

Etaloniranje infracrvenih beskontaktnih merila temperature koršćenjem IC kalibratora sa posebnim osvrtom na ukupnu mernu nesigurnost

Miloš Jovanović
School of computing, Union University
Beograd, Srbija
mjovanovic@raf.rs
0000-0002-6621-8235

Neda Spasojević
Tehnički opitni centar; Sektor za
metrologiju
Beograd, Srbija
nedamilivojcevic@yahoo.com
0000-00015-8051-982X

Dragan Lazić
Tehnički opitni centar; Sektor za
metrologiju
Beograd, Srbija
astazulazic@gmail.com
0009-0005-1800-7838

Miša Markuš
Tehnički opitni centar; Sektor za
metrologiju
Beograd, Srbija
misa.markus@gmail.com
0009-0006-1389-4330

Slobodan Subotić
Tehnički opitni centar; Sektor za
metrologiju
Beograd, Srbija
slobodansubotic80@gmail.com
0009-0008-1389-2451

Nikola Jovičić
Tehnički opitni centar; Sektor za
metrologiju
Beograd, Srbija
nikolajovicic26@gmail.com

Aleksandar Atanacković
Tehnički opitni centar; Sektor za
metrologiju
Beograd, Srbija
salelovac1@gmail.com

Abstract—U radu je predstavljena metoda etaloniranja infracrvenih beskontaktnih merila temperature. Predstavljajući su osnovni fizički i matematički postulati implementirani kod beskontaktnim merila temperature, njihova primena, osnovne karakteristike i ograničenja. Poseban osvrt u radu, dat je na budžet merne nesigurnosti, glavne elemente budžeta merne nesigurnosti, kao i proračun ukupne merne nesigurnosti tokom etaloniranja.

Gljučne reči—beskontaktni način, infracrveni system, temperatura, merna nesigurnost

I. UVOD

Merenje temperature ima dugu i zanimljivu istoriju, koja seže još od antičkih vremena do modernih tehnologija [1]. Još je Aristotel u 4. veku p.n.e. je uveo pojam "kvaliteta toplote i hladnoće" kao osnovnih svojstava materije. Ovo doba bilo je poznato kao doba galenske medicine, metode koja je koristila subjektivnu procenu toplote (dodirom) za dijagnostiku bolesti. Revolucija u merenju temperature označila je pojava prvih termometara u 17. veku. Tako se pripisuje poznatom naučniku tog doba Galileo Galileju (1592.) izum "termoskopa" (gasni termometar bez skale), koji je pokazivao promene temperature širenjem/sabijanjem vazduha. Godine 1612. godine, italijanski naučnik Santorio Santorio je razvio prvi klinički termometar sa numeričkom skalom, a Ferdinand II de Medici je razvio zatvoreni tečni alkoholni termometar. 18. vek je doneo prvu standardizaciju termometara, tako je Daniel Gabriel Fahrenheit razvio živosrebrni precizni termometar 1724. godine i uveo Fahrenheit-ovu skalu. Godine 1742, je Andres Celsius uveo Celsiusovu skalu.

Savremene metode merenja temperature jesu metode razvijene od početka 20. veka do danas. U tom smislu razvijene

su kontaktne i beskontaktno metode. Kontaktne metode podrazumevaju upotrebu termoparova, termistora kao i otpornih termometara, dok beskontaktno metode podrazumevaju upotrebu pirometara i posebnih termovizijskih kamera.

II. BESKONTAKTNI INFRACRVENI TERMOMETRI

Kao što je već i pomenuto, beskontaktno merenje temperature se ostvaruje putem detekcije infracrvenog (IR) zračenja koje emituju tela [3]. Pirometri [4] (beskontaktni merači temperature putem detekcije infracrvenog zračenja) mere toplotno zračenje koje emituje objekat u infracrvenom spektru (obično 0.7–20 μm). Infracrveni termometar koristi sistem sočiva za fokusiranje zračenja na infracrveni detektor koji pretvara apsorbovanu energiju u električni signal. Temperatura koja se proračuna iz električnog signala koriguje se za emisivnost izvora. Koristeći optičke filtere, infracrveni termometri mogu da koriste veoma uski opseg talasnih dužina, dok drugi sistemi mogu da koriste veoma širok opseg talasnih dužina. U oba slučaja, apsorbovana energija je povezana sa temperaturom koristeći Plankov zakon. Širokopojasni infracrveni termometri su relativno jeftini i laki za upotrebu, ali njihova preciznost je direktno povezana sa činjenicom da emisivnost zavisi od talasne dužine, što otežava korekciju. Uskopojasni infracrveni termometri se ne suočavaju sa ovim ograničenjem jer vrednost emisivnosti ne varira značajno u odnosu na korišćene talasne dužine.

Savremena tehnologija neprestano poboljšava tačnost infracrvenih termometara. Putem, optičkih sistema omogućava se udaljeno pozicioniranje merila od izvora toplote. Savremeni infracrveni termometari kombinuju pulsnu lasersku tehnologiju sa uskopojasnim, jednobojnim infracrvenim termometrima kako bi se automatski odredile vrednosti emisivnosti i tačno

korigovale u ciljnu temperaturu. Ova tehnologija uključuje upotrebu pulsnog lasera koji emituje energiju unutar istog uskog opsega kao što instrument meri ciljnu toplotno zračenje. Infracrveni detektor meri količinu laserske energije reflektovane od mete, a mikroprocesorska jedinica određuje u tačnu vrednost putem kompenzacije emisivnost. Instrument zatim prikazuje realnu ciljnu temperaturu, korigovanu za emisivnost i ostvaruje tačnost u granicama ± 3 K. Tehnologija pulsnog lasera je veoma efikasna u slučaju difuznih površina.

III. ETALONIRANJE INFRACRVENIH BESKONTAKTNIH TERMOMETARA.

Kao i svako merilo, i beskontaktni infracrvene merače temperature potrebno je periodično etalonirati, odnosno, kalibrisati, da bi se korisnik uverio u njihovu ispravnost i funkcionalnost. Za razliku od kontaktnih termometara, infracrveni beskontaktni merači temperature zahtevaju nešto složeniju proceduru etaloniranja i kalibracije. Osnovni problem kod etaloniranja infracrvenih beskontaktnih termometara jeste precizno određivanje temperature merne površine na kojoj se vrši kalibracija, odnosno etaloniranje termometra. Drugi problem je sama osetljivost infracrvenih beskontaktnih merača temperature na različite spoljašnje uticaje kao što su koncentracija ugljen dioksida i drugih gasova, uticaj prljavštine i prašine na samoj površini, kao i uticaj okolne radijacije koja se može javiti u procesu kalibracije.

Najoptimalniji način etaloniranja infracrvenih termometara je etaloniranje upotrebom takozvanih infracrvenih kalibratora. Jedan od pouzdanih kalibratora takve vrste na tržištu jeste kalibrator tipa FLUKE 4181 [4].

Fluke Calibration 4181 precizni infracrveni kalibrator [4] je prenosivi kalibrator temperature koji se koristi za kalibraciju tačkastih IR termometara. Uređaj je malih dimenzija, prenosni, pogodan za upotrebu u laboratoriji i na terenu.

Osnovne karakteristike uređaja jesu:

- Brzo zagrevanje i hlađenje.
- Mogućnost RS-232 interfejsa.
- Kontrola brzine skeniranja temperature.
- Mogućnost memorisanja osam zadatih tačaka.
- Podesivo očitavanje u $^{\circ}\text{C}$ ili $^{\circ}\text{F}$.
- Podesiva emisivnost.

Digitalni kontroler precizno reguliše temperaturu, putem otprunog platinskog RTD senzora a ostvaruje precizno zagrevanje grejne površine putem poluprovodničkog SSR releja. Posедуje LCD displej na kome se neprekidno prikazuje trenutna temperatura.

IV. METODA ETALONIRANJA

Metoda etaloniranja putem kalibratora sastoji se u tome da se u potpunosti simulira princip beskontaktnog merenja temperature. Na početku procesa etaloniranja na kalibrator se zada željena temperatura odgovarajućim postupkom. Aktiviranjem kalibratora otpočinje proces uspostavljanja željene odabrane temperature na kalibratoru. Kada je temperatura dostignuta kalibrator odgovarajućim zvučnim signalom obaveštava da je moguće otpočeti proces etaloniranja. Termometar se zatim uperi sa odgovarajuće razdaljine na ploču

kalibratora koja je zagrejana na željenu temperaturu i izvrši se očitavanje temperature na ploču i kalibratora u isto vreme očitava se realizovana temperatura na LCD displeju koja daje informaciju koliko je zaista zagrejana ploča kalibratora.

Zapisuje se informacija o izmerenoj temperaturi i dostignutoj temperaturi na površini kalibratora. Merenje je potrebno ponoviti više puta radi statističke obrade podataka. Ukoliko merilo poseduje mogućnost automatizacije procesa merenja, kalibrator već poseduje odgovarajuće protokole i softverske alate koji omogućavaju automatizaciju. Vizuelni prikaz kalibracije putem kalibratora temperature prikazan je na slici 1.



Slika 1. Prikaz metode etaloniranja beskontaktnih infracrvenih merila temperature.

Postupak se zatim ponavlja za sledeću tačku i tako sukcesivno do kraja etaloniranja. Treba napomenuti da je svaki put potrebno postaviti željenu temperaturu na kalibratoru i sačekati vreme dok kalibrator ne dostigne željenu temperaturu i zvučnim signalom ne obavesti operatera da je temperatura stabilisana. Takođe treba napomenuti da je moguće isprogramirati željeni broj tačaka na kalibratoru tako da kalibrator može samostalno ostvariti sledeću tačku posle nekog vremena, te se samim tim proces etaloniranja može ubrzati. Takođe treba napomenuti da je kalibrator moguće povezati odgovarajućim serijskim protokolima na računarski sistem i odgovarajućim alatima izvršiti automatizaciju procesa etaloniranja samo u slučaju ukoliko i merilo poseduje iste takve karakteristike, odnosno, moguće ga je odgovarajućim komunikacionim protokolima povezati na računarski sistem i nezavisno očitati mrerenu temperaturu.

V. OGRANIČENJA I PROBLEMI

Tokom etaloniranja infracrvenih senzora putem kalibratora potrebno je posebnu pažnju obratiti na moguće uticaje okoline tokom etaloniranja. Posebno treba napomenuti da je infracrveni spektar jako zavistan od koncentracije ugljen dioksida jer koncentracija ugljen dioksida značajno utiče na apsorpciju a samim tim i merenje količine infracrvenog spektra od strane mernog instrumenta tokom kalibracije. Potrebno je pratiti i meriti koncentraciju ugljen dioksida u laboratoriji ili na mernom mestu.

Drugi problem odnosi se na koncentraciju vodene pare, odnosno, na zasićenost vazduha tokom etaloniranja. Relativnu vlažnost vazduha potrebno je pratiti i meriti tokom metaloniranja vrlo precizno jer koncentracija vodene pare tokom etaloniranja direktno utiče na preciznost merenja.

Treći problem odnosi se na udaljenost merila od kalibratora, odnosno, od površine na kojoj se vrši kalibracija. Udaljenost mora biti u granicama definisanim uputstvom od strane proizvođača merila. Ukoliko je udaljenost veća, merna vrednost značajno odstupa od stvarne vrednosti. Ukoliko je udaljenost manja, očitana vrednost može varirati u zavisnosti od udaljenosti.

Četvrti parametar koji utiče na vrednost merenja jeste prisutnost čestica prašine i drugih nečistoća tokom etaloniranja, jer svaka od ovih neželjenih nečistoća utiče na preciznost merenja.

Takođe je potrebno obratiti pažnju na ugao pod kojim se očitava temperatura sa kalibratora. Poželjno je da ugao merenja bude 90° u odnosu na površinu kalibratora. Ukoliko je ugao merenja u značajnoj meri odstupa od 90°, preciznost merenja može biti značajno narušena.

Tokom etaloniranja potrebno je da merilo bude fiksno učvršćeno u odnosu na kalibrator odnosno da ne postoji fluktuacija tokom merenja koja se javlja u slučaju da se očitavanje vrši rukom, što unosi podrhtavanje i fluktuaciju rastojanja tokom merenja.

Svi navedeni parametri direktno utiču na ukupnu mernu nesigurnost koja se primenjuje na mernu vrednost tokom merenja. U narednom paragrafu svaki od ovih parametara direktno će biti merljiv i dati svoj doprinos u budžetu merne nesigurnosti tokom etaloniranja.

VI. BUDŽET MERNE NESIGURNOSTI TOKOM ETALONIRANJA INFRACRVENIH TERMOEMTARA PUTEM KALIBRATORA

Tabela 1. Budžet merne nesigurnosti na 100 °C

budžet merne nesigurnosti na 100 °C									
Порекло несигурности	Ознака величине	јединица	Процена	стандардна несигурност	Врста расподеле	Коефицијент осетљивости	Јединица	Допринос несигурности	
	X_i		x_i	$u(x_i)$		c_i		$u_i(y)$, degC	$u_i^2(y)$
Таčnost очитаванја temperature merila (°C)	dT	(°C)	0.2	0.05774	правоугаона	1	(°C)	0.0577	3.33E-03
Мерна несигурност kalibrатора (°C)	dT_{cal}	(°C)	0.5	1.44E-01	правоугаона	1	(°C)	0.1443	2.08E-02
rezolucija merila	δR_{RAZ}	(°C)	0.1	2.89E-02	правоугаона	1	(°C)	0.0289	8.33E-04
Koncentracija CO ₂	δT_{CO_2}	(°C)	0.05	1.44E-02	правоугаона	1	(°C)	0.0144	2.08E-04
Koncentracija H ₂ O	δT_{H_2O}	(°C)	0.05	1.44E-02	правоугаона	1	(°C)	0.0144	2.08E-04
netačnost ugla kalibracije	$\delta \alpha$	(°C)	0.02	5.77E-03	правоугаона	1	(°C)	0.0058	3.33E-05
Утицај зрачења околине	δT_{back}	(°C)	0.02	5.77E-03	правоугаона	1	(°C)	0.0058	3.33E-05
Укупна мерна несигурност								0.1596	2.55E-02
Проширена мерна несигурност, k=2								0.3193	

U Tabeli 1. dat je kompletan budžet merne nesigurnosti svih uticajnih faktora tokom etaloniranja infracrvenih merila temperature putem kalibratora.

Kao što se vidi iz tabele svi uticajni faktori u budžetu imaju svoju težinsku karakteristiku. Najveća težinska karakteristika očigledno je merna nesigurnost samog kalibratora, sledeća težinska karakteristika koja dominira u budžetu jeste tačnost

očitavanja temperature merila. Naredna uticajna veličina je sama rezolucija merila. Koncentracija ugljen dioksida u atmosferi, koncentracija vodene pare u atmosferi, odnosno relativna vlažnost vazduha kao i stepen nečistoće u samoj okolini tokom etaloniranja takodje ima svoje uticajne karakteristike. Uočava se da na 100 °C merna nesigurnosti kalibratora, koja je data uputstvom proizvođača u iznosu od 0,5 °C najznačajnije odprinosi ukupnoj mernoj nesigurnosti tokom etaloniranja. Uočava se da iz bužeta ukupna merna nesigurnost kod standardnih uticaja okoline u svim veličinama na kraju ne prelazi 0,4 °C. Treba napomenuti da je predviđena raspodela merne nesigurnosti za sve uticajne veličine pravougaona jer su sve uticajne veličine takvog karaktera da je pravougaona raspodela najbolja raspodela za definisane uticajne veličine.

VII. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan metod kalibracije infracrvenih beskontaktnim merila temperature putem kalibratora. Objasnjeni su svi uticajni faktori tokom kalibracije kao i mogućnost za minimizaciju uticajnih faktora tokom etaloniranja. Prikazan je kompletan budžet merne nesigurnosti i objasnjeni svi elementi merne nesigurnosti za temperaturu od 100 °C koji direktno utiču na ukupnu mernu nesigurnost na datoj temperaturi.

REFERENCE/LITERATURA

- [1] G. Eason, B. Noble, and I. N. Sneddon, "On certain integrals of Lipschitz-Hankel type involving products of Bessel functions," Phil. Trans. Roy. Soc. London, vol. A247, pp. 529–551, A
- [2] Middleton, W. E. Knowles, A history of the thermometer and its use in meteorology, Baltimore (The Johns Hopkins Press). 1966. <https://doi.org/10.1002/qj.49709440024>
- [3] Joseph Priest, Temperature and Its Measurement, Encyclopedia of Energy Elsevir, 2004, Pp 45-54, <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00082-6>
- [4] Internet sajt firme FLUKE infracrvenog kalibratora 4181. <https://www.fluke.com/en/product/calibration-tools/temperature-calibrators/fluke-calibration-4180-4181J>. Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.

ABSTRACT

Calibration of infrared non-contact temperature measure devices using IR calibrators with special reference to overall measurement uncertainty

The paper presents the calibration method of infrared non-contact temperature gauges. Presentations are the basic physical and mathematical postulates implemented in non-contact temperature gauges, their application, basic characteristics and limitations. The paper gives a special review of the measurement uncertainty budget, the main elements of the measurement uncertainty budget, as well as the calculation of the total measurement uncertainty during calibration.

Milos Jovanović, Dragan Lazić, Slobodan Subotić, Neda
Spasojević, Miša Markuš, Nikola Jovičić, Aleksandar
Atanacković,