

6. SENZORI ZA MJERENJE TEMPERATURE

U procesnoj industriji se temperatura pojavljuje vrlo često kao upravljana veličina. Procesi se odlikuju širokim temperaturnim opsezima koji se ne mogu tačno mjeriti samo jednom vrstom mjernih elemenata, nego većim izborom senzora sa različitim principima na kojima se zasniva njihov rad.

Senzori za mjerenje temperature se mogu podijeliti na primarne i sekundarne. U prve spadaju termometri prema kojima se ustanovljavaju termodinamičke temperaturne skale. Oni imaju složenu konstrukciju i veliku inerciju. Zato, mada omogućavaju mjerenje temperature sa visokom tačnošću, ovi termometri nisu pogodni za primjene u sistemima za upravljanje procesima.

Za tu namjenu se isključivo koriste sekundarni termometri koji će ovdje biti razmatrani. Mjerenje temperature je moguće uporabom stepena zagrijanosti dva tijela od kojih jedno ima stepen zagrijanosti koji se mjeri i uzima se za referentni. Senzor temperature treba biti u dobroj termičkoj vezi s tijelom (ili medijem) čija temperatura se mjeri, i ne smije uticati na mjerenu temperaturu. Utvrđivanje stepena zagrijanosti se vrši na osnovu bilo kakvog fizičkog svojstva tijela senzora, koje zavisi od temperature. Potrebno je da je ovaj efekat dobro ponovljiv i da se može relativno lako brojno izraziti. Ove uslove zadovoljavaju tako zvana termometrijska tijela. Jednakost temperature mjenog i termometrijskog tijela se postiže pri termodinamičkoj ravnoteži. Idealno teoretski se ova ravnoteža nikad ne uspostavlja u potpunosti, zbog toga što se razmjena toplote zasniva na razlici temperatura. Sa inženjerskog stanovišta može se smatrati da je ravnoteža uspostavljena nakon nekoliko vremenskih konstanti senzora jer po pravilu tada odstupanje postaje manje od greške senzora.

6.1. SENZORI SA ŠIRENJEM ČVRSTIH TIJELA

6.1.1. Dilastometrijski senzori

Promjene dužine jednog termometrijskog tijela bilo kakvog oblika poprečnog presjeka, dužine l_0 , na temperaturi 0°C može se pri promjeni temperature definisati pomoću izraza:

$$l_T = l_0 (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

l_T - dužina termometrijskog tijela na temperaturi T

α, β - koeficijenti temperaturnog širenja termometrijskog tijela.

Za izradu dilatometrijskih senzora se koriste samo materijali za koje je zavisnost dužine od temperature približno linearna:

$$l_T = l_0 (1 + \alpha T).$$

Od posebnog su značaja materijali za koje ovakva zavisnost vrijedi u širem temperaturnom opsegu i koeficijent α ima što veću vrijednost.

Kako su materijali od kojih se realizuju davači podložni procesu starenja, da bi se postigla zahtijevana ponovljivost ovi materijali se podvrgavaju procesu ubrzanog starenja. Time se obezbjeđuje stabilnija struktura materijala i bolja ponovljivost pri mjerenju.

Mjerenje se realizuje tako što se jedan kraj šipke čvrsto fiksira za podlogu, a drugi kraj je pokretan. Sa porastom temperature slobodni kraj se pomjera. Ovaj pomjeraj je indikator promjene temperature. Relativna promjena dužine materijala je malena pa se na slobodni kraj vezuju mehanički mehanizmi ili pretvarači pomjeraja u električni signal za indikaciju temperature. Generalno, zbog malog pomjeraja, ovaj princip mjerenja temperature se sve manje koristi i to po pravilu samo tamo gdje temperatura nije glavna upravljana promjenljiva, pa nije neophodna velika tačnost.

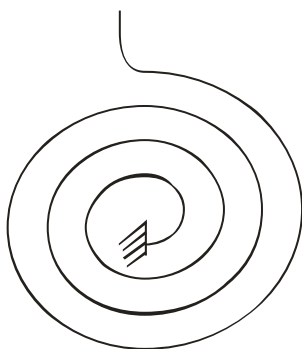
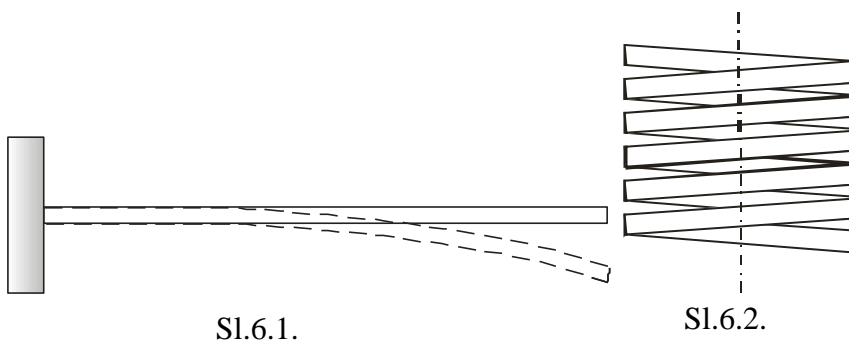
6.1.2. Bimetalni senzori

Osnovu ovih senzora čini traka sastavljena od dvije folije različitih metala čvrsto spojenih po cijeloj površini. Ovo se legiranje vrši u vakuumu,

tako da se dobije homogena traka koja se dalje može mehanički obrađivati. Traka je sastavljena od materijala kod koji je što veća razlika koeficijenata temperaturnog širenja α . Jedan kraj bimetala je čvrsto fiksiran za podlogu, a drugi kraj je pokretan. Zbog razlike u vrijednostima α , sa porastom temperature slobodni kraj se savija u smjeru materijala sa manjim α . Ovo pomjeranje je indikator promjene temperature.

Za industrijske primjene se uglavnom koriste tri tipa bimetalnih mjernih traka:

- ravna traka (Sl.6.1.)
- torziona opruga (Sl.6.2.)
- Arhimedova spirala (Sl.6.3.)



Sl.6.3.

Ovakvi bimetalni senzori se izvedu za klase tačnosti $\pm 0.5\%$ do $\pm 1.5\%$ za niže temperaturne opsege i do $\pm 3\%$ za više temperaturne opsege (-30 do $+400^\circ\text{C}$).

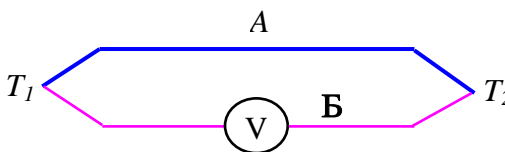
Kod većine komercijalnih bimetala se kao metal sa manjim temperaturnim koeficijentom širenja koristi invar (legura željeza i nikla) sa koeficijentom $\alpha = 1.7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Kao materijal sa većim koeficijentom širenja se koristi legura nikla i hroma (do oko 400°C), ili bronza (do oko 150°C).

Primjena bimetalnih termometara je uglavnom ograničena za grublja mjerenja gdje je temperatura pomoćna promjenljiva. Češće se kombinuju sa električnim kontaktima za signalizaciju ili automatsku regulaciju temperature električnih grijača male snage i u termostatima.

Kod električnih motora veće snage ugrađuju se u vidu automatskih električnih osigurača motora od pregrijavanja. Moguće je postići tačnost $\pm 0.2^\circ\text{C}$.

6.2. MJERENJE TEMPERATURE POMOĆU TERMOPAROVA

Ako se dva provodnika od različitih materijala A i B zaleme ili zavare u spojevima kao na Sl.6.4. i pri tome je temperatura jednog spoja T_1 različita od temperature T_2 , voltmetrom je moguće registrovati postojanje elektromotorne sile ili ako se spoji ampermetar, struju. Veličina elektromotorne sile zavisi od vrste materijala i razlike temperatura spojeva. Ova zavisnost se može dobro aproksimirati formulom:



Sl.6.4.

$$E = \alpha(T_1 - T_2) + \beta(T_1^2 - T_2^2).$$

Mnogi materijali u termospojevima pokazuju termo-električni efekat, ali samo neki od njih su od praktičnog značaja jer imaju maleno β i veliko α . Tada se može smatrati da je elektromotorna sila srazmjerna razlici

temperatura. Koeficijent α predstavlja osjetljivost termopara ili Zebekovu (*Seebeck*) konstantu.

Za praktično korištenje termoelektričnog efekta potrebno je poznavati tri osnovna empirijska zakona koji vrijede za njega.

Zakon i homogenim materijalima. Termoelektrična struja se ne može održavati u kolu od jednog homogenog materijala bez obzira na razliku temperatura u pojedinim njegovim tačkama.

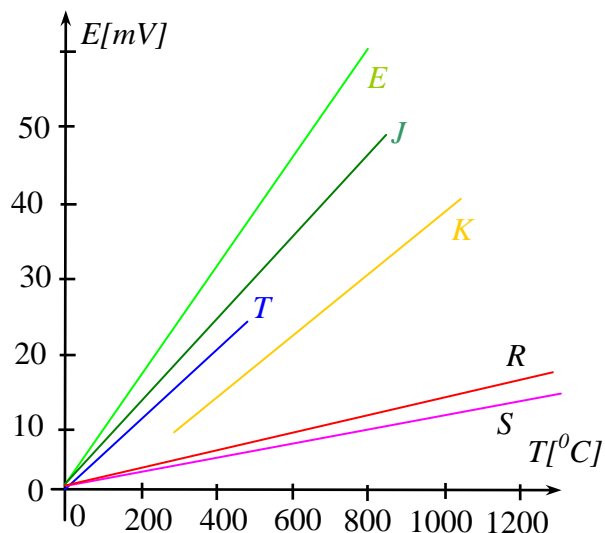
Zakon o međumaterijalima. Algebarska suma termo-elektromotornih sila u kolu sastavljenom od nekog broja različitih materijala je nula, ako je čitavo kolo na uniformnoj temperaturi. Direktna posljedica ovog zakona je da se treći homogeni materijal unese u kolo bez termoelektričnog efekta ako su njegovi krajevi na istoj temperaturi.

Zakon o sukcesivnim temperaturama. Neka dva različita homogena materijala proizvode termo elektromotornu silu E_1 , kada se spojevi nalaze na temperaturama T_1 i T_2 i termo-elektromotornu silu E_2 kada se spojevi na temperaturama T_2 i T_3 . Elektromotorna sila koja se generiše pri temperaturnoj razlici spojeva T_2 i T_3 će biti E_1+E_2 . Ovaj zakon omogućava kalibraciju spojeva na jednoj referentnoj temperaturi, a da se koristi pri drugačijoj referentnoj temperaturi.

Statičke karakteristike u zavisnosti od razlike temperatura (T_1-T_2) za standardne termoparove su date u tabeli 6.1. i na Sl 6.6.

Tabela 6.1.

Termopar	Tip	Maks. temp. $^{\circ}C$	Osjetljivost $\mu V/^{\circ}C$
Hromel-konstantan	E	1000	61
@eljezo-konstantan	J	800	52
Hromel-alumel	K	1300	41
Platina(13%Rh)-platina	R	1600	12
Platina(10%Rh)-platina	S	1700	8
Bakar-konstantan	T	400	40



Sl.6.6.

Okviran sastav nekih legura u termoparovima (datim u Tabeli 6.1) je sljedeći:

Hromel: 90% *Ni*, 10% *Cr*

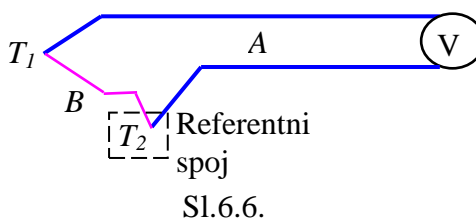
Alumel: 95% *Ni*, 5% *Al, Cr, Mn*

Konstantan: 55% *Cu*, 45% *Ni*

Standardno se termoparovi nazivaju prema komercijalnim nazivima koje su im dali proizvođači. Zbog nepreciznosti u korištenju ovih naziva sve je više prihvaćeno simboličko obilježavanje termistora prema određenim tipovima.

Ako je T_1 mjerena temperatura, tada temperaturu T_2 treba održavati konstantnom, jer će u tom slučaju izlazni napon biti direktno proporcionalan mjerenoj temperaturi. Ako se mijenja temperatura T_2 , mijenja se elektromotorna sila i na taj način unosi greška. Postupak u kome se temperatura T_2 drži konstantnom naziva se kompenzacija hladnog kraja. Koriste se tri standardna postupka za postizanje ovog uslova.

Prvi način koji je dugo



Sl.6.6.

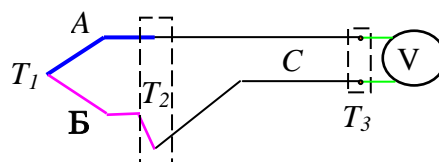
korišten kao jedini jeste da se referentna temperatura T_2 održava na temperaturi trojne tačke vode (temperatura svježe vode od leda koji se topi), kao na Sl.6.6. U tom slučaju se referentni spoj drži u posudi sa vodom i ledom koji se topi. U posudu se dodaje led i odvodi voda tako da se temperatura stalno održava na vrlo približno 0°C . Ovaj postupak je proceduralno zametan i eneregetski neracionalan pa se danas sve manje koristi.

Druga varijanta da se temperatura T_2 drži konstantnom jeste da se referentni spoj drži u komori sa konstantnom temperaturom. Pomoću manjeg grijača, jednostavnog regulatora i senzora temperature održava se viša konstantna temperatura referentnog spoja.

Treći način kompenzacije jeste da se prati temperatura referentnog spoja i da se u skladu sa njenom vrijednošću generiše napon koji je po intenzitetu jednak komponenti elektromotorne sile kao posljedici odstupanja temperature u odnosu na kalibracionu vrijednost. Iz zakona o sukcesivnim temperaturama slijedi da će kopenzacija biti izvršena ako je generisani napon suprotnog polariteta od stvorene elektromotorne sile. Ovo se obično realizuje pomoću kompenzacionog mosta. To je mostni spoj, sastavljen od temperaturno nezavisnih otpornika i termootpornika. Kada temperatura referentnog spoja poraste u odnosu na referentnu (obično 20°C) u dijagonali mosta će se pojaviti takav napon da kompenzira elektromotornu silu proizvedenu ovim povećanjem temperature. Za istu namjenu se nekada koriste integrisana kola sa poluprovodničkim sensorima temperature koja će biti detaljnije razmatrana kasnije.

Ako su krajevi kojima je priključen indikator ili adapter na različitim temperaturama, tada će se pojaviti dodatna elektromotorna sila. U industriji je rijetko moguće i opravdano postaviti mjerni i referentni spoj blizu jedan drugog. Jasno je da je skupo praviti konekcione krajeve od materijala od kojih su termospojevi za velika rastojanja, specijalno u slučaju plemenitih metala. Tada su i ovi spojevi potencijalno izvori dodatnih elektromotornih sila o čemu treba voditi računa pri postavljanju instalacija pri mjerenju pomoću termoparova.

Kada mjerni spoj (spoj termopara sa indikatorom i/ili regulatorom) nije vrlo blizu referentnog spoja postoje bar dva



Sl.6.7 .

druga spoja na krajevima mjernog spoja. Po pravilu se tada radi o drugim materijalima (obično legurama) pa će se pojaviti dodatna nepoznata teroelektromotorna sila ako su ovi spojevi na različitim temperaturama (Sl.6.7.). Da bi se eliminisala pojava dodatne termoelektromotorne sile oba nastavka provodnika linija za povezivanje trebaju biti na istoj temperaturi. Na Sl.6.7. ovo je naznačeno kao prvi spoj sa uniformnom temperaturom T_2 i drugi spoj sa uniformnom temperaturom T_3 .

6.6. MJERENJE TEMPERATURE POMOĆU METALNIH TERMOTOPNIKA

Otpornost različitih materijala (provodnika ili poluprovodnika) se mijenja sa promjenom temperature. Hronološki su u upotrebu prvo ušli termootpornici od provodnih materijala: *Pt*, *Ni*, *Cu*, *Fe* i danas se najviše koriste.

Zavisnost otpornosti od temperature (T) u širokom temperaturnom području se može predstaviti izrazom:

$$R_T = R_0 (1 + \alpha T + \beta T^2)$$

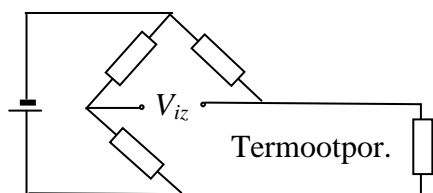
gdje je:

R_0 -otpornost na 0°C

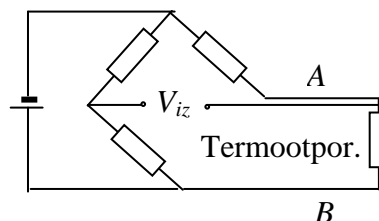
α , β -koeficijenti temperaturne osjetljivosti

Najviše korišten materijal za proizvodnju termootpornika je platina. NJeno osnovno svojstvo je velika postojanost osobina na različite uticaje jer spada u kategoriju plemenitih materijala (slabo hemijski reaguje sa drugim materijalima). Takođe ima vrlo visoku tačku topljenja (1769°C). Odnos otpornosti na 0°C i 100°C za platinu približno iznosi $R(100^\circ\text{C})/R(0^\circ\text{C})=1.39$. Nominalna otpornost ovog otpornika tipično iznosi $100\ \Omega$ (kreće se maksimalno do $500\ \Omega$). Imajući u vidu relativno malu osjetljivost ($0.392\ \Omega/^\circ\text{C}$) i malu ukupnu otpornost platinskog otpornog senzora, čak i male vrijednosti otpornosti za vezu mogu dovesti do nezanemarive greške pri mjerenju.

Pored platine u praksi se često, iz grupe neplemenitih materijala, za proizvodnju termootpornika koristi nikl. Odlikuje se odnosom otpornosti $R(100^\circ\text{C})/R(0^\circ\text{C})=1.67$ što je povoljnije nego kod platine. Takođe ima veliku specifičnu otpornost, ali nižu gornju granicu mjerene temperature.

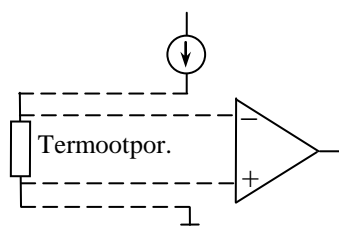


Sl.6.8.



Sl.6.9.

Mjerenje temperature sa visokom tačnošću, zbog male nominalne otpornosti, zahtijeva precizne postupke konverzije otpornosti u odgovarajući električni signal. Korištenjem mostne mjerne šeme može se eliminisati problem uticaja otpornosti provodnika za vezu na tačnost mjerenja Sl.6.8. Ovakav mjerni most zahtijeva četiri provodnika za vezu, vanjsko napajanje i tri otpornika sa nultim temperaturnim koeficijentom. Problemi se eliminišu povezivanjem otpornog senzora u mostnu šemu sa tri provodnika kao na Sl. 6.9. Ako su provodnici *A* i *B* istih dužina, njihov uticaj će se poništiti jer se nalaze u suprotnim stranama mjernog mosta. Treći provodnik služi samo za mjerenje napona i kroz njega praktično ne teče struja.



Sl.6.10.

Problemi mjerenja otpornosti termootpornika mogu se eliminisati i korištenjem strujnog izvora za napajanje senzora, kao na Sl.6.10. Direktnim mjerenjem napona na termootporniku preko dva zasebna provodnika eliminiše (termootpornik sa četiri provodnika) se uticaj otpornosti provodnika za vezu. Kroz ove provodnike, zbog velike ulazne optornosti operacionog pojačavača, praktično ne protiče struja, pa se pad napona na njima može zanemariti.

6.4. MJERENJE TEMPERATURE POMOĆU POZISTORA

Poluprovodnički senzori temperature se obično nazivaju pozistorima jer u mjernom području u kome se koriste imaju pozitivan temperaturni koeficijent. Iz tog razloga se često nazivaju i *PTC* otpornicima (Eng. *Positive temperature coefficient*). Van ovog opsega imaju svojstvo da im

otpornost opada sa promjenom temperature. Posebnim tehnološkim procesom u proizvodnji poluprovodnika može se postići da imaju širi opseg temperature u kome ovo vrijedi, pa su poznati i kao otpornici sa proširenim opsegom otpornosti.

Otpornost pozistora u zavisnosti od temperature analitički se obično predstavlja funkcijom:

$$R(\Delta T) = R_{25} (1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2)$$

R_{25} -otpornost na 25°C

α, β -koeficijenti temperaturene osjetljivosti

$\Delta T = T - 25$ – odstupanje temperature od 25°C .

Mjerno područje ovih senzora je od -50°C do 150°C . U poređenju sa prethodno razmatranim senzorima oni imaju mnogo uži temperaturni opseg. Ipak je bitno imati u vidu da je za mnoge oblasti kao što su: prehrambena industrija, klimatizacija, meteorologija, u uređajima široke potrošnje (kućni aparati, automobili ...) ovo temperaturno mjerno područje sasvim dovoljno.

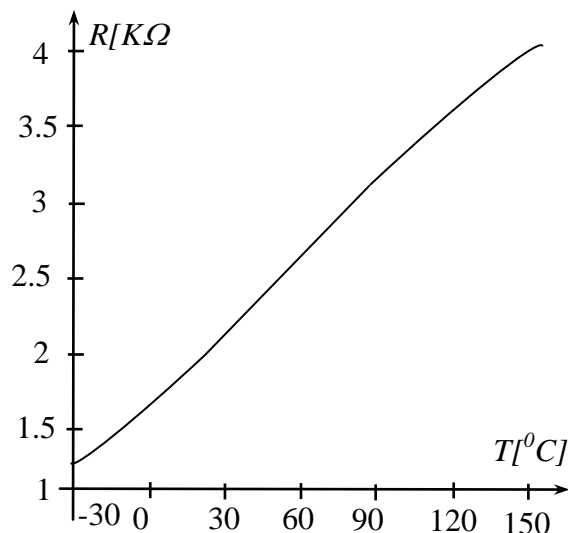
Ovi senzori su jednostavnije konstrukcije i niže cijene u odnosu na termootpornike ili termoparove. Greška senzora iznosi uobičajeno 0.3°C do 0.5°C . Nominalna otpornost je reda $K\Omega$. U cilju poređenja sa termootpornicima u tabeli 6.6. su date vrijednosti temperaturnih koeficijenata.

Iz tabele se vidi da je osjetljivost pozistora dva puta veća (odnosi linearnih koeficijenata). Za više temperature ovaj odnos je još veći jer je za pozistore kvadratni temperaturni koeficijent pozitivan, a za termootpornike negativan.

Tabela 6.6.

Senzor	linearni temperaturni koeficijent $\alpha [1/^{\circ}\text{C}]$	kvadratni temperaturni koeficijent $\beta [1/^{\circ}\text{C}^2]$
Platinski termootpornik	$3.92 \cdot 10^{-3}$	$1.88 \cdot 10^{-5}$
Silicijumski pozistor	$6.85 \cdot 10^{-3}$	$-6.8 \cdot 10^{-7}$

Relativna promjena otpornosti poluprovodničkog pozistora u opsegu 0°C do 100°C iznosi 105% dok kod termootpornog platinskog senzora za isti opseg iznosi 38%. Takođe je vrlo bitno da je nominalna vrijednost otpornosti pozistora više od deset puta veća nego kod termootpornika.



Sl.6.11.

Tipična zavisnost otpornosti od temperature ilustrovana je uobičajenom statičkom karakteristikom predstavljenom na Sl.6.11.

Pretvaranje otpornosti pozistora u električni signal nije kritično sa stanovišta uticaja provodnika za povezivanje kao kod termootpornika, zbog mnogo veće nominalne otpornosti pozistora. U ovom slučaju može se pojaviti problem poznat kao samozagrijavanje pozistora. Efekat je posebno karakterističan ako je pozistor napajan iz strujnog izvora konstantne struje. Ukoliko struja kroz pozistor nije dovoljno malena tada zbog njenog proticanja dolazi do oslobađanja nezanemarive toplote u pozistoru. Posljedica je da raste temperatura pozistora a zbog toga i njegova otpornost. Na taj način se ulazi u pozitivan zatvoreni ciklus jer porast temperature daje porast otpornosti, a takođe porast otpornosti znači porast temperature pozistora. Rezultat je otkaz pozistora. Da bi se spriječila ova pojava potrebno je da struja kroz pozistor bude dovoljno malena i da njegova termička veza sa okolinom bude vrlo dobra. Kod digitalnih sistema za akviziciju se vrlo često problem eliminiše tako što se kolo sa pozistorima

pobuđuje samo kada se vrši očitavanje, a preosatalo vrijeme kroz pozistor ne protiče struja.

Veoma značajna prednost pozistora u odnosu na prethodno navedene je da se lako mogu realizovati kao dio njihovog adaptera, koji se obično proizvode u formi integrisanih poluprovodničkih kola. U tom slučaju se dobijaju sve prednosti koje vrijede za aktivne poluprovodničke senzore temperature, a koji će biti razmatrani kasnije.

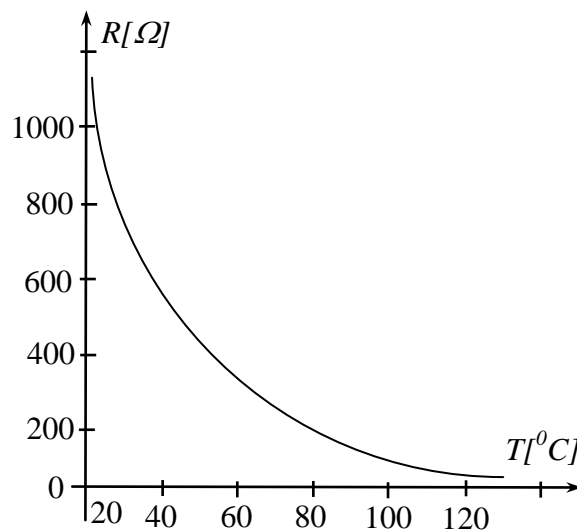
6.6. MJERENJE TEMPERATURE POMOĆU TERMISTORA

Termistori se proizvode od oksida metala mangana, nikla, kobalta, hroma, željeza i drugih. Oksidi u obliku praha se presuju pri visokim temperaturama (oko 1000°C) i vezuje za dva provodnika. Statička karakteristika im je izrazito nelinearna pa se obično aproksimira izrazom:

$$R_T = R_0 e^{B \left(\frac{T_0 - T}{T_0 T} \right)}$$

B - konstanta koja zavisi od sastava materijala od koga je sačinjen termistor

R_0 - otpornost termistora na temperaturi T_0 .



Sl.6.12.

Oblik zavisnosti otpornosti od temperature kod tipičnog termistora je prikazan na Sl.6.12. Činjenica da im je karakteristika izrazito nelinearna određuje njihovu primjenu. Glavna prednost im je velika osjetljivost u užem temperaturnom opsegu. U okolini sobne temperature njihova osjetljivost je $3\%/^{\circ}\text{C}$ do $5\%/^{\circ}\text{C}$, što je desetak puta više nego kod metalnih otpornika. Sa porastom temperature osjetljivost im opada. Tipično se koriste za mjerenje temperature u području od 0°C do 120°C (maksimano do 250°C).

Otpornost termistora na sobnoj temperaturi može biti veoma različita, a određena je sastavom materijala i uslovima sinterovanja. Za tipične nominalne otpornosti na sobnoj temperaturi reda $10\text{K}\Omega$, pri mjerenju temperature nije potrebno koristiti četvorožično vezu kao kod metalnih termootpornika. Naprimjer, za termistor koji ima temperaturni koeficijent $5\%/^{\circ}\text{C}$ otpornost veza od 10Ω , daje grešku mjerenja od samo 0.05°C , što je 500 puta manje nego ekvivalentna greška do koje dolazi pri korištenju platinskog termootpornika.

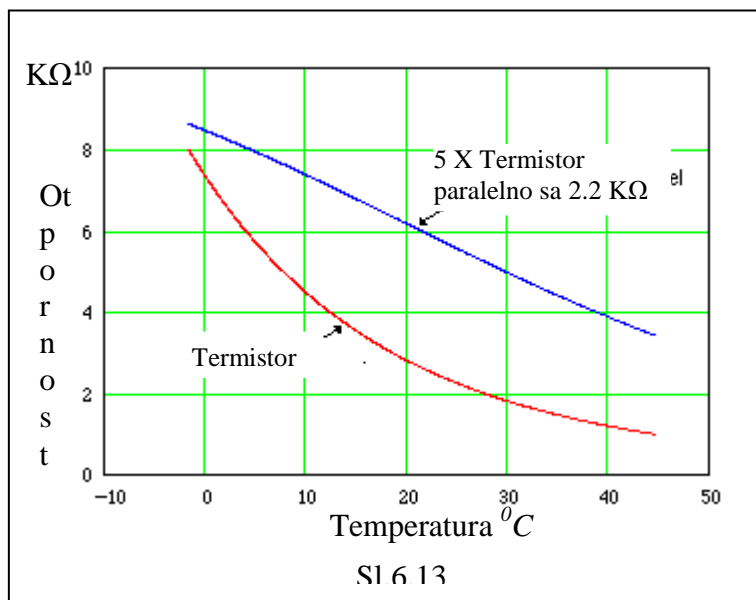
Za mjerenje temperature termistori se obično vezuju u mostne šeme. Kao i kod pozistora, kod primjene u mostnim šemama, treba voditi računa da zbog proticanja struje snaga disipacije ne bude velika tako da ne dođe do samozagrijavanja senzora.

Postoji više različitih načina linearizacije njihovih statičkih karakteristika dodavanjem odgovarajućih električnih kola, koja predstavljaju složene linearizovane termistorske pretvarače, ali se ovi postupci i kola sve manje koriste.

Jedan vrlo jednostavan postupak linearizacije statičke karakteristike termistora je da se on veže paralelno sa fiksnim otpornikom. Otpornost fiksnog otpornika treba da bude približno jednaka otpornosti termistora na sredini njegovog temperaturnog opsega. Grafikon na Sl.6.13 ilustruje uticaj fiksnog otpornika od $2.2\text{ K}\Omega$, vezanog paralelno sa termistorom otpornosti $2.252\text{ K}\Omega$ na temperaturi 25°C . U cilju očiglednije ilustracije efekta linearizacije na dijagramu je "linearizovana kriva" ucrtane sa faktorom skaliranja 6. Ovakva tehnika linearizacije se preporučuje u svim slučajevima kada se termistori koriste zajedno se jednostavnim hardverom za akviziciju sa A/D konvertorima niske rezolucije (obično manje od 12 bita).

Savremeni digitalni sistemi za akviziciju podataka i upravljanje omogućavaju malu grešku rezolucije i softversko provođenje linearizacije statičkih karakteristika (odgovarajućim algoritmima ili tabela pretraživanja), pa linearizacija analognog signala nema tako velik značaj.

Savremenim postupcima proizvodnje mogu se proizvesti termistori sa vrlo uskim granicama tolerancije tako da se mogu direktno zamjenjivati



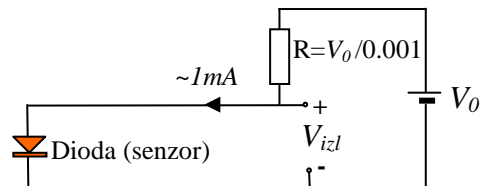
bez potrebe kalibracije a sa greškom svega $0.1^{\circ}C$.

Najčešći razlog otkaza termistora je odvajanje provodnika od tijela termistora zbog vibracija. Sinterovani oksid metala tijela termistora je sklon oštećenjima zbog djelovanja vlažnosti. Iz tog razloga se tijela termistora zalivaju u staklenu ili epoksidnu masu koja štiti tijelo termistora od djelovanja vlage.

6.6. POLUPROVODNIČKI SENZORI TEMPERATURE

Poluprovodničke komponente na bazi $p-n$ spoja (diode i tranzistori) koriste se kao senzori temperature. Osnovni princip se zasniva na činjenici da se napon direktno polarisanog $p-n$ spoja mijenja približno linearno sa osjetljivošću oko $-2,2 \text{ mV}/^{\circ}C$. Osnovna njihova prednost u odnosu na prethodno razmatrana jeste što se radi o vrlo jeftinim komponentama. Osim toga, oblik i dimenzije dioda i tranzistora su takvi da se mogu prilagoditi potrebama minijaturizacije, ukomponovati u adaptore realizovane u formi integrisanih kola i mogu imati velike brzine odziva.

Za vrlo jednostavnu i jeftinu realizaciju mjerenja temperature se može koristiti bilo koja standardna silicijumska didoda opšte namjene. Obična dioda je najjeftiniji senzor temperature, a može dati sasvim zadovoljavajuće rezultate pod uslovom da se može provesti kalibracija u dvije tačke i da postoji stabilan izvor struje pobude. Ove karakteristike su direktna posljedica već navedenog svojstva da se napon



Sl.6.14.

direktno polarisanog $p-n$ spoja mijenja približno linearno sa osjetljivošću oko $2,2 \text{ mV}/^{\circ}C$. Električna šema adaptera je krajnje jednostavna kao što je prikazano na Sl. 6.14. Ključno je da se održava što konstantnija struja kroz senzor tako što se koristi strujni izvor konstantne struje ili konstantan otpor (R) na izlazu stabilnog naponskog izvora. Bez kalibracije očekivana inicijalna greška je veoma velika (reda $\pm 30^{\circ}C$), veća od greške bilo kog drugog senzora. Tačnost se može veoma jednostavno povećati kalibracijom. Pri kalibraciji u dvije tačke dobija se tipično pet puta veća tačnost, a u tri tačke tačnost veća deset puta za čitavo mijerno područje.

U cilju povećanja tačnosti treba za dvije vrijednosti struje diode (I_1 i I_2), tako da je njihov odnos 1:10, tipično, izmjeriti dvije vrijednosti napona diode (V_1 i V_2). Apsolutna temperatura (u stepenima Kelvina) se tada može izračunati iz jednačine:

$$T = (V_1 - V_2) / (8.7248 \times 10^{-5} \ln(I_1/I_2)).$$

Ovaj metod se koristi za kalibraciju mnogih senzora temperature u integrisanim kolima.

Kada se koriste standardni tranzistori kao senzor temperature tada se oni vezuju u takozvani diodni režim, tako što se baza i kolektor tranzistora direktno spoje.

Bitna je i činjenica da se napon $p-n$ spoja mijenja sa promjenom struje, pa pobuda $p-n$ spoja treba biti iz izvora konstantne struje. Takođe, bitno ograničenje u širem korištenju za mjerenje temperature je niska gornja granica temperature koja iznosi oko $150^{\circ}C$. Istovremeno, temperaturna karakteristika $p-n$ spoja je sa lošom ponovljivošću, pogotovo ako se radi o komponentama od različitih proizvođača.

Prva vrlo popularna kola sa poluprovodničkim senzorima namjenski realizovnim za mjerenje temperature, koja se i danas vrlo često koriste su *AD590* (proizvođač *Analog Devices*) i *LM35* (proizvođač *National Semiconductor*). Efekat je da postoje komercijalni poluprovodnički termometri u formi jedne integrisane komponente koja sadrži senzor i adapter u istom kućištu. Ove izvedbe daju napon ili struju proporcionalne temperaturi.

Komercijalno integrisano kolo *AD590* se napaja naponom $4V$ do $30V$ i predstavlja strujni izvor koji generiše struju čija je vrijednost proporcionalna vrijednosti temperature sa osjetljivošću $1\mu A/^{\circ}K$. Integrisano kolo serije *LM35* daje na izlazu napon direktno srazmijeran temperaturi sa osjetljivošću od $10 mV/^{\circ}C$.

Kola sa poluprovodničkim senzorima temperature proizvode mnogi proizvođači, tako da postoji široka ponuda različitih realizacija. Uglavnom se mogu svrstati u grupu sa naponskim ili strujnim izlazom, analognim ili digitalnim izlazom.

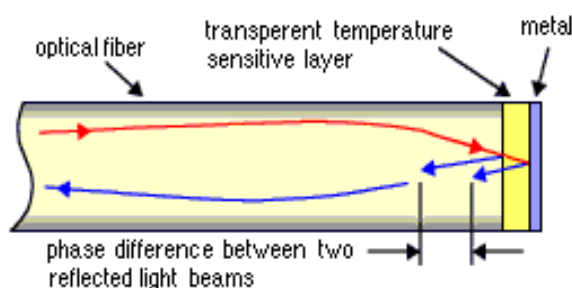
Opšte karakteristike poluprovodničkih senzora su linearnost izlaza, relativno vrlo male dimenzije, ograničen temperaturni opseg (tipično od $-40^{\circ}C$ do $120^{\circ}C$), niska cijena, velika brzina odziva, dobra tačnost ako su

kalibrisani, ali slaba direktna zamjenljivost. Zbog velike osjetljivosti mnogo su pogodniji za mjerenje malih temperaturnih promjena nego za mjerenje apsolutne temperature. Takođe, poluprovodnički čip često nema dobar termički kontakt sa okolinom. Poluprovodnički senzori temperature su tipično vrlo pogodni za korišćenje u ugrađenim računarskim sistemima (Eng. *embedded systems*). Tačnost koja se postiže korištenjem poluprovodničkih senzora temperature je standardno $0.5^{\circ}C$ do $1^{\circ}C$.

6.7. SENZORI TEMPERATURE POMOĆU OPTIČKIH VLAKANA

Senzori pomoću optičkih vlakna pripadaju grupu senzora koji koriste staklena vlakna kao posebno sredstvo za pobuđivanje ili očitavanje senzora. U osnovi vlakno je isto kao vlakno koje se koristi u komunikacijama.

Postoji više svojstava optičkih vlakana koja omogućavaju njegovo korištenje za izvršavanje funkcije senzorskog elementa. Kod optičkog vlakna izrađenog za mjerenje temperature je obično slobodni završetak vlakna zatvoren slojem temperaturno osjetljivog materijala i metalnim slojem koji su na mjerenoj temperaturi, a podatak o temperaturi se dobija direktno na osnovu faze ili spektra odbijene svjetlosti. Za ilustraciju rada senzora na osnovu faze odbijene svjetlosti data je Sl.6.16. Osnovni osjetljivi dio senzora predstavlja prozirni stakleni sloj nanesen na metalnu podlogu koja je na mjerenoj temperaturi. Svjetlosni snop na ovaj senzorski sloj dolazi optičkim vlaknom. Dio svjetlosti se odbija direktno sa površine (prve

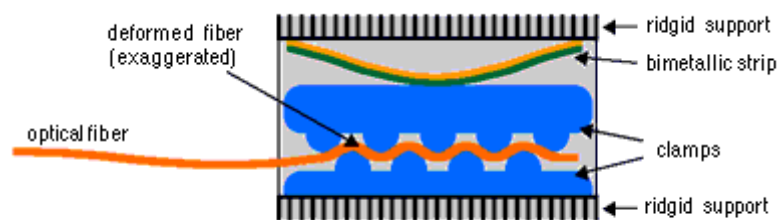


Fiber Optic Temperature Sensor Using Phase Interference

granične površine) ovog sloja, a drugi dio prolazi kroz prozirni sloj i reflektuje se sa kontaktne površine između metala i staklenog sloja. Dakle, reflektovani snop svjetlosti se sastoji od dvije komponente koje su međusobno fazno pomjerene. Fazni pomak je direktno zavisao od temperature jer se promjenom temperature prozirnog sloja mijenjaju njegovi geometrijski i optički parametri (debljina sloja i koeficijent prelamanja optičkog zraka). U ovom slučaju fazni pomak dva zraka svjetlosti je pomoćna promjenljiva, a adapter konvertuje faznu razliku u odgovarajući električni signal.

U osnovi isti senzorski dio se može koristiti tako da se kao pomoćna promjenljiva koristi spektar odbijene svjetlosti jer apsorbovani dio spektra zavisi direktno od geometrijskih i optičkih svojstava temperaturno osjetljivog prozirnog sloja.

Druga varijanta optičkih senzora koristi neki od "klasičnih" senzora (bimetalni sloj ili drugi) za modulisanje zraka svjetlosti pri prolasku kroz



Fiber Optic Temperature Sensor Using Fiber Deformation

Sl.6.16

optičko vlakno. Osnovni princip je ilustovan na Sl.6.16. Bimetalna traka je fiksirana na krutu podlogu koja je na temperaturi koja se mjeri. Sa promjenom temperature dolazi do deformacije bimetalne trake (u skladu objašnjenjem datim u 6.1.2.). Bimetalna traka pritiskom na krutu masku deformiše optičko vlakno i time mijenja njegova optička svojstva. Na taj način dobija se promjena optičkih svojstava optičkog vlekna s promjena temperature.

Senzori temperature pomoću optičkih vlakana spadaju u grupu novih komponenata koje još nisu široko prezentovane u literaturi. Ovi senzori i odgovarajući dodatni elementi su relativno skupi i koriste se po pravilu samo u nekim specijalnim primjenama gdje nije moguće koristiti "klasične"

senzore. Takav primjer je mjerenje temperature namotaja uljem hlađenih visokonaponskih transformatora. Senzori sa žicama su opasni po zdravlje (često i život) svakog ko je u blizini mjernih uređaja, u slučaju pojavljivanja vrlo visokih naponskih pikova (reda 500 kV). Takođe, indukovani napon predstavlja šum vrlo visokog nivoa koji se superponira na korisni signal. U ovakvim situacijama senzori sa optičkim vlaknima su praktično jedino rješenje.

Sadašnje stanje proizvodnje i korišćenja optičkih senzora je slično stanju poluprovodničkih senzora temperature prije više od 2 decenije. Posmatrano sa tog aspekta, može se očekivati njihova niža cijena i šire korišćenje u mjeri u kojoj bude napredovao razvoj i uvođenje optičkih vlakana i sistema u različite oblasti.

6.8. DINAMIKA SENZORA TEMPERATURE

Dinamikara senzora temperature određena je veličinama od kojih zavisi brzina razmjene toplote između senzora i okoline i prenosa toplote unutar tijela senzora. Fizikalni fenomeni koji omogućavaju konverziju temperature u pomoćnu promjenljivu mogu se smatrati trenutnim u odnosu na pomenutu razmjenu toplote. Iz tog razloga se u analizi dinamike senzora u obzir uglavnom uzima proces razmjene toplote.

Najjednostavniji dinamički model se dobija ako se usvoji pretpostavka da je cjelokupna masa pretarača na uniformnoj temperaturi (gradijent temperature unutar senzora je zanemariv). Tada se dinamika senzora može predstaviti funkcijom prenosa:

$$G(s) = \frac{1}{\tau s + 1},$$

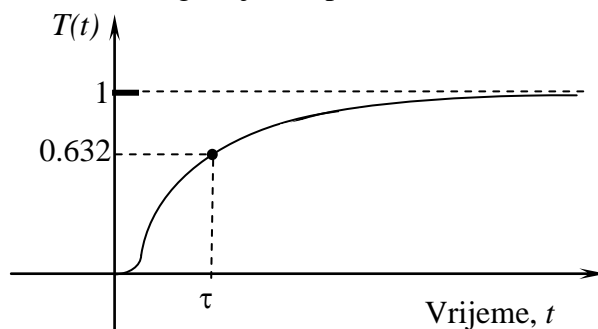
gdje je τ vremenska konstanta senzora. Vrijednost vremenske konstante se može odrediti na osnovu matematičko-fizičkog modelovanja. Ovaj postupak je vrlo zametan i zahtijeva poznavanje svih fizičkih karakteristika senzora i materijala od kojih je izrađen.

U praksi se za određivanje vremenske konstante obično koristi eksperimentalni postupak koji je mnogo jednostavniji. Vremenska konstanta se obično određuje poznatim postupkom na osnovu odskočnog odziva. Odskočni odziv se dobija ako se senzor koji je u stanju temperaturne ravnoteže (jednaka temperatura senzora i medija u kome se senzor nalazi) prebaci u medij sa drugom temperaturom. Tada će se temperatura i izlaz senzora mijenjati dok se ne uspostavi novo stacionarno stanje. Tipičan oblik odskočnog odziva senzora je prikazan na Sl.6.17, pri čemu je sa $T(t)$ označen izlaz senzora, usvojena vrijednost za početno stanje jednaka 0, a vrijednost novog stacionarnog stanja 1. Vremenska konstanta senzora je jednaka vremenu potrebnom da odskočni odziv dostigne 63% vrijednosti novog stacionarnog stanja, prema kome teži (Sl.6.17).

Tačniji dinamički model se može predstaviti funkcijom prenosa:

$$G(s) = \frac{e^{-\tau_0 s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}.$$

U ovom modelu je uzet u obzir gradijent toplote unutar senzora, kao i čisto



Sl.6.17

vremensko kašnjenje kao posljedica prenosa toplote kroz kućište senzora. Ipak, za većinu dinamičkih sistema je dovoljno usvojiti model prvog reda.

Pri određivanju dinamike senzora treba imati u vidu da brzina odziva zavisi i od brzine kretanja fluida u koji je senzor postavljen. Standardno su vremenske konstante senzora temperature reda nekoliko sekundi i više.