

## Beskontaktni senzor temperature

---

*Beskontaktni senzori temperature realizovani u infracrvenom delu spektra elektromagnetnog zračenja su poznati i često korišćeni senzori temperature. U ovom radu je pokušano da se na osnovu istih fizičkih principa na osnovu kojih su realizovani senzori u infracrvenoj oblasti, principa Plankovog zakona zračenja crnog tela, ostvari beskontaktni senzor temperature u vidljivom delu spektra. Dobijeni rezultati su pokazali da je pokušaj ove realizacije potpuno opravdan, i da su dobijene vrednosti, u granicama greške, korektne.*

---

### Uvod

Temperatura je jedna od osnovnih fizičkih veličina, i jako često je potrebno poznavati njenu vrednost. Merenje i tačno određivanje temperature ima izuzetan značaj za sve aspekte života. Međutim, merenje temperature nije jednoznačno i način na koji se merenje vrši razlikuje se od situacije do situacije. Postoje različiti načini merenja temperature. Svi oni su zasnovani na promeni neke fizičke veličine pod dejstvom temperature (promena otpornosti, energetskog procepa, količine emitovanog zračenja, pritiska, zapremine). Generalno govoreći, tri su načina kojima se toplota prenosi: kondukcija, konvekcija i radijacija.

Kondukcija je direktan prenos toplote kroz materiju. Konvekcija je indirektan prenos toplote indukovane termalnim kretanjem gasa ili tečnosti. Radijacija je direktan prenos toplote (ili nekog drugog vida energije) kroz prostor. Termalna radijacija je zapravo elektromagnetno zračenje koje se prostire unutar infracrvenog, vidljivog i ultraljubičastog dela spektra. Radijacija se prostire pravolinijski, može biti reflektovana ili refraktovana i deo zračenja koji padne na aktivnu površinu fotodetektora je obrnuto proporcionalan kvadratu rastojanja između detektora i izvora zračenja.

Prema načinu merenja, termometri se dele na kontaktne i beskontaktno, a po oblastima merenja na nisko temperature (od  $-100^{\circ}\text{C}$  do  $400^{\circ}\text{C}$ )

*Ivana Jovanović  
(1978), Smederevo,  
16. oktobra 84/33,  
učenica 4. razreda  
Gimnazije u  
Smederevu*

*Milica Maksić  
(1980), Niš, Jovana  
Ristića 2/12, učenica  
3. razreda Gimnazije  
Bora Stanković u  
Niš*

**MENTOR:**

*Nebojša Bogdanović,  
student  
Elektrotehničkog  
fakulteta u Beogradu*

i visoko temperaturne (od 500°C do 5000°C) senzore. Termometri koji su nama od interesa su beskontaktni termometri, i to u infracrvenom delu spektra i beskontaktni termometri u vidljivom delu spektra. Svi termometri koji mogu meriti beskontaktno su nelinearni i često veoma skupi, ali zato imaju malu vremensku konstantu (vreme oporavka) i širok merni opseg. Beskontaktni termometri koji su nama od interesa su radijacioni termometri, i to dvobojni pirometri.

## Podela i princip rada radijacionih pirometara

Postoje četiri osnovne tehnike za merenje temperature usled zračenja tela: totalna radijacija, pirometrija, fotometrija i optički metod. Polazeći od veličine čijim se merenjem dolazi do temperature objekta, radijacioni termometri se dele na dve grupe (Stanković 1987):

Tabela 1. Tipovi radijacionih termometara

|   |   |
|---|---|
| Termometri na bazi intenziteta zračenja | Spektralni radijacioni pirometri<br>Pirometri sa određenim opsegom zračenja<br>Termometri na bazi totalnog zračenja |
| Termometri na bazi boje zračenja        | Dvobojni pirometri  |

Radijacioni termometri se primenjuju kada nije moguće ili nije pogodno korišćenje klasičnih kontaktnih termometara. To je u oblasti visokih temperatura iznad tačke očvršćavanja zlata, a pogotovu iznad 1500°C, kada praktično ni jedan kontaktni termometar ne može da radi duže vreme bez posledica po svoje karakteristike. Kod radijacionih termometara senzor je udaljen od izvora zračenja kome se određuje temperatura, te on apsorbuje manji deo energije koju zrači objekat. Usled toga, temperatura senzora se ne menja znatno i vrlo je bliska sobnoj temperaturi, pa samim tim ne dolazi do oštećenja senzora.

Tipične oblasti primene radijacionih termometara u oblasti visokih temperatura su merenja u metalurgiji (pri topljenju i livenju metala), hemijskoj industriji, farmaciji (temperaturska dijagnostika), staklarskoj, keramičkoj pa i prehrambenoj industriji (pečenje, kontrola temperature u raznim procesima). Radijacioni termometri predstavljaju najpogodnije instrumente za merenje temperatura na površinama materijala, jer pri merenju ne utiču na raspodelu temperature objekta.

Pored već nabrojanih mogućnosti za primenu radijacionih termometara, postoje i neke sofisticiranije primene kao što su:

- a) Merenje temperature pokretnih objekata (vozila, živih bića, ili nebeskih tela u astronomskim merenjima).

- b) Merenje temperature otvorenih voda radi otkrivanja nepoželjnih zagrevanja od strane industrijskih objekata.
- c) Otkrivanje suviše zagrejanih mesta na dalekovodima i drugim elektroenergetskim postrojenjima.
- d) Precizno određivanje temperaturske raspodele na površini ljudskog tela u dijagnostičke svrhe.

Rad radijacionog pirometra zasniva se na detekciji emitovanog zračenja sa površine zagrejanog tela, tj. rad ovog pirometra je zasnovan na Plankovom zakonu zračenja crnog tela. Idealno crno telo je ono koje na svim temperaturama apsorbira svo zračenje koje padne na njega. Crno telo je takođe idealan izvor zračenja. Za proizvoljno realno telo promenljive emisivnosti  $\varepsilon(\lambda, T)$  ova raspodela je data relacijom (1),

$$\varphi_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{A \varepsilon(\lambda, T) C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)}, \quad (1)$$

pri čemu je  $\varphi_{\lambda}(\lambda, T)$  snaga zračenja crnog tela po jedinici talasne dužine,  $A$  površina, a  $T$  temperatura tela koje emituje zračenje,  $C_1 = 2\pi h c^2 = 7.7418 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$  – prva radijaciona konstanta,  $C_2 = hc/k = 1.43879 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$  – druga radijaciona konstanta,  $\varepsilon(\lambda, T)$  emisivnost tela (maksimalna vrednost je za crno telo i iznosi 1).

Integracijom jednačine (1) po svim talasnim dužinama može se dobiti izraz za ukupnu snagu zračenja crnog tela, poznat pod nazivom Stefan-Bolcmanov zakon

$$W = \sigma A T^4, \quad (2)$$

gde je  $\sigma$  Stefan-Bolcmanova konstanta i iznosi  $5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ , a  $A$  površina tela sa koga se vrši zračenje.

Diferenciranjem izraza (1) po svim talasnim dužinama dobija se Vinov zakon pomeranja (on nam definiše talasnu dužinu na kojoj je izračena energija zračenja crnog tela na posmatranoj temperaturi maksimalna)

$$\lambda_m T = b, \quad (3)$$

gde je  $\lambda_m$  talasna dužina koja odgovara maksimumu zračenja crnog tela na temperaturi  $T$ , a  $b$  Vinova konstanta.

Dakle, apsolutna temperatura se može meriti ili merenjem ukupne (izračene) energije zračenja crnog odnosno realnog tela na posmatranoj temperaturi ili određivanjem spektra zračenja crnog tela. Greška merenja u ovim slučajevima prevashodno potiče od emisivnosti realnog tela čija se temperatura meri, od okruženja u kome se vrši merenje i načina na koji

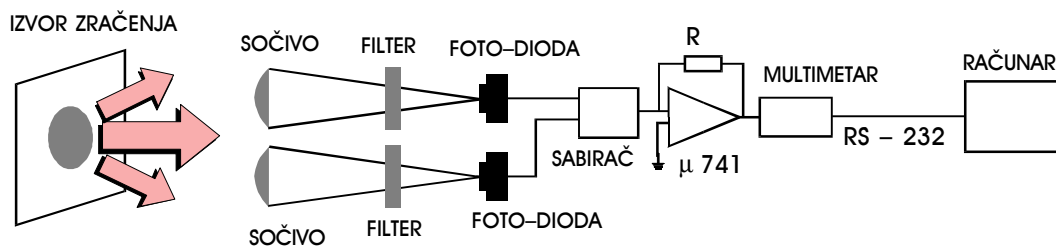
se meri (merenje pomoću optičkog fibera ili bez njega, i merenje bihromatskim ili polihromatskim metodama).

Nedovoljno poznavanje karakteristika emisivnosti tela unosi veliku grešku prilikom merenja, pa se koristi po pravilu jedna od polihromatskih metoda. Ne određuje se ceo spektar zračenja realnog tela, već se zbog jednostavnosti meri izračena energija na nekoliko talasnih dužina, a potom se obradom rezultata dobija temperatura.

Detaljno sprovedene analize pokazuju da polihromatske metode smajuju samo instrumentalnu grešku, a ne i metodska (Matavulj 1996). Iz ovoga proizilazi da je najjednostavniji, a u isto vreme i dovoljno dobar metod merenja bihromatski metod.

## Aparatura

Realizovani merni sistem (slika 1) sastoji se iz tri podsistema: optičkog, detektorskog i elektronskog. U narednom delu će svaki od njih biti posebno opisan.



Slika 1.

Aparatura mernog sistema beskontaktnog senzora temperature.

Figure 1.

The experimental setup.

Optički sistem ima zadatak da fokusira zračenje izračeno sa zagrejanog tela na fotodetektor. Naime, izvori koje smo mi koristili praktično zrače u prostornom uglu od  $2\pi$ . Ako pretpostavimo da je izvor zračenja tačkast i da je senzor na rastojanju 1 m od izvora zračenja, površinska gustina snage koja dolazi od izvora zračenja u neku tačku na toj sferi poluprečnika  $r = 1\text{ m}$  iznosi  $P = \frac{P_0}{4\pi r^2}$ . Pošto je efektivna površina fotodiode

$S = 5\text{ mm} \times 5\text{ mm} = 25\text{ mm}^2$ , na fotodiodu pada snaga zračenja  $P_F = S \cdot P = 2 \cdot 10^{-4} P_0$ . Dakle, iz ovoga se vidi da jako mali deo od snage  $P_0$  dolazi do aktivne površine fotodiode, što može dovesti do toga da je odnos\*  $\frac{S}{\text{NEP}} < 1$ , ( $S \equiv P_F$ ). Zato nam je potreban optički sistem za fokusiranje zračenja. On se sastoji se od dva sabirna sočiva oznake 20Ø -F500 (ovde 20Ø označava dijametar sočiva, a F-500 označava fokus 500 mm, firme Hamamatsu, Tokyo), delitelja snopa.

\* NEP (NOISE EQUIVALENT POWER) je ekvivalentni fluks vezan za detektor koji bi proizvodio izlazni signal jednak rms šumu izlaza s na stalnoj frekvenciji i u opsegu nekih stalnih talasnih dužina  $\Delta f$ . NEP je definisan sa  $\text{NEP} = s/R$ , gde je  $s$  rms šum struje ili napona, a  $R$  osetljivost detektora na ulazni fluks struje

Detektorski sistem se sastoji od dve fotodiode inverzno polarisane naponom od 30 V, povezane (slika 1) tako da na izlazu daju razliku ulaznih signala. Korišćene fotodiode su silicijumske fotodiode N tipa, oznake FDPN1. Neke od njenih najvažnijih osobina su: maksimum odziva je na 900 nm, malo vreme odziva, niska, kapacitivnost (8 pF na 1 MHz), nizak NEP (maksimalno  $7 \cdot 10^{-13}$  W/Hz<sup>1/2</sup> na 900 nm), mala struja mraka (tipično 2 nA, maksimalno 20 nA), probojni napon je tipično 250 V, linearnost u širokom opsegu. One su zapravo trebalo da daju odnos ulaznih signala, ali to nije bilo moguće zbog nedostatka A/D konvertora. Da bi ipak nekako imali informaciju o oba signala, mi ih oduzimamo (ovo ima za posledicu da moramo unapred da snimimo ponašanje izvora zračenja u jednom frekventnom opsegu). Ovaj signal razlike se vodi na operacioni pojačavač  $\mu 741$  (sistem se podešava tako da je signal na izlazu iz oduzimača signala jednak nuli kada se ispred fotodioda ne nalaze filteri).

Ispred fotodetektora se nalaze optički filteri propusnog opsega 20 nm. Filteri su odabrani tako da im je centralna talasna dužina (kao i propusni opseg) u crvenom delu spektra. Tokom rada izvršena su i merenja sa raznim kombinacijama filtera, ali se, kao što se moglo pretpostaviti, pokazalo da kako se udaljavamo od infracrvene oblasti ka ultraljubičastoj, rezultati postaju sve besmisleniji. To se posebno može primetiti ako se centralne talasne dužine filtera razlikuju toliko, da pripadaju različitim spektralnim opsezima.

Sama detekcija bitno zavisi od tipa pirometra. Ako je visokotemperaturni, najčešće se koristi bliski IC spektar, pa stoga i Si ili Ge fotodetektor, a ako je niskotemperaturni onda InSb ili PbS fotodetektor. Pošto je izlazni signal iz fotodetektora uobičajeno mali (zbog male količine zračenja kolektovanog na fotodetektor), on se obavezno prosleđuje na predpojačavač, a zatim i na pojačavač čime se postiže dovoljno veliki nivo električnog signala (nama predpojačavač nije bio potreban jer je energija zračenja dovoljno velika, pošto radimo u vidljivom delu spektra).

Elektronski sistem čini  $\mu 741$  koji je povezan na multimetar. Multimetar je preko inerfejsa RS-232 prikačen na računar. Akvizicija podataka se obavlja programom Digiscope, firme Voltcraft. Podaci se čitaju tri puta u sekundi.

Da bi radijacioni pirometar ispravno radio energija upadnog zračenja koja pada na aktivnu površinu fotodetektora ( $S$ ) mora biti veća od vrednosti NEP-a (odnosno, teorijski mora biti, dok je praktično ovaj odnos par redova veličine). To omogućava postojanje ekvivalentnog električnog signala na izlazu iz fotodetektora, a time i detektibilnost merne veličine.

Ukupna snaga emitovana sa zagrejanog tela temperature  $T$  koja stiže do fotodetektora je

$$P(T) = k \alpha \varphi(T), \quad (4)$$

pri čemu je  $k$  koeficijent koji definiše deo snage emitovane sa zagrejanog tela u prostorni ugao određen aperturom optičkog senzora,  $\alpha$  koeficijent slabljenja u optičkom detekcionom sistemu.

Osnovni faktor u jednačini (4) predstavlja snaga  $\varphi(T)$  koju izrači zagrejano telo u opsegu talasnih dužina  $\lambda_0 \pm \Delta \lambda$ , (ovaj opseg je određen propusnim opsegom optičkog filtra) i ona je predstavljena integralom spektralne snage  $\varphi(\lambda, T)$  koju emituje zagrejano telo

$$\varphi(T) = \int_0^{\infty} \varphi(\lambda, T) d\lambda = \int_{\lambda_0 - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda_0 + \frac{\Delta\lambda}{2}} \varphi(\lambda, T) d\lambda \quad (5)$$

Ovaj integral se ne može izračunati analitički i mora se računati numerički. Međutim, kako je opseg talasnih dužina  $\lambda_0 \pm \Delta \lambda$  u kome se vrši integracija mali, to je u njemu spektralna snaga emitovana sa zagrejanog tela približno linearna iako se smatra da se u naznačenom opsegu talasnih dužina emisivnost ne menja onda se može izvršiti linearizacija integrala (Matavulj 1996). Linearizacijom se dobija

$$P(T) = k \alpha \varphi(T) = k \alpha \varphi(\lambda_0, T). \quad (6)$$

Koeficijent  $k$  je definisan površinom sa koje se detektuje zračenje i rastojanjem zagrejanog tela od optičkog sistema, i on je jednak

$$k = 2 \sin^2 \frac{\arctg \phi_{1/2}}{2} = 2 \sin^2 \frac{\arctg \frac{\sqrt{A}}{D}}{2} \quad (7)$$

gde je  $\phi_{1/2}$  polovina centralnog ravanskog ugla za prostorni ugao definisan aperturom optičkog senzora,  $A$  površina spota,  $D$  udaljenost zagrejanog tela od senzorske glave optičkog detekcionog sistema. Odnos  $A$  i  $D$  nije sasvim proizvoljan. Svaki radijacioni pirometar poseduje faktor koji se zove minimalni prečnik spota (mete) koji se obeležava sa  $F$  i jednak je  $D/d$ , gde je  $d$  dijametar spota. Faktor  $F$  mora imati vrednost između 3 i 500. Ako je faktor  $F$  relativno mali radi se o tzv. širokougaonom pirometru, a ako je relativno veliki o uskougauom pirometru. Uobičajeno je da se, ako se mere niske temperature, koristi uskougauoni radijacioni pirometar. U našim merenjima faktor  $F$  uzima vrednosti od 10 do 20 ( $d$  je 5 cm za sijalice, a 10 cm za reflektor i sunce,  $D$  je 100 cm).

Optički detektori koji pretvaraju optički ulazni signal u ekvivalentnu električnu vrednost u ovom razmatranju se uzimaju kao linearni, radi lakšeg proračuna. Za linearne senzore izlaz se uzima kao:

$$R_\lambda(T) = S_\lambda P_\lambda(T), \quad (8)$$

pri čemu je  $R$  električni ekvivalent mernog signala,  $S$  osetljivost fotodetektora.

Pošto je pirometar dvobojni, to se na osnovu gore opisanog, uzimajući u obzir da su emisivnost zagrejanog tela i osetljivost fotodetektora približno konstantni za obe talasne dužine ( $S_{\lambda_1} \approx S_{\lambda_2}$  i  $\epsilon_{\lambda_1} \approx \epsilon_{\lambda_2}$ ) temperatura može naći iz izraza izvedenog pomoću (7), (6) i (1):

$$\frac{R_1(T)}{R_2(T)} = \frac{S_1 P_1}{S_2 P_2} = \frac{k_1 \alpha_1 \Phi_{\lambda_1}(\lambda_{o1}, T)}{k_2 \alpha_2 \Phi_{\lambda_2}(\lambda_{o2}, T)} = \frac{\lambda_{o2}^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda_{o2} T}} - 1)}{\lambda_{o1}^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda_{o1} T}} - 1)}. \quad (9)$$

Sada se iz ovoga prosto dobija da je temperatura data izrazom (10) (ovo je naravno pod pretpostavkom da su centralne talasne dužine filtera koje ćemo koristiti bliske, pa su i emisivnosti iste)

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left[ \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \cdot \frac{R_1(\lambda_1)}{R_2(\lambda_2)} \right]} \quad (10)$$

## Proračun energetskog bilansa

Energetski bilans daje uvid u detektibilnost merne veličine. Da bi radijacioni termometar ispravno radio, energija upadnog zračenja koja pada na aktivnu površinu fotodetektora mora biti veća od vrednosti NEP-a fotodetektora, jer to omogućava postojanje električnog signala na izlazu iz fotodetektora. Zbog toga je potrebno uvek birati fotodetektor sa što nižom vrednošću NEP-a (ovo je posebno važno ako se radijacionim termometrom mere niže temperature, jer je u tom slučaju upadna energija veoma niska). Ta činjenica ovde nije predstavljala nikakvo ograničenje pošto radimo u vidljivom delu spektra pa nam je samim tim i energija upadnog zračenja veća (energija je, kao što je poznato, obrnuto proporcionalna talasnoj dužini). Vrednost NEP-a se, inače, može smanjiti hlađenjem fotodetektora na kriogene temperature (najčešće na temperaturu tečnog azota). Vrednost NEP-a raste sa povećanjem aktivne površine fotodetektora.

U opštem slučaju izlazni signal koji daje radijacioni pirometar je funkcija temperature mernog objekta i može se naći iz

$$I(T) = \int_0^{\infty} \Phi_{\lambda}(\lambda, T) \Psi_F(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

gde je  $\Phi_{\lambda}(\lambda, T)$  snaga zračenja tela na temperaturi  $T$  i talasnoj dužini  $\lambda$ ,  $\Psi_F(\lambda)$  funkcija transmisivnosti celog optičkog sistema od zagrejanog tela do aktivne površine fotodetektora,  $S(\lambda)$  funkcija osetljivosti fotodetektora. Ovi proračuni se izvode smatrajući da funkcija  $\Psi_F(\lambda)$  predstavlja transmittivnost filtera, koji unosi najveće slabljenje za veliki opseg talasnih dužina (prenosni medijum i ostale optičke komponente unose zanemarljivo slabljenje u opsegu talasnih dužina od interesa).

## Metod

Za realizaciju senzora imamo dve mogućnosti: polihromatski metod ili bihromatski metod. Složeniji polihromatski metod smanjuje samo instrumentalnu grešku, koja je karakteristika kvaliteta korišćenog instrumenta. Iz ovoga sledi da je najjednostavniji, a u isto vreme i dovoljno dobar metod merenja bihromatski metod te će se on koristiti u projektovanju traženog radijacionog pirometra. Najveći problem predstavlja izbor spektralnog opsega u kome će se vršiti merenje. Pri ovom izboru treba da obratimo pažnju na sledeće probleme:

- a) opseg temperatura koji se meri,
- b) prenosna sredina kroz koju se prenosi zračenje,
- c) emisivnost realnog tela.

Prethodno rečeno važi za rad u infracrvenom delu spektra (dakle, talasne dužine veće od 720 nm), i to u atmosferskim optičkim prozorima, zato što je atmosfersko slabljenje u njima najmanje. U ovom radu je pokušana realizacija senzora u vidljivom delu spektra, korišćenjem klasičnih optičkih elemenata za ovaj deo spektra, uz uračunavanje i uzimanje u obzir svih grešaka do kojih dovodi ovakav pokušaj. Na ovo smo bili primorani usled nedostatka odgovarajuće opreme (optičkih elemenata za rad u IC delu spektra, AD konvertora), odnosno uslova koje nam je pružala optička laboratorija u Istraživačkoj stanici Petnica. Ovo praktično znači da smo se u startu odlučili za temperature veće od 1500°C (obična sijalica sa volframovim vlaknom), pa do nekih 6000°C, što je temperatura sunca.

Izvori koji su bili korišćeni su: sijalica sa volframovim vlaknom od 100 W, živina lampa snage 150 W, reflektor snage 1000 W i sunce. Razlog zašto smo koristili baš ove izvore leži u činjenici da se navedeni veštački izvori ponašaju skoro kao crno telo (emisivnost im je nešto manja od 1), a sunce zrači praktično kao crno telo (emisivnost mu je skoro jedan).

Prvobitna ideja bila je da se meri trenutna temperatura, ali pošto to iz već pomenutih razloga nije bilo moguće, opredelili smo se za naknadno utvrđivanje temperature izvora zračenja (naknadno u smislu vrednosti temperature koju dobijamo nakon završenih merenja i obrade podataka). Zbog



toga smo prvo snimali intenzitet zračenja pomenutih izvora, da bi utvrdili kako se oni tokom vremenu ponašaju u različitim spektralnim opsezima, odnosno kada se i da li se uspostavlja toplotna ravnoteža izvora zračenja i posle koliko vremena oni počinju da zrače približno konstantnom temperaturom. Temperatura je određivana (merena) u delovima kada je intenzitet zračenja, a samim tim i temperatura, praktično konstantan.

Usled nedostatka AD-konvertora način merenja je modifikovan. Zbog potrebe da se istovremeno beleže dva signala napravljen je uređaj koji računa razliku dva signala koje detektuju fotodiode. Dakle, on se sastoji od dve fotodiode koje su vezane tako da na ulazu u operacioni pojačavač ( $\mu 741$ ) daju razliku ulaznih veličina (u ovom slučaju to su intenziteti zračenja koja prolaze kroz optičke filtere).

Na graficima (slika 2) su prikazane osobine optičkih filtera koji su korišćeni prilikom merenja. U pitanju su optički filtri firme Edmunds Scientific Company i nose oznake: 806 (žuti, centralne talasne dužine  $\lambda = 570$  nm), 817 (crveni,  $\lambda = 630$  nm), 863 (zeleni,  $\lambda = 520$  nm), 818 (crveni,  $\lambda = 650$  nm), 811 (narandžasti,  $\lambda = 610$  nm), 871 (plavi,  $\lambda = 430$  nm). Usvojicemo da su filtri idealni sa propusnim opsegom od  $\Delta \lambda = 20$  nm. S obzirom na koeficijente transmisije krive ovo unosi grubu aproksimaciju.

Oduzimač signala je kalibrisan u odnosu na Laserski merač snage (Laser Powermetar, Edmunds Scientific Company). Merač snage je kalibrisan na 632.8 nm (Helijum-neonski laser).

To je izvršeno uz pomoć laserskog snopa koji se, posle deljenja, šalje na dve fotodiode. Intenzitet jednog snopa se održava konstantnim, dok se intenzitet drugog menja polarizatorom. Očitavana je vrednost svakog od signala na meraču snage (razlika ova dva signala se nanosi na apscisu), dok se razlika koju pokazuje oduzimač signala (multimetar) nanosi na ordinatu.

Dobijena je linearna zavisnost koja se može opisati jednačinom (dobijena metodom najmanjih kvadrata).

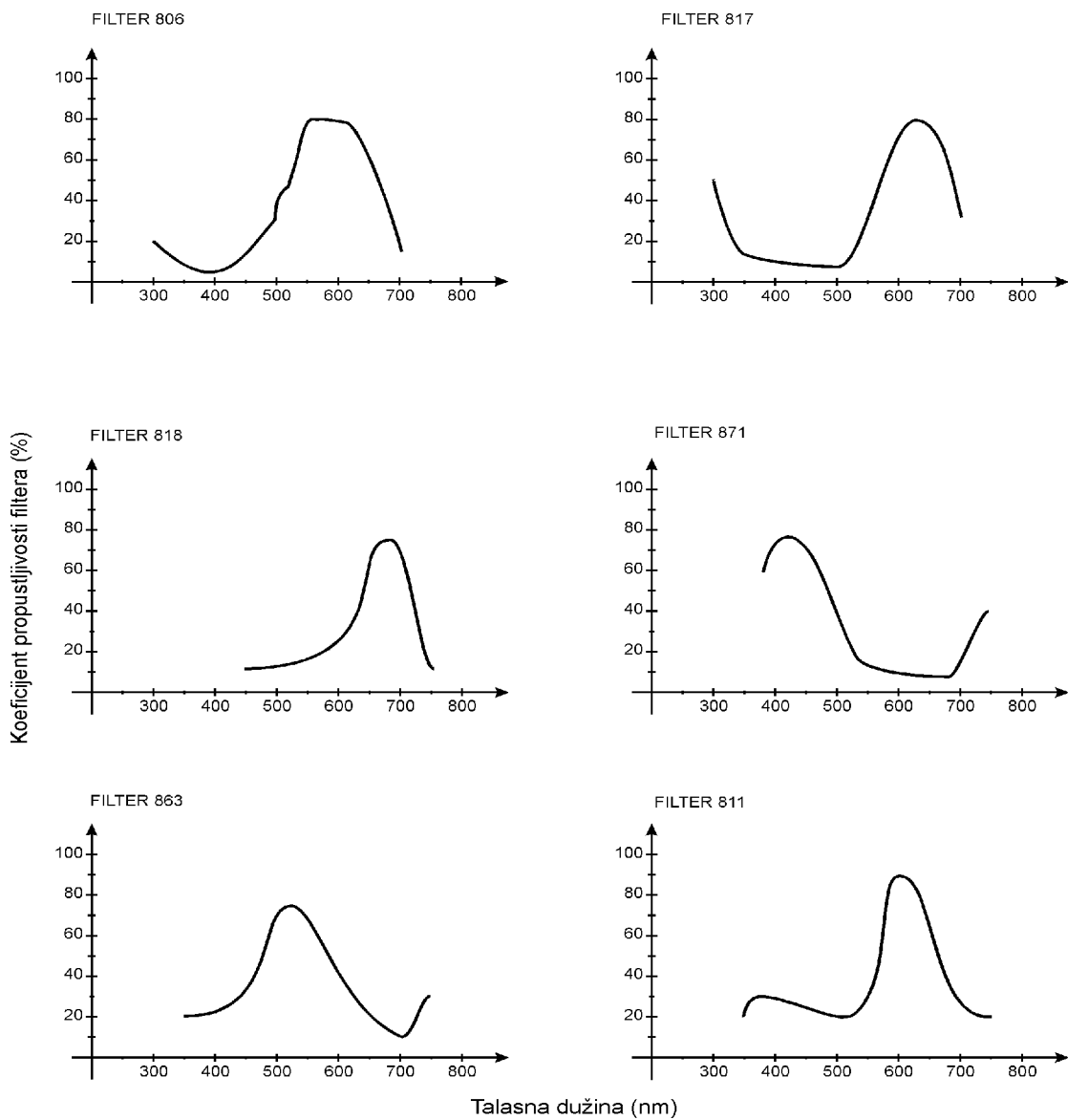
$$y = 7.322 x - 0.0523, \quad (12)$$

gde koeficijent korelacije između eksperimentalno dobijenih tačaka i prvučene prave iznosi  $r^2 = 0.988$ .

## Rezultati

### Obrada rezultata

Temperatura se meri na osnovu izraza (10). Najveća greška merenja potiče od filtera zbog velikog opsega talasnih dužina koje propušta. Maksimalna apsolutna greška temperature računa se po formuli:



Slika 2.  
Optičke karakteristike  
ispitivanih filtera

Figure 2.  
Optical  
characteristics of  
analyzed filters.

$$\Delta T = \left| \frac{-\frac{1}{\lambda_1^2} v + \frac{5}{\lambda_1} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) C_2 \Delta \lambda}{v^2} \right| \quad (13)$$

gde je  $v = \ln \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) + \ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)$ ,  $\Delta \lambda_1 = \Delta \lambda_2 = 20 \text{ nm}$ ,  $C_2$  druga radijaciona konstanta.

Podaci u tabeli su za merenja izvršena za optičke filtere 817 i 818, odnosno za filtere 806 i 863 u slučaju sunca. Vrednosti  $R_1$  i  $R_2$  su vrednosti intenziteta zračenja koje registruju fotodiode posle prolaska kroz filtere 817 i 818, respektivno.

Tabela 2. Temperatura različitih izvora zračenja za filtere 817 i 818

| izvor zračenja                  | $R_2/R_1$ | $R_1$ [mV] | $R_2$ [mV] | $T \pm \Delta T$ [ $10^3 \text{K}$ ] |
|---------------------------------|-----------|------------|------------|--------------------------------------|
| reflektor                       | 0.92      | 181.2      | 166.5      | $3.6 \pm 1.0$                        |
| sijalica sa volframovim vlaknom | 0.59      | 119        | 70         | $1.8 \pm 0.6$                        |
| živina lampa                    | 0.74      | 135        | 107        | $2.2 \pm 0.8$                        |
| sunce                           | 0.93      | 264        | 243        | $6.3 \pm 1.9$                        |

Dakle, na osnovu podataka iz tabele možemo da zaključimo da se relativna greška merenja kreće u intervalu od 25% do 35%.

Na osnovu ovih podataka je napravljen kalibracioni grafik beskontaktnog senzora temperature. Ovo je, ipak, uslovno rečeno kalibracioni grafik, s obzirom na sve aproksimacije koje smo uveli. Tu se pre svega misli na činjenicu da izvori zračenja koje smo koristili imaju emisivnost različitu od jedan, odnosno da nije korišćeno idealno crno telo kao izvor za kalibraciju.

Grafik je urađen za optičke filtere 817 i 818. Na apscisi grafika je odnos  $R_1 / R_2$ , dok je na ordinati temperatura. Dobijena je eksponencijalna zavisnost ove dve veličine (koeficijent korelacije  $r = 0.99$ ). Bez obzira na ovaj lep rezultat, treba ovom ipak prići sa izvesnom rezervom s obzirom na mali broj tačaka (odnosno izvora zračenja koji su korišćeni) koje se nalaze na kalibracionom grafiku, i na veliku apsolutnu grešku.

## Analiza grešaka, kako ih eliminisati i smanjiti

Greške merenja temperature pomoću radijacionih termometara mogu poticati od samog instrumenta ili usled nepoznavanja radijacionih osobina objekata i sredine kroz koju prolazi zračenje.

Greške koje nastaju usled instrumenta su rezultat promena karakteristika prijemnika-senzora, šuma elektronike kao i promena u optičkom sistemu. Šum elektronike treba da bude konstantan i na što nižem nivou. Greške optičkog sistema najčešće su posledica nečistoća na filtrima, ogledalima ili sočivima. Ako se merenja obavljaju u prisustvu jako zagrejanih metala, može doći do njihovog napanavanja na sočivu usled čega se trajno menja njihova transparentcija.

Sredina između izvora zračenja i senzora treba da ima što manju apsorpciju zračenja u opsegu merenja. Dim ili prašina izazivaju slabljenje svih talasnih dužina zračenja, što dovodi do toga da je izmerena temperatura manja u odnosu na stvarnu temperaturu (ovo je slabost svih radijacionih pirometara osim dvobojnih, tj. ovih koje smo mi realizovali). Slabljenje atmosfere,  $\alpha_A$ , čine apsorpcija u gasovima (vodena para, ugljen-dioksid, ozon) i molekulsko rasejanje, Rayleigh-ovo i Mie-ovo rasejanje, gubici usled turbulencija u atmosferi. U opštem slučaju ovo slabljenje se može izraziti preko empirijske formule

$$\alpha_A = \frac{3.91}{s} \left( \frac{0.55}{\lambda} \right)^{0.585 s^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

gde je  $\lambda$  talasna dužina,  $s$  vidljivost (daje se u kilometrima). Dobra vidljivost (sunčan dan) je 10km i ova vrednost se obično koristi pri izračunavanju ove veličine. Slabljenje se, inače, izražava u decibelima po kilometru (dB/km).

Emisivnost je takođe značajan parametar koji bitno utiče na izbor spektralnog opsega, s obzirom da je ona funkcija talasne dužine. Potrebno je, dakle, birati onaj opseg u kome je promena emisivnosti najmanja, jer će u tom slučaju i uneta greška biti najmanja. Takođe je bolje birati spektralni opseg u kome je emisivnost maksimalna, jer će tada i prijemni signal biti najveći, pa će uticaj šuma fotodetektora biti minimiziran.

Dakle na osnovu prethodno navedenog, mi smo se odlučili za merenje u crvenom delu spektra, sa atmosferom kao prenosnim medijumom.

Jedan od osnovnih uzroka grešaka radijacionih termometara je nepoznavanje emisivnosti objekta čija se temperatura meri. Radijacioni termometri se kalibrišu pomoću crnog tela, pa se kod merenja na telima čija je emisivnost znatno manja od jedan, javljaju sistematske greške. Za razliku od termometra na bazi intenziteta zračenja, kod dvobojnog pirometra greška ne zavisi od emisivnosti objekta, ukoliko su u pitanju siva tela čija emisivnost ne zavisi od talasne dužine. Greška dvobojnog pirometra nastaje ako emisivnost objekta na dvema talasnim dužinama nisu jednake,

$\varepsilon(\lambda_1) \neq \varepsilon(\lambda_2)$ . Temperatura koju u ovom slučaju pokazuje dvobojni pirometar, baždaren pomoću crnog tela iznosi:

$$T = \frac{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left[ \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \cdot \frac{R_1(\lambda_1)}{R_2(\lambda_2)} \right]} = \frac{1}{\frac{1}{T} + \ln \frac{\frac{\varepsilon(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_2)}}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}} \quad (15)$$

gde je  $T$  stvarna temperatura data izrazom (10). Kod svih metala emisivnost opada sa porastom talasne dužine (važi uslov da je  $\varepsilon(\lambda_1) / \varepsilon(\lambda_2) > 1$ , za  $\lambda_2 > \lambda_1$ ). Odavde sledi da je izmerena temperatura nešto viša od stvarne temperature  $T$ .

U cilju praćenja promene temperature tela signal  $R_1$  je meren posebno na multimetru, takođe pomoću oduzimača signala, zaklanjanjem jedne od fotodioda. Prednost ove metode u odnosu na prethodnu je da se tačnije određuje vrednost signala  $R_1$ . U ovom slučaju nemoguće je meriti istovremeno oba signala ( $R_2$  i  $R_1$ ) na multimetru. Zbog neusklađenosti trenutnih vrednosti dva signala dobijaju se samo približne vrednosti temperature.

Kao izvor zračenja korišćena je živina lampa koja menja temperaturu prvih 5 minuta od uključivanja. Izvršena su merenja za  $R_1$  i  $R_2$ . Tako tokom vremena pratimo porast temperature. Nakon izračunavanja zaključuje se da se temperatura živine lampe, nakon uključivanja i prve detekcije zračenja, menja od 1880 K do 2500 K.

## Kalibracija radijacionih termometara

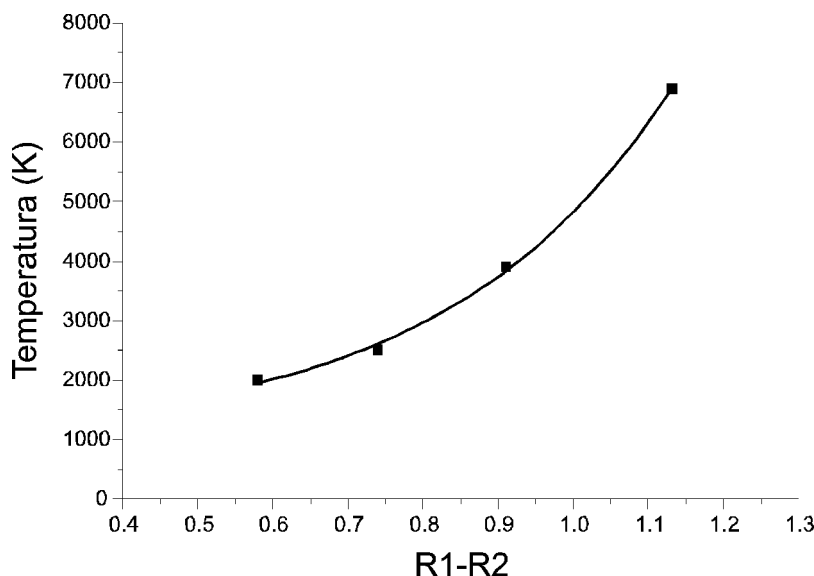
Kvalitetna crna tela sa promenljivom temperaturom su jako skupa i koriste se za kalibraciju radijacionih termometara samo u velikim metrološkim laboratorijama. U praksi se za kalibraciju najčešće koriste toplotni izvori koji se sastoje od lampe sa volframovom trakom (band lampe). Mi smo kao izvor zračenja za kalibraciju koristili sve izvore kojima smo određivali temperaturu (što, naravno, dovodi do nepouzdanje kalibracije). Kalibracioni grafik beskontaktnog senzora je na slici 3.

## Zaključak

U ovom radu konstruisan je beskontaktni senzor temperature, čiji se rad zasniva na detekciji emitovanog zračenja sa površine zagrejanog tela. Senzor radi na principu bihromatske metode, gde je kao prenosni medijum zračenja korišćena atmosfera. U nedostatku AD-konvertora, napravljen je uređaj koji oduzima signale, a njihova razlika se očitava na multimetru. Poredeći dobijene rezultate i podatke u literaturi zaključeno je da se uvo-

đenje nove metode pokazalo opravdano. Greška merenja je velika i uglavnom je posledica širokog opsega talasnih dužina koje filter propušta, ali i uticaja atmosfere, odnosno rada u vidljivom delu spektra. Metoda se pokazala dobrom i pri merenju temperature tela koja se stalno menja. Bez obzira na sve ovo, ovaj način merenja je korektan za neke grublje primene.

Tokom rada smo zaključili da ova metoda merenja daje bolje rezultate što smo bliži infracrvenoj oblasti (dakle, ako već radite na ovaj način, radite u crvenom delu spektra). Rad u drugim oblastima daje mnogo veće vrednosti grešaka, što se vidi i sa slike 3, a korišćenje filtera iz različitih delova spektara daje manje-više besmislene rezultate. Način za poboljšanje realizacije beskontaktnog senzora temperature u vidljivom delu spektra je korišćenje AD-kartice za direktno beleženje signala posle prolaska kroz filtere i korišćenje optičkog fibera kao prenosnog medijuma zračenja.



Slika 3.  
Kalibracioni grafik  
beskontaktnog senzora

Figure 3.  
Calibration curve of  
non-contact sensor

Greška merenja nastala usled aproksimacije koju smo učinili pretpostavkom da su filteri idealni (idealnog oblika sa tačno određenim propusnim opsegom) može da se smanji tačnim uračunavanjem prenosne funkcije filtera i njihovog uticaja na intenzitet zračenja koji dolazi do fotodioda. Numeričkom integracijom po svim talasnim dužinama (odnosno talasnim dužinama koje su od interesa za određeni optički filter) prenosne funkcije optičkog sistema, možemo dobiti vrednost temperature, koja će biti koliko-toliko oslobođena greške usled neidealnosti optičkih filtera.

## Literatura

- Drljača, P. 1997. Termovizijska kamera. Seminarski rad na predmetu Termovizija. Elektrotehnički fakultet u Beogradu.
- Matavulj, P. 1996. Senzor Temperature. Seminarski rad na predmetu Fiberoptički senzori. Elektrotehnički fakultet u Beogradu.
- McCuney, R. 1994. *Introduction to Radiometry and Fotometry*. Boston: Artech House.
- Moller, K.D. 1988. *Optics*. Mill Valley, CA: University Science Books.
- Noltingk, B.E. 1988. *Instrumentation Reference Book*. London: Buuerworths.
- Stanković. D. 1987. *Fizičko-Tehnička merenja*. Beograd: Naučna knjiga.

---

*Ivana Jovanović and Milica Maksić*

## Contactless Temperature Sensor

Contactless temperature sensors made in infrared part of the electromagnetic spectrum are known and oftenly used temperature sensors. In this work we tried to construct the contactless temperature sensor in the visible spectral region, on the basis of the same physical principles on which the infrared sensors work – Plank's law of black body radiation.

The sensor works on the principle of bichromatic method, where atmosphere is used as a transitional medium for radiation. In the lack of A-D converter, we made a device that substracts signals, and their difference is read on a multimeter.

Overall, the achieved measuring system (Figure 1) consists of three subsystems: optical, detectional and electronical. Optical system focuses radiation from the heated body onto a photodetector. It is made of two collective lenses (20-F500), which act as beamsplitters. Detection system is made of two photodiodes inversely polarized with voltage of 30 V, connected in a way to give the difference of the input signals on the output. There are optical filters with 20 nm bandwidth in front of photodetector. Electronical system is made of  $\mu 741$  which is connected to the multimeter. The multimeter is connected to a computer over RS-232 interface. Acquisition of data is done with Digiscope software, made by Voltcraft. Data is read three times per second.

Error in measuring is big and is, in greatest part, consequence of wide lengthwave bandwidths that are going through the filter, but also because of atmospheric interference, i.e. operation being done in the visible spectral region. Better results are achieved closer to infrared area; work in other areas gives greater error values (Figure 3).

The method also proved good measuring constantly changing body temperature. Anyway, this method of measuring is appropriate for some rougher applications.

