Dr Slavko Pokorni,
pukovnik, dipl. inž.
Vojna akademija VJ,
Beograd

ANALIZA GREŠKE ODREĐIVANJA TEMPERATURE POVRŠI ČVRSTIH MATERIJALA IC KAMEROM

UDC: 536.521.088:681.772.7

Rezime:

U radu je izvedena i analizirana funkcija greške određivanja temperature čvrstih materijala, kao i uticaj direktno merenih veličina i njihovih instrumentalnih grešaka merenja na grešku određivanja temperature termovizijskom kamerom THERMOVISION 870 SWB. Predstavljeni su rezultati analize standardne i maksimalne relativne greške i parcijalnih grešaka određivanja temperature, koji pokazuju uticaj pojedinih veličina i ukazuju na uslove koje treba obezbediti radi modeliranja uslova i postizanja odgovarajuće tačnosti određivanja temperature u uslovima uticaja zračenja okoline, zračenja atmosfere, slabljenja pri prostiranju zračenja kroz atmosferu i uticaja emisivnosti objekta čija se temperatura određuje.

Ključne reči: merenje temperature, greška merenja, indirektna metoda merenja, matematički model, IC zračenje, IC kamera, termovizijska kamera.

ANALYSIS OF THE ERROR OF THE TEMPERATURE DETERMINATION ON THE SURFACE OF SOLID MATERIALS BY THE IR CAMERA

Summary:

The function of an error during the determination of solid materials temperature is derived and analyzed in the paper as well as the effect of directly measured values and their instrumental measurement errors on the error of temperature determination by the thermal camera THERMOVISION 870 SWB. The obtained results concerning the analysis of the standard and maximal relative errors as well as the partial errors of temperature determination show the influence of measured values and draw the intention to the requirements which should be fulfilled in order to acquire condition modelling and appropriate temperature determination accuracy under different conditions such as environmental radiation, atmospheric radiation, reducing of radiation during the propagation through the atmosphere and emissivity of the examined object.

Key words: temperature measurement, measurement error, indirect method of measurement, mathematical model, IR radiation, IR camera, thermal camera.

Uvod

Poslednjih desetak godina infracrvena (IC) termografija svakodnevno doživljava nove primene. Primena IC termografije, posebno termovizije, mo-

guća je i već dokazana u raznim oblastima kao što su upravljanje procesima, kontrola i obezbeđenje kvaliteta, dijagnostika, istraživanje i razvoj, preventivno održavanje (mali broj otkaza uređaja nastaje bez prethodnih

znakova da će do otkaza doći, a temperatura je često jedan od parametara koji na to ukazuje), medicina, itd. [1, 7, 9, 13, 14]. Infracrvena termografija ima sve veću primenu u oblasti istraživanja i razvoja, jer je danas jedan od osnovnih zahteva merenje i snimanje stacionarnih i dinamičkih temperaturnih stanja u realnom vremenu. To je efikasan, pouzdan i isplativ metod otkrivanja potencijalnih izvora otkaza električnih postrojenja i sprečavanja neplaniranih isključenja i opravki, kontrole kvaliteta u industriji (naročito automobilske i poluprovodničke).

Od izuzetne važnosti je i specifična primena IC termovizije u vojsci, na primer za otkrivanje maskiranih objekata, vizuelizaciju objekata u noćnim uslovima, snimanje signature aviona, rešavanje raznih problema u vazduhoplovnoj industriji koji su u vezi sa temperaturnim stanjem, itd.

Pojedini proizvođači tvrde da je primena njihovih IC termografskih instrumenata, posebno instrumenata sa skaniranjem, skoro neograničena. Naime, IC termografski instrumenti, koji daju termalnu sliku, jesu sredstva za otkrivanje uzoka problema kada je ključ rešenja problema u raspodeli temperatura na površini objekta.

Neki od IC instrumenata su u stanju samo da detektuju temperaturne promene, a neki i da mere (određuju) temperaturu. Zahtevi za ove instrumente se međusobno razlikuju i nije moguće instrument koji je namenjen samo za detekciju temperaturnih promena koristiti i za merenje temperature, što se ponekad previđa. Infracrvena termografija razvija se u dva pravca: jedan je dobijanje termalne slike, gde je potrebno samo utvrditi da li su dve susedne tačke međusobno toplije ili hladnije, a drugi je merenje temperature kada je potrebno kvantitativno odrediti vrednost temperature.

U mnogim primenama u vojsci, na primer pri otkrivanju maskiranih objekata, nije potrebno precizno izmeriti

temperaturu neke tačke, već je dovoljno samo utvrditi da li se temperature susednih tačaka na ispitivanoj površi razlikuju. Međutim, ako je potrebno odrediti stvarne vrednosti temperatura tačaka površi objekta, što je izuzetno značajno u oblasti usavršavanja postojećih i razvoja novih uređaja i sistema, potrebno je rešiti znatno više problema da bi se došlo do stvarne temperature.

Razvoj IC senzora, digitalne i mikroprocesorske, odnosno računarske tehnike omogućio je da IC termografija izađe iz okvira detekcije toplo-hladno i zađe u oblast merenja temperatura i analize termičkih fenomena, tako da savremeni IC termografski sistemi predstavljaju kombinaciju sistema za merenje i sistema za analizu.

Problem merenja temperature termovizijom

Kontaktne metode merenja temperature (otporni termometri, termoparovi) imaju niz nedostataka, posebno pri merenju visokih temperatura i kada je potrebno istovremeno izvršiti merenja u velikom broju tačaka [2].

Određivanje temperature površi materijala (objekta) merenjem fluksa infracrvenog zračenja, primenom IC senzora, odnosno kamere, jeste nekontaktna metoda merenja temperature (pogodna za površi koje su na drugi način nedostupne) i nema nedostatke kontaktnih metoda merenja, jer senzor ne mora da bude u neposrednom dodiru sa objektom čija se temperatura meri [3, 4].

Danas postoje IC skanirajući sistemi koji omogućuju ne samo razlikovanje toplijih i hladnijih tačaka objekta, već i istovremeno određivanje temperature u hiljadama tačaka i dobijanje termičke slike površi, kao što je, na primer, termovizija [8]. Određivanje temperature površi materijala na osnovu merenja fluksa IC zračenja pripada grupi indirektnih metoda merenja temperature, pri čemu se koristi odgovarajući matematičko-fizički mo-

del za povezivanje temperature objekta sa direktno merenim veličinama u odgovarajućoj stvarnoj situaciji, odnosno uslovima pri merenju fluksa zračenja. To znači da se do podataka o temperaturi dolazi proračunom, a ne direktnim merenjem, zbog čega se, u ovom radu, više koristi termin »određivanje temperature« umesto »merenje temperature«.

Određivanje temperature čvrstih tela na osnovu posrednog merenja fluksa IC zračenja jeste kompleksan problem zbog uticaja više faktora (izvora zračenja kao što su objekat, okolina, atmosfera) i procesa (emisija, refleksija) na ukupno izmereni fluks, što otežava izdvajanje korisnog fluksa koji nosi informaciju o temperaturi površi objekta koja se određuje [3, 4, 9, 12]. Zbog toga radijacioni termometri i termovizijske kamere ne pokazuju stvarnu već neku prividnu temperaturu, pa, je, kako se konstatuje u [6] jedan od ključnih problema radijacionih termometara kako odrediti stvarnu temperaturu tela sa nepoznatom emisivnošću i nepoznatim zračenjem iz atmosfere. Problem pokušava da se reši i specijalnom konstrukcijom radijacionih termometara [5, 6], što ne odgovara svim uslovima, posebno ne ako se merenje obavlja na objektu koji je na terenu.

Prema tome, jedan od značajnih problema primene IC senzora za merenje temperature je velika greška merenja [9], kojoj se u praksi ne poklanja dovoljna pažnja i nije dovoljno teorijski obrađena. Pri obradi rezultata određivanja temperature, primenom IC senzora, u literaturi se retko može sresti analiza greške merenja. Ako se greška i razmatra, obično se najčešće razmatra samo uticaj emisivnosti materijala čija se temperatura određuje, a ostale veličine se neopravdano zane-maruju.

Greška (ili tačnost) merenja koju navode proizvođači IC sistema odgo-

vara situaciji koja se postiže pri kalibraciji uređaja pomoću crnog tela (emisivnost jednaka jedinici) u laboratorijskim uslovima. Jedan broj kamera ima mogućnost da se unosi podatak o emisivnosti materijala čija se temperatura meri i tako koriguje temperatura koju ona pokazuje, a neke imaju ugrađen softver koji omogućava da se unesu i druge direktno merene veličine. Međutim, u određivanju greške merenja, proizvođači ne uzimaju u obzir i grešku sa kojom će biti izmerene, odnosno određene ove direktno merene veličine koje treba da posluže za proračun temperature, već smatraju da su te veličine potpuno tačno izmerene (određene), a u praksi upravo na njih otpada najveći udeo ukupne greške. Zbog toga je u ovom radu izvršena kompletna analiza greške određivanja temperature površi čvrstih materijala merenjem fluksa IC zračenja i drugih direktno merenih veličina koje se pojavljuju u modelu za proračun temperature, koja pokazuje uticaj i udeo pojedinih direktno merenih veličina na ukupnu grešku merenja i omogućava modeliranje situacije pri merenju, u skladu sa potrebnom tačnošću određivanja temperature.

Situacija pri merenju, koja obuhvata određeni broj uticajnih faktora, poslužila je za formiranje matematičkog modela određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom THERMOVISION 870 SWB¹, švedske firme AGEMA [8], a prikazana je na slici 1.

Sl. 1 — Situacija pri merenju

¹ SWB — Short Wave Band, što označava da kamera radi u spektralnom opsegu 2 do 5 μm .

Ovako formiran model situacije pri merenju uzima u obzir da IC kamera prima ne samo zračenje koje emituje površ materijala objekta čija se temperatura meri, već i zračenje koje se reflektuje od te površi, a potiče od zračenja objekata iz okoline, kao i zračenje medija (atmosfera) između objekta i senzora. Očigledno da će sva ta zračenja biti modifikovana uticajem medija kroz koji se prostiru na putu do kamere. Prema tome, senzor prima više komponenti zračenja, od kojih samo jedna (zračenje objekta) sadrži informaciju o temperaturi koja se meri.

Matematički model određivanja temperature IC kamerom

Polazeći od situacije opisane na slici 1, može se, za fluks zračenja na ulaznoj aperturi senzora, napisati sledeća merna jednačina:

$$\Phi_e = \epsilon_o \tau \Phi_o + \tau(1 - \epsilon_o) \Phi_a + (1 - \tau) \Phi_{atm} \quad (1)$$

gde je:

- Φ_e — ukupni fluks zračenja koje prima senzor,
- Φ_o — fluks zračenja površi objekta (zavisi od T_o i ϵ_o),
- Φ_a — fluks zračenja okoline (zavisi od T_a),
- Φ_{atm} — fluks zračenja medija prostiranja (zavisi od T_{atm} i τ),
- ϵ_o — emisivnost objekta,
- τ — transmitivnost medija prostiranja (atmosfera),
- T_o — temperatura objekta,
- T_a — temperatura okoline,
- T_{atm} — temperatura medija prostiranja (atmosfera).

Fluks IC zračenja na ulaznoj aperturi senzora kamere usmerava se na detektor koji ga transformiše u električni signal srazmeran fluksu koji pri-

ma detektor senzora. Električni signal detektora senzora zavisi od fluksa primljenog zračenja, odziva detektora i pojačanja elektronskog lanca za obradu signala. Fluks primljenog zračenja je funkcija temperature, pa je amplituda električnog signala funkcija temperature objekta, tako da se može definisati takozvani termički ekvivalent detektora koji određuje prenosnu funkciju mernog uređaja:

$$I_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Termički ekvivalent, koji odgovara ukupnom fluksu koji prima detektor, dobija se integraljenjem relacije (1) i može se prikazati u obliku:

$$I_e = \tau \epsilon_o I_o + \tau(1 - \epsilon_o) I_a + (1 - \tau) I_{atm} \quad (2a)$$

Oznake upotrebljene u relacijama (2) i (2a) su:

- I_e — termički ekvivalent fluksa zračenja na ulazu aperture senzora (termički ekvivalent ukupnog fluksa zračenja koji prima IC senzor),
- $R(\lambda)$ — spektralna odzivnost IC senzora (detektora),
- λ_1, λ_2 — spektralni opseg odzivnosti IC senzora,
- I_o — termički ekvivalent fluksa zračenja objekta na temperaturi T_o ,
- I_a — termički ekvivalent fluksa zračenja okoline na temperaturi T_a ,
- I_{atm} — termički ekvivalent fluksa zračenja atmosfere na temperaturi T_{atm} .

Pošto komponente fluksa IC zračenja na ulaznoj aperturi senzora zavise od temperature i signal detektora zavisi od fluksa IC zračenja, može se smatrati da je signal funkcija temperature, tj. da je vrednost amplitude signala termički ekvivalent fluksa IC zračenja na ulazu.

Polazeći od relacije (2) može se izdvojiti termički ekvivalent IC zračenja objekta I_o , koji nosi informaciju o temperaturi objekta T_o , u vidu relacije:

$$I_o = \frac{I_e - \tau(1 - \epsilon_o)I_a - (1 - \tau)I_{atm}}{\tau\epsilon_o} \quad (3)$$

Signal detektora (termički ekvivalent) jeste nelinearna funkcija temperature, a ta zavisnost se određuje kalibracijom IC senzora. Za termovizijsku kameru THERMOVISION 870 ova zavisnost ima oblik:

$$I = \frac{R}{\frac{B}{e^T - F}} \quad (4)$$

gde je:

I — termički ekvivalent fluksa odgovarajućeg izvora IC zračenja na ulazu aperture senzora,

T — temperatura odgovarajućeg izvora IC zračenja,

R, B, F — kalibracione konstante.

Kalibracione konstante R, B, F zavise, osim od vrste IC senzora, i od otvora objektiva kamere, otvora aperture (dijafragme), filtera koji koristi kamera, i udaljenosti izvora zračenja i kamere prilikom kalibracije, odnosno njima se uzimaju u obzir, osim osobina detektora, i uticaj ostalih elemenata kamere kroz koje prolazi fluks zračenja do detektora.

Koristeći se relacijama (3) i (4) može se doći do funkcionalne zavisnosti za temperaturu objekta T_o , u zavisnosti od direktno merenih veličina, tj.:

$$T_o = f(I_e, T_a, T_{atm}, \epsilon_o, \tau) \quad (5)$$

Posle zamene relacije (4) u relaciju (3) i rešavanja po T_o dobija se matematički model za temperaturu površi objekta, koji se može napisati u obliku izraza:

$$T_o = \frac{B}{\ln \left(\frac{R}{\frac{I_e}{\tau\epsilon_o} - \frac{1 - \epsilon_o}{\epsilon_o} \frac{R}{e^{\frac{B}{T_a}} - F} - \frac{1 - \tau}{\tau\epsilon_o} \frac{R}{e^{\frac{B}{T_{atm}}} - F} + F \right)} \quad (6)$$

Relacija (6) omogućava proračun temperature površi objekta, koja se želi odrediti, na osnovu izmerenog termičkog ekvivalenta ukupnog fluksa IC zračenja I_e , kalibracionih konstanti IC senzora, odnosno sistema kojim se termički ekvivalent IC zračenja meri, i ostalih direktno merenih veličina ($T_a, T_{atm}, \epsilon_o, \tau$).

Polazeći od relacije (6) za T_o , čija je funkcionalna zavisnost data relacijom (5), može se doći do relacije za grešku određivanja temperature IC senzorom, kao indirektno merene veličine.

Matematički model greške određivanja temperature IC kamerom

U literaturi [11] date su opšte relacije za grešku merenja (određivanja) indirektno merenih veličina. Na osnovu toga relacije za standardnu relativnu grešku e_{T_o} i maksimalnu relativnu grešku određivanja temperature površi materijala IC senzorom $e^*_{T_o}$ imaju sledeći oblik, respektivno:

$$e_{T_o} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{T_o} \frac{\partial T_o}{\partial x_j} e_{x_j} \right)^2} \quad (7)$$

$$e^*_{T_0} = \pm \sum_{j=1}^m \left| \frac{1}{T_0} \frac{\partial T_0}{\partial x_j} e_{x_j} \right| \quad (8)$$

gde je:

x_j — direktno merena veličina iz relacije (5), $j=1 \dots 5$,

e_{x_j} — relativna instrumentalna greška direktno merene veličine x_j .

Parcijalni izvodi podeljeni sa temperaturom površi objekta, čija se temperatura T_0 određuje, a koji definišu relativnu grešku u relacijama (7) i (8), dati su u tabeli 1. Ovde izvedeni parcijalni izvodi važe za senzore definisane relacijom (4).

Izvedena funkcija greške omogućuje proračun greške, analizu uticajnih faktora i modeliranje uslova merenja radi smanjenja greške merenja, odnosno postizanja odgovarajuće tačnosti merenja.

Za proračun korekcionog faktora za uticaj transmitivnosti atmosfere za IC sistem THERMOVISION 870, pri određivanju temperature, AGEMA koristi semiempirijsku relaciju [8]:

$$\tau = e^{[-\alpha(\sqrt{d_0} - \sqrt{d_{cal}}) - \beta(d_0 - d_{cal})]} \quad (9)$$

gde je:

α, β — konstante slabljenja ili »atmosferske« konstante,

d_0 — udaljenost objekat — kamera,

d_{cal} — kalibraciona udaljenost.

Relacija (9) se zasniva na modelu LOWTRAN i važi za takozvanu standardnu atmosferu [8], a ne i za $\tau < 0,6$. Atmosferske konstante razlikuju se zavisno od primenjenog filtera u kameri THERMOVISION 870. Na primer, ako se ne koristi filter iznose $\alpha = 0,03330$ i $\beta = 0,00049$, a ako se koristi filter CO_2 iznose $\alpha = 0,21351$ i $\beta = 0,02056$.

Direktno merena veličina x_j	Parcijalni izvod $\frac{1}{T_0} \frac{\partial T_0}{\partial x_j}$
I_e	$\frac{RT_0}{\epsilon_0 \tau E B I_0^2}$
T_a	$\frac{(\epsilon_0 - 1) T_0 I_a^2 e^{(B/T_a)}}{\epsilon_0 E I_0^2 T_a^2}$
T_{atm}	$\frac{(\tau - 1) T_0 I_{atm}^2 e^{(B/T_{atm})}}{\epsilon_0 \tau E I_0^2 T_{atm}^2}$
τ	$\frac{(I_{atm} - I_e) R T_0}{\epsilon_0 \tau^2 E B I_0^2}$
ϵ_0	$\frac{(I_a - I_e) R T_0}{\epsilon_0 E B I_0^2}$

$$E = F + R/I_e$$

Analiza greške određivanja temperature IC senzorom

Analiza greške direktno merenih veličina

Funkcionalna zavisnost temperature objekta, relacije za standardnu relativnu i maksimalnu relativnu grešku, odnosno relacije u tabeli 1, pokazuju da greška određivanja temperature IC senzorom zavisi od sledećih veličina i instrumentalnih grešaka direktno merenih veličina:

— termičkog ekvivalenta ukupnog fluksa zračenja I_e i greške kojom se on meri;

— emisivnosti objekta ϵ_0 i greške kojom se ona određuje ili meri;

— temperature okoline T_a i greške kojom se ona određuje (procenjuje) ili meri;

— temperature atmosfere T_{atm} i greške kojom se ona meri;

— transmitivnosti atmosfere τ i greške kojom se ona određuje;

— temperatura objekta T_o , koja se određuje (proračunava) prema definisanom modelu;

— kalibracionih konstanti sistema.

Greška kojom se meri termički ekvivalent ukupnog zračenja I_e je, u stvari, greška koju daju proizvođači, i predstavlja instrumentalnu grešku merenja ukupnog termičkog ekvivalenta zračenja pri kalibraciji IC senzora, odnosno IC mernog sistema pomoću crnog tela. Prema podacima proizvođača IC sistema THERMOVISION 870 može se smatrati da ona iznosi 0,02, odnosno 2%. Iako to proizvođači navode kao grešku merenja temperature, to jeste greška merenja temperature samo ako se meri temperatura crnog tela ($\epsilon_o=1$), i u realnim uslovima se ne može smatrati greškom određivanja temperature, jer realna tela nisu crna (emisivnost im je, po pravilu, manja od jedan, a može biti i znatno manja od jedan kod metalnih površi). Može se lako pokazati da se greška određivanja termičkog ekvivalenta ukupnog zračenja I_e svodi na grešku određivanja termičkog ekvivalenta zračenja objekta I_o pri uslovima $\tau=1$ i $\epsilon_o=1$, kada je prema relaciji (3) $I_o=I_e$. To je instrumentalna greška sistema i može se smanjiti boljom konstrukcijom sistema, što se neće analizirati.

Greška određivanja emisivnosti objekta ϵ_o može biti veoma velika. Ona zavisi od načina dolaska do podatka za emisivnost objekta [15]. Do tog podatka može se doći iz odgovarajućih priručnika u kojima se daju podaci za emisivnost različitih vrsta materijala, analitičkim relacijama ili merenjem emisivnosti materijala objekta.

S obzirom na to da emisivnost materijala zavisi od više faktora, kao što su spektralni opseg (talasna dužina) zračenja, temperatura površi materijala, ugao zračenja [15], i stanje površi materijala (hrapavost i kontaminiranost slojem ulja, gareži ili premazima), a podaci o emisivnosti ma-

terijala u priručnicima nisu praćeni adekvatnom specifikacijom ovih uslova, podatak o emisivnosti uzet iz priručnika i stvarna emisivnost površi materijala može se razlikovati i po nekoliko puta (posebno zbog uticaja stanja površi materijala), što unosi veliku grešku. Zbog toga se određivanju emisivnosti materijala objekta, čija se temperatura određuje IC senzorom, mora posvetiti posebna pažnja. Poželjno je emisivnost materijala meriti na istom materijalu na kojem se meri i temperatura, u spektralnom opsegu u kojem radi IC sistem za određivanje temperature. To znači da bi za određivanje emisivnosti mogao da se iskoristi IC sistem kojim se određuje temperatura [9]. Pri tome, zavisno od metode merenja, treba uzeti u obzir i metodsku i instrumentalnu grešku merenja. Zbog toga je realno da greška sa kojom se poznaje emisivnost najčešće iznosi oko 10%, iako u nekim slučajevima, posebno kada se radi o velikim emisivnostima, može biti i manja (do 1%, za $\epsilon>0,9$). Međutim, u praksi su moguće i greške daleko veće od 10%.

Vrednost emisivnosti objekta, koja ulazi u relaciju za proračun temperature objekta i relaciju za proračun greške određivanja te temperature, predstavlja srednju vrednost emisivnosti u spektralnom opsegu odzivnosti IC senzora kojim se prima fluks zračenja.

Greška kojom se određuje ili meri temperatura okoline T_a sastoji se, uglavnom, od dve komponente. Jedna predstavlja grešku u definisanju okoline, tj. objekata, odnosno izvora zračenja koji zrače na površ objekta čija se temperatura meri i čije se zračenje reflektuje od objekta i dolazi na IC senzor. Druga komponenta predstavlja instrumentalnu grešku merenja temperature okoline, koja zavisi od greške instrumenta i metoda kojim se meri temperatura okoline.

Ponekad se temperatura okoline, zbog više izvora zračenja, ne može a-

dekvatno izmeriti, već se mora procenjivati na osnovu izmerenih temperatura izvora zračenja u okolini. Grešku kojom se vrši procena treba dodati na grešku instrumenta za merenje temperature okoline i to smatrati instrumentalnom greškom merenja temperature okoline u relacijama (7) i (8).

Smanjenje greške, usled uticaja okoline, može se postići kontrolom okoline upotrebom odgovarajućih ekrana poznate temperature, kada greška postaje zanemarljiva ili se bitno smanjuje komponenta greške usled nedefinisanosti okoline, pa se greška određivanja temperature okoline svodi na instrumentalnu grešku. Ako se koristi termopar i zanemari metodska greška može se smatrati da je ta greška oko $\pm 0,5$ K.

Greška kojom se meri temperatura atmosfere T_{atm} , kao i u slučaju greške temperature okoline, sastoji se od dve komponente. Prva komponenta sadrži izbor mesta merenja temperature atmosfere, odnosno definiciju temperature atmosfere, a druga predstavlja grešku instrumenta kojim se meri temperatura atmosfere.

U ovom radu usvojeno je da temperatura atmosfere predstavlja temperaturu na srednjem delu rastojanja između IC senzora i objekta čija se temperatura meri. Ako se može smatrati da postoji i greška u definisanju temperature okoline, onda je treba proceniti i sabrati sa greškom instrumenta kojim se ta temperatura meri. Ako se temperatura atmosfere meri živinim termometrom, i zanemari greška definisanja atmosfere, greška se svodi na oko $\pm 0,15$ K.

Greška kojom se određuje transmitivnost atmosfere τ . Transmitivnost atmosfere računa se na osnovu relacije (9) koja sadrži konstante koje se određuju pri kalibraciji konkretnog IC sistema, i udaljenost objekat — IC senzor. Prema tome, greška određivanja transmitivnosti atmosfere sastoji se od

greške modela na osnovu kojeg se transmitivnost atmosfere računa i greške merenja udaljenosti objekat — IC senzor.

Za proračun transmitivnosti atmosfere postoji više modela, s tim što nema preciznih podataka o njihovoj tačnosti. S obzirom na to da za model dat relacijom (9) AGEMA nije navela podatke o grešci modela, uzeto je u proračunu, jer se u [10] navodi da za slične modele greška iznosi od 5 do 10%, da greška određivanja transmitivnosti atmosfere iznosi 10%.

Pri merenju udaljenosti objekat — IC senzor može da postoji dilema da li treba meriti udaljenost od površi objekta do objektiva IC sistema ili do mesta IC senzora (IC detektora). Međutim, greška merenja udaljenosti, u odnosu na grešku modela (5—10%) je zanemarljiva, pa to nije od značaja. Do ovog zaključka se dolazi na osnovu analize uticaja greške merenja udaljenosti objekat — IC senzor na grešku određivanja emisivnosti atmosfere.

Kvantitativna analiza greške određivanja temperature

Za određivanje termičkog ekvivalenta ukupnog zračenja I_e korišćena je IC kamera, firme AGEMA, temperatura okoline merena je kontaktnim termometrom, a temperatura medija prostiranja (atmosfera) živinim termometrom. Korišćeni instrumenti imaju radnu klasu tačnosti.

Na osnovu toga i sprovedene analize, za kvantitativnu analizu greške odabrani su ulazni podaci i instrumentalne greške prikazani u tabeli 2. Pri proračunu greške od ostalih direktno merenih veličina uzeto je da je $T_0 = 323$ K.

Za potrebe analize uticaja pojedinih veličina na grešku određivanja temperature IC senzorom urađen je računarski program koji omogućuje proračun standardne relativne greške, ma-

ksimalne relativne greške i parcijalnih grešaka u zavisnosti od pojedinih direktno merenih veličina.

Tabela 2

Ulazni podaci za analizu greške

Veličina		Apsolutna greška	Relativna greška
Oznaka	Vrednost		
I_e	—	—	0,02
T_a	303,15 K	0,5 K	0,0016
T_{atm}	303,15 K	0,15 K	0,0005
τ	0,99	—	0,1
ϵ_0	0,5	—	0,1

Na slikama 2, 4, 6 i 7 prikazane su zavisnosti standardne relativne greške e_{T_o} i parcijalnih grešaka, za ulazne podatke date u tabeli 2, a na slikama 3 i 5 zavisnost standardne relativne greške za različite vrednosti direktno merenih veličina. Standardna relativna greška merenja računata je prema relaciji (7) i relacijama u tabeli 1. Relativne parcijalne greške računate su prema relacijama iz tabele 1, pomnožene sa relativnom instrumentalnom greškom odgovarajuće direktno merene veličine. Na slikama su krive za parcijalne greške označene odgovarajućom direktno merenom veličinom. Ostali parametri koji figurišu u matematičkom modelu za određivanje temperature imaju manji uticaj, pa, zbog ograničenog prostora, za njih zavisnost nije prikazana.

Analiza uticaja temperature objekta na standardnu relativnu grešku određivanja temperature (sl. 2) pokazuje da funkcija greške ima minimum, a njegov položaj prvenstveno zavisi od temperature objekta, okoline i atmosfere (sl. 3). Teoretski, ovaj minimum jednak je nuli, a nastupa kada je $T_o = T_a = T_{atm}$, $\epsilon_0 = 1$ i $\tau = 1$, ali je to prak-

tično skoro nemoguće postići. Detaljnija analiza pokazuje da, kada bilo koje dve od ovih temperatura nisu jednake, minimum nije nula i greška je

Sl. 2 — Zavisnost relativne greške od temperature površi objekta

Sl. 3 — Zavisnost relativne standardne greške od temperature objekta za različite vrednosti ϵ_0 , T_a , T_{atm}

Sl. 4 — Zavisnost relativne greške od emisivnosti objekta

Sl. 5 — Zavisnost relativne standardne greške od emisivnosti objekta za različite vrednosti T_o , T_a , T_{atm}

Sl. 6 — Zavisnost relativne greške od temperature okoline

Sl. 7 — Zavisnost relativne greške od temperature atmosfere

utoliko veća ukoliko je temperatura objekta niža od temperature okoline i atmosfere i ukoliko je razlika ovih temperatura veća. Međutim, što je emi-

sivnost objekta ϵ_o veća, minimum je blaži, pa je povoljnije merenje temperature materijala sa velikom emisivnošću.

Analiza uticaja emisivnosti objekta na grešku određivanja temperature IC senzorom (sl. 4) pokazuje da emisivnost objekta ima veliki uticaj, posebno pri malim vrednostima (metali sjajnih površi) kada greška počinje veoma brzo da raste, što se dešava kada je emisivnost objekta $\epsilon_o < 0,3$ a kada je $\epsilon_o < 0,1$ greška postaje toliko velika da je precizno merenje praktično nemoguće.

Detaljnija analiza zavisnosti greške (sl. 5) pokazuje da je teoretski najpovoljniji slučaj $T_o = T_a = T_{atm}$, a praktično najpovoljniji slučaj ako je $T_a = T_{atm}$, a T_o veće od tih temperatura kada za $\epsilon_o > 0,5$ greška iznosi oko 1% — maksimalna relativna greška prema relaciji (8) iznosi oko 2%.

Zavisnost standardne relativne greške od temperature okoline T_a (sl. 6) ima minimum koji iznosi oko 1%, a javlja se u okolini jednakosti temperatura T_a i T_o . Za postizanje manje greške pri $T_a \neq T_o$ pogodnije je da bude $T_a < T_o$. To se može objasniti time što je pri temperaturi okoline manjoj od temperature objekta (i istoj emisivnosti) manji doprinos fluksa zračenja okoline ukupnom fluksu zračenja koji prima IC senzor.

Zavisnost greške određivanja temperature IC senzorom od temperature atmosfere (sl. 7) ima sličan karakter kao i za temperaturu okoline, s tim što se minimum relativne standardne greške javlja na delu između vrednosti T_o i T_{atm} .

Očigledno je da greška određivanja temperature termovizijom zavisi od mnogo faktora, i da se prihvatljiva greška postiže samo pri određenim uslovima, kada je u granicama instrumentalne greške merenja termalnog ekvivalenta zračenja, odnosno greške merenja temperature crnog tela, što

je, u stvari, greška koju daje proizvođač sistema, a što je zaključeno i na osnovu analize izvedene funkcije greške.

Analiza parcijalnih grešaka pojedinih direktno merenih veličina pokazuje da najveći uticaj ima parcijalna greška emisivnosti objekta i transmisivnosti atmosfere, posebno za male vrednosti emisivnosti objekta i kada je temperatura objekta manja od temperature okoline. To se može objasniti time što je kod malih emisivnosti objekta i temperatura objekta manjih od temperature okoline, termički ekvivalent fluksa zračenja objekta znatno manji od termičkog ekvivalenta fluksa zračenja okoline, pa je udeo zračenja okoline i ostalih parazitnih izvora zračenja veći, čime je i greška određivanja temperature objekta veća.

Zaključak

U radu je izvedena i analizirana funkcija greške određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom THERMOVISION 870SWB švedske firme AGEMA, koja radi u spektralnom opsegu od 2 do 5 μm . Izvedena funkcija greške omogućuje proračun greške merenja, analizu uticaja pojedinih parametara i modeliranje uslova merenja radi postizanja zahtevane tačnosti. Pokazano je da greška merenja zavisi od mnogo parametara, a najznačajniji je uticaj emisivnosti objekta, posebno pri malim vrednostima emisivnosti, što ukazuje na poseban značaj njenog poznavanja.

Obavljena analiza standardne relativne i parcijalnih grešaka merenja pokazuje da se greška merenja koju daje proizvođač može postići samo pri određenim uslovima merenja koje je

u praksi teško obezbediti i da ona u određenim situacijama može biti toliko velika da je precizno merenje nemoguće.

Greška određivanja temperature površi materijala primenom IC senzora može se smanjiti smanjivanjem instrumentalnih grešaka merenja direktno merenih veličina, ali i izborom pogodnih uslova merenja koji dovode do eliminacije uticaja, odnosno redukcije pojedinih veličina iz uopštenog modela za određivanje temperature.

Greška merenja zavisi i od kompletnosti, odnosno greške matematičko-fizičkog modela (metodska greška) i od greške direktno merenih veličina (instrumentalne greške). Da bi se smanjila metoda greška, model za proračun temperature (merna jednačina) trebalo bi da što više odgovara stvarnoj situaciji pri merenju, odnosno da uzme u obzir što više faktora (izvora zračenja) koji utiču na proces merenja. Zbog toga je od posebnog značaja da se identifikuju i kvantifikuju svi ili što više potencijalnih izvora zračenja i procesa, i proceni njihov uticaj na proces merenja i grešku određivanja temperature.

Vrednost temperature okoline koja ulazi u model mora se proceniti ako okolina nije uniformna, ili treba koristiti radijacione štitove. Vrednost emisivnosti objekta, koja se unosi u matematički model za proračun temperature objekta, predstavlja srednju vrednost emisivnosti u spektralnom opsegu senzora, za posmatranu tačku objekta.

Obavljena analiza posebno je korisna za razumevanje uslova koje treba obezbediti pri merenju, kako bi se ono obavilo prihvatljivom, odnosno zahtevanom greškom određivanja temperature.

- [1] Madding, R.: Thermographic Instruments and Systems, University of Wisconsin — Extension, Department of Engineering and Applied Science, 1979.
- [2] Temperature, Its Measurements and Control in Science and Industry, Instrument Society of America, volume four, part 3, 1972.
- [3] Snopko, N. V.: Spektralne metode optičeskoj pirometrii nagretoj poverhnosti, Nauka i tehnika, Minsk, 1988.
- [4] Cogan, J.: Remote sensing of surface and near surface temperature from remotely piloted aircraft, Applied Optics 24, 1985, 1972.
- [5] You-Wen Zhang, i dr.: Quantitative measurements of ambient radiation emissivity, and thruth temperature of a greybody: methods and experimental results, Applied Optics. 1986.
- [6] Lixin, C., Bing, T. J., Xie-Rong, H.: Design principle for simultaneous emissivity and temperature measurement, Optical engineering, Vol 29, No. 12, December, 1990.
- [7] Pokorni, S., Milatović, B.: Mjerenje temperature na toplim djelovima turbomlaznih motora, JUKEM 90, Sarajevo, 24—27 oktobar 1990.
- [8] Thermovision 870, Operating Manual, AGEMA Infrared Systems, 1991.
- [9] Pokorni, S.: Određivanje temperaturskog stanja toplih djelova turbomlaznog motora metodom infracrvenog zračenja, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1995.
- [10] Gossorg, Ž.: Infrakrasnaja termografija, osnovi, tehnika primenienie, Mir, Moskva, 1988. (prevod sa francuskog na ruski).
- [11] Kurzenkov, D. D.: Osnovi metrologii v avio-priborostroenii, Izdateljstvo MAI, Moskva, 1990.
- [12] Livada, B.: Radiometrija optičkog zračenja: Izvori greške pri kalibraciji i merenju, Naučno-tehnički pregled, Vol. XLIII, 1993, 10, 12—23.
- [13] Forth Biennial Infrared Information Exchange, Proceedings, St. Louis, Missouri, August 22—24, 1978. (IRIE '78).
- [14] Fifth Biennial Infrared Information Exchange, Proceedings, book I, II, New Orleans, Louisiana, October 29—31, 1985. (IRIE '85).
- [15] Pokorni, S.: Mogućnost i ograničenja predikcije emisivnosti materijala, Vojnotehnički glasnik, 3/1997.