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

GREŠKA ODREĐIVANJA EMISIVNOSTI POVRŠI ČVRSTIH MATERIJALA IC KAMEROM

UDC: 535.247-15:681.785.6

Rezime:

Određivanje temperature IC termovizijskom kamerom bitno zavisi od poznavanja emisivnosti materijala čija se temperatura određuje. Podaci o emisivnosti materijala mogu se naći u priručnicima, ali mogu znatno odstupati od stvarnih vrednosti. Zbog toga je do podatka o emisivnosti potrebno doći merenjem na stvarnom materijalu. Emisivnost materijala moguće je odrediti istim IC sistemom kojim se određuje temperatura. U radu je izveden matematički model određivanja emisivnosti, a zatim izvedena i analizirana funkcija greške određivanja emisivnosti čvrstih materijala pomoću IC kamere THERMOVISION 870SWB firme Agema, koja radi u spektralnom opsegu 2 do 5 μm . Predstavljeni su rezultati analize standardne relativne greške i parcijalnih grešaka određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala, koji ukazuju na mogućnost modeliranja uslova koje treba obezbediti radi postizanja potrebne tačnosti određivanja emisivnosti IC kamerom.

Ključne reči: emisivnost, matematički model, greška merenja, IC zračenje, IC kamera, termovizija.

ERROR IN SOLID SURFACE EMISSIVITY DETERMINATION BY AN IR CAMERA

Summary:

Determination of temperature by IR thermal cameras depends significantly on the knowledge about the emissivity of solids in question. Solids emissivity data can be found in handbooks but can also considerably differ from real values. It is therefore necessary to obtain emissivity data by measurements taken on real materials. Solids emissivity can be determined by the same IR system used for temperature determination. A mathematical model for emissivity determination is derived in the paper as well as the function of error in determining solid materials emissivity by the 870SWB Agema IR THERMOVISION camera with 2—5 μm spectral range. The standard relative error and partial errors in determining emissivity of solid surfaces are analyzed and the obtained results point out to the possibility to model conditions necessary for acquiring demanded accuracy in emissivity determination.

Key words: emissivity, mathematical model, measurement error, IR radiation, IR camera, thermal imaging.

Uvod

Termovizija se, osim za otkrivanje maskiranih objekata, vizuelizaciju objekata u noćnim uslovima, snimanje signature aviona i slično, može pri-

meniti i za merenje temperature. Dok je u prvom slučaju, gde je cilj dobijanje termalne slike, potrebno utvrditi samo da li su dve susedne tačke međusobno toplije ili hladnije, pri čemu nije toliko značajno i koliko je stvar-

no neka tačka topla, u drugom slučaju, pri merenju stvarne temperature objekta, potrebno je kvantitativno odrediti (proračunati) vrednost temperature na osnovu intenziteta infracrvenog (IC) zračenja koje registruje IC senzor, odnosno IC kamera.

Određivanje temperature na osnovu merenja fluksa IC zračenja pripada grupi indirektnih metoda merenja, pri čemu se koristi odgovarajući matematičko-fizički model za proračun temperature, koji povezuje temperaturu objekta sa direktno merenim veličinama [1]. Pri određivanju temperature objekta IC kamerom, emisivnost objekta je jedna od direktno merenih veličina, a pokazalo se da greška određivanja temperature znatno zavisi od poznavanja emisivnosti materijala čija se temperatura određuje [1, 2]. Podaci o emisivnosti materijala koji se mogu naći u priručnicima mogu biti prilično nepouzdana, zbog toga što nisu u dovoljnoj meri precizirani uslovi pod kojima su dobijeni pa njihovo korišćenje može dovesti do značajne greške. Zbog toga je do podataka o emisivnosti potrebno doći merenjem na objektu na kojem se meri temperatura. Za određivanje emisivnosti objekta može se primeniti isti IC sistem koji se koristi za određivanje temperature, ako se temperatura objekta smatra direktno merenom veličinom, odnosno ako je poznata ili se izmeri nekom metodom. Prema tome, i određivanje emisivnosti na ovaj način pripada grupi indirektnih merenja i greška određivanja emisivnosti zavisi od potpunosti, odnosno greške modela (metodska greška) i od greške direktno merenih veličina (instrumentalne greške).

Zbog toga je, koristeći isti pristup kao pri analizi greške određivanja temperature IC kamerom [3], izveden matematički model određivanja emisivnosti u funkciji direktno merenih veličina i parametara kamere THERMOVISION 870SWB, a zatim izvedena i analizirana funkcija greške određivanja emisivnosti primenom iste IC kamere. Izvedena funkcija greške omo-

gućuje modeliranje uslova merenja koji obezbeđuju postizanje prihvatljive greške određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala.

Karakteristike emisivnosti materijala

Intenzitet infracrvenog zračenja materijala zavisi, prema Plankovom i Štefan-Bolcmanovom zakonu, od temperature tela i od emisivnosti njegove površi. Emisivnost materijala zavisi od vrste materijala. Sva realna tela imaju emisivnost manju od jedan (slika 1). Dielektrici imaju veću emisivnost od provodnih materijala, uglavnom veću od 0,5 a veliki broj dielektrika ima emisivnost veću od 0,9. Metali imaju emisivnost manju od 0,5, osim ako im površ nije korodirala ili je premazana nekim dielektričnim materijalom, na primer bojom. Metali sjajne površi imaju vrlo malu emisivnost, često ispod 0,1. Očigledno je da se emisivnost materijala mora uzeti u obzir u relaciji koja povezuje količinu zračenja i temperaturu površi materijala, jer bi se u protivnom moglo

Sl. 1 — Vrednosti emisivnosti različitih materijala

desiti da se, zavisno od vrednosti emisivnosti konkretnog materijala, temperatura odredi sa velikom greškom.

Podaci o emisivnosti materijala se mogu naći u priručnicima, kao na primer u [4]. Međutim, i emisivnost istog materijala zavisi od niza faktora [5], kao što su spektralni opseg zračenja, temperatura, ugao zračenja, stanje površi materijala (hrapavost, premazi, zaprljanost uljem i gareži i slično). Ti faktori obično, za potrebe preciznog određivanja temperature IC kamerom, nisu dovoljno precizno specificirani u podacima o emisivnosti u priručnicima, pogotovo stanje površi materijala. Zbog toga su nepouzdati i njihovo korišćenje može dovesti do velike greške u određivanju temperature. 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.

Postoje mogućnosti analitičkog predviđanja emisivnosti materijala, ali su isto tako ograničene [6]. Prema tome, do podatka o emisivnosti materijala potrebno je doći merenjem upravo na materijalu čija se temperatura meri i, po mogućnosti, IC senzorom kojim se temperatura određuje.

Određivanje emisivnosti IC kamerom kojom se određuje i temperatura pogodno je zbog toga što se tada podatak o emisivnosti dobija upravo u spektralnom opsegu u kojem radi IC sistem za merenje temperature, a takav je i neophodan kao ulazni podatak u matematički model za proračun temperature koja se određuje na osnovu IC zračenja materijala [1].

Kod čvrstih materijala kod kojih emisivnost ima vrednost manju od jedan koeficijent refleksije je, u skladu sa Kirhofovom zakonom, jednak razlici broja jedan i emisivnosti. To znači da što je manja emisivnost to se više toplotnog zračenja iz okoline reflektuje od površi objekta. Zbog toga je je-

dan od ključnih problema primene termovizije i radijacionih termometara za merenje temperature — kako odrediti stvarnu temperaturu tela sa nepoznatom emisivnošću i nepoznatim zračenjem iz okoline [7, 8, 9].

IC sistem sa kamerom THERMOVISION 870SWB

Merna aparatura korišćena u ovom radu predstavlja termovizijski sistem THERMOVISION 870SWB, švedske firme Agema, čiji su namena i sastav opisani u [3].

Laboratorijska konfiguracija termovizijskog mernog sistema THERMOVISION 870SWB obuhvata:

- IC kameru koja radi u SWB (Short Wave Band) kratkotalasnom IC spektralnom opsegu 2 do 5 μm sa termoelektrično hlađenim SPRITE IC detektorom;

- upravljačko-pokazivačku (display) jedinicu,

- personalni računar sa odgovarajućim interfejsima i softverom za snimanje i analizu termičkog stanja i proračun stvarne temperature objekta (Temperature Image Computer — TIC-8000),

- kolor printer.

Osetljivost kamere je, prema podacima proizvođača [10], $0,1^{\circ}\text{C}$ na 30°C temperature objekta, a tačnost $\pm 2\%$ ili $\pm 2\text{ K}$. Može da meri temperature od 253 K do 723 K bez primene filtera, odnosno do 1773 K uz njegovu primenu. Rezolucija iznosi 90 elemenata po liniji, mereno na 50 % modulacije.

Termovizijski sistem THERMOVISION 870SWB omogućuje trenutno određivanje (merenje) temperature velikog broja tačaka površi nekog objekta. Pored vrednosti temperature svake tačke omogućuje prikazivanje profila temperature duž željene linije, ra-

spodelu temperature i praćenje dinamike promene temperature u realnom vremenu. To je omogućeno povezivanjem personalnog računara u termovizijski sistem i odgovarajućim softverom. Funkcije softvera mogle bi se svrstati u četiri grupe:

- kvantitativni proračun stvarne temperature objekta;
- detaljna obrada i dijagnostika termograma;
- zapis, skladištenje i korišćenje zapisanih termograma;
- upoređenje termograma.

Situacija pri merenju, koja je poslužila za formiranje matematičkog modela određivanja emisivnosti površi čvrstih materijala IC kamerom THERMOVISION 870SWB, švedske firme Agema i za analizu greške, predstavlja situaciju pri merenju temperature datu u [3], s tom razlikom što je sada emisivnost indirektno, a temperatura objekta direktno merena veličina.

Matematički model određivanja emisivnosti IC kamerom

Polazeći od relacije za termički ekvivalent koji odgovara ukupnom flukusu IC zračenja koji prima detektor senzora kamere, date u [3], za emisivnost površi materijala objekta može se napisati sledeća relacija:

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

gde je:

- ε_o — emisivnost objekta;
- I_e — termički ekvivalent ukupnog zračenja koje prima senzor,
- I_o — termički ekvivalent zračenja površi objekta (zavisi od temperature objekta T_o i ε_o);
- I_a — termički ekvivalent zračenja okoline (zavisi od temperature okoline T_a);

I_{atm} — termički ekvivalent zračenja medija prostiranja — atmosfere (zavisi od temperature atmosfere T_{atm} i τ);

τ — transmitivnost medija prostiranja (atmosfera).

Kao što je objašnjeno u [3], signal detektora (termički ekvivalent) jeste funkcija temperature koja se određuje kalibracijom IC kamere. Za termovizijsku kameru THERMOVISION 870, firma Agema, ova zavisnost ima isti oblik [10]:

$$I = \frac{R}{e^{\frac{B}{T}} - F} \quad (2)$$

Kalibracione konstante R , B , F zavise od tipa IC detektora, otvora objektiva IC kamere, otvora dijafragme (aperture) i vrste filtera [10]. Za IC kameru THERMOVISION 870SWB, serijski broj 4131, otvor objektiva 12° , bez filtera i za otvore dijafragme 0, 1 i 2, podaci o konstantama R , B i F prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1

Podaci za konstante R , B i F

Otvor dijafragme	Konstante		
	R	B	F
0	456600	2942	-170
1	94230	3031	-25.3
2	22560	3237	0.38

Kao i pri određivanju temperature, relacija (2) važi za bilo koju komponentu termičkog ekvivalenta zračenja, uključujući i termički ekvivalent ukupnog zračenja. Na primer, ako se radi o termičkom ekvivalentu zračenja površi materijala objekta termički ekvivalent u relaciji (2) predstavlja termički ekvivalent I_o , a temperatura, u relaciji (2), predstavlja temperatu-

ru površi objekta T_o . Slično važi za vezu termičkog ekvivalenta zračenja okoline I_a i temperature okoline T_a , odnosno termičkog ekvivalenta zračenja atmosfere I_{atm} i temperature atmosfere T_{atm} . Ako se radi o termičkom ekvivalentu ukupnog zračenja onda termički ekvivalent u relaciji (2) predstavlja I_e , a temperatura predstavlja neku prividnu temperaturu T_{priv} . Termički ekvivalent ukupnog zračenja I_e meri se IC kamerom, a temperature T_o , T_a i T_{atm} odgovarajućim instrumentom. Temperatura površi objekta T_o može se meriti i IC kamerom ako postoji na objektu deo površi poznate emisivnosti. Prema tome, emisivnost objekta ϵ_o može se izraziti u zavisnosti od direktno merenih veličina, tj.:

$$\epsilon_o = f(I_e, T_a, T_{atm}, T_o, \tau) \quad (3)$$

Transmitivnost atmosfere τ takođe se smatra direktno merenom veličinom, iako se u ovom slučaju ne meri već izračunava na osnovu semiempirijske relacije [10]:

$$\tau = e^{[-\alpha(\sqrt{d_o} - \sqrt{d_{cal}}) - \beta(d_o - d_{cal})]} \quad (4)$$

U relaciju (4) ulaze veličine: udaljenost objekat—kamera d_o , koja se meri, kalibraciona udaljenost d_{cal} i odgovarajuće konstante α i β koje zavise od korišćenog filtera.

Ako se sve to ima u vidu, zamenom relacije (2) u relaciju (1), umesto vrednosti termičkih ekvivalenata I_o , I_a i I_{atm} , za emisivnost objekta dobija se relacija u kojoj figurišu termički ekvivalent ukupnog zračenja I_e , i ostale direktno merene veličine T_o , T_a , T_{atm} i τ , u obliku:

$$\epsilon_o = \frac{I_e - \tau \frac{R}{e^{\frac{B}{T_a}} - F} - (1 - \tau) \frac{R}{e^{\frac{B}{T_{atm}}} - F}}{\tau \left(\frac{R}{e^{\frac{B}{T_o}} - F} - \frac{R}{e^{\frac{B}{T_a}} - F} \right)} \quad (5)$$

Greška određivanja emisivnosti IC kamerom

Na osnovu opštih relacija za grešku indirektnih merenja [11], standardna relativna greška određivanja emisivnosti IC kamerom e_{ϵ_o} izražava se relacijom:

$$e_{\epsilon_o} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{\epsilon_o} \frac{\partial \epsilon_o}{\partial x_j} e_{x_j} \right)^2} \quad (6)$$

gde je:

x_j — direktno merene veličine (I_e , T_a , T_{atm} , T_o , τ),

e_{x_j} — relativne instrumentalne greške direktno merenih veličina x_j ,

$m = 1, \dots, 5$ ($1 = I_e$, $2 = T_a$, $3 = T_{atm}$, $4 = T_o$, $5 = \tau$).

Parcijalni izvodi koji ulaze u relaciju za relativnu grešku (6) prikazani su u tabeli 2. Prikazane relacije važe za senzore definisane izrazom (2).

Izvedena funkcija greške omogućava proračun greške, analizu određenih faktora i modeliranje uslova merenja radi postizanja potrebne tačnosti određivanja emisivnosti.

Analiza greške određivanja emisivnosti IC kamerom

Analiza greške direktno merenih veličina

Analiza relacija u tabeli 2, koje ulaze u relaciju (6), za grešku određivanja emisivnosti čvrstih materijala pokazuje da greška određivanja emisivnosti IC kamerom zavisi od sledećih direktno merenih veličina i njihovih instrumentalnih i metodskih grešaka:

— termički ekvivalent ukupnog fluksa zračenja I_e i greške kojom se on meri;

— temperatura objekta T_o , i greške kojom se ona meri;

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

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

— transmitivnost atmosfere τ i greške kojom se ona određuje (proračunava);

— emisivnost objekta ϵ_0 koja se određuje (proračunava) prema relaciji (5),

— kalibracione konstante sistema.

Tabela 2

Parcijalni izvodi za relaciju (6)

m	Direktno merena veličina x_j	Parcijalni izvod $\frac{\partial \epsilon_0}{\partial x_j}$
1	I_e	$\frac{1}{\tau D}$
2	T_a	$\frac{(\epsilon_0 - 1)BR \cdot e^{(B/T_a)}}{DT_a^2(e^{(B/T_a)} - F)^2}$
3	T_{atm}	$\frac{(\tau - 1)BR \cdot e^{(B/T_{atm})}}{\tau DT_{atm}^2(e^{(B/T_{atm})} - F)^2}$
4	T_o	$\frac{\epsilon_0 BR \cdot e^{(B/T_o)}}{DT_o^2(e^{(B/T_o)} - F)^2}$
5	τ	$\frac{I_{atm} - I_a - \epsilon_0 D}{\tau D}$

$$D = I_o - I_a$$

Greške određivanja svih ovih veličina analizirane su u [3] pri analizi greške određivanja temperature površi materijala pomoću IC senzora. Tada je emisivnost objekta predstavljala direktno merenu veličinu (na neki način poznatu ili merenu, kada je upravo i naznačen problem tačnosti poznavanja emisivnosti objekta), a temperatura objekta bila je veličina koja je određivana. U ovom slučaju je obrnuto — temperatura površi objekta je direktno merena veličina, pored ostalih u relaciji (5), a emisivnost površi objekta je veličina koja se određuje. Prema tome, i ovde važe zaključci u

vezi s greškama merenja svih direktno merenih veličina, osim temperature površi objekta i emisivnosti objekta.

Temperatura površi objekta, potrebna kao direktno merena veličina za određivanje emisivnosti, može se meriti na više načina, počevši od kontaktnih metoda do primene IC senzora, uz pretpostavku da na površi objekta postoji tačka sa poznatom emisivnošću (tzv. »crna tačka«). Radi prove- re mogućnosti korišćenja istog IC sistema kojim se meri emisivnost za istovremeno merenje temperature objekta, temperatura objekta, koja je potrebna kao ulazni podatak za proračun emisivnosti, merena je termo- parom zavarenim elektronskim snopom na površ materijala, i IC sistemom uz pomoć »crne tačke« — dela površi poznate emisivnosti [1].

Merenje temperature termo-parom zavarenim na površ uzorka, kao preciznija metoda, poslužilo je za evaluaciju mogućnosti merenja temperature objekta istim IC sistemom uz pomoć dela površi poznate emisivnosti, odnosno, takozvane »crne tačke«. Pokazalo se da je obe ove metode merenja temperature moguće ravnopravno koristiti [1]. Kao materijali za »crnu tačku« korišćeni su crni emajl lak i čađ sveće. Za te materijale je, istim IC sistemom, prethodno utvrđeno da imaju emisivnost 0,95, pri čemu je temperatura uzorka na koje su nanošeni ovi materijali merena termo-parom zavarenim na površ uzorka. Kalibracija termo-para vršena je u uljnoj kupki, pre nanošenja čađi, odnosno emajl laka na uzorak, čime je postignuta visoka tačnost merenja temperature uzorka.

Kvantitativna analiza greške određivanja emisivnosti

Za kvantitativnu analizu greške određivanja emisivnosti čvrstih materijala IC kamerom odabrani su ulazni podaci i instrumentalne greške, prikazani u tabeli 3.

Za određivanje termičkog ekvivalenta ukupnog zračenja I_e korišćena je IC kamera THERMOVISION 870 firme Agema, čija greška, prema podacima proizvođača [10], iznosi 2 %, odnosno 0,02. Ovaj podatak proizvođač navodi kao grešku merenja temperature, međutim u [1] je pokazano da je to instrumentalna greška merenja termičkog ekvivalenta IC zračenja a odgovara grešci određivanja temperature samo kada se radi o crnom telu, što je slučaj pri kalibraciji, a vrlo retko u praksi. U tabeli 2 je, radi analize, uzeto da greška iznosi 1 %, što je svakako u granicama greške kontaktnih termometara, odnosno termoparova, a takva tačnost se pod određenim uslovima može postići i putem termovizijskog sistema i »crne tačke« [1]. Temperatura okoline merena je kontaktnim termometrom (apsolutna greška 0,5 K), a temperatura medija prostiranja (atmosfera) živinim termometrom (apsolutna greška 0,15 K).

Tabela 3

Ulazni podaci za analizu greške

Veličina		Apsolutna greška	Relativna greška e_{xi}
Oznaka	Vrednost		
I_e	—	—	0,02
T_a	303 K	0,5 K	0,0016
T_{atm}	303 K	0,15 K	0,0005
T_o	323 K	—	0,01
τ	0,99	—	0,05

Što se tiče transmitivnosti atmosfere, koja se određuje prema relaciji (4), s obzirom na to da je uticaj greške merenja udaljenosti objekat—kamera d_o mali, greška određivanja τ svodi se na grešku matematičkog modela koja iznosi 5 do 10 % [12]. Za potrebe analize uzeto je da ona iznosi 5 %, odnosno 0,05.

Na slikama 2, 3, 4 i 5 prikazane su zavisnosti standardne relativne greš-

ke i parcijalnih grešaka od T_o , ϵ_o , T_a i T_{atm} , respektivno. Na slici 6 prikazana je zavisnost standardne relativne greške od temperature objekta T_o za iste, a na slici 7 za različite vrednosti T_a i T_{atm} i različite vrednosti ϵ_o . Dok je na svim slikama za instrumentalnu grešku transmitivnosti atmosfere uzeta vrednost 0,05, na slici 7 je prikazana kriva, označena brojem 6, kod koje je uzeto za instrumentalnu grešku transmitivnosti atmosfere vrednost 0,1. Na slici 8 dat je komparativan prikaz zavisnosti standardne relativne greške određivanja emisivnosti za iste i različite vrednosti T_a i T_{atm} , a sve ostale parametre iste. Standardna relativna greška određivanja emisivnosti objekta e_{ϵ_o} izračunata je prema relaciji (6), parcijalnim izvodima u tabeli 2 i podacima u tabeli 3.

Relativne parcijalne greške direktno merenih veličina izračunate su prema relacijama u tabeli 2, pomnožene sa relativnom instrumentalnom greškom odgovarajuće direktno merene veličine iz tabele 3, a krive za parcijalne greške na slikama su označene odgovarajućom direktno merenom veličinom.

Analiza greške određivanja emisivnosti materijala pokazuje da greška neograničeno raste kada je vrednost temperature objekta T_o jednaka vrednosti temperature okoline T_a (slika 2, $T_a=303$ K a T_o se menja, i slika 4, $T_o=323$ K, a T_a se menja). Prema tome u uslovima $T_o=T_a$ i u okolini te jednakosti, merenje emisivnosti postaje nemoguće. Greška određivanja emisivnosti ne zavisi mnogo od vrednosti emisivnosti (slika 3), osim pri malim vrednostima emisivnosti kada počinje brže da raste. Ako se menja samo temperatura atmosfere, vidi se da greška određivanja emisivnosti ima minimum (slika 5), koji za $\epsilon_o=1$ nastupa za $T_o=T_{atm}$, a za $\epsilon_o \neq 1$ nastupa za neku vrednost temperature između T_o i T_a , što zavisi od vrednosti ϵ_o . Što je ϵ_o manje ta temperatura je bliža vrednosti T_a , a što je ϵ_o veće ta temperatura je bliža vrednosti T_o .

Sa svih dijagrama se uočava da najveći uticaj na ukupnu grešku određivanja emisivnosti ima parcijalna greška transmitivnosti atmosfere zbog njene velike instrumentalne greške (5 %) u odnosu na ostale instrumentalne greške (2 % i manje) i velike zavisnosti od ostalih veličina (temperatura ambijenta i temperature atmosfere).

Da bi se postigla standardna relativna greška određivanja emisivnosti IC kamerom THERMOVISION 870 SWB, za uslove iz tabele 3, manja od 2 %, potrebno je da bude $|T_o - T_a| > 30$ K (slika 4), pod uslovom da je $\epsilon_o \geq 0,5$ i $T_o > T_a$. Nepovoljnije je ako je $T_o < T_a$.

Detaljnija analiza greške (slike 6, 7 i 8) pokazuje da je povoljnije ako su temperature okoline i atmosfere jednake nego ako se razlikuju (u razmatranju je uzeto da je $T_a > T_{atm}$, jer je češća situacija da u okolini objekta postoje izvori toplote čija je temperatura veća od temperature medija kroz koje se prostire zračenje od objekta do kamere, odnosno temperature atmosfere. Ako je $T_a = T_{atm}$ potrebna je manja razlika T_o i T_a da bi se postigla ista tačnost određivanja emisivnosti (slika 6). Može se uočiti da je povoljnija situacija kada je $T_o > T_a$ za $T_o = T_{atm}$, dok za slučaj $T_o \neq T_{atm}$ to nije tako. U slučaju kada je $T_a > T_{atm}$, kao na slici 7, greška ima minimum na temperaturi bliskoj T_{atm} (koliko bliskoj zavisi od vrednosti ϵ_o , ako je $\epsilon_o = 1$ onda je taj minimum na T_{atm}),

ali je mesto tog minimuma teže proceniti bez ovakvog računa. Zbog toga ostaje zaključak da je povoljniji slučaj kada je $T_o > T_a$, ali je potrebno obezbediti veću razliku ove dve temperature.

Sl. 3 — Zavisnost greške od emisivnosti objekta

Sl. 4 — Zavisnost greške od temperature okoline

Sl. 2 — Zavisnost greške od temperature površi objekta

Sl. 5 — Zavisnost greške od temperature atmosfere

Sl. 6 — Zavisnost greške od temperature površi objekta za iste vrednosti T_a i T_{atm} i različite vrednosti ϵ_0 i instrumentalne greške za τ

Sl. 7 — Zavisnost greške od temperature površi objekta za različite vrednosti ϵ_0 , T_a i T_{atm} i instrumentalne greške za τ

Sl. 8 — Komparativan prikaz uticaja istih i različitih vrednosti za T_a i T_{atm} na grešku određivanja emisivnosti

Greška se može smanjiti i manjim instrumentalnim greškama merenja direktno merenih veličina, za što je potrebna oprema koja prelazi nivo radne klase tačnosti, a to znači i veću cenu.

Zaključak

U radu je izveden matematički model određivanja emisivnosti primenom IC kamere THERMOVISION 870SWB firme Agema, koja se koristi i za određivanje temperature. Izvedena je i analizirana funkcija greške određivanja emisivnosti, koja omogućava proračun greške merenja, analizu uticaja pojedinih parcijalnih grešaka i parametara i modeliranje uslova merenja radi postizanja zahtevane tačnosti.

Pristup analizi greške preko parcijalnih grešaka omogućava izdvajanje direktno merene veličine koja najviše utiče na ukupnu grešku merenja, odnosno određivanje emisivnosti. Analiza pokazuje da najveći uticaj na ukupnu grešku merenja ima parcijalna greška transmisivnosti atmosfere, i njena velika instrumentalna greška kao direktno merene veličine. Najveći udeo u toj grešci ima greška modela transmisivnosti atmosfere koja, za raspoložive modele, iznosi 5 do 10 %.

Da bi se postigla standardna relativna greška određivanja emisivnosti IC kamerom THERMOVISION 870 SWB, manja od 2 %, za uslove u ovom radu, potrebno je da bude $|T_o - T_a| > 30$ K, uz uslov da je $\epsilon_0 \geq 0,5$ i $T_o > T_a$. Povoljnija je situacija kada je $T_o > T_a$.

Parcijalna greška transmisivnosti atmosfere znatno zavisi od temperature atmosfere. Prema tome, kontrolom temperature atmosfere, odnosno medija kroz koji se prostire zračenje od objekta do kamere, može se znatno uticati na povećanje tačnosti određivanja emisivnosti.

Posebno je nepovoljna situacija kada je temperatura objekta jednaka

ili bliska temperaturi okoline, što je u praksi često, kada je precizno određivanje emisivnosti praktično nemoguće.

S obzirom na to da proizvođač ne daje podatak o tačnosti, odnosno grešci određivanja emisivnosti IC kamerom THERMOVISION 870SWB, preostaje da se smatra da je ta greška jednaka grešci koju je proizvođač dao za merenje temperature, što je, u stvari, instrumentalna greška merenja ter-

mičkog ekvivalenta IC zračenja ili da se pribegne ovakvoj detaljnijoj analizi greške određivanja emisivnosti.

Vrednost temperature okoline koja ulazi u model, kao i kod određivanja temperature IC kamerom, mora se proceniti, ako okolina nije uniformna ili treba koristiti radijacione štitove.

Vrednost emisivnosti koja se dobija merenjem predstavlja srednju vrednost emisivnosti u spektralnom opsegu rada senzora, što je bolje rešenje.

Literatura:

- [1] Pokorni, S.: Određivanje temperaturnog stanja toplih delova turbomlaznog motora metodom infracrvenog zračenja, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1994.
- [2] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi materijala primenom IC senzora, ETRAN'96, Zbornik radova, sveska IV, Budva, 4—7. juni 1996. str. 103—106.
- [3] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja temperature površi čvrstih materijala IC kamerom, Vojnotehnički glasnik, 1/98. str. 75—86.
- [4] OMEGA Engineering Inc.: The Temperature Handbook, 1991.
- [5] Siegel, R., Howell, J.: Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, Kogakusha, Ltd., 1972.
- [6] Pokorni, S.: Mogućnosti i ograničenja predikcije emisivnosti materijala, Vojnotehnički glasnik, 3/1997. str. 313—325.
- [7] Emilsson B. E., Roos A. R.: A Method And Equipment For Measuring Infrared Emissivity, Sweden.
- [8] Lixin C., Bing T. J., Xic-Rong H.: Design Principle for simultaneous emissivity and temperature measurement, Optical Engineering, vol. 29, No. 12, dec. 1990. p. 1445—1448.
- [9] You-Wen Zhang, i dr.: Quantitative measurements of ambient radiation emissivity, and truth temperature of a greybody: methods and experimental results, Applied Optics. vol. 25, No. 20, 1986. p. 3683—3689.
- [10] Thermovision 870, Operating Manual, AGEMA Infrared Systems, 1991.
- [11] Kurzenkov, D. D.: Osnovi metrologii v aviopriborostroenii, Izdatel'stvo MAI, Moskva, 1990.
- [12] Gossorg, Ž.: Infrakrasnaja termografija, osnovi, tehnika, primenenie, Mir, Moskva, 1988. (prevod sa francuskog na ruski).
- [13] Snopko, N. V.: Spektralnie metodi optičeskoj pirometrii nagretoj poverhnosti, Nauka i tehnika, Minsk, 1988.
- [14] Pokorni, S.: Analiza greške određivanja emisivnosti materijala pomoću IC senzora, ETRAN '97, Zbornik radova, sveska IV, Zlatibor 3—6. jun, 1997. str. 133—136.