

## MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

## Bezdotykové měření teploty

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY: NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT

Karel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

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 využívají jednak **bezdotykové teploměry** (*IČ teploměry, pyrometry*), které poskytují obvykle číslcový výstup na displeji, jednak **termokamery** (*IČ termokamery, termovizní kamery*), jejichž výstupem je termogram na displeji termokamery (obr. 1.).

## Teoretické základy bezdotykového měření teploty

Pro správné pochopení hlavních zásad bezdotykového měření teploty je důležité znát základní teoretické poznatky z této oblasti. 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 se někdy označuje jako *tepelné záření*. Při bezdotykovém měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 až 15  $\mu\text{m}$ . Toto záření spadá částečně do viditelné oblasti, z větší části do *infračervené oblasti spektra*. Uvedené rozsahy vlnových délek pokrývají měření teplot v rozmezí od  $-60\text{ }^\circ\text{C}$  do  $+6\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ .

Intenzita emitovaného záření závisí na teplotě a liší se svou vlnovou délkou. Vzájemné souvislosti mezi intenzitou záření, teplotou, vlnovou délkou a dalšími veličinami popisují fyzikální zákony: Planckův vyzařovací zákon, Wienův posunovací zákon, Stefanův-Boltzmannův zákon a Kirchhoffovy zákony (1 až 3). Podrobný teoretický výklad však přesahuje rámec tohoto článku, a proto budou uvedeny pouze vybrané vztahy, důležité pro pochopení principu měření a pro praktické aplikace.

Idealizovaný objekt, který se používá při teoretickém popisu dějů probíhajících při vyzařování, je *černé těleso*. Je to teoretický objekt, který při dané teplotě vyzařuje nejvyšší možné množství energie, a také naopak pohltí veškerou energii, která na něj dopadá. Celková intenzita vyzařování černého tělesa  $M_0$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) je podle *Stefanova-Boltzmannova zákona* úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty  $T$  (K):

$$M_0 = \sigma \cdot T^4, \text{ kde } \sigma \text{ je Boltzmannova konstanta} \quad (1).$$

Skutečné těleso vyzařuje (i pohlcuje) méně tepelného záření než černé těleso a tuto skutečnost koriguje faktor, který se nazývá *emisivita*  $\varepsilon$ . Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování objektu při dané teplotě k intenzitě vyzařování černého tělesa při stejné teplotě. Emisivita může nabývat hodnot

0 až 1; emisivita černého tělesa je rovna 1,0; pro reálná tělesa je emisivita vždy menší než 1. Emisivita závisí obecně na vlnové délce a na teplotě, dále pak na materiálu, kvalitě povrchu a úhlu pozorování. Existují však tělesa, jejichž emisivitu lze považovat za konstantní v širokém rozsahu vlnových délek. Takové zářiče označujeme jako *šedá tělesa* s emisivitou  $\varepsilon < 1$ , a tato tělesa jsou pro bezdotykové měření nevhodnější. Pro intenzitu vyzařování šedého tělesa  $M$  pak platí Stefanův-Boltzmannův zákon ve tvaru:

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \text{ kde } \varepsilon \text{ je emisivita šedého tělesa} \quad (2).$$

Intenzita vyzařování  $M$  je dána podílem zářivého toku  $\Phi$  (W) a plochy povrchu  $S$  ( $\text{m}^2$ ) zdroje záření a pro zářivý tok z povrchu tělesa tedy platí:

$$\Phi = S \cdot M = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (3).$$

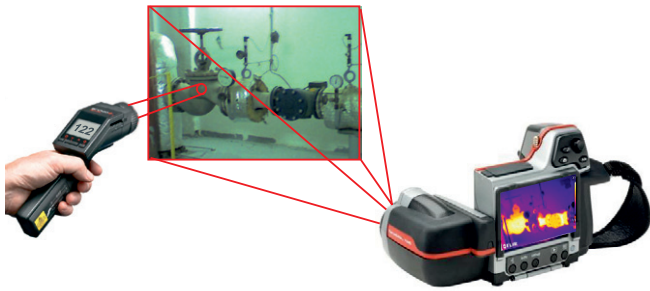
Energie vyzařovaná šedým zářičem, v porovnání s energií vyzařovanou černým tělesem, bude menší úměrně k hodnotě emisivity šedého tělesa.

Jestliže je objekt ve stavu tepelné rovnováhy, nedochází ani k ohřívání ani ochlazování, a tedy energie, kterou těleso vyzařuje, musí být rovna energii pohlcované. Podle *Kirchhoffova zákona* platí, že emisivita  $\varepsilon$  se rovná pohltivosti  $a$ . Je-li teplota tělesa větší 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 černého tělesa je emisivita i pohltivost  $\varepsilon = a = 1$ . U šedého tělesa je emisivita i pohltivost vždy  $< 1$ .

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

Charakteristika povrchu	Teplota ( $^\circ\text{C}$ )	Emisivita
Černý lak matný	40–100	0,96–0,98
Lidská pokožka	32	0,96
Voda	20	0,96
Cihla (červená, normální)	20	0,93
Papír (bílý, matný)	20	0,93
Dřevo hoblované	20	0,8–0,9
Železo zoxidované	100	0,74
Železo lesklé	150	0,16
Měď leštěná	100	0,03

Obr. 1. Bezdotykové měření teploty IČ teploměrem a termokamerou



Existují tři jevy, které se projevují u reálných objektů (obr. 2.):

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

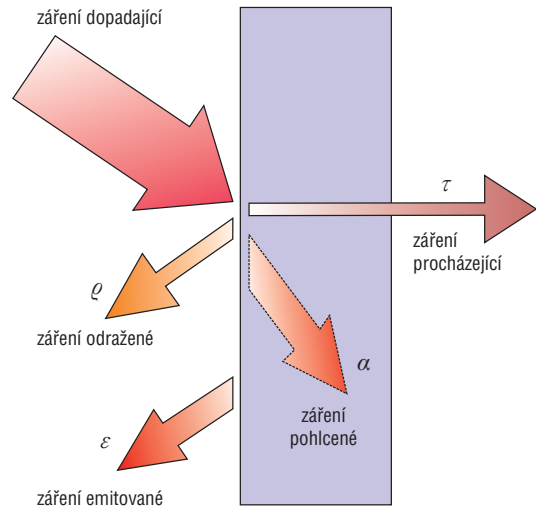
Vedle *pobltivosti*  $a$  a *emisivity*  $\varepsilon$  jsou definovány i *odrazivost*  $\rho$  jako míra schopnosti odrážet záření, a *propustnost*  $\tau$  jako míra schopnosti propustit záření. Všechny tyto veličiny jsou obecně závislé na vlnové délce; pro šedá tělesa je však můžeme považovat za konstantní v dosti široké oblasti vlnových délek. Protože jsou tyto veličiny pro bezdotykové měření teploty velmi důležité, jsou dále uvedeny v souhrnu jejich definice:

- *Emisivita*  $\varepsilon$  je poměr zářivého toku reálného objektu a černého tělesa při stejné teplotě.
- *Pobltivost* (absorbance)  $a$  je poměr pohlceného a dopadajícího zářivého toku.
- *Odrzivost* (reflektance)  $\rho$  je poměr odraženého a dopadajícího zářivého toku.
- *Propustnost* (transmittance)  $\tau$  je poměr prostupujícího a dopadajícího zářivého toku.

Součet pobltivosti nebo emisivity s odrazivostí a propustností je roven jedné:

$$a + \rho + \tau = 1, \text{ nebo } \varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (4)$$

Obr. 2. Interakce záření s tělesem



Pro nepropustné materiály je propustnost  $\tau = 0$ , a pak  $\varepsilon + \rho = 1$  a ze známé emisivity můžeme vypočítat odrazivost nepropustného tělesa:

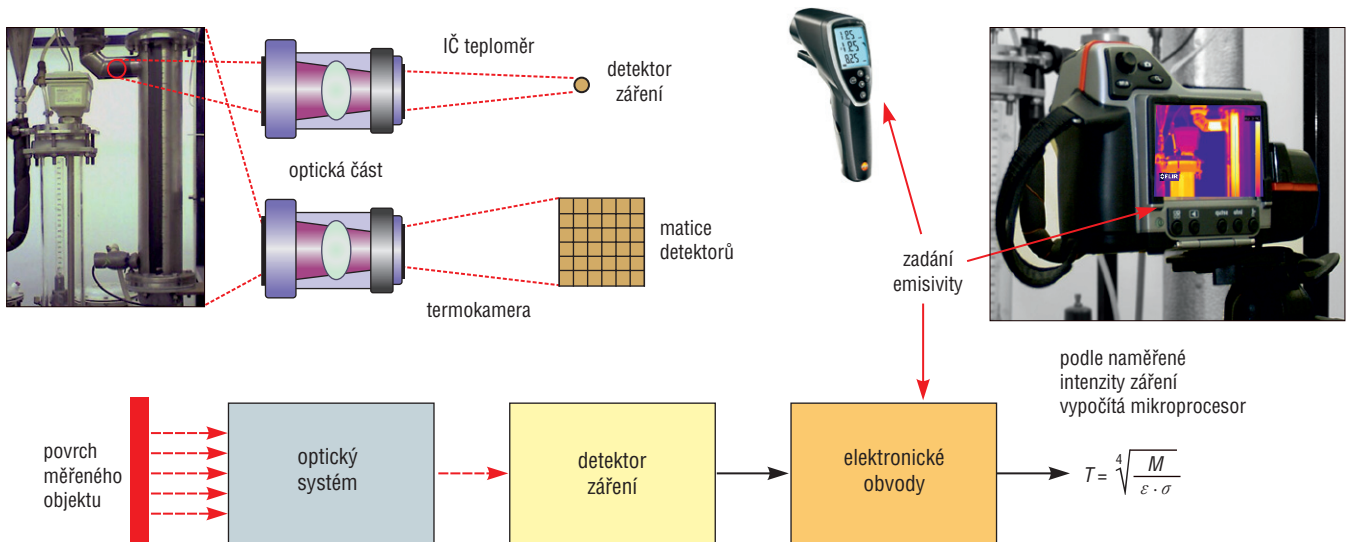
$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (5)$$

Informativní hodnoty emisivity  $\varepsilon$  pro vybrané povrchy jsou uvedeny v tab. I. Podrobné tabulky emisivit pro různé materiály, vlnové délky a teploty je možno nalézt v odborné literatuře, případně na internetu (1, 4). Tabulka emisivit by měla vždy obsahovat údaj o teplotě a vlnové délce, neboť emisivita je na teplotě a vlnové délce závislá. Emisivita je velmi důležitým faktorem termografie a její vliv je nutno vždy respektovat.

### Uspořádání IČ teploměru a termokamery

Zjednodušené blokové schéma uspořádání IČ teploměru a termokamery je znázorněno na obr. 3. Tepelné záření, vyzařované měřeným objektem, se soustřeďuje optickým systémem

Obr. 3. Blokové schéma IČ teploměru a termokamery

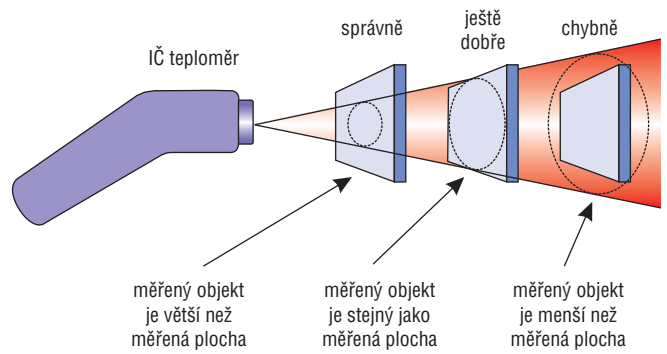


na detektor IČ záření. Optický systém funguje většinou i jako filtr a musí propouštět záření požadovaných vlnových délek. Termokamera pracuje na principu bezdotykového měření teploty a princip funkce je tedy stejný jako u IČ teploměru. Zásadní rozdíl je v tom, že IČ teploměr vyhodnocuje teplotu v jednom bodě (přesněji řečeno vyhodnocuje průměrnou teplotu v určité oblasti), zatímco termokamera vyhodnocuje teplotní pole na povrchu celého objektu (obr. 1.). Většina současných typů termokamer využívá tzv. *maticové (mozaikové) detektory*. Rozdíl je tedy takový, že v pyrometru je použit jeden senzor IČ záření, v termokamere je maticový detektor, obsahující velký počet jednotlivých senzorů tepelného záření.

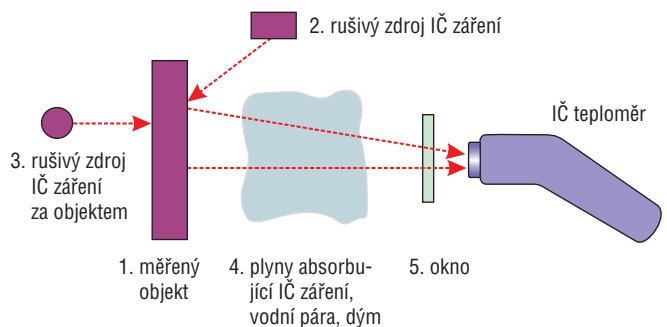
Jako senzory infračerveného záření se používají jednak *tepelné senzory*, u nichž IČ záření vyvolává změnu teploty, která se poté vyhodnocuje. Takovým senzorem je například *mikrobolometr* (miniaturní odporový teploměr), který mění elektrický odpor v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Tepelné senzory pracují v široké oblasti vlnových délek a nevyžadují chlazení detekčního systému. Dále se používají *kvantové fotonové senzory* (fotodiody a fotoodpory), které poskytují po dopadu IČ záření elektrický signál (změna napětí či elektrické vodivosti). Kvantové detektory jsou citlivější než tepelné detektory, vyžadují většinou chlazení a detekují záření jen v úzkém rozsahu spektra. *Mikrobolometrické maticové detektory* jsou typem tepelného detektoru a v současné době nejčastějším typem detektoru v termokamerách. Rozlišení maticového detektoru je dáno počtem prvků (pixelů), uspořádaných do matice. Matice detektorů pro modely termokamer nižší třídy obsahují např. 100×100 elementů, střední třída termokamer obsahuje detektory s rozlišením 320×240 (tj. 76 800) elementů a termokamery vyšší třídy pracují s rozlišením např. 640×480 (i více) elementů.

Vstupní optická část termokamery se velmi podobá digitálnímu fotoaparátu. Objektiv termokamery však musí propouštět IČ záření požadovaných vlnových délek je proto vyroben ze speciálního materiálu. Pro termokamery pracující v rozsahu vlnových délek 8 až 14 μm, což je v současné době nejčastější typ termokamer, jsou objektivy vyráběny z germania s nanosenou antireflexivní vrstvou. Objektiv promítá dopadající tepelné záření na maticový detektor, na kterém se vytváří „infračervený obraz“ povrchu měřeného objektu. Teplota maticového detektoru je udržována na konstantní hodnotě (obvykle 30 °C) obvodem s Peltierovým článkem. Moderní mikrobolometrické detektory obsahují již na čipu potřebné elektronické obvody pro analogovou nebo

Obr. 4. Velikost zorného pole IČ teploměru a zaměření měřeného objektu



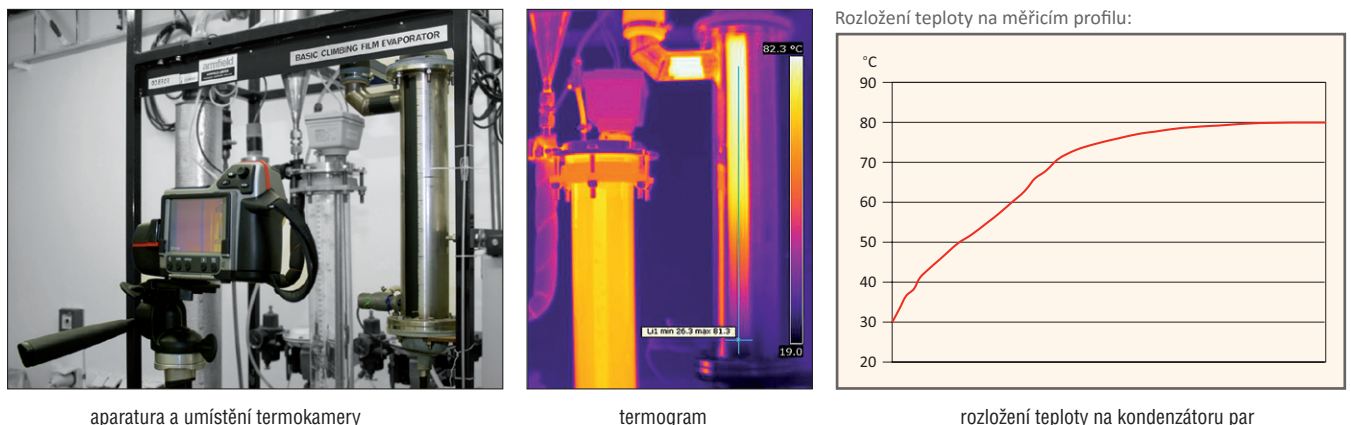
Obr. 5. Hlavní zdroje chyb při bezdotykovém měření teploty



digitální úpravu signálu. Řídící logika zajišťuje postupné čtení signálu z jednotlivých elementů.

Elektronické obvody řízené mikroprocesorem *vypočítávají teplotu na základě změřeného zářivého toku dopadajícího na detektor*. Většina IČ teploměrů má displej, na kterém je možné číst naměřené hodnoty v požadovaných jednotkách, zobrazit maximální a minimální teplotu v jistém časovém intervalu, vypočtenou průměrnou teplotu, rozdíl teplot, nastavenou emisivitu a případně další údaje. Výstupem termokamery je barevný obraz na monitoru – *termogram*. Vzhledem k tomu, že infračervené záření je pro lidské oko neviditelné, tak se tepelné obrazy objektů (infračervené snímky) vizualizují za použití okem viditelných

Obr. 6. Monitorování teploty kondenzátoru brydových par termokamerou



Tab. II. Přednosti a omezení při bezdotykovém měření teploty

Přednosti	Omezení a nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>– zanedbatelný vliv měřicího zařízení na objekt,</li> <li>– možnost měření rychlých teplotních změn,</li> <li>– možnost měření rotujících a pohyblivých se objektů,</li> <li>– možnost snímání rozložení teplot na celém povrchu objektu (termokamera).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– měří se pouze teplota povrchu objektu,</li> <li>– chyby způsobené nejistotou stanovení emisivity objektu,</li> <li>– chyby způsobené propustností prostředí (absorpce tepelného záření v prostředí mezi objektem a IČ teploměrem – sklo, CO<sub>2</sub>, vodní pára, dým),</li> <li>– chyby způsobené odraženým zářením z okolí.</li> </ul>

barevných palet, které přiřazují barvu různým teplotám. Stejný snímek tak lze zobrazit v odlišných barevných paletách, a tím zviditelnit nebo zdůraznit jiná místa. Počet zobrazených bodů na termogramu odpovídá počtu senzorů na maticovém detektoru a každý bod termogramu obsahuje informaci o teplotě. Hodnotu emisivity a případně dalších korekcí zadává operátor prostřednictvím obslužné klávesnice. Podrobnější informace o různých typech bezdotykových teploměrů, termokamer, jejich charakteristických vlastnostech, vyhodnocování termogramů a kalibraci bezdotykových teploměrů je možno nalézt v literatuře (např. 1, 2, 4).

#### Vlivy působící při bezdotykovém měření teploty

Předpokladem správného měření s IČ teploměrem je *dodržení správné velikosti zaměřovací plochy* na tělese, jehož teplota se měří. Velikost této plochy závisí na zaměřovacím úhlu, na vlastnostech optické části IČ teploměru (ohnisková délka), na velikosti účinné plochy detektoru a na zaměřovací vzdálenosti. Vztah mezi zaměřovací vzdáleností a rozměrem měřené plochy výrobci většinou uvádějí v podobě grafu nebo tabulky. Při měření musí plocha měřeného objektu zcela vyplňovat zorné pole pyrometru. Pokud je tato podmínka splněna, tak výsledek měření je nezávislý na vzdálenosti přístroje od měřeného objektu. Jestliže měřený objekt zorné pole přístroje nevyplňuje je naměřená teplota váženým průměrem teploty objektu a jeho pozadí (váha je dána podílem ploch). Souvislost mezi velikostí zorného pole IČ teploměru a plochou snímaného objektu je patrná z obr. 4. Pro zajištění správné teploty povrchu určitého objektu doporučují výrobci přístrojů, aby měřený objekt přesahoval plochu zorného pole nejméně o 50 %.

Běžnou součástí bezdotykového teploměru je zaměřovací systém, který umožňuje zaměřit přístroj na žádanou oblast měřeného objektu. K zaměření se v současné době nejčastěji používají *laserové zaměřovače*, které na měřeném objektu vizuálně vyznačí viditelnou stopu. Bodový laser vymezuje přibližně střed měřeného terče, dvojitý laser vymezuje průměr měřeného terče, kruhový nebo křížový laser vymezuje přibližně plochu měřeného terče.

Při termografickém měření snímá termokamera (a stejně IČ teploměr) záření nejen samotného objektu, ale také záření z okolí, které se odráží z povrchu objektu do kamery. Obě záření jsou do jisté míry zeslabována atmosférou mezi termokamerou a měřeným objektem. Kromě toho je třeba někdy vzít v úvahu

i záření atmosféry. Hlavní zdroje chyb při bezdotykovém měření teploty jsou znázorněny na obr. 5.:

1. Charakter povrchu měřeného objektu může být velmi rozdílný (matný, lesklý, drsný, barevný nebo také propustný pro IČ záření). IČ teploměry a termokamery jsou kalibrovány pro měření teploty černého tělesa. Měřený objekt se jen málokdy přibližuje svými vlastnostmi černému tělesu, a proto je důležitým úkolem *určení emisivity* měřené plochy a zadání hodnoty tohoto korekčního faktoru.
2. Významným zdrojem rušení může být *odražené záření* pocházející z rušivých zdrojů IČ záření (např. záření horkých objektů, dopadající sluneční paprsky); chyby lze kompenzovat nastavením tzv. zdánlivé odražené teploty. Zde je nutno mít na zřeteli, že čím menší je emisivita povrchu měřeného objektu, tím větší je jeho odrazivost – viz vztah (5).
3. Za měřeným objektem propustným pro IČ záření se může nacházet zdroj rušivého tepelného záření.
4. Prostředí mezi měřeným povrchem a IČ teploměrem může mít různou propustnost pro IČ záření. Obsahuje-li atmosféra mezi objektem a teploměrem složky absorbující IČ záření (např. CO<sub>2</sub>, vodní pára, případně další plyny a páry), tak dochází k ovlivnění výstupního údaje. Rovněž dým a prachové částice absorbují tepelné záření a naměřený údaj bude potom nižší.
5. Pokud se měří přes okno propustné pro IČ záření, dochází k pohlčení části záření (vliv lze korigovat nastavením emisivity).

Při měření bezdotykovým teploměrem je třeba mít vždy na zřeteli, že *IČ teploměr nebo termokamera měří teplotu povrchu objektu*; k měření vnitřní teploty je zapotřebí použít vhodný dotykový teploměr. Pro předcházení chybným výsledkům měření je rovněž nezbytná *pravidelná kontrola* a případná kalibrace bezdotykového teploměru. Výhody a nevýhody bezdotykového měření teploty jsou shrnuty v tab. II.

#### Aplikační možnosti bezdotykového měření teploty

Bezdotykové teploměry se vyrábějí buď jako přenosné přístroje, sloužící pro příležitostná měření, nebo jako stabilní pro nepřetržitá měření. Bezdotykové teploměry mají velmi příznivé dynamické vlastnosti a reagují na změny teploty téměř okamžitě. Umožňují měřit teplotu pohyblivých se objektů nebo objektů, jejichž teplota se rychle mění. IČ teploměry a termokamery se s výhodou využívají pro diagnostická a inspekční měření. Termokamerou lze snadno zobrazit rozložení povrchových teplot na měřeném objektu a odhalit tak místa, kde dochází např. k přehřívání. Při diagnostickém měření v průmyslu je termokamera spolehlivým bezkontaktním nástrojem, který je schopen snímat a zobrazit rozložení teploty celého povrchu technologického zařízení rychle a přesně. Při tzv. prediktivní údržbě umožní vyhledávání závad a odhalení problematických a narušených prvků.

Termokamery umožňují zobrazit infračervené záření tělesa ve viditelném termogramu, a toho se využívá zejména pro termodiagnostiku (tam, kde dochází k uvolňování tepelné energie a ke změnám teploty) při hledání úniků tepla z budov, kontrola rozvodů tepla, sledování elektrických vedení a rozvaděčů, určení poruchy aparatur vyhledáním nehomogenit teplotního pole apod. S bouřlivým rozvojem termokamer a jejich dostupností

se termografie a termodiagnostika velmi dynamicky rozvíjí a rozšířila se téměř do všech oblastí techniky a lidské činnosti. Na obr. 6. je ukázka použití termokamery k monitorování teploty na povrchu kondenzátoru brýdových par na laboratorním modelu cukrovarnické odparky (5).

### Souhrn

Príspevek popisuje bezdotykové měření teploty – jsou uvedeny teoretické základy bezdotykového měření teploty, je popsáno uspořádání IČ teploměrů a termokamer. Jsou diskutovány vlivy působící při bezdotykovém měření teploty a jsou popsány možnosti použití IČ teploměrů a termokamer pro bezdotykové měření teploty.

**Klíčová slova:** bezdotykové teploměry, IČ teploměry, termokamery.

### Literatura

1. VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K. P.: *Infrared Thermal Imaging*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2010, 593 s.
2. KADLEC, K.: Měření teploty. In KADLEC, K.; KMÍNEK, M.; KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení v potravinářských a biotechnologických výrobcích*. Ostrava: Key Publishing, 2015, s. 90–135.
3. KADLEC, K.: Teoretické základy bezdotykového měření teploty. *Automa*, 20, 2014 (2), s. 13–15.

4. IMPAC Infrared: *Pyrometer Handbook – Non-Contact Thermometry*. Frankfurt a.M.: IMPAC Infrared GmbH, 2004, [online] <http://www.contika.dk/Download/literatur/teori.pdf>, cit. 20. 2. 2016.

5. KMÍNEK, M. ET AL.: Využití termografie ke studiu dynamiky kondenzátoru brýdových par. *Automa*, 17, 2011, (8–9), s. 44–46.

### Kadlec K.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Non-contact Temperature Measurement

The paper deals with non-contact temperature measurement – the theoretical foundations of contactless temperature measurement are given and the arrangement IR thermometers and thermal imagers is described. It also discusses the influences during noncontact temperature measurement and the possible applications of IR thermometers and thermal imagers for non-contact temperature measurement.

**Key words:** non-contact thermometers, IR thermometers, thermal imagers.

---

### Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Fakulta chemicko-inženýrská, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: [karel.kadlec@vscht.cz](mailto:karel.kadlec@vscht.cz)