



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 3.2.3/03/14

ČERNÁ TĚLESA

Praha
Říjen 2014

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

Číslo úkolu: VII/1/14

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 kalibrační postup platí pro kalibraci černých těles.

2 Související normy a metrologické předpisy

OILM/TC11/SC3/N3:	Blackbody Radiators for calibration of radiation thermometers – Calibration and Verification Procedure, 3rd draft of recommendation	[1]
EA-04/02 M:2013	Vyjádření nejistoty měření při kalibracích (Expressions of the Uncertainty of Measurements in Calibration (previously EAL- R2), DEC 1999)	[2]
EA-04/07	Návaznost měřicího a zkušebního zařízení na státní etalony (Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards (previously EAL-G12), NOV 1995)	[3]
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)	[4]
CCT-WG5	Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point	[5]
VDI/VDE 3511	Radiation termometry – Calibration of radiation thermometers (2004)	[6]
ČSN EN ISO/IEC 17025	Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří	[7]
ČSN EN ISO 10012	Systémy managementu řízení - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení	[8]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci černých těles 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

V tomto textu je použito následujících zkratk:

- IČ – infračervený,
- ČT – černé těleso,
- λ – vlnové délka,
- ε - emisivita

Černé těleso (ČT) – (Absolutně) černé těleso pohlcuje veškerý, na něj dopadající, zářivý tok. Z Kirchhoffova zákona dále vyplývá, že (absolutně) černé těleso je také dokonalý zářič. Dokonalý zářič vyzařuje při dané teplotě 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 pětinasobkem 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 emisivity 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 ve 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; taková 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.

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-Boltzmannova 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 tětiny daného úhlu (vyjádřeného ve stupních nebo radiánech), ve kterém bude přístroj integrovat veškerou na něj dopadající zářivou energii. U skenovacích nebo zobrazujících systémů zorným polem se rozumí úhel skenování nebo velikost obrazu nebo celkové zorné pole.

5 Prostředky potřebné pro kalibraci

Podrobný seznam etalonů a měřicích zařízení je uveden v databázi etalonů kalibrační laboratoře. Jedná se o etalonové infračervené teploměry s nastavitelnou emisivitou pracující při různých vlnových délkách.

Základním vybavením potřebným pro kalibraci černých těles jsou infračervené teploměry. Černá tělesa lze rozdělit na 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 můžou 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 mívá 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 ČT 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 ČT, jejichž kavita je tvořena teplotní trubicí. 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.

Pomůcky

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.

Čistící 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.

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 ČT 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.

Ostatní zařízení

Do ostatních prostředků patří:

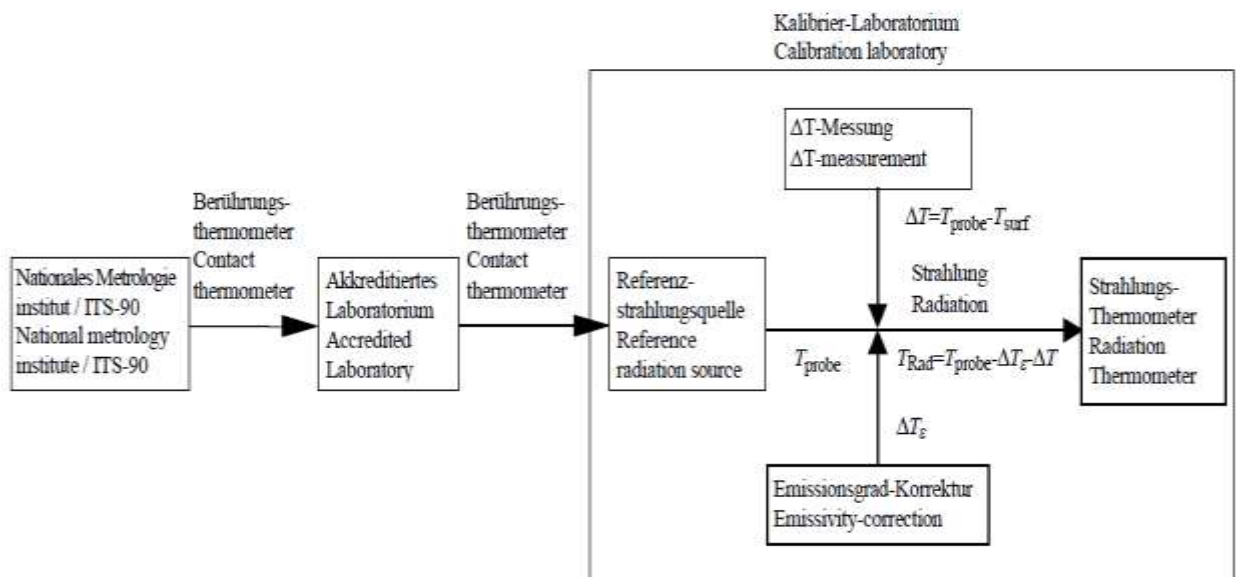
- měřidlo teploty a vlhkosti okolí,
- souprava nářadí,
- lupa, posuvné měřidlo, metr,
- čisticí prostředky, stojánek nebo jiné prostředky pro uchycení teploměru.

Návaznost

Návazností rozumíme zajištění vazby použitého etalonu (etalonážního zařízení) na etalon vyšší (metrologické) úrovně. Metrologická návaznost je zajištěna pomocí soustavy černých těles a etalonového pyrometru. Nejčastěji se v laboratoři používá etalonový infračervený teploměr, který je navázaný na černé těleso vyšší metrologické úrovně. Dále bude uvedena celá metrologická návaznost kalibrace infračervených teploměrů, kde mají černá tělesa přesně definované místo.

V technické praxi v laboratořích se nejčastěji používají následující typy návazností:

Návaznost pomocí kontaktních senzorů teploty (VDI/VDE 3511)

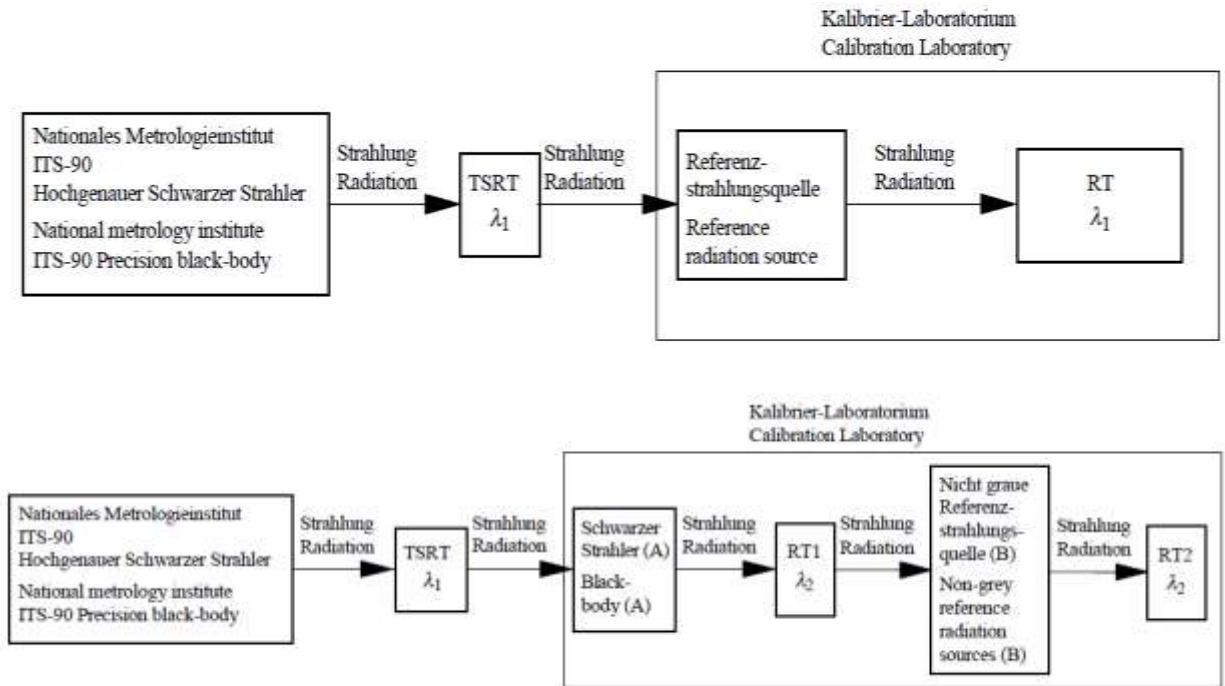


Zde je v ČT implementován kontaktní teploměr, který je kalibrován podle mezinárodní teplotní stupnice (ITS-90).

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.

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 ± 2,5) °C,
- Změna teploty vzduchu: max. 1 °C / h,
- Relativní vlhkost vzduchu: max. 80 % RH, nekorozi a nekondenzující prostředí.

7 Rozsah kalibrace

Kalibrace černých těles se skládá z následujících částí:

- zajištění podmínek prostředí,
- vnější prohlídka a kontrola funkce zařízení, zjištění základních parametrů (teplotní rozsah, nastavitelnost emisivity, pracovní rozsah vlnových délek atd.),

- zkouška správnosti údajů, případně stanovení emisivity a stability,
- vyhodnocení naměřených hodnot,
- vystavení kalibračního listu,
- označení kalibrovaného tělesa kalibrační značkou.

8 Kontrola dodávky a příprava ke kalibraci

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

- zda je k dispozici příslušná dokumentace (návod k použití),
- zda není měřidlo poškozeno, znečištěno,
- zda případné mírné poškození nemůže mít vliv na údaj přístroje nebo jeho funkci.

Měřidlo, u kterého se zjistí chyba nebo nespĺňuje požadavky určené předpisy, se nepřijme ke kalibraci. Během přijetí měřidla se kontrolují některé požadavky, které by měl přístroj splňovat. Základem je jednoznačný identifikační znak uváděný na kalibračním listu (výrobní číslo měřidla, metrologické nebo evidenční číslo apod.). Při vyjádření shody se specifikací musíme respektovat pravidla ČSN EN ISO/IEC 17025.

Předmětem kontroly jsou také následující údaje:

- značka výrobce,
- rok výroby,
- model měřidla,
- rozlišení displeje,
- rozsah apod.

Nejsou-li však na kalibrovaném ČT tyto údaje vyznačeny, nejedná se o důvod k vyřazení měřidla z dalšího postupu kalibrace.

9 Postup kalibrace

Chyba ČT je určena jako rozdíl mezi údajem teploty naměřené etalonovým IČ teploměrem a nastavenou teplotou na ČT. Na IČ teploměru je nastavena stejná emisivita, jakou má černé těleso, aby nedocházelo ke zkreslení naměřených hodnot. Není-li tohoto požadavku možné dosáhnout, provede se měření s hodnotou emisivity blízkou emisivitě ČT a tato skutečnost se uvede v kalibračním listě.

Chyba ČT by měla být určena minimálně ve 3 teplotách z celkového teplotního rozsahu ČT. Měří se při nejnižší, střední a nejvyšší teplotě kalibrovaného rozsahu. Měření se provádí směrem od nejnižší teploty po nejvyšší. Ve všech bodech jsou vypočteny průměrné hodnoty teploty naměřené etalonovým IČ teploměrem $t_{IČ}$ a potom je stanovena odchylka ČT v měřeném bodě určená z rovnice:

$$\Delta t = t_{IČ} - t_{ČT},$$

Kde: Δt je rozdíl teploty naměřené etalonovým IČ teploměrem a ČT,

$t_{IČ}$ je teplota etalonového IČ teploměru a

$t_{ČT}$ je teplota indikovaná ČT.

Kalibrace ČT pomocí etalonového IČ teploměru

Při kalibraci ČT můžou nastat dvě situace. První, kdy ČT i etalonový teploměr pracuje na

stejných vlnových délkách, pak k žádným komplikacím nedochází a kalibrace je provedena podle následujícího postupu.

Postup kalibrace je následující:

- na ČT je nastavena požadovaná teplota a čeká se na stabilizaci nastavené teploty, čas potřebný na stabilizaci by měl být uvedený v manuálu nebo technické specifikaci ČT,
 - na etalonovém IČ teploměru je nastavena emisivita ε , která je stejná jako zadaná emisivita ČT pro danou vlnovou délku (je-li to možné),
 - je proveden odečet hodnoty,
- postup je opakován i pro další měřené teploty.

Druhá situace, kdy pracuje kalibrované ČT a IČ teploměr při různých vlnových délkách, kalibraci je nutné provést přes dva IČ teploměry (jak je ukázáno na schématu návaznosti) a před kroky popsanými výše je nutné provést následující činnosti:

- na referenční IČ teploměr pracující při λ_1 (jiné, než je λ kalibrovaného ČT) jsou navázány sekundární pevné body,
- v těchto bodech je zkalibrován teploměr, který pracuje při stejné vlnové délce jako ČT,
- pomocí takto zkalibrovaného IČ teploměru je provedena kalibrace ČT, dále se pokračuje podle postupu uvedeného výše.

Stanovení skutečné emisivity černého tělesa

Ve specifikaci ČT je vždy uvedena hodnota emisivity pro dané ČT. Tato hodnota však může být ve skutečnosti jiná, a proto je vhodné zjistit skutečnou emisivitu ČT. Tato činnost je prováděna na přání zákazníka.

Postup je následující:

- na ČT je nastavena požadovaná teplota a čeká se na stabilizaci nastavené teploty,
- emisivita na etalonovém IČ teploměru je nastavena na hodnotu rovnou 1,00,
- je proveden odečet teploty,
- pomocí změřené teploty je spočítaná skutečná emisivita ČT, je potřeba brát do úvahy vlnovou délku měření,
- na IČ teploměru je následně nastavena emisivita rovná spočítané hodnotě a je proveden kontrolní odečet hodnot,
- postup se opakuje pro další teploty,
- do kalibračního listu je uvedena průměrná hodnota stanovené emisivity, spočítaná ze všech teplotních bodů.

Stabilita černého tělesa

To, že je na ČT nastavena určitá teplota neznamená, že přesně tato teplota bude na ČT po celou dobu měření. Ve skutečnosti teplota kolísá v určitém rozmezí kolem nastavené teploty, a proto je dobré tuto skutečnost znát.

Postup pro zjištění stability ČT je následující:

- na ČT je nastavena požadovaná teplota a čeká se na stabilizaci nastavené teploty,
- po určitou dobu (např. asi 15 minut) jsou v intervalech prováděny odečty teploty pomocí etalonového teploměru,

- z naměřených hodnot je spočítaná směrodatná odchylka měření, tato hodnota udává stabilitu ČT v daném časovém intervalu, tato hodnota se udává ve °C.

Homogenita černého tělesa

U plochých ale i dutinových ČT je důležité znát rozložení teplot na ploše ČT. Homogenita ČT se zjišťuje následujícím postupem:

- na ČT je nastavena požadovaná teplota a čeká se na stabilizaci dané teploty,
- IČ teploměr se zaměří doprostřed kavity nebo plochy terče a odečte se první hodnota,
- další hodnoty jsou získány z následujících pozic na okraji ČT: nahoře, dole, napravo a nalevo od středového bodu. Jestliže má koncová plocha ČT větší průměr, přidává se další sada bodů – uprostřed vzdáleností střed – konec plochy ČT,
- výsledkem měření je tabulka s rozdílem naměřených hodnot v jednotlivých bodech od hodnoty získané uprostřed.

Tato činnost je prováděna na přání zákazníka.

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.

- a) Vyhodnocení shody se specifikací se neprovádí, pokud není uvedena požadovaná přesnost měřidla nebo pokud ho zákazník nepožaduje.
- b) Pokud měřidlo ve všech bodech vyhovuje, vyhovuje i celkově.
- c) Pokud minimálně v jednom bodu nevyhovuje, nevyhovuje i jako celek.
- d) 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 černého tělesa ke kalibraci, datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- f) určení specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu (v tomto případě KP 3.2.3/03/14),
- g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňující veličiny apod.),
- h) měřidla použitá při kalibraci,
- i) obecné vyjádření o návaznosti výsledků měření (etalony použité při kalibraci),

- j) výsledky měření a s nimi spojenou 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 5 roků 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	Obdrží 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)

Pro jednotlivé zkušební teploty se provede vyhodnocení nejistot měření. Při vyhodnocování nejistot se pracuje pouze se standardní nejistotou ($k = 1$). Výpočet se provádí v °C. Je třeba brát v úvahu tyto nejistoty:

Vliv referenčního teploměru

Do této složky je nutné zahrnout kromě nejistoty kalibrace IČ teploměru také další složky, které jsou shrnuty v následující tabulce:

Tabulka 1: Přehled složek nejistoty týkající se IČ teploměru

Radiation Thermometer	SSE effect
	Non-linearity
	Reference temperature
	Ambient temperature
	Atmospheric absorption
	Gain ratios
	Noise
Drift	
Calibration Equation - thermometer	Interpolation error

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 radičního teploměru 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 napěťový 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.

Chyba interpolace (Interpolation error)

Chyba interpolace je popsána rozdílem mezi teplotou získanou pomocí interpolační rovnice (např. rovnice Sakuma-Hattori) a teplotou která by byla spočítána pomocí Planckova zákona, který je integrován přes spektrální citlivost teploměru.

Drift

Tato složka nejistoty je definována jako rozdíl hodnot z dvou po sobě jdoucích kalibrací IČ teploměru, prostřednictvím kterého probíhá kalibrace ČT.

Vliv kalibrovaného ČT

Zde se projevuje hlavně krátkodobá stabilita, homogenita a rozlišení zobrazovací jednotky. Krátkodobá stabilita ČT je určena jako směrodatná odchylka z naměřených hodnot teploty získaných po definovanou dobu měření.

Homogenita ČT ovlivňuje celkovou nejistotu až při konečném použití kalibrovaného ČT a proto není zahrnuta do tohoto budgetu nejistot.

Vliv okolí

Při měření teploty pomocí infračerveného teploměru je nutné brát v úvahu i záření pocházející z okolního prostředí. Zejména při měření nízkých teplot je důležité nezapomínat na tuto skutečnost, a je nutno zahrnout vliv okolního záření do celkové nejistoty

Příklad výpočtu nejistoty černého tělesa

Nejistota kalibrace terčového černého tělesa infračerveným teploměrem o vlnové délce 3,9 μm při teplotě 300 $^{\circ}\text{C}$.

Zdroj nejistoty	z_{max}		Rozdělení	κ	u_x		k		u_y	
Nejistota měření referenčním teploměrem	0,7	$^{\circ}\text{C}$	normální	2,000	0,35	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,35	$^{\circ}\text{C}$
Krátkodobá stabilita referenčního teploměru	0,1	$^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,057 735	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,057 735	$^{\circ}\text{C}$
Rozlišení referenčního teploměru	0,005	$^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,002 887	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,00 2887	$^{\circ}\text{C}$
Rozlišení kalibrovaného ČT	0,05	$^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,028 868	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,028 868	$^{\circ}\text{C}$
Krátkodobá stabilita ČT	0,15	$^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,085 709	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,085 709	$^{\circ}\text{C}$
Spektrální závislost a emisivita	0,5	$^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,288 675	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,288 675	$^{\circ}\text{C}$
Vliv okolní teploty	0,1	$^{\circ}\text{C}$	normální	1,000	0,1	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,1	$^{\circ}\text{C}$
Atmosférické absorpce	0,001	$^{\circ}\text{C}$	normální	1,000	0,001	$^{\circ}\text{C}$	1	$^{\circ}\text{C}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,001	$^{\circ}\text{C}$
Kombinovaná standardní nejistota ($^{\circ}\text{C}$)	0,476 817 873									
Faktor pokrytí	2									
Rozšířená standardní nejistota ($^{\circ}\text{C}$)	0,953 635 747									
U zaokrouhleno ($^{\circ}\text{C}$)	0,95									

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 její 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).