

Negotovost karakteristike vpliva velikosti tarče pri sevalnih termometrih

Igor Pušnik¹, Goran Grgić²

¹ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Laboratorij za metrologijo in kakovost
Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo, Urad za meroslovje, Tržaška 21, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: igor.pusnik@fe.uni-lj.si

Povzetek. Pri umerjanju sevalnih termometrov je eden izmed prispevkov k celotni merilni negotovosti odvisen od velikosti merjene površine. Pojav se imenuje vpliv velikosti tarče in je posledica sevanja, katerega vir je zunaj nazivne velikosti tarče, ki je določena z vidnim poljem instrumenta. To lahko opazimo kot spremembo merjene temperature zaradi spremembe velikosti merjene površine. Številni sevalni termometri, še posebej komercialni, ki delujejo v infrardečem spektru, to je pri temperaturah pod 600 °C, imajo slabo karakteristiko vpliva velikosti tarče. V splošnem obstajata dve metodi za določanje karakteristike vpliva velikosti tarče, direktna in indirektna. Direktna metoda je primernejša pri nižjih temperaturah. Pri direktni metodi je sevalni termometer fokusiran na črno telo (vir sevanja), kateremu spreminjamo premer odprtine. Razmerje med signalom detektorja pri določenem premeru in signalom pri največjem premeru je merilo za vpliv velikosti tarče. Vpliv velikosti tarče smo izmerili po direktni metodi za sevalni termometer z neposrednim prikazom temperature. Takšne sevalne termometre se v praksi tudi najbolj pogosto uporablja. Izmerjena karakteristika vpliva velikosti tarče nam omogoča korekcijo merilnih rezultatov. Takšna korekcija pa ima svojo negotovost, ki je odvisna od uporabljene metode merjenja karakteristike vpliva velikosti tarče. V članku je predstavljeno ovrednotenje negotovosti pri merjenju karakteristike velikosti tarče po direktni metodi za sevalni termometer z neposrednim prikazom temperature. Prikazana je tudi primerjava ovrednotenja negotovosti v odvisnosti od uporabljenega Planckovega zakona ali njegove poenostavitve, ki jo predstavlja Wienov zakon. V primeru, ko je vpliv velikosti tarče neznan, naj bo merjena površina vsaj dvakrat večja od nazivne velikosti tarče sevalnega termometra.

Ključne besede: sevalni termometer, korekcija, negotovost vpliva velikosti tarče

Uncertainty of the Characteristic of the Size-of-Source Effect in Radiation Thermometers

Extended abstract. In calibration of radiation thermometers one of contributions to the total uncertainty of measurement depends on the target size. The phenomenon is known as the size-of-source effect (SSE). It is caused by radiation from an origin outside the instrument's nominal target area as defined by the field of view. As the size of the measured source varies, many radiation thermometers, especially the commercial thermometer, which operate in the infrared spectrum, that is at temperatures below 600 °C, suffer from a bad SSE characteristic. The result are different measured temperatures. Generally two methods are available, the direct and the indirect method. The direct method is more appropriate at lower temperatures. In the direct method, a radiation thermometer is focused on

the blackbody (radiation source), where the diameter of aperture is variable. The ratio between the signal at a given radius and the signal at the maximum radius is a measure for the SSE. We measured the SSE characteristic with the direct method for a radiation thermometer with a direct reading of temperature. Such radiation thermometers are most frequently used in practice. Correction for the SSE has to be evaluated in terms of its uncertainty. The paper presents evaluation of uncertainty in measuring the SSE with the direct method for a radiation thermometer with direct reading of temperature. A comparison is given between evaluation of uncertainty with consideration of the Planck's law and its approximation, which is the Wien's law. When the SSE is unknown, the measured target size shall be at least twice as large as the nominal target size of a radiation thermometer and even than.

Keywords: radiation thermometer, correction, uncertainty of the size-of-source effect

1 Uvod

Pojav, ki se imenuje »vpliv velikosti tarče«, je posledica sevanja, katerega vir je zunaj nazivne velikosti tarče, določene z vidnim poljem sevalnega termometra. To lahko opazimo kot spreminjanje vrednosti signala detektorja oziroma izmerjene temperature kot posledico spreminjanja velikosti merjene površine pri konstantni temperaturi le-te. Vpliv velikosti tarče je posledica razpršitve sevanja na prašnih delcih, medsebojnih odbojev sevanja na površinah leč, odklona in loma sevanja v lečah optičnega sistema, razpršitve sevanja na nepravilnostih optičnega sistema in drugih napak (aberacij) optičnega sistema. Zato sta za točno umerjanje sevalnega termometra potrebno umerjanje na viru z enakomerno porazdelitvijo sevanja, znanega polmera, in določitev vpliva velikosti tarče. Trenutno v termometriji ne obstaja standard, ki bi določal način ovrednotenja vpliva velikosti tarče pri sevalnem termometru. Uporabljata se predvsem dve metodi določanja vpliva velikosti tarče, direktna [1] in indirektna [2]. Predpostavimo lahko, da sta metodi ekvivalentni, čeprav dobimo pri indirektni metodi manjše negotovosti [3], [4]. Tako je zato, ker pri direktni metodi uporabljamo črno telo z obliko votline, iz katere se toplota odvaja s konvekcijo in lahko prihaja do hitrih sprememb temperature, ki jih kontaktni termometer v črnem telesu ne zazna. Pri indirektni metodi pa se uporablja predvsem integrirna sfera, kjer meritve potekajo v vidnem spektru in ni problema odvajanja toplote. To je krogla s premerom od 30 cm do 50 cm, ki je na notranji strani prebarvana z barvo visoke odbojnosti. V njej je več volframovih žarnic, ki so regulirane tako, da imamo znotraj krogle stabilno in homogeno osvetljenost. Krogla ima odprtino z difuzno ploščico premera (10-15) cm, na kateri merimo sevanje. Ker potekajo meritve po indirektni metodi v vidnem spektru (temperature nad 600 °C), se lahko vpliv velikosti tarče pri sevalnih termometrih z neposrednim prikazom temperature in nižjih temperaturah meri samo po direktni metodi.

Pri merjenju vpliva velikosti tarče primarnih sevalnih termometrov se uporablja nelinearizirani signal detektorja $S(L)$, za katerega velja:

$$S(L) = a \cdot L \quad (1)$$

kjer L pomeni jakost vpadnega sevanja na detektor, konstanta a , ki je karakteristična za vsak termometer, pa vsebuje absorpcijo na optični poti in odzivnost detektorja, ki je neodvisna od jakosti vpadnega sevanja. Ker imajo izhod nelineariziranega signala detektorja samo precizijski sevalni termometri, lahko za druge, ki

nam neposredno prikazujejo sevalno temperaturo, uporabimo metodo ekvivalentnega sevanja [5] ob predpostavki, da je sevalni termometer kvazi-monokromatski. To pomeni, da meri pri eni valovni dolžini. Vpliv velikosti tarče izračunamo s pomočjo jakosti sevanja, ki jo izračunamo iz sevalne temperature T po Planckovem zakonu:

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi n^2 \lambda^5} \cdot \left[e^{\frac{c_2}{n\lambda T}} - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

kjer sta $c_1 = 2\pi^5 h c_0^2 = 3,7417749 \cdot 10^{-16}$ [W·m²] in $c_2 = hc_0/k = 0,014388$ [m·K] prva in druga sevalna konstanta, λ valovna dolžina detektorja sevalnega termometra in n lomni količnik medija, skozi katerega potuje sevanje.

V številnih primerih je dober približek Plankovemu zakonu Wienov zakon:

$$L_{\lambda,b}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi n^2 \lambda^5} \cdot \left[e^{\frac{c_2}{n\lambda T}} \right]^{-1} \quad (3)$$

Izdelovalci v specifikacijah za sevalne termometre navajajo nazivno velikost tarče kot polmer ali premer kroga na merjeni površini, pri določeni oddaljenosti sevalnega termometra. V temu krogu je zajet določen odstotek sevanja (ponavadi 90 % do 98 %), ki vpliva na izmerjeno vrednost sevalne temperature. V sevalnih termometrih, pri katerih skozi optični sistem vidimo merjeno površino, je nazivna tarča ponavadi označena. Za pravilno merjenje temperature mora merjena površina popolnoma prekriti nazivno velikost tarče, v nasprotnem primeru je sevanje iz okolice vzrok za napačno izmerjeno temperaturo [6].

2 Direktna metoda

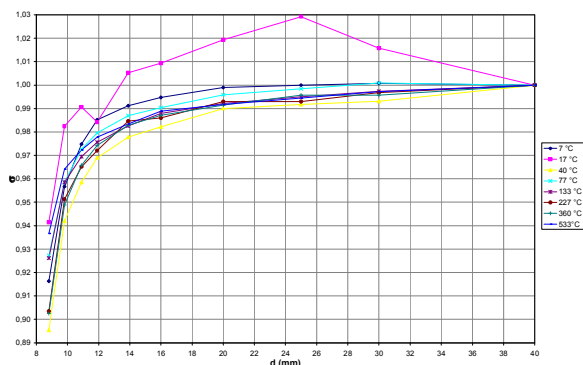
Pri direktni metodi je sevalni termometer fokusiran na odprtino zaslonke, ki se nahaja pred stabilnim virom sevanja, najpogosteje črnim telesom. Merimo signal detektorja pri različnih polmerih odprtine zaslonke. Vpliv velikosti tarče pri nekem polmeru r je določen z razmerjem $\sigma_s(r)$ med signalom pri tem polmeru $S(r, L)$ in signalom, ki bi ga dobili pri neskončnem polmeru $S(\infty, L)$:

$$\sigma_s(r) = \frac{S(r, L)}{S(\infty, L)} \quad (4)$$

Ker v praksi ne moremo realizirati neskončnega polmera, merimo vpliv velikosti tarče kot funkcijo polmera vira sevanja na nekem omejenem območju $r_{\min} \leq r \leq r_{\max}$, kjer je r_{\max} najpogosteje polmer odprtine črnega telesa.

Vpliv velikosti tarče tako izrazimo z razmerjem med signalom detektorja pri polmeru r in signalom pri polmeru r_{\max} :

$$\sigma_S(r, r_{\max}) = \frac{\sigma_S(r)}{\sigma_S(r_{\max})} = \frac{S(r, L)}{S(r_{\max}, L)} \quad (5)$$



Slika 1: Karakteristike vpliva velikosti tarče s korekcijo sevanja iz okolice za tarče s premerom od 4,8 mm do 40,0 mm
Figure 1. Characteristics of the SSE with correction of background radiation for targets with diameter from 4.8 mm to 40.0 mm

2.1 Rezultati merjenja vpliva velikosti tarče s korekcijo sevanja iz okolice

Pri merjenju vpliva velikosti tarče pri temperaturah, nižjih od 200 °C, dobimo različne karakteristike. To je posledica sevanja iz okolice, ki ni zanemarljivo. Lahko pa pri izračunu karakteristike upoštevamo korekcijo letga, in sicer tako, da v enačbi (5) upoštevamo enačbo (1), pri čemer moramo števec in imenoalec enačbe (5) korigirati za vrednost sevanja iz okolice $L(T_{ok})$:

$$\sigma_{L,ok}(d, d_{\max}) = \frac{L(d, T) - L(T_{ok})}{L(d_{\max}, T) - L(T_{ok})} \quad (6)$$

kjer $L(T_{ok})$ pomeni jakost sevanja iz okolice. Tako vse meritve preračunamo na iste pogoje, ko nimamo sevanja iz okolice. Karakteristike vpliva velikosti tarče s korekcijo sevanja iz okolice pri termometru Minolta/Land Cyclops 300AF so prikazane na sliki 1. Karakteristika pri 17 °C zelo odstopa od drugih karakteristik. To je posledica odštevanja dveh podobnih števil v enačbi (16), saj se merjena temperatura ne razlikuje veliko od temperature okolice, kar nam povečuje pogrešek pri določanju karakteristike vpliva velikosti tarče. Podobno velja za karakteristike pri temperaturah 7 °C, 40 °C in 77 °C, vendar v manjšem obsegu. Druge karakteristike so tesno skupaj. Predvsem karakteristiki pri temperaturah 227 °C in 360 °C se v območju premera tarč od 8,8 mm do 40,0 mm ne razlikujeta za več kot 0,3 %. Če ne upoštevamo karakteristike pri 17 °C, lahko iz povprečja vseh drugih karakteristik ugotovimo, da pomeni vpadno sevanje

znotraj nazivnega premera tarče 92 % celotnega vpadnega sevanja na detektor. Preostalih 8 % sevanja ima izvor na kolobarju med premeroma 9 mm in 40 mm. Podatek za nazivno tarčo 9 mm smo dobili z linearno interpolacijo med rezultati meritev pri tarčah s premeroma 8,8 mm in 9,8 mm. Srednja vrednost vseh karakteristik, brez karakteristike za 17 °C, in karakteristika pri 360 °C se zelo dobro ujemata. Sistem, s katerim so bile meritve izvedene, je bil podrobneje predstavljen v [6].

3 Negotovost merjenja vpliva velikosti tarče

Negotovost veličine, ki je odvisna od več medsebojno neodvisnih vhodnih parametrov $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, je podana z enačbo:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (7)$$

kjer je člen v oklepaju parcialni odvod funkcije f po parametru x_i in $u(x_i)$ standardna negotovost tega parametra. Tako določimo negotovost sevanja L in negotovost vpliva velikosti tarče $u(\sigma)$. Negotovost sevanja, ki ga računamo iz izmerjene temperature T , po metodi ekvivalentnega sevanja in predpostavki, da je sevalni termometer kvazi monokromatski, je določena z enačbo:

$$u(L) = \left| \frac{\partial L}{\partial T} \right| \cdot u(T) \quad (8)$$

Če v enačbi (8) upoštevamo Wienov zakon, enačba (3), negotovost sevanja zapišemo kot:

$$u(L) = L \cdot \left(\frac{c_2}{\lambda T^2} \right) \cdot u(T) \quad (9)$$

Če v enačbi (8) upoštevamo Planckov zakon, enačba (2), negotovost sevanja zapišemo kot:

$$u(L) = L^2 \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot \frac{c_2}{c_1} \cdot \frac{\lambda^4}{T^2} \cdot u(T) \quad (10)$$

Vpliv velikosti tarče je odvisen od dveh spremenljivk $L(d, T)$ in $L(d_{\max}, T)$, enačba (16), zato ga moramo parcialno odvajati po obeh spremenljivkah, ki jih označimo z L_1 in L_2 :

$$u^2(\sigma) = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial L_1} \right)^2 \cdot u^2(L_1) + \left(\frac{\partial \sigma}{\partial L_2} \right)^2 \cdot u^2(L_2) \quad (11)$$

in dobimo:

$$u^2(\sigma) = \left(\frac{1}{L_2}\right)^2 \cdot u^2(L_1) + \left(-\frac{L_1}{L_2^2}\right)^2 \cdot u^2(L_2) \quad (12).$$

Če na desni strani enačbe izpostavimo člen $(L_1/L_2)^2$, ki pomeni σ^2 , in ga prestavimo na levo stran, dobimo relativno negotovost vpliva velikosti tarče, ki je enaka vsoti relativnih negotovosti obeh sevanj:

$$\frac{u^2(\sigma)}{\sigma^2} = \left(\frac{u(L_1)}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{u(L_2)}{L_2}\right)^2 \quad (13).$$

Ker sevanje računamo iz izmerjene sevalne temperature po metodi ekvivalentnega sevanja, vstavimo za negotovost sevanja enačbo (8) in dobimo enačbo za izračun relativne negotovosti vpliva velikosti tarče pri določenem premeru:

$$\frac{u(\sigma)}{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{c_2}{\lambda T_1^2}\right)^2 \cdot u^2(T_1) + \left(\frac{c_2}{\lambda T_2^2}\right)^2 \cdot u^2(T_2)} \quad (14).$$

Vidimo, da je negotovost odvisna od valovne dolžine λ , druge sevalne konstante c_2 , temperature T_1 izmerjene pri določenem premeru tarče d , temperature T_2 izmerjene pri največjem premeru tarče d_{\max} , in negotovosti obeh temperatur. Negotovosti $u(T_1)$ in $u(T_2)$ sta ponavadi enaki, ker ju merimo z istim termometrom. Če pri računanju negotovosti vpliva velikosti tarče primerjamo absolutni vrednosti temperature T_1 in T_2 , ugotovimo, da je njuna razlika majhna, zato lahko enačbo (15) poenostavimo v naslednjo enačbo:

$$\frac{u(\sigma)}{\sigma} = \sqrt{2} \cdot \frac{c_2}{\lambda T^2} \cdot u(T) \quad (15),$$

kjer za negotovost izmerjene temperature vzamemo negotovost pri manjšem premeru tarče, ker je le-ta ponavadi večja, in temperaturo pri manjši tarči, ker le-ta prispeva večji delež k izračunani negotovosti (imenovalec enačbe).

Če v enačbi (14) upoštevamo enačbo (11) in zopet predpostavimo, da je $T_1 \cong T_2$, lahko za relativno negotovost vpliva velikosti tarče zapišemo:

$$\frac{u(\sigma)}{\sigma} = \sqrt{2} \cdot \frac{c_2}{\lambda T^2} \cdot \frac{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \cdot u(T) \quad (16).$$

Za uporabnika sevalnega termometra je pomembna predvsem negotovost izmerjene temperature zaradi vpliva velikosti tarče. Iz enačbe (16) izrazimo $u(T)$ in dobimo enačbo za izračun negotovosti temperature v odvisnosti od relativne negotovosti vpliva velikosti tarče:

$$u(T) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda T^2}{c_2} \cdot \frac{u(\sigma)}{\sigma} \quad (17).$$

V primeru, ko imamo sevalni termometer z majhnim vplivom velikosti tarče, je σ blizu 1 in lahko upoštevamo poenostavitev v enačbi (17):

$$u(T) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda T^2}{c_2} \cdot u(\sigma) \quad (18).$$

Podobno naredimo, ko iz enačbe (16) izrazimo $u(T)$ in dobimo enačbo za izračun negotovosti temperature v odvisnosti od relativne negotovosti vpliva velikosti tarče:

$$u(T) = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda T^2}{c_2} \cdot \frac{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \cdot \frac{u(\sigma)}{\sigma} \quad (19).$$

V primeru, ko imamo sevalni termometer z majhnim vplivom velikosti tarče, je σ blizu 1 in lahko upoštevamo poenostavitev v enačbi (19):

$$u(T) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\lambda T^2}{c_2} \cdot \frac{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \cdot u(\sigma) \quad (20).$$

Razlike med negotovostmi temperature, ki smo jih dobili na podlagi izmerjenih rezultatov vpliva velikosti tarče za termometer Minolta/Land Cyclops 300 AF, ob upoštevanju Wienovega zakona, enačba (17) in ob upoštevanju Planckovega zakona, enačba (19), so predstavljene v tabeli 1. Očitno je, da so razlike zanemarljive. To pomeni, da lahko uporabnik sevalnega termometra z neposrednim prikazom temperature na podlagi znane negotovosti zaradi vpliva velikosti tarče določi negotovost temperature zaradi tega vpliva s pomočjo preproste enačbe (17), ki upošteva sevanje v skladu z Wienovim približkom Planckovega zakona, ne da bi pri tem podcenil negotovost temperature zaradi neupoštevanja Planckovega zakona.

Tabela 1: Razlike v negotovosti temperature sevalnega termometra z neposrednim prikazom temperature zaradi negotovosti vpliva velikosti tarče, če sta negotovosti izračunani z upoštevanjem Wienovega ali Planckovega zakona

Table 2: Differences between uncertainties of temperature of a radiation thermometer with the direct reading of temperature due to uncertainty of the size-of-source effect calculated with respect to the Wien or the Planck law

$\theta(^{\circ}\text{C})$	$u_{\text{Wien}}(\sigma)/\sigma$	$u_{\text{Planck}}(\sigma)/\sigma$	$u_{\text{Wien}}(^{\circ}\text{C})$	$u_{\text{Planck}}(^{\circ}\text{C})$	$u_{\text{Wien}} - u_{\text{Planck}} (^{\circ}\text{C})$	$\{u_{\text{Wien}} - u_{\text{Planck}} (^{\circ}\text{C})\}/T(\text{K})$
7	0,00223	0,00225	0,0947	0,0947	0,00000	-1,0E-08
17	0,00163	0,00165	0,0741	0,0741	-0,00001	-1,8E-08
40	0,00139	0,00141	0,0737	0,0737	0,00001	2,3E-08
77	0,00086	0,00088	0,0570	0,0570	0,00000	-2,4E-09
133	0,00056	0,00059	0,0502	0,0502	0,00000	5,7E-09
227	0,00306	0,00330	0,4134	0,4133	0,00006	1,2E-07
360	0,00138	0,00158	0,3000	0,2982	0,00173	2,7E-06
533	0,00085	0,00105	0,2974	0,2956	0,00178	2,2E-06

4 Sklep

Vpliv velikosti tarče se ponavadi meri za tarče, ki so večje od nazivne velikosti tarče sevalnega termometra. Če ne poznamo karakteristike vpliva velikosti tarče, naj bo merjena površina vsaj dvakrat večja od nazivne velikosti tarče sevalnega termometra. Če poznamo obe vrsti karakteristik (s korekcijo sevanja iz okolice in brez korekcije), lahko izračunamo delež sevanja iz okolice, le-tega pa preračunamo v temperaturo. Očitno je, da je prispevek sevanja iz okolice k izmerjeni temperaturi zelo majhen pri visokih temperaturah. V našem primeru pri nazivni tarči 9 mm za temperaturo 533 °C znaša približno 0,2 %, za temperaturo 7 °C pa kar 50 %. Iz tega lahko sklepamo, da bolj točno izmerimo pravo karakteristiko vpliva velikosti tarče sevalnega termometra pri zgornji meji merilnega območja sevalnega termometra. Ko poznamo karakteristiko vpliva velikosti tarče za sevalni termometer, lahko z njim merimo bolj točno, kajti tudi pri tarčah, katerih velikost je večja od nazivne velikosti tarče, moramo upoštevati ustrezno korekcijo. Vsaka korekcija pa ima tudi določeno negotovost. Le-to je potrebno podati pri meritvah, da sploh dobimo občutek, kako dobro so bile izvedene. Pri izračunu negotovosti vpliva velikosti tarče je treba skrbno upoštevati določene smiselne poenostavitve, ki so prikazane v članku. Vendar za uporabnike sevalnih termometrov z neposrednim prikazom temperature ta negotovost, ki jo sicer nekateri kalibracijski laboratoriji podajajo v svojih rezultatih, nima uporabnega pomena. Zanje je precej pomembnejša negotovost temperature, ki jo je moč izračunati na podlagi negotovosti karakteristike velikosti tarče ob upoštevanju Planckovega zakona ali njegovega približka, to je Wienovega zakona. V članku je prikazano, da je ovrednotenje negotovosti temperature sevalnega termometra z neposrednim prikazom temperature zaradi njegove karakteristike vpliva velikosti tarče tako rekoč neodvisno od upoštevanja Planckovega zakona sevanja ali Wienovega zakona sevanja.

5 Literatura

- [1] Bloembergen P., Duan Y., Bosma R., Yuan Z., *The characterization of radiation thermometers subject to the size-of-source effect*, Proceedings of 6th International symposium on temperature and thermal measurements in industry and science (TEMPMEKO 1996), Torino, 1996, str. 261-266
- [2] Bloembergen P., *On the correction for the size-of-source effect corrupted by background radiation*, Proceedings of 7th International symposium on temperature and thermal measurements in industry and science (TEMPMEKO 1999), Delft, 1999, str. 607 – 612
- [3] Lowe D., Battuello M., Machin G., Girard F., *A comparison of size of source effect measurements of radiation thermometers between IMGIC and NPL*, Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, New York, 2003, Vol. 7, str. 625-630
- [4] Machin G., Sergienko R., *A comparative study of size of source effect (SSE) determination techniques*, Proceedings of 8th International symposium on temperature and thermal measurements in industry and science (TEMPMEKO 2001), Berlin, 2001, str. 155-160
- [5] Machin G., Ibrahim M., *Size of source effect and temperature uncertainty: I - high temperature systems*, Proceedings 7th International symposium on temperature and thermal measurements in industry and science (TEMPMEKO '99), Delft, 1999. Vol. 2, str. 681-686
- [6] Pušnik I., Grgić G., Drnovšek J., *Razvoj sistema za določitev vpliva velikosti tarče*, Elektrotehniški Vestnik, Vol. 73(4), str. 173-178, 2006

Igor Pušnik diplomiral, magistriral in doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v letih 1995, 1997 in 2004. Kot asistent je zaposlen v Laboratoriju za metrologijo in kakovost. Poudarek njegovega raziskovalnega dela je na brezkontaktnih temperaturnih merjenjih.

Goran Grgić je diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko leta 2004. Kot strokovnjak za meroslovje je zaposlen na Uradu za meroslovje Republike Slovenije, v Laboratoriju za maso.