

Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 1)

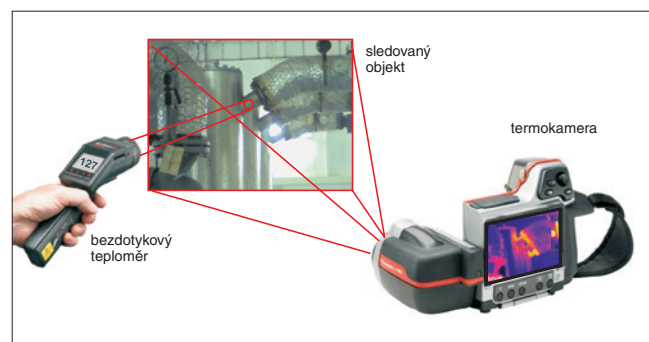
Ke správnému pochopení funkce a bezchybnému používání přístrojové techniky při bezdotykovém měření teploty je nezbytná znalost teoretických základů používaných měřících metod. V článku jsou popsány děje při vyzařování tepelného záření a uvedeny základní fyzikální zákony a z nich odvozené vztahy, na jejichž základě pracují bezdotykové teploměry a termokamery.

Při bezdotykovém měření se teplota vyhodnocuje z intenzity infračerveného záření vyzařovaného měřeným objektem. Toto záření je optickým systémem soustředěno na vhodný detektor, jehož elektrický signál je dále zpracován v elektronických obvodech. K bezdotykovému měření teploty se používají jednak bezdotykové teploměry (IČ teploměry, pyrometry), které měří tep-

je termogram na displeji, popř. v paměti termokamery (obr. 1).

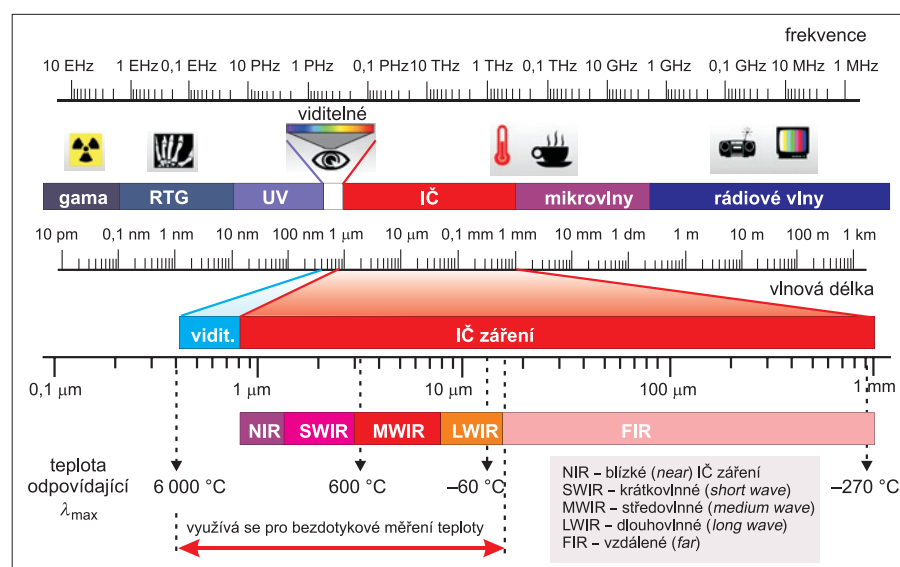
Elektromagnetické záření využívané k bezdotykovému měření teploty

Všechny objekty, jejichž teplota je vyšší než absolutní nula, vyzařují elektromagnetické záření v určité části spektra. Příčinou je termický pohyb atomárních a subatomárních částic. Elektromagnetické záření vznikající v důsledku tepelného pohybu částic je někdy označováno jako *tepelné záření*. Na obr. 2 je uvedeno rozdělení spektra elektromagnetického záření s vyznačením oblastí využívané při bezdotykovém měření teploty. Jde o záření vlnových délek 0,4 až 15 μm , které spadá částečně do viditelné oblasti a z větší části do infračervené oblasti spektra. K detekci infračerveného záření o vlnových délkách větších než 15 μm nejsou v současné době k dispozici detektory vhodné pro běžné, komerčně dostupné bezdotykové teploměry.



Obr. 1. Bezdotykové měření teploty

lotu v určité úzce vymezené oblasti povrchu sledovaného objektu a obvykle poskytují číselný údaj teploty na displeji, a jednak termokamery (IČ termokamery, IČT kamery), které snímají rozložení teploty na větší části (celém) povrchu objektu a jejichž výstupem



Obr. 2. Záření využívané při bezdotykovém měření teploty

Teoretický popis dějů při vyzařování

Všechna tělesa vyzařují (emitují) elektromagnetické záření, přičemž maximum intenzity emitovaného záření závisí na teplotě tělesa a nachází se na různých vlnových délkách (leží v odlišné části spektra).

Černé těleso

Idealizovaným objektem, který se používá při teoretickém popisu dějů probíhajících při vyzařování, je *černé těleso*. Jde o teoretický objekt, který při dané teplotě vyzaří největší možné množství energie a naopak pohltí veškerou energii, která na něj dopadá (veličiny, které se týkají černého tělesa, jsou v dalším textu označeny indexem „0“).

Intenzita vyzařování M ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) je dána podílem zářivého toku Φ (W) a plochy povrchu S (m^2) zdroje záření

$$M = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1)$$

Vysílané tepelné záření je složeno z různých vlnových délek, intenzita vyzařování má integrální charakter a skládá se z příspěvků při jednotlivých vlnových délkách podle vztahu

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda \quad (2)$$

kde

M_{λ} je spektrální hustota intenzity vyzařování¹⁾ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$),

λ vlnová délka (m).

Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a na teplotě pro černé těleso $M_{0\lambda}$ je dána *Planckovým zákonem vyzařování*

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp \frac{hc}{k\lambda T} - 1 \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)} \quad (3)$$

kde

h je Planckova konstanta

($h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ J·s),

k Boltzmannova konstanta

($k = 1,380 \cdot 10^{-23}$ J·K⁻¹),

1) Spektrální hustota intenzity vyzařování vyjadřuje intenzitu vyzařovanou v jednotkovém intervalu vlnových délek (podíl intenzity vyzařování v malém intervalu vlnových délek a tohoto intervalu).

Základní zákony pro vyzařování

Planckův vyzařovací zákon:

- vychází z kvantové teorie záření; exaktně popisuje spektrální hustotu intenzity vyzařování černého tělesa jako funkci vlnové délky a teploty,
- z tohoto obecného zákona jsou odvozeny další zákony, s nimiž se v praxi snáze počítá.

Wienův posunovací zákon:

- konstatuje, že s rostoucí teplotou se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá směrem ke menším vlnovým délkám: $\lambda_{\max} (\mu\text{m}) = 2898 / T$.

Stefanův-Boltzmannův zákon:

- vyjadřuje celkovou intenzitu vyzařování tělesa na všech vlnových délkách jako funkci absolutní teploty: $M = \epsilon\sigma T^4$.

Kirchhoffovy zákony:

- ve stavu tepelné rovnováhy je emisivita rovna pohltivosti: $\epsilon = \alpha$,
- pohltivost (nebo emisivita) + odrazivost + propustnost = 1: α (nebo ϵ) + ρ + $\tau = 1$.

c rychlost světla ve vakuu
($c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),

C_1 první a druhá vyzařovací konstanta
($C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$),

C_2 druhá vyzařovací konstanta
($C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ K}\cdot\text{m}$),

T termodynamická teplota (K).

Závislost $M_{0\lambda}$ na vlnové délce pro různé teploty černého tělesa je graficky znázorněna na obr. 3. Se snižující se teplotou intenzita vyzařování výrazně klesá.

Derivací vztahu podle Planckova zákona (3) podle λ lze stanovit maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování pro danou teplotu. Toto maximum se posouvá se vzrůstající teplotou ke kratším vlnovým délkám podle Wienova zákona posuvu

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (4)$$

kde λ_{\max} (μm) je vlnová délka odpovídající maximum závislosti $M_{0\lambda} = f(\lambda)$.

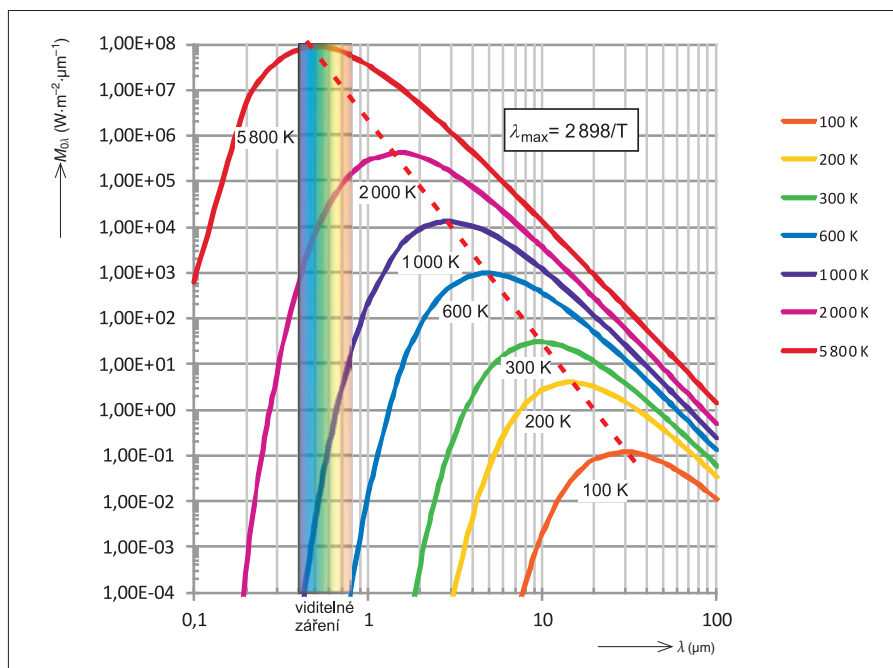
Poloha maxima je vyznačena čárkovaně v obr. 3 a graf vypočítaných teplot t ($^{\circ}\text{C}$) odpovídajících maximum pro λ od 2,5 do 20 μm je na obr. 4.

Integrací vztahu podle Planckova zákona (3) přes všechny vlnové délky se dostane Stefanův-Boltzmannův zákon, podle kterého je intenzita vyzařování černého tělesa M_0 úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty

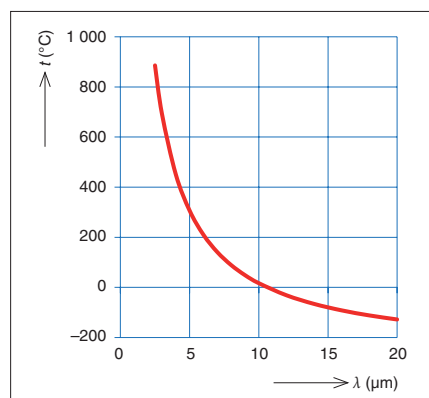
$$M_0 = \sigma T^4 \quad (5)$$

kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$

Intenzita vyzařování M_0 je graficky vyjádřena plochou pod křivkou vytvořenou podle



Obr. 3. Vyzařování černého tělesa podle Planckova zákona



Obr. 4. Teplota odpovídající λ_{\max} podle Wienova zákona

Planckova zákona pro danou teplotu na obr. 3 nebo ji lze vypočítat podle (5) – viz obr. 5.

Skutečná tělesa, šedá tělesa

Skutečné těleso vyzařuje (i pohlcuje) méně než černé těleso. Jeho spektrální hustota

tota intenzity vyzařování M_λ je dána vztahem

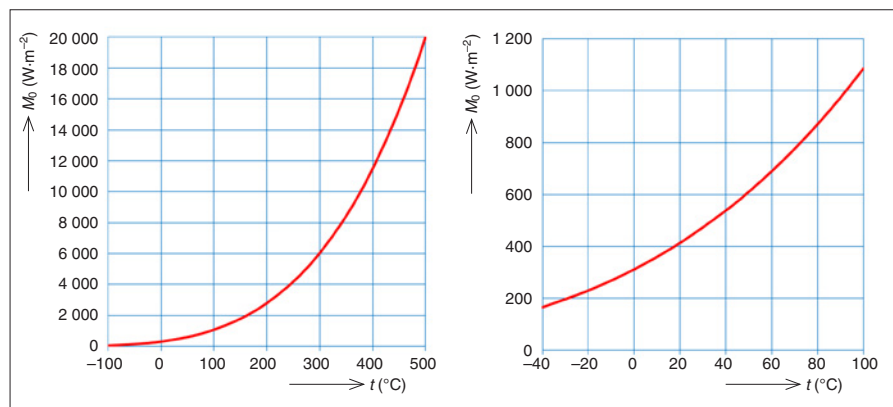
$$M_\lambda = \epsilon_\lambda M_{0\lambda} \quad (6)$$

kde

ϵ_λ je spektrální emisivita pro vlnovou délku λ , $\epsilon_\lambda < 1$ (index „ λ “ značí spektrální veličiny).

Jak je patrné ze vztahu (6), je spektrální emisivita definována jako poměr $M_\lambda/M_{0\lambda}$ při dané vlnové délce a teplotě. Spektrální emisivita černého tělesa má hodnotu 1,0.

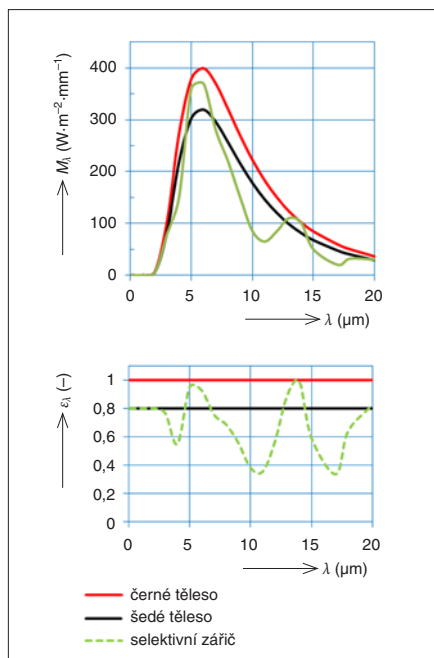
Spektrální emisivita závisí obecně na vlnové délce a na teplotě, tj. $\epsilon_\lambda = f(\lambda, T)$ a dále na materiálu, kvalitě povrchu a úhlu pozorování objektu. Tělesa, která mají pro různou vlnovou délku různou spektrální emisivitu ϵ_λ , vykazují také různé velké odchylky od záření černého tělesa; jsou to tzv. *selektivní (spektrální) zářiče*. Existují však tělesa, jejichž emisivitu je možné považovat za konstantní v dosti značném rozsahu vlnových délek. Takové zářiče jsou označovány jako *šedá tělesa* s emisivitou $\epsilon < 1$ (obr. 6) a tato těle-



Obr. 5. Intenzita vyzařování černého tělesa

sa jsou z hlediska efektivity bezdotykového měření nejhodnější.

Informativní hodnoty emisivity ϵ pro vybrané povrchy jsou uvedeny v tab. 1. Podrobné tabulky emisivity pro různé materiály, vlnové délky a teploty lze nalézt např. v [1] až



Obr. 6. Vyzařování a emisivita tří základních druhů zářičů

[4], popř. na webu. Správná tabulka by vždy měla obsahovat také údaj o teplotě a vlnové délce. Emisivita je velmi důležitým faktorem IČ termografie a její vliv je nutné vždy respektovat.

Pro vyzařování šedého tělesa platí Stefanův-Boltzmannův zákon ve tvaru

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad (7)$$

kde ϵ je emisivita šedého tělesa.

Pro zářivý tok emitovaný tělesem plochy S se dostane

$$\Phi = S \epsilon \sigma T^4 \quad (8)$$

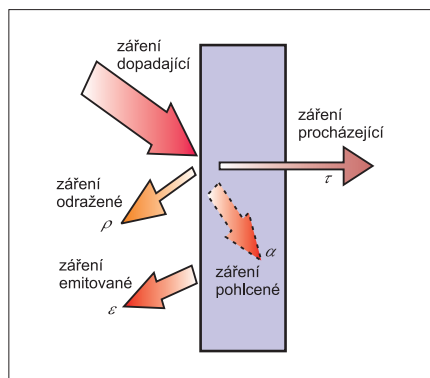
Znamená to tedy, že při stejných teplotách šedého a černého tělesa je výsledná energie vyzařovaná šedým zářičem v porovnání s energií vyzařovanou černým tělesem menší úměrně k hodnotě emisivity šedého tělesa.

Je-li objekt ve stavu tepelné rovnováhy, neohřívá se ani neochlazuje. Energie vyzařovaná musí být rovna energii pohlcované, takže emisivita ϵ se rovná pohltivosti α a podle Kirchhoffova zákona platí pro spektrální veličiny

$$\epsilon_\lambda(\lambda, T) = \alpha_\lambda(\lambda, T) \quad (9)$$

Černé těleso maximálně vyzařuje i maximálně pohlcuje záření. Emisivita a pohltivost jsou u černého tělesa shodné ($\alpha = \epsilon = 1$). Je-li

teplota povrchu tělesa vyšší než teplota okolí, převažuje vyzařování energie nad jejím pohlcováním a obráceně. Intenzita vyzařování černého tělesa M_0 závisí jen na jeho termodynamické teplotě T . U šedého tělesa jsou emisivita i pohltivost vždy menší než 1.



Obr. 7. Interakce záření s objektem

Existují tři jevy, které se projevují u reálných objektů (obr. 7):

- část dopadajícího záření může být pohlcena (ve stavu rovnováhy se rovná vyzařování),
- část záření může být odrazena,
- část záření může tělesem prostoupit.

Vedle pohltivosti α (α_λ) a emisivity ϵ (ϵ_λ) jsou definovány také odrazivost ρ (ρ_λ) jako míra schopnosti odrazet záření a propustnost τ (τ_λ) jako míra schopnosti propustit záření. Všechny tyto veličiny jsou obecně závislé na vlnové délce, a jde tedy o spektrální veličiny.

Shrňme definice uvedených veličin, které jsou pro bezdotykové měření teploty velmi důležité:

- *emisivita* ϵ je poměr zářivého toku objektu a černého tělesa,
- *pohltivost (absorbance)* α je poměr pohlceného zářivého toku k dopadajícímu,
- *odrazivost (reflektance)* ρ je poměr odraženého zářivého toku k dopadajícímu,
- *propustnost (transmitance)* τ je poměr prostupujícího zářivého toku k toku dopadajícímu.

Součet posledních tří z uvedených čtyř veličin je pro každou vlnovou délku vždy roven jedné

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (10)$$

Analogický vztah platí pro emisivitu

$$\epsilon_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (11)$$

Pro šedé těleso platí vztah

$$\epsilon + \rho + \tau = 1 \quad (12)$$

Tab. 1. Informativní hodnoty emisivity pro vybrané materiály (povrchy) při $\lambda = 7$ až $14 \mu\text{m}$

Charakteristika povrchu	Teplota povrchu t (°C)	Emisivita ϵ (-)
černý lak matný	40 až 100	0,96 až 0,98
lidská pokožka	32	0,98
voda	20	0,96
cihla (červená, běžná)	20	0,93
papír (bílý, matný)	20	0,93
dřevo hoblované	20	0,8 až 0,9
železo zoxidované	100	0,74
železo lesklé	150	0,16
měď leštěná	100	0,03

Nepropustné materiály mají propustnost $\tau = 0$, takže pro ně platí

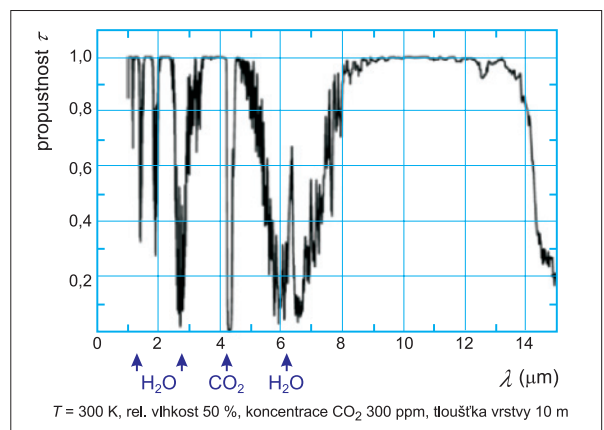
$$\alpha + \rho = 1, \text{ popř. } \epsilon + \rho = 1 \quad (13)$$

Ze známé emisivity lze určit odrazivost nepropustného tělesa

$$\rho = 1 - \epsilon \quad (14)$$

Čím větší bude odrazivost, tím menší bude emisivita. U vysoce lesklých materiálů se emisivita blíží k nule, takže pro dokonale vyleštěný materiál, tzv. *dokonalé zrcadlo* s velkou odrazivostí, platí $\rho = 1$.

Při měření bezdotykovými teploměry je důležité znát propustnost používaných optických materiálů a propustnost atmosféry mezi objektem a teploměrem. Na obr. 8 je znázor-



Obr. 8. Propustnost atmosféry za podmínek $T = 300 \text{ K}$, relativní vlhkost 50%, koncentrace CO_2 300 ppm, tloušťka vrstvy 10 m (podle [5], upraveno)

něna propustnost atmosféry na vzdálenost 10 m. Z grafu jsou patrné jednak oblasti, kde se projevuje absorpce IČ záření oxidem uhličitým a vodní párou, a jednak oblasti s velkou propustností, které jsou využívány k bezdotykovému měření teploty. Jde o pásma vlnových délek 3 až $5 \mu\text{m}$ a 8 až $14 \mu\text{m}$. Tato pásma jsou označována jako *atmosférická okna*. Propustnost závisí i na tloušťce vrstvy; např. při vzdálenosti 1 000 m klesne v oblasti 8 až $14 \mu\text{m}$ asi na hodnotu 0,8.

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc.
Ústav fyziky a měřicí techniky, VŠCHT Praha
(dokončení v příštím čísle)