

Umjeravanje etalonskih mjerila temperature s platinskim otporničkim osjetnicima

Dujmović, Dominik

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:531451>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Dominik Dujmović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Danijel Šestan, dipl. ing.

Student:

Dominik Dujmović

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Danijelu Šestanu na izdvojenom vremenu, pruženoj pomoći i korisnim savjetima. Posebna zahvala roditeljima, baki, bratu i sestri, mojoj obitelji na podršci, razumijevanju i strpljenju. Također se zahvaljujem mojoj djevojci, prijateljima i svim ljudima koji su mi pomogli na bilo koji način tijekom studija.

Dominik Dujmović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dominik Dujmović** JMBAG: **0035221974**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje etalonskih mjerila temperature s platinskim otporničkim osjetnicima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of standard thermometers with platinum resistance temperature sensors**

Opis zadatka:

Potrebno je definirati postupak umjeravanja i provesti umjeravanje dvaju etalonskih platinskih otporničkih osjetnika temperature povezanih na zajednički termometrijski otpornički most. Umjeravanja je potrebno provesti metodom usporedbe u najmanje pet umjernih točaka kojima će se obuhvatiti temperaturni raspon od -40 °C do 400 °C.

U okviru izrade završnog rada potrebno je:

- Dati pregled teorijskih osnova vezanih uz osiguravanje sljedivosti rezultata usporedbenih umjeravanja mjerila temperature.
- Opisati postupak provedbe usporedbenih umjeravanja platinskih otporničkih osjetnika temperature, povezanih na zajednički termometrijski otpornički most, u temperaturnom rasponu od -40 °C do 300 °C.
- Konstruirati, prikazati shemu i dati opis mjerne linije koja će se koristiti za predmetna umjeravanja.
- Sastaviti mjernu liniju i provesti umjeravanja koristeći postojeće uređaje i pomoćnu opremu koja je na raspolaganju u Laboratoriju za procesna mjerenja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu (FSB-LPM).
- Prikazati rezultate umjeravanja oba etalonska mjerila temperature.
- Opisati postupak procjene i procijeniti mjernu nesigurnost za predmetna umjeravanja.

Za provedbe umjeravanja koristit će se mjerna oprema Laboratorija za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Danijel Šestan

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
1.1	Umjeravanje	1
1.2	Etalonska mjerila.....	2
2	OSNOVE MJERENJA TEMPERATURE.....	3
2.1	Temperatura	3
2.2	Povijesni razvoj mjerila temperature i temperaturnih ljestvica	4
2.3	Termodinamička temperaturna ljestvica	5
2.4	Međunarodne temperaturne ljestvice	6
3	TERMOMETRI S OTPORNIČKIM OSJETNICIMA TEMPERATURE	8
3.1	Princip rada	9
3.1.1	Način spajanja termometra s mjerilom električnog otpora	10
3.1.1.1	Dvožilno i trožilno spajanje osjetnika temperature s pokaznom jedinicom	10
3.1.1.2	Četverožilno spajanje termometara s pokaznom jedinicom pomoću diferencijskog mosta	11
3.2	Građa otporničkih termometara	13
3.2.1	Materijali za izradu otporničkih osjetnika temperature	14
3.2.2	Platinski otpornički osjetnici temperature.....	14
3.3	Pogreške otporničkih termometara pri mjerenju temperature.....	15
3.3.1	Pogreške uranjanja	15
3.3.2	Efekt toplinskog širenja	15
3.3.3	Pogreške zračenja.....	16
3.3.4	Samozagrijavanje	16
3.3.5	Kontaminacija	16
4	MJERNA NESIGURNOST	17
4.1	Kontinuirana, pravokutna distribucija.....	17
4.2	Normalna, Gaussova distribucija	18
4.3	Procjena mjerne nesigurnosti	19
4.3.1	Tip A	19
4.3.2	Tip B	19
4.4	Ukupna i proširena standardna nesigurnost	19
5	MJERNA LINIJA I UMJERAVANJE.....	21
5.1	Elementi mjerne linije	22
5.1.1	Osjetnici temperature	23
5.1.1.1	Etalonski osjetnik.....	23
5.1.1.2	Umjeravani osjetnici	24
5.2	Otpornički mostovi	24
5.2.1.1	Otpornički most etalonskog termometra.....	24
5.2.1.2	Otpornički most umjeravanog termometra	25
5.2.2	Zone kontrolirane temperature.....	27
5.2.2.1	Etanolska kupka	27
5.2.2.2	Vodena kupka	28
5.2.2.3	Uljna kupka.....	30
5.2.2.4	Termometrijska peć	31
5.3	Proces umjeravanja	32

6	REZULTATI UMJERAVANJA	42
7	ZAKLJUČAK.....	47

POPIS SLIKA

Slika 1.	Barotermoskop	4
Slika 2.	Pojednostavljeni prikaz plinskog termometra	5
Slika 3.	Ćelija za realizaci trojne točke vode.....	6
Slika 4.	Definicijske točke temperaturne ljestvice ITS-90 i odgovarajući termometri	7
Slika 5.	Prikaz nekoliko termometara s otporničkim osjetnicima	8
Slika 6.	Odnos električnog otpora i temperature nikla, volframa, bakra i platine.....	9
Slika 7.	Shema četverožilnog spoja s diferencijskim mostom	12
Slika 8.	Primjer sheme četverožilnog spoja s digitalnim termometrijskim otporničkim mostom	12
Slika 9.	Građa osjetnika temperature sa žicom i pločastog osjetnika.....	13
Slika 10.	Osnovna građa otporničkog termometra	13
Slika 11.	Prikaz pravokutne distribucije.....	17
Slika 12.	Gaussova distribucija	18
Slika 13.	Skica mjerne linije.....	21
Slika 14.	Uronjeni termometri u neku zonu kontrolirane temperature.....	22
Slika 15.	Prikaz etalonskog termometra	23
Slika 16.	Umjeravani osjetnici CTP 5000-450.....	24
Slika 17.	Termometrijski otpornički most etalonskog termometra	25
Slika 18.	Prikaz CTR 2000 otporničkog termometra	26
Slika 19.	Korištena etanolska kupka.....	27
Slika 20.	Fotografija vodene kupke tijekom umjeravanja.....	29
Slika 21.	Fotografija uljne kupke	30
Slika 22.	Prikaz peći korištene za umjeravanje	31
Slika 23.	Budžet nesigurnosti za točku -40 °C	33
Slika 24.	Budžet nesigurnosti za točku -20 °C	34
Slika 25.	Budžet nesigurnosti za točku 0 °C	35
Slika 26.	Budžet nesigurnosti za točku 25 °C	36
Slika 27.	Budžet nesigurnosti za točku 50 °C	37
Slika 28.	Budžet nesigurnosti za točku 100 °C	38
Slika 29.	Budžet nesigurnosti za točku 150 °C	39
Slika 30.	Budžet nesigurnosti za točku 300 °C	40
Slika 31.	Budžet nesigurnosti za točku 400 °C	41
Slika 32.	Grafički prikaz rezultata umjeravanja za termometar 1	45
Slika 33.	Grafički prikaz rezultata umjeravanja za termometar 2	46

POPIS TABLICA

Tablica 3.1 Klase točnosti platinskih otporničkih termometara prema IEC 60751	15
Tablica 5.1 Karakteristike etalonskog termometra	23
Tablica 5.2 Podaci o umjeranim osjetnicima	24
Tablica 5.3 Podaci o otporničkom mostu F700.....	25
Tablica 5.4 Podaci o otporničkom mostu CTR 2000	26
Tablica 5.5 Karakteristike etanolske kupke	28
Tablica 5.6 Karakteristike vodene kupke	29
Tablica 5.7 Karakteristike uljne kupke	30
Tablica 5.8 Karakteristike peći.....	32
Tablica 6.1 Temperatura -40 °C.....	42
Tablica 6.2 Temperatura -20 °C.....	42
Tablica 6.3 Temperatura 0 °C	42
Tablica 6.4 Temperatura 25 °C	43
Tablica 6.5 Temperatura 50 °C	43
Tablica 6.6 Temperatura 100 °C	43
Tablica 6.7 Temperatura 150 °C	44
Tablica 6.8 Temperatura 300 °C	44
Tablica 6.9 Temperatura 400 °C	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T, t	K (Kelvin) °C (Celzij)	Temperatura
R	Ω (Ohm)	Električni otpor
U	V (Volt)	Električni napon
I	A (Amper)	Jakost električne struje
α	°C ⁻¹	Temperaturni koeficijent otpora
A	°C ⁻¹	Standardni koeficijenti za platinske otporničke osjetnike temperature prema normi ISO/IEC 60751
B	°C ⁻²	
C	°C ⁻⁴	
p	-	Gustoća vjerojatnosti kod kontinuirane i normalne distribucije
σ	-	Standardna devijacija
$X_{1,2}$	-	Ulazne i izlazne varijable
μ	-	Srednja aritmetička vrijednost mjerenja
n	-	Broj mjerenja
$u(T)$	-	Složena standardna mjerna nesigurnost
$U(T)$	-	Proširena mjerna nesigurnost
k	-	Faktor prekrivanja

SAŽETAK

U sklopu ovog završnog rada bilo je potrebno umjeriti etalonski termometar s 2 platinska otpornička osjetnika spojena na zajednički otpornički most, metodom usporedbe. Izabrane temperaturne točke na kojima će se provesti umjeravanje su: -40 °C, -20 °C, 0 °C, 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 300 °C i 400 °C. Na svakoj od tih temperatura, po redu, jedan pa drugi, umjeravani i etalonski termometar bio je postavljen u zonu kontrolirane temperature. Kao zone kontrolirane temperature korištene su: etanolska kupka, vodena kupka, uljna kupka i termometrijska peć, ovisno o temperaturi umjeravanja. U ovom radu objašnjen je cijeli proces umjeravanja. Da bi se proces mogao shvatiti, prvo je detaljno objašnjena teorija koja stoji iza cijelog procesa, a nakon toga se moglo preći na eksperimentalni dio. Nadalje, što se tiče eksperimentalnog dijela, dan je opis mjerne linije i svih njenih komponenata korištenih u laboratoriju. Na kraju je procijenjena nesigurnost u svim umjernim točkama te su prikazani pripadni budžeti nesigurnosti, da bi konačno mogli biti obrađeni i prikazani rezultati umjeravanja, koji su bili cilj ovog rada. Cijeli proces umjeravanja je proveden u Laboratoriju za procesna mjerenja na FSB-u

Ključne riječi: Etalonski termometar, platinski otpornički termometar, temperatura, umjeravanje, mjerna nesigurnost, zona kontrolirane temperature.

SUMMARY

As part of this work, it was necessary to calibrate the standard thermometer with 2 platinum resistance sensors connected to a common resistance bridge, using the comparison method. The calibration was performed in the following temperature points: -40 °C, -20 °C, 0 °C, 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 300 °C, and 400 °C. At each of these temperatures, one after the other, thermometers under calibration were inserted into the controlled temperature zone, together with the reference thermometer. The zones of controlled temperatures were ethanol bath, water bath, oil bath, and thermometric furnace, depending on the calibration temperature. This work explains the entire calibration process. In order to understand the process, the theory behind it was first explained in detail, and after that it was possible to move on to the experimental part. Furthermore, as far as the experimental part is concerned, a description of the measuring line and all its components found in the laboratory is given. At the end, the measurement uncertainty was estimated and the uncertainty budget is presented, so that the measurement results, which were the final goal of this work, could finally be analysed and presented. The entire measurement process was carried out in the Laboratory for Process Measurements at FSB.

Key words: Reference thermometer, platinum resistance thermometer, temperature, calibration, measurement uncertainty, controlled temperature zone.

1 UVOD

Cilj ovog zadatka je provesti umjeravanje dvaju platinskih otporničkih osjetnika temperature kao cjelovito mjerilo zajedno s pripadnim termometrijskim otporničkim mostom. Umjeravani termometri se koriste u laboratoriju u kojem služe kao radni etaloni za umjeravanje industrijskih termometara. Cijeli eksperimentalni dio posla proveden je u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i korištenjem tamo dostupne opreme. Umjeravanja su provedena na temperaturama od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovisno o temperaturi umjeravanja korišteni su različiti uređaji kao zone kontrolirane temperature. Umjeravani termometri pokazivali su temperaturu na displeju njihovog otporničkog mosta, što je bilježila kamera i slala podatke na računalo. Etalonski je termometar konstantno bio spojen na računalo, gdje su se na posebno prilagođenom računalnom programu u svakom trenutku mogle očitati referentne temperature. Sam proces umjeravanja bio je dugotrajan i složen jer se radi umjeravanje na mnogo različitih temperatura, a rezultati su morali biti jako precizni, pa na toj razini i najmanje smetnje i neočekivani kvarovi, koje smo morali riješiti, mogu zadavati probleme i pogreške u rezultatima umjeravanja.

Da bi se uopće moglo započeti s eksperimentalnom provedbom umjeravanja potrebno je, prije svega dosta teorijskog znanja, kako o naizgled jednostavnim i općepoznatim pojmovima, tako i o nekim manje poznatim, stručnim pojmovima, koji će u nastavku biti detaljnije objašnjeni. Što se tiče teorijskog uvoda, prije svega je potrebno objasniti sam naslov rada koji možda može biti zbunjujuć na prvu.

1.1 Umjeravanje

Umjeravanje je proces koji ima za cilj održavanje sljedivosti mjerenja, pri čemu očitavanja umjeranog instrumenta moraju biti povezana s definicijom mjerene veličine unutar prihvatljivih i potrebnih granica. Dakle završetkom procesa umjeravanja dobit će se podaci o tome koliko je očitavanja instrumenta potrebno korigirati kako bi se ona dovela u vezu s definicijom mjerene veličine. Također, umjeravanjem se određuju i nesigurnosti tih korekcija. Postoji više metoda umjeravanja, ovaj zadatak je rađen metodom usporedbenog umjeravanja. Usporedno umjeravanje je postupak usporedbe izlaza, odnosno temperature koju pokazuje umjeravani instrument, u ovom slučaju termometri s platinskim otporničkim osjetnicima, i temperature izmjerene etalom, dakle fakultetskog termometra s platinskim otporničkim osjetnikom interne oznake TEPOT22 koji se nalaze u jednakim temperaturnim uvjetima u

zonama kontrolirane temperature. Zone kontrolirane temperature su područja koja osiguravaju jednaku temperaturu za oba umjeravana termometra, a realiziraju se pomoću različitih uređaja o kojima će se detaljnije još govoriti u nastavku.

1.2 Etalonska mjerila

Etalon je mjera, mjerilo ili tvar za usporedbu kojom se utvrđuje dogovorom, normom ili zakonom određena vrijednost mjerne jedinice ili određene vrijednosti fizikalne veličine. Također je bitan pojam mjerna sljedivost, niz sljedivosti predstavlja neprekidan lanac usporedbi koje moraju biti provedene kako bi se moglo osigurati da mjerni rezultat odnosno vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini sljedivosti.

Po hijerarhiji, od najtočnijih pa na dalje, etalone dijelimo:

- *Međunarodni etalon* je etalon prihvaćen međunarodnim dogovorom za međunarodnu osnovu za određivanje vrijednosti svih drugih etalona.
- *Primarni etalon* je etalon jedinice određene veličine koji ima najbolje mjeriteljske osobine koje se provjeravaju usporedbom sa međunarodnim etalom a služi za određivanje mjeriteljskih osobina sekundarnih etalona.
- *Nacionalni etalon* je etalon prihvaćen službenom nacionalnom odlukom kao osnovu za određivanje vrijednosti svih drugih etalona odnosne veličine u jednoj državi. Uobičajeno je nacionalni etalon ujedno i primarni etalon.
- *Sekundarni etalon* je etalon jedinice određene veličine čije su mjeriteljske osobine određene usporedbom s primarnim etalom, a služi za određivanje mjeriteljskih osobina radnih etalona.
- *Radni etalon* je etalon jedinice određene veličine čije su mjeriteljske osobine određene usporedbom sa sekundarnim etalom, a služi za određivanje mjeriteljskih osobina mjerila.

Fakultetski termometar, onaj koji je korišten za umjeravanje je sekundarni etalon, a termometar koji je umjeravan je radni etalon.

2 OSNOVE MJERENJA TEMPERATURE

Sigurno su svi nekad u životu mjerili temperaturu bilo čega i upoznati su s tim procesom, to je samo dokaz koliko je ovaj proces rasprostranjen i bitan, svijet kakvog poznajemo ne bi postojao bez mjerenja i regulacije temperature. Proces mjerenja temperature koristi se u gotovo svim sferama života, a za strojarstvo je posebno važno mjerenje temperature u industriji. Upravo zbog tolike rasprostranjenosti mjerenja temperature važno je imati dobro umjerene termometre jer nekad jako mala odstupanja mogu biti uzrok velikih problema. U nastavku će biti objašnjeni pojmovi vezani uz temperaturu u cilju lakšeg shvaćanja procesa umjeravanja.

2.1 Temperatura

Temperatura je jedna od osnovnih fizikalnih veličina u Međunarodnom sustavu jedinica, koja opisuje toplinsko stanje i sposobnost tijela ili tvari da izmjenjuju toplinu s okolinom. Međunarodnom sustavu jedinica (skraćeno SI) je Kelvin (K), a u praksi se često koriste i mjerne jedinice Celzij (°C) te Fahrenheit (°F). Ona ovisi o tome koliko unutarnje energije sadrži neko tijelo određene mase i tlaka.

Molekularna teorija nam govori da je temperatura u izravnoj vezi s prosječnom brzinom gibanja molekula, dakle ako raste temperatura, raste i prosječna brzina gibanja molekula i obrnuro, padom temperature, pada i brzina gibanja molekula.

Također valja napomenuti, jer ljudi često miješaju, da su temperatura i toplina dva različita pojma, dakle toplina predstavlja energiju koja prelazi sa toplijeg tijela na hladnije, što često, u praksi uzrokuje i promjenu temperature.

Za mjerenje temperature koristi se jednostavno rečeno njeno ponašanje, utjecaj na različite fizikalne pojave kao što su: promjena volumena nekih plinova, promjena tlaka, promjena električnog otpora i tako dalje. Temperaturu izražavamo i očitavamo pomoću različitih temperaturnih ljestvica koje će biti detaljnije pojašnjene.

2.2 Povijesni razvoj mjerila temperature i temperaturnih ljestvica

Već 1592. godine Galileo Galilei je izradio prvi instrument za mjerenje temperature, takozvani barotermoskop. Princip rada mu se temeljio na barometarskom tlaku, pomoću kojeg se vrši očitavanje instrumenta. Očitavanja ovog instrumenta ovisila su o atmosferskom tlaku i temperaturi.



Slika 1. Barotermoskop

Dalje, 1654. toskanski vojvoda Ferdinando II de' Medici osmišlja prvi instrument za mjerenje temperature koji radi neovisno o atmosferskom tlaku. To je bila hermetički zatvorena staklena cijev napunjena alkoholom, koji je naravno mijenjao svoj volumen promjenom temperature. Godine 1694. Carlo Renaldini predložio ledište i vrelište vode kao dvije fiksne točke na temperaturnoj ljestvici koju je podijelio na 12 dijelova.

Njemački fizičar Daniel Fahrenheit počeo je proizvoditi termometre 1706. godine. Ključne točke na njegovoj ljestvici bile su: 0 F što predstavlja najnižu umjetno uspostavljenu temperaturu dobivenu miješanjem vode, soli i leda u jednakim omjerima ($-17.7\text{ }^{\circ}\text{C}$) i 96 F koja je predstavljala temperaturu ljudske krvi. Fahrenheitova skala se koristi i dan danas, posebno u Engleskoj i SAD-u.

1742. godine Anders Celsius je osmislio danas najkorišteniju temperaturnu ljestvicu, takozvanu Celzijevu. Ova ljestvica je najpopularnija danas u svijetu upravo zbog svoje

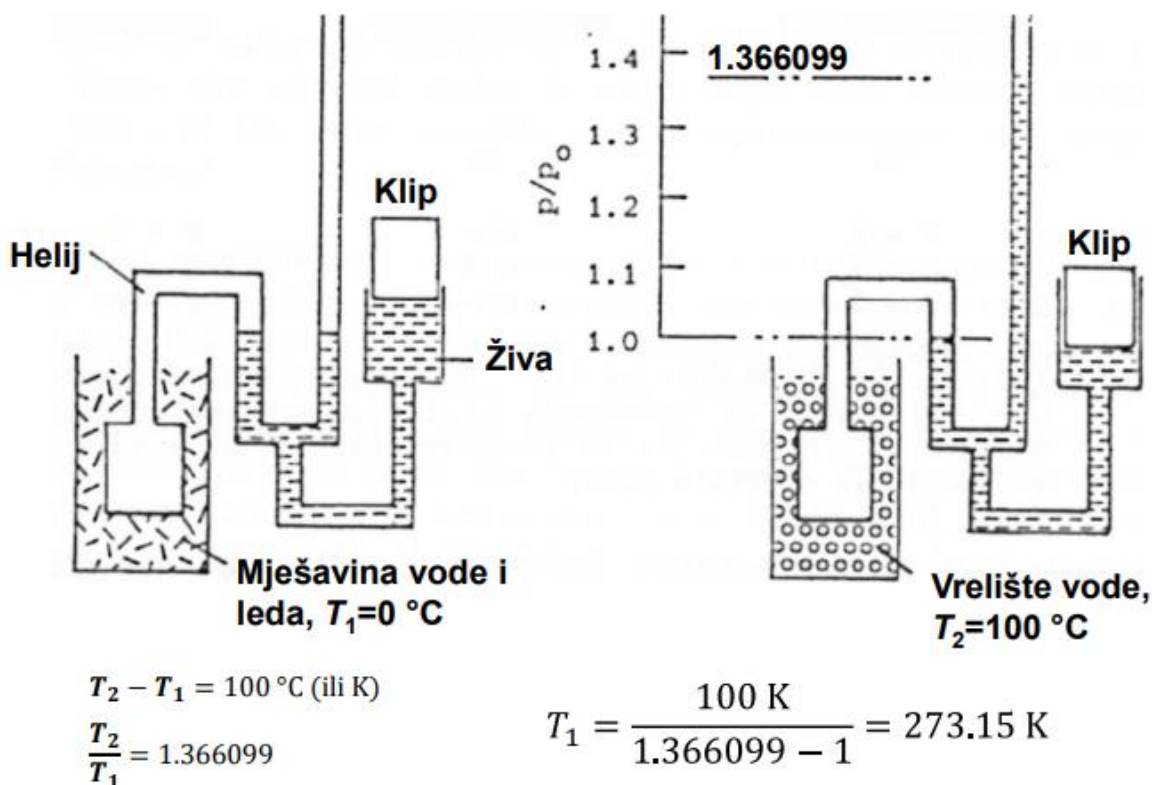
jednostavnosti. Ima dvije temeljne točke: 0 °C, to je točka taljenja leda i 100 °C, točka vrelišta vode pri normalnom tlaku (101325 Pa).

Do kraja 18. stoljeća postojalo je onoliko temperaturnih ljestvica koliko je bilo znanstvenika koji su bili u stanju proizvesti stakleni termometar. Problem je bio što niti jedna od ovih ljestvica nije bila dovoljno pouzdana.

2.3 Termodinamička temperaturna ljestvica

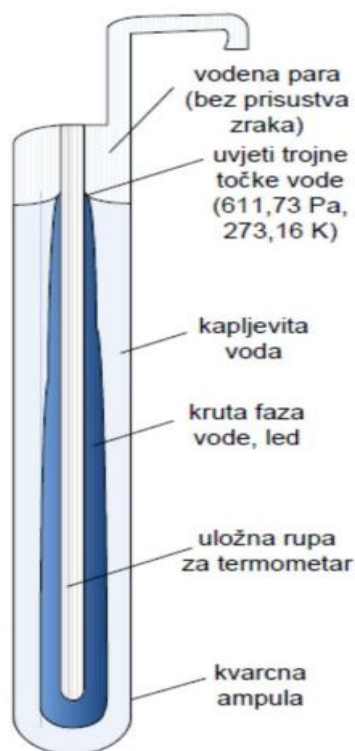
Lord Kelvin je osmislio temperaturnu ljestvicu koja je neovisna o radnom mediju ili vrsti termometra. Ljestvica je nastala primjenom Celzijevih stupnjeva za temperaturne raspone, tako da je najniža moguća temperatura u prirodi, apsolutna nula (stanje materije pri kojem prestaje gibanje molekula), uzeta za početak ljestvice i označena 0 K. Zato su mjerne jedinice kelvin i Celzijev stupanj jednake ($1\text{K}=1^\circ\text{C}$), ali je ista temperatura izražena različitim iznosima u kelvinima i u celzijevim stupnjevima. Kelvinova ljestvica ima samo teorijski značaj budući da je vrlo komplicirano izraditi pouzdan mjerni sustav za njenu realizaciju.

Zbog toga je 1887. godine međunarodnim dogovorom određeno da će se apsolutna termodinamička ljestvica definirati i realizirati plinskim termometrom.



Slika 2. Pojednostavljeni prikaz plinskog termometra

Budući da je izvedba plinskog termometra jako komplicirana i skupa, a sama mjerenja su



Slika 3. Čelija za realizaciju trojne točke vode

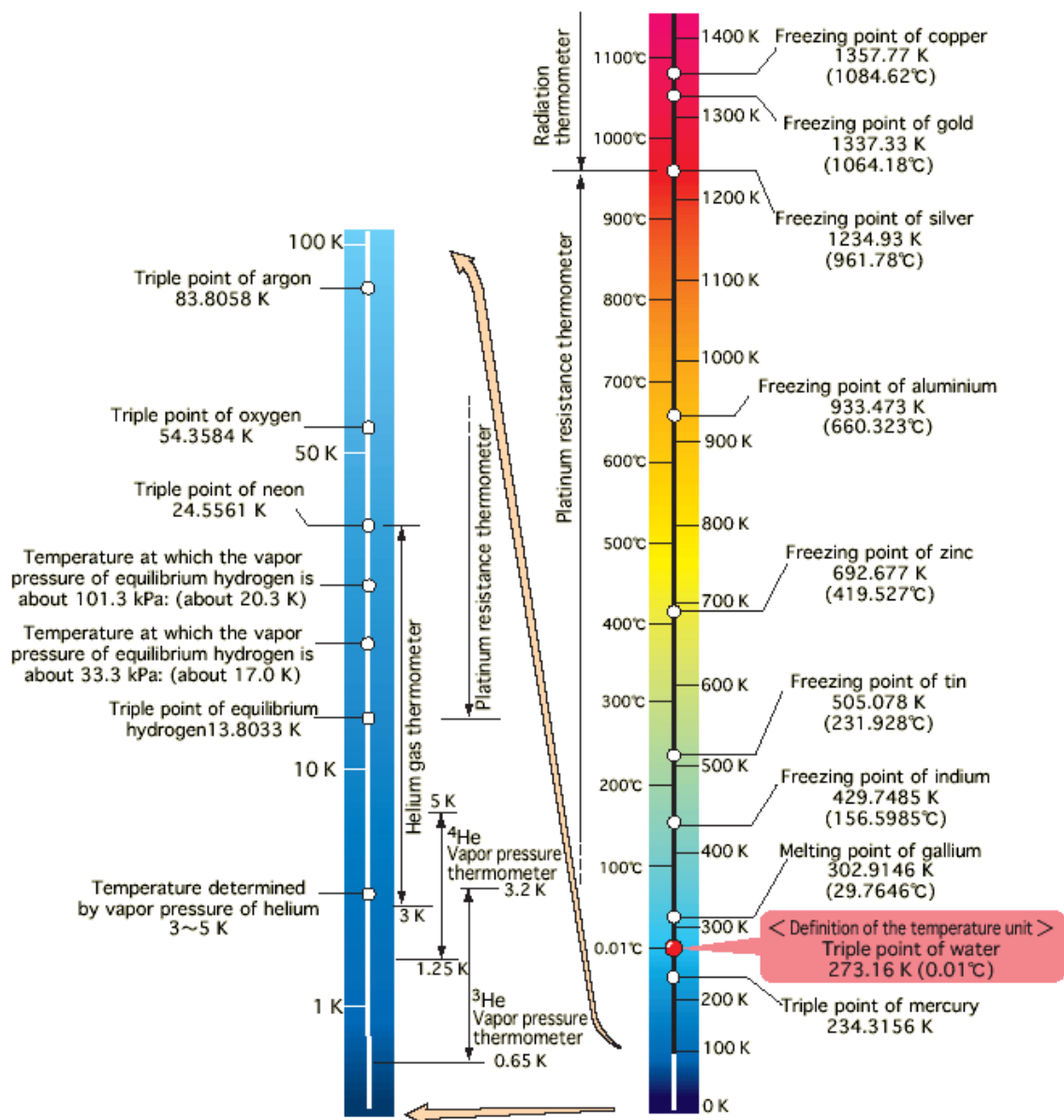
dugotrajna i imaju slabu ponovljivost, plinski termometar nam je bitan jer su se na njegovim mjerenjima mogu definirati ostale empirijske temperaturne ljestvice koje imaju za cilj izbjegavanje njegove uporabe.

Jedinica termodinamičke temperature je Kelvin, koji je od 1954. godine definiran kao $1/273,16$ - ti dio termodinamičke temperature trojne točke vode. Zanimljivo je razmišljanje da je bilo koje mjerenje temperature zapravo samo usporedba temperature koju želimo izmjeriti s temperaturom trojne točke vode. Trojna točka vode je ono stanje u kojem su prisutna sva tri agregatna stanja vode, plin, tekućina i krutina. Trojna točka vode se realizira u ćeliji za trojnu točku vode gdje se održavaju uvjeti potrebni za pojavu sve tri faze vode, pri čemu se, prema definiciji, ostvaruje temperatura od $273,16$ K.

Trojna točka vode je osnovna definicijska točka za temperaturne ljestvice, ali pored nje za međunarodnu temperaturnu ljestvicu ITS90, koja se koristi i danas, definirano je više definicijskih točaka. To su u pravilu trojne točke, tališta ili krutišta različitih kemijskih elemenata.

2.4 Međunarodne temperaturne ljestvice

Uspostavljaju se u cilju izbjegavanja dugotrajnih i kompliciranih realizacija temperaturne ljestvice pomoću plinskih termometara. Danas je važeća International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), ljestvica koja je uvedena 1. Siječnja 1990. godine za mjerenje s Kelvinovim i Celzijevim jedinicama temperature. ITS-90 je aproksimacija termodinamičke temperature koja olakšava međunarodnu usporedivost i kompatibilnost temperaturnih mjerenja i ona je danas standard za umjeravanje mjerila temperature. Definira se pomoću četrnaest fiksnih točaka: Trojna točka vodika $13,8033$ K, trojna točka neona $24,5561$ K, trojna točka kisika $54,3584$ K, trojna točka argona $83,8058$ K, trojna točka žive $234,3156$ K, trojna točka vode $273,16$ K, talište galija $302,9146$ K, krutište indija $429,7485$ K, krutište kositra $505,078$ K, krutište cinka $692,677$ K, krutište aluminija $933,473$ K, krutište srebra $1.234,93$ K, krutište zlata $1337,33$ K i krutište bakra $1.357,77$ K.



Slika 4. Definijske točke temperaturne ljestvice ITS-90 i odgovarajući termometri

Iznad se nalazi jako zanimljiva slika, pomoću koje je lakše sve predočiti. Na njoj je vidljiva jedna temperaturna ljestvica u Celzijevim i Kelvinovim stupnjevima, na kojoj se nalaze definijske točke ITS-90 norme. Također se može vidjeti pomoću kojih termometara se mjeri temperatura u određenom temperaturnom području.

U 2019. kelvin je redefiniran. Međutim, promjena je bila vrlo mala u usporedbi s nesigurnostima ITS-90, tako da ITS-90 ostaje na snazi kao praktična temperaturna ljestvica bez značajnih promjena.

3 TERMOMETRI S OTPORNIČKIM OSJETNICIMA TEMPERATURE

Termometri s otporničkim osjetnicima omogućavaju mjerenje temperature s visokom preciznošću i točnošću u temperaturnom području od -200 do 660 °C (postoje specijalne izvedbe koje se mogu koristiti i na temperaturama do 960 °C). Obično se koriste u industrijskim, znanstvenim i medicinskim primjenama gdje je točnost mjerenja temperature izuzetno bitna. Samo ime otpornički termometri ukazuje nam da se radi o električnom otporu, tako da princip rada polazi od činjenice, odnosno fenomena da se električni otpor mijenja s promjenom temperature, dakle: $R = f(t)$.



Slika 5. Prikaz nekoliko termometara s otporničkim osjetnicima

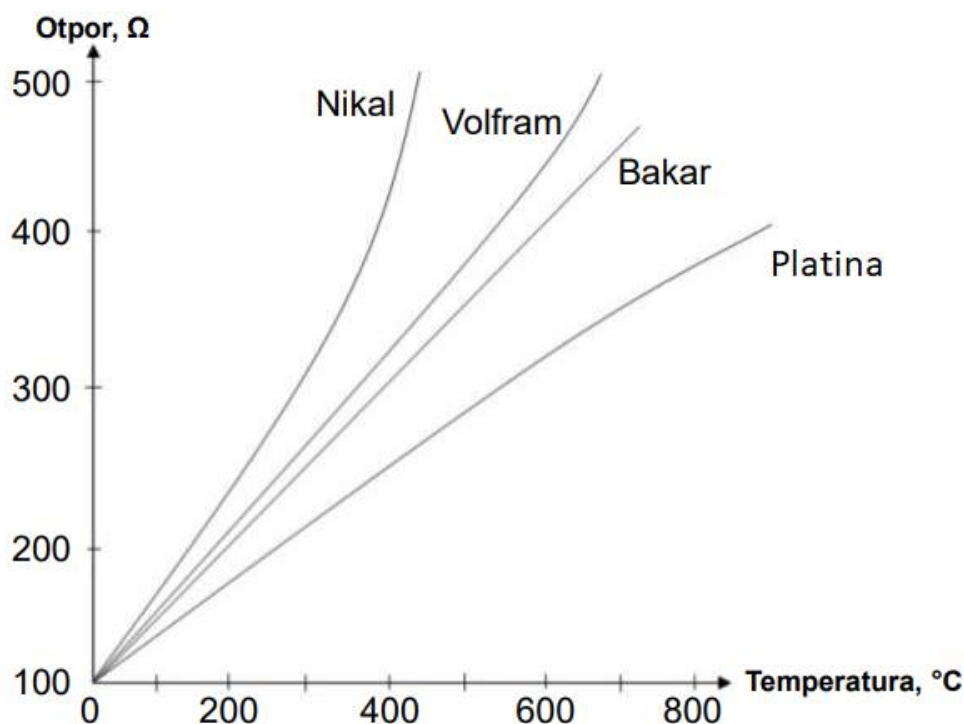
Na slici se nalazi nekoliko klasičnih otporničkih termometara, na prvoj sličici (gore lijevo) prikazan je otpornički most termometra koji je umjeravan u okviru ovog završnog rada.

3.1 Princip rada

Kao što je rečeno, princip rada se zasniva na ovisnosti električnog otpora osjetnika o njegovoj temperaturi. Dovođenjem topline povećava se temperatura osjetnika koji je obično izrađen od tanke žice napravljene od vodljivog materijala, poput platine, nikla ili bakra, koja je namotana u spiralu oko keramičke ili staklene jezgre i upravo u strukturi tog osjetnika dolazi do povećanja titranja molekula i atoma. Izlaganjem dvaju krajeva osjetnika različitim električnim potencijalima kroz njega će započeti usmjereno gibanje elektrona, odnosno početak će teći električna struja. Gibanje elektrona kroz osjetnik temperature je teže što je intenzivnija oscilacija molekula i atoma koji sačinjavaju osjetnik. Fizikalnu veličinu koja mjeri ovu pojavu zovemo električnim otporom i može se zaključiti da se povećanjem temperature u čistim metalima povećava i njihov električni otpor. Dakle kad se struja pusti kroz osjetnik, generira se pad napona na otporu žice, a veličina pada napona proporcionalna je otporu žice i mjerenjem pada napona može se odrediti otpor korištenjem poznatog odnosa između otpora i temperature materijala. Temperatura se zatim može izračunati iz mjerenja otpora. U ovom kontekstu je važno povezati i Ohmov zakon, dakle što je veći napon (U) na žici, elektroni će biti brži i jakost električne struje (I) će, pri konstantnom otporu, biti veća.

$$I = \frac{U}{R}$$

Gdje je R ukupni električni otpor koji ovisi o ograničavanju gibanja elektrona.



Slika 6. Odnos električnog otpora i temperature nikla, volframa, bakra i platine

Na slici je prikazana promjena otpora u ovisnosti o temperaturi za najčešće korištene materijale osjetnika otporničkih termometara. Vidljivo je da niti jedan materijal nema linearnu karakteristiku, ipak za manje promjene temperature može se koristiti i linearna karakteristika:

$$R_t = R_{0^\circ\text{C}} \cdot (1 + \alpha t)$$

Gdje t predstavlja temperaturu, a α temperaturni koeficijent otpora.

Otpornički termometri se često koriste u industrijskim i znanstvenim primjenama gdje su potrebna precizna mjerenja temperature. Poznati su po svojoj visokoj točnosti, stabilnosti i ponovljivosti te se mogu koristiti u širokom temperaturnom rasponu. Najčešće korišteni materijal je platina jer ima vrlo linearan i ponovljiv odnos između otpora i temperature u velikom rasponu temperatura.

3.1.1 Način spajanja termometra s mjerilom električnog otpora

Način spajanja osjetnika s mjerilom električnog otpora može biti dvožilni, trožilni i četverožilni, a izbor načina povezivanja ovisi o specifičnim zahtjevima primjene i kriterijima točnosti mjerenja. Metoda s četiri žice obično se koristi u primjenama koje zahtijevaju najvišu preciznost, dok se metode s dvije i tri žice koriste za mjerenja niže zahtijevane razine točnosti.

3.1.1.1 Dvožilno i trožilno spajanje osjetnika temperature s pokaznom jedinicom

Iako su osjetnici obaju umjeranih termometara, kao i etalonski osjetnik korišten u eksperimentalnom dijelu rada, bili četverožilno povezani s pokaznom jedinicom, nije na odmet spomenuti osnovne principe rada termometara u dvožilnom i trožilnom načinu spajanja.

U dvožilnom spoju koriste se samo dvije električne veze za mjerenje otpora. Ova metoda je sklona pogreškama zbog nemogućnosti određivanja električnog otpora samog osjetnika već se uvijek mjeri zajednički otpor osjetnika i vodiča, što naravno utječe na točnost mjerenja. Zbog toga se ovakav način spajanja koristi kada nije potrebno visoko precizno mjerenje. Za mjerenje otpora osjetnika u dvožilnom spoju može se koristiti Wehastoneov most.

Trožilnim povezivanjem osjetnika s mjerilom električnog otpora postiže se poboljšana točnost mjerenja u usporedbi s dvožilnim spojem, a funkcionira na način da se spoje tri žice od termometra do mjerača električnog otpora. Prva žica spojena je na pozitivni dio mjerača električnog otpora, druga na negativni, a treća na poseban dio na mjeraču električnog otpora, koji je namijenjen za mjerenje otpora u trožilnom spoju. Mjerač električnog otpora mjeri otpor osjetnika temperature i pretvara tu vrijednost u očitavanje temperature koje se ažurira u

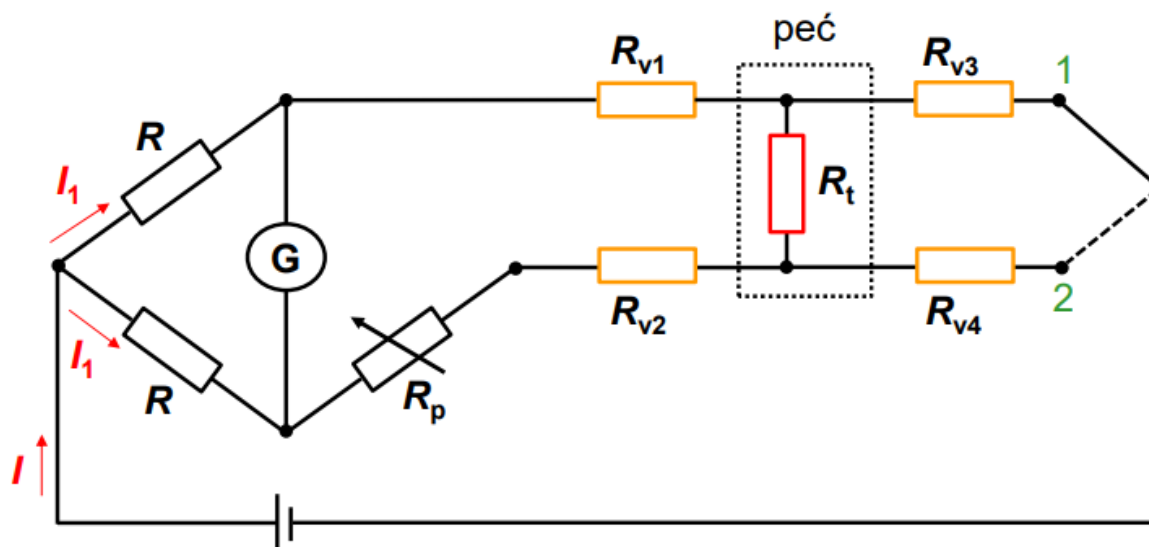
stvarnom vremenu kako se temperatura objekta ili materijala mijenja. Dakle treća žica u trožilnoj vezi može se smatrati kao zasebna referenca za mjerač električnog otpora. Izmjereni otpor treće žice kontinuirano se oduzima od ukupnog otpora žica i osjetnika čime se omogućuje mjerenje električnog otpora osjetnika, neovisno o električnim otporima spojnih vodova, što omogućuje točnije mjerenje u odnosu na termometre s dvožilnim spojem. Kod ove vrste spoja važno je da su sve tri žice izrađene od istog materijala te da su iste duljine, odnosno da u istim uvjetima imaju što je moguće sličniji električni otpor.

Važno je napomenuti da točnost očitavanja temperature ovisi o točnosti mjerila električnog otpora, kao i osjetnika temperature, zbog čega se preporuča povremeno umjeriti sustav kako bi se osigurala točna očitavanja temperature.

3.1.1.2 Četverožilno spajanje termometara s pokaznom jedinicom pomoću diferencijskog mosta

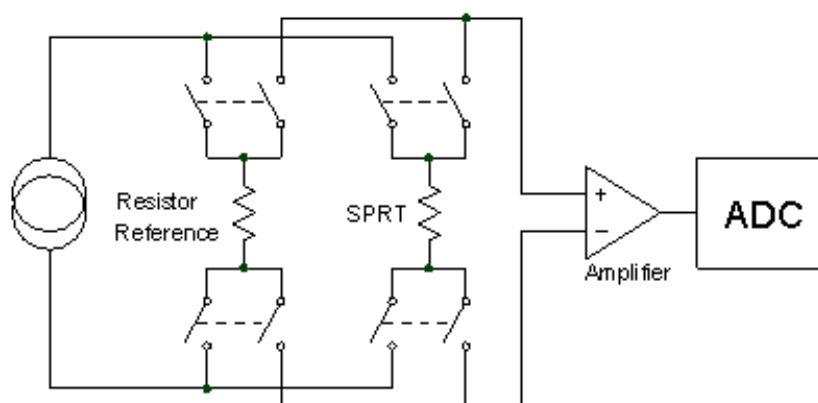
Termometri koji su umjeravani bili su četverožilno spojeni s pokaznom jedinicom, pa će ovaj dio biti malo detaljnije objašnjen. Za mjerenje električnog otpora osjetnika temperature moguće je koristiti diferencijski most u četverožilnom spoju. Ovim instrumentom omogućavaju se jako točna i precizna mjerenja temperature budući da se otpor osjetnika može izdvojiti od otpora spojnih vodiča, bez obzira na individualne električne otpore tih vodiča (vodiči mogu biti izrađeni od različitih materijala, mogu biti različite duljine te se mogu nalaziti na različitim temperaturama). Ove vodiči su obično označeni bojama, najčešće su dvije crvene, a dvije crne. Osjetnik temperature jedan je od otpornika u krugu diferencijskog mosta.

Diferencijski most je sličan Wheatstoneovom mostu s razlikom da je u strujni krug dodana sklopka. Balansiranjem mosta sa sklopkom u položaju 1 te zatim u položaju 2, moguće je na temelju obaju rezultata odrediti otpor samog osjetnika, bez obzira na individualne otpore vodiča. Upravo zbog toga korištenje četverožilne veze u kombinaciji s diferencijski mostom osigurava veću točnost i preciznost u mjerenjima temperature u usporedbi s dvožilnom ili trožilnom vezom. Ovaj spoj se obično koristi za mjerenja temperature s najstrožim zahtjevima na točnost.



Slika 7. Shema četverožilnog spoja s diferencijskim mostom

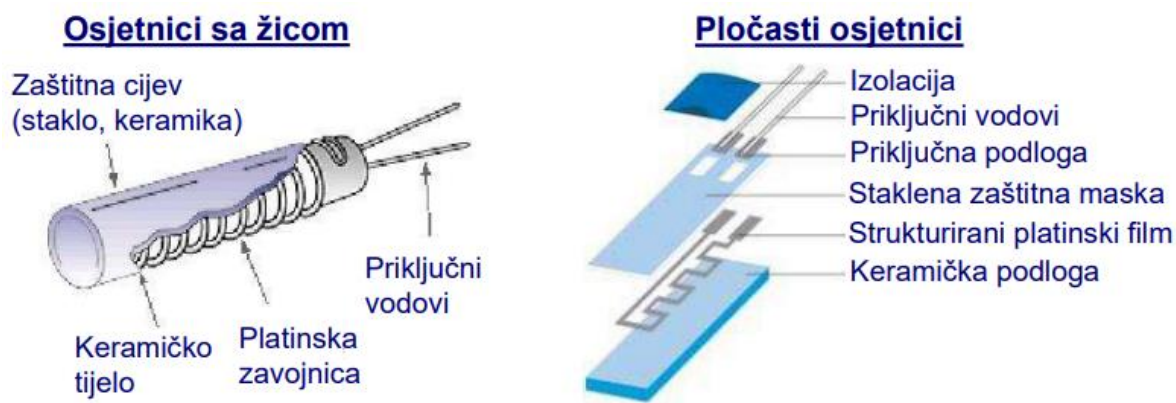
Moderni digitalni instrumenti, poput instrumenta umjerenog u okviru ovog završnog rada, za mjerenje električnog otpora koriste precizan izvor struje, referentni otpornik i precizan AD pretvornik, kao što je prikazano na slici 8. Preciznim izvorom održava se konstantna struja, naizmjenice kroz referentni otpornik i osjetnik temperature. Pomoću pojačala i AD konvertera se uspoređuju padovi napona na referentnom otporniku i osjetniku temperature, čime se dobiva omjer njihovih otpora. Budući da je električni otpor referentnog otpornika sljediv s malim nesigurnostima, množenjem tog otpora s omjerom otpora osjetnika i referentnog otpornika dobiva se električni otpor osjetnika.



Slika 8. Primjer sheme četverožilnog spoja s digitalnim termometrijskim otporničkim mostom

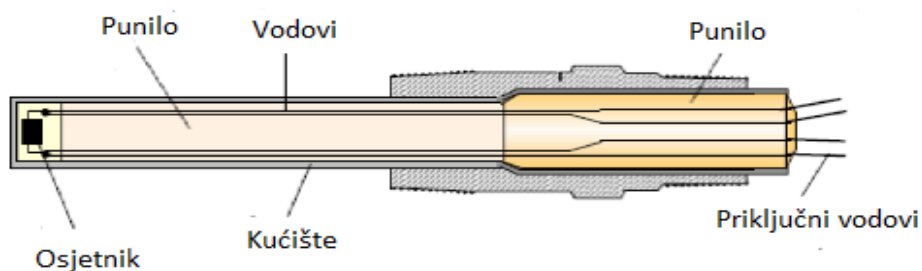
3.2 Građa otporničkih termometara

Osnovna konstrukcija otporničkih termometara uključuje sastavljanje osjetnog elementa, provodnih žica, izolacije, zaštitnog omotača i električnih veza kako bi se formirao pouzdan i precizan osjetnik temperature. Osjetnik je najvažniji dio a dolazi u dvije izvedbe, može biti namotan u zavojnicu oko izolacijskog tijela ili postavljen na ravnu podlogu, pri čemu je u velikom broju izvedbi s vanjske strane učvršćen i zaštićen izolacijskim materijalom.



Slika 9. Građa osjetnika temperature sa žicom i pločastog osjetnika

Priključni vodovi se koriste za spajanje osjetnika na mjerilo električnog otpora. Te su žice obično izrađene od materijala postojanog na visokim temperaturama kao što su nikal, željezo ili bakar, kako bi mogle zadržati svoju električnu vodljivost u širokom temperaturnom rasponu. Punilo je izolacijski sloj i štiti osjetnik i odvodne žice od oštećenja i osigurava da se samo željeni električni signal prenosi od do mjernog instrumenta termometra. Zaštitni omotač je u pravilu metalno kućište koje okružuje osjetnik i time ga štiti od čimbenika okoline kao što su vlaga i mehanička oštećenja. Termometrijski otpornički mostovi u pravilu omogućavaju izračun i prikaz temperature koja je određena na temelju izmjenjenog električnog otpora osjetnika.



Slika 10. Osnovna građa otporničkog termometra

3.2.1 Materijali za izradu otporničkih osjetnika temperature

Za otporničke termometre se koriste različiti materijali, a svaki ima svoja jedinstvena svojstva i ograničenja. Najčešće se koriste materijali koji imaju pozitivan gradijent otpora po temperaturi, a to su već spomenuti bakar, nikal i platina. Materijali s negativnim gradijentom kao što su germanij ili mješavine metalnih oksida se u pravilu koriste za mjerenje nižih temperatura (do 300 °C) i u užim temperaturnim rasponima. Izbor materijala ovisi o specifičnim zahtjevima primjene, kao što su temperaturni raspon, točnost, stabilnost, ponovljivost i cijena. Na primjer, ako se traži visoka točnost i stabilnost, koristi se platina koja je relativno skupa, ali ako točnost ne igra veliku ulogu, koristit će se bakar koji je jeftiniji od platine. Dakle najprikladniji materijal treba odabrati na temelju specifičnih zahtjeva svake primjene kako bi se osigurala pouzdana i točna mjerenja temperature.

3.2.2 Platinski otpornički osjetnici temperature

Predmet ovog rada je umjeravanje termometra s platinskim otporničkim osjetnicima temperature. Platina je ujedno i najbolji izbor za izradu preciznih osjetnika zbog svoje kemijski inertne prirode i izdržljivosti. Tako se platina može koristiti mnogo puta za jako precizna mjerenja i ima gotovo linearnu karakteristiku. Temperaturno područje u kojem se obično koriste platinski otpornički termometri je od -200 °C do 660 °C. Za platinu, ovisnost otpora s obzirom na temperaturu može se odrediti prema normi ISO/IEC 60751, korištenjem sljedećeg izraza:

- Od -200 °C do 0 °C: $R_t = R_{0^\circ\text{C}} \cdot [1 + At + Bt^2 + C \cdot (t - 100^\circ\text{C}) \cdot t^3]$
- Od 0 °C do 660 °C: $R_t = R_{0^\circ\text{C}} \cdot (1 + At + Bt^2)$

gdje su $R_{0^\circ\text{C}}$ električni otpor osjetnika pri temperaturi 0 °C, t je temperatura izražena u °C a A, B i C su koeficijenti sa sljedećim standardnim vrijednostima:

$$A = 3.9083 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5.775 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4.183 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$$

Otpori različitih platinskih otporničkih osjetnika pri 0 °C mogu biti različiti, a osjetnici su stoga standardizirani i označavaju se upravo u skladu s vrijednostima tog otpora. Tako je npr. Pt-100 oznaka za platinski otpornički osjetnik koji pri 0 °C ima otpor 100 Ω, za $R_{0^\circ\text{C}} = 500 \text{ } \Omega$ oznaka je Pt-500, za $R_{0^\circ\text{C}} = 1000 \text{ } \Omega$ oznaka je Pt-1000.

Tablica 3.1 Klase točnosti platinskih otporničkih termometara prema IEC 60751

Klasa točnosti	Temperaturno područje °C		Dopuštene pogreške °C
	Osjetnici sa žicom	Pločasti osjetnici	
AA	-50 do +250	0 do +150	$\pm(0,1 + 0,0017 t)$
A	-100 do +450	-30 do +300	$\pm(0,15 + 0,002 t)$
B	-196 do +600	-50 do +500	$\pm(0,3 + 0,005 t)$
C	-196 do +600	-50 do +600	$\pm(0,6 + 0,01 t)$

3.3 Pogreške otporničkih termometara pri mjerenju temperature

Gotovo svaki i najmanji dio termometra može biti uzrok nastanka pogreške i odstupanja prikazane temperature od stvarne. Tako pogreške možemo podijeliti prema uzroku i mjestu nastanka u ove četiri skupine:

- Pogreške u kućištu,
- pogreške u osjetniku,
- pogreške u otporničkom mostu,
- pogreške koje nastaju zbog vanjskih utjecaja.

Najčešće konkretne pogreške zbog kojih nastaju odstupanja su:

3.3.1 Pogreške uranjanja

Pogreška uranjanja nastaje zbog postojanja toplinskog toka uzduž zaštitnog tijela termometra, između zone kontrolirane temperature i okoline. Zbog ovog toplinskog toka, temperatura osjetnika se razlikuje od temperature medija u koji je uronjen budući da mu se, kroz zaštitnu cijev, toplina može odvoditi ili dovoditi (ovisno o tome da li je temperatura okoline viša ili niža od temperature zone u koju je osjetnik uronjen). Pogreška uranjanja može se smanjiti uranjanjem termometra dublje u zonu kontrolirane temperature. Za mjerenja najviše točnosti dubina uranjanja mora biti barem 10 puta veća od promjera zaštitne cijevi osjetnika.

3.3.2 Efekt toplinskog širenja

Kod industrijskih otporničkih termometara nastaju deformacije žice zbog različitih toplinom potaknutih mehaničkih efekata i to je jedan od najvećih izvora nesigurnosti. Postoje dva glavna efekta, oba su uzrokovana razlikama u širenju platinske žice i podloge pri promjeni

njihove temperature: prvi, elastična deformacija koja uzrokuje povećanje histereze i drugi, plastična deformacija koja uzrokuje klizanje. Iz ovog razloga najprecizniji osjetnici se izrađuju sa što manje kontakata platinske žice i izolacijskog tijela. S druge strane, takvi osjetnici su izuzetno osjetljivi na mehaničke šokove i vibracije, budući da platinska žica nema gotovo nikakvu mehaničku potporu.

3.3.3 Pogreške zračenja

Pogreške zračenja nastaju zbog prisutnosti izvora topline zračenja u okolini osjetnika. Izvori zračenja topline emitiraju infracrveno zračenje, koje može utjecati na očitavanje temperature termometra intenzivnijim zagrijavanjem njegovog osjetnika u odnosu na zagrijavanje medija u koji je uronjen (npr. mjerenje temperature zraka na otvorenom uz prisutnost sunčevog zračenja).

3.3.4 Samozagrijavanje

Do samozagrijavanja dolazi zbog toga što za mjerenje električnog otpornika osjetnika, prema Ohmovom zakonu, kroz njega mora protjecati električna struja čime se oslobađa toplina. Ova toplina podiže temperaturu osjetnika u odnosu na temperaturu okoline, što dovodi do pogrešaka u mjerenju. Kako bi se smanjili učinci samozagrijavanja, električna struja kroz otpornički termometar treba biti što niža.

3.3.5 Kontaminacija

Na temperaturi iznad 250 °C, platinski otpornički osjetnici temperature postupno postaju podložni zagađenju. Efekt zagađenja (kontaminacije) uzrokuje povećanje nečistoća unutar metala osjetnika, zbog čega se njegov otpor povećava. Ako je udio nečistoća prevelik, odstupanje od tabličnih podataka otpora mogu biti i do nekoliko puta.

Sve ove nesavršenosti mogu značajno utjecati na preciznost mjerenja temperature otporničkim termometrom, stoga se koriste različiti postupci umjeravanja i kontrole kvalitete da bi se smanjili utjecaji ovih čimbenika.

Bitno je bilo reći nešto o nastanku pogrešaka kod termometara, jer je slijedeća tema o kojoj će se govoriti mjerna nesigurnost.

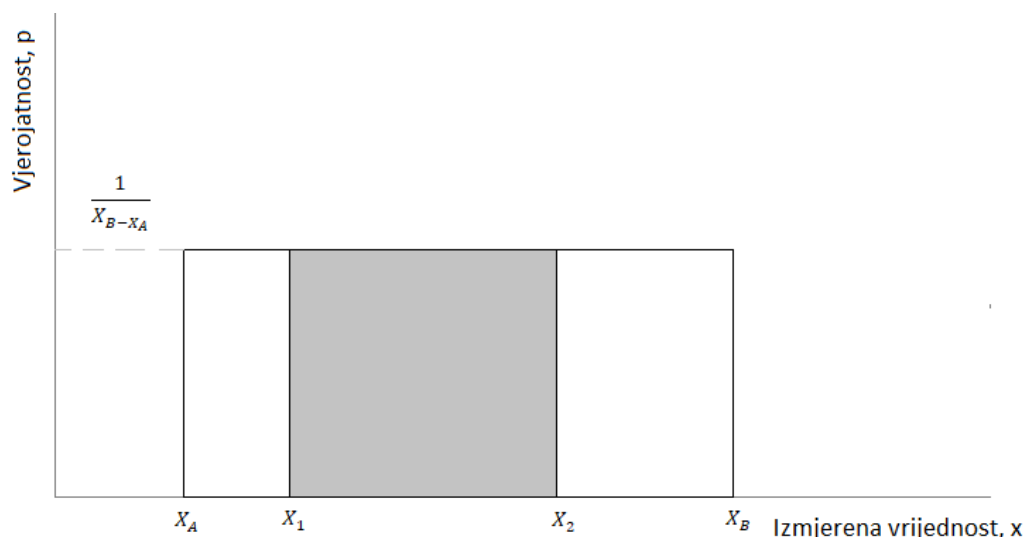
4 MJERNA NESIGURNOST

Mjerna nesigurnost je jedan od parametara za procjenu kvalitete rezultata mjerenja, tako da rezultati umjeravanja nisu potpuni bez utvrđene mjerne nesigurnosti. Po definiciji mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja, koji opisuje rasipanje vrijednosti koje se mogu opravdano pripisati mjerenoj veličini. Važno je napomenuti i da ne treba miješati mjernu nesigurnost rezultata s mjernom pogreškom, rezultat mjerenja može biti vrlo blizu stvarnoj vrijednosti mjerene veličine (i imati zanemarivu pogrešku) iako mu je možda pridijeljena velika mjerna nesigurnost. Dakle pogreške su razlike između mjerne vrijednosti i stvarne vrijednosti, nesigurnost je kvantifikacija sumnje u rezultat mjerenja.

Raspodjela rezultata mjerenja s više ponavljanja naziva se distribucija mjerene varijable. Postoji više vrsta distribucija od kojih su za mjerenje najbitnije kontinuirana i normalna distribucija.

4.1 Kontinuirana, pravokutna distribucija

Kontinuirana distribucija odnosi se na distribuciju vjerojatnosti gdje slučajna varijabla može poprimiti beskonačan broj vrijednosti unutar određenih granica. Drugim riječima, ishod nije ograničen na diskretne vrijednosti, već može biti bilo koja vrijednost unutar određenog intervala.



Slika 11. Prikaz pravokutne distribucije

Vjerojatnost p predstavlja obojani pravokutnik i može se napisati kao:

$$p = \frac{X_1 - X_2}{X_B - X_A}$$

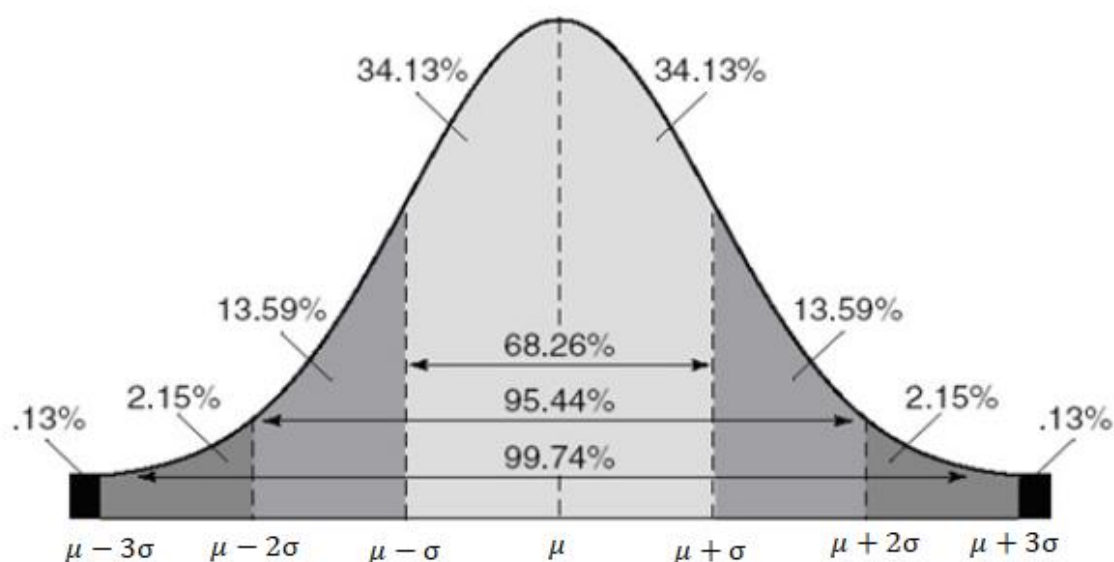
Standardna devijacija (σ) je mjerilo raspršenosti rezultata, ona predstavlja kvadratni korijen svih varijanci i može se zapisati:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{(X_B - X_A)}{2}$$

Varijance su prosječna odstupanja izmjerenih vrijednosti od aritmetičke sredine.

4.2 Normalna, Gaussova distribucija

Normalna distribucija, također poznata i kao Gaussova je distribucija vjerojatnosti koja se široko koristi u statistici i teoriji vjerojatnosti. Definirana je srednjom vrijednošću μ i standardnom devijacijom σ .



Slika 12. Gaussova distribucija

U normalnoj distribuciji, 68% podataka je unutar jedne standardne devijacije srednje vrijednosti, 95% je unutar dvije standardne devijacije, a 99,7% je unutar tri standardne devijacije. Ovo svojstvo normalne distribucije čini je korisnom za testiranje i procjenu intervala pouzdanosti. Vjerojatnost rezultata se prikazuje se jednadžbom:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$

4.3 Procjena mjerne nesigurnosti

Mjerne nesigurnosti se procjenjuju na dva načina: metoda procjene tipa A i metoda procjene tipa B. Tip A ili B mogu biti samo metode procjene, a ne i tipovi nesigurnosti, te su kod većine mjerenja potrebne procjene oba tipa.

4.3.1 Tip A

Procjena nesigurnosti tipa A je metoda koja se koristi za kvantificiranje nesigurnosti u rezultatima mjerenja. Temelji se na statističkoj analizi skupa rezultata mjerenja dobivenih pod istim uvjetima, rezultati mjerenja obično se dobivaju ponavljanjem mjernog postupka. Tip A koristi Gaussovu distribuciju i glavna ideja procjene mjerne nesigurnosti tipa A je korištenje standardne devijacije skupa mjerenja za procjenu nesigurnosti u jednom mjerenju. Standardna devijacija predstavlja mjeru širenja podataka i koristan je pokazatelj točnosti rezultata mjerenja.

$$U_A = \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}}$$

Jednadžba prikazuje procjenu proširene nesigurnosti U_A , t je vrijednost za danu razinu pouzdanosti (kao što je 1,96 za 95% pouzdanosti), s je standardna devijacija skupa mjerenja, a n je broj mjerenja.

4.3.2 Tip B

Procjena nesigurnosti tipa B je metoda koja uzima u obzir i slučajne i sustavne pogreške, često koristi pravokutnu distribuciju i koristi se u kombinaciji s procjenom nesigurnosti tipa A, koja uzima u obzir samo slučajne pogreške. Procjena nesigurnosti tipa B temelji se na korištenju informacija iz izvora koji nisu sami rezultati mjerenja, kao što su specifikacije proizvođača, izvješća o umjeravanju ili vrijednosti iz literature. Ove se informacije koriste za procjenu veličine i smjera sustavnih pogrešaka koje su prisutne u procesu mjerenja.

4.4 Ukupna i proširena standardna nesigurnost

Ukupna procjena nesigurnosti umjeranih otporničkih termometara je kombinirana nesigurnost svih izvora pogrešaka u procesu umjeravanja. To uključuje i nesigurnost tipa A i tipa B, kao i sve značajne dodatne nesigurnosti koje se mogu pojaviti pri procesu umjeravanja. Općenito, ukupna nesigurnost umjeranih otporničkih termometara može se procijeniti pomoću sljedeće formule:

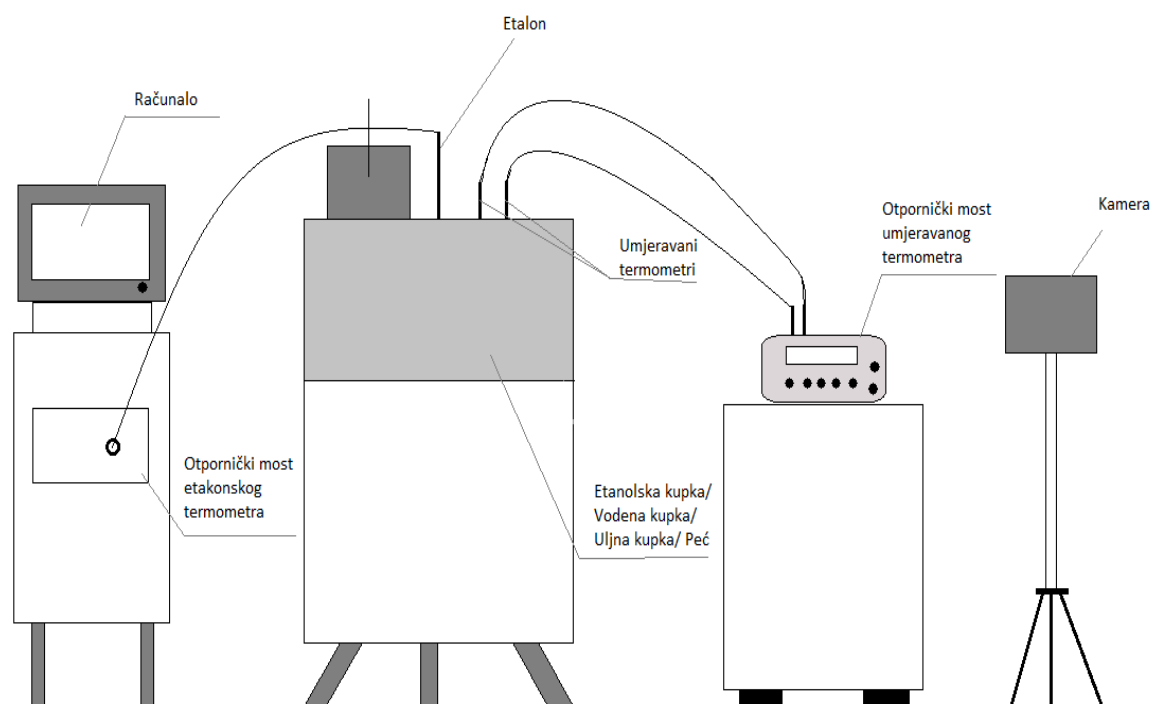
$$u(T) = \sqrt{\mathbf{u}_A^2 + \mathbf{u}_B^2 + \mathbf{u}_{Bn}^2 \dots} = \sum_{i=1}^n \sqrt{u_i^2}$$

Proširena sigurnost $U(T)$ dobiva se umnoškom kombinirane standardne mjerne nesigurnosti $u(T)$ i odabranog faktora pokrivanja k . Ako je potrebna veća sigurnost, rezultatu mjerenja se pridodaje veći faktor pokrivanja.

$$U(T) = k \cdot u(T)$$

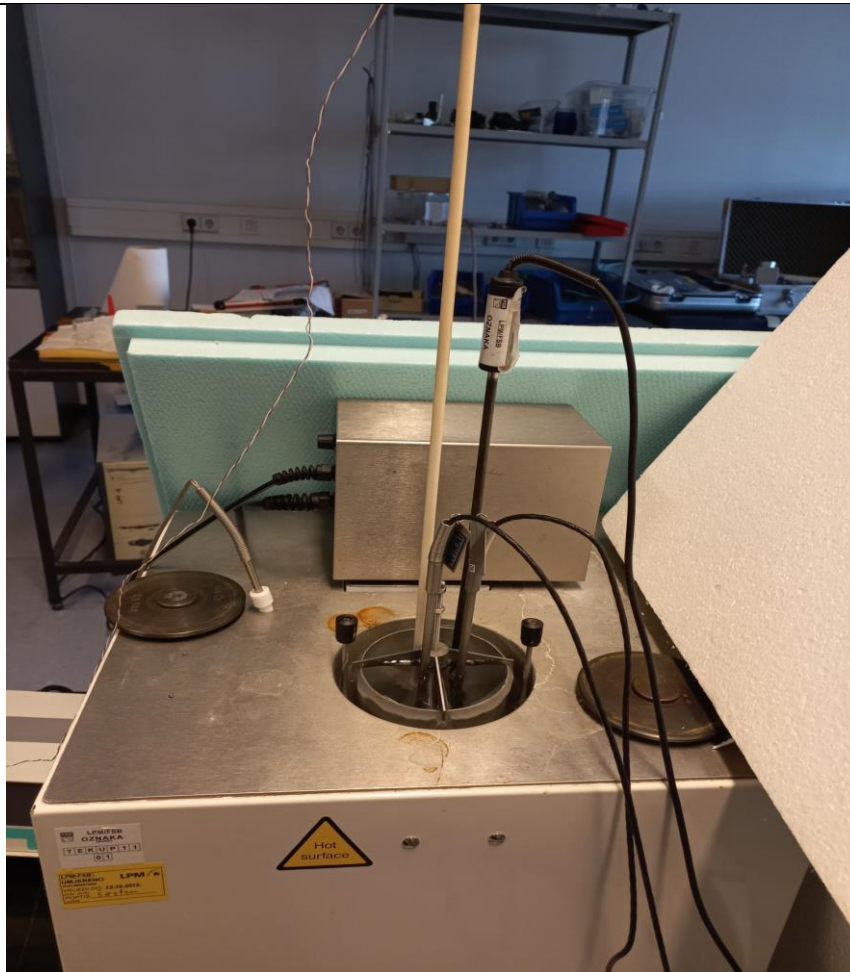
5 MJERNA LINIJA I UMJERAVANJE

Do sad, u radu je više manje objašnjena teorijska podloga za ono što slijedi i što je zapravo rađeno. Mjerna linija je skup instrumenata i opreme koja se koristi za sljedivo mjerenje temperature otporničkog termometra koji se umjerava. Svrha mjerne linije je osigurati sredstvo za što točnije mjerenje temperature umjeravanog otporničkog termometra i njezinu usporedbu s temperaturom izmjerenom referentnim termometrom. Ovakva mjerna linija omogućava provođenje dosljedne i standardizirane metode za određivanje odstupanja očitavanja umjeravanog termometra što je, kod daljnje upotrebe umjeravanog termometra, ključno za osiguravanje točnih mjerenja temperature.



Slika 13. Skica mjerne linije

Na slici je prikazana pojednostavljena shema mjerne linije, na kojoj se mogu vidjeti osnovni instrumenti i oprema potrebna za umjeravanje. Cijeli proces umjeravanja proveden je u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Također, sva korištena oprema za sastavljanje mjerne linije je u nadležnosti fakulteta, naravno osim termometara koje je bilo potrebno umjeriti za potrebe jedne tvrtke. Umjeravani su radni etaloni s Pt100 osjetnicima pomoću sekundarnog etalona s Pt25 osjetnikom.



Slika 14. Uronjeni termometri u neku zonu kontrolirane temperature

Slika prikazuje osjetnike temperature (umjeravane i etalonski) uronjene u vodenu termometrijsku kupku. Slika je ubačena čisto da se stekne bolji dojam kako se umjeravaju termometri i za bolje razumijevanje skice na prethodnoj slici. U daljnjem djelu rada svaki element sa skice će biti detaljno prikazan i objašnjen.

5.1 Elementi mjerne linije

Mjerna linija se sastoji od etalonskog i umjeravanog termometra, njihovih otporničkih mostova, uređaja koji su služili kao zone kontrolirane temperature, računala s programom pomoću kojeg su se kontinuirano bilježila očitavanja etalonskog termometra kao i kamere koja je kontinuirano snimala ekran pokazne jedinice (otporničkog mosta) umjeravanih termometara.

5.1.1 Osjetnici temperature

5.1.1.1 Etalonski osjetnik

Radi se o otporničkom termometru, model Fluke 5628. To je laboratorijski referentni termometar od platine, dizajniran za korištenje kao referentni standard za umjeravanje drugih instrumenata za mjerenje temperature. Omogućuje vrlo točna očitavanja temperature u širokom temperaturnom rasponu i idealan je za upotrebu u laboratorijskim i industrijskim uvjetima gdje se zahtijeva velika točnost. Termometar je umjeren po definicijskim točkama ITS 90 temperature ljestvice.



Slika 15. Prikaz etalonskog termometra

Tablica 5.1 Karakteristike etalonskog termometra

Oznaka	Pt25	Mjerno područje	-200 °C do 661 °C
Interna oznaka	TEPOT22, SN:2456	Nesigurnost umjeravanja (°C), za $k=2$	Temperatura, °C
Model	FLUKE 5628	± 0.006	-200
Način spajanja	Četverožilno	± 0.006	0
Dimenzije	6.35 mm promjer, 508 mm duljina	± 0.015	420
		± 0.022	661

5.1.1.2 Umjeravani osjetnici

Radi se o otporničkim osjetnicima, model CTP5000-450, proizvođača WIKA. Riječ je o osjetnicima visoke mjeriteljske kakvoće koji se primjenjuju u širokom temperaturnom rasponu. Idealni su za upotrebu u laboratorijskim i industrijskim uvjetima gdje se zahtijeva visoka točnost.



Slika 16. Umjeravani osjetnici CTP 5000-450

Tablica 5.2 Podaci o umjeravanim osjetnicima

Model	CTP5000-450
Proizvođač	WIKA
Temperaturno područje	Od -80 °C do 450 °C
Dimenzije	Promjer 6 mm, duljina 350 mm

5.2 Otpornički mostovi

Općenito otpornički mostovi su instrumenti koji se koriste za mjerenje električnog otpora. U slučaju mjerenja temperature radi se o električnom otporu osjetnika platinskog otporničkog termometra. Osnovna zadaća otporničkog mosta je uravnotežiti dva kraka kruga, pri čemu je na jedan krak spojen otpornik poznatog otpora, dok je na drugi krak spojen otpornik čiji se otpor želi izmjeriti.

5.2.1.1 Otpornički most etalonskog termometra

Za umjeravanje je korišten termometrijski otpornički most, model F700, proizvođača ALS sa fiksnim otpornikom Tinsley 100 Ω . To je most visoke točnosti, predviđen za četverožilno

spajanje osjetnika temperature. Tinsley 100 ohm je etalonski otpornik kojemu je električni otpor određen umjeravanjem s vrlo malim nesigurnostima.



Slika 17. Termometrijski otpornički most etalonskog termometra

Tablica 5.3 Podaci o otporničkom mostu F700

Proizvođač	ALS
Model	F700
Napajanje, V	240/220/120/100
Frekvencija, Hz	50-60
Dimenzije, mm	155×520×466
Radni uvjeti	0 °C do 30 °C i 10% do 20%
Vrijeme balansiranja	Potuno balansiranje za 20 sekundi

5.2.1.2 Otpornički most umjeravanog termometra

Ovdje je riječ o otporničkom mostu oznake ctr 2000, proizvođača ALS. CTR 2000 je precizni instrument koji je dizajniran za mjerenje otpora platinskih otporničkih termometara s visokom

preciznošću i pouzdanošću. Koristi konfiguraciju Wheatstoneovog mosta za mjerenje otpora, što pruža visoku razinu točnosti i stabilnosti.



Slika 18. Prikaz CTR 2000 otporničkog termometra

Na slici je prikazan CTR 2000 tijekom umjeravanja, vidljivo je digitalno očitavanje temperature, koja se dobila pretvaranjem iz otpora.

Tablica 5.4 Podaci o otporničkom mostu CTR 2000

Proizvođač	ALS
Model	CTR 2000
Napajanje, V	90 do 264
Frekvencija, Hz	47 do 63
Dimenzije, mm	168×108×215
Broj mjernih ulaza	2
Radni uvjeti, °C	15 do 25
Točnost, °C	0.01

5.2.2 Zone kontrolirane temperature

Zona kontrolirane temperature je određeni radni volumen ispunjen medijem (medij biramo ovisno o željenoj temperaturi) u koji se uranjaju etalonski i umjeravani termometri. Ovaj radni volumen se nalazi u pripadnom uređaju kojim se radni medij grijeje ili hladi na željenu temperaturu. Kako bi se osiguralo da se za vrijeme usporedbe svi termometri nalaze na što sličnijim temperaturama, temperaturni gradijenti unutar radnog volumena moraju biti što je moguće manji. Također, sustav regulacije nastoji osigurati što manje oscilacije temperature nakon njene stabilizacije. Što su temperaturni gradijenti i oscilacije u zoni manji, to je manji njen doprinos u ukupnoj nesigurnosti umjeravanja. Općenito, zone imaju najveći doprinos nesigurnosti umjeravanja.

5.2.2.1 Etanolska kupka

Termometrijske kupke su zone kontrolirane temperature koje se koriste za umjeravanje termometara u temperaturnom rasponu od $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ovisno o temperaturnom rasponu u kojem se koristi, kupka može biti napunjena etanolom ($-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $15\text{ }^{\circ}\text{C}$), vodom ($5\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) ili uljem ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Termometrijske kupke su relativno jednostavne za korištenje i održavanje. Ovdje se etanolska kupka koristila za umjeravanje na temperaturama $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Korištena je etanolska kupka parallel tube liquid bath 915, proizvođača ISOTECH. Etanol je poprilično sigurna tekućina, iako je zapaljiv pa se s njim mora pažljivo rukovati.



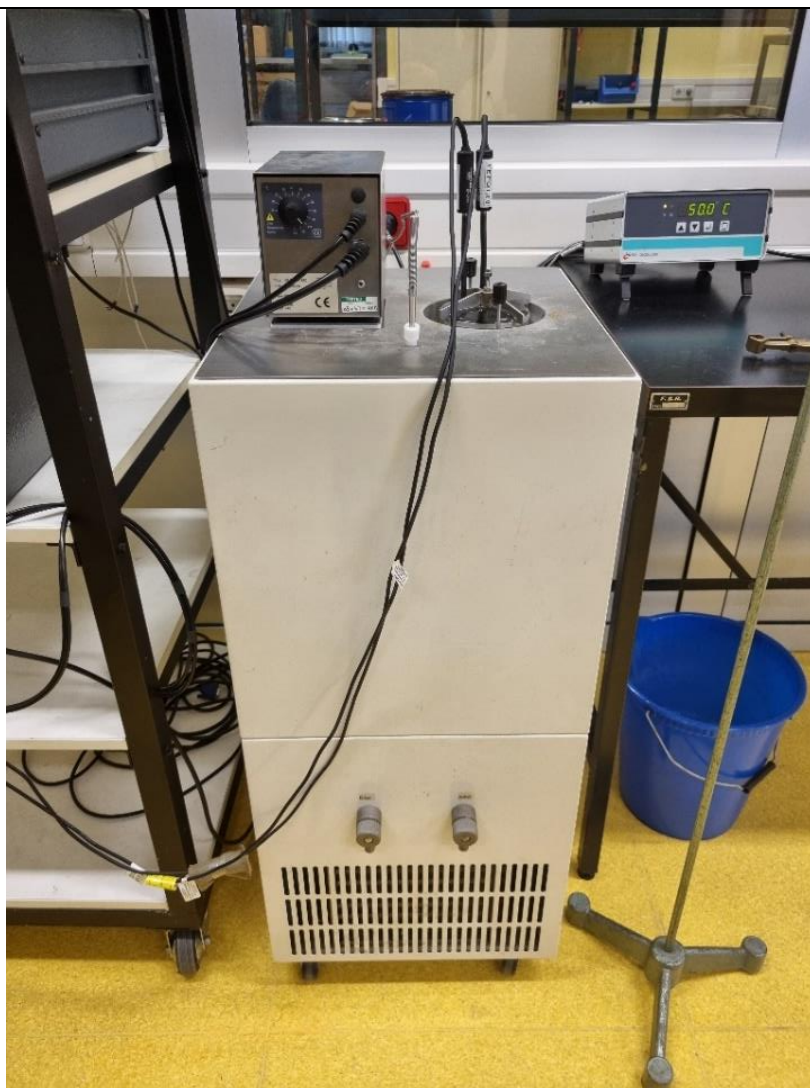
Slika 19. Korištena etanolska kupka

Tablica 5.5 Karakteristike etanolske kupke

Proizvođač	ISOTECH
Model	Parallel tube liquid bath 915
Interna oznaka	TEKUP 09
Volumen, L	7
Dimenzije, mm	580×640×1020
Snaga, m kW	1
Odstupanje za period od 10 minuta, °C	0.005

5.2.2.2 Vodena kupka

Vodena kupka obično se koristi za umjeravanje termometara u tipičnom temperaturnom u rasponu od 10 °C do 80 °C. Prednost ovakve vrste kupke je ta što koristi vodu, koja je lako dostupna, jeftina i netoksična tekućina, isto tako prednost ovakvih kupki je što su relativno jednostavne za korištenje i održavanje. Mane vodenih kupki su prije svega je to što se niti teorijski ne mogu koristiti za temperature ispod 0 °C ili iznad 100 °C. Također zahtijevaju dulje vrijeme stabilizacije od ostalih vrsta kalibracijskih kupki zbog visokog specifičnog toplinskog kapaciteta vode. Vodena kupka je korištena za umjeravanje na temperaturama od 25 °C i 50 °C



Slika 20. Fotografija vodene kupke tijekom umjeravanja

Tablica 5.6 Karakteristike vodene kupke

Proizvođač	Heto Calibration
Model	KB 22-2
Temperaturno područje	-20 °C do 100 °C
Volumen radnog medija	4,5 L (Ø100 x 450 mm)
Temperatura stabilnosti	< ±0.001 °C
Brzina hlađenja	cca. 11 °C·h ⁻¹
Brzina zagrijavanja	cca. 25 °C·h ⁻¹

5.2.2.3 Uljna kupka

Uljne kupke se koriste za umjeravanja termometara na temperaturama između 50 °C i 300 °C. Prednosti uljnih kupki u odnosu na peći su: veća stabilnost, odnosno manje oscilacije temperature u vremenu, ujednačenost, manji gradijenti u radnom volumenu. U odnosu na vodene kupke imaju relativno širok temperaturni raspon, zato je uljna kupka bila najbolji izbor za umjeravanje termometara na temperaturama od 100 °C i 150 °C u našem slučaju. Korištena je kupka proizvođača Leeds&Northrup, model TB 300.



Slika 21. Fotografija uljne kupke

Tablica 5.7 Karakteristike uljne kupke

Proizvođač	Leeds & Northrup Italia S.p.A.	
Model	TB 300	
Temperaturno područje	Ulje	+30 °C do 300 °C
Kapacitet radnog medija	10 litara	

Dimenzije	Visina	965 mm
	Širina	360 mm
	Dužina	30 mm
Dimenzije unutrašnjosti kupke	Promjer	100 mm
	Dubina	330 mm
Masa	26 kg	
Snaga	1600 W	
Napajanje	220 V ; 50 Hz	

5.2.2.4 Termometrijska peć

Peći, kao zone kontrolirane temperature, tipično se koriste za umjeravanje termometara na temperaturama iznad 300 °C. Zbog rada na visokim temperaturama važno je napomenuti da se peći koje se koriste za umjeravanje moraju pravilno održavati i redovito provjeravati kako bi se osigurala pouzdana kontrola temperature. Naravno, potrebno je poduzeti posebne mjere opreza pri korištenju visokotemperaturnih peći, uključujući korištenje odgovarajuće osobne zaštitne opreme i pridržavanje odgovarajućih radnih postupaka. U ovom slučaju korištena je vertikalna termometrijska peć, proizvođača Leeds&Northrup na umjernim temperaturama od 300 °C i 400 °C.



Slika 22. Prikaz peći korištene za umjeravanje

Tablica 5.8 Karakteristike peći

Proizvođač	Vertikalna termometrijska peć
Model	Leeds&Northrup
Vrsta	T-30/H
Volumen, L	2.278
Radno područje, °C	Od 200 do 600

5.3 Proces umjeravanja

Proces počinje prvo tako što se pripremi oprema potrebna za umjeravanje. Naravno sve polazi od termometara, etalonskog i umjeravanog i temperatura na kojima ih je potrebno umjeravati, koje su prethodno već rečene. Zatim se odabire termometrijska peć ili kupka sa različitim medijem, ovisno temperaturi umjeravanja, koja se podešava na željenu temperaturu svojim regulatorom. Prije početka umjeravanja, termometre je potrebno spojiti na njihove otporničke mostove. Termometri se zatim uranjaju u zonu kontrolirane temperature i čekamo da se temperatura stabilizira na željenu. Kad se temperatura stabilizira, temperaturu etalona pratimo na računalu, na koje je povezan etalonski termometar, a temperaturu umjeranih termometara na displeju njihovih otporničkih mostova. Budući da su mjerenja morala biti precizna, a umjeravala su se 2 termometra, svaki na 9 različitih temperatura, tu je bilo jako puno posla i zahtijevalo je puno vremena. Kako bismo si uštedjeli vrijeme, postavili smo kameru koja svakih 10 sekundi slika ekran umjeranih termometara i te su se slike pohranjivale na računalu, koje je pratilo i temperaturu etalona. Tako smo na jednom mjestu imali obje potrebne temperature za usporedbu. Dalje unutar vrlo velikog broja očitavanja i fotografija ekrana umjeravanog termometra bilo je potrebno pronaći vremenske periode u kojima su oscilacije temperature bile najmanje. Temperatura izmjerena pojedinim termometrom izračunavala se kao srednja vrijednost njegovih 30 očitavanja, pri čemu su očitavanja svih termometara uzimana u istom vremenskom periodu.

Nadalje, da bismo mogli umjeravati termometre potrebne su nam procijene mjerne nesigurnosti, koje su određene upotrebom takozvanih budžeta nesigurnosti. Za proračun mjerne nesigurnosti etalonskog termometra uzeta je standardna nesigurnost tipa A, te pogreška umjeravanja etalona čija se distribucija rezultata aproksimiramo normalnom

raspodjelom. Pogreška drifta etalona razvija se pravokutnom distribucijom. Krajnji cilj budžeta nesigurnosti je dobiti sastavljenu proširenu nesigurnost umjeravanja. Budžeti nesigurnosti za ovo umjeravanje prikazani su slikama 23 do 31.

Thermal source uncertainty budget							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	PRT temperature	t_S	-40.059 °C	0.00139 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	1.4 mK
B	PRT calibration	$\delta\alpha_S$	0.00 °C	0.0050 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	2.5 mK
	PRT drift	$\delta\alpha_D$	0.00 °C	0.0010 °C	rectangular	0.839 [-]	0.5 mK
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_S	1.0 mK
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_S	0.3 mK
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_S	1.1 mK
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000208 °C/ppm@ t_S	0.0 mK
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000208 °C/ppm@ t_S	0.0 mK
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	2.1 °C/ Ω @ t_S	0.1 mK
	Temp. gradients and stability	$\delta\alpha_F$	0.00 °C	0.0033 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	3.3 mK
	A&B	DUT temperature	t_x	-40.0594 °C			Uncertainty (1 σ)
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ -40.0594 °C							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	DUC Readout	READ	-40.04234 °C	0.00136 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.36 mK
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK
	DUC immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	DUC repeatability		0.000 °C	0.004 °C	rectangular	1.0 [-]	2.31 mK
	Temp. deviation	t_x	0.000 °C	0.00475 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	4.75 mK
A&B	DUC Reading	TD	-40.0423 °C			Uncertainty (1 σ)	5.46 mK
Expanded Uncertainty		U				k=2	10.9 mK

Slika 23. Budžet nesigurnosti za točku -40 °C

Thermal source uncertainty budget							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	PRT temperature	t_s	-20.084 °C	0.00166 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	1.7 mK
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0050 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	2.5 mK
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0013 °C	rectangular	0.920 [-]	0.7 mK
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.0 mK
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.1 mK
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000229 °C/ppm@ t_s	0.0 mK
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000229 °C/ppm@ t_s	0.0 mK
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	2.3 °C/ Ω @ t_s	0.1 mK
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0029 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	2.9 mK
	A&B	DUT temperature	t_x	-20.0838 °C	Uncertainty (1 σ)		
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ -20.0838 °C							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	DUC Readout	READ	-20.07709 °C	0.00149 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.49 mK
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK
	DUC immersion	t_x	0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	DUC repeatability		0.000 °C	0.005 °C	rectangular	1.0 [-]	2.89 mK
	Temp. deviation		0.000 °C	0.00459 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	4.59 mK
A&B	DUC Reading	TD	-20.0771 °C	Uncertainty (1 σ)			5.63 mK
Expanded Uncertainty U k=2 11.3 mK							

Slika 24. Budžet nesigurnosti za točku -20 °C

Thermal source uncertainty budget							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	PRT temperature	t_s	0.007 °C	0.00117 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	1.2 mK
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0015 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	0.8 mK
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0017 °C	rectangular	1.000 [-]	1.0 mK
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.0 mK
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.1 mK
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000251 °C/ppm@ t_s	0.1 mK
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000251 °C/ppm@ t_s	0.0 mK
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	2.5 °C/ Ω @ t_s	0.1 mK
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0049 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	4.9 mK
	A&B	DUT temperature	t_x	0.0074 °C	Uncertainty (1 σ)		
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 0.0074 °C							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	DUC Readout	READ	0.0205873 °C	0.00136 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.36 mK
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK
	DUC immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	DUC repeatability		0.000 °C	0.003 °C	rectangular	1.0 [-]	1.73 mK
	Temp. deviation	t_x	0.000 °C	0.00552 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	5.52 mK
A&B	DUC Reading	TD	0.0206 °C	Uncertainty (1 σ)			5.95 mK
Expanded Uncertainty U k=2 11.9 mK							

Slika 25. Budžet nesigurnosti za točku 0 °C

Thermal source uncertainty budget								
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution	
A	PRT temperature	t_s	24.959 °C	0.00066 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	0.7 mK	
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0015 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	0.8 mK	
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0023 °C	rectangular	1.099 [-]	1.5 mK	
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK	
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.0 mK	
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK	
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.2 mK	
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK	
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000278 °C/ppm@ t_s	0.1 mK	
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000278 °C/ppm@ t_s	0.0 mK	
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	2.8 °C/ Ω @ t_s	0.2 mK	
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0061 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	6.1 mK	
	A&B	DUT temperature	t_x	24.9591 °C	Uncertainty (1 σ)			0.0066 °C
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 24.9591 °C								
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution	
A	DUC Readout	READ	24.982823 °C	0.00053 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	0.53 mK	
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK	
	DUC immersion	t_x	0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK	
	DUC repeatability		0.000 °C	0.002 °C	rectangular	1.0 [-]	1.15 mK	
	Temp. deviation		0.000 °C	0.00661 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	6.61 mK	
A&B	DUC Reading	TD	24.9828 °C	Uncertainty (1 σ)			6.74 mK	
Expanded Uncertainty						U	k=2	13.5 mK

Slika 26. Budžet nesigurnosti za točku 25 °C

Thermal source uncertainty budget								
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution	
A	PRT temperature	t_s	50.154 °C	0.00104 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	1.0 mK	
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0050 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	2.5 mK	
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0050 °C	rectangular	1.198 [-]	3.5 mK	
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK	
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.0 mK	
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK	
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.2 mK	
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK	
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000305 °C/ppm@ t_s	0.1 mK	
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000305 °C/ppm@ t_s	0.0 mK	
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	3.1 °C/ Ω @ t_s	0.2 mK	
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0056 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	5.6 mK	
	A&B	DUT temperature	t_x	50.1541 °C	Uncertainty (1 σ)			0.0074 °C
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 50.1541 °C								
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution	
A	DUC Readout	READ	50.191919 °C	0.00131 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.31 mK	
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK	
	DUC immersion	t_x	0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK	
	DUC repeatability		0.000 °C	0.002 °C	rectangular	1.0 [-]	1.15 mK	
	Temp. deviation		0.000 °C	0.00738 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	7.38 mK	
A&B	DUC Reading	TD	50.1919 °C	Uncertainty (1 σ)			7.59 mK	
Expanded Uncertainty						U	k=2	15.2 mK

Slika 27. Budžet nesigurnosti za točku 50 °C

Thermal source uncertainty budget							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	PRT temperature	t_s	99.983 °C	0.00043 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	0.4 mK
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0050 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	2.5 mK
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0080 °C	rectangular	1.393 [-]	6.5 mK
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.0 mK
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.2 mK
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000360 °C/ppm@ t_s	0.1 mK
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000360 °C/ppm@ t_s	0.0 mK
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	3.6 °C/ Ω @ t_s	0.2 mK
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0040 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	4.0 mK
	A&B	DUT temperature	t_x	99.9834 °C	Uncertainty (1 σ)		
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 99.9834 °C							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	DUC Readout	READ	100.02606 °C	0.0005 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	0.50 mK
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK
	DUC immersion	t_x	0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	DUC repeatability		0.000 °C	0.004 °C	rectangular	1.0 [-]	2.31 mK
	Temp. deviation		0.000 °C	0.00822 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	8.22 mK
A&B	DUC Reading	TD	100.0261 °C	Uncertainty (1 σ)			8.56 mK
Expanded Uncertainty U k=2 17.1 mK							

Slika 28. Budžet nesigurnosti za točku 100 °C

Thermal source uncertainty budget							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	PRT temperature	t_s	150.008 °C	0.00054 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	0.5 mK
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0050 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	2.5 mK
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0112 °C	rectangular	1.585 [-]	10.2 mK
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.0 mK
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.2 mK
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000416 °C/ppm@ t_s	0.1 mK
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000416 °C/ppm@ t_s	0.0 mK
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	4.2 °C/ Ω @ t_s	0.2 mK
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0047 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	4.7 mK
A&B	DUT temperature	t_x	150.0081 °C	Uncertainty (1 σ)			0.0117 °C
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 150.0081 °C							
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution
A	DUC Readout	READ	150.03986 °C	0.00123 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.23 mK
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK
	DUC immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK
	DUC repeatability		0.000 °C	0.003 °C	rectangular	1.0 [-]	1.73 mK
	Temp. deviation	t_x	0.000 °C	0.01170 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	11.70 mK
A&B	DUC Reading	TD	150.0399 °C	Uncertainty (1 σ)			11.90 mK
Expanded Uncertainty U k=2 23.8 mK							

Slika 29. Budžet nesigurnosti za točku 150 °C

Thermal source uncertainty budget									
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution		
A	PRT temperature	t_s	298.945 °C	0.01049 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	10.5 mK		
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0080 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	4.0 mK		
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0213 °C	rectangular	2.139 [-]	26.3 mK		
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK		
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.1 mK		
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK		
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.3 mK		
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK		
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000589 °C/ppm@ t_s	0.1 mK		
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000589 °C/ppm@ t_s	0.0 mK		
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	5.9 °C/ Ω @ t_s	0.3 mK		
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0950 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	95.0 mK		
A&B	DUT temperature	t_x	298.9448 °C	Uncertainty (1 σ)			0.0993 °C		
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 298.9448 °C									
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution		
A	DUC Readout	READ	298.94576 °C	0.01046 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	10.46 mK		
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK		
	DUC immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK		
	DUC repeatability		0.000 °C	0 °C	rectangular	1.0 [-]	0.00 mK		
	Temp. deviation	t_x	0.000 °C	0.09927 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	99.27 mK		
A&B	DUC Reading	TD	298.9458 °C	Uncertainty (1 σ)			99.82 mK		
Expanded Uncertainty							U	k=2	199.6 mK

Slika 30. Budžet nesigurnosti za točku 300 °C

Thermal source uncertainty budget								
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution	
A	PRT temperature	t_s	399.971 °C	0.0034 °C	normal (1 σ)	1.000 [-]	3.4 mK	
B	PRT calibration	δt_s	0.00 °C	0.0080 °C	normal (2 σ)	1.000 [-]	4.0 mK	
	PRT drift	δt_D	0.00 °C	0.0288 °C	rectangular	2.500 [-]	41.6 mK	
	PRT immersion		0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK	
	RB linearity	δR_{IS1}	0.00 ppm	2.00 ppm	normal (2 σ)	0.001 °C/ppm@ t_s	1.1 mK	
	RB resolution	δR_{IS2}	0.00 ppm	1.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	0.3 mK	
	RB AC/DC		0.00 ppm	2.00 ppm	rectangular	0.001 °C/ppm@ t_s	1.3 mK	
	RB internal insulation leakage		0.00 mK	1.00 mK	normal (1 σ)	1.0 [-]	1.0 mK	
	RS calibration		100.00 Ω	0.40 ppm	normal (2 σ)	0.000711 °C/ppm@ t_s	0.1 mK	
	RS drift		0.00 Ω	0.10 ppm	rectangular	0.000711 °C/ppm@ t_s	0.0 mK	
	RS temp. stability		0.00 Ω	0.00 Ω	rectangular	7.1 °C/ Ω @ t_s	0.4 mK	
	Temp. gradients and stability	δt_F	0.00 °C	0.0758 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	75.8 mK	
A&B	DUT temperature	t_x	399.9709 °C	Uncertainty (1 σ)			0.0866 °C	
DUC Reading uncertainty budget $t_{cal.}$ 399.9709 °C								
Type	Quantity	Symbol	Estimation	Uncertainty	Probability	Sensitivity coeff.	Contribution	
A	DUC Readout	READ	400.00548 °C	0.00323 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	3.23 mK	
B	DUC Resolution	RDres	0.000 °C	0.001 °C	rectangular	1.0 [-]	0.29 mK	
	DUC immersion	t_x	0.00 °C	0.0000 °C	rectangular	1.000 [-]	0.0 mK	
	DUC repeatability		0.000 °C	0 °C	rectangular	1.0 [-]	0.00 mK	
	Temp. deviation		0.000 °C	0.08663 °C	normal (1 σ)	1.0 [-]	86.63 mK	
A&B	DUC Reading	TD	400.0055 °C	Uncertainty (1 σ)			86.70 mK	
Expanded Uncertainty						U	k=2	173.4 mK

Slika 31. Budžet nesigurnosti za točku 400 °C

6 REZULTATI UMJERAVANJA

Tablica 6.1 Temperatura -40 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	-40.059	-40.058
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	-40.042	-40.052
Odstupanje, K	0.017	0.005
Nesigurnost umjeravanja, mK	11	10

Tablica 6.2 Temperatura -20 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	-20.084	-20.058
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	-20.077	-20.082
Odstupanje, K	0.007	0.001
Nesigurnost umjeravanja, mK	11	10

Tablica 6.3 Temperatura 0 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	0.007	0.004
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	0.0021	0.011
Odstupanje, K	0.013	0.007
Nesigurnost umjeravanja, mK	12	11

Tablica 6.4 Temperatura 25 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	24.959	24.958
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	24.983	24.970
Odstupanje, K	0.024	0.012
Nesigurnost umjeravanja, mK	13	13

Tablica 6.5 Temperatura 50 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	50.154	50.002
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	50.192	50.020
Odstupanje, K	0.038	0.018
Nesigurnost umjeravanja, mK	15	16

Tablica 6.6 Temperatura 100 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	99.983	99.986
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	100.026	100.004
Odstupanje, K	0.043	0.018
Nesigurnost umjeravanja, mK	17	17

Tablica 6.7 Temperatura 150 °C

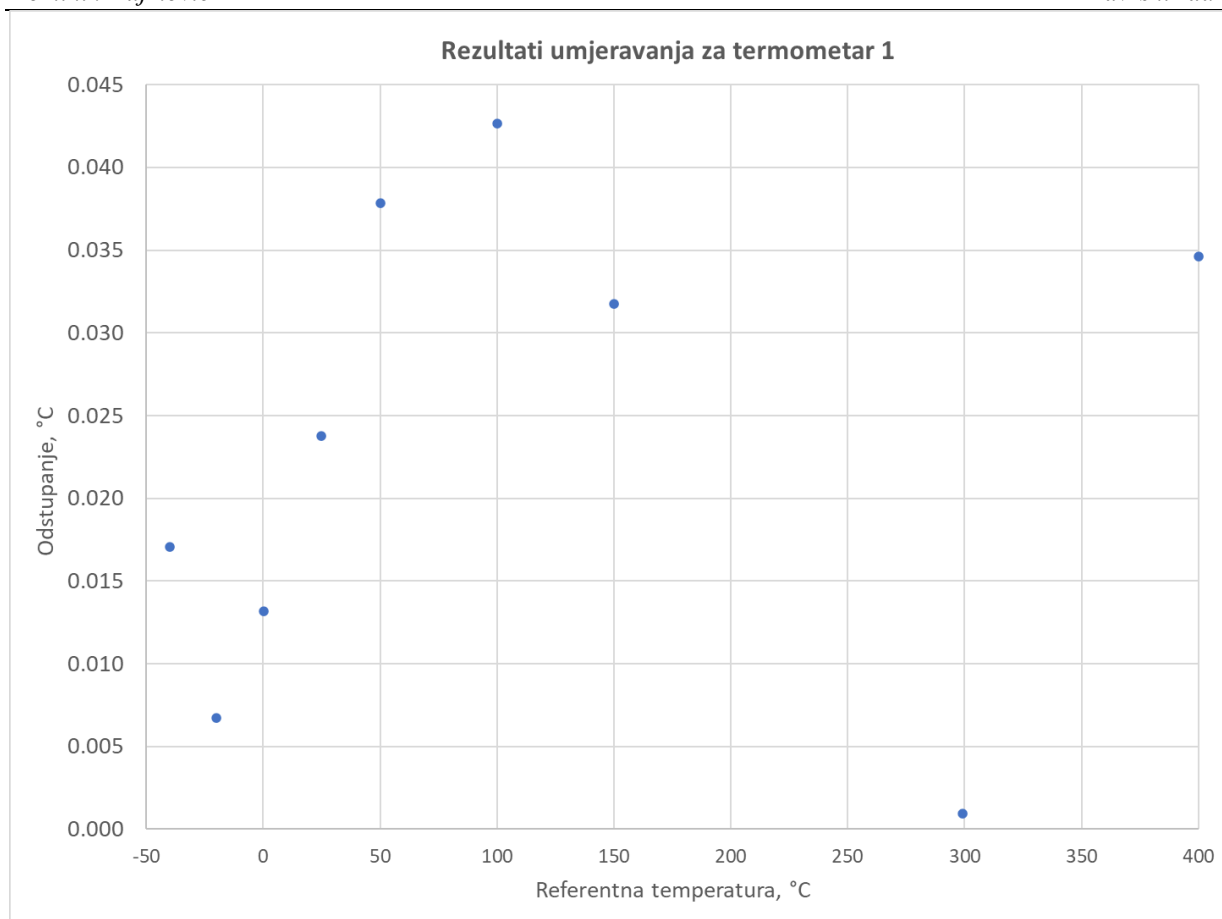
Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	150.008	150.006
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	150.040	150.021
Odstupanje, K	0.032	0.015
Nesigurnost umjeravanja, mK	24	24

Tablica 6.8 Temperatura 300 °C

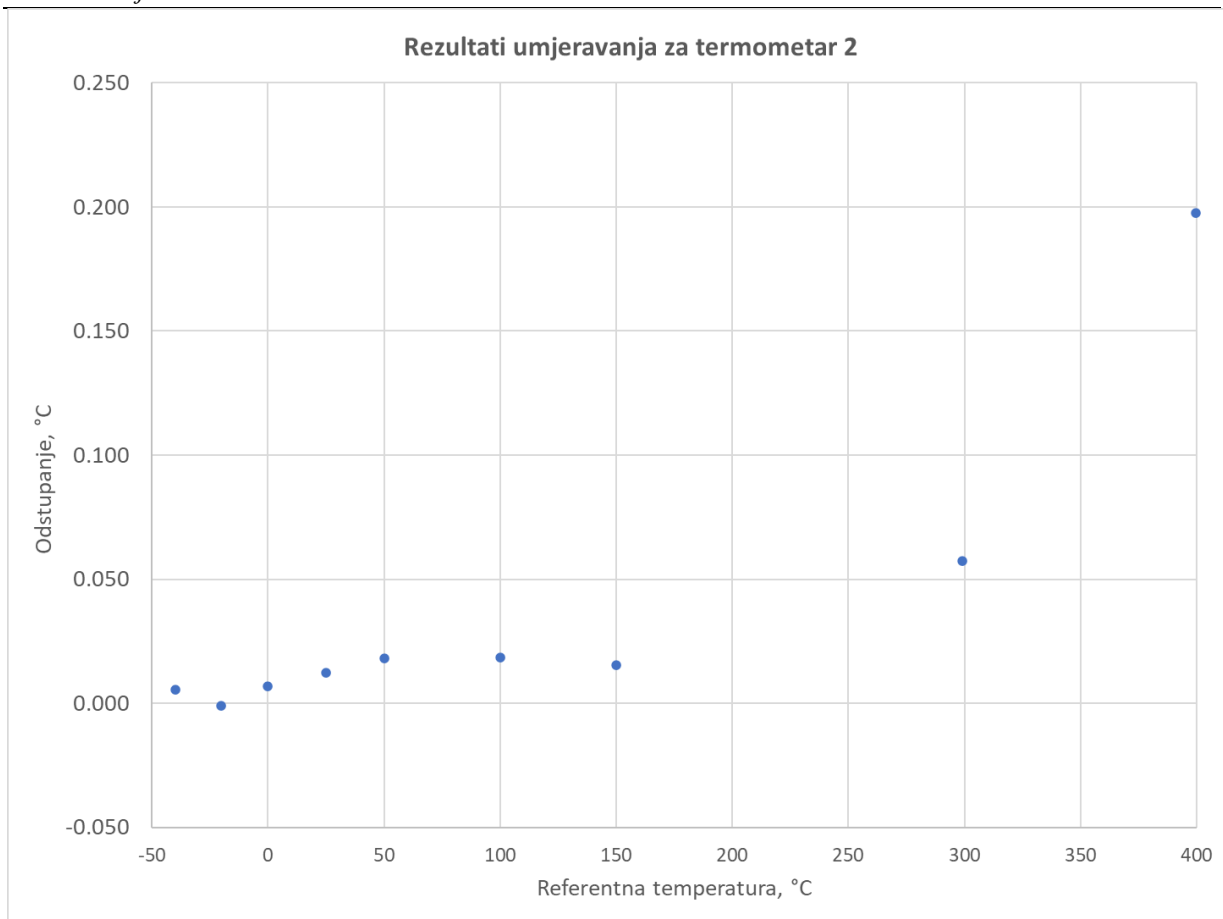
Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	298.945	298.900
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	298.946	298.957
Odstupanje, K	0.001	0.015
Nesigurnost umjeravanja, mK	200	203

Tablica 6.9 Temperatura 400 °C

Termometar	1	2
Temperatura izmjerena etalonskim termometrom, °C	399.971	399.836
Temperatura izmjerena umjeravanim termometrom, °C	400.005	400.034
Odstupanje, K	0.035	0.198
Nesigurnost umjeravanja, mK	173	175



Slika 32. Grafički prikaz rezultata umjeravanja za termometar 1



Slika 33. Grafički prikaz rezultata umjeravanja za termometar 2

7 ZAKLJUČAK

Proces mjerenja temperature koristi se u gotovo svim sferama života, a za strojarstvo je posebno važno mjerenje temperature u industriji. Upravo zbog tolike rasprostranjenosti mjerenja temperature važno je imati dobro umjerene termometre jer nekad jako mala odstupanja mogu biti uzrok velikih problema, a proces umjeravanja je ključan za osiguranje točnog mjerenja temperature. Platinski otpornički termometri naširoko se koriste u industrijskim i znanstvenim krugovima za mjerenje temperature, međutim na njihovu točnost može utjecati niz čimbenika, uključujući promjene u temperaturi okoline, električni šum i starenje senzora, te je umjeravanje ključno za minimiziranje tih učinaka i to je osiguranje da termometar pruža točna i pouzdana mjerenja. U sklopu ovog rada bilo je potrebno umjeriti dva industrijska termometra s etalonskim, na različitim točkama, koje smo odabrali. Sam proces umjeravanja, kao i pisanje ovog rada, bilo je jako zanimljivo jer se nauči jako puno novih stvari kad se sudjeluje u cijelom procesu. Tijekom samog umjeravanja bilo je puno nepredviđenih stvari, tako smo morali ponovno mjeriti temperature od 0 °C i 25 °C, ali sve u svemu, cijeli proces je protekao jako dobro. Na kraju, rezultati su predstavljeni tablično i odlično se mogu vidjeti potrebni podaci. Odstupanja umjeravanog termometra spojenog na kanal 1 otporničkog mosta kretala su se u granicama od 1 do 43 mK dok su se za termometar na kanalu 2 odstupanja kretala u granicama od -1 mK do 198 mK. Umjeravanja su provedena s nesigurnostima od 10 do 203 mK. Vidljivo je da su odstupanja pri temperaturama do 150 °C vrlo mala, radi se o nekoliko stotih dijelova Kelvina, što je fascinantno, koliko su mjerenja morala biti precizna. Na takvoj razini preciznosti, svaki mali detalj može imati utjecaj, ali mjerenja su odrađena jako dobro i zadovoljni smo rezultatima.

LITERATURA

- [1] Šestan, D., Grgerc Bermanec L., Matas I.: Podloge za predavanja: „Mjerenje temperature otporničkim termometrima“, „Temperature ljestvice i umjeravanje termometara“, „Procjena mjerne nesigurnosti“, Zagreb, 2022.
- [2] Niki Orešković: Umjeravanje mjerila temperature, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2022.
- [3] Filip Jurić: Mjerna nesigurnost u kontaktnoj termometriji, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] The Definition of the Kelvin and International Temperature Scale, National Metrology Institute of Japan.
- [5] FLUKE company, specifications of 5628 Secondary Standard PRTs.
- [6] WIKA company, specifications of precision thermometer, model CTR2000 and reference thermometer, model CTP5000.
- [7] ISOTECH company, specification of Parallel Tube Liquid Bath Model 915

PRILOZI

- I. CD-R disc – PDF verzija završnog rada