

# Termovizní zobrazovací systémy

## Thermovision displaying systems

Ing. Roman VAVŘIČKA  
 ČVUT v Praze, Ústav techniky prostředí

Recenzent  
 doc. Ing. Karel Brož, CSc.

Článek pojednává o principu termografického zobrazování. V úvodu popisuje základní pojmy a zákony související se sdílením tepla sáláním, seznamuje s konstrukcí termovizní zobrazovací techniky a přibližuje současné možnosti využití termovize v praxi.

**Klíčová slova:** přenos energie zářením, termovizní zobrazovací systém, termovizní kamera

The article deals with the principle of thermovision displaying. The introduction describes fundamental concepts and laws connected with heat transfer by radiation, informs about displaying technique design and at the same time brings nearer the present-day possibilities of thermovision utilisation in practice.

**Key words:** energy transfer by radiation, thermovision displaying system, thermovision camera

Bezkontaktní mapování teploty je spojeno s využitím infračervené části elektromagnetického spektra v rozmezí vlnových délek 0,75 μm až 1 mm. Tato teorie byla poprvé vyslovena fyzikem W. Herschelem v roce 1801 a od jeho syna J. Herschela pak pochází termín „termografie“. Začátky vývoje elektronických infrazobrazovacích systémů jsou spojeny s konstrukcí zařízení pro noční vidění během 2. světové války (tzv. noktovize). Poté následoval postupný rozvoj těchto systémů postupně s rozvojem elektronických prvků a komponent. V roce 1965 byl firmou AGA Infrared Systems představen první průmyslově využitelný termografický systém AGA Thermovision® 665, a to byl začátek využívání termografické techniky mimo vojenské aplikace.

V současné době existuje několik předních výrobců této technologie a termografie je hojně využívána v různých průmyslových odvětvích jako jsou např. lékařství, stavebnictví, výzkum atd..

### VLASTNOSTI SIGNÁLU NESOUCÍ INFORMACI O PRIMÁRNÍM PARAMETRICKÉM POLI

Termografie využívá vlnové pásmo infračerveného (IČ) 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 λ = 0,75 μm až 1 mm. Pásmo infračerveného záření lze dále rozdělit na infraoblasti:

– blízkou	0,75 μm až 3 μm	Near Wave Infra-Red (NWIR)
– střední	3 μm až 5 μm	Mid Wave Infra-Red (MWIR)
– vzdálenou	5 μm až 15 μm	Long Wave Infra-Red (LWIR)
– velmi vzdálenou	15 μm až 1 mm	Very Long Wave Infra-Red (VLWIR)

Zářivá energie v infračervené části spektra může být generována třemi typy zdrojů (luminiscenčními zdroji, radiovými zdroji a tepelnými zdroji). Pro termografii jsou nejdůležitější tepelné zdroje. Pro tepelné zdroje je charakteristické, že generovaná zářivá energie je hrazena na úkor tepelné energie zdroje. Z toho vyplývá, že IČ záření bude generovat veškerá hmota, jejíž teplota je vyšší než absolutní nula (0 K). Velikost zářivého toku generovaného tepelnými zdroji, jeho spektrální složení a směr šíření závisí na vlastnostech a teplotě zdroje záření. Signálový radiační tok IČ systémů je pro tepelné zářiče umístěné v jeho zorném poli reprezentován tokem fotonů v infračervené části spektra. Jeho velikost a spektrální složení lze pro speciální zářiče (absolutně černá tělesa a tělesa šedá) stanovit ze základních zákonů vyzařování.

Pozn.: Absolutně černé těleso je definováno jako ideální těleso, které pohlcuje veškerou radiaci na něj dopadající, bez ohledu na vlnovou délku (energii fotonu) a úhel, pod kterým je povrch tělesa ozářen. A zároveň absolutně černé těleso vyzařuje na všech vlnových délkách při dané teplotě maximální dosažitelnou energii zářivého toku (pokud je zdrojem radiace).

### ZÁKLADNÍ POJMY A ZÁKONY

**Planckův vyzařovací zákon** – Max Planck v roce 1900 vyslovil myšlenku, která později vedla k zavedení kvantové hypotézy šíření zářivé energie. Planckův vyzařovací zákon se týká spektrální měrné zářivosti což je výkon generovaný z jednotky plochy povrchu zdroje na dané vlnové délce do jednotkového prostoroúhlu.

Pro ideální zdroj (absolutně černé těleso) při absolutní teplotě zdroje T [K] lze tento zákon napsat v energetickém tvaru

$$I_{\lambda, T} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{ch}{k_B \lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad [\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}]$$

kde jsou použity následující konstanty:

$h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ [J.s]	Planckova konstanta
$k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ [J.K <sup>-1</sup> ]	Boltzmannova konstanta
$c = 2,9979 \cdot 10^8$ [m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost světla ve vakuu
T [K]	povrchová absolutní teplota zdroje

Vzhledem k tomu, že vyzařování absolutně černého tělesa je nezávislé na směru, lze jeho spektrální intenzitu vyzařování  $I_{e,\lambda}(\lambda, T)$  v energetickém tvaru vyjádřit závislostí

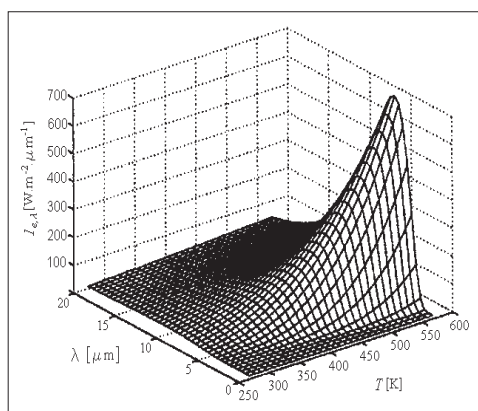
$$I_{e,\lambda}(\lambda, T) = \pi \cdot I_{\lambda, T}(\lambda, T) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}]$$

**Stefan – Boltzmannův zákon** – tento zákon vyjadřuje celkový zářivý výkon  $I_e(T)$  absolutně černého tělesa generovaný z jednotky plochy zdroje na všech vlnových délkách při dané teplotě. Lze ho psát v energetickém tvaru jako

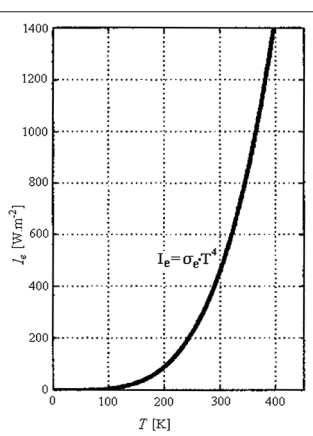
$$I_e(T) = \int_0^{\infty} I_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma_e T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$$

kde

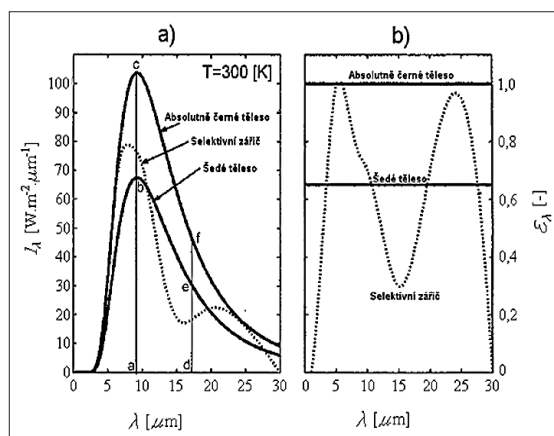
$\sigma_e \approx 5,67 \cdot 10^{-8}$ [W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]	Stefan – Boltzmannova konstanta
$k_B = 1,3805 \cdot 10^{-23}$ [J.K <sup>-1</sup> ]	Boltzmannova konstanta



Obr. 1 – Prezentace Planckova vyzařovacího zákona v energetickém tvaru. Teplotní závislost generovaného spektra infračerveného záření



Obr. 2 – Stefan – Boltzmannův zákon vyjadřující nelinearit transformace tepelné energie na zářivou v závislosti na teplotě



Obr. 4 – Průběh spektrální intenzity vyzařování (obr. a) a spektrální emisivity (obr. b) absolutně černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zdroje. Např.: pro šedé těleso

Grafické vyjádření J. Stefan (1879 odvození zákona) a L. Boltzmannova (1884 ověření zákona) zákona je dobře patrné z obr. 2, který vyjadřuje nelinearit transformace tepelné energie na zářivou.

**Wienův posouvací zákon** – maximum spektrální intenzity vyzařování  $I_{e,\lambda}(\lambda, T)$  se mění v závislosti na teplotě absolutně černého tělesa. Odpovídající vlnovou délku lze pak snadno stanovit z Planckova vyzařovacího zákona pro energetické vyjádření vyhledáním lokálního extrému odpovídající funkci

$$\frac{\partial I_{e,\lambda}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_{\max} \cdot T = 2898 \quad [\mu\text{m}\cdot\text{K}]$$

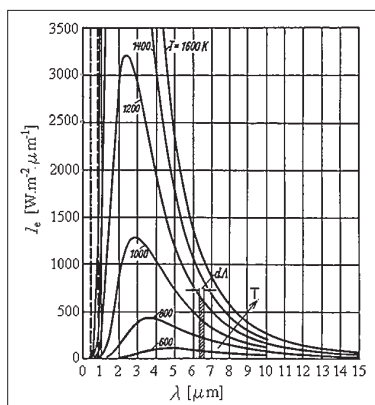
Integrací Planckova zákona v intervalu vlnových délek kratších a delších nežli je  $\lambda_{\max}$  lze ověřit, že celkově 25 % zářivé energie je generováno na kratších vlnových délkách (vyšší energiích), nežli je  $\lambda_{\max}$ , a 75 % na vlnových délkách delších (viz. obr. 3).

**Modifikace základních zákonů vyzařování pro šedá tělesa** – všechny předem zmíněné zákony byly odvozeny pro ideální zdroj infračerveného záření (absolutně černé těleso).

Vlastnosti obecných radiačních zdrojů se nejčastěji popisují bezrozměrným koeficientem tzv. **emisivitou**  $\epsilon$ . Emisivita číselně vyjadřuje zhoršení vyzařovacích vlastností zdroje ve srovnání s absolutně černým tělesem a obecně závisí na  $\lambda$  a  $T$ . Lze ji zapsat ve tvaru

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{I_{e,\lambda}(\lambda, T)_{\text{zdroje}}}{I_{e,\lambda}(\lambda, T)_{\text{absolutně černého tělesa}}}$$

Koeficient emisivity  $\epsilon$  tak může obecně nabývat hodnot od 0 do 1. Porovnání spektrální závislosti emisivity vyzařování pro absolutně černé těleso a pro obecně šedé těleso ukazuje obr. 4 a b). Na základě tohoto obrázku lze konstatovat, že některé materiály vykazují vlastnosti selektivního zdroje, pro které se  $\epsilon(\lambda)$  mění v závislosti na  $\lambda$ .



Obr. 3 – Grafické vyjádření závislosti spektrální intenzity záření  $I_\lambda$  v závislosti na vlnové délce  $\lambda$  a teplotě  $T$

Z uvedeného vyplývá, že u šedých zářičů je jejich vyzařování na všech vlnových délkách  $\epsilon$ -krát menší nežli vyzařování absolutně černého tělesa. Pro tyto zdroje pak lze modifikovat základní vyzařovací zákony do tvarů

$$I_{\lambda,T}^{ST} = \epsilon \cdot I_{\lambda,T} \quad \text{Planckův zákon}$$

$$I_e^{ST} = \epsilon \cdot I_e = \epsilon \cdot \sigma_e \cdot T^4 \quad \text{Stefan – Boltzmannův zákon}$$

**Kirchhoffův zákon** – poskytuje informace o jednotlivých vlastnostech těles. Ve své podstatě je zákonem zachování energie pro záření. Vyjadřuje vztah mezi integrálním zářivým tokem  $I_S$  dopadajícím na plochu tělesa  $S$  a tokem  $I_\alpha$  tělesem pohlceným, tokem  $I_p$  tělesem odraženým a tokem  $I_r$  tělesem prošlým.

$$I_S = I_a + I_p + I_r \quad [\text{W}]$$

Pokud tuto rovnici vydělíme integrálním zářivým tokem  $I_S$  obdržíme definici tří základních součinitelů, které popisují vlastnosti těles ozářených radiačním tokem

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

kde je součinitel

$$\text{pohltivosti (absorbce):} \quad \alpha = I_a / I_S$$

$$\text{odrazivosti (reflexe):} \quad \rho = I_p / I_S$$

$$\text{propustnosti (transmise):} \quad \tau = I_r / I_S$$

Velikost jednotlivých koeficientů určuje, zda se těleso bude chovat jako:

- absolutně černé těleso (dokonalý přijímač) –  $\alpha = 1, \rho = \tau = 0$ ,
- šedé těleso –  $\alpha < 1$  ale  $\neq f(\lambda), \rho = 1 - \alpha, \tau = 0$ ,
- antireflexní materiál –  $\alpha + \tau = 1, \rho = 0$ ,
- zrcadlo (dokonalý reflektor) –  $\rho = 1, \alpha = \tau = 0$ ,
- dokonale propustný (transparentní materiál) –  $\tau = 1, \alpha = \rho = 0$ ,
- matný (opacitní materiál) –  $\alpha + \rho = 1, \tau = 0$ ,
- obecný materiál –  $0 < (\alpha, \rho; \tau) < 1$ .

Celá řada technicky významných materiálů se však vyznačuje v určitém rozsahu vlnových délek nezávislostí emisivity  $\epsilon$  na vlnové délce, a proto je pro zjednodušení výpočtů pokládáme za šedá. Většina obecných povrchů vykazuje směrovou závislost vyzařování. Problematikou směrové závislosti vyzařování se zabývá **Lambertův kosinový zákon**, který říká: „Září-li plošný zářič  $dS$  do poloprostoru ve směru, který svírá s normálou  $n$  k ploše zářiče úhel  $\phi$ , je zářivý tok plošného zářiče  $dS$  úměrný kosinu úhlu  $\phi$ .“

$$dI_\phi = dI_n \cdot \cos \phi \cdot dS$$

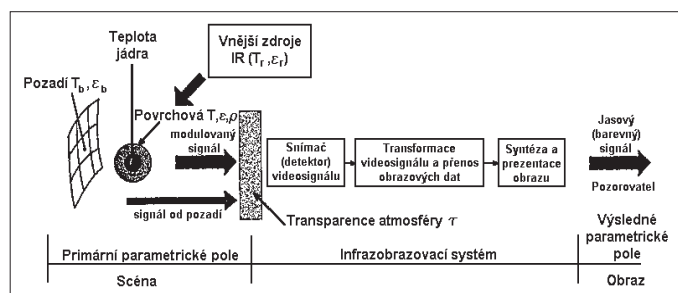
kde

$dI_n$  je zářivý tok ve směru normály k ploše zářiče  $dS$ .

## PRIMÁRNÍ PARAMETRICKÉ POLE INFRAZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ

Velikost signálu emitovaného z povrchu absolutně černého tělesa (velikost infra signálového toku) je úměrná absolutní teplotě  $T$  [K]. U šedých těles je jejich infra signál úměrný jak absolutní teplotě  $T$ , tak i jejich povrchové emisivitě  $\varepsilon$ . Předměty umístěné ve scéně, které můžeme považovat za absolutně černá tělesa, vytvářejí tedy jednoparametrické primární pole, ve kterém je parametrem jejich povrchová tepla. Šedá tělesa vytvářejí dvojparametrické pole, ve kterém je parametrem jak povrchová teplota tak i emisivita jejich povrchu. Obecná tělesa sice vytvářejí také dvojparametrické pole, vzhledem k složité spektrální závislosti koeficientu emisivity však lze procesem zobrazení určit pouze srovnávací měření.

Obecný proces infra zobrazení je zjednodušeně uveden na obr. 5. Signálový radiační tok detekovaný infrazobrazovacím systémem je determinován jednak tokem od vlastního snímaného objektu a jednak tokem od pozadí a vnějších radiačních zdrojů. Navíc celé zobrazení může značně zkomplikovat skutečnost, že detekovaný infra zářivý tok je ovlivněn teplotou a transparentností atmosféry, ochlazením povrchu snímaných objektů prouděním vzduchu, a v neposlední řadě u obecných zdrojů také i směrovostí jejich vyzařování. Také tvorba teplotního reliéfu je ovlivněna skladbou snímaného objektu a existencí vnitřních zdrojů tepelné energie. Z těchto důvodů je nutné si uvědomit tzv. vnitřní a vnější faktory generace a detekce povrchového teplotního reliéfu.



Obr. 5 – Obecné schéma procesu zobrazení infračerveným zářením

**Vnitřní faktory generace a detekce povrchového teplotního reliéfu** ovlivňují generaci a šíření tepelné energie v zobrazovaném objektu a nelze je v procesu zobrazení ovlivnit. Vzhledem k tomu, že tepelná energie se ve většině objektů šíří tepelnou kondukcí (vedení tepla – vzájemné předávání rotačně-vibračních kmitů mezi pevně vázanými částicemi pružnými a nepružnými srážkami částic ve směru teplotního spádu) a tepelnou konvekcí (vzájemné předávání rotačně-vibračních kmitů mezi pevně vázanými částicemi a proudícími částicemi), bude vznikající povrchový teplotní reliéf ovlivněn vlastnostmi a skladbou zobrazovaného objektu – tepelnou vodivostí, rychlostí a viskozitou proudící kapaliny.

**Vnější faktory generace a detekce povrchového teplotního reliéfu** ovlivňují i jeho obraz a jsou vázány na prostředí, v němž se zobrazovaný objekt nachází. Patří k nim např.: vlastnosti snímaného objektu (emisivita a reflexe), topologie snímaného objektu (směrovost vyzařování), velikost snímaného objektu (bodový/plošný zdroj), teplota vnějšího prostředí (vzduchu), vnější zdroje infračerveného záření, radiace pozadí, proudění vzduchu a transparentnost vzduchu. První dva případy byly vysvětleny v předchozím výkladu. Velikost snímaného objektu determinuje, zda se bude jevit objekt jako bodový předmět (průmět detektoru do předmětové roviny je větší než velikost předmětu) nebo plošný předmět, jehož plocha je větší nežli průmět detektoru do předmětové roviny. Z toho vyplývá, že stanovení teploty bodového předmětu je vázáno na znalost vzdálenosti mezi předmětem a infrazobrazovacím zařízením, naopak u plošného zdroje lze bez znalosti vzdálenosti určit velikost primárního parametru změřením měrné zářivosti plošného zdroje. Teplota vnějšího prostředí ovlivňuje jednak velikost stejnosměrné signálové radiační složky detekovaného infra signálu a jednak

její 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). Radiace od pozadí snižuje radiační kontrast scény. Proudění vzduchu ovlivňuje ztrátu tepla z povrchu, tedy i výsledný povrchový teplotní reliéf. Transparentnost vzduchu 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 podílí zejména molekuly  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$  a  $CO$ , které vymezují ve spektrální závislosti součinitele propustnosti.

## ZÁKLADNÍ PRINCIPY KONSTRUKCE INFRAZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ

Základním je dělení infrazobrazovacích systémů podle způsobu vytváření obrazu povrchového teplotního reliéfu na:

**a) Pasivní metody zobrazení** – využívají jako signál k přenosu informace mezi zobrazovanou scénou (primární parametrické pole – PPP) a zobrazovacím systémem vlastní vyzařování snímaného objektu v infračervené části spektra. Používají se zejména v případech, kdy vyzařování snímaného objektu je vyšší nežli vyzařování obklopujícího prostředí.

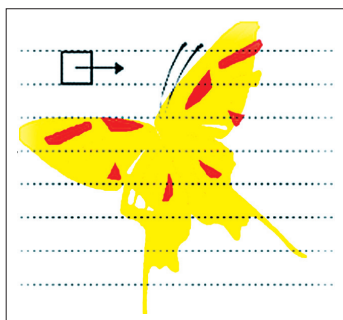
**b) Aktivní metody pasivního zobrazení** – předpokládají předběžné zahřátí zobrazovaného předmětu, po kterém následuje snímání jeho povrchového teplotního pole pasivním infrazobrazovacím systémem. Zahřátí může být buď celkové (současný ohřev celého objektu) nebo postupné (působení na objekt lokálními zdroji tepla, který se posouvá po určené trajektorii). Na stejné trajektorii se měří povrchová teplota objektu a odhalují se tak defekty spojené s tepelnou vodivostí a sdílením tepla.

Informace o zobrazovacím objektu a prostředí, kterým je obklopen – pozadí a atmosféra (PPP), je systémem zobrazujícím infračervené záření (infračervený systém) rozložena na jednotlivé elementární plošky a v určitém časovém intervalu zobrazena jako tepelný obraz – termogram. Podle způsobu rozkladu PPP v prostoru a čase se termografické systémy dále dělí na systémy s úplným rozkladem – skenovací způsoby (obr. 6), s částečným rozkladem – neskenovací způsoby (skenování v řádku či sloupci) a na systémy neskenovací s mozaikovým detektorem (obr. 7).

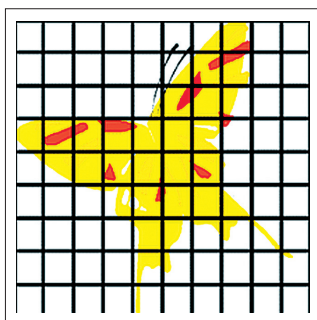
**Skenovací systémy** jsou charakteristické lineární transformací prostorové souřadnice na souřadnici časovou skenerem. Detekční část zobrazovacího systému je tvořena buď jedním elementárním detektorem, jehož zorné pole se skenerem přesouvá po vhodné trajektorii přes celé snímané zorné pole (ve dvou směrech) – postupně zavádění informace, nebo je tvořena malou mozaikou detektorů (např. jeden řádek či sloupec) a skener přesouvá zorné pole jen v jednom směru.

**Neskenovací systémy** jsou charakteristické lineární transformací prostorové souřadnice na souřadnici časovou multiplexem řízeným vnitřním hodinovým signálem (čtení jednotlivých elementárních detektorů). Obrazový detektor je tvořen velkou mozaikou elementárních detektorů, jejichž konfigurace a vlastnosti určují limitní dosažitelné parametry procesu zobrazení. Zařízení neobsahuje poziční jednotku (skener).

Další rozdělení může být podle rychlosti, s jakou dokáže systém transformovat primární parametrické pole na jeho obraz, tzn. vzorkovat obrazový tok. A to na **systémy rychlé**, které pracují v reálném čase (obrazová frekvence je cca desítky obrazů za sekundu) a **systémy pomalé** (obrazové frekvence jsou cca



Obr. 6 – Termogram vytvořený jedním (bodovým) detektorem



Obr. 7 – Termogram vytvořený mozaikovým detektorem. Např.: pro šedé těleso

jednotky a méně obrazů za sekundu). Rychlost vzorkování obrazového toku je u infrazobrazovacích systémů dána jednak časovou konstantou detektoru a jednak konstrukcí skeneru tzn. mechanickými vlastnosti opticko-mechanického rozkladového systému. Rychlé systémy jsou někdy v literatuře označovány jako systémy FLIR (Forward Looking Infra-Red).

Základním prvkem termografického systému je detektor, resp. infradetektor. Detektory používané v současné době lze přibližně rozdělit na:

- **fotonové** (nejčastěji se používají fotokonduktivní detektory – fotoodpory a fotovoltaiické detektory – fotodiody), které radiální tok objektu mění přímo na elektrický signál; tyto detektory jsou chlazené (většinou je používán uzavřený Stirlingův chladíč);
- **tepelné**, v nichž radiální tok vyvolává změnu teploty a změna teploty změnu odporu, která se poté vyhodnocuje; tepelné detektory nevyžadují chlazení;
- **feroelektrické a pyroelektrické**, u nichž změny radiálního toku způsobují změny kapacity detektoru; detektory sice nevyžadují chlazení, ale zato je nutná optická modulace vstupní informace a obecně jde o detektory nevhodné pro radiometrické účely (měření teplot);
- **chlazené fotokonduktivní detektory QWIP** (Quantum Well Infrared Photon), v současnosti již s mozaikou až 640 x 480 obrazových bodů (pixel).

### HODNOCENÍ KVALITY INFRAZOBRAZOVACÍCH SYSTÉMŮ

Obecně lze říci, že popis vlastností infrazobrazovacích systémů je obtížnější, nežli popis vlastností např. radiotechnických nebo ultrazvukových systémů. U radiotechnických/ultrazvukových systémů je základním charakteristickým parametrem citlivost systému k jedné frekvenci použitého signálu. Naproti tomu u infrazobrazovacích systémů je citlivost vázána na relativně široké pásmo frekvencí elektromagnetického záření. Popis citlivosti těchto systémů jednou číselnou hodnotou – **spektrální citlivostí  $R(\lambda)$**  – citlivostí k celkovému výkonu detekované signálové radiace, nevystihuje často všechny požadované skutečnosti. Proto pro praxi bývá většinou velmi vhodné zavést základní hodnotící kritérium, které by v ideálním případě obsahovalo řadu parametrů a umožňovalo tak komplexně hodnotit užitečnost zařízení pro danou aplikaci a vliv jednotlivých komponent na jeho hodnotu. Základním a také nejčastěji používaným kritériem je tzv. **minimální signál**, nebo-li jeho minimální změna,

která může být daným zařízením identifikována, u dnešních zařízení se spektrální citlivost pohybuje v rozmezí  $R = 7,5$  až  $13 \mu\text{m}$ . Z pohledu energetické rozlišovací schopnosti je nutno rozlišit dva základní přístupy k využití termovize:

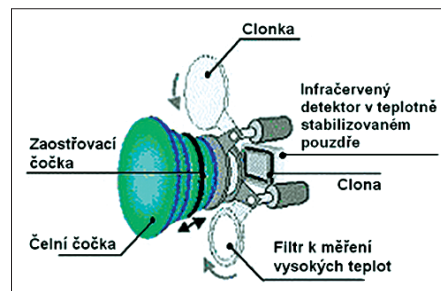
a) **Infrazobrazovací systém je použit pouze k identifikaci** (vyhledávání) co nejmenšího cíle na co největší vzdálenosti.

b) **Infrazobrazovací systém je použit k mapování a kvalitativnímu hodnocení** povrchového teplotního reliéfu.

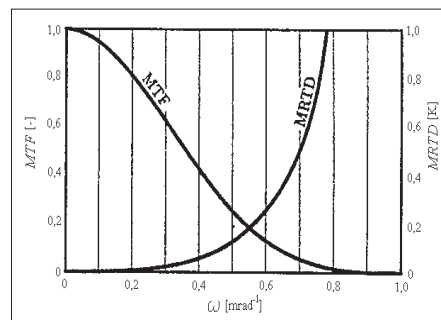
Dalším hodnotícím kritériem je teplotní citlivost (minimální rozlišitelná teplotní diference – MRTD). Kritérium MRTD nám říká jaká nejmenší změna povrchové teploty bude systémem vyhodnotitelná. Experimentálně lze MRTD stanovit tak, že se postupně mění velikost teplotní diference ( $T_1 - T_2$ ) a subjektivně se hodnotí ještě zřetelně rozlišitelná prostorová frekvence. Prostorová frekvence je frekvence ve smyslu Fourierovy transformace. Můžeme ji také chápat jako počet změn jasu na jednotku vzdálenosti. Prostorová frekvence se obvykle vyjadřuje jako počet cyklů na  $1^\circ$  úhlu vidění. V souvislosti s MRTD se používá i tzv. MTF – Modulační přenosová funkce (Modulation Transfer Function), k měření MTF se používá obraz šterbiny síťovaný napříč detektorem, zatímco hlavní počítač nahrává výstup z jednoho nebo více pixelů. Výsledná závislost MRTD a MTF prakticky realizovaného systému je uvedena na obr. 9.

Údaje hodnotící kvalitu používaného infrazobrazovacího systému, které jsou nejčastěji k dispozici přímo od výrobce daného systému, který je používán, jsou např. teplotní citlivost (u dnešních systémů cca desetiny  $^\circ\text{C}$  při  $\approx 30^\circ\text{C}$ ), rozsah měřených teplot ( $-40^\circ\text{C}$  až  $+500^\circ\text{C}$  se speciálním filtrem až  $+2000^\circ\text{C}$ ), přesnost měření (bývá nejčastěji v rozmezí  $\pm 2^\circ\text{C}$  nebo  $\pm 2\%$  z naměřené hodnoty ve stupních Celsia), mozaiková zobrazovací schopnost (u chlazených detektorů QWIP až 640 x 480 pixelů) atd.

Cílem příspěvku bylo přiblížit moderní termografickou techniku. Její využití je velmi široké, výzkum a vývoj je významnou oblastí, kde se termovize používají (obr. 10 a) a b). Je to tam, kde je nutné či výhodné použít nedestruktivní metody



Obr. 8 – Princip termovizní kamery s nechlazeným mozaikovým detektorem FPA (výrobce firma FLIR Systems)



Obr. 9 – Závislost minimální rozlišitelné teplotní diference (MRTD) a (MTF) na prostorové frekvenci  $\omega$



Obr. 10 – Příklady využití termografické zobrazovací techniky

a) termogram šálky kávy, b) infrazobrazovací systém řada SC s příslušenstvím AGEMA, c) nedestruktivní defektoskopie systém THERMACAM řada E, d) příklad metodou nedestruktivní defektoskopie, e) příklad termogramu obvodového pláště budovy

zkoušení materiálů a komponentů s možností rozboru obrazů (termogramů) v reálném čase a záznamem jak statických tak dynamických dějů jako jsou např.: vývoj materiálů, kontrola kvality, kontrola výrobních procesů, lékařská termografie atd. Nedestruktivní defektoskopie (obr. 10 c) a d) – prediktivní údržba je druhou významnou oblastí, kde se používá termovizní technika jsou to např.: kontrola mechanických zařízení či jejich částí, kontrola stavu obvodových plášťů objektů (obr. 10 e) apod. Kontrola a řízení technologických procesů je další významnou oblastí, kde se používá termovize např.: těžký průmysl, elektrotechnický průmysl, potravinářský průmysl apod. Na závěr je třeba však připomenout, že termografie obecně je disciplína, ve které je důležitým předpokladem úspěchu v podobě správného výsledku měření nejen dokonalá technika, ale i nezbytná znalost obecných principů a zákonů (např. problematiky záření černého tělesa, zákonů Kirchhoffova, Planckova, Stefanova-Boltzmannova apod.) i samotného řešení problému či aplikace termografické techniky na řešení daného problému.

**Použité zdroje:**

[1] DRASTICH, A.: *Netelevizní zobrazovací systémy*. VUT – Brno 2001. str. 174  
 [2] SAZIMA, M., a kol.: *Sdílení tepla*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Technický průvodce 78, 1993. 716 str., ISBN 80-853541-42-5  
 [3] HELL, F.: *Grundlagen der Wärmeübertragung*. VDI – Verlag 1979. 254 str., ISBN 3-18-400442-2  
 [4] FLIR Systems: Firemní literatura  
 [5] CIHELKA, J. a kol.: *Vytápění a větrání*. Praha SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1975. 704 s. ISBN 04-216-75  
 [6] SVOBODA, J.: *Soudobá špičková termografická technika*. Internetový měsíčník Automa č. 1/ročník 2003 www.automa.cz/automa 2003/au010325.htm  
 [7] KREIDER, J., F., KREITH, F.: *Solar Heating and Cooling*. Washington McGraw – Hill Book Company, 1977. 342 p. ISBN 0-07-035473-1. ■

**\* Detekční systémy Dräger pro výbušné a toxické plyny**

S dlouhou zkušeností výrobce detekčních a měřicích systémů nabídla firma Dräger Safety AG na veletrhu AICHEMIA 2003 inovaci pevných a přenosných přístrojů pro výbušné a toxické plyny.

Nový pevný varovný systém Polytron SE Ex LC M pro hořlavé plyny a páry, mj. pro čpavek, ethylen, metan, propan, propylen a vodík, pracuje v rozsahu 0 až 100 % dolní meze výbušnosti se zvýšenou citlivostí měření v rozsahu teplot -40 až 85 °C. Pro sledování úniků u plynových turbin a kotlů vytápěných zemním plynem do teplot až 150 °C a v měřicím rozsahu 0 až 100 % dolní meze výbušnosti je určen nový varovný systém Polytron SE Ex HT. Oba přístroje mohou být připojeny na vyhodnocovací jednotku Regard-1 s volně stavitelným detekčním práhem a typem varování pro všechny výbušné a toxické plyny a kyslík. Všechny přístroje s kompenzací vlivu teploty a vlhkosti prostředí jsou schváleny v kategorii II 2 G pro zóny 1 a 2 dle přísnějších požadavků směrnice 94/9/EG (ATEX).

Novinkou je přenosný detekční přístroj Pac Ex 2, jenž je k dispozici ve dvou verzích; jako detekční a varovný přístroj na bázi katalytického senzoru pro výbušné a toxické plyny nebo jako kombinovaný přístroj vybavený kyslíkovým elektrochemickým senzorem. Lehký a pouze 250 g vážící kapselní přístroj s ovládacím tlačítkem pracuje na NiMH akumulátor nebo alkalické baterie.

S informacemi o 1400 nebezpečných látkách provozuje Dräger Safety informační databázi Voice na stránce www.draeger.com/voice s možností stažení informací přes Download-Center ve formátu pdf.

*Dräger Safety AG, Lübeck* (AB)

**\* Přenosné generátory s PEM palivovými články**

Francouzská firma Axane, 100 % dceřiná firma světového výrobce technických plynů Air Liquide, předvedla na veletrhu v Hannoveru své první přenosné generátory elektrického proudu s palivovými články PEM, poháněnými vodíkem 99,99 % o tlaku 30 kPa.

Předchůdcem řady generátorů s modulárním konceptem EVOPAC, používajícím kombinaci 4 modulů s výkony 0,5, 2,5 a 10 kW, byl v roce 2002 generátor POLAR PAC s nominálním výkonem 200 W/24 V a hmotností 50 kg, poprvé použitý k napájení přístrojů na severním pólu francouzským polárníkem Jeanem-Louisem Etienneem. Následoval přenosný BACK PAC o hmotnosti 15 kg (bez paliva), rozměrů 500 x 300 x 400 mm (d x š x v) a s výkonem 0,5 kW/230 V~ nebo 12 či 48 V a v roce 2003 přenosný či pojízdný ROLLER PAC s výkonem 2 kW/230 V~, hmotnosti 75 kg (bez paliva) a o rozměrech 540 x 640 x 980 mm. Ten se používá např. jako zdroj pro osvětlovací balon pro hasiče a policii na místě zásahu nebo jako zdroj regulační techniky. Zaručovaná životnost palivového článku je min. 2000 h; měrnou spotřebu vodíku informace neuvádí.

Výhodou bezemisních generátorů s PEM články je rychlé dosažení plného výkonu do 5 s, tichý provoz, možnost dálkového ovládacího a použití v uzavřených prostorech. Kombinace modulů pro vozidla s hybridním pohonem byla ověřena do výkonu 20 kW.

*Air Liquide – Axane Fuel Cell Systems, Sasenage* (AB)

**\* Chlad z propanu pro výrobu kosmických raket**

Pouze po půl roce projektování a po roce výstavby bylo koncem roku 2002 uvedeno do provozu Arianecentrum v Ottobrunnu. V tomto vysoce technicky vybaveném sesterském středisku závodů EADS budou vyráběny součásti pětistupňových evropských raket Ariane o výkonu cca 2,9 milionů kW.

Pro zásobování klimatizačních zařízení studenou vodou (6/12 °C) a k chlazení strojů svářecích a erodovacích zařízení (12/18 °C) je třeba 1 200 kW chladicího výkonu. Stavebník se zde rozhodl pro dva propanové chladicí agregáty vody – pilotní projekt v této velikosti první v celé Evropě.

Argumenty pro použití propanu jako chladiva (R 290) jsou jeho převážně pozitivní vlastnosti. Je to přírodní chladivo, velmi málo toxické (hodnota MAK 1000 ppm), je netečné při styku s běžnými kovy a elastomery a vykazuje vysokou rozpustnost v mazivech. Propanová zařízení mají malou energetickou potřebu, jejich objemový chladicí výkon je velmi podobný R 22, provoz i při -20 °C je bezproblémový. Jsou však i nevýhody – propan je výbušný (polohermetické kompresory odpovídající zóně ohrožení 2 podle směrnice o ochraně před výbuchem). Zejména pak ve zde potřebných výkonostních třídách je tato technika málo vyzkoušena a zatím nejsou k dispozici žádné sériové stroje v požadované výkonové velikosti.

S přihlédnutím k výše zmíněným výhodám i nevýhodám bylo nakonec rozhodnuto přistoupit k této neobvyklé stavbě s chladivem R 290.

*CCI 12/2003* (Ku)

**\*Chlad z odpadního tepla biomasy**

Od začátku roku 2004 nahradí energetická centrála univerzity v Ulmu, SRN zastaralý chladicí turboagregát novým dvoustupňovým absorpčním chladicím agregátem s chladicím výkonem 5 MW. K pohonu absorpčního procesu potřebný tepelný výkon dodá v Číně vyrobený absorber odpadního tepla elektrárny vytápěné biomasou. Tak zde vznikne v Evropě a snad i ve světě největší kogenerační zařízení na bázi biomasy jako primární energie.

*CCI 11/2003* (Ku)