



Česká metrologická společnost

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.csvts.cz/cms

Kalibrační postup

KP 3.2.3/02/13

TERMOKAMERY

radiometrické infračervené kamery

Praha
Říjen 2013

Vzorový kalibrační postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie

Číslo úkolu: VII/1/13

Zadavatel: Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

Řešitel: Česká metrologická společnost

© ÚNMZ, ČMS

Neprodejné: Metodika je volně k dispozici na stránkách ÚNMZ a ČMS. Nesmí však být dále komerčně šířena.

1 Předmět kalibrace

Tento metodický postup platí pro kalibraci termokamer. Termokamera je optoelektrické zařízení navrženo pro bezkontaktní pozorování, měření a 2D záznam rozložení radiální teploty objektů v zorném poli přístroje pomocí sekvencí termogramů a pro určení teploty povrchu objektu na základě známého záření a ovlivňujících parametrů (např. teplota okolí, prostup atmosférou, vzdálenost). V tomto textu je použito následujících zkratk:

IČ – infračervený,

ČT – černé těleso.

2 Související normy a metrologické předpisy

OIML R 141:2008 (E)	Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instrument	[1]
EA - 04/02	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2), DEC 1999)	[2]
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)	[3]
CCT - WG5	Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point	[4]
EA - 04/07 M	Návaznost měřicího a zkušebního zařízení na státní etalony (Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards (previously EAL-G12), NOV 1995)	[5]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří	[6]
ČSN EN ISO 10012	Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení	[7]
VDI/VDE 3511	Radiation thermometry – Calibration of radiation thermometers (2004)	[8]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci termokamer je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s kalibračním postupem a souvisejícími předpisy. Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným způsobem například osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod.

4 Názvosloví, definice

Černé těleso (ČT) – (Absolutně) černé těleso pohlcuje veškeré záření na něj dopadající zářivý tok. Z Kirchhoffova zákona dále vyplývá, že (absolutně) černé těleso je také

dokonalý zářič. Dokonalý zářič při dané teplotě vyzařuje za 1 sekundu z plochy 1 m^2 v jednotkovém spektrálním intervalu maximální počet fotonů v jednotce času z jednotky plochy v určitém spektrálním intervalu do hemisféry - polokoule. Emisivita (absolutně) černého tělesa je rovna 1,0. V technické praxi bývá za toto těleso považován přístroj s emisivitou $\varepsilon \geq 0,95$.

Bod zaostření (Focal point): Bod – ploška na objektu, na který je zaostřen (pomocí optiky přístroje) detektor přístroje. U skenerů nebo zobrazujících systémů je to bod, ve kterém je nejmenší okamžité zorné pole (IFOV - instantaneous field of view).

Doba náběhu (Rise Time): Čas potřebný k tomu, aby se výstupní signál čidla nebo systému změnil po skokové změně vstupního signálu z jedné určité hodnoty (typicky z 10 %) na druhou určitou hodnotu (typicky na 90 %).

Doba zahřátí (Warm-Up Time): Doba, která uplyne od zapnutí přístroje do dosažení technickými parametry předepsané reprodukovatelnosti (měření).

Doba odezvy (časová konstanta), (Response time): Doba odezvy (časová konstanta přístroje) je čas potřebný k tomu, aby odezva (přístroje - výstupní signál či zobrazená hodnota) dosáhla po skokové změně vstupního signálu (teploty) 63,2 % ustálené hodnoty. (Za čas, který je přibližně 5násobkem časové konstanty dosáhne přístroj cca 95 % ustálené hodnoty).

Doba ustálení (Settling Time): Doba ustálení je definována jako časový interval mezi okamžikem, kdy dojde ke (skokové) změně vstupního signálu a okamžikem, kdy se výstupní signál ustálí na nové hodnotě.

Emisivita (Emissivity) ε : Emisivita je poměr celkové vyzařované energie z určitého povrchu při dané teplotě k celkové vyzařované energii (absolutně) černého tělesa při té samé teplotě. Emisivita může být celková, směrová nebo hemisférická. Emisivita se udává v poměrných číslech v intervalu od 0 do 1, kdy emisivita (absolutně) lesklého tělesa se rovná 0 a emisivita (absolutně) černého tělesa je rovna 1.

Efektivní emisivita (Effective emissivity ε^*): Je to měřená nebo měřitelná hodnota emivity části povrchu tělesa při určitých podmínkách měření, která může být použita pro korekci výsledků měřených teplot získaných specifickými měřicími přístroji.

Lambertův povrch (Lambertian surface): Je to povrch s difuzním (rozptylujícím) odrazem, kdy odražené záření z takového povrchu je všech směrech stejné. (Absolutně) černé těleso je ideálním Lambertovým zdrojem.

Šedé těleso (Greybody): Objekt, jehož emisivita je menší než 1, ale je konstantní v určitém spektrálním pásmu – rozsahu spektrálního pásma.

Nešedé těleso (Non-grey body): Objekt, jehož emisivita se mění s vlnovými délkami. Tento objekt nemá vlastnosti (absolutně) černého tělesa a může být také částečně transparentní (propustný) - propouští IČ energii na určitých vlnových délkách; tato tělesa se někdy nazývají “reálná tělesa”. Příkladem nešedých (reálných) objektů může být např. sklo nebo plastická fólie. Reálné těleso může mít v určitém spektrálním intervalu vlastnosti

šedého tělesa a v jiném spektrálním intervalu vlastnosti nešedého – reálného tělesa.

Poměr signálu k šumu (Signal-to-noise ratio): Poměr hodnot signálu (odezvy, která obsahuje relevantní - podstatné, týkající se - informace) k základním hodnotám šumu (odezvy, která obsahuje nerelevantní - nepodstatné, netýkající se informace). Ekvivalentní šum – šum rovnající se rozdílu teplot mezi dvěma černými tělesy, který na výstupu systému produkuje takovou úroveň elektrického signálu, že podíl úrovně signálu k šumu (Signal -to- Noise Ratio) SNR = 1.

Poměr (ukazatel) velikosti bodu (Spot size ratio): Průměr kruhu utvořený příčným řezem v zorném poli optického systému vzhledem k dané vzdálenosti. Je to inverzní funkce velikosti zorného pole. Skutečně změřené rozlišení radiometrického systému a to včetně optické, mechanické a elektrické části systému. Je ve vztahu k nejmenší velikosti objektu vzhledem k jeho největší vzdálenosti, kdy je zaručeno správné měření teploty.

Šum (Noise): Jakékoliv nežádoucí signály, které ruší normální příjem nebo zpracování užitečného signálu. Šum může být způsoben elektrickým, fotonovými, tepelnými nebo akustickými zdroji.

Šum ekvivalentní rozdílu teplot (Noise Equivalent Temperature Difference), (NETD): Šum ekvivalentní – rovnající se rozdílu teplot mezi dvěma černými tělesy, který na výstupu produkuje takovou úroveň elektrického signálu, že podíl úrovně signálu k šumu (Signal -to- Noise Ratio) SNR = 1.

Šum pozadí (Background Noise): Celkový rušivý šum od všech zdrojů z pozadí, který je snímán přístrojem a který je nezávislý na datovém signálu.

Zákon Kirchhoffův (Kirchhoff's law): Součet všech složek zářivého toku dopadajícího na obecné těleso, které je v termodynamické rovnováze se svým okolím, které se rozdělí na složku pohlcení – absorpce, odrazu – reflexe a propustnosti (přestupu) – transmise se rovná 1. V zájmu zachování energie musí být pohlcený (absorbovaný) a vyzářený (emitovaný) tok na všech vlnových délkách a ve všech směrech při dané teplotě stejný ($\alpha = \varepsilon$).

Zákon vyzařovací Planckův (Planck's distribution law): Základní zákon, který uvádí do vztahu spektrální měrnou zářivost (výkon generovaný z jednotky plochy povrchu zdroje na dané vlnové délce do jednotkového prostorového úhlu) ideálního zdroje (ČT) při dané (absolutní) teplotě zdroje.

Zákon Stefan-Boltzmannův (Stefan-Boltzmann law): Vztah udávající, že poměr vyzařování zářivé energie z jednotkové plochy je nezávislý na vlnových délkách zářivé energie. Zákon udává vztah mezi celkovou intenzitou záření a čtvrtou mocninou absolutní teploty a emisivitou povrchu objektu. Na příklad intenzita vyzařování (tepelný tok) z kostky mědi o teplotě 100 °C je 300 W.m⁻². Stefan-Boltzmann konstanta je 5,67 x 10⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴.

Zákon posuvu Wienův (Wien's displacement law): Udává závislost změny maxima spektrální intenzity vyzařování (ve vztahu k vlnovým délkám) na teplotě absolutně černého tělesa

Zorné pole (Field of view): Velikost oblasti, ve které je možné zobrazit (vidět) objekty pomocí zobrazovacího systému, objektivů nebo průzorů. Je to délka tělivity daného úhlu (vyjádřeného ve stupních nebo radiánech), ve kterém bude přístroj integrovat veškerou energii na něj dopadající zářivou energií. U skenovacích nebo zobrazujících systémů se zorným polem rozumí úhel skenování nebo velikost obrazu nebo celkové zorné pole.

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

Základním vybavením potřebným pro kalibraci IČ teploměrů a kamer jsou černá tělesa. Rozlišujeme 2 druhy – deskové a kavitové (dutinové). Oba druhy mají své výhody i nevýhody, alespoň některé z nich budou uvedeny v následujících odstavcích.

5.1 Terčové ČT

Nespornou výhodou tohoto druhu černých těles je jejich dobrá dostupnost a relativně nízká cena na trhu. Díky jejich velkému průměru zářící plochy je možné, je možné na tomto typu ČT provádět kalibrace IČ teploměrů, které mají nízkou hodnotu D:S parametru. Přechod z jedné teploty na druhou bývá poměrně rychlý. Důležité ovšem je znát teplotní rozložení na povrchu terče, protože není fyzikálně možné, aby plocha umístěná ve vertikálním směru měla všude stejnou teplotu. Zejména při vyšších teplotách mohou být teplotní rozdíly na ploše větší i o více než 1 °C, a tato skutečnost musí být zohledněna při stanovení celkové nejistoty měření. Krátkodobá stabilita tohoto typu černých těles se pohybuje v rozmezí desetin, což je další složka nejistoty, která nesmí být opomenuta. Na tomto typu ČT je možné kalibrovat pouze teploměry, pracující při stejné vlnové délce, jinak je měření zatíženo velkou chybou. Emisivita u těchto přístrojů bývá nejčastěji 0,95.

Teplota u tohoto typu ČT bývá monitorována snímačem, který bývá většinou zabudovaný přímo v zařízení a není možné ho nijak samostatně kalibrovat. Proto musí být zařízení kalibrované jako celek, a ve schématu návaznosti ho proto najdeme zařazené na sekundární úrovni, těsně nad pracovními měřidly.

5.2 Dutinové ČT

Kavitová černá tělesa vyzařují záření z dutiny, která má nejčastěji válcový nebo kulovitý tvar. Vstupní otvor do kavity nebývá příliš velký (průměr max. 50 mm), a proto za jejich pomoci bývá dosti obtížné provádět kalibrace teploměrů, které mají nízkou hodnotu parametru D:S. Závislost tohoto typu ČT na vlnové délce je výrazně nižší než u těles terčových, tudíž je možné provádět kalibrace teploměrů pracujících i při jiných vlnových délkách, a toto měření je zatíženo chybou, která se zahrne do výpočtu nejistot.

Díky geometrii, konstrukci a typu použitých materiálů se emisivita tohoto typu černých těles pohybuje v rozmezí (0,99 až 1,00).

Teplotu u tohoto typu ČT bývá možné monitorovat i jiným, než vestavěným senzorem, a tento senzor je možné nechat přímo navázat na stupnici ITS-90 kontaktním způsobem. Z termoelektrického článku nebo odporového snímače můžeme lehce odečíst teplotu i v řádech setin, a proto tento typ ČT umožňuje realizaci výrazně přesnějších měření. Teplotní stabilita a homogenita kavitového ČT je ovlivněna konstrukcí samotného zařízení. Nejlepší stabilitu a homogenitu poskytují černá tělesa, jejichž kavita je tvořena teplotní trubici. Teplotní trubice je hermeticky uzavřena, a uvnitř se nachází médium, např. voda, nebo sodík, a prostor nad hladinou této látky je vyplněn jejich párami. Princip tepelné

trubice je založen na přenosu tepla, ke kterému dochází při kondenzování a odpařování média. Bude-li jeden konec ohříván a na druhém se nachází chladič, začne se pracovní médium odpařovat. V důsledku toho roste tlak, na chlazeném konci páry kondenzují a předávají tak teplo, které bylo spotřebováno k odpaření. Kondenzát teče, nebo vzlíná zpět a tak to jde stále dokola.

Dále může být kavita ponořena do kapalinové lázně. Kapalina omývající kavitu generuje uvnitř ní teplotu. Je důležité zabezpečit, aby kavita byla zhotovena z materiálu, který dobře vede teplo. Teplota uvnitř kavity je regulovaná pomocí teploty proudícího média, která může být dobře kontrolována pomocí odporového teploměru. Teplotní homogenita a stabilita u takto zkonstruovaných ČT bývá v řádech desetin, a nejčastěji se tento typ ČT používá pro měření teplot v rozsahu (-80 až 40) °C.

Třetím typem, jakým může být ČT zkonstruováno, je, že kolem dutiny ČT je umístěno topení (topná spirála), která by měla být umístěna rovnoměrně podél celé délky kavity, pro dosažení co nejlepší homogenity.

Práce s tímto typem ČT vyžaduje spoustu času, dosažení požadované teploty se pohybuje v řádu hodin (závisí na rozměrech), avšak poskytují výhodu v malé závislosti na vlnové délce, lepší teplotní stabilitě a homogenitě a výrazně vyšší emisivitě.

Na základě všech výše zmíněných vlastností se tyto typy ČT nacházejí ve schématu návaznosti na výše než tělesa terčového typu.

Měřidla a pomocná měřicí zařízení

- Měřidlo délky.

Pro měření pomocí bezkontaktních teploměrů je důležité znát vzdálenost, ze které měření probíhá, protože velikost měřicího bodu je závislá právě na vzdálenosti. Se vzdáleností úzce souvisí také zaostření kamery.

- Čisticí prostředky na optiku.

Aby na detektor dopadalo co nejvíce signálu, je potřeba odstranit z optické cesty (prostor mezi měřeným objektem a měřidlem) všechny překážky. Ty představují i nečistoty, které se mohou časem nachytat na optice přístroje. Při výběru těchto prostředků je důležité dbát na to, aby nedocházelo k chemické reakci s ochrannou vrstvou, kterou může být optika pokryta, případně aby se zabránilo vzniku škrábanců.

- Štěrbiny.

Při měřeních, která probíhají na malé ploše, je dobré znát, jakým způsobem se mění procento dopadajícího signálu se zmenšující se vyzařovací plochou. Tuto skutečnost je možné nejlépe zjistit pomocí štěrbin o různých velikostech. Laboratoř může mít k dispozici štěrbinu, která umožňuje spojitou změnu velikosti anebo sadu štěrbin o různých průměrech.

- Inertní plyn a k tomu příslušející příslušenství.

Při měření teplot nižších, než je rosný bod, dochází na povrchu ČT ke vzniku kapek vody, případně ke vzniku námrazy při teplotách nižších než je 0 °C. Proto se kalibrace IČ teploměrů a kamer při těchto podmínkách stává výrazně časově náročnější než při teplotách nad rosným bodem. Pro zmírnění tohoto efektu bývá možné k černému tělesu připojit zdroj inertního plynu, který před zářivou plochou vytvoří plynovou vrstvu, která alespoň zpomalí tvorbu náledí či kapek vody. Jako inertní plyn může být použit například suchý vzduch nebo argon.

Podrobný seznam etalonů a měřicích zařízení je uveden v databázi etalonů. Jedná se o soubor černých těles v deskovém nebo dutinovém provedení, která nastavují teplotu buď pomocí vestavěného elektronického regulátoru teploty, nebo kde je teplota generována pomocí jiného zařízení (např. kapalinový termostat).

Ostatní zařízení

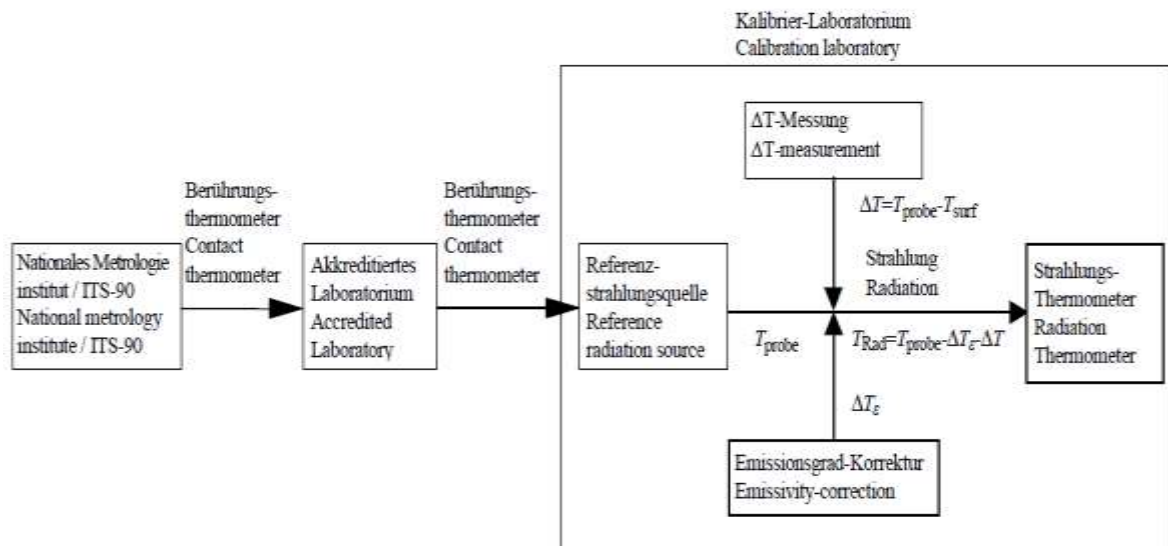
Do ostatních prostředků patří:

- měřidlo teploty a vlhkosti okolí,
- souprava nářadí,
- lupa, posuvné měřítko, metr (například ocelové měřítko),
- stojánek nebo jiné prostředky pro uchycení teploměru.

Návaznost

Návazností rozumíme zajištění vazby použitého etalonu (etalonového zařízení) na etalon vyšší (metrologické) úrovně. Metrologická návaznost je zajištěna pomocí soustavy černých těles a etalonového pyrometru. V technické praxi v laboratořích je nejčastěji používají následující typy návazností:

Návaznost pomocí kontaktních senzorů teploty (VDI/VDE 3511)

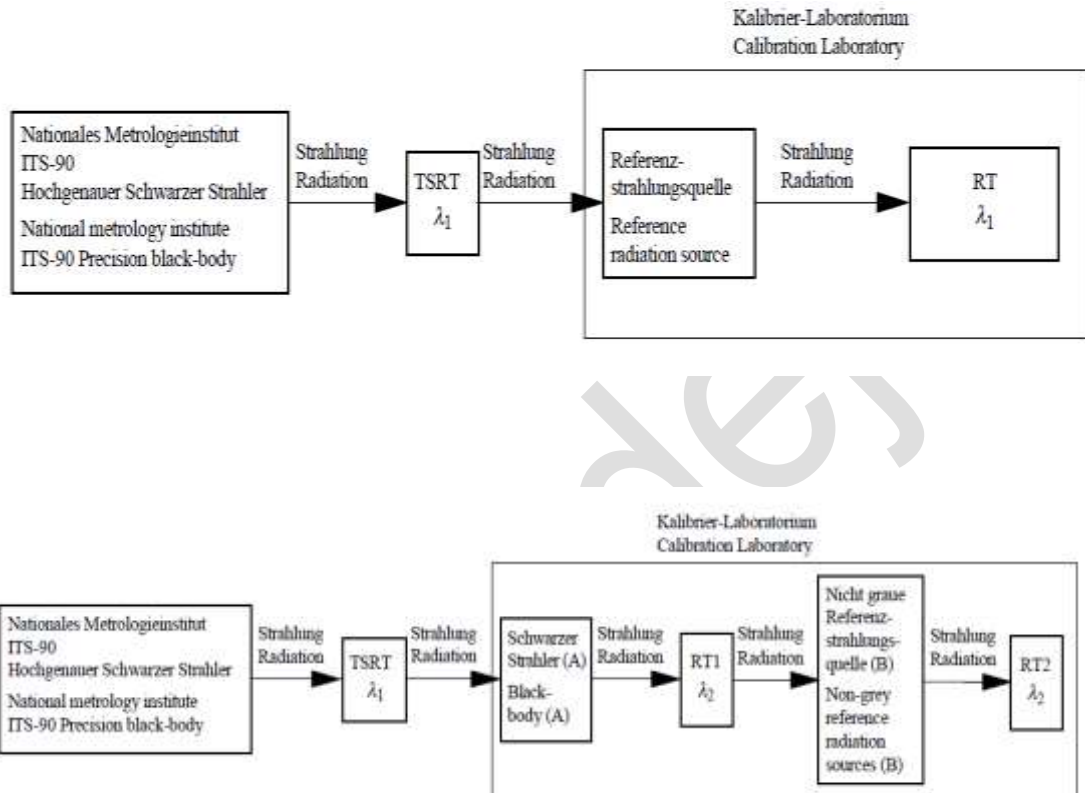


Zde je v černém tělese implementován kontaktní teploměr, který je kalibrován podle mezinárodní teplotní stupnice (ITS-90).

Návaznost je založená na referenčním infračerveném teploměru (VDI/VDE 3511)

Zde je jako referenční používán tzv. *transfer standard* (TRT), který je kalibrován pomocí referenčního ČT s návazností na teplotní stupnici ITS-90. Zde přicházejí v úvahu dva scénáře:

- kalibrace bez změny vlnových délek,
- kalibrace se změnou vlnových délek.



První část je aplikována na šedé těleso, kdy emisivita nezávisí na vlnové délce referenčního teploměru. To platí hlavně pro kavitová tělesa s dobrou radiální i axiální homogenitou teplotního pole.

Jedná-li se o těleso nešedé (nejčastěji kalibrační terč), je nutné brát v úvahu změnu emisivity s vlnovou délkou a používá se další referenční teploměr odpovídající kalibrovanému infračervenému teploměru.

Také ostatní měřidla a měřicí prostředky použité při kalibraci termokamer, musí být navázány na vhodné etalony a mít platnou kalibrační lhůtu.

6 Obecné podmínky kalibrace

Proces kalibrace by měl být uskutečňován ve stabilních vnitřních prostorách, v teplotním rozmezí (20 až 25) °C a s relativní vlhkostí prostředí mezi (40 až 80) %, jestliže není v specifikaci přístroje uvedeno jinak. Zařízení by nemělo být vystaveno nárazům,

vibracím, vnějšímu elektromagnetickému poli nebo externímu zdroji záření, které by mohly ovlivňovat měření.

- Teplota prostředí: $(22,5 \pm 2,5) \text{ } ^\circ\text{C}$,
- Změna teploty vzduchu: max. $1 \text{ } ^\circ\text{C/h}$,
- Relativní vlhkost vzduchu: max. 80 % RH, nekorozní a nekondenzující prostředí.

7 Rozsah kalibrace

Kalibrace termokamer se skládá z následujících částí:

Metoda (kalibrace)	Činnost prováděna standardně nebo pouze na přání zákazníka (volitelně)	Nutnost provedení při	
		prvotní kalibraci	periodické kalibraci
Vnější prohlídka	Standard	Ano	Ano
Test a funkční zkouška termografického zařízení při různých podmínkách	Standard	Ano	Ano
Šum detektoru	Volitelně	Ano	Ano
Stanovení poškozených citlivostních elementů (pixelů)	Volitelně	Ano	Ano
Stanovení zorného pole a skutečného zorného pole	Volitelně	Ano	Ne
Stanovení prostorového rozlišení	Volitelně	Ano	Ano
Kontrola měřicích rozsahů a stanovení přesnosti měření radiační teploty	Standard	Ano	Ano
Stanovení citlivosti na nerovnoměrnosti	Volitelně	Ano	Ne
Ověření vlivu okolních podmínek na chování přístroje	Volitelně	Ano	Ne
Stanovení opakovatelnosti měření přístroje	Volitelně	Ano	Ne

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

8.1 Vnější prohlídka a kontrola konstrukčního provedení

Vnější prohlídka se provádí u všech kalibrovaných kamer. Kontroluje se zejména:

- Kompletnost sady a shoda označení termokamery s jejím identifikačním štítkem,

- vnější poškození termografického přístroje (poškození může mít vliv na metrologické vlastnosti měřidla).

Měřidlo, u kterého se zjistí chyba nebo nespĺňuje požadavky určené předpisy, se nepřijme ke kalibraci.

8.2 Test a funkční zkouška přístroje

Tato část slouží k seznámení s kalibrovaným přístrojem. Zařízení je zapnuto a je zkontrolováno jeho provedení v souladu s dodaným návodem. Následně je přístrojem zaměřeno na zdroj IČ záření a je zkontrolovaná funkčnost kalibrovaného přístroje.

8.3 Příprava měřidla

Termokamera musí být umístěna v laboratoři za podmínek uvedených v článku 6, minimálně 8 hodin před začátkem kalibrace, nestanoví-li výrobce jinak. Baterie musí být nabitá a záznamová karta musí mít dostatečnou kapacitu pro vlastní měření.

9 Postup kalibrace

9.1 Stanovení šumu detektoru

Měření je prováděno z takové vzdálenosti, která zaručuje plné pokrytí zorného pole přístroje zářičem IČ záření. Teplota černého tělesa je nastavena na 30 °C. Objektivem termokamery je zaostřeno doprostřed černého tělesa, a termokamera je zafixovaná v této pozici. V krátkém časovém intervalu jsou pořízeny dva snímky – termogramy. Pomocí softwaru dodaného s kamerou nebo vztahu (1) je spočítán teplotní rozdíl Δt_{ij} (°C) z pořízených obrazů, tj. jsou od sebe odečítány hodnoty korespondujících si pixelů.

$$\Delta t_{ij} = t_{ij}^{(1)} - t_{ij}^{(2)}, \quad (1)$$

$t_{ij}^{(1)}$ je teplota pixelu se souřadnicemi (i, j) v prvním termogramu (°C),

$t_{ij}^{(2)}$ je teplota pixelu se souřadnicemi (i, j) v druhém termogramu (°C),

Následně je spočítán teplotní rozlišení Δt_{NETD} uváděné ve °C podle vztahu:

$$\Delta t_{\text{NETD}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y (\Delta t_{ij} - \bar{\Delta t})^2}{X \cdot Y}}, \quad (2)$$

kde:

Δt_{ij} je teplotní rozdíl sensitivních elementů získaný podle vztahu (1)

$\bar{\Delta t}$ je průměrná hodnota teplotních rozdílů

X je počet pixelů v horizontálním směru

Y je počet pixelů ve vertikálním směru.

NETD popisuje nejmenší možnou teplotní diferenci, která může být získána pomocí přístroje. Nízká hodnota NETD zaručuje rozlišení malých teplotních rozdílů. V praxi to

znamená, že čím menší je tato hodnota, tím můžeme pomocí přístroje dosáhnout lepšího měření a získáme lepší kvalitu obrazu.

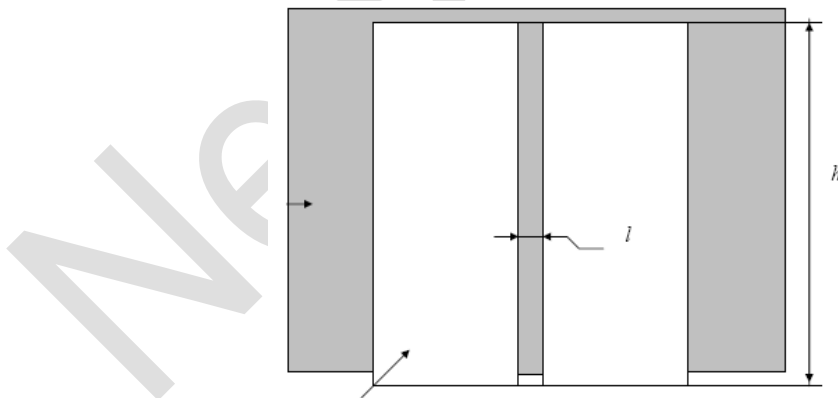
Pro tuto část práce je důležité, aby software určený pro zpracování naměřených dat umožňoval jejich export do formátu txt nebo xls, které jsou potřebné pro numerický výpočet hodnot Δt_{ij} a NETD.

9.2 Stanovení počtu poškozených elementů (pixelů) v termogramu

Přístrojem je zaměřeno doprostřed zdroje IČ záření, a přístroj je zafixován v této pozici. Je pořízen záznam snímané plochy, a za pomoci dodaného softwaru jsou identifikovány poškozené citlivé elementy – pixely. Odchylka teploty jednotlivých pixelů δt (°C) od střední hodnoty spočítané ze všech teplot nacházejících se v termogramu (°C) by neměla překročit hodnotu teplotního rozlišení (NETD) o víc než 6x. Pixely, pro které není tato podmínka splněná, označíme jako chybné. Počet chybných pixelů nesmí překročit hodnotu 0,3 % z celkového počtu pixelů.

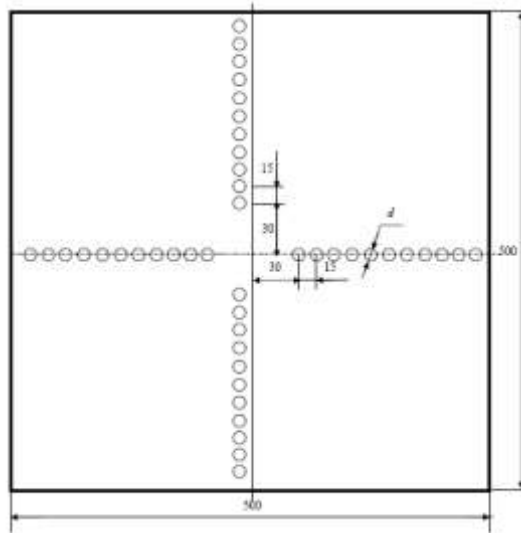
9.3 Určení zorného úhlu a skutečného zorného úhlu přístroje

Při tomto testu je teplota černého tělesa (ČT) nastavena na hodnotu 30 °C. Před ČT jsou umístěny štěrbininy s různou šířkou (obr. 1) ve vzdálenosti (1 až 3) cm od ČT. Černé těleso se štěrbinou je umístěno tak, aby se nacházelo uprostřed snímané plochy termokamerou. Operační mód kamery by měl umožnit její co největší citlivost. Nejdřív je před těleso umístěna štěrbinina s největší šířkou. Jako pracovní vzdálenost R je zvolena taková vzdálenost, při které pomocí kamery dostaneme nejvyšší hodnoty teplot uvnitř štěrbin.



Obrázek 1: Štěrbina s proměnnou šířkou l

Teplota ČT je nastavena na 30 °C. Objekt s malými otvory (obr. 2) je umístěn před ČT ve vzdálenosti (1 až 3) cm. ČT s objektem je umístěn tak, aby se nacházel uprostřed snímané plochy. Měření je prováděno ze vzdálenosti R .



Obrázek 2: Objekt s malými otvory

Krajní otvory, jak v horizontálním tak ve vertikálním směru, jsou zaznamenány na získaném termogramu. Vzdálenost mezi otvory je změřena jak v milimetrech, tak v pixelech. Skutečný zorný úhel přístroje (IFOV) γ (rad) je pak spočítán podle vztahu:

$$\gamma = \frac{2}{a} \arctg \frac{A}{2R}, \quad (3)$$

kde:

a je vzdálenost mezi krajními otvory v pixelech,
 A je vzdálenost mezi krajními otvory v milimetrech,
 R je pracovní vzdálenost (v mm).

Zorný úhel v horizontálním φ_x a vertikálním φ_y směru (ve stupních) je určeno pomocí vztahů:

$$\varphi_x = \gamma \cdot X \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

$$\varphi_y = \gamma \cdot Y \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (5)$$

kde:

γ je skutečný zorný úhel uváděný v radiánech,

X je počet pixelů v horizontálním směru,

Y je počet pixelů ve vertikálním směru.

Spočítané hodnoty IFOV s zorných úhlů φ_x a φ_y by měly odpovídat hodnotám uvedeným v manuálu nebo hodnotám nacházejícím se v technickém popisu přístroje.

9.4 Stanovení geometrického (úhlového) rozlišení

Teplota ČT je nastavena na 30 °C a deska s malými otvory je umístěna před ČT ve vzdálenosti (1 až 3) cm. Měření je prováděno z pracovní vzdálenosti R . Krajní otvory, jak

v horizontálním tak vertikálním směru, jsou zaznamenány na termogramu. Vzdálenost mezi těmito body je změřena jak v milimetrech tak pixelech. Poměrový parametr k je určen jako poměr vzdáleností mezi dvěma navzájem si odpovídajícími otvory v termogramu (v pixelech) a na desce (v milimetrech).

Teplota ČT je nastavena na 30 °C. Ve vzdálenosti (1 až 3) cm od ČT jsou umístěny štěrbinové s různou šířkou ve vertikálním směru. Nejdříve je před ČT umístěna štěrbinová s největší šířkou a je provedeno měření. V termogramu je nalezena maximální teplota zaznamenaná v štěrbině t_{max}^t (°C). Stejně měření jsou provedeny i se štěrbinami s jinou šířkou a dále jsou provedeny stejné měření se štěrbinami, které jsou umístěny horizontálně. Na základě měření jsou spočítány hodnoty štěrbinového rozlišení K_S podle vztahu:

$$K_S = \frac{t_{max}^t - t_0^t}{t_s - t_0^t} \quad (6)$$

kde:

t_{max}^t je maximální hodnota teploty změřená ve štěrbině se šířkou A (°C),
 t_0^t je průměrná teplota změřená ve štěrbině (°C),
 t_s je maximální teplota zaznamenaná ve štěrbině s maximální šířkou (°C).

Na základě naměřených hodnot ve štěrbině se šířkou A (mm), může být spočítána šířka štěrbinové (px) v termogramu pomocí vztahu:

$$a = A \cdot k \quad (7)$$

kde:

a je šířka štěrbinové v px,
 A je šířka štěrbinové v mm,
 k je poměrový parametr (px/mm).

Na základě získaných výsledků je možné stanovit závislost štěrbinového rozlišení K_S na šířce štěrbinové a (px) – SRF (*Slit Response Function*):

$$SRF = K_S(a) \quad (8)$$

Pro tento test je velmi důležité, aby kamera byla dodána s držákem nebo standardním závitem k upevnění na stativ, aby byly dosaženy správné výsledky, zejména při testech s velmi malou šířkou štěrbinové.

Kamera prošla tímto testem úspěšně, jestliže hodnoty K_S dosažené při stejné šířce štěrbinové umístěné v horizontálním a vertikálním směru jsou co nejpodobnější, viz Tab. 2.

9.5 Přesnost měření radiální teploty

Měření jsou prováděna z takové vzdálenosti od ČT, která zaručuje, že ČT bude pokrývat více než 20 % zorného pole termokamery a vyzářovací plocha se nachází uprostřed termogramu. Přesnost měřicího přístroje je určena pro alespoň tři body z pracovního rozsahu kamery (spodní hranice, vrchní hranice a bod mezi nimi) pro každý operační mód (teplotní rozsah) kamery. Pro každou teplotu je požádáno alespoň 5 měření. Průměrná hodnota radiální teploty je určena pomocí termogramu, kdy je vzata do úvahy emisivita

ČT a teplota pozadí záření. Přesnost termografického přístroje Δt (°C) je pro každou teplotu určena podle vztahu:

$$\Delta t = t_{90} - t_{mean}^t, \tag{9}$$

kde:

t_{mean}^t je střední hodnota teploty v oblasti vymezení v termogramu černé těleso,
 t_{90} je teplota černého tělesa.

9.6 Stanovení citlivosti na nespojitosti

Citlivost na nespojitosti ve snímané oblasti je určována v pěti bodech z pracovního teplotního rozsahu přístroje (spodní mez, vrchní mez a 3 body mezi nimi). Pro každý teplotní bod je pořízena sada měření, kdy zdroj IČ záření je nejdříve umístěn doprostřed snímané plochy, a následně do rohů obrazu. Pro každý takový bod je pořízena sada alespoň 5 snímků. Citlivost na nespojitosti ve snímané oblasti δt (°C) je pak spočítaná podle vztahu:

$$\delta t = \bar{t}_{max} - \bar{t}_{min} \tag{10}$$

kde:

\bar{t}_{max} je maximální teplota ze získaných průměrných hodnot,
 \bar{t}_{min} je minimální teplota získaná z vybrané oblasti v termogramu.

Tabulka 1: Příklad záznamu naměřených dat při stanovení citlivosti na nespojitosti ve snímané oblasti

Teplota zdroje záření t_{90} [°C]					
Průměrná hodnota naměřené teploty t_M [°C]	V levém horním rohu				
	V pravém horním rohu				
	Uprostřed				
	V levém spodním rohu				
	V pravém spodním rohu				
Maximální hodnota z průměrných hodnot \bar{t}_{max} [°C]					
Minimální hodnota z průměrných hodnot \bar{t}_{min} [°C]					
Citlivost na nespojitosti ve snímané oblasti δt [°C]					
Nejistota, $k = 2$ [°C]					

9.7 Vliv okolních podmínek na chování termokamery

Cílem tohoto testu je zjistit, jak se přístroj chová i za jiných podmínek, než jsou standardní laboratorní podmínky, protože se předpokládá, že kamera se bude používat i např. venku. Testování vlivu okolí je prováděno pro jeden z měřicích rozsahů přístroje. Kamera je umístěna do klimatické komory, která umožňuje změnu jak okolní teploty, tak i okolní vlhkosti. Malým otvorem v komoře je kamera zaměřena na ČT, kterého teplota je nastavena na 30 °C. V komoře jsou nastaveny výchozí podmínky, stejné jako obvyklé podmínky v laboratoři (např. 23 °C a 40 %RH). První měřená hodnota je změřená po aklimatizaci kamery na vnější podmínky. Následně jsou podmínky v komoře změněny –

teplota v komoře je nastavena na hodnotu (-10 až -15) °C a opět se čeká na ustálení vnějších podmínek a aklimatizaci přístroje. Následně je okolní teplota zvýšena na přibližně 40 °C. Při přechodu z minusových hodnot teplot na teploty vyšší je důležité dát pozor, aby nedocházelo ke kondenzaci, protože tím pak dochází k získání nesprávných výsledků. Při teplotě 40 °C dochází ke zkoumání vlivu vlhkosti na přístroj, vlhkost je nastavena na hodnoty cca (20 a 80) %RH. Nakonec jsou nastaveny stejné hodnoty, jako byly výchozí a po stabilizaci podmínek je odečtena poslední hodnota.

9.8 Stanovení vlivu proudění vzduchu

Tento test je prováděn pro 3 různé rychlosti proudění vzduchu. V pracovní vzdálenosti R od ČT je umístěna kamera. Černé těleso je nastavené na teplotu 30 °C. Pro každou rychlost proudění vzduchu je pořízeno alespoň 5 měření. Průměrná hodnota radiační teploty je určena jako průměr z naměřených hodnot pro jednotlivé rychlosti proudění, do úvahy je vzata emisivita ČT a teplota záření pozadí.

9.9 Opakovatelnost měření

Pro tento test je teplota ČT nastavena na hodnotu o 10 °C vyšší, než je teplota okolí. Černé těleso je umístěno doprostřed termogramu a po dobu 15 minut je každých (10 až 15) s získán snímek. Získané data se rozdělí do tří skupin, z nichž každá obsahuje data z intervalu trvajících 5 minut. Je spočítaná průměrná hodnota teploty v každé skupině, a rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou nesmí překročit hodnotu uvedenou v popisu zařízení.

10 Vyhodnocení kalibrace

Vyhodnocení spočívá v porovnání zjištěných a největších dovolených chyb, stanovení rozšířené nejistoty měření a posouzení shody s metrologickou specifikací. Na základě měření jednotlivých simulovaných bodů je provedeno celkové vyhodnocení kalibrovaného měřidla a je uvedeno do kalibračního listu.

- Vyhodnocení shody se specifikací se neprovádí, pokud není uvedena požadovaná přesnost měřidla nebo pokud ho zákazník nepožaduje,
- pokud měřidlo ve všech bodech vyhovuje, vyhovuje i celkově,
- pokud minimálně v jednom bodu nevyhovuje, nevyhovuje i jako celek
- pokud v jednotlivých bodech vyhovuje, a minimálně v jednom nelze rozhodnout, potom se v kalibračním listu žádné hodnocení neuvádí.

11 Kalibrační list

11.1 Náležitosti kalibračního listu

Kalibrační list by měl obsahovat minimálně následující údaje:

- a) název a adresu kalibrační laboratoře,
- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zadavatele, resp. zákazníka,
- d) název a identifikační číslo kalibrovaného měřidla, popřípadě jméno výrobce,
- e) datum přijetí termokamery ke kalibraci, datum provedení kalibrace a datum vystavení

- kalibračního listu,
- f) určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 3.2.3/02/13),
 - g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
 - h) měřidla použitá při kalibraci,
 - i) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),
 - j) výsledky měření a s nimi spjatou nejistotu měření a/nebo prohlášení o shodě s určitou metrologickou specifikací,
 - k) jméno pracovníka, který měřidlo kalibroval, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko kalibrační laboratoře.

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede přidělenou kalibrační značku a odkaz na akreditaci. Součástí kalibračního listu je též prohlášení, že uvedené výsledky se týkají pouze kalibrovaného předmětu a kalibrační list nesmí být bez předběžného písemného souhlasu kalibrační laboratoře publikován jinak než celý.

Pokud provádí kalibrační, resp. metrologická laboratoř kalibraci pro vlastní organizaci, může být kalibrační list zjednodušen, případně vůbec nevystavován. Výsledky kalibrace mohou být uvedeny např. v kalibrační kartě měřidla nebo na vhodném nosiči, popř. v elektronické paměti. I v tomto případě však musí kalibrační laboratoř zpracovat záznam o měření (s uvedenými měřenými hodnotami) a archivovat jej.

11.2 Protokolování

Originál kalibračního listu se předá zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního listu si ponechá kalibrační laboratoř a archivuje ji po dobu nejméně pěti let nebo po dobu stanovenou zadavatelem zároveň se záznamem o kalibraci. Doporučuje se archivovat záznamy a kalibrační listy chronologicky. Výsledky kalibrace se mohou v souladu s případnými podnikovými metrologickými dokumenty zanášet do kalibrační karty měřidla nebo ukládat do vhodné elektronické paměti.

11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedení kalibrace může kalibrační laboratoř označit kalibrované měřidlo kalibrační značkou, popř. kalibračním štítkem. Pokud to není výslovně uvedeno v některém podnikovém metrologickém předpisu, nesmí kalibrační laboratoř uvádět na kalibrační štítek datum příští kalibrace.

12 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku (viz čl. 13.1 tohoto postupu).

Změny, popř. revize kalibračního postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře nebo metrolog organizace).

13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

13.1 Rozdělovník

Kalibrační postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdržel útvar	Jméno	Podpis	Datum

13.2 Úprava a schválení

Kalibrační postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

14 Stanovení nejistoty měření (příklad výpočtu)

Nejistota kalibrace termokamery se skládá ze dvou hlavních částí:

- Nejistota realizace teploty ČT,
- vliv kamery.

Pro určení celkové rozšířené nejistoty měření je nutné stanovit a definovat jednotlivé složky této nejistoty, které jsou popsány v následujících odstavcích, podrobnější informace se nachází v dokumentu CCT-WG5: *Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point*.

Při výpočtu nejistot je nutné zohlednit, jedná-li se o kalibraci termokamery v pevných bodech nebo pomocí černého tělesa. Do výpočtu pak vstupují různé složky nejistot, jejichž přehled je uveden v následující tabulce - Tabulka 2¹.

¹ V dalším textu budeme předpokládat, že laboratoř nepoužívá pevné body a tyto nebudou uvažovány

Tabulka 2: Složku nejistot vstupující do konečného výpočtu pro jednotlivá kalibrační schémata

	Složka	PBČT	VTČT
Černé těleso	Vliv etalonu		
	Nečistoty		
	Identifikace prodlevy		
	Emisivita ČT, izotermní		
	Emisivita ČT, neizotermní		
	Vliv okolní radiace		
	Prostup tepla na konci kavity		
	Proudění tepla		
	Homogenita ČT		
	Okolní podmínky		
IČ teploměr	SSE		
	Nelinearita		
	Referenční teplota		
	Teplota okolí		
	Atmosférická absorpce		
	Poměr zesílení		
	Šum		
Rovnice kalibrace	Chyba interpolace		
Použití	Drift		

Složky nejistoty týkající se černého tělesa

Vliv etalonu (Calibration Temperature)

Základní složkou je nejistota kalibrace etalonu. U dutinových ČT jde o snímač teploty (odporový, termoelektrický) měřící teplotu lázně (ČT chlazené nebo vyhříváné kapalinovým termostatem) nebo kavity, teplotu u dna dutiny (snímač zasunutý buď podélně vedle dutiny nebo kolmo u stěny dna dutiny ČT) nebo teplotu samostatné destičkové vložky ČT používané do blokových kalibrátorů (snímač zakončen pravoúhlým ohybem, činná část vložena do vývrtu destičky ČT). Kalibrace je obvykle provedena včetně indikační jednotky (jedna hodnota složky nejistoty). Jestliže je snímač teploty kalibrován samostatně, musí být samostatně kalibrována i indikační jednotka a do nejistoty zahrnuta obě zařízení samostatně.

U deskových ČT bývá udána výrobcem tzv. přesnost indikace (v případě ČT HART 418x zahrnuje tato hodnota všechny základní vlivy uplatňující se na černém tělese). Jestliže nemáme k dispozici kalibrační list ČT, je možné použít tuto hodnotu jako složku nejistoty ČT. Jestliže je ČT použito jako etalonové měřidlo, musí mít odpovídající termometrickou kalibraci a do celkové nejistoty pak zahrneme nejistotu kalibrace ČT, nejistotu zjištěné emisivity a homogenitu efektivní plochy zářiče ČT. Měřené teploty korigujeme ve smyslu odchylek zjištěných při kalibraci.

Emisivita ČT (Blackbody Emissivity)

Tato složka se vyskytuje u obou kalibračních schémat a může být stanovena dvěma způsoby – výpočtem nebo měřením. Pro zkoumání vlivu efektivní emisivity ČT existuje

spousta výpočetních modelů, např. sumační metoda nebo použití metody Monte-Carlo. Vlastnosti ČT z hlediska jeho emisivity jsou ovlivněny zejména:

- tvarem dutiny ČT (většinou válcová dutina s kónickým, polokulovým, skoseným nebo rýhovaným dnem a vstupním otvorem tzv. aperturou),
- materiálem dutiny včetně emitujícího povrchu (rýhování dna nebo emitující plochy samostatné vložky, speciální lak apod.),
- velikostí dutiny (průměr obvykle v rozmezí 10 mm až 100 mm, hloubka 60 mm až 500 mm, apertura 6 mm až 50 mm).

U deskových ČT jsou požadované vlastnosti dosahovány buď soustavou zakrývacích clon, nebo elektronicky. Plocha zářiče resp. celá dutina ČT by měla být izotermická tj. teplota dna a stěn dutiny by se neměla významně lišit. Ideálu se nejvíce blíží ČT ponořené do kapalně lázně, nejhorší izotermie hrozí deskovým ČT.

Nejistota emisivity je základní složkou U_c při kalibraci pyrometrů. Vliv emisivity lze relativně vyjádřit jako rozdíl teploty T_m určené při $\varepsilon = 1$ a skutečné teploty zářiče T_t vztahovaný na teplotu T_t . Pro pásmové resp. neselektivní pyrometry platí:

$$\Delta T_{rel} = \frac{T_m - T_t}{T_t} = \sqrt[4]{\varepsilon} - 1 \quad (11)$$

Jestliže známe nebo odhadneme nejistotu emisivity u_ε , můžeme stanovit citlivost relativní chyby teploty na nejistotu emisivity resp. nejistotu relativní teploty jako,

$$u_t = \frac{1}{4} \varepsilon^{-\frac{3}{4}} \cdot u_\varepsilon \quad (12)$$

Pro odhad velikosti vlivu u_ε jsou v **tabulce 3** zpracovány hodnoty emisivity a odhady jejich nejistot typické pro ČT, používané nejčastěji.

Pro složku nejistoty emisivity vlivem rozdílné teploty stěn a dna dutiny ČT platí:

$$u(\varepsilon_{bb,T}) \approx \frac{c_2(1-\varepsilon)|\Delta T|}{\sqrt{3}\lambda_{T_i}T_i^2 \left[1 - e^{\left(-\frac{c_2}{\lambda_{T_i}T_i}\right)} \right]} \quad (13)$$

Tabulka 3: Vliv nejistoty emisivity na nejistotu měřené teploty

$T(K) / t(^{\circ}C)$	$\varepsilon / u_{\varepsilon}$	$u_t(^{\circ}C)$	$\varepsilon / u_{\varepsilon}$	$u_t(^{\circ}C)$	$\varepsilon / u_{\varepsilon}$	$u_t(^{\circ}C)$
323 / 50	0,900 / 0,005	0,44	0,950 / 0,002	0,17	1,000 / 0,005	0,40
373 / 100		0,50		0,19		0,47
473 / 200		0,64		0,25		0,59
573 / 300		0,78		0,30		0,72
673 / 400		0,91		0,35		0,84
773 / 500		1,05		0,40		0,97
$T(K) / t(^{\circ}C)$	$\varepsilon / u_{\varepsilon}$	$u_t(^{\circ}C)$	$T(K) / t(^{\circ}C)$	$\varepsilon / u_{\varepsilon}$	$u_t(^{\circ}C)$	
573 / 300	0,995 / 0,005	0,72	243 / -30	0,990 / 0,002	0,12	
673 / 400		0,84	273 / 0		0,14	
773 / 500		0,97	313 / 40		0,16	
873 / 600		1,1				
973 / 700		1,2				

Kde:

c_2 je druhá radiační konstanta (0,014388 m. K),

ε je emisivita ČT při teplotě T_i ,

ΔT je max. rozdíl teplot v dutině ČT (K),

λ_{Ti} je efektivní vlnová délka při teplotě T_i ,

T_i je měřená teplota (K).

Tabulka 4 uvádí velikost této složky nejistoty pro různé teplotní rozdíly ΔT v dutině ČT na dvou teplotách -30 °C a 500 °C. (Z této tabulky je patrná výrazně vyšší závislost nejistoty na teplotním rozdílu dutiny u nízkých teplot.)

Tabulka 4: Vliv teplotních rozdílů v dutině ČT na nejistotu měřené teploty

	ΔT (K)	u_{ε}	u_T (K)		ΔT (K)	u_{ε}	u_T (K)
	$\varepsilon = 0,95$ $t = -30^{\circ}C$	3	0,0020		0,13	$\varepsilon = 0,95$ $t = 500^{\circ}C$	3
5		0,0034	0,20	5	0,0004		0,08
10		0,007	0,44	10	0,0008		0,16
15		0,010	0,63	15	0,0012		0,24
				30	0,0025		0,50

Efektivní hodnota ε vždy závisí na teplotě a efektivní vlnové délce, což je patrné i z rozdílného vlivu neizotermního černého tělesa u nízkých a vysokých teplot. Jediné správné určení emisivity stanovení závislosti $\varepsilon = f(\lambda, T)$, které je ale velmi komplikované a individuální pro každý typ a konstrukci ČT.

Vliv okolní radiace (Reflected ambient radiation)

Určitá část výstupního signálu teploměru je ovlivněna radiací okolí (světlo zářivek, odražená záření, tepelné zdroje atd.). Záření parazitních zdrojů vstupuje do kavity ČT a vrací se zpět po několikanásobném odrazu. Apertura ČT se chová jako difuzní reflektor s odrazivostí $(1 - \varepsilon_{bb})$, kde ε_{bb} je efektivní emisivita kavity ČT. Pro zjednodušení

předpokládáme, že parazitní záření při konstantní teplotě okolí přichází z čelní hemisféry před aperturou ČT. Podle dokumentu CCT-WG5 lze nejistotu způsobenou reflexní radiací stanovit podle vztahu:

$$u_{10}(T_i) = \frac{\lambda_T T_i^2}{c_2} \frac{S(T_a)}{S(T_i)} \left[1 - \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda_T T_i}\right) \right] \frac{u(\varepsilon_{bb})}{\varepsilon_{bb}^2} \quad (14)$$

kde:

T_i ... teplota ČT (K),

T_a ... teplota okolí (K),

$S(T_a)$, $S(T_i)$... výstupní signály teploměru při uvedených teplotách. Hodnoty výstupních signálů RT obvykle neznáme, známe pouze jejich digitální interpretaci ve fyzikální jednotce teploty. Podle citovaného dokumentu lze přepočítat typické hodnoty parazitních vlivů pro různé měřené teploty při $T_a = 293$ K (20 °C) vztažené na emisivitu a její nejistotu, jak je uvedeno v následující tabulce (**Tabulka 5**).

Tabulka 5: Vliv okolní radiace v závislosti na nejistotě emisivity a měřené teplotě

ε	u_ε	$u(T)$ pro teplotu (°C)				
		-40	-20	50	150	500
0,95	0,01	1,47	1,11	0,53	0,31	0,18
	0,005	0,74	0,55	0,27	0,16	0,09
0,99	0,01	1,36	1,02	0,49	0,29	0,16
	0,005	0,68	0,51	0,25	0,14	0,08

Prostup tepla na konci kavity (Cavity bottom heat exchange)

Protože ČT tělesa nejsou uzavřené objekty, jejich plochou nebo vstupní šěrbinou dochází k „úniku“ záření. To má za následek rozdílné teploty naměřené na povrchu kovu (FPBB schéma) nebo na senzoru měřícím teplotu při VTBB a na vnitřní stěně kavity. Mezi faktory ovlivňující tuto složku patří materiál, z jakého je kavita či povrch ČT vyroben a jeho tepelná vodivost, tloušťka stěny a geometrické rozměry.

Proudění tepla (Convection)

Tato složka nejistoty se uplatňuje pouze při VTBB kalibračním schématu. K radiačním ztrátám dochází díky přítomnosti okolního vzduchu v dutině, který způsobují rozdíl mezi skutečnou teplotou ČT a teplotou indikovanou IČ teploměrem. Tyto ztráty mají významný vliv pro teploty nižší než je teplota okolí resp. teploty, kdy dochází k namrznání vzdušné vlhkosti na stěnách ČT a tím k nedefinovatelným změnám emisivity ČT. Radiační ztráty lze redukovat ofukováním stěn ČT inertním plynem temperovaným na teplotu ČT.

Vliv homogenity ČT (Cavity bottom uniformity)

U dutinových ČT je homogenita ovlivněna konstrukcí a vlastnostmi dna ČT (nátěru). U deskových velkoplošných těles rozhoduje navíc i homogenita vytápění plochy zářiče. Zjištění homogenity je možné pomocí referenčního pyrometru s vysokým optickým rozlišením, kterým skenujeme plochu ČT od středu zářiče směrem k jeho okraji. Homogenitu lze stanovit z úchylek naměřených v jednotlivých plošných bodech povrchu ČT při různých teplotách. Nejprve určíme z údajů etalonů hodnotu referenční teploty t_{90} . V

případě rozdílu údajů etalonů, které nesmí být větší než 1/3 předpokládané nejistoty kalibrovaných teploměrů, určí se jejich průměr. Tato složka se neuplatňuje při výpočtu nejistoty kalibrace v pevných bodech.

Vliv okolních podmínek (Ambient conditions)

Vliv podmínek okolí jako složka nejistoty je definován pomocí šumu radiační teploty ČT. Při kalibracích pomocí PB je tento jev zahrnut v rámci identifikace prodlevy, tudíž se tato složka uplatňuje pouze při použití ČT. Pro ČT ponořené do lázně a ČT s tepelnými trubicemi je možné tento šum změřit pomocí odporového teploměru umístěného blízko dna kavity za splnění podmínky dobrého kontaktu s teplo-přenosným médiem.

Vliv vlnové délky

Závislost emisivity ČT na teplotě a vlnové délce tepelného záření je známá (posun max. zářivého toku se vzrůstající teplotou směrem k nižším vlnovým délkám). Dokument CCT-WG5 uvádí tabulku vhodnou ke stanovení efektivní vlnové délky podle měřené teploty (viz **Tabulka 6**).

Tabulka 6: Stanovení efektivní vlnové délky

Spectral Responsivity	$A / \mu\text{m}$	$B / \mu\text{m.K}$	$\lambda_0 / \mu\text{m}$	Bandwidth / μm	Temperature Range / $^{\circ}\text{C}$	λ_T Range / μm	λ_x Range / μm
0.9 μm	0.896	5.91	0.899	0.083	420 to 1085	0.905 to 0.900	0.914 to 0.905
1.6 μm	1.58	5.16	1.590	0.105	150 to 962	1.592 to 1.584	1.604 to 1.588
3.9 μm	3.90	1.80	3.904	0.165	20 to 962	3.906 to 3.901	3.912 to 3.903
8 μm to 14 μm	9.61	151	11.00	6.00	-40 to 500	10.26 to 9.81	10.95 to 10.00

Efektivní vlnová délka je uvedena ve dvou podobách – teplotně závislá tzv. rozšířená efektivní vlnová délka λ_x a tzv. mezní vlnová délka pro danou teplotu λ_T . Hodnota λ_0 uvedená v tabulce je průměrná hodnota pro dané pásmo. A a B jsou typické konstanty pyrometrů, pomocí kterých lze obě efektivní vlnové délky určit:

$$\lambda_T = A \left(1 + \frac{B}{AT} \right)^2 \quad \lambda_x = A + \frac{B}{T} \quad (15)$$

Z tabulky je patrné, že pro nejběžnější RT pracující v pásmu (8 – 14) μm se efektivní vlnová délka neshoduje s průměrnou hodnotou a leží v rozmezí (10 až 10,5) μm .

Složky nejistot týkající se kamery

Vliv velikosti měřené plochy (Size of Source Effect)

Tento vliv je přítomný u každého kalibrovaného teploměru. Závislost na velikosti měřené plochy vyplývá z optického rozlišení RT. Určuje se buď přímo (postupným zaměřováním RT na několik ČT s rozdílnou velikostí plochy zářiče) nebo nepřímo (vkládáním clonek s rozdílným průměrem apertury před jedno ČT s konstantní teplotou). Závislost na optickém rozlišení lze charakterizovat i měřením stabilní teploty ČT z různé vzdálenosti tak, aby spot teploměru nikdy nepřesáhnul velikost plochy zářiče ČT. Naměřené teplotní rozdíly lze použít pro charakterizaci vlivu SSE resp. pro stanovení příslušné složky nejistoty.

Nelinearita (Non-linearity)

Tato složka nejistoty je závislá na vlastnostech detektoru anebo charakteristice elektronických obvodů, které slouží k měření radiace. Na základě znalosti nelinearity jsou pro různé teplotní rozsahy vybírány různé typy detektorů pracující při různých vlnových délkách.

Referenční teplota (Reference temperature)

Při měření nízkých teplot je nejistota týkající se kalibrovaného teploměru zatížena skutečností, že teplota měřidla je blízká teplotě okolí, nebo je dokonce vyšší. Referenční teplotou rozumíme teplotu detektoru. U běžně dostupných teploměrů je touto teplotou teplota okolí. Nejvíce se tato složka projevuje při měřených teplotách do 200 °C.

Okolní teplota (Ambient temperature)

Je nutné sledovat drift vnitřní teploty přístroje a na základě toho aplikovat korekční faktory při vyhodnocování měření. Běžně užívané hodnoty jsou uvedeny v tabulce v dokumentu CCT-WG5.

Atmosférická absorpce (Atmospheric absorption)

Bezkontaktní měření teploty je ovlivněno vodní párou a oxidem uhličitým nacházejícím se ve vzduchu. Tyto součásti atmosféry částečně pohlcují záření, a tudíž je nutné vybírat IČ teploměry s takovými detektory, které mají absorpční pásma pro tyto součásti co nejnižší. Dalším faktorem, který je nutno vzít při měření do úvahy je vzdálenost, ze které probíhají měření.

Poměr zesílení (Gain ratios)

Tato složka nejistoty je závislá:

- Na krátkodobé stabilitě výstupu,
- stabilitě zesílení bez ohledu na napět'ový výstup,
- stanovení poměru zesílení pro celý pracovní rozsah přístroje.

Při kalibracích přístrojů pracujících při vlnových délkách (8 až 14) μm ovlivňuje tuto složku nejistoty pouze krátkodobá stabilita výstupu.

Šum (Noise)

Šum získaného signálu je vyhodnocován jako nejistota typu A. Větších hodnot nabývá, když se měřené hodnoty nachází blízko hranic měřicího rozsahu přístroje.

Příklad výpočtu nejistoty kalibrace je uveden v následující tabulce (kavitové ČT, reference termoelektrický článek kalibrovaný porovnáním, 500 °C):

Zdroj nejistoty	Z_{max}		Rozdělení	κ	U_x		k			u_y	
Černé těleso											
Nejistota referenčního teploměru (TC)	20	□V	normální	2,000	10	□V	1	□V.□V ⁻¹	10	□V	1,010101 °C
Drift referenčního teploměru (TC)	10	□V	rovnoměrné	1,732	5,773503 °C		1	□V.□V ⁻¹	5,773503	□V	0,583182 °C
Rozlišení referenčního teploměru (TC)	0,5	□V	rovnoměrné	1,732	0,288675 °C		1	□V.□V ⁻¹	0,288675	□V	0,029159 °C
Spektrální závislost a emisivita	0,1	°C	rovnoměrné	1,732	0,057735 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,057735 °C
Vliv radiace z okolí	0,05	°C	normální	1,000	0,05 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,05 °C
Prostup tepla na konci kavity	0,15	°C	rovnoměrné	1,732	0,086603 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,086603 °C
Vliv konvekce tepla	0,15	°C	rovnoměrné	1,732	0,086603 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,086603 °C
Homogenita ČT	0,6	°C	normální	1,000	0,6 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,6 °C
Krátkodobá stabilita ČT	0,2	°C	rovnoměrné	1,732	0,11547 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,11547 °C
Termokamera											
SSE a vliv zaměření	0,3	°C	rovnoměrné	1,732	0,173205 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,173205 °C
Vliv okolní teploty	0,01	°C	normální	1,000	0,005 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,005 °C
Atmosférické absorpce	0	°C	normální	1,000	0 °C		1	°C.°C ⁻¹			0 °C
Rozlišení termokamery	0,050	°C	rovnoměrné	1,732	0,028868 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,028868 °C
Nejistota typu A	0,1	°C	normální	1,000	0,1 °C		1	°C.°C ⁻¹			0,1 °C
Kombinovaná standardní nejistota (°C)	1,340253951										
Faktor pokrytí	2										
Rozšířená standardní nejistota (°C)	2,680507903										
Uc zaokrouhleno (°C)	2,7										

15 Validace

Kalibrační metody podléhají validaci v souladu s normou ČSN EN ISO/IEC 17025 čl. 5.4. Validační zpráva je uložena v archivu sekretariátu ČMS.

Upozornění

Kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky. V případě, že střediskem provádějícím kalibraci je akreditovaná kalibrační laboratoř, měl by být kalibrační postup navíc upraven podle příslušných předpisů (zejména MPA a EA).