

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Doris Županić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Davor Zvizdić, dipl. ing.
Danijel Šestan, dipl. ing.

Student:

Doris Županić

Zagreb, 2013.

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

Zahvaljujem mentorima prof.dr.sc. Davoru Zvizdiću, dipl.ing. i Danijelu Šestanu, dipl.ing na ukazanom znanju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Također bih se zahvalila i svojim kolegama na pruženoj podršci i pomoći tijekom provedbe mjerenja i izrade rada.

Doris Županić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. PLATINSKI OTPORNIČKI TERMOMETRI	2
2.1. Općenito	2
2.2. Otpor materijala	2
2.2.1. Utjecaj temperature na električni otpor materijala	2
2.3. Električna svojstva platinskih termometara	4
2.4. Konstrukcija platinskih termometara	4
2.4.1. Etalonski platinski otpornički termometri	5
2.4.2. Kućište	7
2.4.3. Vodiči	7
2.4.4. Električna izolacija	8
2.5. Mjerenje otpora	8
2.5.1. Osnovni principi	8
2.6. Pogreške u otporničkoj termometriji	10
2.6.1. Pogreške uranjanja	11
2.6.2. Pogreške zaostajanja i taloženja	11
2.6.3. Greške zračenja	11
2.6.4. Self-heating (samozagrijavanje)	11
2.6.5. Mehanički šok i vibracije	13
2.6.6. Efekt toplinskog širenja	14
2.6.7. Kontaminacija	15
2.6.8. Efekt propuštanja	16
3. ISPITIVANJE SAMOZAGRIJAVANJA PLATINSKIH OTPORNIČKIH TERMOMETARA	17
3.1. Postupak mjerenja samozagrijavanja	17
3.1.1. Općeniti postupak	17
3.1.2. Primjer određivanja samozagrijavanja	17
3.2. Određivanje samozagrijavanja termometra u različitim plinovima i tekućinama	18
3.2.1. Mjerna linija	19
3.2.2. Skica komore sa cijevnom zavojnicom za stabilizaciju temperature	21
4. ZAKLJUČAK	26
LITERATURA	27

PRILOZI28

POPIS SLIKA

Slika 1.	Otpor nikla, bakra i platine kao funkcije temperature	3
Slika 2.	Tipični SPRT u obliku čahure	6
Slika 3.	SPRT sa dugim tijelom	6
Slika 4.	Wheatstonov most.....	10
Slika 5.	Pregled pogrešaka u platinskoj otporničkoj termometriji	10
Slika 6.	Rezultati mjerenja samozagrijavanja	18
Slika 7.	Skica mjerne linije za određivanje samozagrijavanja	19
Slika 8.	3-D model komore za ispitivanje samozagrijavanja sa cijevnom zavojnicom.....	22
Slika 9.	3-D model komore za ispitivanje samozagrijavanja sa fiksiranim termometrom .	23

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Konstante rasipanja.....	13
Tablica 2.	Korekcijske formule samozagrijavanja.....	12

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
I	A	Struja
U	V	Napon
R	Ω	Otpor
R(t)	Ω	Nepoznati otpor
R _s	Ω	Standardni otpor
V _{out}	V	Izlazni napon
S	K/m	Koeficijent samozagrijavanja
Δt	$^{\circ}\text{C}$	Pogreška u mjerenoj temperaturi
h	mW/ $^{\circ}\text{C}$	Konstanta rasipanja

SAŽETAK

U sklopu ovog rada osmišljena je i projektirana linija za ispitivanje samozagrijavanja termometara u Laboratoriju za procesna mjerenja na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Svrha rada je objasniti pojavu samozagrijavanja termometra te pokazati utjecaj strujanja različitih medija, različitim brzinama na efekt samozagrijavanja. Također su provedena i probna mjerenja kako bi se linija ispitala i, po potrebi, unaprijedila.

Ključne riječi: samozagrijavanje

SUMMARY

The concept of this paper was to create and to design the line for self-heating measurement. The project was carried out under the Laboratory for Process Measurements, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb. The purpose of this study is to obtain information about influence of different fluids and gases, streaming over the SPRT sensor with different velocities, to the self-heating of the SPRT. We also implement the test measurements in order to examine and, if it is necessary, to improve the measure line.

Key words: self-heating

1. UVOD

Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja utjecaja medija, koji okružuje etalonski platinski otpornički termometar (SPRT), na njegovo samozagrijavanje. Fenomen samozagrijavanja uzrokuje jednu od najučestalijih pogrešaka koja se, neizbježno, pojavljuje u svakodnevnoj primjeni otporničkih termometara za temperaturna mjerenja. Za izvođenje mjerenja otpora, električna struja mora prijeći preko osjetnika temperature što onda uzrokuje dodatnu potrošnju topline i posljedično uzrokuje povećanje temperature senzora. Povećanje temperature uglavnom ovisi o primijenjenoj struji i toplinskom otporu između osjetnika termometra i onog što ga okružuje. Kada se SPRT-i koriste za visokoprecizna mjerenja temperature, moramo biti svjesni da medij, koji ga okružuje, i okolni uvjeti predstavljaju razlike između kalibracije u fiksnoj točki od onih u radnoj točki i da oni imaju drugačiji utjecaj na pogrešku samozagrijavanja. Cilj ovog rada je skupiti informacije o utjecaju različitih tekućina i plinova, koji na senzor SPRT-a nasmjere različitim brzinama, na samozagrijavanje termometra. Mjerenja su se provodila sa kvarcnim SPRT-om koji je postavljen unutar komore za ispitivanje samozagrijavanja i nalazi se u različitim okruženjima.

2. PLATINSKI OTPORNIČKI TERMOMETRI

2.1. Općenito

Platinski otpornički termometri jedni su od najpreciznijih uređaja za mjerenje temperature. U različitim izvedbama, koriste se u rasponu od -260 °C do 960 °C i to s preciznošću koja doseže i do približno 1 mK . Dostupan je vrlo širok raspon otporničkih termometara, od etalonskih interpolacijskih termometara definiranih prema internacionalnoj temperaturnoj skali ITS-90, do onih robusnih industrijskih termometara, koji također mogu biti precizni i na nekoliko desetinki stupnja.

Otpornički termometri nisu kao ostali osjetnici temperature po tome što zahtijevaju vanjsku stimulaciju u obliku mjerene struje ili napona što dovodi do različitih pogrešaka otporničko-mjernih instrumenata.

2.2. Otpor materijala

Svi metali su dobri električni vodiči. To je zbog toga što elektroni u metalu nisu vezani u atome, već se mogu neometano kretati kroz metal. U savršenoj metalnoj jezgri, elektroni su potpuno neometani u svom kretanju tako da savršena rešetka ima električni otpor jednak nuli. Naravno, u praksi, otpor metala gotovo nikada nije jednak nuli. Postoje dva osnovna mehanizma koja dovode do raspršenja elektrona i ograničavanja njihovog kretanja, a time i porasta otpora metala. Jedan je mehanizam posljedica temperature, a drugi nečistoća i deformacije rešetke.

2.2.1. Utjecaj temperature na električni otpor materijala

Temperatura bilo kojeg materijala mjera je energije gibanja atoma i elektrona. U kristalnoj rešetci, kretanje atoma je vrlo ograničeno, te oni ne mogu na jednostavan način promijeniti poziciju unutar rešetke. Ipak, atomi mogu titrati oko svojeg položaja. Ova temperaturno-povezana vibracija je glavni uzrok raspršenja elektrona. Kako se povećava temperatura rešetke, povećava se titranje i raspršenje elektrona.

Kada se između dva kraja metalne žice narine napon, elektroni se počinju gibati od negativnog prema pozitivnom kraju, ubrzavajući svo vrijeme te se pritom sudaraju sa titrajućim atomima. Kinetička energija koju elektroni predaju rešetci je ono što mi opažamo

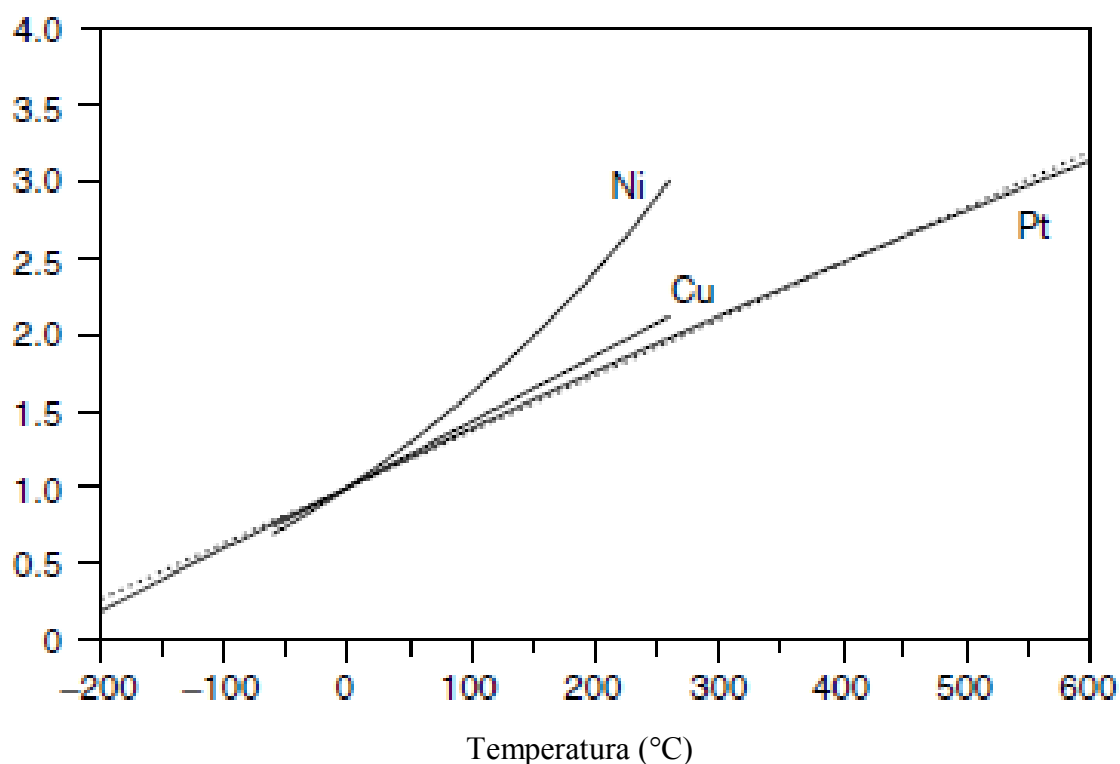
kao električno zagrijavanje. Što je veći napon na krajevima žice, elektroni se brže gibaju prema kraju, a time je i veća struja. Za metale, struja I je proporcionalna naponu U (1):

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1)$$

gdje je R konstanta koja se naziva električni otpor i zavisi o količini raspršivanja elektrona. Kako se povećava temperatura rešetke, titranje i tok elektrona se povećavaju proporcionalno apsolutnoj temperaturi. Veza otpor-temperatura se najčešće prikazuje u odnosu na Celsius-ovu temperaturu, t (2):

$$R(t) = R(0^\circ\text{C})(1 + \alpha t), \quad (2)$$

Gdje je α , temperaturni koeficijent otpora, približno jednak $1/273,15 \text{ K} = 3.66 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.



Slika 1. Otpor nikla, bakra i platine kao funkcije temperature. Iscrtkana linija predstavlja otpor prema jednađbi (2)

2.3. Električna svojstva platinskih termometara

Iako se svi metali, uglavnom, ponašaju prema osnovnom modelu (2), samo je nekoliko metala pogodno za izradu otporničkih termometara. Dobar termometar mora biti u mogućnosti podnijeti visoke temperature, mora biti kemijski inertan i mora se moći lako održati u čistom obliku. Jedan od takvih metala je i platina.

U ranim danima platinske termometrije, otkriveno je da se otpor platine može dobro opisati jednostavnom kvadratnom jednadžbom (3):

$$R(t) = R(0^\circ\text{C})(1 + At + Bt^2), \quad (3)$$

koja je, nakon određenog vremena, preoblikovana u (4):

$$R(t) = R(0^\circ\text{C}) \left[1 + \alpha t + \alpha \delta \left(\frac{t}{100} \right) \left(1 - \frac{1}{100} \right) \right], \quad (4)$$

što je pojednostavilo određivanje kalibracijskih konstanti α i δ . Navedene konstante su se prije određivale pomoću fiksne točke, a upotrebom izraza (4) mogu se odrediti i pomoću vrelišta vode (100°C) i sumpora (440°C). Ova jednadžba eksplicitno određuje i *alpha vrijednost* termometra:

$$\alpha = \frac{R(100^\circ\text{C}) - R(0^\circ\text{C})}{100R(0^\circ\text{C})}, \quad (5)$$

I danas se, ovaj način određivanja vrijednosti α koristi kao mjera čistoće platine i za kategorizaciju platinskih termometara.

2.4. Konstrukcija platinskih termometara

Glavni cilj kod izrade otporničkih termometara je osigurati da metal reagira na temperaturu bez da na njega utječu ostali vanjski faktori uključujući korozivne kemikalije, vibracije, naprezanja, tlak i vlagu.

Za platinsku termometriju, najveća briga je nestabilnost uzrokovana udarcima i naprezanjima zbog toplinskog širenja.

U svojoj osnovnoj formi, otpornički termometar je namot žica labavo postavljen na izolacijsku potporu. Ipak, ovako montiran termometar je osjetljiv na udarce. Blagi udarci i vibracije uzrokuju savijanje dijelova žice koji nisu potpomognuti izolacijom. To dovodi do povećanja otpora. Logično rješenje ovog problema je da se žica u potpunosti osigura (potpomogne) tako da se montira na kruto tijelo koje onemogućava savijanje. No sada, nailazimo na drugi problem. Kada se termometar zagrije, žica i kruto tijelo se različito šire, što uzrokuje razvlačenje ili stlačivanje žice. Ako je naprezanje malo, javit će se privremena i elastična deformacija žice. U slučaju prevelikog naprezanja, javit će se plastična deformacija, a svaka promjena dimenzija bit će trajna. Ovaj proces također očvršćuje žicu i uzrokuje daljnje povećanje otpora.

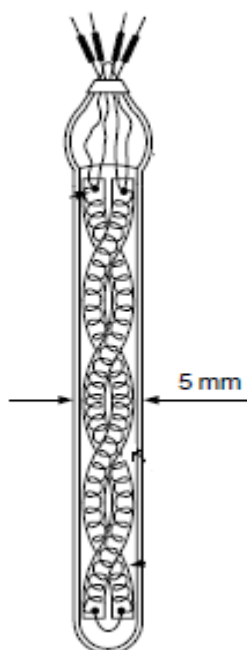
Zbog gore navedenog, platinski otpornički termometri dolaze u nekoliko oblika čime se postiže kompromis između mehaničke izdržljivosti i preciznosti.

2.4.1. Etalonski platinski otpornički termometri

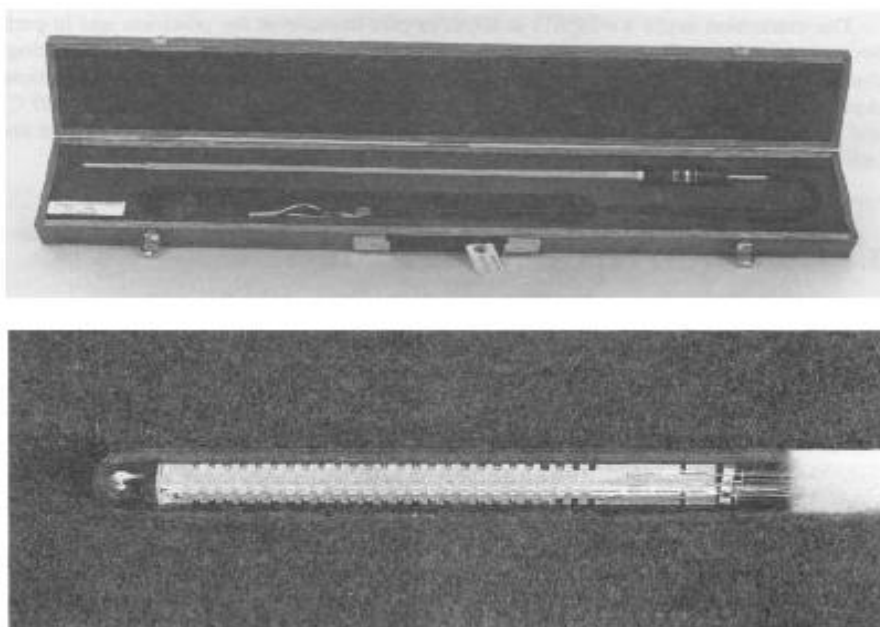
Postoje 3 različita tipa etalonskih platinskih otporničkih termometara (SPRT-a) koji se koriste za ITS-90:

- SPRT-i u obliku čahura pokrivaju raspon temperatura od 13.8 K do 157 °C. Oni su mali, obično dugi 50 mm do 60 mm i promjera 5 mm, sa 30 mm do 50 mm dugim platinskim žicama spojenima staklenom brtvom na jednom kraju [Slika 2]; platinski senzor ima minimalnu mehaničku potporu i na trojnoj točki vodi ima otpor od 25.5 Ω . Većina ovih termometara ispunjena je helijem pod tlakom od 30 kPa (na sobnoj temperaturi) kako bi se poboljšao toplinski kontakt i vrijeme odziva senzora.
- SPRT-i sa dugim tijelom pokrivaju raspon od 84 K do 660 °C; radi se o 450 mm dugim staklenim ili kvarcnim cijevima promjera približno 8 mm sa platinskim senzorom postavljenom na kvarcnu potporu [Slika 3]. I oni također imaju nominalni otpor od 25.5 Ω . Povezivanje platinskih vodiča unutar tijela termometra sa fleksibilnim vodičkim žicama, koje se spajaju na termometrijski otpornički most, ostvaruje se u dršci montiranoj na kraju cijevi. Čistoća pojedinih komponenata kritična je za ove termometre zbog čega je kućište, obično, ispunjeno inertnim plinom i kisikom pri parcijalnom tlaku od 2 kPa. Sastav plina odabran je kako bi kontrolirao

oksidaciju platinske žice i spriječio okside nečistoća da prodiru u metal, što može uzrokovati kontaminaciju platine.



Slika 2. Tipični SPRT u obliku čahure (25Ω). Platinski omotač je promjera 5 mm i duljine 50 mm



Slika 3. SPRT sa dugim tijelom konstruiran prema zahtjevima ITS-90

- Visokotemperaturni SPRT-i su SPRT-i sa dugim tijelom napravljeni za primjenu na višim temperaturama sa uobičajenim rasponom od 0.01 °C do 962 °C. U ovim termometrima, sve izolacijske komponente izložene visokim temperaturama, izrađene su od kvarca. Nominalni otpor iznosi 0.25 Ω , što je mnogo manje od niskotemperaturnih SPRT-a sa dugim tijelom, kako bi se spriječio utjecaj efekta izolacijskog propuštanja.

Etalonski termometri su iznimno osjetljivi instrumenti. Udarci vibracije ili bilo kakvo ubrzavanje koje uzrokuje savijanje žice, dovest će do njezinog naprezanja, te će promijeniti njezin otpor. Poznato je da jači udarci uzrokuju pogreške reda 10 mK, dok duža izloženost vibraciji može dovesti do pogrešaka veličine 100 mK.

2.4.2. *Kućište*

Odabir kućišta za platinske otporničke elemente ključan je faktor pri određivanju temperaturnog raspona termometra. Dvije su vrste materijala za izradu kućišta: metalni, kao što je nehrđajući čelik; i nemetalni, kao što je staklo ili kvarc.

Metalna kućišta su manje krhka i jednostavnija za izradu, ali će vrlo vjerojatno uzrokovati kontaminaciju. Za učestalu upotrebu ograničeni su na temperature ispod 450 °C, a najpoželjnije ispod 250 °C. Na višim temperaturama atomi metala u kućištu postaju pokretni i mogu kontaminirati platinsku žicu. Za primjenu iznad 250 °C, prije montaže, nehrđajući čelik mora biti toplinski obrađen u zraku ili kisiku, kako bi izgradio nepropustan sloj oksida na unutarnjoj strani kućišta. Stakleni elementi pogodniji su za primjenu na temperaturama iznad 250 °C.

Na temperaturama iznad 450 °C, svi platinski elementi postaju sve više podložni kontaminaciji i bilo koja metalna komponenta kućišta mora biti odgovarajuće očišćena. Na najvišim temperaturama, samo je kvarc pogodan za izradu kućišta.

2.4.3. *Vodiči*

Vodiči, koji provode struju od i do termometra, također predstavljaju otencijalni izvor nečistoća. Za najviše temperature, platina je jedini odgovarajući vodič. Na nižim temperaturama (do 250 °C) koriste se staklom izolirane bakrene ili srebrne žice. Staklo

sprječava oksidaciju žice. Za visokotemperaturne sklopove najčešće se koriste žice iz legura nikla ili platinom obložene niklovane žice.

2.4.4. Električna izolacija

Električna izolacija žica vodiča je također presudna komponenta kod sklapanja termometra. Za najveću preciznost i stabilnost, kod visokotemperaturnih SPRT-a, koriste se kvarcni odstojnici i oslonci.

2.5. Mjerenje otpora

Kako bi iskoristili sve mogućnosti otporničkih termometara moramo biti sposobni mjeriti otpor. Za postizanje preciznosti od ± 1 °C, u mjerenju temperature, mjereni otpor mora biti bolji i od 0.4Ω . Čak i naočigled uobičajena mjerenja temperature zahtjevaju neuobičajena mjerenja otpora.

2.5.1. Osnovni principi

Ohm-ov zakon kaže da se otpor može jednostavno izmjeriti mjerenjem napona i struje kroz otpornik (1). Ipak, električna struja se ne može lako izmjeriti osim u odnosu na napon i drugu poznanicu, otpor. U praksi, otpor se mjeri uspoređujući ga sa drugim otporom kako bi se eliminirala potreba za direktnim poznavanjem ili mjerenjem struje. U pogledu toga, postoje dvije osnovne metode koje se koriste.

A. POTENCIOMETRIJSKA METODA

Pojam potencimetrijski proizlazi iz povijesne upotrebe potencimetra za mjerenje otpora, prije nego su izumljeni digitalni voltmetri. Mjerenje otpora ovom metodom zahtjeva standardni otpornik i dva dobro izmjerena napona. Struja se propušta i kroz standardni R_s i kroz nepoznati otpornik $R(t)$. Kako je struja kroz oba otpornika jednaka, dva mjerena napona su u omjeru otpora:

$$R(t) = \frac{V_t}{V_s} R_s \quad (6)$$

Bitna značajka ovakvog kruga je da moramo poznavati vrijednost jednog otpornika i precizno mjeriti jedan omjer napona. Ova tehnika koristi se u skoro svim digitalnim multimetrima i otporničkim mostovima.

B. METODA MOSTA

Druga metoda mjerenja otpora zasniva se na Wheatston-ovom mostu [Slika 4]. Nul-detektor uspoređuje izlazne napone dvaju dijelila napona od kojih jedan uključuje otpornički termometar. Izlazni napon mosta tada glasi:

$$V_{out} = V_1 - V_2 = \frac{R_2 R(t) - R_3 R_1}{(R_2 + R_3)(R_1 + R(t))} V_{in} \quad (7)$$

Postoje dva načina rada. U uravnoteženom načinu rada, jedan od otpornika se prilagođava sve dok izlazni napon ne bude jednak nuli i onda se nepoznati otpor određuje prema:

$$R(t) = \frac{R_3}{R_2} R_1 \quad (8)$$

Sada se otpor termometra može odrediti u odnosu na 3 dobro definirana otpora. Kada se zadovolji jednadžba (8), tj. kada su naponi dviju grana mosta jednaki, tada kažemo da je most u ravnoteži. Prednost ove tehnike je ta što voltmetar jedino mora detektirati nulu što uvelike olakšava njegovu potrebnu preciznost. Ipak, zahtjevi postavljeni na preciznost promijenjivih otpornika su vrlo visoki što čini ovu tehniku skupom.

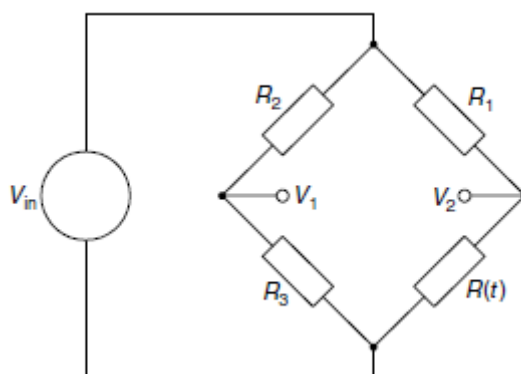
U drugom načinu rada Wheatston-ovog mosta, promijenjivi otpornici su prilagođeni tako da je most uravnotežen na jednoj temperaturi, recimo t_0 ; nju možemo izračunati iz jednadžbe (8) $R(t_0) = R_3 R_1 / R_2$. Tada izlazni napon postaje mjera temperature:

$$V_{out} = \frac{R(t) - R(t_0)}{(R_1 + R(t))(R_1 + R(t_0))} R_1 V_{in} \quad (9)$$

Sada, ako je R_1 dovoljno velik u odnosu na $R(t)$, izlazni napon je približno jednak:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{R_1} R(t_0) \alpha t. \quad (10)$$

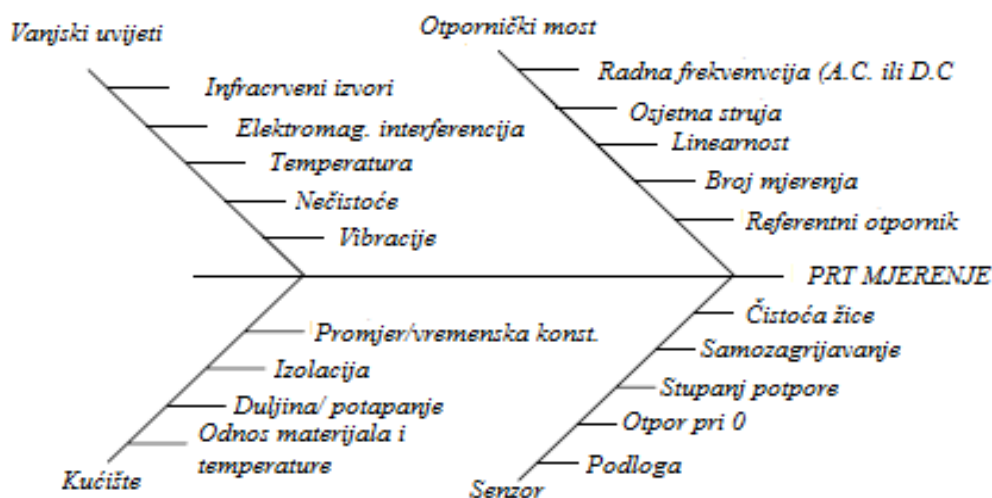
Jednadžba (10) definira izlazni napon koji je približno proporcionalan temperaturi. Izlazni signal je blago nelinearan u odnosu na temperaturu ali ipak dovoljan za temperaturni kontrolni sustav koji pokušava povratiti most u ravnotežno stanje gdje je $R(t) = R(t_0)$, tj. $t = t_0$. Većina najpreciznijih regulatora temperature radi na ovom principu.



Slika 4. Wheatstonov most uklanja potrebu za precizno mjerenje napona

2.6. Pogreške u otporničkoj termometriji

Pogreške u otporničkoj termometriji se mogu razvrstati u 4 glavne grupe [Slika 5]:



Slika 5. Pregled pogrešaka u platinskoj otporničkoj termometriji

2.6.1. Pogreške uranjanja

Zato što su termometri vrlo rijetko posve uronjeni u ispitivani medij, problem uranjanja se javlja u gotovo svim mjerenjima temperature. Drška termometra, plašt i vodiči osiguravaju konstantan protok topline između medija mjerenja i okoline. Kako toplina može protjecati samo tamo gdje postoji razlika u temperaturi, tijek topline dokaz je da je vrh temperature neznatno drugačijoj temperaturi od ispitivanog medija.

Osnovni problem kod PRT-a je relativno veliki osjetnik tako da je potrebno dodatno uranjanje. Osim toga, PRT-ovi su preglomazni za mjerenje površinskih temperatura.

2.6.2. Pogreške zaostajanja i taloženja

U sustavima gdje postoje mehanizmi za kontrolu temperature ili su sustavi jednostavno jako veliki, pogreške uslijed toplinskog kapaciteta su zanemarive. Ipak, sustavu će trebati određeno vrijeme da zamijeni gubitke topline uslijed zagrijavanja termometra i da se termometar ustali na temperaturu sustava. Ako nije omogućeno dovoljno vremena za oba ova procesa, pojavit će se pogreška pri očitavanju termometra.

2.6.3. Greške zračenja

Radijacija je vrlo podmukao izvor grešaka u termometriji. Radijacijske greške specifičan su problem za zračnu i površinsku termometriju gdje ne postoji ništa što bi zasjenilo ili štitilo izvor i gdje je termalni kontakt sa ispitivanim objektom ionako slab.

2.6.4. Self-heating (samozagrijavanje)

Propuštanjem struje kroz osjetnik radi mjerenja otpora, osjetnik rasipa toplinu što s druge strane, uzrokuje porast temperature osjetnika. Ova tzv. pogreška samozagrijavanja se može vrlo jednostavno prikazati omjerom utrošene snage i konstante rasipanja, h . Tada je pogreška u mjerenju temperature jednaka (10):

$$\Delta T = \frac{R(t)I^2}{h}, \quad (11)$$

gdje je $R(t)$ otpor osjetnika, a I struja. Konstanta rasipanja h je najčešće izražena u milivatima po stupnju Celzijusa. Ona također može biti prikazana u odnosu na koeficijent samozagrijavanja $s = I/h$. Stoga dobivamo

$$\Delta T = sR(t)I^2. \quad (12)$$

Koeficijent samozagrijavanja obično je izražen u kelvinima po milivatu. Raspon najčešćih vrijednosti veličine h je velik, varirajući od $1 \text{ mW}^\circ\text{C}^{-1}$ za vrlo male predmeti u mirujućem zraku do $1000 \text{ mW}^\circ\text{C}^{-1}$ za velike žicom omotane elemente u gibajućoj vodi. Tablica 1. daje tipične vrijednosti konstante rasipanja, koeficijenta samozagrijavanja i pogreške samozagrijavanja za različite osjetnike u zraku i vodi.

Tablica 1. Najčešći rasponi konstanti rasipanja za nezaštićene platinske otporničke elemente. Pogreška je proračunata za 100Ω i struju od 1 mA

Stanje	Konstanta rasipanja (mWK^{-1})	Koeficijent samozagrijavanja (KmW^{-1})	Pogreška (mK)
Mirujući zrak	1 do 10	0.1 do 1	10 do 100
Mirujuća voda	2 do 400	0.0025 do 0.5	0.25 do 50
Gibajuća voda	10 do 1000	0.001 do 0.1	0.1 do 10

Zato što se pogreška samozagrijavanja povećava sa kvadratom struje, struja je vjerojatno najznačajniji faktor self-heatinga (samozagrijavanja). Na primjer, u Tablici 1. su dane pogreške za struju od 1 mA i za standardne primjene pogreške su poprilično razumne. Ipak, za većinu osjetnika PRT-a, struja može biti i do 10 mA , što znači da bi pogreška bila 100 puta veća zbog čega takva pogreška postaje problem u skoro svakoj situaciji. Kao nekakvo pravilo, većina PRT-a radi na manje od 1 mW rasipne snage; za osjetnik od 100Ω tipične vrijednosti struje kreću se između 0.1 mA i 2.5 mA .

Jedan od problema sa pogreškama samozagrijavanja je taj što su usko povezane sa neposrednom okolinom termometra. Zaštićenost elemenata može povećati pogrešku do 5 puta, a primjena u zraku čak i do 100 puta. Očigledno nije moguće značajno poboljšati

točnost mjerenja primjermom korekcije temeljene na proizvođačevoj procjeni konstante rasipanja. Ispravci samozagrijavanja mogu se postići promijenom osjetne struje i provođenjem dodatnog mjerenja. Tada se rezultati oba mjerenja mogu primijeniti u jednadžbi (11) kako bi se izračunala nulta struja. Tako će, za par očitavanja T_1 i T_2 dobivenih iz struja I_1 i I_2 , nulta struja biti:

$$T_0 = T_1 - \frac{I_1^2}{I_1^2 - I_2^2} (T_1 - T_2). \quad (13)$$

Korekcijske formule za zajedničke omjere struja I_1 i I_2 dane su u Tablici 2.

Tablica 2. Korekcijske formule samozagrijavanja za zajedničke omjere osjetnih struja

I_2	T_0
$\sqrt{2}I_1$	$2T_1 - T_2$
$\frac{I_1}{\sqrt{2}}$	$2T_2 - T_1$
$2I_1$	$T_1 - (T_2 - T_1)/3$
$\frac{I_1}{2}$	$T_2 - (T_1 - T_2)/3$

Kod ispravaka pogrešaka, pretpostavljeno je da se temperatura T_0 ne mijenja. To je slučaj kada se PRT koristi u fiksnoj točki. Za većinu standardnih PRT-a (SPRT), utjecaj samozagrijavanja, za primijenjenu struju od 1 mA, iznosi između 0.3 mK i 3 mK, ovisno o položaju u fiksnoj točki.

2.6.5. Mehanički šok i vibracije

Vibracije i mehanički šok su glavni doprinositelji dugoročnoj izdržljivosti PRT-a. Rapidno ubrzavanje termometara uzrokovat će savijanje neosigurane žice o podlogu ili oslonac. Savijanje, zauzvrat, uzrokuje povećanje otpora termometra.

U industriji, gdje vladaju velike vibracije, trebaju se koristiti potpuno osigurani tj. potpomognuti, PRT-i i, ako je moguće, izvor vibracija bi trebao biti prigušen i izoliran. U

ekstremnim slučajevima, dugotrajno izlaganje uzrokuje slabljenje termometra, često zbog prekida veze između vodiča i osjetnika.

2.6.6. Efekt toplinskog širenja

Kod industrijskih PRT-a, deformacija žice zbog različitih toplinski potaknutih mehaničkih efekata jedan je od najvećih izvora nesigurnosti. Postoje dva glavna efekta, oba uzrokovana širenjem platinske žice i podloge: prvi, elastična deformacija koja uzrokuje povećanje histereze i drugi, plastična deformacija koja uzrokuje povećanje klizanja.

Svi materijali mijenjaju svoje dimenzije s temperaturom. Za platinske žice, ova promjena je otprilike 9 ppm (*parts per million*) za svaku promjenu temperature od jednog stupnja Celzija. Slično, svi materijali koji se koriste kao podloge za PRT-e šire se ili skupljaju s temperaturom. Idealni slučaj bi bio kada bi se podloga skupljala i širila istim tempom kao i platina. To bi osiguravalo nepostojanje naprezanja u žici. Dvije podloge, staklo i aluminij-oksidi (Al_2O_3), najbliže zadovoljavaju idealni slučaj.

Staklo načinjeno za potporu platinskim termometrima uobičajeno ima koeficijent rastezanja unutar $1 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$, što je u većini slučajeva dobra podudarnost sa platinom. Jedan od problema kod stakla je taj što koeficijent rastezanja raste sa faktorom 3 ili više iznad temperature omekšavanja stakla (temperatura omekšavanja je najčešće $400 \text{ }^\circ\text{C}$ do $500 \text{ }^\circ\text{C}$, ali za neka stakla i $250 \text{ }^\circ\text{C}$).

Podloga od aluminij-oksida također ima koeficijent širenja otprilike $8 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ do $10 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$. Keramika nije jedinstvena krutina već je to materija sastavljena od vi malih kristala. Kristali aluminija imaju nekoliko oblika, od kojih svaki ima različit koeficijent širenja. Za individualne kristale aluminija, koeficijent varira između otprilike $+13 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ i $-15 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$, što se poprilično razlikuje od onog kod platine. U globalu, što je finiji sirovi aluminij za izradu keramike, to je ujednačeniji koeficijent širenja i niža poroznost keramike. Iako je aluminij, u pogledu električne otpornosti i čistoće, bolji od stakla, porozniji je i može imati neujednačen i pomalo nepredvidljiv koeficijent širenja.

Elastična deformacija i histereza

Za oba tipa podloge javit će se diferencijalno toplinsko širenje, obično $1 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ ili manje, za bolje podloge. Kako se žica napreže, produljuje se. Dimenzijske promjene nisu

trajne deformacije jer je žica elastična za mala naprezanja i čim naprezanje nestane, žica se vraća u svoj prvobitni oblik. Kako se žica napreže dolazi do deformacije rešetke, a diferencijalni koeficijent širenja od $1 \text{ ppm}^{\circ\text{C}^{-1}}$ uzrokuje povećanje ili smanjenje temperaturnog koeficijenta platine za $5 \text{ ppm}^{\circ\text{C}^{-1}}$. Pošto je temperaturni koeficijent platine otprilike $4000 \text{ ppm}^{\circ\text{C}^{-1}}$, greška koja se javlja je uglavnom $\pm 0.1 \%$ unutar temperaturne promjene.

U većini elemenata, podloga neće biti u mogućnosti zadržati naprezanje na žici. To omogućuje žici da se opusti i sklizne niz podlogu. Termometar koji je izložen naprezanju pri zagrijavanju prvo će oslabiti i pretrpjeti kompresiju prije nego li se vrati na nižu temperaturu. To uzrokuje porast histereze. Uobičajena histereza, kod potpuno poduprtih PRT-a, varira između $\pm 0.02 \%$ i $\pm 0.05 \%$.

Plastična deformacija i klizanje

Metali, uključujući i platinu, ne mogu biti beskonačno rastegnuti. Jednom kada naprezanje prijeđe otprilike 0.1% granice popuštanja metala, kažemo da se javila plastična deformacija. Površno gledajući, to ne bi bio problem. Međutim, platinska žica nije ujednačeno poduprta cijelom dužinom. Zbog toga mala lokalizirana područja platinske žice žarišta su visokih naprezanja i stalno podliježu plastičnoj deformaciji.

Plastična deformacija ima dva štetna efekta. Prvo, trajno mijenja dimenzije žice. Drugo, deformacija unosi nedostatke u žicu zbog čega dolazi do deformacije i lomljenja kristalne strukture. Oba efekta povećavaju otpor točke leđišta žice i karakteristični su za određivanje temperaturnog koeficijenta.

2.6.7. Kontaminacija

Na temperaturama iznad $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, platinski termometri postupno postaju podložni zagađenju. Efekt zagađenja (kontaminacije) uzrokuje povećanje nečistoća unutar metala i stoga povećavaju otpor. Ako je udio nečistoća prevelik, odstupanja od tabličnih podataka otpora mogu biti i do nekoliko puta, što bi dovelo do uništenja termometra. Šteta se ne može popraviti pošto se, za razliku od kristalnih nepravilnosti, nečistoće ne mogu odstraniti kaljenjem.

Najvjerojatnije, najčešći uzrok onečišćenja je migracija željeza, mangana i kroma iz nehrđajućeg čelika. Migracija nečistoća može se smanjiti toplinskom obradom ovojnice, u zraku ili kisiku, prije samog sklapanja termometra.

2.6.8. Efekt propuštanja

Točna mjerenja otpora zahtjevaju da sva mjerena struja prođe preko osjetnika PRT-a. To je relativno jednostavno provesti pri niskim temperaturama gdje izolatori imaju vrlo veliki otpor. Međutim, na visokim se temperaturama čak i najbolji izolatori slome i uzorkuju kratki spoj oko osjetnika. Vlaga je drugi glavni uzrok efekta propuštanja, posebno na niskim temperaturama gdje nema dovoljno topline za odvođenje vode iz sklopa.

3. ISPITIVANJE SAMOZAGRIJAVANJA PLATINSKIH OTPORNIČKIH TERMOMETARA

3.1. Postupak mjerenja samozagrijavanja

3.1.1. Općeniti postupak

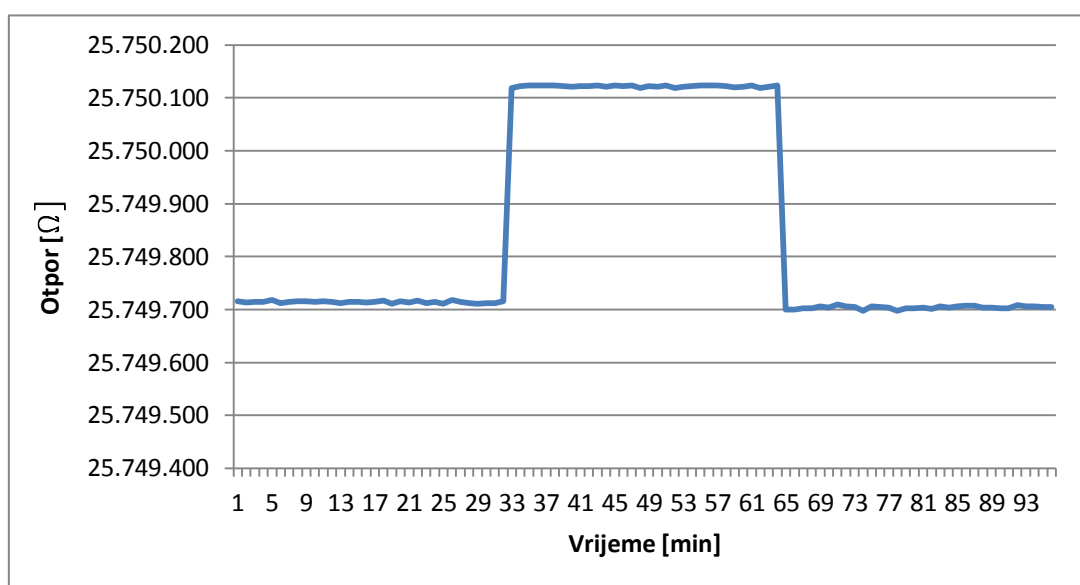
Samozagrijavanje platinskih otporničkih termometara, u praksi se određuje propuštanjem više različitih struja kroz termometar (obično dvije), pri čemu se termometar nalazi u zoni konstante temperature. Otpor termometra čitavo se vrijeme prati pomoću termometrijskog otporničkog mosta te je moguće dovesti otpore termometra u vezu sa različitim strujama. Propuštanjem veće struje kroz termometar, povećat će se temperatura termometra, a time i njegov otpor. Kada izmjerimo otpor termometra pri dvije različite struje, rezultate možemo prikazati u obliku pravca na dijagramu I-R. Ekstrapolacijom dobivenog pravca moguće je pronaći otpor termometra pri struji $I=0$. Na opisan način možemo sa relativno velikom sigurnošću pretpostaviti koju bi temperaturu mjerio termometar kada kroz njega ne bi protjecala struja. Za još točnije određivanje temperature termometra, pri $I=0$, možemo koristiti više od dvije različite struje, pri čemu metodom najmanjih kvadrata dobivamo krivulju drugog ili višeg reda. Dobivena promjena otpora termometra prevodi se u temperaturu pomoću koeficijenta dobivenih umjeravanjem termometra ili pomoću poznatog koeficijenta osjetljivosti predmetnog termometra na ispitnoj temperaturi $C [^{\circ}\text{C}/\Omega]$.

3.1.2. Primjer određivanja samozagrijavanja

U ovom će poglavlju, u nekoliko točaka, biti opisan slijed postupaka prilikom mjerenja samozagrijavanja platinskog otporničkog termometra:

1. Termometar smo spojili na termometrijski otpornički most
2. Pomoću mosta smo podesili početnu struju mjerenja od 1 mA (mjerili smo na dvije različite struje); podešavanje struja na mostu moguće je vršiti ručno ili automatski, pomoću računala
3. Potrebno je odrediti ili procijeniti vrijeme potrebno za stabilizaciju termometra
4. Na struji od 1 mA odradili smo 32 mjerenja sa intervalom od 5 sec
5. Nakon 32 mjerenja promijenili smo struju na $\sqrt{2}$ mA te smo pustili opet određeno vrijeme dok se termometar ne stabilizira

6. Ponavili smo 32 mjerenja na drugoj struji
7. Vratili smo struju ponovno na početnu vrijednost od 1 mA i ponovili 32 mjerenja (ovaj korak napravljen je kao dodatna provjera stabilnosti termometra na struji od 1 mA)
8. Pri završetku mjerenja, iz dobivenih vrijednosti otpora dobili smo odgovarajući grafikon



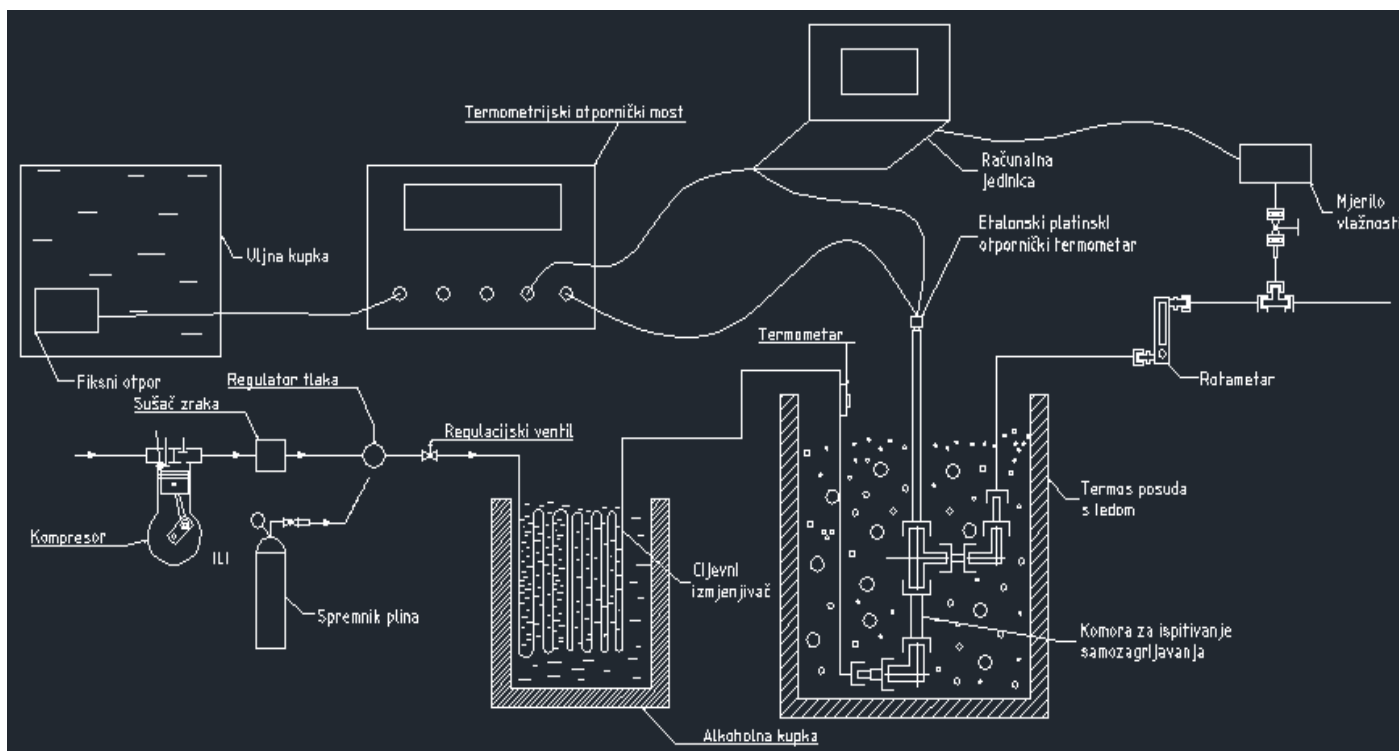
Slika 6. Slika prikazuje rezultate mjerenja samozagrijavanja etalonskog platinskog otporničkog termometra u struji zraka pri protoku 0LPM

9. Odabrali smo srednju vrijednost rezultata pri dvije različite struje te odredili samozagrijavanje

3.2. Određivanje samozagrijavanja termometra u različitim plinovima i tekućinama

Dosadašnja istraživanja pokazuju da samozagrijavanje ovisi o mediju u kojem termometar mjeri temperaturu te o brzini strujanja tog medija. Kako bi se odredio konkretan iznos samozagrijavanja u različitim medijima pri različitim brzinama strujanja, potrebno je projektirati odgovarajuću mjernu liniju.

3.2.1. Mjerna linija



Slika 7. Skica mjerne linije za određivanje samozagrijavanja etalonskog platinskog otporničkog termometra

Mjerna linija za ispitivanje samozagrijavanja, osmišljena je tako da se radni medij, koji će prestrujavati preko senzora termometra, prije ulaska u termos posudu s ledom kondicionira na temperaturu približno jednaku temperaturi leda. Za dobavu zraka, kao radnog medija, koristi se kompresor, dok se za dobavu različitih plinova (dušik, argon...) koristi spremnik plina. Oba su spojena na regulator tlaka koji se preko regulacijskog ventila spaja na cijevni izmjenjivač uronjen u alkoholnu kupku. Alkoholna kupka koristi se kako bi radni medij prethladili prije samog ulaska u led. Termometar postavljen prije same termos posude omogućuje praćenje temperature medija. Nakon što se prethladio, radni medij u cijevi ulazi u termos posudu s ledom (zonu kontrolirane temperature), u kojoj se nalazi cijevna zavojnica za stabilizaciju temperature [Slika 8], te prolazeći kroz komoru za ispitivanje nastrojava na senzor etalonskog termometra. Prilikom izlaska iz komore, cijev je dalje spojena na rotametar, uređaj kojim se prati protok. Iza rotametra nalazi se i mjerilo vlažnosti koje je, preko T-komada i ventila, spojeno s rotametrom kako bi se donekle mogao kontrolirati protok koji prolazi kroz njega, a ostatak medija ga zaobilazi.

Fiksni otpor koji se nalazi u uljnoj kupki četverožilno je, kao i etalonski platinski otpornički termometar, spojen na termometrijski otpornički most. Sam etalonski termometar, termometrijski otpornički most i mjerilo vlažnosti spojeni su na računalnu jedinicu što nam omogućuje postavljanje parametara te praćenje i bilježenje dobivenih rezultata mjerenja.

Modeli i karakteristike nekih, od gore navedenih, komponenata:

Etalonski platinski otpornički termometar

Proizvođač: Isotech

Model: 670

Opis: etalonski platinski otpornički termometar sa kvarcnim oklopom

Radno područje: -200 °C do 670 °C

Minimalna točnost: 1 mK

Način spajanja: četverožilno

Termometrijski otpornički most

Proizvođač: Automatic System Laboratories (ASL)

Model: F18

Radno područje: omjeri otpora od 0 do 1.3999999

Deklarirana točnost: 0.1 ppm

Etalonski fiksni otpor

Proizvođač: Tinsley

Model: 5685A

Nominalni otpor: 100 Ω

Godišnje klizanje: ± 2 ppm

Način spajanja: četverožilno

Kupka za fiksni otpor (uljna kupka)

Proizvođač: Kambić Laboratorijska oprema d.o.o.

Model: OB-50

Radno područje: + 15 °C do + 90 °C

Kupka za prethlađenje plina (alkoholna kupka)

Proizvođač: Kambić Laboratorijska oprema d.o.o.

Model: OB-50 LT

Radno područje: - 30 °C do + 60 °C

Mjerilo vlažnosti zraka

Proizvođač: General Eastern

Model: M2/D2

Radno područje: injište/rosište – 35 °C do + 80 °C

Termometar na ulazu u posudu

Proizvođač: WIKA

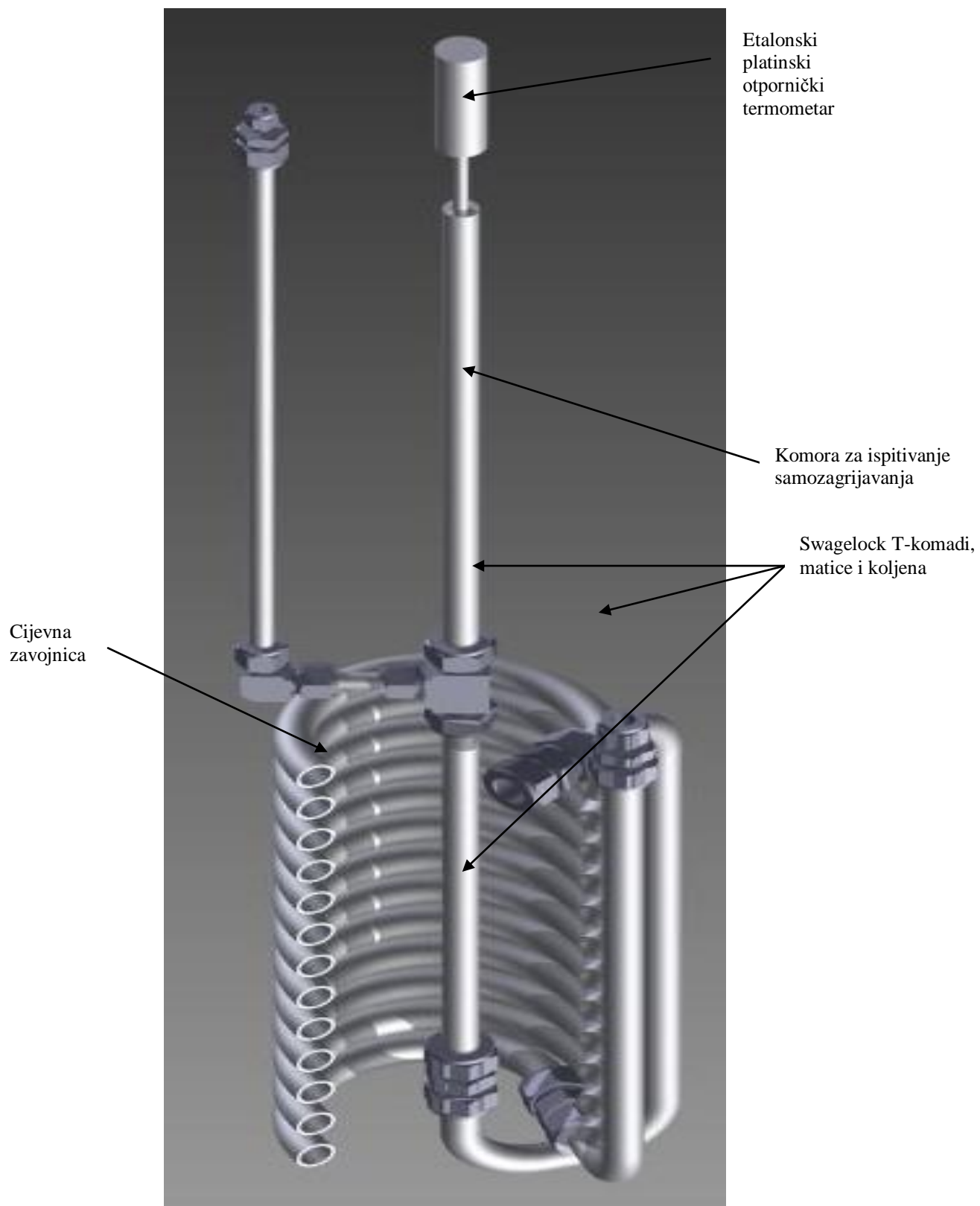
Model: tr 40

Radno područje: 50 °C do + 500 °C

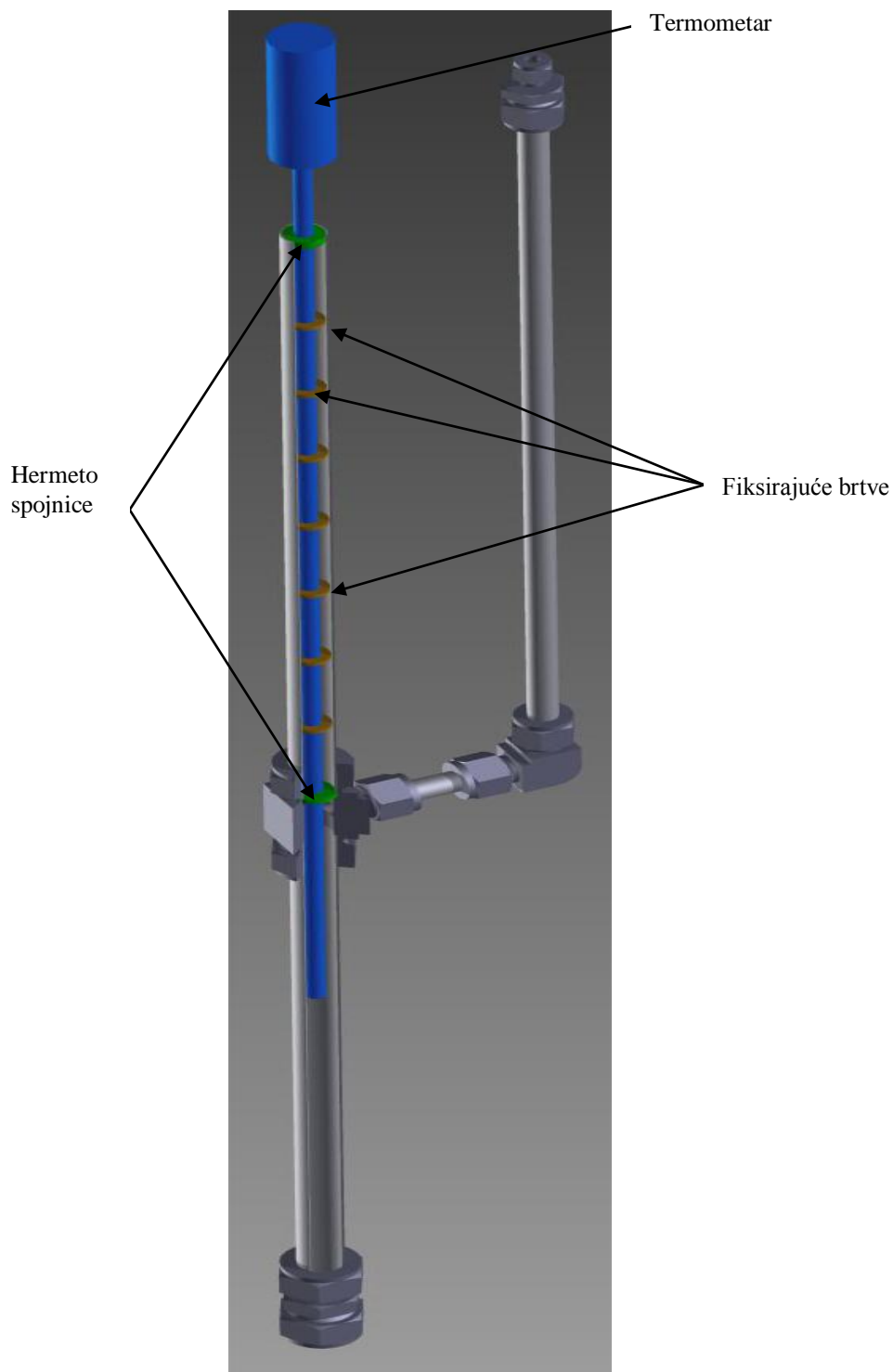
Točnost: klasa A

3.2.2. *Skica komore sa cijevnom zavojnicom za stabilizaciju temperature*

Nakon predstabilizacije temperature radnog medija u alkoholnoj kupki, medij kroz cijev unutarnjeg promjera \varnothing 16 mm ulazi u cijevnu zavojnicu za konačnu stabilizaciju temperature. Već se pri samom ulasku medija u zavojnicu pokušava postići temperatura strujanja od otprilike 0 °C (što pokazuje termometar na ulazu u termos posudu). Dodatnim prolaskom kroz cijevni izmjenjivač uronjen u led, temperatura medija će se potpuno stabilizirati tako da u trenutku nastrujavanja na senzor etalonskog termometra bude jednolika.



Slika 8. 3-D model komore za ispitivanje samozagrijavanja sa cijevnom zavojnicom



Slika 9. 3-D model komore za ispitivanje samozagrijavanja sa fiksim etalonskim platinskim otporničkim termometrom

Slika 9 prikazuje presjek 3-D crteža komore za ispitivanje samozagrijavanja sa fiksim termometrom. Fiksirajuće brtve, centriraju termometar i osiguravaju određeni razmak između vanjske površine termometra i unutarnje površine komore što sprječava

oštećenje kvarcnog oklopa termometra. Hermeto spojnice sprječavaju protok radnog medija u neželjenom smjeru. One također, u sklopu T-komada, osiguravaju usmjeravanje medija na izlaz iz komore i sprječava njegovo prodiranje prema gore. Gornja hermeto spojnica, na samom kraju komore, postavljena je kako bi spriječila prodiranje vanjskog zraka u komoru.

Treba napomenuti da je rješenje prikazano na slici izvedeno iz podataka dobivenih mjerenjima na više različitih izvedbi izmjenjivača topline za stabilizaciju temperature zraka prije ulaska u komoru za ispitivanje. U prethodnim rješenjima, za stabilizaciju zraka, koristile su se pneumatske cijevi izrađene iz poliuretana te pločasti izmjenjivač topline. Iako poliuretan ima vrlo malu toplinsku vodljivost, za ovo smo se rješenje odlučili zbog savitljivosti takvih cijevi, što ih čini pogodnima za upotrebu u raznim zonama kontrolirane temperature. Slabu toplinsku vodljivost cijevi kompenzirali smo većom duljinom. Nakon sastavljanja linije sa poliuretanskom cijevi proveli smo niz mjerenja samozagrijavanja termometra pri različitim protocima zraka u različitim zonama kontrolirane temperature ali iz dobivenih rezultata nismo mogli izračunati samozagrijavanje jer niti jedno isprobano rješenje nije osiguralo potrebnu stabilnost temperature zraka pri protocima većim od 0 L/min. Mjerenja samozagrijavanja traju otprilike 45 minuta i u tom bi se periodu morala osigurati temperaturna stabilnost od najviše 1 mK (peak to peak). Ovako visoka stabilnost potrebna je zbog toga što je samozagrijavanje promatranog termometra na nivou 2.5 mK.

Kako bi postigli potrebnu temperaturnu stabilnost zraka, kao zone kontrolirane temperature upotrijebili smo vodenu kupku, alkoholnu kupku, izoliranu posudu s ledom i termos posudu s ledom. Osim temperature 0 °C, ispitivanje smo također pokušali provesti i pri temperaturi zraka u sobi, čime se smanjuje potrebna izmjenjivačka površina odnosno potrebna duljina cijevi. Prilikom raznih pokušaja mjerenja pri temperaturi od 0 °C pojavio se i problem rošenja unutar cijevi a ponekad i stvaranja ledenog čepa zbog toga što je rosište zraka za vrijeme mjerenja bilo više od temperature leda (cca. 15°C). Taj je problem na kraju riješen upotrebom adsorpcijskog sušača zraka prije ulaska u cijevi za hlađenje, čime se injište zraka dovodi do razine od otprilike -35 °C. Kako bi bili sigurni da u cijevima i izmjenjivačima linije nema zaostale vlage, na izlazu iz komore priključen je higrometar točke rose kojim se prati injište/rosište zraka. Nakon je mjerenjima utvrđeno da su najbolji rezultati dobiveni pri korištenju termos posude punjene ledom kao zone stabilne temperature, postao je očit problem vezan uz različite poprečne presjeke cijevi komore i spojnice za povezivanje

izmjenjivača na komoru. Komora je izrađena od cijevi unutarnjeg promjera 16 mm a jedina dostupna spojnica za povezivanje komore s izmjenjivačem topline ima unutarnji promjer 4 mm. Iz navedenog razloga dolazi do intenzivne ekspanzije zraka neposredno prije ulaza u komoru za ispitivanje, što je popraćeno padom temperature zraka u odnosu na temperaturu u izmjenjivaču. S obzirom da se strujanje zraka ostvaruje upotrebom kompresora sa spremnikom konačnog volumena, tlak zraka s vremenom oscilira zbog dopunjavanja spremnika. S promjenama tlaka mijenja se i protok zraka a time i intenzitet ekspanzije te konačno i temperatura zraka koji nastrojava ispitivani termometar. U intervalu između punjenja i pražnjenja kompresora izmjerene su razlike temperature zraka reda veličine 10 - 20 mK. S obzirom da je vrijeme punjenja spremnika 3 minute a pražnjenja 10 minuta, vidi se da zbog upotrebe neodgovarajuće spojnice nije moguće ostvariti potrebnu temperaturnu stabilnost od 1 mK u periodu od 45 minuta.

Iz navedenih razloga projektirano je novo rješenje [slika 8] te je naručena izrada novog izmjenjivača s poprečnim presjekom jednakim presjeku komore za ispitivanje termometra.

4. ZAKLJUČAK

Od samog početka istraživanja, koje je započelo upoznavanje sa procesom samozagrijavanja platinskih otporničkih termometara, preko smišljanja mjerne linije, nabavljanja potrebne opreme, same konstrukcije mjerne linije pa sve do provođenja mjerenja, nailazili smo na razne poteškoće i ograničenja u radu.

Ipak, nakon niza provedenih mjerenja uspjeli smo osmisliti shemu mjerne linije za ispitivanje samozagrijavanja etalonskog platinskog otporničkog termometra te konstruirati komoru za ispitivanje. Zbog kašnjenja proizvođača s izradom potrebnog cijevnog izmjenjivača topline, zadovoljavajuća mjerenja samozagrijavanja, pri različitim protocima plinova, nisu provedena.

Trenutno je mjerna linija prerađena i u toku su mjerenja samozagrijavanja pri različitim protocima vode i alkohola.

LITERATURA

- [1] J. V. Nicholas, D. R. White: *Treaceable Temperatures, An Introduction to Temperature Measurement and Calibration, Second Edition, 2001.*
- [2] V. Batagelj, J. Bojkovski, I. Pušnik: *Optimizing the uncertainty due to the self-heating of platinum resistance thermometers in practical use, University of Ljubljana, Faculty of Electrical engineering, Ljubljana, Slovenia*

PRILOZI

I. CD-R disc