

## Merenje temperature vazduha pomoću ultrazvuka

---

*U radu je ispitana mogućnost primene ultrazvuka za beskontaktno merenje temperature. Ideja se zasniva na zavisnosti brzine zvuka od temperature za koju je dokazano da je u intervalu od 0 do 85°C linearna pri konstantnoj vlažnosti vazduha i pritisku. Pomoću mikrokontrolera, mereno je vreme potrebno zvuku da pređe određenu razdaljinu, na osnovu čega je zatim određivana temperatura. Postignuta je tačnost merenja od 2°C.*

---

### Uvod

U okviru merne tehnike ultrazvuk se najčešće primenjuje u određivanju udaljenosti objekata, kada se koristi vrednost brzine zvuka za opšti slučaj. Ipak, brzina prostiranja zvučnih talasa kroz vazduh zavisi i od temperature okoline. Ova zavisnost određena je jednačinom (Popović 1996):

$$331.3 \cdot \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad (1)$$

Važno je napomenuti da postoje još dva faktora koja utiču na brzinu zvuka – odnos atmosferskog pritiska i gustine vazduha kao i relativna vlažnost. Odnos pritiska i gustine je konstantan, pa je vlažnost vazduha jedini faktor čija promena utiče na tačnost merenja. Data zavisnost je određena jednačinom (Popović 1996):

$$c = c_0 (1 + 2.8 \cdot 10^{-7} p_v) \quad (2)$$

gde je  $c_0$  brzina zvuka na 0°C, a  $p_v$  – parcijalni pritisak vodene pare.

Izračunato je da bi primena vlažnosti vazduha u trasponu 0-100% unela geašku manju od 0.0032°C (Popović 1996), pa je ovaj uticaj zanemaren.

U radu je razmotrena mogućnost korišćenja linearne zavisnosti brzine zvuka od temperature za računanje temperature okoline. Merenjem je upravljano mikrokontrolerom, koji po pitanju brzine zadovoljava potrebe ove aplikacije: pri radnom taktu od 8 MHz, potrebno je 0.5  $\mu$ s za izvršavanje jedne instrukcije, što je dovoljno da bi se merenje vršilo uz relativno malu grešku. Cilj rada je utvrđivanje tačnosti ovog načina merenja njegovim poređenjem sa digitalnim termometrom. S obzirom da se radi o atipičnoj metodi merenja, nisu nađeni uporedivi rezultati drugih autora. Očekivano je da tačnost merenja zavisi isključivo od rezolucije tajmera mikrokontrolera (0.5  $\mu$ s) i tačnosti referentnog termometra (1°C).

### Opis uređaja

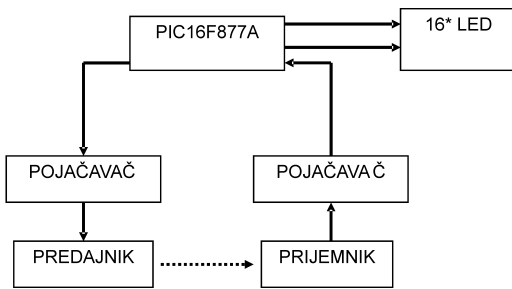
Sistem čine tri celine:

- platforma sa ultrazvučnim predajnikom i prijemnikom,
- pojačavači signala i
- mikrokontroler PIC16F877A.

Centralni deo sistema čini PIC mikrokontroler, povezan sa ultrazvučnim predajnikom, prijemnikom i 16 LED dioda (slika 1). Ultrazvučni signal je poslat iz mikrokontrolera na predajnik i istovremeno je aktiviran merač vremena u PIC-u. Po prijemu signala, tajmer je zaustavljen, a izmereno vreme se u binarnom obliku ispisuje na LED diodama. Pomoću datog podatka, manuelno se računa temperatura.

---

*Miodrag Basić (1990), Beograd, Bulevar AVNOJ-a 47, učenik 2. razreda X gimnazije "Mihajlo Pupin" u Beogradu*



Slika 1. Blok šema

Figure 1. Simplified schematic; left (from top) – amplifier, transmitter, right – amplifier, receiver

Predajnik i prijemnik, oznake 400ST/SR, rade na principu piezoelektričnog efekta. Zaštićeni metalnim kućištem, sastoje se iz membrane i piezoelektričnog elementa. Postavljeni su na međusobnu udaljenost od 43 cm i usmereni jedan prema drugom (slika 1). Preporučeni naizmenični napon napajanja predajnika je 10 – 20 V. Ultrazvučni signal frekvencije 40 kHz i napona 5 V generisan je pomoću mikrokontrolera. Ovaj signal je potrebno pojačati da bi se dobio signal napona 15 V, kojim je moguće napajati predajnik.

S obzirom da je potrebno pojačati signal visoke frekvencije, posebna pažnja je posvećena izboru operacionog pojačavača. Potrebno je da brzina promene stanja izlaza (*slew rate*) bude veća od 1.275 V/s kako bi izlazni signal bio neizmenjenog oblika i željene amplitude (Todorović 2004). Korišćeni su TL082CP operacioni pojačavači, čiji *slew rate* od 13 V/s zadovoljava navedeni uslov. Usled smanjenja intenziteta zvuka tokom prenosa kroz vazduh i nepostojanja pojačavača u prijemniku, primljeni signal je nedovoljno visoke amplitude, pa se provodi kroz dva stepena pojačanja (slika 2).

Tako se dobija signal u opsegu (–4, +4 V), koji je pogodan za prosleđivanje mikrokontroleru.

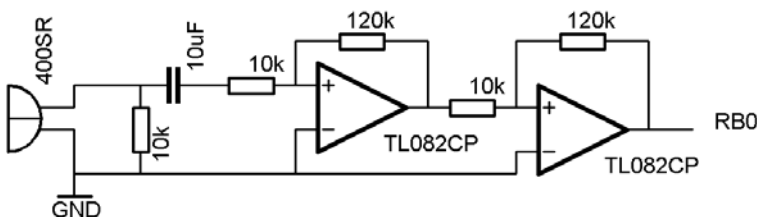
Osnovu mernog sistema čini PIC mikrokontroler. U njemu je generisan PWM signal frekvencije 40 kHz, koji se preko operacionog pojačavača šalje na predajnik. Istovremeno se aktivira merač vremena (tajmer 1) unutar mikrokontrolera. Ovaj tajmer je programiran da uvećava stanje svog brojača prilikom izvršavanja svake instrukcije, to jeste na svakih 0.5  $\mu$ s. Na prijemnik zatim deluje emitovani ultrazvučni talas. Nakon pojačanja, primljeni signal se prosleđuje mikrokontroleru. Kada detektuje ovaj signal, PIC prelazi u prekidnu rutinu (*interrupt*). U njoj zaustavlja tajmer, a zatim i isključuje emitovanje ultrazvuka, jer ono nije potrebno tokom daljeg izvršavanja programa. Mikrokontroler potom očitava stanje tajmera i ispisuje ga u binarnom obliku na 16 LED dioda (slika 1). Konvertovanjem ovog 16-bitnog zapisa u decimalni broj, dobija se stanje tajmera. S obzirom da tajmer uvećava vrednost na svakih 0.5  $\mu$ s, množenjem stanja njegovog brojača sa 0,0005 dobija se vreme (u milisekundama) za koje je zvuk prešao razdaljinu od 43 cm (*S*). Iz navedenih podataka može se izračunati brzina zvuka, a zatim i temperatura okoline iz jednačine (1).

Analizom zavisnosti *c* od *t* u intervalu od 0 do 85°C iz jednačine (1), dobijen je koeficijent korelacije  $R = 0.99991$ . Dobijena vrednost *R* od približno 1 dokazuje linearnu zavisnost brzine zvuka od temperature u posmatranom intervalu.

S obzirom da je zavisnost brzine zvuka od temperature linearna, izračunata je konstanta *K*, koja predstavlja odnos temperature i izmerenog vremena (*T*). Onda se temperatura okoline kroz koju je zvuk emitovan može izračunati iz jednačine:

$$t(^{\circ}\text{C}) = K \cdot T \quad (3)$$

Korišćenjem jednačine (3), značajno je pojednostavljeno računanje temperature u odnosu na prvu metodu.



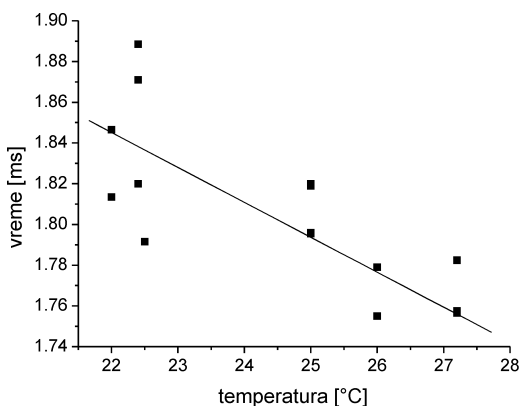
Slika 2.  
Shema prijemnog kola

Figure 2.  
Receiver circuit schematic

Radi što bolje kontrole i optimalne brzine izvršavanja, program za mikrokontroler je napisan u assemblerskom jeziku, u okruženju MPLAB IDE.

## Rezultati i diskusija

Vršeno je ukupno 24 merenja u opsegu od 22°C do 27.2°C. Zatim je izračunat odnos zabeleženog vremena i temperature pri svakom merenju. Na slici 3 su prikazani rezultati merenja. Vršeno je po nekoliko merenja na svakoj temperaturi i odstupanja su najuočljivija oko 22°C. Uzrok greške je što je merenje vršeno na prelazu između prostorije i spoljašnjosti gde se susreću različite vazdušne mase, pa temperatura nije homogena. Ostala merenja su vršena u prostorijama sa konstantnom temperaturom, a samim tim su i odstupanja manja. Izračunata je prosečna vrednost odnosa vremena i temperature ( $K = 14$ ). Korišćenjem jednačine (3) postignuta je tačnost od 2°C. Sistem je konstantno merio malo veći period  $T$  od onog koji bi trebalo da izmeri po proračunima iz jednačine (1). Izvršeno je po 5 merenja na rastojanjima od 5, 10, 15, 20 i 25 cm na temperaturi od 24°C i pritom beleženo odstupanje izmerenog vremena od očekivane vrednosti. Ustanovljeno je da navedeno odstupanje nije konstantno i da se uvećava povećanjem međusobne udaljenosti senzora. Navedeni problem je prevaziđen kalibracijom sistema. Pri računanju temperature iz jednačine (1), zbog većeg uticaja merenog vremena  $T$  na rezul-



Slika 3. Rezultati merenja

Figure 3. Measurement results

tat, dolazi do veoma velike greške, te ova metoda nije pouzdana. U poređenju sa navedenom, primena jednačine (3) daje značajno tačnije rezultate, s obzirom da podrazumeva kalibraciju uređaja.

Kako nije nađen rad sa istim poljem istraživanja, nije bilo moguće uporediti tačnost dobijenih rezultata sa rezultatima drugih autora. Ipak, u poređenju sa digitalnim termometrom tačnosti 1°C, sistem je dao zadovoljavajuće rezultate. Zbog loših uslova regulacije temperature pri merenjima, nije bilo izvodljivo preciznije merenje.

## Zaključak

Nakon kalibracije sistema, dobijeni su rezultati u skladu sa očekivanjima – postignuta tačnost je duplo manja u odnosu na referentni termometar. Uz bolje uslove kalibracije, prvenstveno kvalitetniju kontrolu temperature, preciznost bi mogla značajno da se poboljša. U ovom pravcu moguće je vršiti dalja istraživanja.

## Literatura

Popović M. 1996. *Senzori u robotici*. Beograd: Viša elektrotehnička škola

Todorović D. 2004. Ultrazvučni sonar. *Petničke sveske*, 57: 133

---

Miodrag Basić

## Measurement of Air Temperature by Ultrasound

In this work, an application of ultrasound in contactless temperature measurements was examined. The speed of sound depends on temperature. This correlation is linear from 0°C to 85°C. The time in which ultrasound passes over a certain distance was measured. Using this data, the speed of sound and the temperature were calculated, as these two are linearly correlated. The aim of this research was to determine the accuracy of the new contactless temperature measurement method by comparing it to the

digital thermometer. Measurements were made by a PIC microcontroller. A 40 kHz signal is generated inside the PIC, then amplified and emitted by an ultrasound transmitter. At the same time, the microcontroller's integrated Timer is activated. When the emitted ultrasound reaches the receiver, the Timer is stopped. The temperature is then calculated using the

measured time. Twenty four measurements have been made in the temperature range from 22°C to 27.2°C (Figure 3). Some significant deviations are present around 22°C, as these measurements were performed in a heterogeneous temperature environment. Other measured values show no significant deviation. The achieved accuracy is 2°C.

