,0	49,880	0,120
100,0	99,880	0,120
150,0	149,870	0,130
200,0	199,870	0,130
250,0	249,860	0,140
300,0	299,980	0,020
350,0	349,860	0,140
400,0	399,850	0,150
450,0	449,850	0,150
500,0	499,960	0,040
550,0	549,730	0,270
600,0	599,720	0,280
650,0	649,950	0,050
700,0	699,830	0,170
750,0	749,940	0,060
800,0	799,820	0,180
850,0	849,820	0,180
900,0	899,810	0,190
950,0	949,920	0,080
1000,0	1000,030	-0,030

Mittauslaitteisto

Huoneenlämmössä:

- Beamex Precision Thermometer/Calibrator Model TC301
tarkkuus $\pm 0,02$ %
- Lloyd Instruments Ltd. Pt100-vastusdekadi
tarkkuus $\pm 0,05$ %
- Keithley 2000 Multimeter
tarkkuus $\pm 0,002$ % DCV-mittaus ja $\pm 0,008$ % resistanssimittaus
- Emerson 375 Field Communicator (HART-kenttäterminaali)
- Satron Instruments Si-Toole USB/HART modem (Käyttöjännite modeemin sisäisestä hakkurivirtalähteestä lähettimelle)

Lämpökaapissa:

- PC, jossa Satron Instrumentsin Hart-tiedonkeruuohjelma
- HP 3479A Data Acquisition / Control Unit
- Farnell Instruments LT50 – 0,5 Jännitelähde
- Heraeus Vötsch lämpökaappi IEE 488-väyläohjauksella
- Beamex Precision Thermometer/Calibrator Model TC301
tarkkuus $\pm 0,02$ %
- Lloyd Instruments Ltd. Pt100-vastusdekadi
tarkkuus $\pm 0,05$ %