

536.331:536.521.2:519.63

PRIMJENA TERMOVIZIJSKE INFRACRVENE KAMERE U TERMOTEHNICI APPLICATION OF INFRARED CAMERA IN THERMAL ENGINEERING

Paolo BLECICH – Bernard FRANKOVIĆ – Kristian LENIĆ

Sažetak: U ovom je radu izložena mogućnost primjene infracrvene (IC) kamere u termotehnici. Mjerenja su izvršena na pločastom električnom radijatoru s ciljem utvrđivanja položaja grijača u materijalu radijatora kao i toplinskog učina radijatora za slučaj ugradnje u prozorsku nišu s prozorskom klupčicom i bez nje. Dobiveni termogrami nestacionarnih temperaturnih distribucija površine radijatora, na kojima se temelje proračuni toplinskih učina, uspoređivani su s numeričkim putem dobivenim temperaturnim poljima radijatora u pogonu.

Ključne riječi:

- IC-kamera
- zračenje topline
- metoda kontrolnih volumena
- dubina grijača
- toplinski učin radijatora

Abstract: In this paper, an application of infrared (IR) camera in thermal engineering is presented. Measurements have been performed on an electrical flat radiator with the goal of revealing the heaters location inside the radiator material as the heating output of the radiator when it is embedded in a window niche, with and without a bench. The resulting thermograms of unsteady radiator surface temperatures, the basis for heating output calculations, have been compared with numerically obtained temperature fields of the radiator at power-on.

Keywords:

- IR camera
- heat radiation
- finite-volume method
- heaters depth
- radiator heating output

1. UVOD

IC kamera je mjerni uređaj koji omogućuje čovjeku da proširi poznavanje svijeta koji ga okružuje: toplinsko zračenje koje odašilju svi predmeti postalo je posredstvom IC kamere vidljivo ljudskom oku.

Zračenje je funkcija temperature površine tijela, a upravo na toj osnovi radi IC kamera koja prikazuje izmjerene temperature u obliku termograma.

Zbog niza kvaliteta IC kamere su pronašle svoje mjesto i u strojarstvu kao alat kontrole, održavanja i osiguranja kvalitete [1].

U ovome radu termogrami površine radijatora služe za provjeru numeričkim putem dobivenih temperaturnih polja radijatora, na kojima se temelji proračun toplinskog učina radijatora i dubine električnih grijača [2].

1. INTRODUCTION

The IR camera is a measuring device that allows a man to expand the knowledge of the world that surrounds him: thermal radiation from an object surface can be detected, via an IR camera, by the human eye.

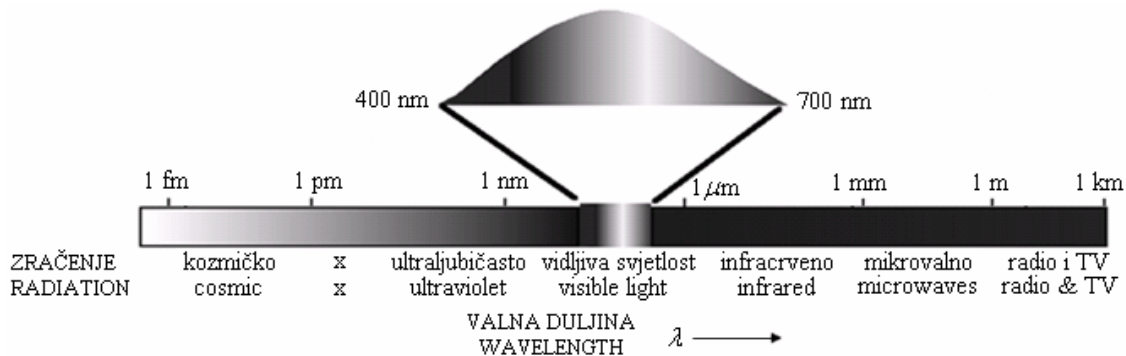
The fact that radiation is a function of body-surface temperature makes it possible for the camera to calculate and show this temperature as a thermogram.

Because of a number of merits, IR cameras have found their place in mechanical engineering as a tool of control, maintenance and quality assurance [1].

In this paper thermograms of the radiator surface are used to verify the numerically obtained temperature fields of the radiator which are the basis for the calculus of the radiator heating output and the heaters depth [2].

2. OSNOVE ZRAČENJA TOPLINE

Zračenje topline mehanizam je prijenosa topline koji ovisi isključivo o temperaturi tijela te o stanju njegove površine. Sva tijela temperature iznad 0 K zrače toplinu. Za razliku od provođenja i konvekcije, zračenju nije neophodan medij posrednik u izmjeni te ne ovisi o temperaturnom gradijentu medija. U spektru elektromagnetskih valova (slika 1) toplinsko se zračenje pojavljuje u području valnih duljina od 3 do 400 nm – ultraljubičasto (UV) zračenje, od 0,4 do 0,76 μm – vidljiva svjetlost i posebice u pojasu valnih duljina od 1 do 1000 μm – infracrveno (IC) zračenje.



Slika 1. Spektar elektromagnetskih valova
Figure 1. Electromagnetic waves spectrum

Zračenje realnog tijela uspoređuje se sa zračenjem teorijskog tijela, koje, za određenu temperaturu T i valnu duljinu λ , zrači najveću moguću energiju [3]. Takvo tijelo naziva se crnim tijelom. Raspodjelu intenziteta zračenja crnog tijela u vakuumu po spektru valnih duljina opisuje Planckov zakon:

$$E_{c\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}, \text{ W}/\mu\text{m} \cdot \text{m}^2 \quad (1)$$

gdje su C_1 i C_2 prva i druga konstanta zračenja. Vlastita emisija crnog tijela, temperature T , opisuje se Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$E_c = \int_0^{\infty} E_{c\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \text{ W}/\text{m}^2 \quad (2)$$

Odnos vlastite emisije stvarnog tijela $E(T)$ i emitirane energije crnog tijela $E_c(T)$ pri istoj temperaturi naziva se emisivnost ili faktor emisije:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_c} < 1 \quad (3)$$

On ovisi o stanju i temperaturi površine tijela te o smjeru i valnoj duljini zračenja. Upadajuće zračenje na površinu stvarnog tijela dijelom se apsorbira (a), dijelom se reflektira (r) i dijelom propusti (d), te vrijedi izraz:

$$a + r + d = 1 \quad (4)$$

2. BASIS OF THERMAL RADIATION

Radiation is a mode of heat transfer which depends solely on the body temperature and on the properties of its surface. All bodies with a temperature above 0 K radiate heat. Unlike conduction and convection, thermal radiation does not require a material medium to take place and the temperature gradient of the medium is irrelevant. In the electromagnetic waves spectrum, Figure 1, thermal radiation exists between the wavelengths 3 and 400 nm – ultraviolet (UV) radiation, 0,4 and 0,76 μm – visible light and most of all between 1 and 1000 μm – infrared (IR) radiation.

Real body radiation is compared to the radiation of a theoretical body, which, for a specified temperature T and wavelength λ , radiates the highest possible energy [3]. This body is called a blackbody. The spectral blackbody emissive power in a vacuum is expressed by the Planck's Law:

where C_1 and C_2 are the first and the second radiation constants. The total blackbody emissive power, at temperature T , is expressed by the Stefan-Boltzmann Law:

The ratio of the radiation emitted by a real body $E(T)$ to the blackbody radiation $E_c(T)$ at the same temperature is called emissivity:

It depends on the state and temperature of the surface and on the direction and wavelength of radiation. The incoming radiation onto a real body surface is partly absorbed (a), partly reflected (r) and partly transmitted (d), according to:

Ako je tijelo nepropusno za toplinsko zračenje, izraz (4) postaje

If the body is non-transparent to thermal radiation, the equation (4) becomes

$$a + r = 1 \tag{5}$$

Kirchhoffov zakon pojednostavnjuje izraz (5): tijelo (crno ili stvarno), u toplinskoj ravnoteži s okolinom, apsorbira i emitira jednaku količinu energije u bilo kojem smjeru i pri bilo kojoj valnoj duljini zračenja:

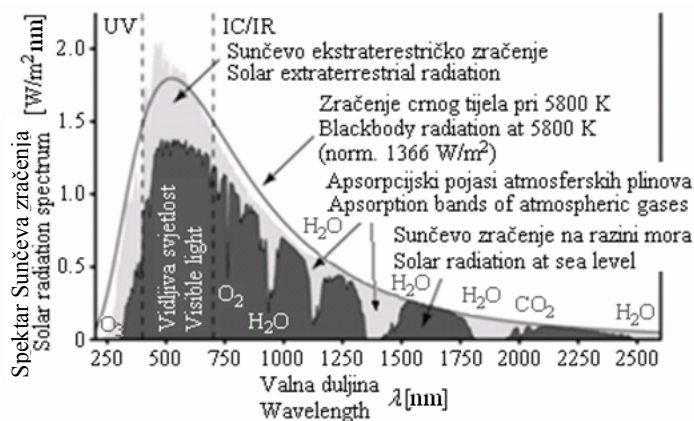
Kirchhoff's law simplifies the expression (5): a body (real or blackbody), in thermal equilibrium with the environment, absorbs and thus emits the same amount of energy in any direction and at any radiation wavelength:

$$a = \varepsilon \begin{cases} = 1, \text{ za crna tijela/for blackbodies} \\ < 1, \text{ za stvarna tijela/for real bodies} \end{cases} \tag{6a}$$

$$\tag{6b}$$

Plinovi su, za razliku od kapljevina i krutina, više ili manje propusni za toplinsko zračenje: jedno i dvoatomni plinovi smatraju se potpuno prozračnima za toplinske zrake dok višeatomni plinovi selektivno apsorbiraju zračenje, kao što je prikazano na slici 2.

Gases, unlike liquids and solids, are more or less transparent to thermal radiation: one and two-atomic gases are taken as completely transparent to heat rays while pluriatomic gases selectively absorb the radiation, as shown in Figure 2.



Slika 2. Apsorpcijski pojasi atmosferskih plinova za Sunčevo zračenje
Figure 2. Absorption windows for atmospheric gases to Solar radiation

3. INFRACRVENA TERMOGRAFIJA

3. INFRARED THERMOGRAPHY

IC termografija je nedestruktivna, beskontaktna metoda mjerenja temperature i njezine raspodjele na površini promatranog tijela. IC kamera mjeri i prikazuje ukupno zračenje koje dolazi s površine tijela.

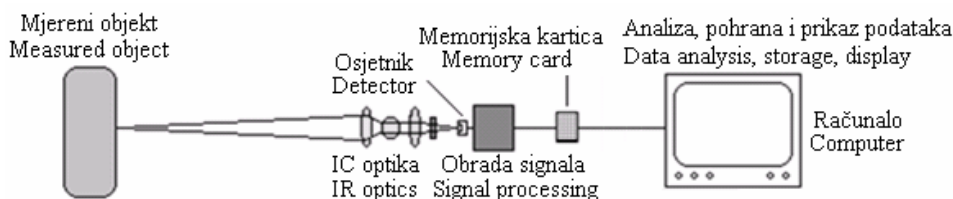
IR thermography is a non-destructive, remote sensing technique of temperature measurement and its distribution on a body surface. The IR camera measures and images the total radiation from the object surface.

Nekoliko je mogućih primjena IC kamera: ispitivanje materijala bez razaranja, osiguranje kontrole i kvalitete, održavanje toplinskih izolacija i električnih instalacija, astrofizika, medicina.

Some of the possible applications of IR cameras are: non-destructive material testing, control and quality assurance, maintenance of thermal insulation and electrical installations, astrophysics, and medicine.

Termografski sustav na slici 3. sastoji se od mjerenog tijela, termografske kamere i računala za obradu rezultata mjerenja (termograma).

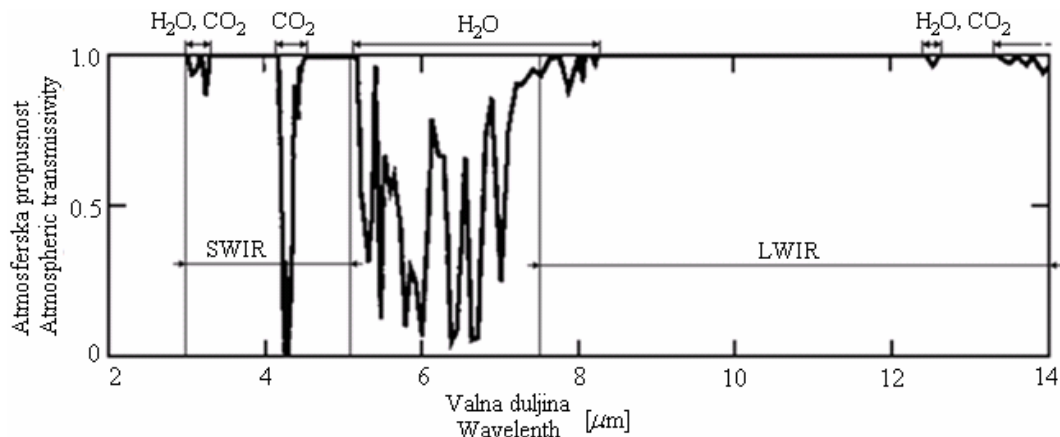
The thermographic system in Figure 3. consists of a measured object, an IR camera and a computer for data (thermogram) analysis.



Slika 3. Termografski sustav
Figure 3. Thermographic system

Na kvalitetu IC mjerenja utječu: faktor emisije i temperatura objekta, temperatura okoline i okolnih predmeta, udaljenost objekta od IC kamere te stanje atmosfere. Kako zrak sadrži selektivnoapsorbirajuće plinove, propusnost atmosfere je funkcija valne duljine zračenja, kao što je prikazano na slici 4. Najbolju propusnost atmosfera pokazuje u kratkovalnom IC pojasu – SWIR (3÷5 μm), iznimno pri 4,2 μm i u dugovalnom IC pojasu – LWIR (7,5÷14 μm).

The quality of IR measurements depends on the object emissivity and temperature, the temperature of the surroundings, the object distance from the IR camera and the atmospheric conditions. Due to the selective-absorptivity of the air, the atmospheric transmissivity is a function of radiation wavelength, as shown in Figure 4. Top transmissivities are obtained in the shortwave IR window – SWIR (3÷5 μm), with a notch at 4,2 μm , and in the longwave IR window – LWIR (7,5÷14 μm).



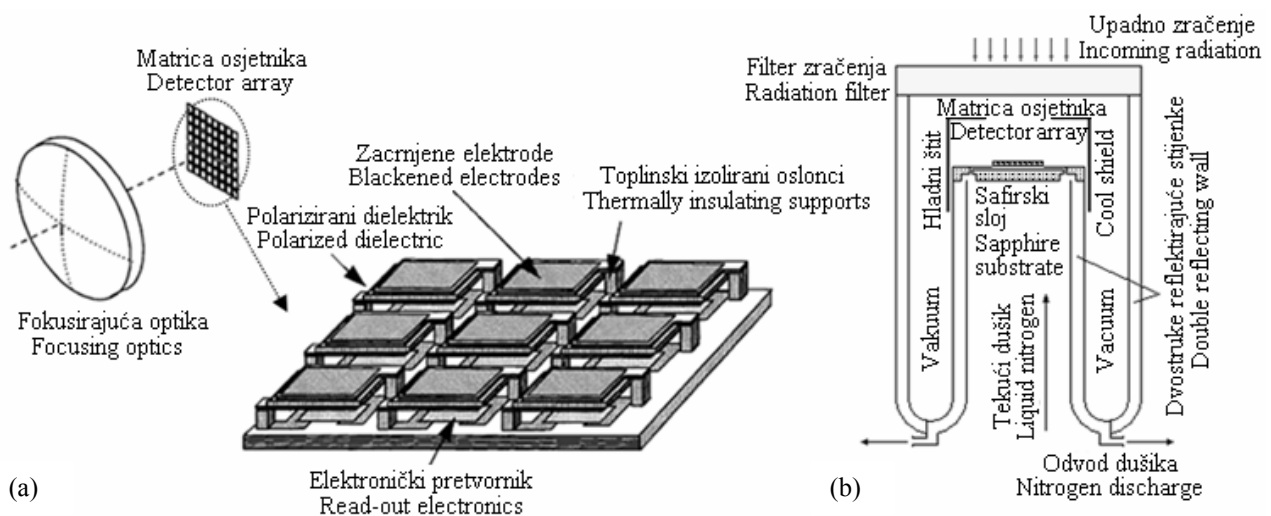
Slika 4. Propusnost atmosfere u funkciji valne duljine zračenja i pri udaljenosti objekta od 10 m
Figure 4. Atmospheric transmissivity with respect to radiation wavelength for an object at distance of 10

IC osjetnici međusobno se razlikuju po načinu na koji pretvaraju upadno zračenje u električne signale [4].

U fotonskim osjetnicima upadno zračenje inducira razliku napona. Fotonske je osjetnike potrebno hladiti na vrlo niske temperature (-100 do -200°C) radi postizanja dobre osjetljivosti. Jedna je od mogućnosti hlađenje izravnim kontaktom s tekućim dušikom, slika 5.

U nehlađenim toplinskim osjetnicima količina upadnog zračenja utječe na temperaturu osjetnika, a time i na njegov otpor. Prikaz nehlađenoga toplinskog osjetnika dan je na slici 5.

IR detectors differ from each other in the way they convert incoming radiation into electrical impulses [4]. In photon detectors, the incoming radiation generates a potential difference. Photon detectors require cooling to very low temperatures (-100 to -200°C) in order to achieve good sensitivities. Pouring liquid nitrogen directly onto the detector is just one possible cooling technique, Figure 5. Uncooled thermal detectors rely on the heating effect of the incoming radiation: a change in temperature results in a change in resistance. An uncooled thermal detector is shown in Figure 5.



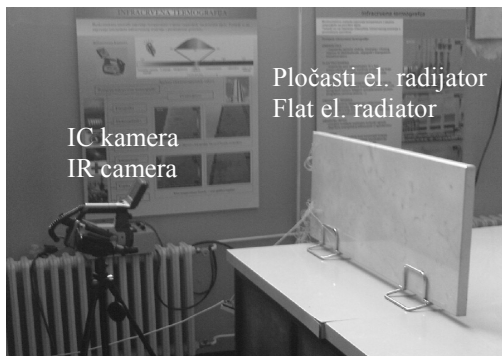
Slika 5. Nehlađeni toplinski osjetnik (a) i hlađeni fotonski osjetnik (b)
Figure 5. Uncooled thermal detector (a) and cooled photon detector (b)

4. MJERNA LINIJA

IC kamerom snimane su temperaturne raspodjele na površini pločastoga električnog radijatora pri njegovu zagrijavanju. Prikaz mjerne linije dan je na slici 6.

4. MEASURING SET-UP

Temperature distributions on the flat electrical radiator at power-on were recorded by the IR camera. The measuring set-up is given in Figure 6.



Slika 6. Mjerna linija

Figure 6. Measuring set-up

Karakteristike IC kamere dane su u tablici 1. Karakteristike radijatora i fizikalna svojstva materijala radijatora dani su u tablici 2.

The IR camera characteristics are given in Table 1. The radiator and the physical properties of its materials are given in Table 2.

Tablica 1. Karakteristike IC kamere

Table 1. IR camera characteristics

Proizvođač/Manufacturer	FLIR Systems
Model/Model	ThermaCAM S65
Točnost/Accuracy	±2 %
Osjetljivost/Sensitivity	< 0.08 °C
Mjerno područje/Measuring range	-40÷2000 °C
Veličina osjetnika/Detector array size	320×240
Osjetnik/Detector	Nehladeni bolometar/Uncooled bolometer
Pojas osjetljivosti/Waveband	LWIR (7.5÷14 μm)

Tablica 2. Karakteristike pločastog el. radijatora

Table 2. Flat el. radiator properties

Proizvođač/Manufacturer	Mramoterm, Viškovo (Rijeka)
Model/Model	800 W/40cm
Toplinski učin el. grijača/El. wire heating output	66.7 W/m (ϕ5)
Dimenzije/Dimensions	
- dužina/length	1000 mm
- visina/height	400 mm
- debljina/thickness	30 mm
Fizikalna svojstva materijala radijatora/Physical properties of radiator material	
Materijal/Material	Kamen Bračko veselje/Rock-Bračko veselje
Gustoća/Density	2600 kg/m ³
Toplinska provodnost/Thermal conductivity	2.8 W/mK
Toplinska difuzivnost/Thermal diffusivity	1.33 mm ² /s
Specifični toplinski kapacitet/Specific heat capacity	810 J/kgK

Mjerenja su provedena u okolini temperature zraka i ambijenta od 18 °C. Umjeravanje emisijskog faktora površine radijatora, ulazne varijable za IC kameru, izvršeno je mjerenjem temperature površine radijatora. Izmjereni emisijski faktor iznosi $\varepsilon = 0,94$.

Measurements were performed at an air and ambient temperature of 18 °C. Calibration of the radiator surface emissivity, input value for the IR camera, was effected measuring the radiator surface temperature. The measured emissivity is $\varepsilon = 0,94$.

5. NUMERIČKA ANALIZA PROVOĐENJA TOPLINE U RADIJATORU

Kad se primijeni numerička metoda kontrolnih volumena, domena i pripadajuća jednadžba očuvanja energije za nestacionarno 3D provođenje topline diskretiziraju se i rješavaju za konačan broj čvorova napredovanjem po vremenskoj koordinati [5]. Radi se o matematičkim problemu oblika

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + \dot{q}_v \quad (7)$$

gdje je ρ gustoća, c specifična toplina, a λ toplinska vodljivost materijala radijatora. Toplinski učin grijača određen je članom izvora topline \dot{q}_v . Za konstantnu toplinsku vodljivost u domeni, izraz (7) postaje

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{\dot{q}_v}{\rho c} \quad (8)$$

Korištena je potpuno implicitna formulacija za diskretizaciju jednadžbe 3D nestacionarnog provođenja topline u krutini. Linearizirani oblik diskretizacijske jednadžbe za kontrolni volumen može se zapisati kao

$$a_p T_p = \sum_{nb} a_{nb} T_{nb} + b \quad (9)$$

pri čemu su a_p i a_{nb} linearizirani koeficijenti za temperaturu čvora promatranoga kontrolnog volumena T_p , odnosno za temperature čvorova susjednih kontrolnih volumena T_{nb} . Električni grijači postavljeni su u središnjoj ravnini ploče radijatora, a računski domena, zbog toplinske simetrije, postaje polovica ploče. Takva je domena diskretizirana s približno 300 000 kontrolnih volumena. Granice domene u doticaju s okolnim zrakom opisuju se rubnim uvjetom 3. vrste. Geometrija pločastog radijatora konstruirana je i umrežena u programu *Gambit*, a računski riješena u programskom paketu *Fluent 6*.

6. DUBINA GRIJAČA U RADIJATORU

Cilj analize bio je odrediti dubinu el. grijača u radijatoru ako su na raspolaganju IC kamera za mjerenje površinske temperaturne raspodjele na radijatoru i računalo za simulaciju zagrijavanja radijatora. Zadatak je srodan s mjerenjem dubine pogreške u materijalu pomoću promjene temperaturnoga kontrasta u vremenu [6]. Računalnim simulacijama pronađena je ovisnost između trenutka postizanja stacionarnog stanja površine radijatora i dubine grijača. Ovisnost je dana na slici 7. Radijator postiže stacionarno stanje kada se toplinski tok doveden električnim grijačima izjednači s toplinskim tokom koji se odvodi s površine radijatora na okolni zrak i predmete. Usvojena je pretpostavka da stacionarno stanje površine radijatora nastupa kad porast maksimalne

5. NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT CONDUCTION IN THE RADIATOR

Using the finite volume method, the computational domain and the related energy conservation equation for unsteady 3-D heat conduction are being discretised and calculated for a finite number of nodes marching along the time coordinate [5]. In other words, the mathematical expression for that problem is

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + \dot{q}_v \quad (7)$$

where ρ is the mass density, c the specific heat and λ the thermal conductivity. The heating output of the heaters is expressed with the heat source term \dot{q}_v . For constant thermal conductivity in the domain, the equation (7) becomes:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \frac{\dot{q}_v}{\rho c} \quad (8)$$

The heat conduction equation for 3-D unsteady heat conduction in a solid is discretised using the fully implicit formulation. The linearised form of the discretization equation for a control volume is

$$a_p T_p = \sum_{nb} a_{nb} T_{nb} + b \quad (9)$$

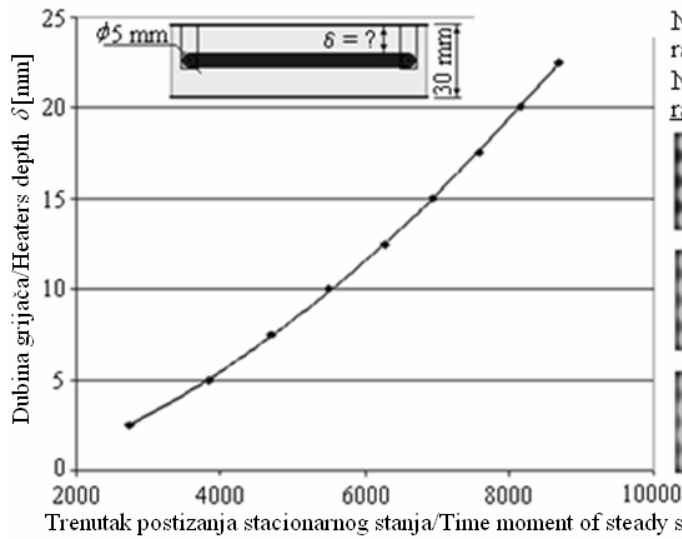
where a_p and a_{nb} are the linearised coefficients for the nodal temperature of the observed control volume T_p and for the nodal temperatures of the neighbouring control volumes T_{nb} . Electric heaters are set in the midplane of the radiator, the computational domain, and due to heat transfer symmetry, it becomes one half of the radiator. Such a domain is discretised with nearly 300 000 control volumes. Domain boundaries exposed to room air are described with the 3rd type of boundary condition. The radiator geometry has been built and meshed in the program *Gambit* and numerically solved in the application *Fluent 6*.

6. HEATERS DEPTH IN THE RADIATOR

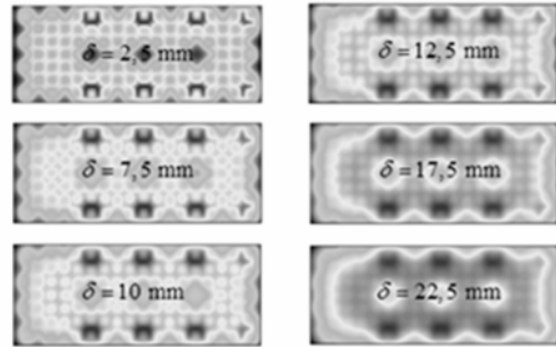
The goal of the analysis was to determine the heaters depth inside the radiator using an IR camera for imaging the temperature distributions on the radiator surface and a computer to simulate the radiator at power-on. The problem is akin to a defect depth measurement using a variation of temperature contrast in time [6]. Using computer simulations, a relationship between the time of steady-state achievement on the radiator surface and the heaters depth has been found. The relationship is given in Figure 7. A steady-state is reached when the heat flux from electrical heaters and the emitted heat flux from the radiator surface toward the surrounding air and objects become equal. The steady-state of the radiator surface is assumed to occur when the growth of the maximum

temperature na površini radijatora tijekom 5 min zagrijavanja radijatora padne ispod 0,5 °C.

temperature on the radiator surface drops below 0.5 °C during 5 minutes of the radiator warming up.



Numeričkim putem dobivena temperaturna polja radijatora u stacionarnom stanju za različite dubine grijača. Numerically obtained temperature fields of the radiator at steady state for different heaters depth.



Slika 7. Ovisnost vremenskog trenutka postizanja stacionarnog stanja o dubini grijača
Figure 7. Time moment of steady-state achievement in dependence of heaters depth

Funkcijska ovisnost na slici 7., opisana polinomom drugog reda, glasi

The obtained relationship from Figure 7, described as a second-order polynomial, states

$$\delta = 2 \cdot 10^{-7} t^2 + \frac{t}{1000} - 1,658 \cdot \tag{10}$$

Termografskim je mjerenjem ustanovljeno da trenutak postizanja stacionarnog stanja ploče radijatora iznosi $t = 6\,350$ s. Iz izraza (10) slijedi da je dubina grijača 12,757 mm. Proizvođač radijatora postavlja grijače točno u sredinu ploče ($\delta = 12,5$ mm), tako da je odstupanje proračunate dubine grijača od stvarne 2 %.

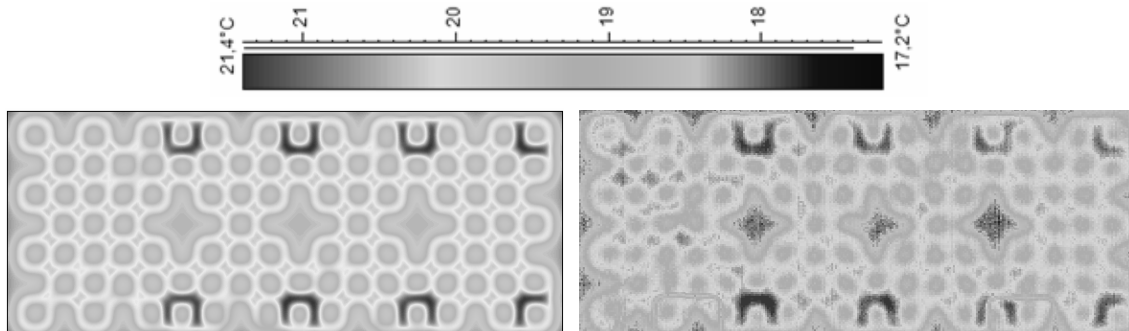
The thermographic measurement has established that the time moment of steady-state achievement is $t = 6\,350$ s. According to expression (10), the heaters depth results in 12.757 mm. The manufacturer embeds the heaters in the midplane ($\delta = 12.5$ mm) which yields an error of 2 % between the calculated and the real depth of the heaters.

7. TEMPERATURNE RASPODJELE – USPOREDBA REZULTATA MJERENJA I POSTUPKA NUMERIČKE SIMULACIJE

7. TEMPERATURE FIELDS – COMPARISON OF RESULTS OF MEASUREMENTS AND NUMERICAL SIMULATIONS

Slika 8. donosi usporedbu termograma i numeričkim putem dobivenih temperaturnih polja radijatora u trenutku $t = 60$ s od uključivanja radijatora.

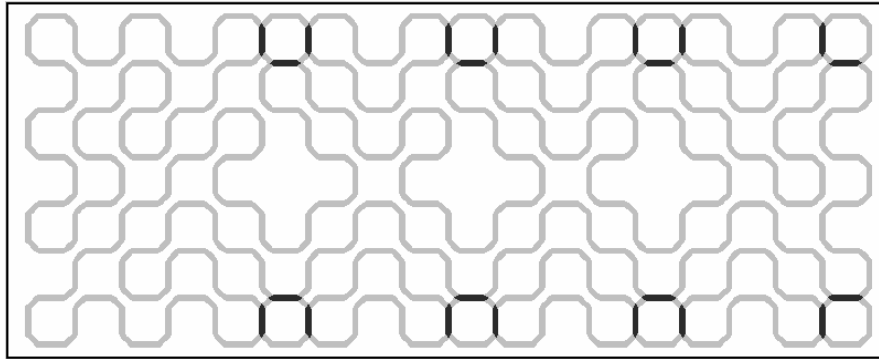
Figure 8. shows a comparison between the thermogram and the numerically obtained temperature fields of the radiator at time $t = 60$ s after starting it.



Slika 8. Numeričkim putem dobivena temperaturna polja (lijevo) i termogram (desno) radijatora za $t = 60$ s
Figure 8. Numerically obtained temperature fields (left) and thermogram (right) of the radiator at $t = 60$ s

Iz slike 8. zaključuje se da su grijači postavljeni dvostrukim prolazom (tamnosiva boja) u gornjem i donjem rubu ploče dok grijača u sredini ploče uopće nema. U ostatku ploče grijači su postavljeni ravnomjerno u sačastom rasporedu (svijetlosiva boja) jednim prolazom, kao na slici 9. Razlog je takvu odabiru rasporeda grijača činjenica da se jačim zagrijavanjem ploče na rubovima u odnosu na sredinu kompenzira nejednoliko odavanje topline, a time i izbjegava moguće pucanje ploče uslijed toplinskih naprezanja.

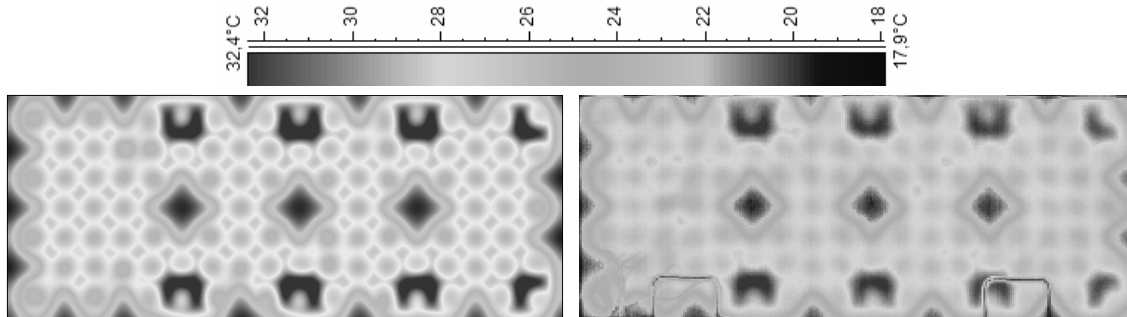
As it can be clearly seen in Figure 8, the heaters are embedded in a double-passage (dark-gray colour) in the upper and lower edge of the radiator, whilst in the central area there are none. In the remaining parts of the radiator, heaters are found to be posted equally in a honeycomb pattern (light-gray colour), Figure 9. Such a choice is influenced by the fact that using stronger heating at the edges with respect to the central area, non-uniform heating of the radiator material is balanced to prevent its possible cracking under thermal stress.



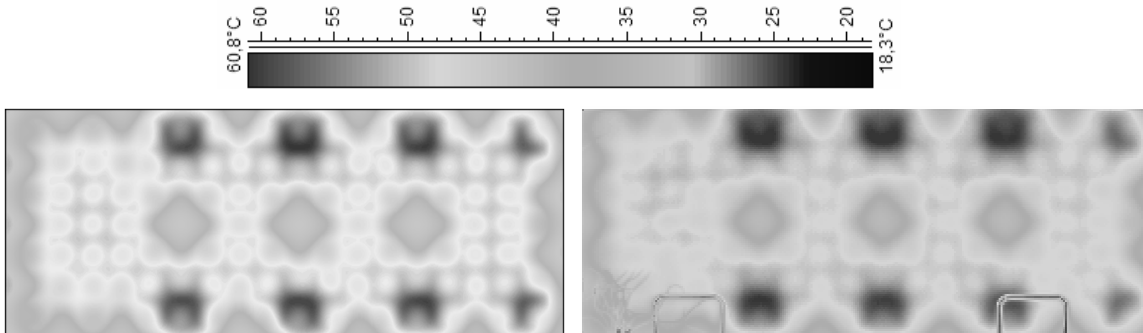
Slika 9. Raspored električnih grijača u ploči radijatora
Figure 9. Electric heaters distribution inside the flat radiator

Numerički dobivena temperaturna polja i termogrami radijatora nakon 5 i 20 minuta od trenutka uključivanja el. grijača prikazani su na slikama 10. i 11.

Thermograms and numerically obtained temperature fields of the radiator at 5 and 20 minutes after starting the el. heaters are given in Figures 10. and 11.



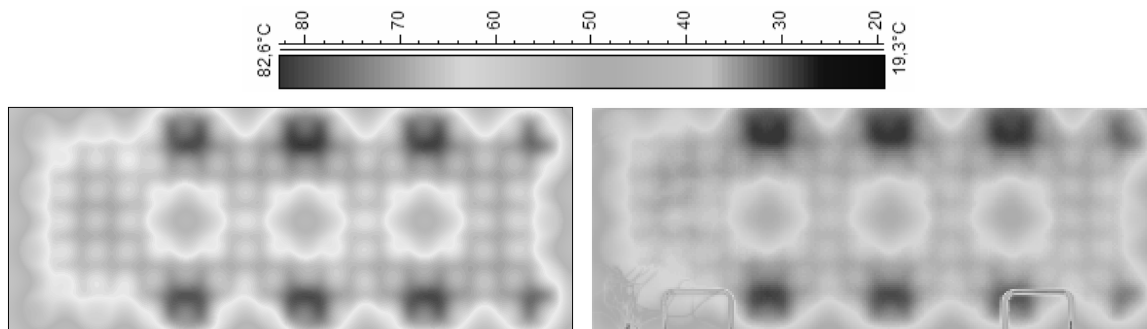
Slika 10. Numerički dobivena temperaturna polja (lijevo) i termogram (desno) radijatora za $t = 300$ s
Figure 10. Numerically obtained temperature fields (left) and thermogram (right) of the radiator at $t = 300$ s



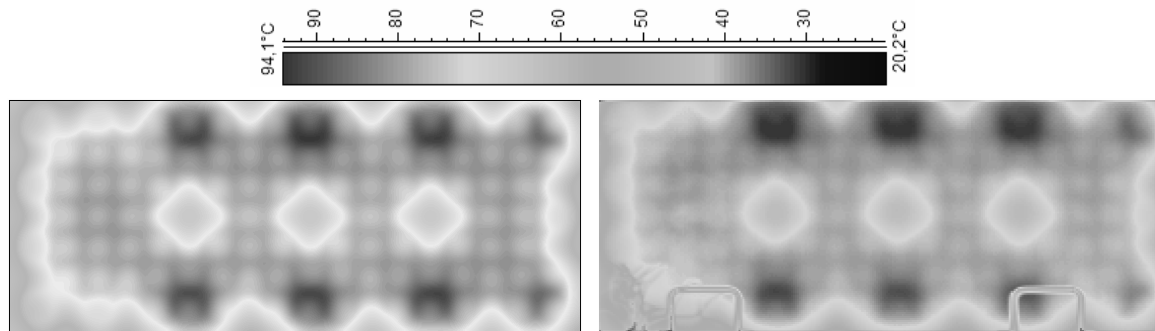
Slika 11. Numerički dobivena temperaturna polja (lijevo) i termogram (desno) radijatora za $t = 1200$ s
Figure 11. Numerically obtained temperature fields (left) and thermogram (right) of the radiator at $t = 1200$ s

Termogrammi i numerički dobivena temperaturna polja radijatora nakon 40, 60 i 106 minuta od trenutka uključivanja el. grijača prikazani su na slikama 12., 13. i 14.

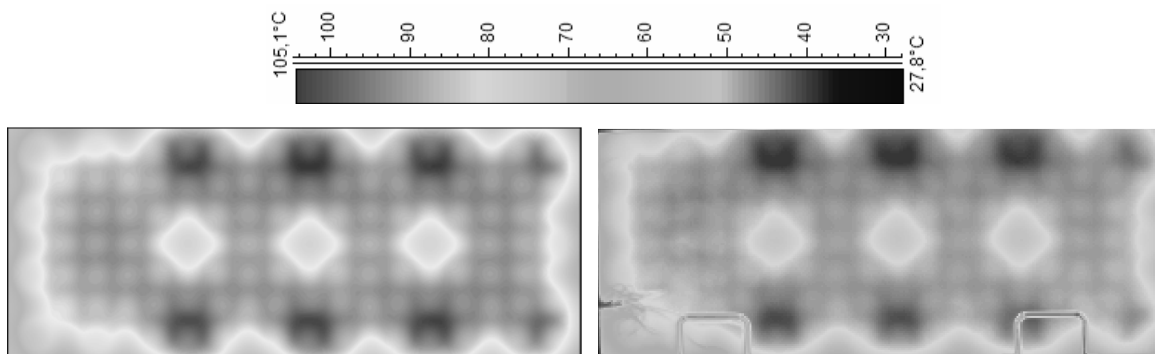
Thermograms and numerically obtained temperature fields of the radiator at 40, 60 and 106 minutes after starting the electric heaters are shown in Figure 12, 13. and 14.



Slika 12. Numerički dobivena temperaturna polja (lijevo) i termogram (desno) radijatora za $t = 2400$ s
Figure 12. Numerically obtained temperature fields (left) and thermogram (right) of the radiator at $t = 2400$ s



Slika 13. Numerički dobivena temperaturna polja (lijevo) i termogram (desno) radijatora za $t = 3600$ s
Figure 13. Numerically obtained temperature fields (left) and thermogram (right) of the radiator at $t = 3600$ s

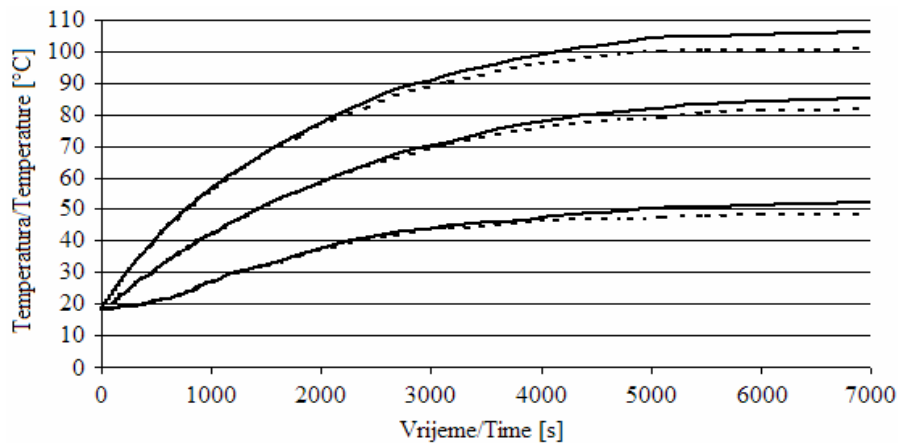


Slika 14. Numerički dobivena temperaturna polja (lijevo) i termogram (desno) radijatora u stacionarnom stanju
Figure 14. Numerically obtained temperature fields (left) and thermogram (right) of the radiator at steady-state

Prethodne slike pokazuju vrlo dobro slaganje termografskih snimaka i numerički dobivenih temperaturnih polja pločastoga električnog radijatora. Minimalna, prosječna i maksimalna temperatura ploče, određene IC kamerom odnosno računalnom simulacijom, u funkciji vremena dane su na slici 15.

Iz rastućih odstupanja prosječnih, minimalnih i maksimalnih temperatura ploče u vremenu zaključuje se da je toplinski učin grijača u računalnoj simulaciji lagano podcijenjen. Spomenuta odstupanja međutim ne premašuju 7 %.

The previous figures show very good agreement between recorded thermograms and numerically obtained temperature fields of the flat electrical radiator. Minimum, average and maximum temperatures, determined by an IR camera and computer simulations respectively, as functions of time, are given in Figure 15. Growing deviations in time of average, minimum and maximum temperatures suggest that the heating output of the heaters is slightly underestimated in the computer analysis; however, those deviations, do not exceed 7 % of error.



Slika 15. Prosječna, minimalna i maksimalna temperatura radijatora, dobivena iz termografskih snimaka (puna linija) i računalnih analiza (isprekidana linija), u funkciji vremena
 Figure 15. Average, minimum and maximum temperature of the radiator, resulting from thermograms (solid line) and from computational analysis (dashed line), as a function of time

8. TOPLINSKI UČIN RADIJATORA

Toplinski učin radijatora određuje se iz Newtonova zakona hlađenja

$$\dot{Q}_{\text{RAD}} = \bar{\alpha} A (\bar{T}_s - T_\infty). \quad (11)$$

Površina radijatora je $A = 0,884 \text{ m}^2$, \bar{T}_s je srednja temperatura prednjeg lica radijatora dobivena iz termograma, $\bar{\alpha}$ je prosječni koeficijent prijelaza topline i sastoji se od udjela konvekcije ($\bar{\alpha}_k$) i zračenja ($\bar{\alpha}_z$) [7]:

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_k + \bar{\alpha}_z \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{\alpha}_k = 0,59 \frac{\lambda}{H} \left(\frac{g H^3 (\bar{T}_s - T_\infty) \nu}{\nu^2 T_\infty} \right)^{0,25} \\ \bar{\alpha}_z = \frac{\varepsilon_1 \sigma [\bar{T}_s^4 - T_{\text{ok}}^4]}{T_1 - T_\infty} \end{array} \right. \quad \left. \begin{array}{l} (13) \\ (14) \end{array} \right. \quad (12)$$

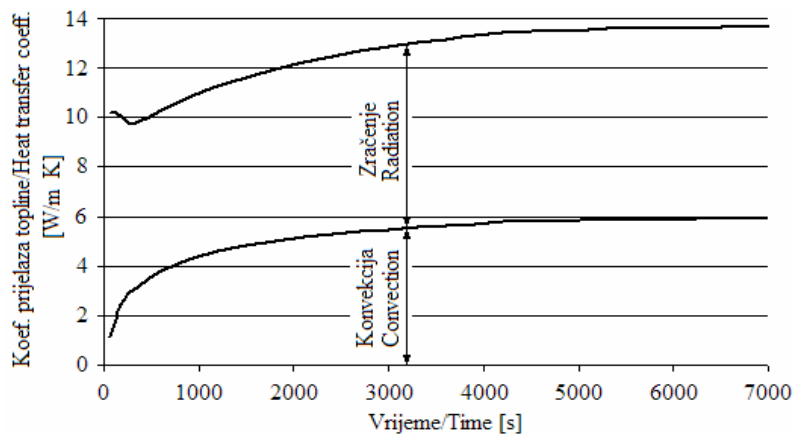
Prosječni koeficijenti prijelaza topline površine radijatora, u funkciji vremena, prikazani su na slici 16.

8. RADIATOR HEATING OUTPUT

The radiator heating output is determined from Newton's law of cooling

The radiator surface is $A = 0,884 \text{ m}^2$, \bar{T}_s is the average temperature of the radiator front face obtained from thermograms, $\bar{\alpha}$ is the average heat transfer coeff. that includes a convective $\bar{\alpha}_k$ and a radiative $\bar{\alpha}_z$ part [7]:

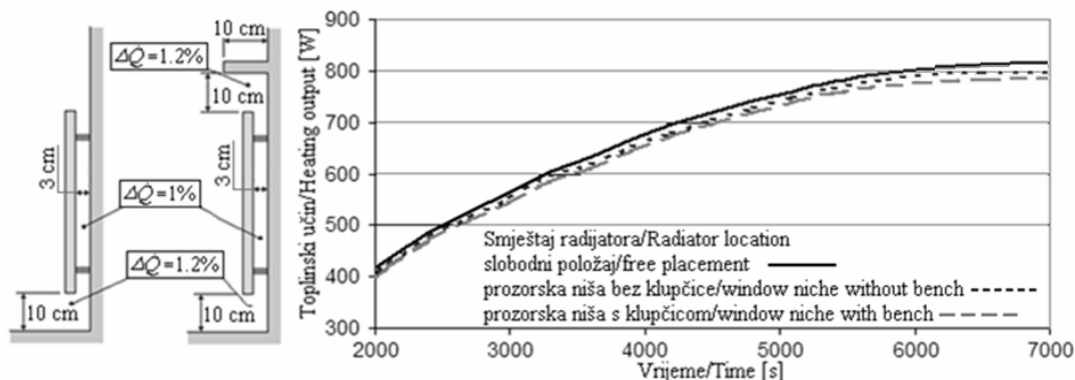
The average heat transfer coefficients on the radiator surface, as a function of time, are shown in Figure 16.



Slika 16. Udio koeficijenata prijelaza topline konvekcijom i zračenjem u ukupnom koeficijentu prijelaza topline
 Figure 16. Share of convective and radiative heat transfer coefficient in the total heat transfer coefficient

U ukupnom odavanju topline radijatora zračenje je zastupljeno s 57 % a konvekcija s 43 %. Dobivene vrijednosti toplinskog učina u slobodnom položaju, prema (11), treba korigirati iskustvenim faktorima iz [8] da bi se dobili učini radijatora pri ugradnji u prozorsku nišu sa prozorskom klupčicom i bez nje. Slika 17. daje prikaz ugradnje radijatora u nišu s korekcijskim faktorima učina te toplinske učine radijatora za dotične slučajeve.

In the overall heating output of the radiator, radiation is represented by 57 % of output and convection by 43 % of output. The heating output for a radiator in free placement, obtained from (11), has to be adjusted with correction factors from [8] to obtain heating outputs for a radiator in a window niche with and without a bench. Figure 17. shows the radiator in a window niche with the correction factors and the heating outputs for the respective cases.



Slika 17. Korekcijski faktori i toplinski učini radijatora u slobodnom položaju i pri ugradnji u prozorsku nišu
Figure 17. Correction factors and heating outputs of the radiator for free and a window-niche-placemen

Smanjenje toplinskog učina nastaje pri postavljanju radijatora u prozorsku nišu. Ako su udaljenosti od stražnjeg zida, poda i prozorske klupčice neadekvatne, smanjenja toplinskog učina mogu biti znatna.

Toplinski učin radijatora u stacionarnom stanju dobiven termografskim mjerenjima iznosi 820 W, što se odlično slaže s deklariranim toplinskim učinkom proizvođača od 800 W. Toplinski učin dobiven numeričkim postupkom iznosi 760 W, a uzrok odstupanja je razlika između srednjih temperatura ploče radijatora u stacionarnom stanju (slika 15.). Deklarirani se toplinski učin dostiže tek u stacionarnom stanju, a do tog trenutka prosječni toplinski učin iznosi svega 530 W. Drugim riječima, sve dok se stacionarno stanje ne postigne, 35 % odane topline grijača zaostaje u radijatoru kao pohranjena toplina.

9. ZAKLJUČAK

Pri rješavanju problematike ispitivanja točne dubine kanala grijača u materijalu ploče vrlo uspješnom pokazala se kombinacija termografske i računalne analize. Pokazano je kako odrediti toplinski učin pločastoga ogrjevnog tijela iz termografskih snimaka. Analizom je utvrđeno da se deklarirani toplinski učin radijatora postiže tek u stacionarnom stanju, a do tada je prosječni toplinski učin znatno manji.

Odlike su IC termografije: unošenje neznatnih poremećaja u mjerni sustav te brzo, sigurno i beskontaktno mjerenje. Nastavi li se trenutačni trend

A reduction in heating output occurs when the radiator is placed in a window niche. Also, if the distances from the rear wall, from the floor or the window niche are too short, reductions in heating output may be significant.

According to thermographic measurements, the heating output in the steady state ends up being 820 W, which is in accordance with the declared heating output of 800 W. The numerically obtained heating output is 760 W and the reason for this discrepancy is found in the differences between the average temperatures for the radiator at steady state (Fig. 15). The declared heating output is not reached until the steady state is achieved and by then the average heating output is 530 W. In other words, until the steady state is achieved, 35 % of the heaters heating output is being stored in the radiator as accumulated heat.

9. CONCLUSION

In the task of seeking the heaters depth inside the radiator material, a combination of thermographic and computer analysis has been proven to be more than sufficient. It has been shown how to determine the heating output of a flat heating body from thermograms. An analysis has been established that the declared heating output of the radiator is reached only when the steady state is achieved and by then the average heating output is quite smaller.

The main features of IR thermography are that as little noise as possible is involved in the measuring system, it has fast, user-safe and remote measurement. If the

pada cijene IC kamera uz usporedan razvoj komponenta IC tehnologije, može se pretpostaviti da će IC kamere nalaziti sve širu primjenu i u praksi i u laboratoriju.

present trend of cost reduction and improvement in IR components continues, IR cameras will have a larger use both in practical applications and in laboratory work.

10. POPIS OZNAKA

faktor apsorpcije zračenja	a ,	-
toplinska difuzivnost	a ,	m^2/s
specifični toplinski kapacitet	c ,	J/kgK
faktor propusnosti zračenja	d ,	-
vlastita emisija	E ,	W/m^2
vlastita emisija crnog tijela	E_c ,	W/m^2
intenzitet zračenja crnog tijela	$E_{c\lambda}$,	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}$
Grashofova značajka	Gr,	-
Prandtlova značajka	Pr,	-
faktor refleksije zračenja	r ,	-
termodinamička temperatura	T ,	K
srednja temperatura stijenke ploče	\overline{T}_s ,	K
temperatura zraka	T_∞ ,	K
vrijeme	t ,	s
toplinski učin radijatora	\dot{Q}_{RAD} ,	W
unutarnji toplinski izvor	\dot{q}_v ,	W/m^3
prosječni koef. prijelaza topline	$\overline{\alpha}$,	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
dubina grijača	δ ,	mm
faktor emisije	ε ,	-
toplinska provodnost	λ ,	W/mK
kinematička žilavost	ν	m^2/s
gustoća	ρ ,	kg/m^3
Stefan-Boltzmannova konst.	$\sigma = 5,667 \cdot 10^{-8}$	$\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$

10. LIST OF SYMBOLS

absorptivity
thermal diffusivity
specific heat
transmissivity
emissive power
blackbody emissive power
spectral blackbody emissive power
Grashof number
Prandtl number
reflectivity
temperature
average wall temperature
air temperature
time
radiator heat output
internal heat generation
average heat transfer coefficient
heaters depth
emissivity
thermal conductivity
kinematic viscosity
density
Stefan-Boltzmann constant

LITERATURA REFERENCES

- [1] *ThermaCAM S65-User's Manual*, FLIR Systems, Publ. No. 1557990 Rev. a155, 2006.
- [2] Blecich, P.: *Primjena Termovizijske Infracrvene Kamere u Termotehnici*, Diplomski rad, Tehnički fakultet, Rijeka, 2008.
- [3] Bošnjaković, F.: *Nauka o Toplini*, II. dio, IV. izdanje, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [4] Webster, J. G., (ed.): *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press, IEEE Press, 1999.
- [5] Patankar, S. V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taylor & Francis, New York, 1980.
- [6] Boras, I.: *Prilog Određivanju Greške u Materijalu Primjenom Termografske i Numeričke Metode*, Doktorska disertacija, Fakultet Strojstva i Brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [7] Bejan, A., Kraus, A. D.: *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2003.
- [8] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.-R.: *Grejanje i klimatizacija 05/06*, Interklima, Vrnjačka Banja, 2004.

Primljeno / Received: 15.1.2009.

Prihvaćeno / Accepted: 7.5.2009.

Prethodno priopćenje

Preliminary note

Adresa autora/Authors' address:
Paolo Blecich, dipl. ing.

Doc. dr. sc. Kristian Lenić, dipl. ing.

Red. prof. dr. sc. Bernard Franković, dipl. ing.

Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

Vukovarska 58, 51000 Rijeka, Hrvatska

paolo.blecich@riteh.hr; kristian.lenic@riteh.hr; bernard.frankovic@riteh.hr