

Využití termovize v praxi



Ústav techniky prostředí

Thermovision Utilization in Praxis

Recenzent
Ing. Vladimír Poledna

Článek popisuje okrajové podmínky měření termovizní technikou. Autor na ukázkách z praktických měření přibližuje možnosti a metodiky stanovení okrajových podmínek měření a jejich vliv na snímaný termografický záznam.

Klíčová slova: termovize, sdílení tepla, měření

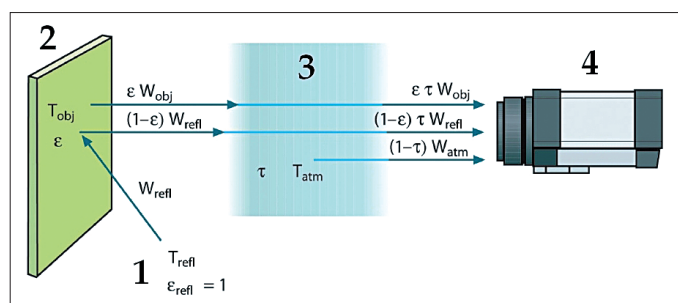
The article describes border conditions of measurements by thermovision technique. The author brings near possibilities and methodology of border measurement conditions determination and their impact on scanned thermographical record on examples from measurements in praxis..

Keywords: thermovision, heat exchange, measurement

Bezkontaktní snímání teplot je v poslední době velmi populární metodikou měření povrchových teplot. Využití nachází jak ve strojírenství a stavitelství, tak i v dalších technických oborech. Zásadním nedostatkem bezkontaktního měření je výrazná závislost na okrajových podmínkách měření. Článek přibližuje jednotlivé veličiny ovlivňující výsledek měření a popisuje zásady bezdotykového měření teplot.

Termografie obecně využívá vlnové pásmo infračerveného (IR) záření. Hranice, kde začíná pásmo krátkého IČ záření je tam, kde končí tzv. viditelné pásmo (tmavě červená). Hranice, kde končí pásmo dlouhovlnného IČ záření je tam, kde začíná pásmo „mikrovlnných“ vlnových délek. Číselně lze toto pásmo vyjádřit v rozmezí vlnových délek $\lambda = 0,75 \mu\text{m}$ až 1 mm , což v praxi zahrnuje měření teplot v rozsahu od -40°C do $+10\,000^\circ\text{C}$. IR záření je někdy považováno za „tepelné záření“. Nicméně povrchy těles zahřívá absorpce libovolného elektromagnetického záření a například objekty při pokojové teplotě nejvíce emitují záření v infračerveném pásmu od 8 do $12 \mu\text{m}$. Teorie záření je založena na celé řadě fyzikálních zákonů (Planckův, Stefan-Boltzmannův, Wienův, Kirchhoffovi zákony atd.) a jejich odvození lze nalézt v celé řadě odborných publikací. Pro termografii je ovšem jejich aplikace úzce spjata s teorií černého tělesa a obecných (nečerných) těles [1].

Zjednodušené schéma bezkontaktního snímání teplot je znázorněno na obr. 1 [2].



Obr. 1 Schematické znázornění obecné termografické měřicí situace
1 – okolí, 2 – měřený objekt, 3 – atmosféra, 4 – kamera

Při měření je nutné si uvědomit, že detektor snímá záření nejen z měřeného objektu, ale také záření z okolního prostředí a záření odražené z povrchu objektu. Navíc obě tato záření jsou zeslabovány atmosférou mezi detektorem a měřeným objektem. Samozřejmě se jedná o velmi zjednodušené schéma, protože ve skutečnosti mohou do podmínek měření vstupovat ještě další vlivy. Jedná se zejména o sluneční světlo, nebo odražené záření ze zdrojů intenzivního záření mimo zorné pole kamery. Ve většině případů mají tyto vlivy minimální dopad na výsledek měření, avšak například při měření v průmyslových halách s instalovanými světly či tmavými zářícími jíz zanedbatelné nejsou.

Pokud bychom na základě obr. 1, chtěli sestavit zjednodušenou rovnici přijatého záření na detektor přístroje, můžeme psát

$$W_c = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{obj} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{refl} + (1 - \tau) \cdot W_{atm} \quad (1)$$

Za předpokladu platnosti lineární závislosti mezi vyzařovaným výkonem zdroje a výstupním signálem (napětím) kamery,

$$U_{zdroje} = C \cdot W(T_{zdroje}) \quad (2)$$

kde C je konstanta. Pak po dosazení do rovnice (1) můžeme vypočítané výstupní napětí kamery pro teplotu měřeného objektu vyjádřit jako [2]

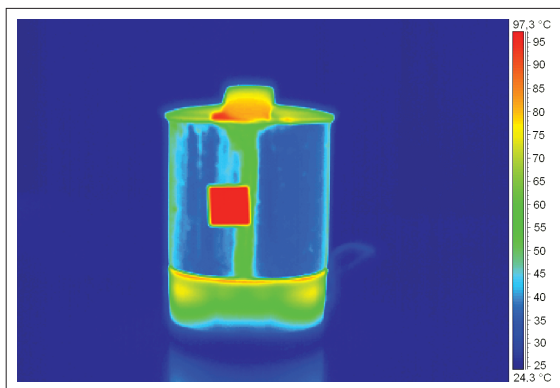
$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_c - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \cdot U_{refl} - \frac{1 - \tau}{\varepsilon \cdot \tau} \cdot U_{atm} \quad (3)$$

Jak vyplývá z rovnice (3), musíme pro výpočet skutečné teploty zdroje definovat několik okrajových podmínek měření. Nejdůležitější podmínkou je správné definování emisivity měřeného objektu ε . Dále pak teplota prostředí resp. teplota vzduchu T_{atm} , teplota okolí objektu, tj. „odrážená“ okolní teplota T_{refl} a prostupnost atmosféry τ (obvykle definována relativní vlhkostí a vzdáleností objektu od kamery).

Nejprve se budu zabývat emisivitou měřeného povrchu. Pro emisivitu různých materiálů můžeme v odborné literatuře nalézt spoustu tabulek s rozdílnými hodnotami. Například pro ocel lze nalézt hodnoty emisivity od $0,06$ do $0,8$ [2]. Takto velký rozptyl hodnot je způsobem povrchovou úpravou daného materiálu. Pokud bude povrch broušen, a tím i vysoce lesklý, bude emisivita nízká, oproti tomu pokud se bude jednat o surový odlitek, bude emisivita vyšší. Proto je nutné věnovat stanovení správné emisivity povrchu velkou pozornost.

Obecně platí, že pro měření povrchových teplot je nejvhodnější použít odporové dotykové teploměry a to z důvodů jejich velké teplotní citlivosti, malých rozměrů a jednoduchosti převodu odporu na elektrické napětí nebo proud. Nejpříznivější výsledky měření povrchových teplot odporovými teploměry lze dosáhnout tehdy, je-li možno část čidla (nejlépe těsně za spojem) umístit v drážce, jejíž teplota je stejná jako teplota v měřeném místě [3]. Tento předpoklad souvisí s odváděním tepla z měřicího místa povrchem drátku (čidla) v místě dotyku a tím částečným zkrácením celého výsledku měření. Bohužel tento způsob stanovení povrchové teploty a následně emisivity není pro praktické využití příliš vhodný (nutná mechanická úprava měřeného povrchu, dodatečná a náročná instalace dalšího měřicího zařízení, atd.).

Jednou z dalších metod jak poměrně přesně a rychle stanovit emisivitu snímaného povrchu je použití dodatečného materiálu o známé emisivitě. Jedná se většinou o speciální samolepku se známou emisivitou cca $0,95$. Po nale-



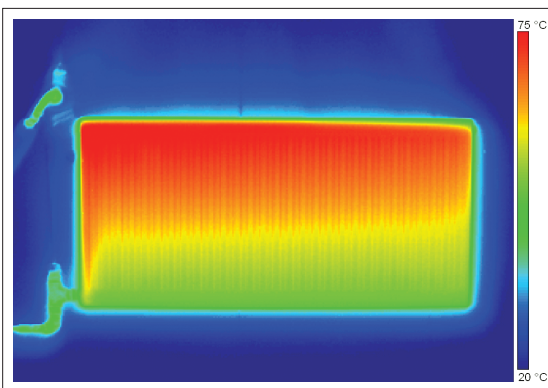
Obr. 2 Ukázka využití speciální samolepky při měření povrchové teploty vysoce lesklého povrchu rychlovarné konvice při dosažení varu vody ($t_{obj} = 97,3\text{ °C}$)

pení se změní teplota povrchu se samolepkou a poté se nastaví emisivita měřeného povrchu tak, aby snímaná teplota termovizí odpovídala teplotě samolepky. Nastavenou emisivitu lze poté použít na všech měřených objektech z tohoto materiálu. Postup můžeme aplikovat také, pokud máme možnost natřít část povrchu tělesa matnou černou barvou apod.

Na obr. 2 můžeme vidět praktické využití speciální samolepky u jednoduché pochromované rychlovarné konvice. Pro emisivitu samolepky 0,95 je indikována povrchová teplota konvice při varu vody 97,3 °C. Samozřejmě nyní bychom mohli nastavovat emisivitu tak, aby výsledný termogram vykazoval teplotu 97,3 °C na celém měřeném povrchu konvice, to by bylo ale v tomto konkrétním případě velkou chybou a to hned ze dvou důvodů.

První problém souvisí s tzv. Lambertovým směrovým (kosinovým) zákonem [1]. Jak můžeme vidět na obr. 2 je uprostřed znázorněn výrazný světle zelený pruh o zdánlivě vyšší teplotě než světle modrý zbytek materiálu konvice. Světle zelený pruh uprostřed konvice o výrazně vyšší teplotě je způsoben tím, že podle Lambertova zákona leží maximum vyzařování jakéhokoli předmětu vždy ve směru normály k povrchu, a proto i v tomto směru je snímaná teplota termogramu konvice nejvyšší. Výrazný vliv na výsledném zobrazení termogramu má tedy vlastní geometrie zobrazeného předmětu, v tomto případě zakřivení válcové plochy konvice. Druhou chybou je, že u takto vysoce lesklých povrchů s emisivitou cca 0,1 má výrazný vliv také odrazivost respektive vysoký lesk předmětu. Světle modrá barva zobrazuje kombinaci zdánlivé povrchové teploty konvice a „teploty stolu“, na kterém je konvice umístěna. Jak bylo uvedeno výše, je nutné si uvědomit, že detektor zároveň snímá záření odražené z okolního prostředí. V podstatě se dá říci, že takto lesklé povrchy se vůči termovizní kaměře chovají jako zrcadla.

Další okrajovou podmínkou je teplota vnějšího prostředí. Teplota okolí ovlivňuje velikost detekovaného infra signálu a zároveň i jeho kolísání. Vnější zdroje infračerveného záření ovlivňují v závislosti na povrchových vlastnostech objektu (součinitel absorpce a reflexe) buď jeho skutečnou povrchovou teplotu (součinitel absorpce), nebo jeho zdánlivou povrchovou teplotu (součinitel reflexe). Zářivý tok dopadá na detektor, kde se jeho část pohltí a část se odráží. Současně ale vychází opačným směrem



Obr. 3 Teplotní pole u deskového otopného tělesa 10–500 x 1000 napojeného jednostranně shora-dolů, při jmenovitém hmotnostním průtoku a teplotním spádu 75/65 °C, teplotě okolí 20,5 °C a $\varepsilon = 0,95$

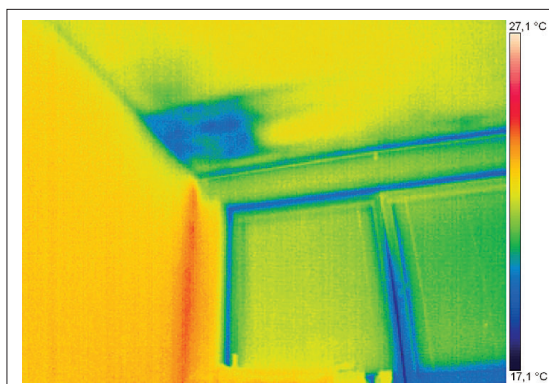
zářivý tok z detektoru, který dopadá na měřený objekt a opět se částečně pohltí a částečně odráží. Rovnice popisující tento jev je možné nalézt v [4]. Pokud bychom např. uvažovali deskové otopné těleso umístěné v uzavřené místnosti (obr. 3), můžeme za teplotu okolí objektu, tj. „zdánlivě se odrážející“ teplotu dosadit střední radiční teplotu a dále použít teplotu vzduchu míst-

nosti. Desková otopná tělesa ve standardní bílé barvě RAL 9010 mají emisivitu povrchu od 0,92 do 0,95. Emisivita detektoru termovizní kamery ThermoCAM S65 je 0,92. Výsledný termogram, pro podmínky měření otopných těles $t_{atm} \approx 20\text{ °C}$ a $t_{st} = 70\text{ °C}$, zobrazený detektorem tak bude zkreslen o cca $2 \times 10^{-4}\text{ °C}$. Což je s ohledem k pásmu teplot měření zanedbatelná nejistota měření. Jinak by tomu, ale bylo u výrazných zdrojů signálu, např. u světlých plynových zářičů (obr. 7).

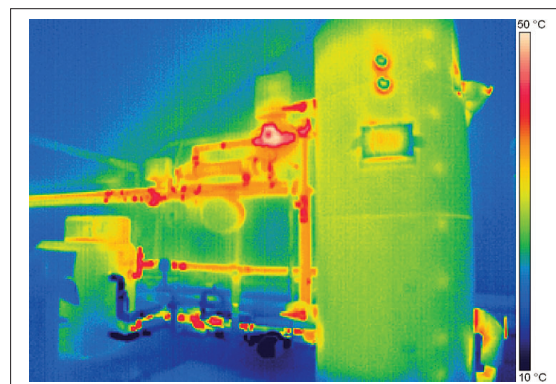
Poslední okrajovou podmínkou, o které bych se rád zmínil, je prostupnost atmosféry. Transparentnost prostředí je významná zejména při dálkovém snímání zobrazovaného objektu (např. snímání povrchové teploty fasády před a po zateplení objektu, apod.). Zeslabení zářivého toku při průchodu atmosférou může být způsobeno jednak přímou absorpcí a jednak rozptylem infračerveného záření na molekulách plynu, aerosolech, kapkách vody, částicích kouře atd. Na snižování transparentnosti atmosféry se nejvíce podílí molekuly H_2O , CO_2 , O_3 , CH_4 a CO , které vymezují ve spektrální závislosti součinitele propustnosti. Proto se většina dnes používaných systémů omezuje při zadávání prostupnosti atmosféry na definování relativní vlhkosti vzduchu a vzdálenosti kamery od snímaného objektu. V případech měření v prostorech s výrazně zhoršenou prostupností atmosféry (prašné technologie, vysoká vlhkost vzduchu, atd.) je možné zadávat hodnotu transparency atmosféry přímo do termovizní kamery, nebo vyhodnocovacího softwaru.

PŘÍKLADY VYUŽITÍ TERMIVIZE V TECHNICE PROSTŘEDÍ

Na obr. 4 je vidět termogram vnitřní obytné místnosti s jedním oknem a obvodovou venkovní zdí. Jak je vidět v horní části obrázku je zřetelně znázorněna chybějící tepelná izolace stropu. Podle indikované povrchové teploty 17,1 °C je možné předpokládat problematické chování stavební konstrukce s ohledem na vznik plísní. Dalším problematickým místem mohou



Obr. 4 Ukázka zobrazení termogramu s chybějící tepelnou izolací stropní konstrukce



Obr. 5 Termogram kotelný tepelného čerpadla země – voda a akumulční nádob

být tepelné mosty okolo rámu okna a dále tepelný most v místě napojení stropu a obvodové stěny. Oproti tomu podle červené svislé čáry v levé části obr. 4 můžeme usuzovat na polohu rozvodů otopné soustavy.

Termogram může sloužit také jako ověření správnosti provozu různých zařízení. Obr. 5 ukazuje kotelnou tepelného čerpadla země – voda a akumulční nádoby. Na obr. 5 je jasně zřetelný primární a sekundární okruh tepelného čerpadla. Termogram ukazuje provozní stav TČ, správnost proudění teplotních látek a v neposlední řadě poukazuje na tepelnou izolaci potrubí a akumulční nádoby.

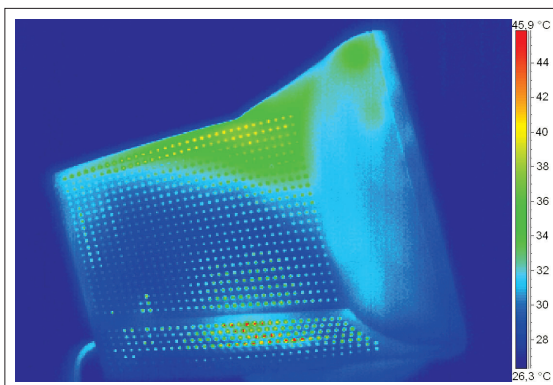
Využití může termovize

nalézt také při vytváření matematických modelů. Obr. 6a+b znázorňuje termogramy CRT monitoru. Na základě snímků termovizní kamery a rozměrů snímání monitoru, byl sestaven matematický model, který může být využíván při simulaci tepelné zátěže vnitřních prostor.

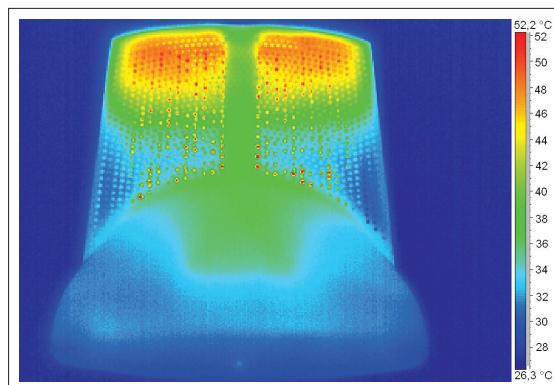
Neposledním příkladem využití termovize je při posuzování vytápění světelných plynových zářičů (obr. 7a+b). Snímání velmi vysokých teplot, v tomto případě kolem 900 až 950 °C, sebou nese rizika, které byly již v článku vysvětleny. Problémem však zůstává stanovení emisivity sklokeramické destičky při takto vysoké teplotě a vysoké poréznosti desky. Dále zůstává otázkou, jak ovlivňuje hořící směs plynu výsledný zářivý tok, který je kamerou indikován. Řešení sdílení tepla zářením mezi vrstvou plynu a ohraňovanou stěnou zářiče (obr. 7a) je závislé na celkové spektrální emisivitě a pohltivosti směsi plynu. K řešení této problematiky bych se proto rád vrátil v budoucnu v samostatném článku. Nicméně z uvedeného termogramu na obr. 7b je zřetelně vidět jak dochází na reflexních zákrytech s velmi vysokým leskem (tj. nízkou emisivitou) k odrazu sklokeramické destičky o výrazně vyšší teplotě, což do jisté míry zkresluje výsledek měření.

ZÁVĚR

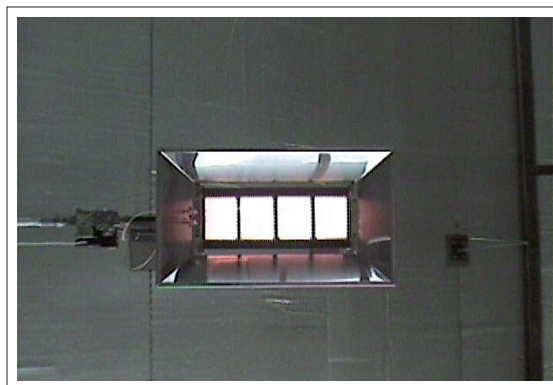
Z uvedeného vyplývá, že jak měření nízkých teplot objektu tak i měření velmi vysokých teplot sebou nese celou řadu nejistot. U měření teplot od 10 do 40 °C je vliv dalšího zdroje (umělé osvětlení, sluneční světlo, podlahové nebo stěnové vytápění, atd.) relativně silný a výsledek měření proto může být značně zkreslen. Pokud má navíc měřený objekt nízkou emisivitu je měřicí situace ještě více obtížná v důsledku vysokého lesku předmětu. Naopak měříme-li vysoké teploty cca od 350 °C výše, je důležité přesně stanovit teplotu vnějšího okolí s ohledem na výraznější ovlivnění okolního prostředí (stěn, podlahy, stropu, atd.). Nezanedbatelný problém je také emisivita, která není v celém spektru konstantní, ale je závislá na vlnové délce vyzařování, resp. teplotě snímání objektu. Jak bylo ukázáno ob-



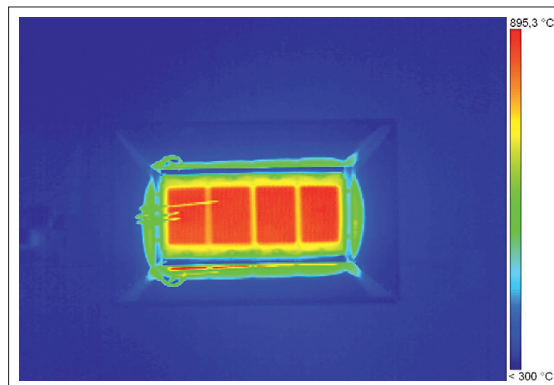
Obr. 6a Termogram CRT monitoru
a) boční pohled



Obr. 6b Termogram CRT monitoru
b) horní pohled



Obr. 7a Využití termovize při posuzování světelných plynových zářičů
a) fotografie snímání zářiče



Obr. 7b Využití termovize při posuzování světelných plynových zářičů
b) termogram

last využitelnosti termovizní techniky je velmi široká, od defektoskopie povrchů až po měření velmi vysokých teplot např. povrchových teplot světelných plynových zářičů. Avšak jako každá technologie i termovize vyžaduje pro správné využití osvojení základních fyzikálních principů.

Kontakt na autora: roman.varicka@fs.cvut.cz

Tento příspěvek byl podpořen výzkumným záměrem MSM 6840770011.

Seznam použitého značení:

- C – konstanta [-]
- T – teplota [K]
- U – napětí [V]
- W – vyzářená energie [W/m²]
- ε – emisivita [-]
- τ – transmise [-]

Indexy:

- atm – prostředí
- c – celkové
- obj – objektu
- refl – okolí
- st – střední

Použité zdroje:

- [1] Vavříčka, R.: Termovizní zobrazovací systémy. In: *Vytápění, větrání, instalace*, 2004, roč. 13, č. 3, s. 120-124. ISSN 1210-1389.
- [2] FLIR Systems: Firemní literatura, www.flirthermography.com
- [3] Chyský, J.: Měření teplot termoelektrickými články. *Zdravotní technika a vzduchotechnika*, 1960, č. 4, s. 158-170.
- [4] Kreidl, M.: Měření teploty. Technická literatura BEN, 2005, 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [5] Vavříčka, R.: Proudové a teplotní pole u deskových otopných těles. Disertační práce, 150 s., ČVUT-FS-Ú 12 116, Praha, 2007.