

Bežični sistem za merenje temperature

Uglješa Z. Jovanović, Nemanja Z. Jovanović i Dragiša P. Milovanović

Sadržaj — U ovom radu prikazana je realizacija jednog sistema za bežično merenje temperature baziranom na mikrokontroleru i RF komunikaciji. Realizovani sistem predstavlja jedan od delova složenijeg meteorološkog sistema, a može se koristiti i zasebno. Detaljnije su opisani najčešće korišćeni senzori za merenje temperature sa akcentom na njihovim prednostima i manama. Opisana je arhitektura sistema i komunikacija između RF modula. Nakon realizacije sistem je detaljno testiran i proračunata je relativna greška njegovih rezultata u odnosu na referentni, komercijalni merni sistem.

Cljučne reči — Bežični merni sistem, mikrokontroler, RF komunikacija, relativna greška, senzor, temperatura, testiranje.

I. UVOD

MERENJE temperature predstavlja jedno od najvažnijih merenja bilo da se radi o meterologiji, industriji ili medicini. Sistemi za merenje temperature prave se za razne primene sa širokim temperaturnim opsezima uz veću ili manju preciznost [1].

U ovom radu akcenat je na realizaciji bežične komunikacije sistema za merenje temperature u opsegu od $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ na udaljenosti do 250 m korišćenjem relativno jeftinih i jednostavnih komponenti i senzora. Sistem bi se koristio zasebno za merenje ambijetalne temperature iz centralne, kontrolne prostorije ili kao deo složenijeg bežičnog meteorološkog sistema.

Iako na tržištu postoji vema širok izbor sistema za merenje temperature veoma mali broj koristi bežičnu komunikaciju za slanje podataka i njihova upotreba ne bi bila praktična iz više razloga. Cene sličnih sistema su znatno veće od troškova realizacije prezentovanog sistema. Drugi razlog je fleksibilnost koja se dobija razvojem i realizacijom sopstvenog sistema pri čemu se funkcionalni zahtevi mogu prilagođavati shodno potrebama.

Rad se sastoji od pet poglavlja. U drugom poglavlju opisani su senzori za merenje temperature. U trećem poglavlju analizirani su tipovi bežičnih komunikacija. U četvrtom poglavlju opisana je arhitektura realizovanog sistema. U petom poglavlju prikazani su rezultati testiranja sistema. Šesto poglavlje je zaključak.

Uglješa Z. Jovanović (autor za kontakte), Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (telefon: 381-18-529-324; e-mail: ugljesa.jovanovic@elfak.ni.ac.rs).

Nemanja Z. Jovanović, FADATA AD, Gundulićev venac 51/13, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: nemanja.jovanovic.1987@gmail.com)

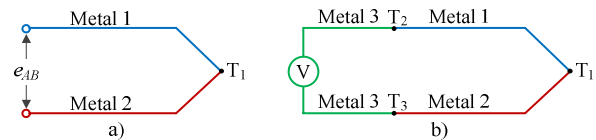
Dragiša P. Milovanović, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (telefon: 381-18-529-602; e-mail: dragisa.milovanovic@elfak.ni.ac.rs).

II. TEMPERATURNI SENZORI

Pošto je temperatura najverovatnije najčešće merena neelektrična većina razvijeno je mnogo senzora za njeno merenje koji se mogu svrstati neku od četiri kategorije.

A. Termopar

Termopar je jedan od najčešće korišćenih senzora za merenje temperature zbog relativno niske cene i velike tačnosti u širokim opsezima temperatura. Na slici 1.a prikazana je osnovna struktura termopara.



Sl. 1. a) struktura termopara; b) povezivanje sa voltmetrom

Termopar predstavlja spoj dva metala različitih temperaturnih koeficijenta na jednom kraju dok se na drugom kraju pod dejstvom Zebekovog efekta javlja razlika potencijala po relaciji:

$$e_{AB} = \alpha T. \quad (1)$$

gde je e_{AB} napon na izlaznom spoju termopara, α Zebekov koeficijent materijala a T temperatura koja se meri [2].

Ukoliko bi se ovaj napon direktno merio nekim instrumentom usled spoja metala na mestu kontakta sa termoparom (slika 1.b) pod dejstvom Zebekovog efekta došlo bi do stvaranja novog napona koji unosi grešku u merenju. Pošto termoparovi ne mere apsolutnu temperaturu već samo temperaturnu razliku između dve tačke potrebno je da se ovaj spoj (hladni spoj) održava na konstantnoj referentnoj temperaturi kojom bi se kompenzovala nastala greška. Zbog toga se najčešće koristi dodatni senzor za merenje temperature.

Izlazni napon obično ne prelazi 50 mV što znači da ga je potrebno dodatno pojačati usled čega se njihova primena dodatno komplikuje. Preciznost termoparova je mala, vreme odziva je sporo i kao što je već navedeno potrebno je izvršiti kompenzaciju hladnog spoja.

B. Temperaturni otporni senzor

Temperaturni otporni senzori menjaju svoju otpornost u zavisnosti od temperature [3]. Imaju pozitivan temperaturni koeficijent i malu nelinearnost. Promena otpornosti sa dovoljnom preciznošću može se opisati po Callendar-Van Dusen jednačini koja je data relacijom:

$$R_T = R_0 + R_0 \alpha \left[T - \delta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right) - \beta \left(\frac{T}{100} - 1 \right) \left(\frac{T}{100} \right)^3 \right]. \quad (2)$$

gde je R_T otpornost senzora na temperaturi T , R_0 je otpornost senzora na temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a α , δ i β su

temperaturni koeficijenti materijala od kog je senzor izrađen.

Obično se prave sa otpornostima od 100 Ω i zbog te male otpornosti i male osetljivosti, ovi senzori zahtevaju upotrebu mernog mosta zbog čega se komplikuje njihova primena.

Pošto je reč o pasivnim otpornim sensorima kroz koje mora prolaziti neka struja da bi se dobio napon koji se može meriti. Međutim, pod dejstvom te struje dolazi do unutrašnje disipacije snage i nastaje Džulova toplota koja senzor dodatno zagreva što povećava grešku merenja.

C. Termistor

Termistori rade na sličnom principu kao i temperaturni otporni senzori [4]. Temperaturni koeficijent može biti kako pozitivan (PTC) tako i negativan (NTC).

Koriste se u primenama gde je potrebno detektovati i izmeriti male promene u temperaturi kao što je npr. 0.01 $^{\circ}\text{C}$. Međutim, ova osetljivost se postiže na štetu linearnosti zbog čega su termistori izrazito nelinearni senzori. Njihova temperaturna karakteristika može se aproksimirati Steinhart-Hart jednačinom datom sledećom relacijom:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3. \quad (3)$$

gde je T temperatura, R otpornost termistora a A , B i C koeficijenti koje specificira proizvođač. Ova jednačina ima tačnost od oko 0.02 $^{\circ}\text{C}$.

Za razliku od temperaturnih otpornih senzora termistori imaju mnogo veću nominalnu otpornost kojom se umanjuje uticaj otpornosti priključaka tj. greška nastala usled te otpornosti.

Tačnost termistora je znatno veća od tačnosti termoparova dok platinski temperaturni otporni senzor može imati bolju tačnost. Pored većeg nominalnog otpora prednost su im male fizičke koje doprinose bržem vremenu odziva.

Prilikom merenja promene otpornosti senzora dolazi do unutrašnje disipacije snage pa se javljaju isti problemi kao kod temperaturno otpornih senzora, i veoma su osetljivi na udarce i vibracije.

D. Poluprovodnički temperaturni senzori

Ovi senzori predstavljaju novinu u merenju temperature i najčešće se prave od silicijuma pa se zbog toga još nazivaju Si sensorima. Mogu imati strujne ili naponske izlaze. U oba slučaja izlazni signal je proporcionalan apsolutnoj temperaturi. Kod strujnog izlaza osetljivost je obično reda reda 1 $\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$, a kod naponskog je reda 10 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. Amplituda izlaznog signala je relativno velika i linearna, pa se interpretacija signala vrši bez teškoća. Neki senzori na izlazu šalju digitalne podatke pa upotreba AD konvertora nije potrebna.

Velika stabilnost i tačnost omogućavaju veoma niske rezolucije merenja uz veliku linearnost.

Pošto se radi o poluprovodničkim sensorima imaju iste nedostatke kao i termistori i za njihov rad potreban je spoljašnji izvor napajanja. Problem samozagrevanja je takođe prisutan.

Za realizaciju sistema korišćen je digitalni poluprovodnički senzor DS18B20 firme *Dallas* [5]. Reč je o jeftinom i pouzdanom senzoru.

Ovaj senzor princip rada zasniva na dva band-gap naponska izvora. Jedan od izvora je temperaturno zavistan, dok drugi ne zavisi od temperature. Integrirani AD konvertor konvertuje razliku ova dva napona u digitalnu vrednost koja predstavlja izmerenu temperaturu na senzoru. Rezolucija konverzije kreće se u opsegu od 9 do 12 bitova tj. rezoluciji od 0.5 $^{\circ}\text{C}$ do 0.0625 $^{\circ}\text{C}$ koja može podešavati odgovarajućim registrima. Temperaturni opseg merenja kreće se u granicama od -55 $^{\circ}\text{C}$ do +125 $^{\circ}\text{C}$ uz tačnost od ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$ u opsegu od -10 $^{\circ}\text{C}$ do +85 $^{\circ}\text{C}$.

III. BEŽIČNA KOMUNIKACIJA

Pošto je pri realizaciji sistema akcenat postavljen na bežični prenos podataka odabir adekvatne bežične komunikacije bio je od presudne važnosti. Najvažniji kriterijumu u odabiru bežične komunikacije odnosili su se na pouzdanost transfera podataka i cenu odgovarajućih modula uz određeni kompromis.

GPRS protokol je veoma pouzdan i brz protokol, njegovom implementacijom realizovani sistem bi mogao biti povezan sa nekim web serverom bio i na taj način rezultati merenja bili bi opšte dostupni svima koji bi imali pristup serveru. Međutim, uvođenjem ovog protokola uveli bi se dodatni troškovi prilikom slanja podataka jer gotovo svi provajderi naplaćuju GPRS protok. Još veći nedostatak bi predstavljala zavisnost funkcionisanja sistema od pokrivenosti GSM signalom usled čega bi sistem bio potpuno neupotrebljiv u sredinama gde pokrivenosti nema.

Bluetooth komunikacija ne unosi dodatne troškove prilikom slanja podataka kao GPRS. Brzine transfera podataka su više nego zadovoljavajuće (do 3 Mbit/s) uz veliku pouzdanost prilikom transfera istih. Međutim, moduli nisu jeftini a ni jednostavni za implementaciju. Glavni problem ove komunikacije ogleda se u efektivnom rastojanju između modula u kojima je uspešan prenos podataka zasiguran a koji se kreće do 20 m što je nedovoljno za njihovo korišćenje u realizaciji sistema.

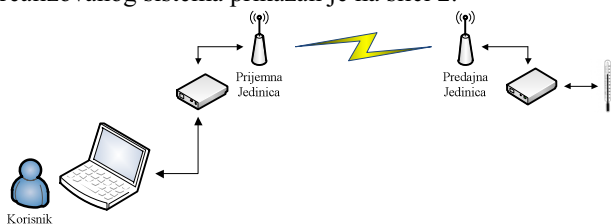
ZigBee protokol takođe ne unosi dodatne troškove prilikom transfera podataka uz zadovoljavajuće brzine transfera (do 500 Kbit/s) i veliku pouzdanost prilikom transfera. Komunikacija se obavlja putem RF talasa na frekvencijama od 868 Mhz i 2.4G GHz i efektivnim rastojanjem između modula od 100 m do 1 km u zavisnosti od frekvencije i snage korišćenih modula. Komunikacioni moduli (primopredajnici) su finansijski pristupačni i relativno jednostavni za implementaciju.

Na tržištu je zastupljeno mnogo relativno jeftinih i veoma pouzdanih RF primopredajnika koji se ne svrstavaju među ZigBee primopredajnike. Upravo jedan takav primopredajnik korišćen je za realizaciju sistema. Reč je o primopredajniku ST-TR1100 firme *Summitek* baziranom na čipu CC1100 [6] firme *Texas*. Navedeni primopredajnik je specijalno konstruisan za industrijske senzorske mreže zadovoljavajući stroge industrijske standarde pa je očigledno da se radi o pouzdanom primopredajniku. Radi na frekvenciji od 433 MHz uz maksimalnu brzinu

transfera podataka od 500 Kbit/s. Treba napomenuti da mu cena ne prelazi par dolara što ga svrstava u red najjeftinijih primopredajnika na tržištu.

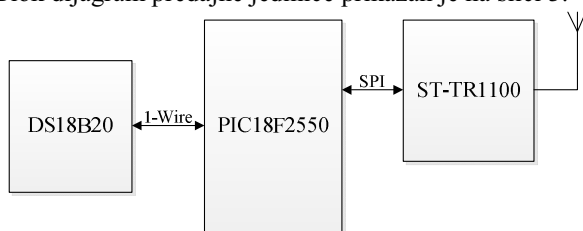
IV. ARHITEKTURA SISTEMA

Realizovani sistem se sastoji iz dva glavna dela predajne jedinice koja vrši neprekidno merenje temperature a dobijene rezultate merenja bežičnim putem prosleđuju do drugog dela tj. prijemne jedinice koja dobijene rezultate prosleđuje računaru na dalju obradu i prikazivanje. Obzirom da brzina transfera nije od presudnog značja RF primopredajnici komuniciraju na brzini od 76.8 Kbit/s koristeći FSK modulaciju signala. Blok dijagram realizovanog sistema prikazan je na slici 2.



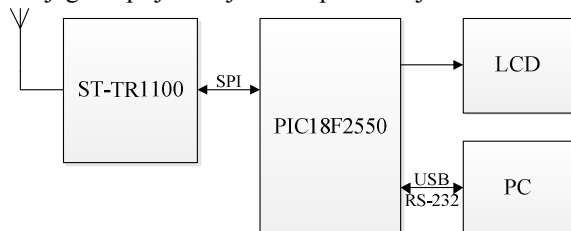
Sl. 2. Blok dijagram sistema

Predajna jedinica sastoji se od mikrokontrolera PIC16F887 [7] firme *Microchip*, RF primopredajnika ST-TR1100 i digitalnog temperaturnog senzora DS18B20. Blok dijagram predajne jedinice prikazan je na slici 3.



Sl. 3. Blok dijagram predajne jedinice

Prijemna jedinica sastoji se od mikrokontrolera PIC18F2550, RF primopredajnika ST-TR1100, LCD displeja za opciono prikazivanje izmerene temperature direktno na jedinici i periferija za komunikaciju sa računarem. Komunikacija sa računarem ostvaruje se na dva načina, putem serijskog RS-232 porta ili USB porta. Blok dijagram prijemne jedinice prikazan je na slici 4.



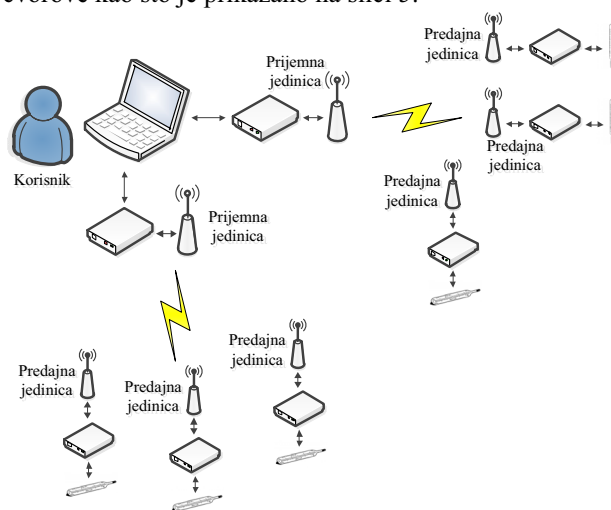
Sl. 4. Blok dijagram prijemne jedinice

Predajna jedinica vrši kontinualno merenje temperature i to sa jednim merenjem u sekundi. Nakon svakog merenja dobijeni rezultati šalju se prijemnoj jedinici. U zaglavlju svake poruke koju predajna jedinica šalje nalazi se adresa prijemne jedinice kojoj se vrši obraćanje tako da se u prijemnoj jedinici eliminiše mogućnost prijema podataka sa drugog sistema. Ukoliko prijemna jedinica ne primi nijednu poruku u čijem zaglavlju se nalazi njena adresira

20 sekundi nakon prijema poslednje poruke automatski će se resetovati. Nakon svakog uspešno prihvaćene poruke adresirane na nju prijemna jedinica šalje potvrđnu poruku predajnoj jedinici. Predajna jedinica nastavlja sa merenjem i slanjem rezultata isključivo nakon prihvatanja potvrđne poruke. Ukoliko predajna jedinica ne primi potvrđnu poruku 20 sekundi nakon slanja rezultata prethodnog merenja automatski će se resetovati.

Ovako sprovedenim zaštitnim procedurama prilikom trasmisije podataka postiže se bolja sinhronizacija sistema, umanjuje se broj grešaka i uvodi dodatna pouzdanost u njegovom radu.

Ukoliko to potrebe nalažu uz male softverske izmene moguće je povezati više ovakvih sistema u senzorske čvorove kao što je prikazano na slici 5.



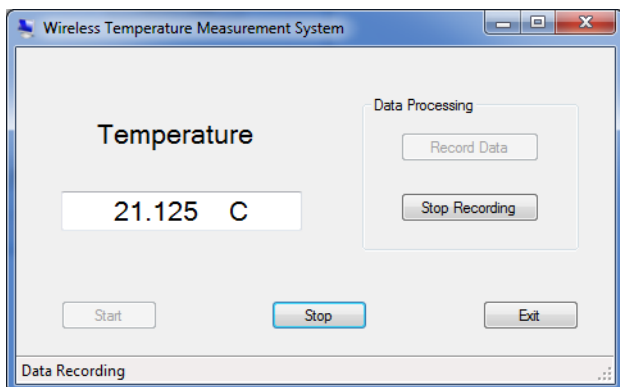
Sl. 5. Blok dijagram složenijeg sistema

U topologiji sa slike 5 svaka prijemna jedinica vrši prikupljanje podataka sa više predajnih jedinica na način sličan prethodno opisanom uz dve izmene. Prva razlika odnosi se na uvođenje jedinstvenih adresa predajnih jedinica po kojima se vrši razvrstavanje pristiglih rezultata merenja kako ne bi došlo do njihovog mešanja. Iz tog razloga svaka predajna jedinica mora da se obraća samo jednoj prijemnoj odnosno prijemna jedinica prihvata poruke samo od predajnih jedinica čije su adrese u internoj EEPROM memoriji mikrokontrolera dok ostale zanemaruje.

Povezivanjem više predajnih jedinica moguće je meriti temperaturu sa više međusobno udaljenih lokacija na jednostavan način.

V. TESTIRANJE SISTEMA I REZULTATI

Nakon uspešne realizacije mernog sistema pristupilo se njegovom testiranju i upoređivanju sa referentnim komercijalnim mernim sistemom. Kako bi testiranje razvijenog sistema bilo što pouzdanije i jednostavnije razvijena je posebna softverska aplikacija čiji glavni prozor je prikazan na slici 6.



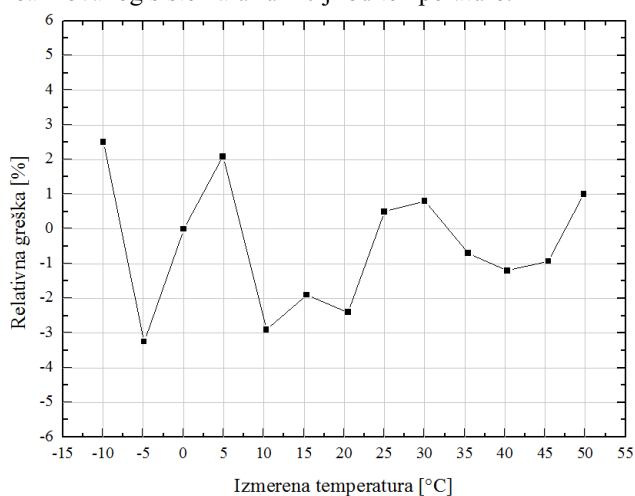
Sl. 6. Izgled razvijene aplikacije

Iako predajna jedinica podržava i serijski i USB port razvijena aplikacija je bazirana na USB portu koji danas imaju svi računari, a serijski port se koristio prilikom testiranja sistema u fazi razvoja jer je protokol jednostavniji za analizu.

Inicijalizacija merenja započinje se klikom na dugme *Start* nakon čega se u text box-u ispisuje trenutno izmerena vrednost temperature. Klikom na dugme *Record Data* započinje se memorisanje izmerenih vrednosti u bazu podataka zbog naknadne analize. Klikom na dugme *Stop Recording* prekida se memorisanje rezultata a klikom na dugme *Stop* prekida se komunikacija između aplikacije i sistema pri čemu sistem nastavlja sa radom.

Kao referentni sistem izabran je komercijalni merni uređaj UT325 firme *UNI-T* čija tačnost iznosi $\pm 0.6^\circ\text{C}$ a rezolucija 0.1°C dok tačnost realizovanog sistema zavisi od senzora DS18B20 i iznosi $\pm 0.5^\circ\text{C}$ a rezolucija 0.0625°C . Referentni sistem ima USB komunikaciju sa računarom što omogućava prikaz i obradu rezultata merenja na računaru pomoću odgovarajuće aplikacije. Prilikom testiranja oba sistema nalazila su se u zatvorenoj komori čija je temperatura menjana u opsegu od -10°C do $+50^\circ\text{C}$ uz korak od 5°C .

Na osnovu dobijenih rezultata merenja proračunata je greška realizovanog mernog sistema u odnosu na referentni. Na slici 7 prikazana je relativna greška realizovanog sistema u funkciji od temperature.



Sl. 7. Relativna greška realizovanog sistema

Kao što se vidi sa slike 8 relativna greška ne prelazi 4 % u celom opsegu merenja što se može smatrati

zadovoljavajućim obzirom da sistem nije optimizovan jer se radi o laboratorijskom prototipu kao i da referentni sistem nema vrhunsku rezoluciju a ni tačnost.

Realizovani sistem uspešno je testiran na rastojanju od 200 m između prijemne i predajne jedinice pri čemu nije dolazilo do gubitka podataka dok se sa povećavanjem razdaljine broj gubitaka uvećavao do potpunog prekida komunikacije na 400 m. Testiranje dometa je obavljeno na otvorenom prostoru uz optičku vidljivost između jedinica sistema.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je realizovani sistem za bežično merenje temperature. Detaljnije su opisani najčešće korišćeni senzori za merenje temperature i izvršeno je njihovo poređenje. Opisana je arhitektura razvijenog sistema i predložene su neke od mogućnosti za njegovu nadogradnju i implementaciju sa drugim sistemima. Realizovani sistem je detaljno testiran i izvršeno je poređenje njegovih merenja sa komercijalnim mernim uređajem sličnih karakteristika na osnovu čega je proračunata relativna greška razvijenog sistema.

LITERATURA

- [1] *Omega Temperature Measurement Handbook and Encyclopedia*, OMEGA Engineering INC., Stamford, CT., 2010.
- [2] *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., 1993.
- [3] *RESISTANCE THERMOMETRY: Principles and applications of resistance thermometers and thermistors*, Mincom, Minneapolis, MN., 2000.
- [4] D. Jones, "Biomedical Sensors," New York, Momentum Press, 2010.
- [5] *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*, Maxim Integrated Products, Sunnyvale, CA., 2008.
- [6] *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet*, Microchip Technology Inc., Chandler, AZ., 2009.
- [7] *CC1100 Low-Power Sub- 1 GHz RF Transceiver*, Texas Instruments, Dallas, TX., 2009.

ABSTRACT

In this paper realization of the wireless temperature measurement based on the microcontroller and RF communication is presented. Realised system is a part of more complex meteorological system, but it can be used separately. Details of most commonly used sensors for temperature measurement with a focus on their advantages and disadvantages were presented. Detailed system architecture was presented as well as communication between its RF modules. After the realisation the system was thoroughly tested and its measurement results were compared with results of the commercial measurement system serving as secondary standard. Based on the obtained results a relative measurement error of the realised system was calculated.

WIRELESS TEMPERATURE MEASUREMENT SYSTEM

Uglješa Z. Jovanović, Nemanja Z. Jovanović and
Dragiša P. Milovanović