

Vpliv velikosti vira referenčnih sevalnih termometrov v LMK

Igor Pušnik¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: igor.pusnik@fe.uni-lj.si

Size-of-source effect of reference radiation thermometers in LMK

Abstract.

For measurements with radiation thermometers, it is very important to take into account the factors that influence the measurement uncertainty. One of them is the phenomenon called the size-of-source effect (SSE). This occurs due to irregularities in the optical system of the measuring instrument, which can cause a higher or lower temperature reading of a measured object, as it really is. This is due to radiation having a source outside the nominal size of the measured area. There are two commonly used methods for determining this effect, namely indirect and direct method. The latter is more appropriate for radiation thermometers with a lower resolution and a temperature output signal. In this case, calibration furnaces (blackbodies) are used as a source of radiation, and with the corresponding apertures we reduce the size-of-source. Thus, we measure the response of a radiation thermometer at different sizes of the source. The nominal size-of-source is at the specified distance the minimum required measurement surface, where it is possible to measure the temperature with a radiation thermometer. Knowing the size-of-source effect of a radiation thermometer is very important, as this allows adjustment of the measurement conditions for the correct performance of measurements.

1 Uvod

Sevalni termometri predstavljajo termometre za realizacijo temperaturne lestvice ITS-90 nad strdiščem srebra (961,78 °C) [1]. Sevalni termometri ali pirometri spadajo v skupino termometrov, ki z detektorjem zaznavajo toplotno sevanje in ga pretvorijo v električni signal. Izkoriščajo dejstvo, da vsi objekti s temperaturo nad absolutno ničlo (0 K) oddajajo toploto v obliki elektromagnetnega sevanja. Največje prednosti pirometrov so brez kontaktno merjenje, merjenje premikajočih se objektov ter merjenje zelo visokih temperatur. Najpogosteje so uporabljeni v industriji, dostopne pa so tudi razne cenejše izvedbe, kot so prenosni baterijski sevalni termometri. Pri kalibracijah referenčnih sevalnih termometrov za različna območja so pogosto uporabljena črna telesa, z različnimi dimenzijami odprtín. Zato je pomembno poznati vse morebitne dejavnike, ki lahko vplivajo na točnost meritev. Z različnimi oddaljenostmi pirometra do črnega telesa lahko dobimo različne rezultate meritev. Zato je pomembno poznati podatke o najmanjši oziroma nazivni velikosti vira ter

karakteristiko vpliva velikosti vira za določen sevalni termometer. Vpliv velikosti vira smo izmerili in izračunali za dva sevalna termometra proizvajalca Heitronics, tipa TRT II in KT 19.01 II, ki se v Laboratoriju za metrologijo in kakovost uporabljata kot referenčna sevalna termometra. Pri izvedbi meritev temperature smo si pomagali z grafoma najmanjšega premera merjene površine (tarče), kot ju je podal proizvajalec za posamezen pirometer. Cilj je bil ugotoviti, pri kateri velikosti vira za posamezen pirometer, pri različnih oddaljenostih od vira in temperaturi, je izvedba meritev še dovolj točna in je nižja izmerjena temperatura zaradi tega vpliva še sprejemljiva za določen namen merjenja. Z manjšanjem merjene površine se namreč zmanjšuje točnost meritve, ker detektor sevalnega termometra ne dobi zadostnega signala. Razlogi poleg majhne velikosti vira so še ovire na prenosni poti (transmisivnost atmosfere, običajno izgube sevanja) ter neidealnosti optičnega sistema pirometra (odklon, lom, uklon).

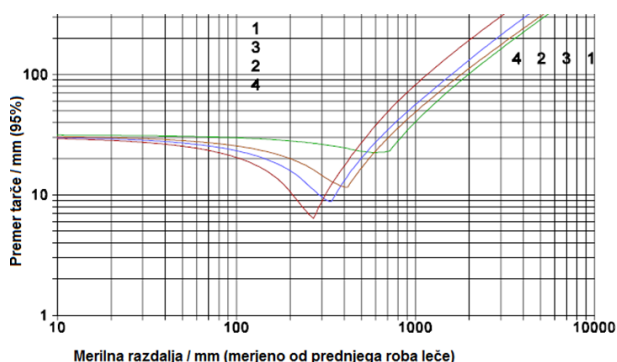
2 Oprema

Vpliv velikosti vira je bil določen po direktni metodi za referenčna sevalna termometra Heitronics KT 19.01 II in Heitronics TRT II. Uporabljena oprema za izvedbo meritev je poleg pirometrov obsegala:

- kalibracijske temperaturne kopeli in peči s črnimi telesi, uporabljenih je bilo šest kopeli in peči za različna temperaturna območja,
- ohmmeter HP 34420A in referenčne uporabne termometre kalibracijskih peči,
- aluminijaste zaslonke debeline 2 mm in s premerom odprtine od 8,8 mm do 60 mm, pobarvane s črno barvo z visoko emisivnostjo,
- nosilec zaslonk z vodnim hlajenjem na 23 °C,
- računalnik s programskim okoljem LabVIEW za zajemanje in obdelavo podatkov (temperaturnih meritev).

Tabela 1. Specifikacije termometra Heitronics KT 19.01 II

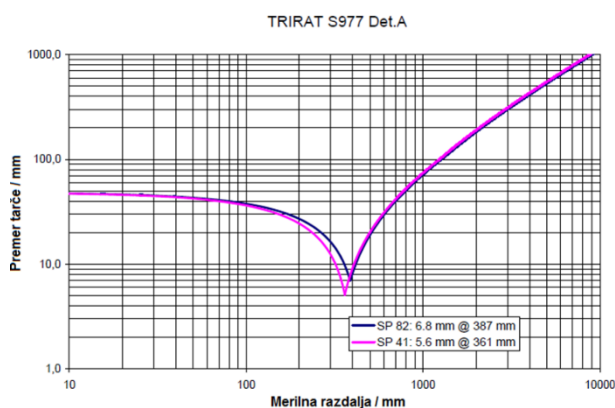
merilno območje	350 °C - 2000 °C
spektralna odzivnost	2 – 2,7 μm
najmanjša velikost tarče	22 pri 733 nm
ločljivost	0,1 do 1000 °C, 1 nad 1000 °C
detektor	piroelektrični
optika	leča S922 (kalcijev fluorid), detektor tipa B



Slika 1: Podatki o najmanjšem premeru tarče za Heitronics KT19.01 II

Tabela 2. Specifikacije termometra Heitronics TRT II

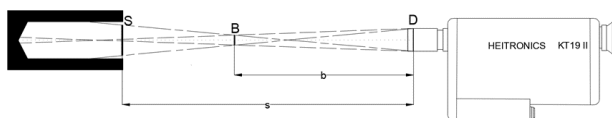
merilno območje	- 50 °C - 300 °C; 150 °C - 1000 °C
spektralna odzivnost	8 – 14 μm; 3,9 μm
najmanjša velikost tarče	6,8 pri 380 mm; 5,6 pri 361 mm
ločljivost	0,01 do 100 °C, 0,1 nad 100 °C
detektor	pireoelektrični
optika	leča S977AR (cinkov selenid), detektor tipa A



Slika 2: Podatki o najmanjšem premeru tarče za Heitronics TRT II

3 Meritve

Meritve smo izvedli pri različnih oddaljenostih od roba črnega telesa do leče pirometra (razdalja s) glede na podatke o vidnem polju oz. najmanjši velikosti tarče pri določeni razdalji instrumenta (field of view - grafa na sliki 1 in 2). Na sliki 3 je predstavljena postavitve pirometra pri izvajanju meritev.

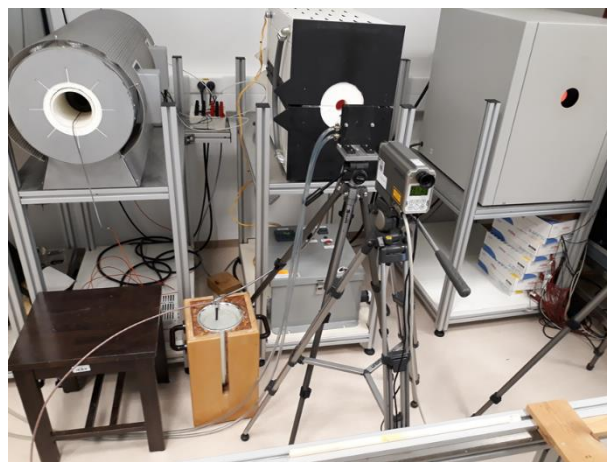


Slika 3: Postavitve pirometra glede na črno telo

Iz projekcij razdalj in premerov na sliki 3 se lahko izpelje razmerje

$$\left[\frac{D+s}{s} \right] = \left[\frac{D+B}{b} \right] \quad (1)$$

kjer je D premer leče pirometra, S navidezna tarča na odprtini črnega telesa, B premer zaslonke, ki predstavlja tarčo, s razdalja od leče do črnega telesa in b razdalja od leče do zaslonke. Iz tega lahko sklepamo, da morajo biti zaslonke čim bližje črnemu telesu, s tem dosežemo manjšo navidezno tarčo S in merimo sevanje, ki izhaja le iz črnega telesa in ne merimo površine okoli njega. Pri meritvah stojala z zaslonkami ni bilo mogoče povsem približati črnemu telesu zaradi stojala peči in pri eni od peči tudi zaradi referenčnega termometra, ki se je nahajal na sprednji strani pod njeno odprtino (slika 4). Pri ostalih pečeh so se le-ti nahajali v zadnjem delu, na koncu črnega telesa. Pri temperaturah 50 °C, 150 °C in do 250 °C se uporabljajo tri kalibracijske kopeli enakih dimenzij, s premerom odprtine črnega telesa 60 mm in z dolžino votline 400 mm. Pri 500 °C se uporablja kalibracijska peč s premerom odprtine črnega telesa 55 mm in z dolžino votline 500 mm. Pri 750 °C in 1000 °C se uporablja kalibracijska peč s premerom odprtine črnega telesa 40 mm in z dolžino votline 500 mm. Meritve so se izvajale s pomočjo programske opreme, narejene v okolju LabVIEW.



Slika 4: Merilno mesto v LMK (črno telo v ozadju, pred njim zaslonka s hlajenjem in pirometar na stojalu)

Pri direktni metodi merjenja vpliva velikosti vira [2] je instrument fokusiran na odprtino zaslonke, ki se nahaja pred stabilnim virom sevanja, običajno črnim telesom, in merimo signal detektorja pri različnih polmerih odprtine zaslonke. Vpliv velikosti vira pri nekem polmeru r je določen z razmerjem med signalom pri tem polmeru $S(r,L)$ in signalom, ki bi ga dobili pri neskončnem polmeru $S(\infty,L)$. Ker v praksi ne moremo realizirati neskončnega polmera, merimo vpliv velikosti vira kot funkcijo polmera vira sevanja na nekem omejenem območju $r_{min} \leq r \leq r_{max}$, kjer r_{max} najpogosteje predstavlja polmer odprtine črnega telesa. Vpliv velikosti vira tako izrazimo z razmerjem med signalom detektorja pri polmeru r in signalom pri največjem polmeru r_{max}

$$\sigma_S(r, r_{\max}) = \frac{\sigma_S(r)}{\sigma_S(r_{\max})} = \frac{S(r, L)}{S(r_{\max}, L)} \quad (2)$$

kjer L predstavlja sevanje črnega telesa v skladu s Planckovim zakonom

$$L_{\lambda, b}(\lambda, T) = \frac{M_{\lambda, b}}{\pi} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \left[e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1} \quad (3)$$

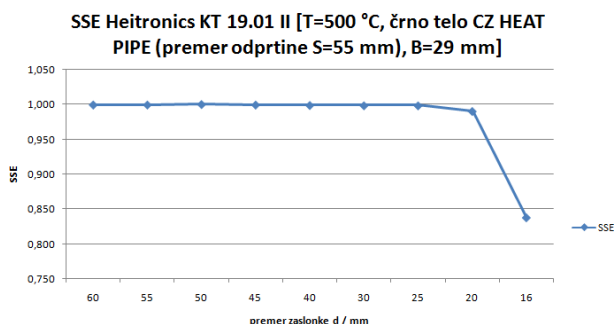
kjer sta $c_1 = 2hc_0^2 = 1,1911 \cdot 10^{-16}$ [W/sr] in $c_2 = hc_0/k = 0,014388$ [m·K] prva in druga sevalna konstanta.

4 Rezultati

4.1 Heitronics KT 19.01 II

Vpliv velikosti vira je bil merjen pri temperaturah 500 °C, 750 °C 1000 °C in 1300 °C. Najmanjša nazivna velikost vira merjenja znaša 22 mm pri oddaljenosti 733 mm.

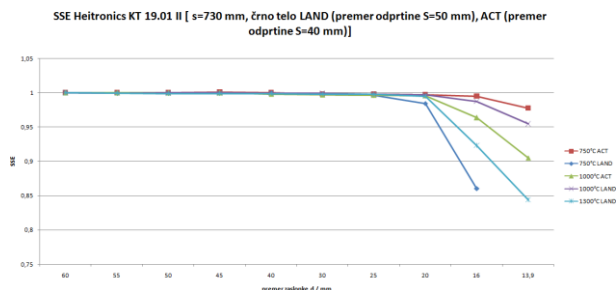
Na sliki 5 je prikazana karakteristika vpliva velikosti vira pri temperaturi 500 °C. Uporabljena je bila kalibracijska peč s premerom odprtine 50 mm in z dolžino votline 500 mm. Pri meritvah je bil rob leče od roba črnega telesa oddaljen 415 mm, od roba zaslonke pa 165 mm. Pri tej razdalji med zaslonkami in lečo je znašal premer najmanjše tarče za pravilno meritev temperature 29 mm. Z nadaljevanjem meritev z zaslonkami pod nazivno velikostjo vira temperatura pade, saj vpadno sevanje na detektor ne izhaja več samo iz votline črnega telesa.



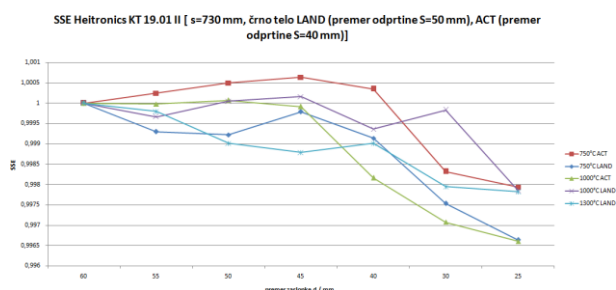
Slika 5: Karakteristika vpliva velikosti vira pri 500 °C, do zaslonke s premerom 16 mm.

Za merjenje vpliva velikosti vira pri temperaturah 750 °C, in 1000 °C sta bili uporabljeni dve kalibracijski peči (proizvajalca ACT in Land), za 1300 °C pa samo peč Land. Pri črnem telesu ACT je bila temperatura merjena na razdaljah 485 mm in 730 mm, pri Landu pa na razdaljah 430 mm in 730 mm. Oddaljenost zaslonke od leče pirometra je pri ACT znašala 230 mm in 475 mm, pri Landu pa 230 mm in 530 mm. Pri ACT je bil za merjenje referenčne temperature uporabljen uporovni termometer, pri drugi pa kar isti pirometer, le da so meritve te temperature potekale brez zaslonke. Na sliki 6 je prikazana karakteristika vpliva velikosti vira pri razdalji od roba leče od črnega telesa 730 mm, kjer so združene meritve za obe kalibracijski peči. Glede na razdalje leče do zaslonke je znašal najmanjši premer tarče pri peči ACT 24 mm, pri Landu pa 23 mm. Iz grafa je razvidno, da se po zmanjšanju premera zaslonke pod 25 mm pojavi vpliv

velikosti vira pri približno enaki velikosti tarče, zaradi zelo različnih padcev temperatur pri meritvah pa se karakteristike od tega premera dalje precej razlikujejo, tudi za 5 %. Na sliki 7 je predstavljena karakteristika z večjo ločljivostjo, preden začne vrednost SSE padati pod kritično mejo 95 %.



Slika 6: Karakteristika vpliva velikosti vira pri temperaturah od 700 °C do 1300 °C, do zaslonke s premerom 13,9 mm.

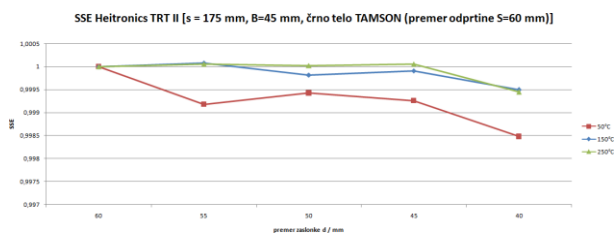


Slika 7: Karakteristika vpliva velikosti vira pri temperaturah od 700 °C do 1300 °C, do zaslonke s premerom 25 mm.

4.1 Heitronics TRT II

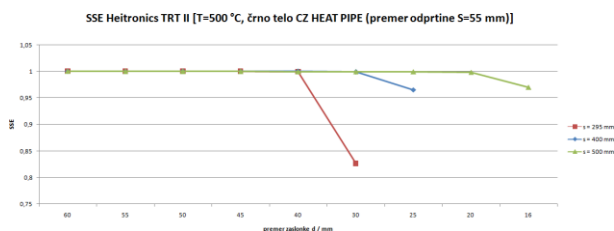
Vpliv velikosti vira je bil merjen pri temperaturah 50 °C, 150 °C, 250 °C, 500 °C, 750 °C in 1000 °C. Oddaljenost leče sevalnega termometra od črnega telesa je bila prilagojena glede na dimenzije peči in prostorske zmožnosti. Pri tem sta bili upoštevani dve različni območji valovnih dolžin glede na temperaturno območje in izmerjena temperatura pri določenem premeru zaslonke. V območju do 300 °C ima sevalni termometer najmanjši premer tarče 6,8 mm na razdalji 380 mm. Pri vseh meritvah je bila emisivnost sevalnega termometra nastavljena na 1.

Na sliki 8 so prikazane meritve vpliva velikosti vira med 50 °C in 250 °C pri razdalji od leče do črnega telesa $s=175$ mm pri premeru odprtine črnega telesa $S=60$ mm. Razdalja stojala z zaslonkami od črnega telesa je znašala 130 mm, torej je bila leča pirometra od vira (zaslonke) oddaljena 45 mm. Pri tej razdalji je bila odčitana velikost najmanjšega vira iz grafa najmanjšega vidnega polja za ta pirometer, ki pri tej razdalji znašala 45 mm. Iz tega podatka lahko predvidevamo, da se bo signal pirometra znižal po vstavitvah zaslonke manjših od 45 mm. Izkazalo se je, da se pri zaslonki s premerom 40 mm temperatura še ne zniža, pri naslednji zaslonki $d=30$ mm pa se temperatura zniža za 10 °C.



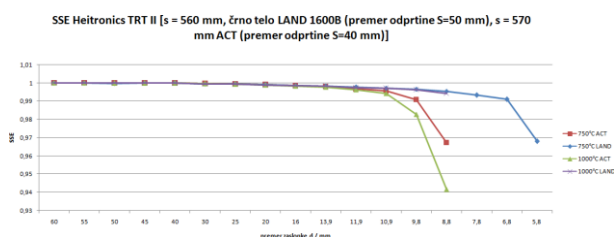
Slika 8: Karakteristika vpliva velikosti vira pri temperaturah od 50 °C do 250 °C, do zaslonke s premerom 40 mm.

Iz grafa na sliki 9 vidimo, da pri krajši razdalji merjenja pride do večjega in bolj nenadnega padca temperature, medtem ko pri daljši razdalji (npr. $s=500$ mm) pride do manjšega padca temperature, vendar ta začne sistematično padati, ko zmanjšujemo premer zaslonk. Tako pri razdalji $s=295$ mm in zaslonki $d=30$ mm temperatura pade za $29,2$ °C, pri razdalji $s=500$ mm in zaslonki $d=16$ mm pa temperatura pade za $4,6$ °C.



Slika 9: Karakteristika vpliva velikosti vira pri 500 °C, do zaslonke s premerom 16 mm.

Iz grafa pri meritvah na razdalji $s=560$ mm in 570 mm (slika 10) in iz podatkov lahko ponovno sklepamo, da se vpliv velikosti vira pojavi kmalu za tem, ko preidemo na manjše zaslonke od najmanjše nazivne velikosti vira. Karakteristika je odvisna od oddaljenosti pirometra do zaslonke (s-b), v primeru meritev s pečjo Land je ta oddaljenost blizu najmanjše nazivne velikosti vira, torej se pojavi vpliv velikosti vira pri manjših premerih zaslonk.



Slika 10: Karakteristika vpliva velikosti vira za pirometer Heitronics TRT II pri temperaturah 750 °C in 1000 °C, pri dveh različnih črnih telesih.

5 Zaključek

Vpliv velikosti vira je pomemben prispevek k negotovosti pri merjenju in umerjanju sevalnih termometrov. Za oba referenčna sevalna termometra v

LMK smo želeli ugotoviti, če specifikacije proizvajalca v zvezi z najmanjšo velikostjo merjene površine (imenovane tudi tarče ali vira) veljajo in je s tem vpliv velikosti vira pri umerjanju v primerjavi z našimi črnimi telesi zanemarljiv. Meritve in izračuni so pokazali, da je vpliv velikosti vira za oba referenčna sevalna termometra v LMK pri umerjanju v primerjavi s črnimi telesi, katerih premer odprtine je vsaj 40 mm, zanemarljiv.

Literatura

- [1] Preston-Thomas H., Bloembergen P., Quinn T. J., *The supplementary information for the international temperature scale of 1990*, Bureau International des poids et mesures, Pavillon de Breteuil, F-92310 Sevres, France, 1990
- [2] I. Pušnik, G. Grgić in J. Drnovšek, "System for the determination of the size-of-source effect of radiation thermometers with the direct reading of temperature," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 6, str. 1330, 2006.