

DIGITALNI TERMOMETAR SA TERMOPAROM K TIPA I KOMPENZACIJOM HLADNOG KRAJA TERMOPARA SILICIJUMSKIM OTPORNIM SENZOROM KTY10

Miomir Đukić, Iritel, Beograd

Miodrag Zlatanović, Ivan Popović, Zoran Zirojević, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Sadržaj - U radu je opisan instrument za merenje temperature baziran na termoparu K tipa, pri čemu se za merenje temperature hladnog kraja termopara koristi PTC silicijumski otporni senzor temperature KTY10. Termometar je namenjen za merenje temperature u procesima plazma depozicije i plazma nitiranja, pri čemu su od interesa temperature u opsegu od 300°C do 600°C.

1. UVOD

Precizna kompenzacija varijacije temperature hladnog kraja termopara je od velike važnosti pri konstrukciji mobilnih termometara, koji kao temperaturni senzor koriste termopar, namenjenih za rad u različitim ambijentalnim uslovima. Neki univerzalni multisenzorski termometri, koji rade sa više različitih tipova temperaturnih senzora, obično sadrže mikrokontroler, koji se može koristiti za linearizaciju karakteristika temperaturnih senzora, kompenzaciju varijacije temperature hladnog kraja termopara, akviziciju temperaturnih podataka i slično. U referenci [1] opisan je jedan ovakav termometar, u kome se naponi dobijeni sa mernih krajeva termopara i sa senzora temperature hladnog kraja termopara koriste za izračunavanje stvarne vrednosti merene temperature. Kao senzor temperature hladnog kraja termopara koristi se tranzistor smešten na ulaznim krajevima termopara. Ovakvo rešenje, koje podrazumeva postojanje mikrokontrolera u okviru mernog sistema, rezultira u povećanoj složenosti hardvera i ukupnoj ceni instrumenta.

U ovom radu je opisan relativno jednostavan termometar, baziran na termoparu K tipa [2]. Za kompenzaciju hladnog kraja termopara korišćen je silicijumski otporni senzor temperature sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom otpornosti KTY10 [3]. Merni opseg ovog senzora je od -50°C do 150°C, što je sasvim dovoljno za merenje temperature ambijenta. Upotrebom ovog senzora konstrukcija digitalnog termometra se pojednostavljuje, a takođe je jednostavno prilagođavanje senzora za rad u željenom mernom opsegu, tako da greška merenja bude manja od 0,1%.

Kao senzor temperature korišćen je termopar K tipa. Osnovne prednosti termoparova u odnosu na ostale tipove termometara predstavljaju jednostavnost konstrukcije, relativno niska cena, tačkasti oblik senzora, jednostavnost ugradnje i dobre osobine za dinamička merenja temperature. Termoparovi se koriste za merenje temperature u vrlo širokom opsegu, od kriogenih temperatura od 1K pa do 2600°C.

Primenjeni termopar K tipa može se koristiti u opsegu temperatura od -200°C do 1200°C, što u potpunosti pokriva merni opseg temperatura koji je od interesa u procesima plazma nitiranja i plazma depozicije.

Uređaj prikazan u ovom radu služi za merenje temperature u opsegu od -100°C do 600°C, sa relativnom greškom merenja manjom od 1,5%, pri velikim varijacijama temperature ambijenta od -20°C do 70°C. Takođe, uređaj je predviđen za priključivanje na sistem za akviziciju podataka preko računara, pa je moguće dodatnom softverskom obradom i linearizacijom karakteristike samog termopara postići znatno veću tačnost.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE SENZORA KTY10

Silicijumski otporni senzori temperature sa pozitivnim temperaturnim koeficijentom nalaze danas sve veću primenu, zahvaljujući tome što su termometri bazirani na ovom tipu senzora jednostavne konstrukcije, niske cene i lako je ostvariti linearizaciju njihovih karakteristika. Merna nesigurnost ovih senzora kreće se u granicama od 0,3°C do 0,5°C, što je slabije od platinskih otpornih termometara, ali ipak potpuno zadovoljavajuće za većinu praktičnih primena.

Sama tehnologija izrade senzora je zasnovana na ravnomernom i homogenom dopiranju silicijumske pločice, što se postiže dejstvom neutrona u nuklearnom reaktoru. Na ovaj način dobijaju se uzorci silicijuma sa faktorom nesimetrije manjim od 0,1% i rasipanjem specifične provodnosti od jednog do drugog uzorka manjom od ±1%. Ta činjenica je veoma bitna, jer i minimalno odstupanje otpornosti senzora od standardne vrednosti od 2kΩ unosi veliku grešku, neprihvatljivu za mnoge aplikacije.

U temperaturnom opsegu od -50°C do 150°C zavisnost otpornosti silicijumskog otpornog senzora od temperature se prikazuje paraboličnom funkcijom:

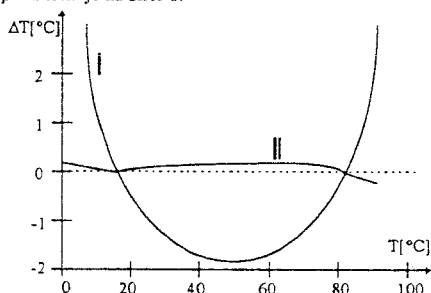
$$R(\Delta t) = R_{25} (1 + \alpha \Delta t + \beta \Delta t^2),$$

gde je $R_{25} = 2k\Omega$ otpornost KTY10 na 25°C, $\Delta t = t - 25^\circ\text{C}$, linearni koeficijent $\alpha = 7,68 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, a kvadratni koeficijent $\beta = 1,88 \times 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ [4].

Pošto je linearni koeficijent α silicijumskog senzora više od dva puta veći od linearnog koeficijenta platinskog otpornog pretvarača, osetljivost silicijumskog temperaturnog senzora je u manjim

intervalima temperature veća više od dva puta. Kvadratni koeficijent β silicijumskog pretvarača je pozitivan, pa sa porastom temperature osetljivost senzora raste. Relativna promena otpornosti senzora u mernom opsegu je veća od 100%. Međutim, linearizacija senzora se vrši veoma jednostavno pomoću pasivnog otpornika, što je nemoguće uraditi u slučaju platinskog pretvarača, koji ima negativni kvadratni temperaturni koeficijent. Vrednost linearizacionog otpornika se određuje u zavisnosti od željenog mernog opsega. Iz jednačine za ekvivalentnu otpornost paralelne veze silicijumskog senzora i pasivnog otpornika, uz uslov najmanjeg odstupanja linearnosti, izvodi se vrednost otpornosti pasivnog otpornika od $6,8k\Omega$ za merni interval od 0°C do 100°C .

Nelinearnost karakteristike silicijumskog senzora i nelinearnost karakteristike paralelne veze silicijumskog senzora i pasivnog otpornika od $6,8k$ prikazana je na slici 1.



Slika 1. Kvalitativni oblik nelinearnosti karakteristike $R(T)$ senzora KTY10 (I) i nelinearnosti linearizovane karakteristike (II) otpornikom od $6,8k\Omega$

3. OPIS SISTEMA

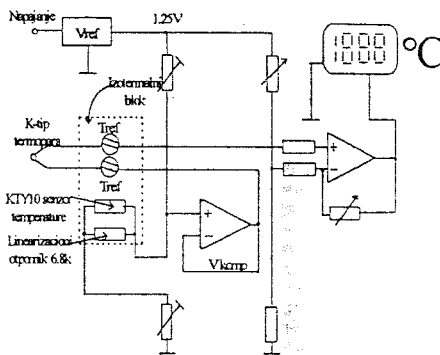
U okviru sistema nalazi se više funkcionalnih celina:

- Blok za napajanje sistema
- Pojačavački blok
- Blok za kompenzaciju hladnog kraja termopara
- Blok za kontrolu prekida termopara
- Konvertor sa displejom

S obzirom da termopar nije apsolutni merač temperature, već pokazuje razliku temperatura njegovih krajeva (mernog i hladnog kraja), pri konstantnoj vrednosti merene temperature dolazi do promene napona na ulaznim priključcima termopara usled promene temperature ambijenta, odnosno hladnog kraja termopara. Kompenzacija uticaja promene ambijentalne temperature ostvarena je pomoću silicijumskog PTC temperaturnog senzora KTY10, koji u stvari predstavlja merač temperature hladnog kraja termopara [5]. Pri promeni temperature ambijenta menja se napon na temperaturno osetljivom otpornom razdelniku, koga čine paralelne vezani linearizacioni otpornik sa KTY10 senzorom i pasivni

otpornici. Vrednost pasivnih otpornika je proračunata tako da izlazni napon kompenzacije V_{komp} odgovara promeni napona na ulaznim priključcima termopara usled varijacije temperature ambijenta. Time se na ulazu pojačavačkog dela sistema dobija signal nezavistan od ambijentalne temperature.

Pojačavački deo služi da pojača relativno malu vrednost korisnog signala, proporcionalnog merenoj temperaturi. U tu svrhu je upotrebljen integrirani operacioni pojačavač, sa izuzetno malim temperaturnim driftom. Karakteristika pojačanja pojačavača podešena je pomoću dva nezavisna trimera, čime se opseg izlaznih napona pojačavača može prilagoditi različitim tipovima A/D konvertora. U konkretnom slučaju primenjen je digitalni panelmetar, kod koga 1mV promene ulaznog napona odgovara 1°C promene pokazivanja displeja.



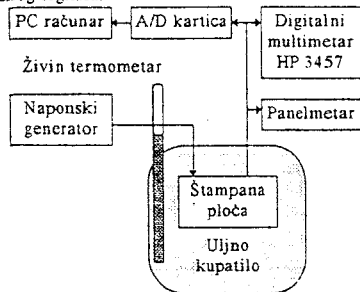
Slika 2. Principijelna šema sistema

Napajanje celog sistema je mrežno, preko odgovarajućeg transformatorskog bloka. Pri projektovanju napajanja obračena je posebna pažnja na moguće varijacije mrežnih napona, kao i na nestabilnosti izlaznih nivoa napona stabilizatora koji napajaju pojačavački deo sistema. Naime, pošto su vrednosti signala na ulaznim priključcima termopara male (reda mV), usled male varijacije napona napajanja operacionih pojačavača došlo bi do velike greške merenja, pa je izvršena dodatna stabilizacija napona napajanja pojačavačkog dela.

4. REALIZACIJA EKSPERIMENTA

U cilju provere karakteristika realizovanog termometra izvršena su sveobuhvatna eksperimentalna ispitivanja. Da bi se utvrdila tačnost pokazivanja termometra potrebno je izdvojiti grešku usled nelinearnosti termopara i grešku kompenzacije hladnog kraja termopara. Merenja su vršena pri konstantnoj temperaturi ambijenta (dobijen je uticaj nelinearnosti termopara) i pri različitim ambijentalnim uslovima sa krajevima termopara u kratkom spoju (dobijen je uticaj nelinearnosti paralelne veze senzora KTY10 i pasivnog otpornika).

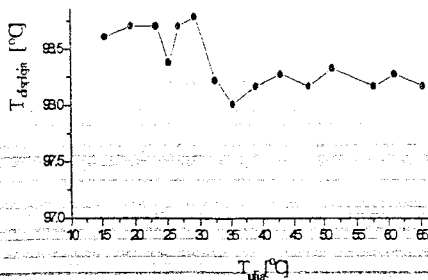
U eksperimentima je korišćeno temperaturno kontrolisano uljno kupatilo za promenu ambijentalne temperature, grejna peć za temperaturnu kalibraciju termometra i naponski izvor za generisanje napona koji odgovaraju standardnim izlazima K tipa termopara. Štampana ploča sa hladnim krajem termopara i elektronskim komponentama, osim displeja i termopara, potopljena je u uljno kupatilo. Pored displeja u okviru termometra, za merenje temperature korišćen je i precizan digitalni multimetar HP 3457, sa mogućnošću filtriranja ulaznog signala.



Slika 3. Merni sistem za snimanje karakteristika termometra

5. REZULTATI EKSPERIMENTA

U okviru prvog eksperimenta izvršeno je ispitivanje primenjene kompenzacije hladnog kraja termopara. Merni kraj termopara je držan na konstantnoj temperaturi (temperatura ključanja vode), dok je temperatura uljnog kupatila menjana u opsegu od 15°C do 65°C. Po uspostavljanju stacionarnog stanja u uljnom kupatilu vršena su očitavanja pokazivanja preciznog živinog termometra, digitalnog voltmetra i digitalnog panelmetra. Postupak je ponovljan sa korakom promene temperature ulja manjim od 8°C. Dobljeni rezultati su prikazani na slici 4 i predstavljaju varijaciju pokazivanja termometra u zavisnosti od temperature ambijenta, pri konstantnoj temperaturi mernog kraja termopara.

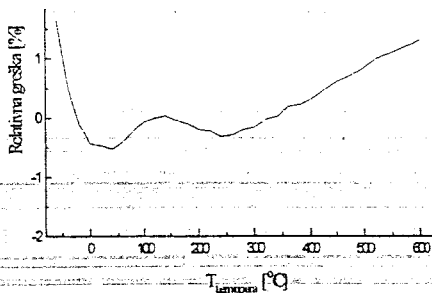


Slika 4. Pokazivanje termometra u zavisnosti od temperature ambijenta, sa termoparom u ključaloj vodi

Rezultati eksperimenta pokazuju da je promena izlaznog signala termometra manja od 0,3°C u posmatranom opsegu promene temperature ambijenta. S obzirom da je preciznost korišćenog panelmetra $\pm 1^\circ\text{C}$ (primena u procesima plazma depozicije), može se zaključiti da je nemoguće primetiti promene pokazivanja termometra, usled promena temperature ambijenta.

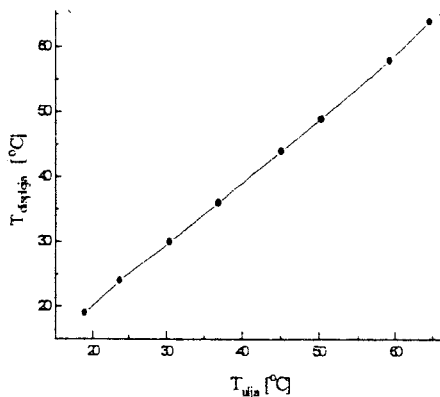
U sledećem eksperimentu ispitivano je pokazivanje termometra za različite vrednosti merene temperature, pri čemu je temperatura ambijenta držana na konstantnoj vrednosti od 20,7°C. Pre vršenja samog eksperimenta obezbeđeno je postojanje nulte greške pokazivanja termometra na temperaturama od 0°C i 100°C, podešavanjem prenosne karakteristike pojačavačkog dela pomoću trimera. Treba napomenuti da je ovo neka vrsta hardverske linearizacije, u smislu aproksimacije V-t karakteristike pravom. Time je postignuto minimalno odstupanje pokazivanja termometra od stvarne temperature u opsegu od 0°C do 200°C. U okviru samog eksperimenta nije korišćen termopar kao generator termoelektromotorne sile, već je izvršena simulacija tih vrednosti pomoću naponskog generatora, na osnovu poznatih V-t karakteristika za K-tip termopara. Vrednost generisanog napona je skokovito menjana sa rezolucijom od 20°C.

Termopar K-tipa pokriva temperaturni merni opseg od -200°C do 1200°C, ali kako je projektovani termometar konstruisan za kontrolu temperature u plazma procesima, testiranje karakteristika instrumenta su izvršena simulacijom temperatura u opsegu od -100°C do 600°C. Celokupno odstupanje merenog signala od stvarne vrednosti, uključujući nelinearnost termopara i elektronskih komponenta, u posmatranom temperaturnom opsegu, pri konstantnoj temperaturi ambijenta je prikazana na slici 5. Može se uočiti postojanje veoma male relativne greške u opsegu od 0°C do 200°C. Treba naglasiti da se jednostavnim podešavanjem trimera može obezbediti minimalna relativna greška pokazivanja termometra u željenom mernom podopsegu veličine 200°C, u okviru kompletnog mernog opsega od -100°C do 600°C.



Slika 5. Relativna greška pokazivanja termometra, pri promeni merne temperature od -100°C do 600°C i konstantnoj temperaturi ambijenta

Da bi se snimila karakteristika dela sistema koji služi za kompenzaciju varijacije temperature ambijenta, ulazni priključci termopara su kratko spojeni, a štampana ploča sa hladnim krajem termopara je postavljena u uljno kupatilo. Na taj način očitane vrednosti temperature sa displeja i digitalnog voltmetra predstavljaju vrednosti temperature ulja, odnosno KTY10 je u ovom slučaju senzor merene temperature. Temperatura ulja je menjana u opsegu od 18°C do 65°C, pri čemu su vrednosti temperature očitavane po uspostavljanju stacionarnog stanja u uljnom kupatilu.



Slika 6. Pokazivanje termometra pri kratkospojenim ulaznim priključcima termopara

Dobijeni rezultati, prikazani na slici 6, pokazuju da se silicijumski otporni senzor KTY10 može uspešno primeniti za merenje temperature u posmatranom temperaturnom opsegu. Takođe, potvrđuju se izložene teorijske pretpostavke o mogućnosti jednostavne linearizacije R-t karakteristike senzora KTY10 upotrebom pasivnog otpornika odgovarajuće vrednosti.

Konačno, izvršeno je i snimanje dinamičkih karakteristika realizovanog termometra. U ovom eksperimentu izlazni signal pojačavačkog dela termometra je preko A/D kartice povezan na računar, čime je omogućena dalja obrada i prikazivanje rezultata merenja pomoću PC računara. Pri konstantnoj temperaturi ambijenta snimljen je impulsni odziv sistema, tako što je merni kraj termopara naizmenično postavljan na dve temperature (0°C i 75°C). Dobijene su vrednosti vremena uspona $t_r=0,512s$ i vremena pada $t_f=0,495s$.

6. ZAKLJUČAK

Dobijeni eksperimentalni rezultati pokazali su da se PTC silicijumski otporni temperaturni senzor može uspešno primeniti u termometrima baziranim na

K tipu termopara, za kompenzaciju varijacije ambijentalne temperature u širokom opsegu od -10°C do 70°C. Realizovani termometar je jednostavne konstrukcije i niske cene, pa može naći široku primenu u aplikacijama u kojima zahtevana preciznost merenja temperature, u širokom opsegu od -100°C do 600°C, ne prelazi 1,5% relativne greške. Međutim, u mnogim aplikacijama (kao na primer u procesima plazma nitriranja i plazma depozicije) ovako široki temperaturni merni opseg nije od interesa. Omogućena je jednostavna hardverska linearizacija termometra za merenje u užem temperaturnom opsegu, sa relativnom greškom merenja manjom od 0,5%. U radu je dat primer ovakve linearizacije u opsegu od 0°C do 200°C.

Upoređivanjem rezultata eksperimenata i poznate V-t karakteristike termopara K tipa lako je uočiti da najveći deo greške pokazivanja termometra potiče upravo od nelinearnosti termopara. U tom smislu moguće je ostvariti dodatnu hardversku linearizaciju kojom bi se neutralisana nelinearnost termopara. Međutim, kako je sistem u osnovnoj nameni predviđen za rad sa računarskom podrškom, umesto hardverske linearizacije, koja bi rezultirala povećanom složnošću i cenom instrumenta, implementirana je softverska linearizacija, a na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata.

LITERATURA

- [1] "FLUKE 2190A Operation Manual" Fluke Company, 1978
- [2] "Application note 290-Practical Temperature measurement", Hewlett-Packard Company, 1981
- [3] *Siemens Forschung und Entwicklung Bereich*, Bd. 10 (1981) Nr. 2. Springer Verlag 1981
- [4] D. Stanković and M. Zlatanović, *Sensors & actuators A*, Vol. 41-42 pp 612-616, 1994
- [5] E.O.Doebelin, "Measurement Systems", *Application and Design*, M.C.Graw Hill, pp 595-596, Sidney, 1991

Abstract - In this paper we described a relatively simple thermometer, based on the K type thermocouple, in which the temperature of the reference junction is measured by a PTC silicon resistive sensor KTY10. Thermometer is intended for temperature measurement in process of a plazma deposition and plazma nitriding, for temperature range from 300°C to 600°C.

REFERENCE JUNCTION COMPENSATION BY TEMPERATURE SENSOR KTY10

Miomir Đukić, Miodrag Zlatanović, Ivan Popović, Zoran Zirojević