

Mjerenje temperature i instrumenti za mjerenje temperature

Kuretić, Laura

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:387190>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

**MJERENJE TEMPERATURE I INSTRUMENTI ZA
MJERENJE TEMPERATURE**

Završni rad

Laura Kuretić

Osijek, 2023.

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 11.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Laura Kuretić
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4837, 29.07.2020.
OIB Pristupnika:	01085474399
Mentor:	prof. dr. sc. Tomislav Barić
Sumentor:	prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Mjerenje temperature i instrumenti za mjerenje temperature
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove na kojima je zasnovan rad električnih instrumenata za kontaktno i bez kontaktno mjerenje temperature (termografija). Pri opisu mjernih instrumenata za mjerenje temperature opisati građu i fizikalna načela na kojima se zasniva njihov rad, područja primjene, pogrešku i osjetljivost. Opisati i <u>druge tehničke značajke instrumenata za mjerenje temperature kao</u>
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	11.09.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	24.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 25.09.2023.

Ime i prezime studenta:	Laura Kuretić
Studij:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Mat. br. studenta, godina upisa:	4837, 29.07.2020.
Turnitin podudaranje [%]:	4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Mjerenje temperature i instrumenti za mjerenje temperature**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Tomislav Barić

i sumentora prof. dr. sc. Hrvoje Glavaš

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

Sadržaj

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak završnog rada.....	1
2. TEMPERATURA I TEMPERATURNE LJESTVICE	2
2.1. Temperatura.....	2
2.2 Temperaturne ljestvice.....	3
2.2.1. Kelvinova temperaturna ljestvica	4
2.2.2. Celzijeva temperaturna ljestvica	5
2.2.3. Fahrenheitova temperaturna ljestvica.....	5
3. TEMPERATURNI SENZORI.....	6
3.1. Kontaktni temperaturni senzori.....	6
3.2. Beskontaktni temperaturni senzori.....	7
4. TERMOPAROVI	8
4.1. Termoelektrični učinak.....	8
4.2 Tablice napona.....	10
4.3 Linearnost.....	10
4.4 Kriterij odabira termoelementa	11
4.4.1. Vrsta T (Cu-Con).....	12
4.4.2. Vrsta J (Fe-Con).....	12
4.4.3 Vrsta E (NiCr-Con)	12
4.4.4. Vrsta K (Ni-CrNi)	13
4.4.5 Vrsta N (NiCrSi-NiSi).....	13
4.4.6 Vrste R, S i B	13
5. OTPORNI TERMOMETRI	14
5.1 Varijacija otpora s temperaturom	14
5.2 Otpornici od platine	15
5.3 Otpornici od nikla	17
6. TERMISTORI	18
6.1 Termistor s pozitivnim temperaturnim koeficijentom.....	18
6.1.1 Karakteristike PTC termistora.....	19
6.2 Termistori s negativnim temperaturnim koeficijentom.....	21
6.2.1 Karakteristike NTC termistora	22
6.3 Linearnost.....	23
7. INFRACRVENI OPTIČKI TEMPERATURNI SENZORI	26

7.1 Toplinsko zračenje	26
8. DIODA	28
8.1 Karakteristike diode	28
8.2 Izvor stalne struje.....	31
9. MJERENJE.....	32
10. ZAKLJUČAK	36
LITERATURA	37
SAŽETAK	39
ABSTRACT	39
PREGLED LITERATURE.....	40
ŽIVOTOPIS.....	41

1. UVOD

Tema ovog završnog rada je mjerenje temperature i instrumenti koji se koriste za mjerenje. Još prije nekoliko stoljeća ljudi se nastojali izmjeriti temperaturu, odnosno odrediti je li određeno tijelo toplo ili hladno i kakvo je u usporedbi s drugim tijelom. Kako bi se temperatura uistinu mogla izmjeriti, a ne shvaćati intuitivno, uvedene su temperaturne ljestvice i mjerni instrumenti. Nakon dane definicije temperature, objašnjene su tri osnovne temperaturne ljestvice: Celzijeve, Kelvinova i Fahrenheitova. Nadalje su opisani temperaturni senzori podijeljeni u dvije osnovne skupine: kontaktni senzori i beskontaktni senzori. Svako iduće poglavlje rezervirano je za pojedinu vrstu senzora. Opisan je termoelektrični učinak i linearnost te navedene vrste termoparova. Istaknuti su otpornici od platine i otpornici od nikla, a termistori su podijeljeni na: PTC (pozitivni temperaturni koeficijent) i NTC (negativni temperaturni koeficijent). Zatim je predstavljeno toplinsko zračenje infracrvenih temperaturnih senzora i karakteristike diode. Na samom kraju provodi se laboratorijsko mjerenje temperaturnog odziva za naglu i stupnjevitu promjenu temperature koja se ostvaruje uranjanjem sonde u ranije zagrijanu vodu. Zaključak je donesen na bazi dobivenih rezultata koji su analizirani sukladno s pravilima za iskazivanje mjernog rezultata te objašnjeni tablicom i grafičkim prikazima.

1.1. Zadatak završnog rada

U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove na kojima je zasnovan rad električnih instrumenata za kontaktno i bez kontaktno mjerenje temperature (termografija). Pri opisu mjernih instrumenata za mjerenje temperature opisati građu i fizikalna načela na kojima se zasniva njihov rad, područja primjene, pogrešku i osjetljivost. Opisati i druge tehničke značajke instrumenata za mjerenje temperature kao što su rezolucija, tromost mjerne sonde, utjecajne veličine na točnost mjerenja itd. Osvrnuti se na norme kojima je definirana klasa točnosti pojedinih vrsta instrumenata. U dogovoru s mentorom provesti laboratorijsko mjerenje temperature, dobivene rezultate potrebno je analizirati, komentirati i iskazati u skladu s važećim normama za iskazivanje mjernog rezultata. Izlaganje je potrebno poduprijeti grafičkim prikazima i shemama.

2. TEMPERATURA I TEMPERATURNE LJESTVICE

2.1. Temperatura

Ako se dodirne neko tijelo može se ocijeniti je li hladno, mlako, toplo ili vruće te usporediti je li toplije ili hladnije od našeg tijela. Postoji više definicija kojima se može objasniti pojam temperature, a jedna od njih govori kako se temperatura definira kao mjera zagrijanosti ili ohlađenosti tijela, odnosno sustava. Navedena definicija nije u potpunosti točna jer su ovakvi subjektivni načini određivanja temperature relativni, a procjena vrlo nepouzdana koja na kraju može dovesti do krivih zaključaka. Temperatura se naziva i varijabla stanja jer skupa s ostalim varijablama poput specifične topline i mase poblizje označava energetski sadržaj tijela [1]. Realno fizikalno definiranje temperature uspostavljeno je u 19. stoljeću zakonima termodinamike u kojima se ne primjenjuju svojstva materijala za objašnjenje temperature [1]. Termodinamička temperatura može se ustanoviti bilo kojom metodom mjerenja izvedenom iz drugog zakona termodinamike [1]. Boyle-Marlottev zakon govori kako je tlak pri temperaturi koja je konstantna obrnuto proporcionalan volumenu ($p \sim 1/V$) dok nam Gay-Lussacov zakon govori kako je tlak pri volumenu koji je konstantan izravno proporcionalan apsolutnoj temperaturi ($P \sim V$) [1]. Iz navedenih zakon za jedan mol plina izvodi se opća plinska jednačba [1]:

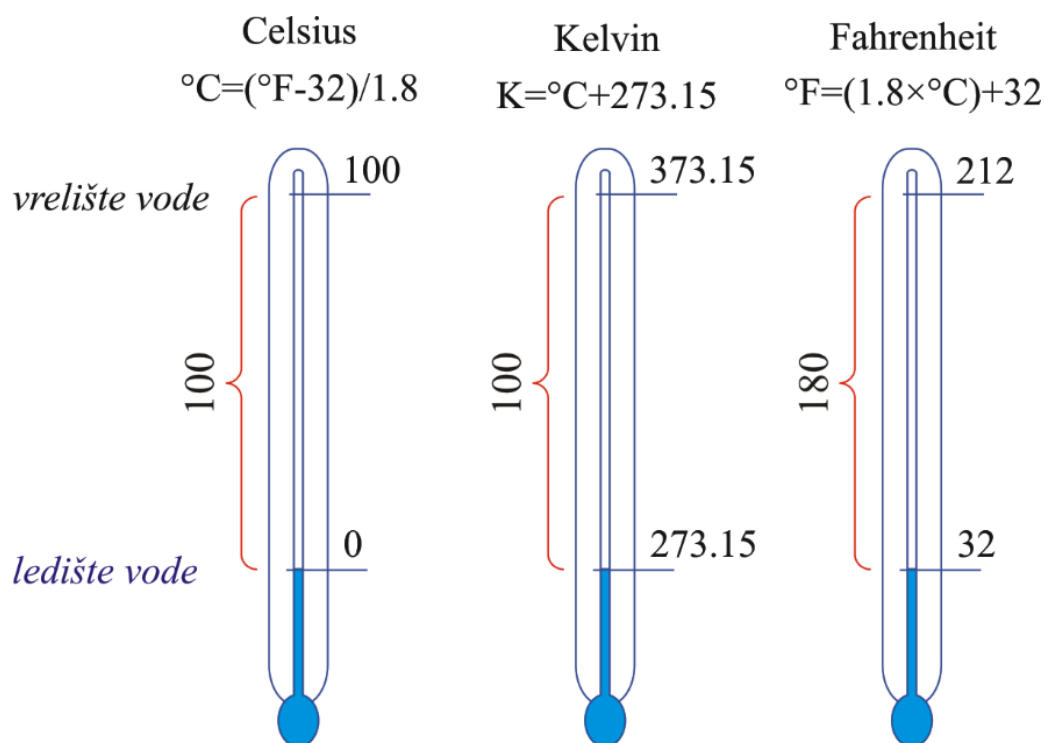
$$p \cdot V_m = R_m \cdot T, \quad (2-1)$$

u kojoj je p tlak, V_m molarni volumen, R_m plinska konstanta, a T temperatura idealnog plina. Navedena jednačba upućuje na izravan odnos između tlaka, volumena i temperature idealnog plina. Na primjeru pokazat će se kako je određivanje temperature našom procjenom uz pomoć osjetila subjektivno. U toplicama nalaze se tri bazena različitih veličina i dubina. Najveći bazen puni se hladnom vodom, malo manji bazen puni se toplom vodom, dok se najmanji bazen puni izrazito vrućom vodom. Posjetitelj toplica prvo je ušao u bazen s vrućom vodom te potom u bazen s toplom vodom. Bazena s toplom vodom za njega je predstavljao hladnu vodu nakon što je izašao iz bazena s vrućom vodom. Nakon nekoliko sati taj isti posjetitelj ušao je u bazen s hladnom vodom, a potom u bazen s toplom vodom. Ovaj put za njega je bazen s toplom vodom predstavljao vruću vodu nakon izlaska iz bazena s hladnom vodom.

Kako se pojam temperature ne bi intuitivno shvaćao uvedeni su mjerni instrumenti i temperaturne ljestvice kojima se temperatura tijela mjeri na objektivan način. Davne 1596. godine Galileo Galilei pokušao je pronaći objektivnu metodu kojom bi mogao odrediti temperaturu, a zato je upotrijebio širenje plinova i tekućina tijekom zagrijavanja [1]. Nešto kasnije, u 17. stoljeću, Akademija u Firenci počela je izrađivati termometre koji su bili zapečaćeni, a temperatura nije bila pod utjecajem barometarskog tlaka. Kao tekućinu za termometar uzimao se alkohol [1]. Temperatura je jedna od 7 osnovnih fizikalnih veličina koja se najčešće označava velikim ili malim slovom T, a osnovna mjerna jedinica za temperaturu gledajući Međunarodni sustav jedinica je Kelvin (K). Na 0 K (Kelvina) molekule koje tijela imaju miruju i ne sadržavaju toplinsku energiju što upućuje da negativna temperatura ne postoji [1]. Budući da je temperatura fizikalna veličina treba ju vezati s gibanjem čestica. Toplinsko gibanje jest neprekidno gibanje čestica u tijelima, a čestice radi toplinskog gibanja imaju toplinsku energiju. Osjetilna procjena toplog i hladnog ovisi isključivo o kinetičkoj energiji čestica tvari s kojom se susreće. Zaključuje se kako je temperatura proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji molekula [2]. Ako se jedan do drugog nađu, hladnije i toplije tijelo, i ostvare kontakt, čestice koje imaju veću kinetičku energiju predat će energiju česticama koje imaju manju kinetičku energiju. Prijenos topline odvija se sve dok se ne uspostavi termička ravnoteža, odnosno dok tijela u termičkoj ravnoteži ne budu imala jednaku temperaturu [2]. Do sredine 18. stoljeća znanstvenici nisu znali razliku između pojmova temperature i topline iako se ta dva pojma još i danas izjednačuju. Temperatura se definira kao fizikalna veličina koja karakterizira mjeru zagrijanosti ili ohlađenosti tijela, a toplina mjeru prijenosa energije s jednog tijela na drugo tijelo ili iz jednog sustava u drugi sustav.

2.2 Temperaturne ljestvice

U današnje vrijeme najčešće koristimo tri temperaturne ljestvice: Celzijevu, Kelvinovu koju još nazivamo i apsolutna temperaturna ljestvica i Fahrenheitovu iako postoje i neke druge temperaturne ljestvice (Slika 2.1).



Slika 2.1. Prikaz triju temperaturnih ljestvica s temperaturama vrelišća i ledišća vode te formulama za preračunavanje Celzijeve, Kelvinove i Fahrenheitove temperaturne ljestvice [3]

2.2.1. Kelvinova temperaturna ljestvica

Međunarodni standard za znanstvena mjerenja temperature je Kelvinova temperaturna ljestvica koja označava apsolutnu ljestvicu temperature, a najčešće je korištena u znanosti i tehnici. Budući da Kelvinovu temperaturnu ljestvicu nazivamo i apsolutnom, temperature izmjerene u Kelvinima nemaju stupnjeve. Na Kelvinovoj temperaturnoj ljestvici referentna točka je apsolutna nula, odnosno najniža temperatura na kojoj se čestice u potpunosti zaustavljaju. Kelvinova temperaturna ljestvica koristi mjernu jedinicu Kelvin (K), a to je ujedno i osnovna mjerna jedinica za temperaturu u Međunarodnom sustavu jedinica (SI). Kelvinova temperaturna ljestvica dobila je ime po engleskom fizičaru Williamu Thomsonu, barunu Kelvinu. Termodinamičku temperaturu T i Celzijevu temperaturu t vežemo formulom [4]:

$$\frac{T}{\text{K}} = 273.15 + \frac{t}{^{\circ}\text{C}}. \quad (2-2)$$

Interval temperature koji se izražava u kelvinima jednak je intervalu temperature koji se izražava u celzijevim stupnjevima [4]:

$$\Delta T = \Delta t . \quad (2-3)$$

2.2.2. Celzijeva temperaturna ljestvica

Celzijevu temperaturnu ljestvicu koristimo u svakodnevnom životu, ali i u znanstvenim istraživanjima. Za razliku od Kelvinove temperaturne ljestvice gdje je referentna točka apsolutna nula, na Celzijevoj temperaturnoj ljestvici referentna točka je smrzavanje vode, to jest 0 stupnjeva Celzijeva ($^{\circ}\text{C}$). Pri normalnom atmosferskom tlaku točka vrenja vode postavljena je na 100 stupnjeva Celzijeva ($^{\circ}\text{C}$) te je prema tome interval između referentnih stanja podijeljen na 100 jednakih dijelova. $^{\circ}\text{C}$ označava stoti dio temperaturnog intervala od ledišta vode (0°C) do vrelišta vode (100°C) pri normalnom atmosferskom tlaku 101325 Pa. Celzijeva temperaturna ljestvica dobila je ime po Andreasu Celsiusu, švedskom astronomu koji je dizajnirao vrlo sličnu ljestvicu.

2.2.3. Fahrenheitova temperaturna ljestvica

Poslije Celzijeve i Kelvinove temperaturne ljestvice, najčešće korištena ljestvica za mjerenje temperature je Fahrenheitova temperaturna ljestvica koja se pretežno koristi u Sjedinjenim Američkim Državama. Gledajući Fahrenheitovu temperaturnu ljestvicu točka na kojoj se voda smrzava postavljena je na 32 stupnja Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), a točka vrenja vode postavljena je na 212 stupnjeva Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). Interval između točke smrzavanja i točke vrenja podijeljen je na 180 dijelova. Fahrenheitova temperaturna ljestvica nazvana je po njemačkom fizičaru Danielu Gabrielu Fahrenheitu.

3. TEMPERATURNI SENZORI

Pojam senzor izveden je iz latinske riječi *sensus* koja se prevodi kao osjet, a označuje uređaj koji reagira te detektira na unos koji se pojavljuje iz okoline [5]. Od najranije povijesti ljudi su bili svjesni važnosti topline i na razne načine nastojali su procijeniti temperaturni intenzitet. Temperaturni senzori definiraju se kao mjerni instrumenti koji mjere hladnoću i toplinu i pretvaraju ju u električni signal, odnosno brojčanu jedinicu. Svaka vrsta senzora, bez obzira na svoje dimenzije u stanju je ometati mjesto mjerenja te na taj način prouzrokovati greške u mjerenju temperature [6]. Inženjeri nastoje svaku pogrešku svesti na minimalnu razinu dizajnom odgovarajućeg senzora i pravilnom mjernom tehnikom [6]. Kada temperaturni senzor detektira primjenjuju se dvije metode obrade signala: prediktivna i ravnotežna [6]. U prediktivnoj metodi ravnotežu je nemoguće postići za vrijeme mjerenja nego se određuje unaprijed brzinom izmjene temperature senzora [6]. U ravnotežnoj metodi gotovo mjerenje temperature nema toplinskog gradijenta među površinom koju mjerimo i elementa osjeta u sondi [6]. Čovjek termostatom mjeri i kontrolira temperaturu, a termostat se nalazi u grijaču vode za kućanstvo, hladnjacima, mikrovalnim pećnicama i klima uređajima. Osim temperaturnih senzora koji se koriste u svakodnevnom životu u upotrebi su i specijalizirani temperaturni senzori za mjerene temperature zgrada, tla, bušotina i betonskih brana. Princip rada temperaturnih senzora temelji se na naponu na stezaljkama diode. Povećanjem napona povećava se i temperatura, a potom se događa pad napona između izvoda tranzistora baze i emitera u diodi. Osnovne dvije skupine temperaturnih senzora su: kontaktni senzori i beskontaktni senzori.

3.1. Kontaktni temperaturni senzori

Kontaktni temperaturni senzori su uređaji koje koristimo za mjerenje temperature tako što su u izravnom kontaktu s objektom ili površinom koju želimo ispitati. Kontaktni senzori najčešće imaju sondicu ili vrh kojim se dodiruje objekt kako bi se mogla izmjeriti temperatura. Kontaktni senzor, odnosno sonda stavi se na objekt ili unutar te se provedba topline odvija putem sučelja koje se nalazi između sonde i objekta. U sondi se nalazi osjetni element koji se koji se zagrijava ili hladi, pri čemu izmjenjuje toplinu s predmetom [6]. Koriste se za detekciju krutih tvari, tekućina i plinova u velikim rasponima temperatura. Postoje i brojni nedostaci koji

ograničavaju rad kontaktnih temperaturnih senzora, a neki od najčešćih su: vrijeme odziva, uska primjena, ograničen raspon temperature i utjecaj na mjernu površinu. Kontaktni senzori najčešće imaju dulje vrijeme odziva u odnosu na beskontaktno senzore što znači da je potrebno dulje vrijeme da senzor prikaže točno očitavanje temperature.

Pod uskom primjenom podrazumijevamo da kontaktni senzori moraju biti u izravnom kontaktu s objektom ili površinom koju želimo ispitati, a to znači da ih ne možemo koristiti na objektima i površinama do kojih ne možemo fizički dosegnuti. Kontaktni temperaturni senzori vrlo često imaju ograničen raspon temperature koju mogu točno izmjeriti pa nam radi toga nisu prikladni za mjerenje jako visoke ili jako niske temperature. Posljednji navedeni nedostatak kontaktnih senzora je utjecaj na mjernu površinu jer zahtijevaju direktni dodir s mjernom površinom što može izazvati oštećenja ili ogrebotine površine koju mjerimo. Neki od vrsta kontaktnih senzora su: termoparovi, otpornički detektori temperature, poluvodički termometri, bimetalni termometri, stakleni termometri, termistori i mnogi drugi.

3.2. Beskontaktni temperaturni senzori

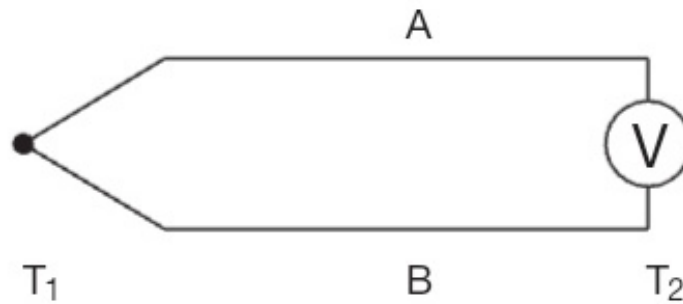
Beskontaktni temperaturni senzori su uređaji koje koristimo za mjerenje temperature bez potrebe za izravnim fizičkim kontaktom s objektom ili površinom koju želimo ispitati. Mjere stupanj zagrijanosti od zračenja koje emitira izvor topline i koriste različite tehnike za mjerenje i detekciju temperature. Beskontaktni senzori koriste se u industriji medicine, hrane, automobilske industriji, meteorologiji i mnogim drugima. Razumijevanje načina rada beskontaktnih temperaturnih senzora zahtjeva poznavanje spektralnog zračenja te su radi toga još uvijek u industriji češće korišteni kontaktni temperaturni senzori. Prednost beskontaktnih senzora je što omogućavaju vrlo brzo i precizno mjerenje temperature na udaljenijim i teže dostupnim površinama. Neke od najčešće korištenih vrsta beskontaktnih temperaturnih senzora su: infracrveni senzor temperature, termalna kamera, optički senzori temperature i piranski senzori.

4. TERMOPAROVI

Najrašireniji i najkorišteniji tip od svih senzora temperature su termoelektrični senzori termoparovi. Jeftini su, odziv im je brz, ali su manje točni i stabilni te vrlo osjetljivi s obzirom na druge vrste senzora. Mjere samo relativnu temperaturnu razliku dok neki drugi temperaturni senzori poput otporničkih senzora i termistora mjere apsolutnu temperaturu [7]. Rasprostranjeni su u znanosti i industriji zbog svoje brzine, male veličine, lakoće korištenja i jednostavnosti. Pogodni su jer imaju najširi temperaturni raspon, odnosno s njima možemo mjeriti temperaturu od $-267\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $2316\text{ }^{\circ}\text{C}$. Imaju osjetilo sačinjeno od žica dva različita metala, najčešće homogenih metala ili legura koji su na krajevima povezani u čvorišta [3]. Krajevi se drže na različitim temperaturama. Hladni kraj koji se naziva i referentni kraj vezan je na mjerni instrument kojim se strujni krug zatvara i održava se na konstantnoj temperaturi, dok je vrući kraj, odnosno mjerni kraj izložen većoj temperaturi [3]. Budući da krajevi nisu na istim temperaturama stvara se napon kojeg koristimo za mjerenje senzora temperature. Najčešće korišteni metali u termoparovima su konstantan, bakar, nikal, krom i željezo. Spojevi dvaju različitih metala daju „termo-električni“ učinak koji ima stalnu razliku potencijala među njima koja iznosi nekoliko milivolta. Razlika napona između krajeva otvorenog kruga dva spoja naziva se Seebeckov efekt. Prednost termoparova je njihova otpornost na visoke temperature te otpornost na elektromagnetske smetnje, a nedostatak je što mogu krivo očitati svoju temperaturu, a to se posebice događa ako su dugo korišteni ili ako je izolacija među žicama izgubila na otporu. Budući da postoje mnoge vrste termoparova, oni se dijele na tipove gdje je svaki tip termopara odgovara određenoj temperaturi.

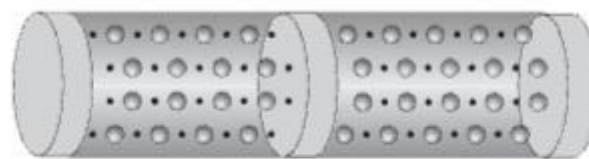
4.1. Termoelektrični učinak

1821. godine Seebeck je utvrdio učinak na kojem se temelje termoparovi [1]. Mala struja protječe ako su metalni vodiči drugačijih materijala A i B u dodiru te ako postoji razlika temperature uzduž tih vodiča [1]. Spojeni vodiči zovu se termoelementi (Slika 4.1) [1].



Slika 4.1 Termoelektrični učinak

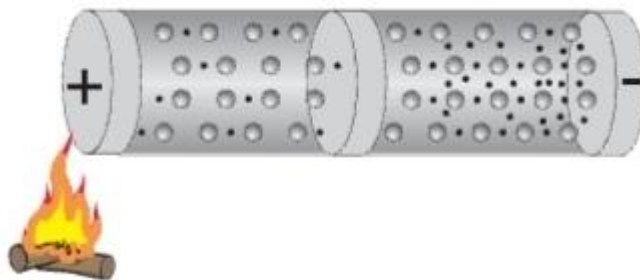
Kako bi se u potpunosti razumio Seebeckov efekt mora se proučiti sastav metala i atomska struktura metala (Slika 4.2) [1]. Slobodni vodljivi elektroni odgovaraju za struju te se po njima prepoznaje metalni vodič [1]. Ako je metalni vodič svom svojom duljinom na istoj temperaturi, elektroni se pomiču unutar kristalne rešetke [1]. S vanjske strane vodič je neutralan [1].



- atoms
- free electrons

Slika 4.2 Struktura metalnog vodiča

Kada se jedan kraj vodiča zagrije do slobodnih elektrona dolazi toplinska energija čija je srednja brzina u porastu u odnosu na elektrone smještene na hladnom kraju vodiča (Slika 4.3)



Slika 4.3 Pomak naboja u metalnom vodiču koji se zagrijava

4.2 Tablice napona

Termoelektrična elektromotorna sila povećava se s porastom razlike između metala dva kraka [1]. Najveću elektromotornu silu ima NiCr-Con termopar dok najnižu elektromotornu silu ima termopar od platine [1].

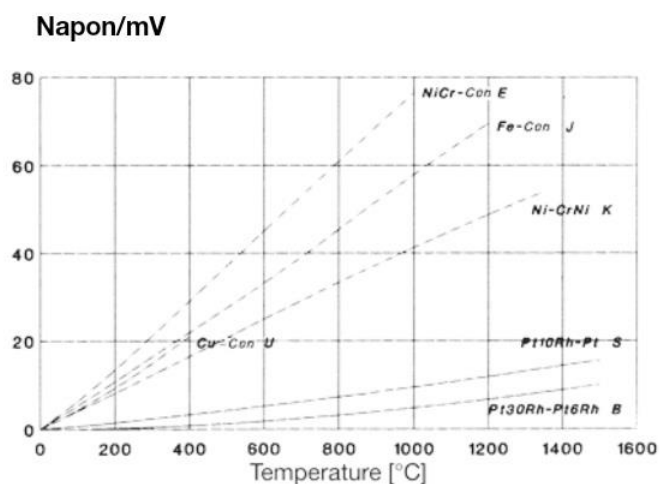
Tablica 4.1 Termoparovi prema EN 60 584 [1]

Standard	Termopar	Maksimalna temperatura	Definiran do
EN 60 584	Fe-Con J	750°C	1200°C
EN 60 584	Cu-Con T	350°C	400°C
EN 60 584	NiCr-Ni K	1200°C	1370°C
EN 60 584	NiCr-Con E	900°C	1000°C
EN 60 584	NiCrSi-NiSi N	1200°C	1300°C
EN 60 584	Pt10Rh-Pt S	1600°C	1540°C
EN 60 584	Pt13Rh-Pt R	1600°C	1760°C
EN 60 584	Pt30Rh-Pt6Rh B	1700°C	1820°C

4.3 Linearnost

Termoelement koji generira napon treba se linearizirati u posebnim ulaznim krugovima [1]. Linearizacijske tablice programirane su u digitalnim instrumentima ili korisnik unosi podatke [1]. Tablicama napona određene su karakteristike standardnih termoparova na način da je

moгуća zamjenjivost. Primjerice, tip K željezo-konstantan termoelement u mogućnosti je zamijeniti se nekim drugim termoelementom istog tipa tako da instrument koji je na njega spojen ne kalibrira [1].



Slika 4.4 Karakteristike termoparova prema EN 60 584 [1]

4.4 Kriterij odabira termoelementa

O radnoj temperaturi ovisi vrsta termoelementa [1]. Odabire se termoelement s poprilično visokom termoelektričnom elektromotornom silom da se može dobiti mjerni signal sasvim otporan na smetnje [1].

Tablica 4.2 Svojstva termoparova [1]

Cu-Con	350°C ¹⁾	nije u širokoj uporabi
Fe-Con	700°C ¹⁾	široko korišten, jeftin, sklon koroziji
NiCr-Con	700°C ¹⁾	nije široko korišten, visoka elektromotorna sila
Ni-CrNi	1000 °C	uobičajeno se koristi u rasponu od 800-1000°C, ali također je pogodan za niže temperaturno područje

NiCrSi-NiSi	1300 °C	(još uvijek) malo korišten može donekle zamijeniti plemenite termoelemente
Pt10Rh-Pt	1500°C (1300 °C ¹)	skup, vrlo dobra dugotrajna postojanost, niske tolerancije
Pt30Rh-Pt6Rh	1700750 °C	skup, najniža termoelektrična elektromotorna sila, visoka maksimalna temperatura

1. prema DIN 43 710 (1977) koristi se na čistom zraku

4.4.1. Vrsta T (Cu-Con)

Ograničenje koje je napisano u DIN 43 710 od 400°C smanjuje se na 350 °C budući da je tolerancija prema IEC 584 propisana samo do 350 °C, a na čistom zraku događa se oksidacija već nešto iznad 200 °C [1]. Standardna vrijednost termoelektrične elektromotorne sile izmjenjuje se iznad 350 °C jer iznad te temperature bakrena noga jako brzo oksidira. Bakrena noga ima vrlo dobra vodljiva svojstva radi kojih se prepoznaju pogreške toplinske vodljivosti [1]. Ova vrsta termopara ne koristi se često.

4.4.2. Vrsta J (Fe-Con)

Uzimajući u obzir sve vrste termoelemenata, Fe-Con je najraširenija. Ima vrlo visoku termoelektričnu elektromotornu silu i nije skupa, a upotrebljava se u nižim i srednjim temperaturnim područjima [1]. U tablicama standardnih napona vrijednost je do 1200 °C , ali brzina oksidacije raste kada pređe 750 °C pa termoelement ne radi na temperaturama koje su iznad navedene [1]. Trajna promjena izlaznog signala događa se jer željezna noga na 769 °C prolazi kroz magnetsku promjenu i jer se na 910 °C izmjenjuje kristalna struktura [1]. Javlja se opasnost radi kondenzacije pa se termoelement ne bi trebao upotrebljavati u vlažnim područjima [1].

4.4.3 Vrsta E (NiCr-Con)

Glavna razlika NiCr-Con termoelementa u odnosu na ostale vrste je specifična relativno visoka termoelektrična elektromotorna sila radi čega se NiCr-Con upotrebljava u nižim

temperaturnim okruženjima [1]. Ova vrsta termoelementa najviše je rasprostranjena u Sjedinjenim Američkim Državama, dok u Europi nije popularna [1]. Prvenstveno se koristi da se izmjere niske temperature jer je vrlo osjetljiv na napon [1].

4.4.4. Vrsta K (Ni-CrNi)

Ni-CrNi (Cr-Al) termoelement ima veću oksidaciju od prethodno opisane dvije vrste termoelemenata pa se radi toga koristi za mjerenja temperatura koje su iznad 500°C. Brzina oksidacije naglo raste iznad 750°C te se radi toga ne koristi na temperaturama iznad 750°C bez odgovarajuće zaštite [1]. Ako se upotrebljava u vakuumu ili na vrlo visokim temperaturama važno je voditi brigu o osjetljivosti vakuuma [1]. Na temperaturama između 800°C i 1050°C krom oksidira [1]. Pogreška mjerenja može doseći i nekoliko stotina celzijevih stupnjeva [1].

4.4.5 Vrsta N (NiCrSi-NiSi)

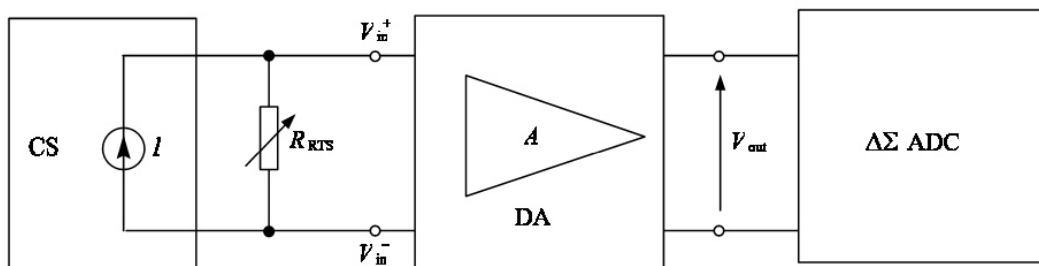
NiCrSi-NiSi vrsti termoparova gornja temperatura doseže 1300°C. Na površini žica termoelemenata dolazi do oksidacije legiranog silicija te se pojavljuje zaštitni sloj koji je protiv korozije [1]. Moguće je koristiti ga kao zamjenu za skuplje termoparove kao one od platine [1]. U izvedbama s mineralnom izolacijom materijal plašta sličan je materijalu termoelementa [1].

4.4.6 Vrste R, S i B

Trajanje termoparova koji su od plemenitog metala ograničava porast zrna u žicama termoparova [1]. Mehanička čvrstoća postaje manja, a radi visoke cijene i vrlo niske elektromotorne sile upotrebljavaju se isključivo na temperaturama iznad 800°C [1]. Termopar Pt13Rh-Pt (tip R) koristi se u državama u kojima se govori engleskim jezikom [1]. Kada se bira hoće li se upotrebljavati termopar vrste S ili vrste R, gleda se linearizacijski krug u instrumentu [1]. Na temperaturama iznad 1300°C upotrebljavaju se termoparovi vrste B jer imaju vrlo nisku termoelektričnu elektromotornu silu [1].

5. OTPORNI TERMOMETRI

Otporni termometri kojima se otpor mijenja kako se mijenja temperatura služe isključivo za mjerenje temperature. Za otporne termometre koristi se naziv i namotana žica jer su građeni od tanke žice namotane oko jezgre koja je staklena ili keramička. Što je temperatura metala veća, veći je i otpor metala protoku elektriciteta. Kroz senzor teče električna struja, a za mjerenje otpora struje koristimo otporni element. Za izradu metala koriste se razni tipovi materijala poput nikala, bakra i platine. Platina je preporučeni materijal kojim se precizno mjeri jer posjeduje temperaturni koeficijent otpora koji je praktički skroz linearan [8]. Pripadaju među najpreciznije temperaturne senzore s jako malom mjernom nesigurnošću. Preciznost od ± 0.1 °C postiže se srednje preciznim instrumentom, ali uz bolju opremu moguća je i veća preciznost [8]. Smješteni su u zaštitnu sondu radi zaštite od okoline u koju su uronjeni ili su u sklopu neke druge naprave kojoj mjere temperaturu koja je dio funkcije te naprave [8]. Takav primjer je termostat [8]. Industrije u kojima koristimo otpornički detektor temperature su: potrošačka elektronika, energetska elektronika, medicinska elektronika, industrijska elektronika, prerada hrane, automobilska, vojska i zrakoplovstvo.



Slika 5.1 Blok dijagram strukture termometra s otpornim senzorom temperature [10]

5.1 Varijacija otpora s temperaturom

Električna vodljivost koju imaju metali u ovisnosti je s pokretljivošću elektrona vodljivosti [1]. Ako se napon pojavi na krajevima metala, elektroni se počinju kretati prema pozitivnom polu [1]. S porastom temperature povećava se i oscilacija atoma metalne rešetke te se tada manje

kreću provodljivi elektroni [1]. S porastom temperature linearno raste i oscilacija te je rezultirajuće otporno povećanje izravno proporcionalno temperaturi što se zove pozitivni temperaturni koeficijent, PTC otpornik [1].

Kako bi taj učinak služio za izmjeriti temperaturu treba biti visoki temperaturni koeficijent. Izmjena otpora s temperaturom je idealna, karakteristična svojstva ne bi se trebala previše mijenjati, a temperaturni koeficijent ne bi trebao biti ovisan o temperaturi i tlaku [1]. Odnos među električnim otporom i temperaturom opisuje se polinomom višeg reda:

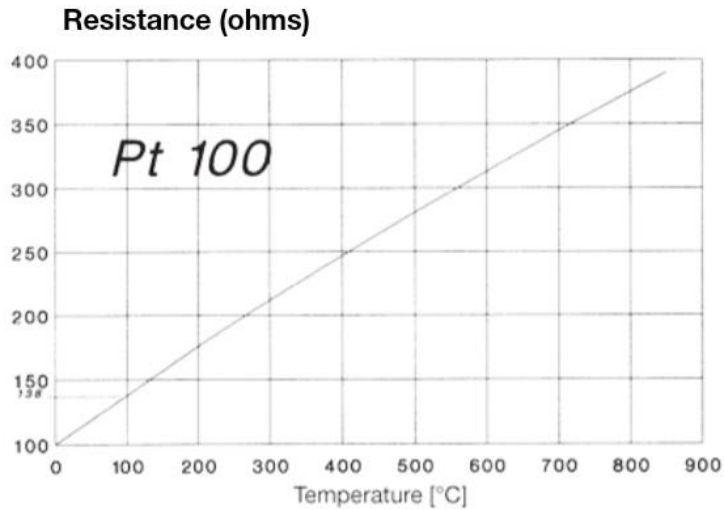
$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots), \quad (5-1)$$

gdje je R_0 nazivni otpor na temperaturi koja se određuje, T^2 , T^3 članovi višeg reda koji se odlučuju o točnosti mjerenja, a A i B koeficijenti koji prikazuju odnos temperature i otpora [1].

5.2 Otpornici od platine

Za otporne termometre koristi se naziv i namotana žica jer su građeni od tanke žice namotane oko jezgre koja je staklena ili keramička. Najčešće korišteni materijal za izradu žice je platina, najbolji i najskuplji materijal koji je linearan među temperaturom i otporom te ima vrlo visok temperaturni raspon. Raspon temperature naveden je u tablicama standardnih vrijednosti, a temperatura je između -200 °C do 850 °C [1]. Različiti rasponi temperature u tablicama standardnih vrijednosti su:

- -200 °C do 0 °C
- 0 °C do 850 °C



Slika 5.2 Karakteristike senzora temperature Pt 100 [1]

Polinomom trećeg reda određen je temperaturni raspon od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ po formuli [1]:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot [T \cdot 100^{\circ}\text{C}] \cdot T^3) . \quad (5-2)$$

Polinomom drugog reda određen je raspon od 0°C do 850°C po formuli [1]:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2) , \quad (5-3)$$

gdje je R_0 nazivni otpor pri 0°C .

Vrijednosti koeficijenta su:

$$A = 3.90802 \cdot 10^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

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

$$C = -4.2735 \cdot 10^{-12} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

5.3 Otpornici od nikla

Osim platine otporni materijal je i nikal koji ima dvostruko veći temperaturni koeficijent, ali mu je raspon mjerenja od 600°C do 2500°C, a fazna transformacija provodi se iznad 350°C [1]. Odnos među otporom i temperaturom prikazan je formulom [1]:

$$R(t) = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^4 + D \cdot t^6). \quad (5-4)$$

Vrijednosti koeficijenta su:

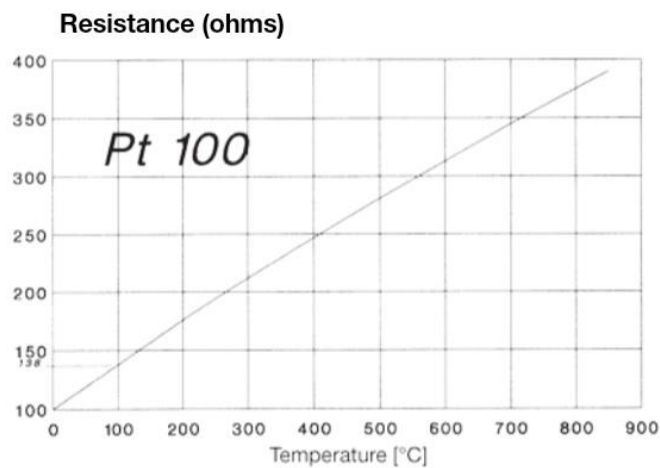
$$A = 0.5485 \cdot 10^{-2} \cdot \text{C}^{-1}$$

$$B = 0.665 \cdot 10^{-5} \cdot \text{C}^{-2}$$

Nazivna vrijednost na 0°C je 100 Ω

$$C = 2.805 \cdot 10^{-11} \cdot \text{C}^{-4}$$

$$D = 2.111 \cdot 10^{-17} \cdot \text{C}^{-6}$$



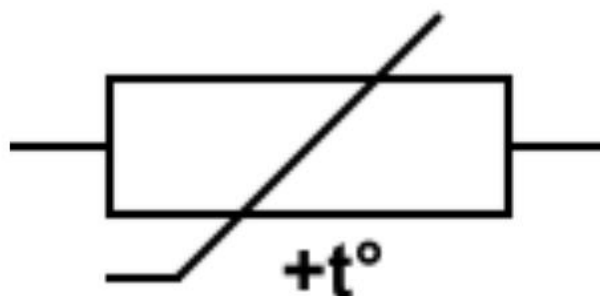
Slika 5.3 Karakteristika Ni 100 prema DIN 43 760

6. TERMISTORI

Termistor je skraćenica od dviju riječi: termalni i otpornik [6]. Termistor je najučestaliji primjer poluvodičkog senzora temperature koji se ponaša poput temperaturno osjetljivog otpornika. Njihovo osnovno svojstvo je promjena električnog otpora ovisno o temperaturi okoline. Poznate su dvije vrste termistora: PTC (pozitivni temperaturni koeficijent) i NTC (negativni temperaturni koeficijent). NTC termistori upotrebljavaju se za precizna mjerenja temperature [6]. Temperaturni koeficijent električnog otpora prikazuje ovisnost otpora o temperaturi. Ako se termistori usporede s drugim sensorima temperature zaključuje se da oni rade u relativno malom temperaturnom području. Nominalni otpor najčešće je na 25 °C, odnosno na standardnoj referentnoj temperaturi tijela termistora. Pripadaju klasi senzora apsolutne temperature, odnosno njima se mjeri temperatura apsolutne temperaturne skale [6].

6.1 Termistor s pozitivnim temperaturnim koeficijentom

PTC termistor (Slika 9.) predstavlja elektroničku komponentu čiji se otpor mijenja s porastom temperature. Ukratko, otpor termistora povećava se rastom temperature okoline, a smanjuje se padom temperature. Najčešće ih koristimo kao temperaturne senzore ili kao komponente za zaštitu od pregrijavanja. Termistori s pozitivnim temperaturnim koeficijentom uključeni u električni krug ograničavaju protok struje ako temperatura pređe određenu granicu te na taj način štite električne uređaje od oštećenja. Svojstvo PTC termistora je visok otpor pri niskim temperaturama, ali i nagli rast otpora kada temperatura pređe određenu brojčanu vrijednost. Vrlo su rašireni te se koriste u automobilskoj industriji, kućanskim aparatima i elektronici.

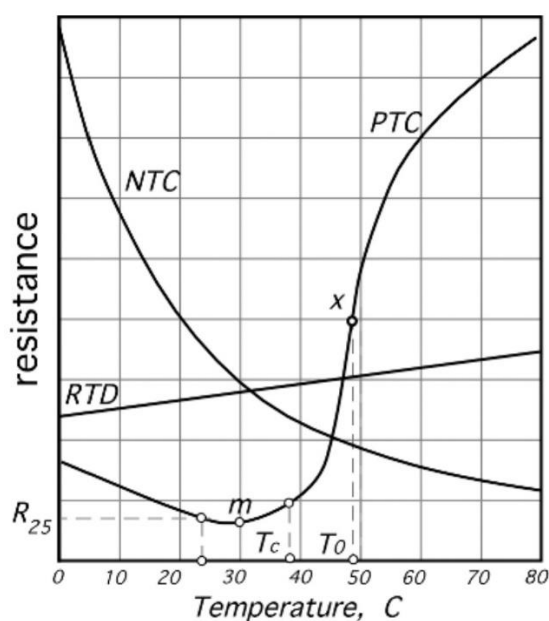


Slika 6.1 Simbol PTC termistora (IEC standard) [11]

6.1.1 Karakteristike PTC termistora

PTC materijali imaju dosta nizak relativni koeficijent otpora (TCR), a RTD je zapravo mali PTC [6]. Suprotno od navedenog, keramičke PTC materijale u pojedinom temperaturnom okruženju odliku veoma visoka ovisnost o temperaturi [6].

PTC termistore grade polikristalne keramičke tvari, a bazne spojeve barijev titanat [6]. Feroelektrična svojstva izmjenjuju se velikom brzinom iznad Curieve temperature kompozitnog materijala što dovodi do rasta otpora [6].



Slika 6.2 Prijenosne funkcije PTC i NTC termistora u usporedbi s RTD [6]

Feroelektrična svojstva izmjenjuju se velikom brzinom iznad Curieve temperature kompozitnog materijala što dovodi do rasta otpora [6]. Oblik krivulje prijenosne funkcije za PTC termistor ne može se jednostavno matematički aproksimirati pa se radi toga PTC termistori navode sljedećim nizom [6]:

- Otpor nulte snage, R_{25} je na 25°C jer je na toj temperaturi samozagrijavanje veoma nisko

- R_m , minimalni otpor označava vrijednost na krivulji koja je prikazana točkom m u kojoj termistor izmjenjuje TCR iz pozitivne vrijednosti u negativnu
- Prijelaznu temperaturu definiramo kao temperaturu brzog mijenjanja otpora i ona se podudara s Curievom točkom materijala
- Standardni oblik TRC-a glasi:

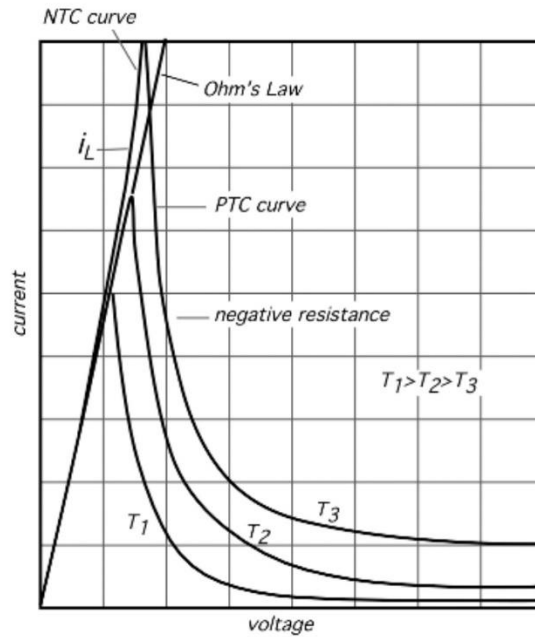
$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} \quad (6-1)$$

- E_{max} , odnosno maksimalni napon je maksimalna vrijednost koju termistor može izdržati na nekoj temperaturi
- Toplinskim kapacitetom, konstantom disipacije i toplinskom vremenskom konstantom određene su toplinske karakteristike

Koliko je PTC termistor osjetljiv na temperaturu može se očitati u strujno-naponskoj karakteristici [6]. Strujno-naponska karakteristika prikazuje se u uskom temperaturnom području gdje je PTC termistor negativnog otpora [6]:

$$R_x = -\frac{V_x}{I}, \quad (6-2)$$

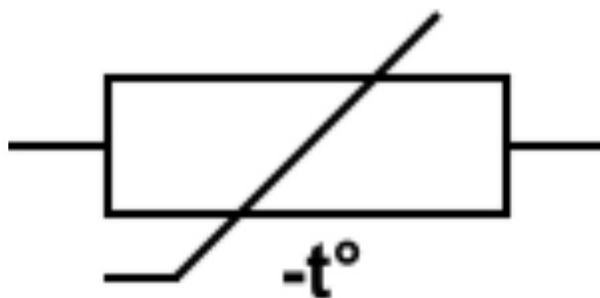
gdje je: V_x - napon termistora (V), I - struja termistora (A).



Slika 6.3 Naponsko-strujna karakteristika PTC termistora

6.2 Termistori s negativnim temperaturnim koeficijentom

NTC termistor (Slika 6.4) druga je vrsta termistora čiji električni otpor pada s povećanjem temperature. Ukratko, kako temperatura raste otpor termistora se smanjuje. NTC termistori koriste se za mjerenje temperature u elektroničkim uređajima. Negativni temperaturni koeficijent koji je obložen staklom daje najveću točnost. Ako se termistor s negativnim temperaturnim koeficijentom uključi u električni krug, njegov otpor koristi se za određivanje temperature. Ovi termistori koriste se u određenom rasponu temperatura jer se njihova karakteristika mijenja ako je raspon temperatura manji ili veći. Upotrebljavaju se u termostatskim uređajima, termalnim sensorima i regulaciji temperature.



Slika 6.4 Simbol NTC termistora (IEC standard) [11]

6.2.1 Karakteristike NTC termistora

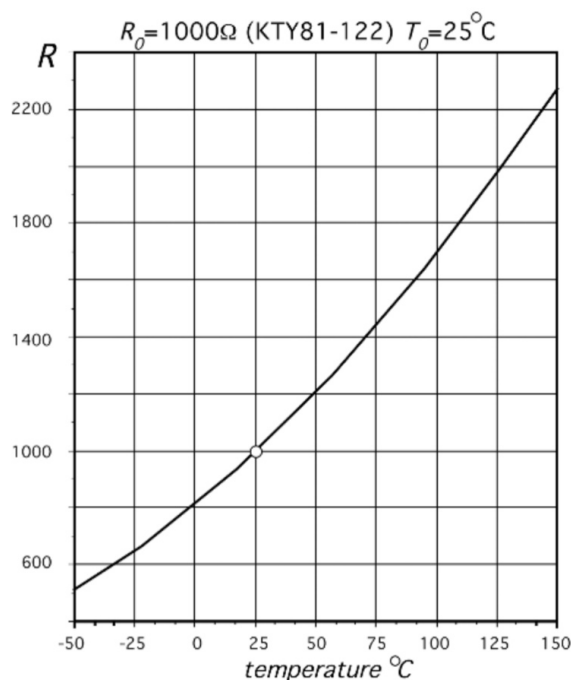
Ispitivanjem otpornosti materijala i fizičkim dimenzijama određuje se otpor NTC termistora, a odnos među temperaturom i otporom nije linearan [6]. Ako treba velika ili je širok radni raspon karakteristike termistora s negativnim temperaturnim koeficijentom, podatci se ne uzimaju iz tablica s podacima proizvođača [6]. Tolerancije nominalnog otpora na temperaturi od 25°C široke su $\pm 20\%$, a da bi se ostvarila što viša točnost termistor se zasebno kalibrira u rasponu radne temperature [6]. Pojam kalibracije govori kako se termistor treba podvrgnuti temperaturi koja je već poznata te izmjeriti njegov otpor [6]. Ako se termistoru mjeri otpor spoji se na mjerni krug [6]. Termistor se upotrebljava kao senzor apsolutne temperature, a tada električna struja koja teče kroz termistor nema temperature [6]. Radi samozagrijavanja statički se povećava temperatura termistora i opisana je formulom [6]:

$$\Delta T_H = r \frac{N^2 V^2}{S}, \quad (6-3)$$

u kojoj je r toplinski otpor unatoč okolini, N radni ciklus mjerenja, V korišteni napon tijekom mjerenja otpora i S otpor termistora na temperaturi koja je izmjerena. Ovisnost otpora o temperaturi u stvarnom uređaju mora biti precizno utvrđena, iako je ta funkcija nelinearna, pa je zbog toga važno imati analitičku jednadžbu koja veže temperaturu i otpor [6]:

$$\ln S = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2} + \frac{A_3}{T^3}, \quad (6-4)$$

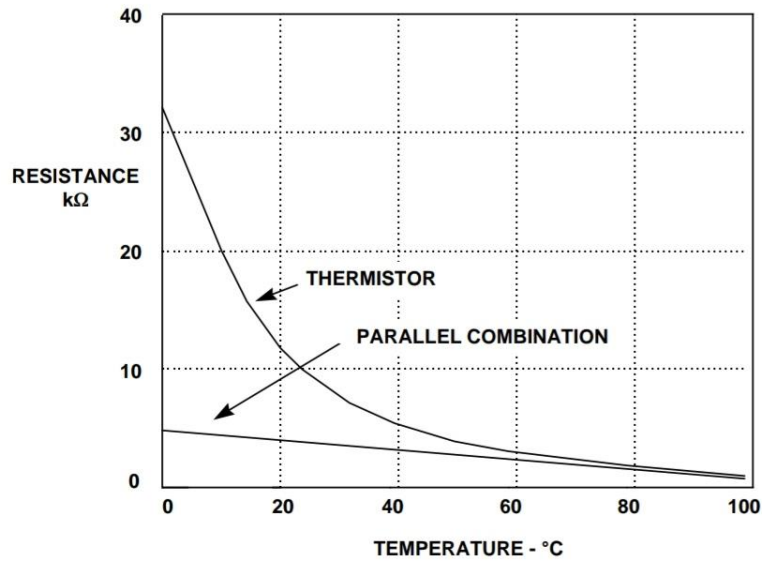
u kojoj je logaritam otpora termistora S u vezi s apsolutnom temperaturom T .



Slika 6.5 Prikaz prijenosne funkcije KTY silikonskog senzora temperature [6]

6.3 Linearnost

Temperaturni koeficijent termistora ne smanjuje se linearno kako raste temperatura, zbog toga treba linearizirati sva temperaturna područja osim onih najužih [12]. Termistori su krhki senzori te ih treba oprezno montirati da ne bi došlo do gnječenja ili odvajanja spojeva [12]. Zbog svoje male veličine termistor ima kratko vrijeme odziva i vrlo je osjetljiv na pogreške zagrijavanja radi male toplinske mase [12]. Temperaturni koeficijent termistora oscilira od $-44.000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ na 25°C do $-29.000 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ na 100°C [12]. Upravo je nelinearnost najveći izvor pogreške kada se mjeri temperatura pa je primjena termistora ograničena na uska temperaturna područja, a da bi se to izmijenilo koristi se tehnika linearizacije [12]. Linearizacija se provodi spajanjem termistora s fiksim otpornikom, a paralelna kombinacija prikazuje bolju linearnu varijaciju s temperaturom, nego što pokazuje sam termistor [12].



Slika 6.6 Linearizacija NTC termistora korištenjem 5.17kΩ [12]

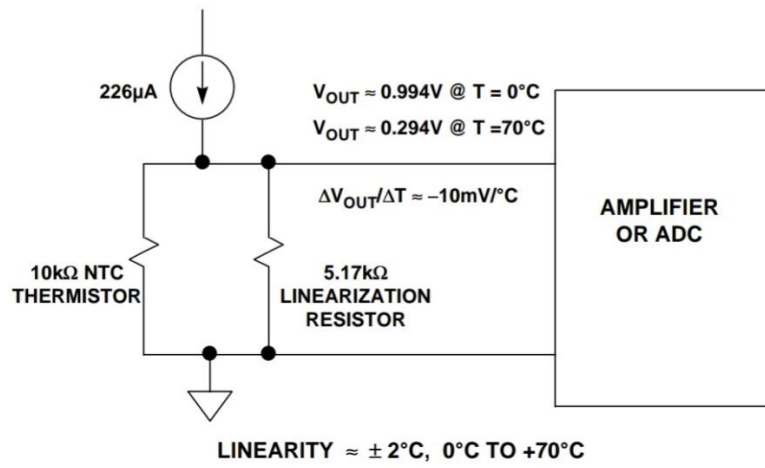
Vrijednost fiksnog otpornika računa se iz jednadžbe [12]:

$$R = \frac{RT_2 \cdot (RT_1 + RT_3) - 2 \cdot RT_1 \cdot RT_3}{RT_1 + RT_3 - 2 \cdot RT_2}, \quad (6-5)$$

u kojoj RT_1 predstavlja otpor termistora na najmanjoj temperaturi u području mjerenja koja se označava s T_1 , RT_2 je otpor termistora na središnjoj točki koja se označava s T_2 , a RT_3 je otpor termistora na najvećoj temperaturi u području mjerenja koja se označava s T_3 [12]. Središnja točka računa se prema formuli [12]:

$$T_2 = (T_1 + T_3)/2. \quad (6-6)$$

Za NTC termistor od 10kΩ otpor termistora $RT_1 = 32.650\Omega$ na 0°C , otpor termistora $RT_2 = 6.532\Omega$ na 35°C , a otpor termistora $RT_3 = 1,752\Omega$ na 70°C što daje vrijednost od 5.17kΩ za otpor [12]. Izlaz mreže termistora posjeduje nagib od oko $-10\text{mV}/^\circ\text{C}$ što govori da 12-bitni ADC ima sasvim dovoljnu rezoluciju [12].



Slika 6.7 Linearizirano termistosko pojačalo [12]

7. INFRACRVENI OPTIČKI TEMPERATURNI SENZORI

Infracrveni senzori su vrsta temperaturnih senzora koji detektiraju temperaturu s udaljenosti mjerenjem količine toplinskog zračenja koje objekti emitiraju. Ovi senzori su beskontaktni uređaji jer ih koristimo za mjerenje temperature objekta ili površine bez potrebe za izravnim kontaktom. Primjenjuju se za određivanje temperature u rizičnim okruženjima kada izrazito jaka magnetska, električna ili elektromagnetska polja i visoki naponi mjerenja čine izrazito osjetljivim na smetnje ili opasnim [6]. Svi objekti koji imaju temperaturu iznad apsolutne nule emitiraju infracrveno zračenje, a intenzitet zračenja proporcionalan je temperaturi objekta. Dvije su vrste infracrvenih temperaturnih senzora: senzori zasnovani na točkastom mjerenju i senzori zasnovani na skeniranju. Kao što i samo ime kaže senzori zasnovani na točkastom mjerenju upotrebljavaju se za mjerenje temperature samo jedne točke na nekom objektu. Senzori zasnovani na točkastom mjerenju točno i precizno mjere temperaturu na točno određenom mjestu. Senzori zasnovani na skeniranju kompleksniji su uređaji, ali mogu skenirati temperaturu cijelog objekta. Infracrveni senzori rasprostranjeni su te se koriste u raznim industrijama kao što su industrija hrane i automobilska industrija te u građevinarstvu i medicini. Najvažniji su za situacije kada trebamo izmjeriti temperaturu objekta koji se nalazi na nepristupačnom mjestu i kada moramo izbjeći izravni kontakt s objektom ili površinom radi potencijalne opasnosti. Na kraju, važno je naglasiti da infracrveni temperaturni senzori mjere površinsku temperaturu objekta, a ne unutarnju temperaturu objekta.

7.1 Toplinsko zračenje

Prosječna kinetička energija vibrirajućih čestica predstavlja se apsolutnom temperaturom, a svi atomi i sve molekule vibriraju bez obzira u kojem su objektu [6]. Izvor elektromagnetskog polja koje se proširuje brzinom svjetlosti prema van je vibrirajuća čestica [6]. Proučavajući zakone elektrodinamike saznaje se da se pokretni električni naboj veže s električnim poljem koje uspostavlja izmjenično magnetsko polje [6]. Valna duljina definira se formulom [6]:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (7-1)$$

gdje je vezana s frekvencijom, ν , putem brzine svjetlosti c .

Pomoću Planckova zakona povezuje se valna duljina i temperatura. Planckov zakon određuje gustoću toka zračenja koja se označava s W_λ kao funkciju apsolutne topline i valne duljine [6]. Gustoća toka zračenja definira se kao snaga elektromagnetskog zračenja po jednoj jedinici valne duljine i prikazuje se formulom [6]:

$$W_\lambda = \frac{\varepsilon(\lambda)C_1}{\pi\lambda^5(e^{C_2/\lambda T}-1)}, \quad (7-2)$$

u kojoj je $\varepsilon(\lambda)$ emisivnost objekta, e baza prirodnog logaritma, a C_1 i C_2 konstante.

Rezultat prosječnih kinetičkih energija izrazito golemog broja čestica koje titraju je temperatura [6]. Čestice ne titraju jednakom frekvencijom i veličinom. Razne dozvoljene frekvencije, energije i duljine raspodijeljene su u neposrednoj blizini jedna drugoj zbog čega je materijal sposoban zračiti jako velik broj frekvencija, praktički beskonačan i širiti se od dugih do kratkih valnih duljina [6]. Najveću vjerojatnost da će čestice imati određenu valnu duljinu i titrati određenom frekvencijom utvrđuje temperatura koja je ujedno statički prikaz prosječne kinetičke energije [6]. Ta određena valna duljina definirana je Wienovim zakonom, a kao rezultat izračuna dobije se valna duljina u čijoj je blizina koncentrirana velika većina snage zračenja: [6]

$$\lambda_m = \frac{2898}{T}, \quad (7-3)$$

gdje je λ_m u μm , a T u K. Wienov zakon govori da je najvjerojatnija frekvencija cijelom spektru proporcionalna apsolutnoj temperaturi i što je temperatura veća, to je valna duljina kraća [6].

8. DIODA

Diodni temperaturni senzor elektronski je komponent koji se koristi za mjerenje temperature. Diodni temperaturni senzor vrlo često naziva se i temperaturni senzorom s p-n spojem jer se njegov rad temelji na izmjeni pada napona na p-n spoju ovisno o izmjeni temperature. Materijali za diode su silicij, galij-arsenid te galij-aluminij arsenid. Linearna osjetljivost, jednostavna instrumentacija, vrlo veliki signal i veliki temperaturni raspon karakteristični su za diodni temperaturni senzor [10]. AC šumom izazivaju se temperaturne pogreške koje se pregledavaju u diodama [10].

8.1 Karakteristike diode

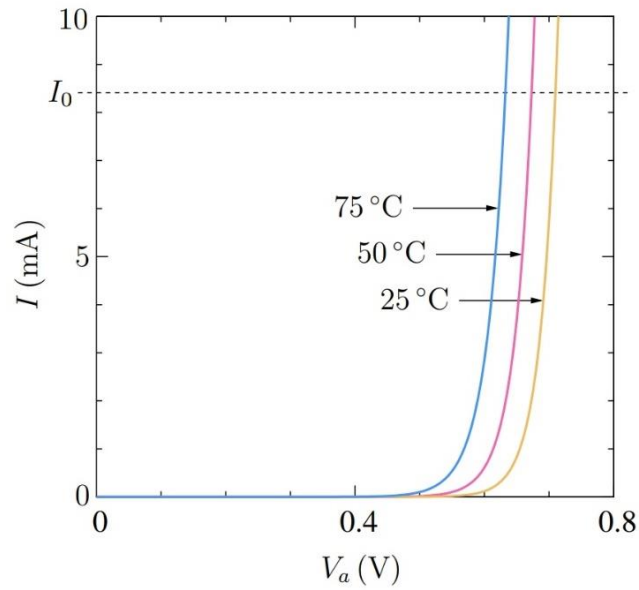
Jednadžba Shockleyeve diode glasi [13]:

$$I_D = I_s(e^{V_a/V_T} - 1) \approx I_s \quad \text{za } V_a \gg V_T, \quad (8-1)$$

u kojoj je V_a primijenjeni napon, $V_T = kT/q$ je toplinski napon, a I_s reverzna struja zasićenja. Eksponencijalni faktor smanjuje se s porastom temperature, ali s porastom temperature povećava se I_s , reverzna struja zasićenja diode [13]. Budući da je $I_s \propto n_i^2$ jednadžba glasi [13]:

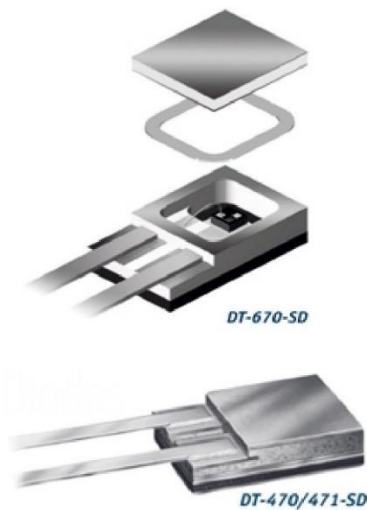
$$n_i = \sqrt{N_C(T)N_V(T)} \exp\left(-\frac{E_g(T)}{2kT}\right), \quad (8-2)$$

gdje su N_C i N_V efektivne gustoće stanja. Što je temperatura veća, veća je i struja diode za jednak primijenjeni napon, odnosno strujno-naponska krivulja diode pomjera se u lijevo s temperaturom (Slika 8.1) [13].



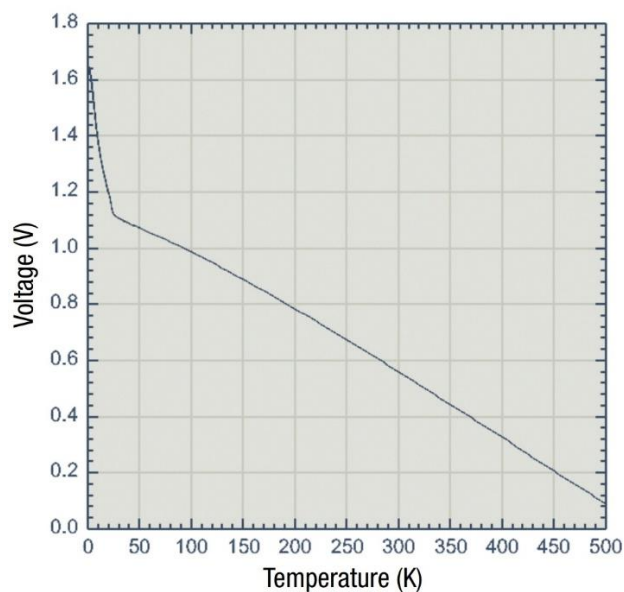
Slika 8.1 Strujno-naponska krivulja silikonske diode pod prednaponom na različitim temperaturama

Kada je struja konstantna što prikazuje I_0 na slici napon diode se smanjuje kako se temperatura povećava, a za silicijske diode (Slika 8.2) promjena iznosi $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ [13].



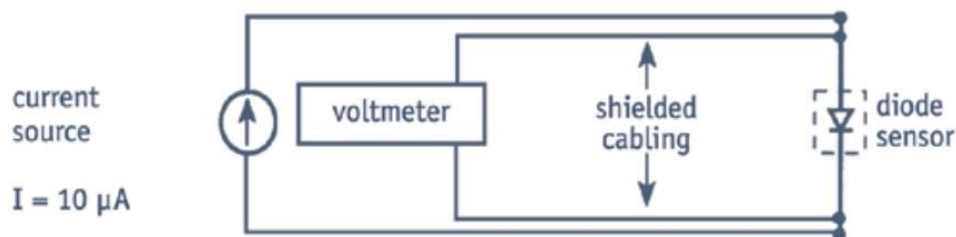
Slika 8.2 Silicijske diode [8]

Silicijske diode koriste se od 1.4 K do 500 K, a od 25K do 500K poprimaju konstantnu osjetljivost od 2.3 mV/K [10]. Ako je temperatura ispod 25K, osjetljivost nije linearna te počinje rasti [10].



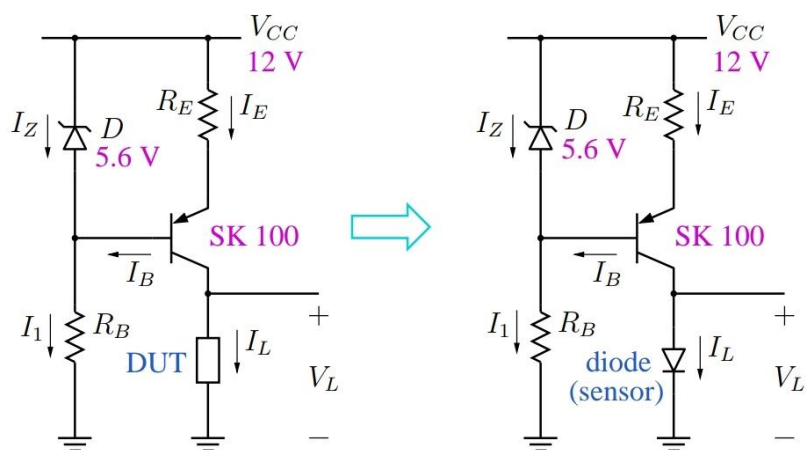
Slika 8.3 Krivulja temperaturnog odziva

Senzori sa silicijskom diodom pobuđuju se konstantnom strujom koja iznosi $10\mu A$ dok im je izlazni signal velik i iznosi 0.5V na sobnoj temperaturi te 1V na 77K [10]. Silicijske diode međusobno su zamjenjive ili su krivulje u skladu u cijelom njihovom rasponu, što se označava kao raspon tolerancije oko standardne krivulje odziva temperature i napona [10]. Razvrstavaju se u razne opsege tolerancije s najidealnijom točnošću od oko $\pm 0.25K$ od 2K do 100K te $\pm 0.3K$ od 100K do 300K [10].



Slika 8.4 Tipična shema instrumentacije diodnog senzora [10]

8.2 Izvor stalne struje



Slika 8.5 Izvedba izvora stalne struje [13]

DUT predstavlja kraticu za uređaj koji se testira, a to je diodno spojeni tranzistor.

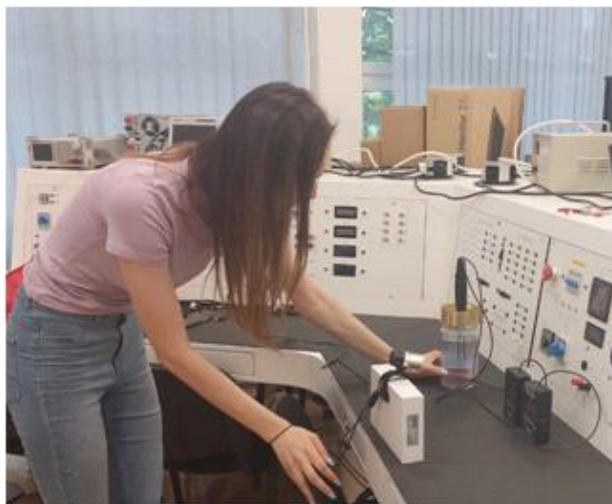
Tražena struja $I_L = I_C \approx I_E$ dobiva se pogodnim odabirom R_E , a R_E izvodimo iz sljedeće jednačbe [13]:

$$V_Z = I_E R_E + V_{EB} \approx I_L R_E + 0.7 \rightarrow R_E = \frac{V_Z - 0.7}{I_L} \quad (8-3)$$

Otpor R_B odabire se da zenerova dioda ima prednapon na željenu struju I_Z koja je nekoliko mA [13]. Pretpostavlja se kako je I_B mali pa je $I_Z \approx I_1$ [13]. Svo vrijeme dok se tranzistor nalazi u aktivnom području, krug se ponaša kao izvor konstantne struje [13].

9. MJERENJE

10. srpnja 2023. godine s početkom u 12:00 sati i završetkom u 14:00 sati provedeno je mjerenje u laboratoriju za osnove elektrotehnike T1-25 koji je smješten u zgradi Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Mjerenje je obavljeno od strane studentice Laure Kuretić (Slika 9.1), a u laboratoriju bili su prisutni prof. dr. sc. Tomislav Barić i student 3. godine sveučilišnog preddiplomskog studija elektroenergetike Filip Zebec.



Slika 9.1 Studentica Laura Kuretić s mjernom opremom



Slika 9.2 Prikazan je mjerni sklop kojeg čine termometar s otpornim temperaturnim senzorom, posuda s vodom i kamera

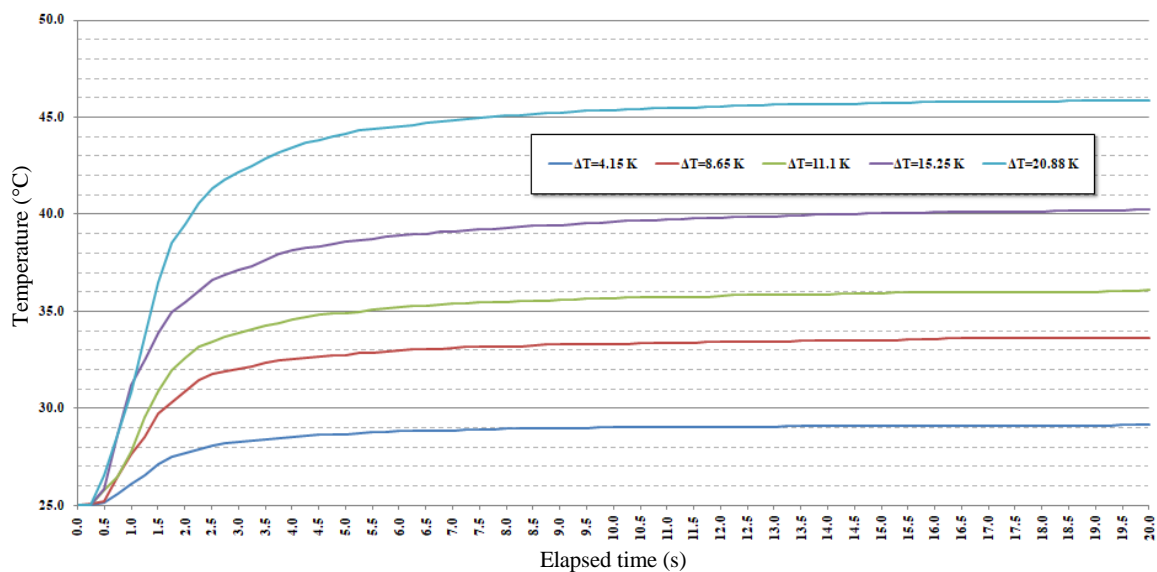
Provedeno je mjerenje temperaturnog odziva za naglu, odnosno stupnjevitu promjenu temperature što je postignuto brzim uranjanjem sonde u prethodno zagrijanu vodu. Da bi se dobili glatki grafikoni uporabljena su dva termometra (Slika 9.1), a mjerenja su izvršena korištenjem GTH 175 PT1000 termometra s RTD-om. Web kamerom za snimanje prijelaznih pojava (Slika 9.2) zabilježene su dobivene vrijednosti koje su zatim prenesene u excel datoteku. Korištenjem programa Mathcad 14 određeni su parametri zasnovani na modelu te je primijenjena metoda najmanjih kvadrata. Vrijednosti koje minimiziraju pogrešku među funkcijom modela i izmjerenim vrijednostima udovoljavaju dobivenim vrijednostima parametara (Tablica 9.1) [10].

Tablica 9.1. Prikaz dobivenih i izračunatih vrijednosti

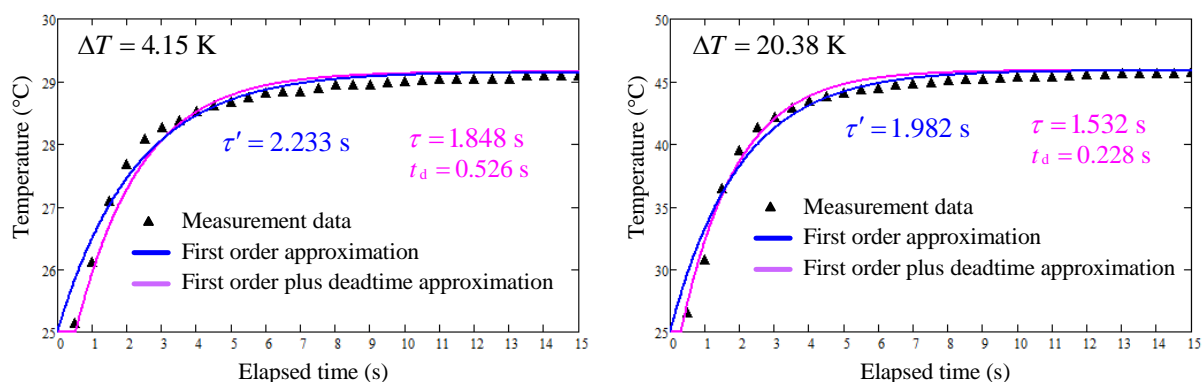
ΔT (K)	4.15	8.65	11.10	15.25	20.38
t_d (s)	0.526	0.431	0.332	0.306	0.228
τ (s)	1.848	1.763	1.675	1.599	1.532
$\tau_1 = 2 \cdot t_d$	1.052	0.862	0.665	0.612	0.457
$\tau_2 = \tau - \tau_1 / 2$	1.322	1.332	1.342	1.293	1.304

Iz podataka navedenih u tablici iznad može se uočiti da se povećanjem temperature ΔT smanjuje vremensko kašnjenje t_d , a također i vremenska konstanta τ_1 koja se s vremenskim kašnjenjem povezna izrazom $\tau_1 = 2 \cdot t_d$. Vremenska konstanta τ opada dok je toplinska vremenska konstanta τ_2 ostaje konstantna. Prosječna vrijednost toplinske vremenske konstante τ_2 iznosi $1.3186 \text{ s} \approx 1.3 \text{ s}$. Dobivani rezultati odgovaraju predviđenim rezultatima [10].

Prezentiran toplinski model, mjerenja i znatno detaljnija analiza mjernih rezultata dani su u [10] kojemu je autorica ovog završnog rada koautor. Članak [10] prošao je recenzentski postupak i prihvaćen za objavljivanje.



Slika 9.3 Prikaz temperaturnog odziva, odnosno očitavanja instrumenta PT10000 termometra na iznenadnu, stupnjevitu promjenu izmjere temperature [10]



Slika 9.4 Prikaz izmjerenog temperaturnog odziva termometra PT10000 na iznenadnu promjenu mjerene temperature i aproksimacije odziva [10]

Gledajući teoriju prijenosa topline povećanjem nadtemperature povećava se koeficijent konvekcije topline [14]. Povećanjem koeficijenta konvekcije dolazi do smanjenja toplinskog otpora uzrokovanog konvekcijom topline R_l [14]. C_l ima konstantnu vrijednost za metale (uronjena sonda), a obzirom da je toplinska vremenska konstanta određena umnoškom toplinskog otpora i toplinskog kapaciteta C_l , odnosno:

$$\tau_1 = R_1 C_1, \quad (9-1)$$

gdje vremenska konstanta τ_1 opada sa smanjenjem otpora R_1 [10].

Konstantna ostaje toplinska vremenska konstanta budući da je određena umnoškom:

$$\tau_2 = R_2 C_2, \quad (9-2)$$

u kojem je konstantan toplinski kapacitet senzora C_2 i toplinski otpor R_2 radi provođenja topline [10].

10. ZAKLJUČAK

Temperatura je fizikalna veličina koja karakterizira mjeru zagrijanosti ili ohlađenosti tijela, odnosno sustava. Za mjerenje temperature koriste se mjerni instrumenti i temperaturne ljestvice koje nam daju stvarni prikaz zagrijanosti ili ohlađenosti pojedinog tijela ili sustava. Mjerni instrumenti koji mjere temperaturu i pretvaraju ju u električni signal nazivaju se temperaturni senzori. Kontaktni temperaturni senzori u izravnom su kontaktu s površinom koju želimo izmjeriti te su zbog toga nepodobni za mjerenje udaljenih i teže dostupnih površina za koje koristimo beskontaktno temperaturne senzore. Najrasprostranjenija vrsta kontaktnih temperaturnih senzora su termoparovi čiji se rad temelji na Seebeckovom efektu. Otporni termometri su jedni od najpreciznijih temperaturnih senzora kojima se otpor mijenja s promjenom temperature, a primjer otpornog termometra je termostat. Poluvodički senzor temperature je termistor čije su dvije vrste PTC (pozitivni temperaturni koeficijent) i NTC (negativni temperaturni koeficijent). Jedni od najpoznatijih beskontaktnih uređaja su infracrveni senzori koji se koriste za mjerenje temperature u vrlo rizičnim okruženjima. Posljednja obrađena vrsta temperaturnih senzora su diode koje se nazivaju i temperaturni senzori s p-n spojem jer pad napona na p-n spoju ovisi o izmjeni temperature.

Praktični dio završnog rada utemeljen je na laboratorijskom mjerenju temperaturnog odziva za naglu i stupnjevitu izmjenu temperature koja se postiže brzim uranjanjem sonde u prethodno zagrijanu vodu. Korišteni mjerni sklop sačinjavaju termometar s otpornim temperaturnim senzorom, posuda s vodom i kamera kojom su snimljene dobivene vrijednosti. Zaključuje se kako se s povećanjem temperature smanjuje vremensko kašnjenje i vremenska konstanta. Dok vremenska konstanta opada, toplinska vremenska konstanta ostaje stalna.

LITERATURA

- [1] Nau, M. (2002). „Electrical Temperature Measurement; With Thermocouples and Resistance Thermometers“, M.K. Juchheim, ISBN: 3-935742-07-7
- [2] S. Pleslić, „Pripreme za predavanja iz Fizike 1“, dostupno na: <http://www.fer.unizg.hr/download/repository/predavanja13-2014.pdf> (21.5.2023.)
- [3] M. Jurković, „Odabir mjernog pretvornika za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru“, Završni rad, Kemijsko-tehnološki fakultet, Sveučilište u Splitu, 2020.
- [4] S. Pleslić, „Pripreme za predavanja iz Fizike 1“, dostupno na: <https://www.fer.unizg.hr/download/repository/predavanja15-2014.pdf> (15.6.2023.)
- [5] M. Vučić, „Senzorski elementi u mehatroničkim sustavima“, Završni rad, Istarsko veleučilište, 2020.
- [6] J. Fraden, „Handbook of Modern Sensors; Physics, Designs, and Applications“, Springer, New York, 1996.
- [7] N. Maslović, „Meteorološka stanica za udaljena mjerenja“, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [8] I. Šarčević, „Senzori temperature; seminarski rad“, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište J. J. Strossmayera, Osijek, 2006.

- [9] Arar, S. (2023). RTD Basics - An Introduction to Resistance Temperature Detectors.
<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/rtd-basics-an-introduction-to-resistance-temperature-detector/>
- [10] T. Barić, H. Glavaš, L. Kuretić, M. Karakašić, „Measurement and Modelling of the Thermal Response of the Resistance Temperature Sensors“, Tehnički Glasnik/ Technical Journal, Vol. 18/No.1 (March,2024), ISSN: 1846-6168.
- [11] „NTC Thermistor; Chapter 3 – Resistor Types“, dostupno na:
<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/> (17.6.2023.)
- [12] W. Kester, „Temperature Sensors: Section 6“, dostupno na:
https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Practical-Design-Techniques-Power-Thermal/Section6.pdf&ved=2ahUKEwjusMDirOn_AhU5hP0HHXaHAgEQFnoECA8QAQ&usg=AOvVaw1blclLPWe7MI0jpRR4pOKZ (20.6.2023.)
- [13] M.B. Patil, IIT Bombay, „Diode as a Temperature Sensor“, dostupno na:
https://www.ee.iitb.ac.in/~sequel/ee230/mbpth_tmpr_sensor.pdf (28.6.2023.)
- [14] Kreith, F., Manglik, R. M., Bohn, M. S. (2010). Principles of Heat Transfer. Cengage Learning, 7th edition, ISBN: 0-495-66770-6

SAŽETAK

U ovom završnom radu analizirana je tema: "Mjerenje temperature i instrumenti za mjerenje temperature". Predstavljene su fizikalne osnove na kojima se zasniva rad električnih instrumenata za mjerenje temperature. Nakon uvoda opisani su pojmovi temperature i temperaturnih ljestvica te definirane mjerne jedinice. U trećem poglavlju objašnjeni su temperaturni senzori koji su podijeljeni u dvije osnovne skupine: kontakti i beskontaktni. U svakom idućem poglavlju opisana je građa i fizikalna načela pojedinih temperaturnih senzora: termoparova, otpornih termometara, termistora, infracrvenih senzora i dioda. Na samom kraju provedeno je laboratorijsko mjerenje temperature.

Ključne riječi: temperatura, temperaturna ljestvica, temperaturni senzor, termopar, otporni termometar, termistor, infracrveni senzor, dioda

ABSTRACT

In this final paper, the topic: "Temperature measurement and instruments for temperature measurement" is analyzed. The physical foundations on which the operation of electrical instruments for temperature measurement is based are presented. After the introduction, the concepts of temperature and temperature scales are described, as well as defined measurement units. In the third chapter, temperature sensors are explained, which are divided into two basic groups: contact and non-contact. In each subsequent chapter, the structure and physical principles of individual temperature sensors are described: thermocouples, resistance thermometers, thermistors, infrared sensors and diodes. At the very end, a laboratory temperature measurement was carried out.

Keywords: temperature, temperature scale, temperature sensor, thermocouple, resistance thermometer, thermistor, infrared sensor, diode

PREGLED LITERATURE

Knjiga „Electrical Temperature Measurement: with thermocouples and resistance thermometers“ autora M. Nau objašnjava pojam temperature i govori o električnom mjerenju temperature s termoparovima i otpornim termometrima, a senzori na kojima se temelji knjiga detaljno su objašnjeni u ovom završnom radu.

„Pripreme za predavanja iz Fizike 1“ autorice S. Pleslić govore o pojmovima topline, temperature i temperaturnih ljestvica koji su opisani u 2. poglavlju ovog rada. Osim spomenutih pojmova autorica opisuje: vrste termometara, toplinsko širenje tekućina i krutih tvari, plinski zakoni, toplinski kapaciteti i kalorimetrija.

U završnom radu, „Odabir mjernog pretvornika za mjerenje temperature u šaržnom reaktoru“, opisani su osnovni dijelovi regulacijskog kruga, karakteristike mjernih pretvornika, temperatura, mjerni instrumenti te su na kraju odabrani odgovarajući mjerni pretvornici koji mjere temperaturu u šaržnom reaktoru. Od navedenog u ovom radu korišteni su pojmovi temperature i mjernih instrumenata.

Knjiga „Handbook of Modern Sensors; Physics, Designs, and Applications“ opisuje gotovo sve vrste senzora i njihove karakteristike, a ovaj rad usredotočen je na temperaturne senzore iz 17. poglavlja u knjizi, preciznije na termistore i infracrvene optičke temperaturne senzore.

U seminarskom radu „Senzori temperature“ opisane su četiri vrste kontaktnih temperaturnih senzora: termopar, otpornički detektor temperature, termistori i diode. Svi navedeni senzori opisani su u radu.

Članak „Measurement and Modelling of the Thermal Response of the Resistance Temperature Sensors“ autora T. Barića, H. Glavaša, L. Kuretić i M. Karakašić, prikazuje toplinski model otpornog senzora temperature. Iznimno je važan za laboratorijsko mjerenje budući da je u članku prezentiran model, mjerenje i detaljnija analiza rezultata.

ŽIVOTOPIS

Laura Kuretić rođena je 2. prosinca 2001. godine u Požegi. Završila je Osnovnu školu Julija Kempfa u Požegi. Sudjeluje na županijskim natjecanjima iz fizike, kemije, povijesti i geografije te na državnom natjecanju iz tehničke kulture. Bavi se gimnastikom i atletikom. Nakon završene osnovne škole upisuje prirodoslovno-matematičku gimnaziju u Požegi. Tijekom srednjoškolskog obrazovanja uči slovački jezik i članica je novinarske skupine. Uspješno završava srednju školu 2020. godine i upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Trenutno je studentica treće godine na smjeru elektroenergetike te planira upisati diplomski studij na istom fakultetu.

Potpis autora