



Česká metrologická společnost, z.s.

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

Tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.spolky-csvts.cz/cms

**KALIBRAČNÍ POSTUP
KP 3.1.3/04/24**

Platinové odporové snímače teplot

**Praha
srpen 2024**

Vzorový metodický postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2024

Číslo úkolu: VII/2/24

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

Řešitel: Česká metrologická společnost, z.s.

© 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 se vztahuje na kalibraci platinových odporových teploměrů a platinových odporových snímačů teploty, které jsou pracovními měřidly.

2 Související normy a metrologické předpisy

Vyhláška č. 264/2000 Sb.	o základních měřicích jednotkách a ostatních jednotkách a o jejich označování v platném znění	[1]
(01 5253) ČSN EN ISO/IEC 17025	Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří	[2]
TPM 3342-94	Platinové odporové snímače teploty. Metody zkoušení při kalibraci	[3]
TNI 01 0115 (ISO/IEC GUIDE 99:2007)	Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM 3)	[4]
(01 1300) ČSN EN ISO 80000-1	Veličiny a jednotky. Část 1: Obecně. Vyd. 23/10	[5]
(01 1300) ČSN EN ISO 80000-5	Veličiny a jednotky. Část 5: Termodynamika. Vyd. 01/21	[6]
Mezinárodní teplotní stupnice ITS 1990	Tematická příloha časopisu Metrologie 4/2008	[7]
ČSN 25 8005	Názvosloví z oboru měření teplot. V 01/23 zrušena bez náhrady	[8]
ČSN 25 8010	Směrnice pro měření teplot v průmyslu. V 01/23 zrušena bez náhrady	[9]
ČSN IEC 751	Průmyslové platinové odporové snímače teploty. Platná pro snímače vyrobené do 02/2011. V 01/2021 zrušena bez náhrady	[10]
ČSN EN 60751	Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové snímače teploty. Platná pro snímače vyrobené do 09/2014	[11]
ČSN EN 60751	Změna Z1 11.22: Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory. Platná pro snímače vyrobené od 10/2014	[12]
(258340) ČSN EN IEC 60751 ed. 2	Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory. Vyd. 12/2022	[13]
OIML R 84, edit. 2003	Platinum, copper, and nickel resistance thermometers (for industrial and commercial use)	[14]
Vyhláška č. 381/2006 Sb.	Požadavky na snímače teploty používané jako součást stanoveného měřidla. Zrušeno 08/2010 bez náhrady (dostupné na webu „Zákony pro lidi“)	[15]
ČSN IEC 60050-300	Mezinárodní elektrotechnický slovník. Elektrická a elektronická měření a měřicí přístroje, části 311 až 314. Vyd. 08/2003.	[16]
ČSN EN 60359	Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností. Vyd. 08/2003	[17]
GUM	Guide to the expression of uncertainty in measurement Internal Organization for Standardization 1995. Zavedeno v TNI 01 4109-3 (01 4109) Nejistoty měření – Část 3: Pokyn pro vyjádření nejistoty měření (GUM:1995) (Pokyn	[18]

	ISO/IEC 98_3). Vyd. 06/2011	
EA 4/02 M:2022	Vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci. Vyd. 04/2022.	[19]
MPM 3.1.3/02/17	Provozní měření teploty při aplikacích pro měření průtoku v průmyslu. ČMS 10/2017.	[20]

3 Kvalifikace pracovníků provádějících kalibraci

Kvalifikace pracovníků, kteří kalibrují měřidla, je stanovena předpisem organizace, který se týká metrologie. Příslušní pracovníci musí být seznámeni s tímto kalibračním postupem. Doporučuje se certifikace odborné způsobilosti těchto pracovníků.

4 Názvosloví, definice

Názvosloví a definice jsou obsaženy v normách, uvedených v článku 2, zejména v [L4], [L13] a [L14], ze zrušených předpisů pak v [L8] a [L9].

5 Prostředky, potřebné pro kalibraci odporových snímačů teplot

Při kalibraci platinových odporových snímačů teploty se používají:

- **etalony teploty:** odporové snímače rozlišujeme podle čistoty platiny rezistoru na SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer) a IPRT (Industrial Platinum Resistance Thermometer). SPRT splňují podmínky pro popis chování podle ITS-90, tj.:

$$W_{\text{Ga}} \geq 1,11807 \quad \dots \quad W_{\text{Ga}} = \text{poměrný odpor při teplotě tání gallia}; \quad W_{\text{Hg}} \dots \text{poměrný odpor}$$

$$W_{\text{Hg}} \leq 0,844235$$

při teplotě trojného bodu rtuti. Poměrný odpor je vypočten jako podíl odporu snímače při uvedené teplotě ku odporu snímače při teplotě trojného bodu vody (TBV = 0,01 °C). Jako etalonu lze použít SPRT, je možné použít i IPRT, má-li odpovídající metrologické vlastnosti pro danou aplikaci;

- **termostaty:** podle rozsahu teplot, při nichž se má snímač kalibrovat a podle požadované nejistoty měření můžeme použít:

- kyvetu s teplotou trojného bodu vody (TBV) nebo zařízení pro realizaci teploty tání ledu,
- kalibrátory teploměřů (blokové kalibrační píčky, celkový rozsah teplot -100 °C až 700 °C),
- kapalinové termostaty (kryostaty) s různými médii (láh, voda, olej, solná lázeň), celkový rozsah teplot (-90 až 600) °C,
- kyvety pevných bodů dle ITS 90,
- fluidní termostat s rozsahem teplot -100 °C až 700 °C;
- **elektrické měřicí přístroje:** zařízení na měření odporu platinového odporového snímače teploty a přístroj na měření izolačního odporu s měřicím napětím do 100 V;
- **pomocná zařízení:** přepínače, pomocné zdroje, regulační prostředky, komutátory a podobně.

6 Obecné podmínky kalibrace – referenční podmínky

Odporové teploměry se kalibrují při teplotě okolního vzduchu $23 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$, relativní vlhkost vzduchu může být max. 90 % RH. Měření musí probíhat v bezprašném prostředí bez otřesů a chvění. Ostatní referenční podmínky jsou určeny hlavně v dokumentaci k elektrickým měřicím přístrojům. Referenční podmínky je nutné kontrolovat před zahájením kalibrace, v jejím průběhu a po skončení.

7 Rozsah kalibrace

Při kalibraci se provádí:

- vnější prohlídka a příprava snímače ke kalibraci,
- zkouška stability příp. stabilizační žihání (u snímačů, které jsou kalibrovány poprvé nebo na žádost zákazníka; u etalonových snímačů vždy),
- zkouška izolačního odporu,
- měření metrologických parametrů,
- vyhodnocení naměřených hodnot,
- vystavení kalibračního listu nebo zápis do evidenčního listu.

8 Kontrola měřidla před kalibrací

8.1 Kontrola měřidel dodaných ke kalibraci

Při přebírání snímače teploty ke kalibraci odpovědný pracovník metrologického pracoviště posoudí, zda typ a výrobní číslo snímače odpovídá údajům, uvedeným na objednávce nebo v dodacím listu. Při vnější prohlídce se zjišťuje, zda snímač není znečištěný, poškozený, má-li viditelné chyby na hlavici, přírodním kabelu, stonkové trubici, izolační keramice nebo rezistoru (pokud jsou dostupné). Také se posoudí úplnost údajů na snímači (výrobce, nejvyšší provozní teplota, jmenovitý odpor, odpor vnitřního vedení apod.). Pokud je požadováno vyjádření o shodě s metrologickou specifikací, musí mít zákazník uvedeno v objednávce požadované zařazení do toleranční třídy.

8.2 Příprava měřidel ke kalibraci

Zkouška stability, stabilizační žihání

Stabilita odporového snímače se posuzuje podle stálosti hodnoty základního odporu nebo odporu v TBV po žihání. Provádí se pro snímače s max. pracovní teplotou vyšší než 200 °C. Snímač s rozsahem **od 200 °C do 420 °C** se pomalu vloží do lázně s maximální provozní teplotou zkoušeného snímače, zvýšenou o 20 °C na dobu (15 až 20) minut. Snímač s pracovní teplotou **vyšší než 420 °C a nižší než 480 °C** se vloží do předehřáté pece na max. teplotu (480 °C umožňuje-li to specifikace snímače) a zde se ponechá cca 1 hodinu. Poté se pomalu vyndá do teploty okolí. V případě, že je maximální teplota použití snímače **vyšší než 480 °C a zároveň nižší než 660 °C**, vloží se snímač do předehřáté pece na 480 °C. Potom je teplota zvýšena na maximální provozní teplotu zkoušeného snímače zvýšenou o 20 °C (max. 675 °C) za dobu cca 1/2 h (ohřev cca 6 °C za minutu). Na této teplotě se ponechá po dobu cca 1 hodinu. Následně je teplota snížena na 480 °C za dobu cca 4 h (chladnutí cca 1 °C za minutu). Po dalších cca 30 minutách se teploměr pomalu vyjme do teploty okolí. Odpor při 0 °C (nebo TBV) se měří po vychladnutí. Maximální odchylka snímače by měla být do 3 mK (etalony SPRT), resp. menší než dovolená chyba při 0 °C dle příslušné toleranční třídy (IPRT).

Zkouška izolačního odporu

Izolační odpor se měří mezi vodiči vnitřního vedení a kovovou armaturou, u snímačů s pomocnou smyčkou i mezi vodiči snímače a smyčky, u snímačů s pátým (zemnicím) vodičem též mezi vodiči snímače a tímto vodičem. Měří se za dvě hodiny po ustálení teploty. Izolační odpor se stanoví ze dvou měření s různou polaritou (platí nižší hodnota). Zkušební napětí 100 VDC se použije, má-li snímač teplotu v rozmezí 15 °C až 35 °C, při vyšší teplotě se měří stejnosměrným napětím 10 V. Minimální hodnoty izolačních odporů mají být: 100 MΩ při teplotě 15 °C až 35 °C, 20 MΩ v rozmezí do 250 °C, 2 MΩ v rozmezí 251 °C až 450 °C a 0,5 MΩ v rozmezí 451 °C až 650 °C a 0,2 MΩ v rozmezí 651 °C až 850 °C.

9 Postup kalibrace

Vlastní kalibrace – stanovení závislosti odporu na teplotě

Závislost odporu na teplotě se určuje nejméně při třech teplotách rovnoměrně rozložených v celém měřicím rozsahu dlouhodobého používání. Pokud je snímač určen pro rozsah do 200 °C zkouší se při dvou teplotách. Měřené body mohou být zákazníkem definovány dle jeho potřeb. Při zkoušce teplotní závislosti se kalibrovaný snímač porovná s platinovým odporovým teploměrem SPRT nebo IPRT.

Jestliže je měřicí vložka snímače umístěna v ochranné jímce, je vhodné vložku pro kalibraci z jímky vyjmout. U dvouvodičových snímačů bývá na štítku svorkovnice uveden odpor spojovacího vedení od rezistoru ke svorkovnici snímače.

Etalonový teploměr a zkoušené snímače se postupně vkládají do jednotlivých zkušebních zařízení (lázní) a po ustálení teploty se měří jejich odpory. Hloubka ponoření snímače má být taková, jakou stanoví výrobce snímače (pokud to není stanoveno, měl by být dodržen pětinasobek délky měřicího rezistoru nebo patnáctinasobek průměru snímače). Dostatečný ponor se zkouší při ustálené teplotě lázně povytažením snímače o (10 až 20) mm. Zůstane-li měřená hodnota odporu beze změn, je ponor dostatečný. Měřicí proud je volen co nejnižší, aby se minimalizovalo vlastní zahřívání odporového snímače (pro Pt 100 ... 1 mA; pro Pt 1000 ... 0,1 mA).

Doporučuje se při zkoušce postupovat v následujícím pořadí: 0 °C, max. teplota, další zkoušené teploty, 0 °C. Odpory kalibrovaného snímače a etalonového teploměru se měří asi 20 minut po jejich vložení do termostatu a po ustálení teploty.

10 Vyhodnocení naměřených hodnot

Vyhodnocení měření je možné provádět těmito způsoby:

1. pomocí odchytkové funkce teplotní stupnice ITS-90,
2. pomocí polynomu definovaného normou [L13],
3. pomocí obecného polynomu.

Odchytková funkce ITS-90

Vyhodnocení je určeno pro etalonové teploměry SPRT, které splňují podmínku dle kap. 5 postupu. Nejprve změříme odpor kalibrovaného snímače v TBV ... R_{TBV} . Při teplotě měřené etalonem určíme odpor kalibrovaného snímače R_t .

Pro každý kalibrační bod vypočteme hodnotu poměrného odporu W

$$W = \frac{R_t}{R_{TBV}}$$

V případě, že snímač nesplňuje podmínky dle kap. 5, je možné vyhodnocení odchytkovou funkcí na základě dokumentované žádosti zákazníka.

Referenční funkce W_r popisuje chování ideálního platinového odporového snímače podle teplotní stupnice ITS-90. Pro popis reálného OT je nutné zavést odchytkovou funkci. Pro podnulový rozsah je definována

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}),$$

kde koeficienty a , b jsou získány kalibrací v pevných bodech (v okolí teplot pevných bodů ITS-90).

Pro rozsah 0 °C až 961,78 °C je definována:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660,323)]^2.$$

Pro nejběžnější rozsah kalibrace do pevného bodu hliníku 660,323 °C má odchylková funkce tvar:

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3$$

Koeficienty se opět zjistí z kalibrací v definičních pevných bodech dle rozsahu snímače. Pro nižší rozsah teplot jsou k dispozici zjednodušené verze polynomů prvního a druhého řádu.

Při kalibraci jsou pro výpočet použity teploty definičních bodů ITS-90 (nebo teploty v jejich blízkém okolí) dle jednotlivých podrozsahů a ostatní kalibrační body jsou využity jako kontrolní pro zobrazení odchylky interpolovaných dat od naměřených dat. Detailní zpracování pro tento způsob vyhodnocení viz [L7].

Polynom dle ČSN EN IEC 60751 ed. 2 [L13]

Naměřená data jsou proložena polynomem podle uvedené normy:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3),$$

kde koeficienty referenční funkce jsou:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4} \text{ pro } t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ pro } t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C je } C = 0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$$

a R_0 je odpor v bodě tání ledu (realizace 0 °C). Pro výpočet koeficientů OT je využita metoda nejmenších čtverců ze všech naměřených dat s využitím nejistot měření, popřípadě vhodný interpolační nástroj.

Obecný polynom

Závislost odporu, popřípadě poměrného odporu na teplotě je aproximována pomocí lineární kombinace sady základních funkcí podle rovnice

$$R_t = \sum_{i=1}^n a_i f_i$$

Hodnota řádu polynomu n je určena pomocí statistických metod. Hodnoty parametrů a_i jsou vypočteny metodou nejmenších čtverců ze všech naměřených dat s využitím nejistot měření. 7

U IPRT je možné zjednodušené vyhodnocení měřených hodnot, kdy neprovádíme výpočet konstant, ale zpracujeme pouze závislost měřených hodnot etalonové teploty t_{90} a předmětného odporu kalibrovaného snímače ve formě tabulky měřených hodnot a klasifikaci snímače můžeme provést dle dovolených chyb podle tolerančních tříd [L13] (na žádost zákazníka).

11 Kalibrační list, označení měřidla po kalibraci

11.1 Náležitosti kalibračního listu

Kalibrační list by měl obsahovat tyto údaje:

a) název a adresu kalibrační laboratoře,

- b) pořadové číslo kalibračního listu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- c) jméno a adresu zákazníka, popř. uživatele,
- d) název, typ, výrobce a identifikační číslo kalibrovaného snímače teploty,
- e) datum kalibrace a datum vystavení kalibračního listu,
- f) určení metody a specifikace uplatněné při kalibraci nebo označení kalibračního postupu, v tomto případě KP 3.1.3/04/24,
- g) podmínky, za nichž byla kalibrace provedena (hodnoty ovlivňujících veličin apod.),
- h) vyjádření o návaznosti použitých měřidel, resp. výsledků měření,
- i) výsledky měření a s nimi spjatou nejistotu měření, příp. prohlášení o shodě s určenou metrologickou specifikací,
- j) identifikaci schvalujícího pracovníka, příp. jméno pracovníka, který provedl kalibraci a razítko kalibrační laboratoře.

Akreditovaná kalibrační laboratoř navíc uvede název/logo akreditačního orgánu, odkaz na akreditaci v souladu s [L2], místo kalibrace, prohlášení, že kalibrační list nesmí být bez písemného schválení kalibrační laboratoře rozmnožován jinak než celý.

Pokud provádí kalibrační laboratoř kalibraci pro vlastní organizaci, může být kalibrační list zjednodušen, popř. vůbec nevystavován (výsledky kalibrace mohou být uvedeny např. v kalibrační kartě snímače nebo na vhodném nosiči, např. v elektronické paměti). I v tomto případě však musí kalibrační laboratoř archivovat záznam o měření s uvedenými měřenými hodnotami a základními údaji o měření, které by umožnily opakování měření za identických podmínek.

11.2 Protokolování

Originál kalibračního listu se předá zadavateli kalibrace. Kopii kalibračního listu si ponechá kalibrační laboratoř a archivuje ji po dobu minimálně 5 roků zároveň se záznamem o měření. Doporučuje se archivovat záznamy o měření a kalibrační listy chronologicky.

11.3 Umístění kalibrační značky

Po provedené kalibraci může kalibrační laboratoř označit kalibrovaný snímač teploty kalibrační značkou, např. kalibračním štítkem. Pokud to není výslovně uvedeno v některém podnikovém metrologickém předpisu nebo neexistuje dokumentovaný požadavek zákazníka, nesmí akreditovaná kalibrační laboratoř uvádět na kalibrační štítek datum příští kalibrace.

12 Předání odporového snímače teploty po kalibraci

Převzetí a předávání měřidla jsou řešeny v pracovním postupu nebo v příručce kvality. Předávací protokoly se obvykle vyplňují na místě kalibrace, aby byly popsány aktuální a reálné podmínky (počet měřidel, rozsah kalibrace, identifikace zákazníka, kontaktní osoba, zapůjčení podkladů atd). Po skončení kalibrace měřidla stvrzuje zákazník svým podpisem na příslušném formuláři nebo v knize zakázek jeho převzetí. V obou případech se k podpisům připojují příslušná data.

12.1 Reklamáce

V případě, že objednatel kalibrace podá stížnost na provedenou kalibraci, tuto přebírá vedoucí kalibrační laboratoře, v době nepřítomnosti jeho zástupce. Stížnost se může týkat rozsahu nebo správnosti kalibrace, úplnosti nebo správnosti kalibračního listu, úplnosti a funkčnosti měřidla, popřípadě fakturace za provedenou kalibraci. Povinností vedoucího kalibrační laboratoře je analyzovat stížnost, na jejím základě učinit příslušná opatření a seznámit s nimi bez prodlení objednatele kalibrace. Když se při analýze nenajdou závady, bude o tom objednatel kalibrace informován. Pokud je stížnost oprávněná a jedná se o rozsah nebo správnost kalibrace, provede laboratoř novou, bezplatnou kalibraci a vystaví nový kalibrační list. V ostatních případech oprávněné stížnosti se provedou příslušná opatření podle příručky kvality.

13 Péče o kalibrační postup

Originál kalibračního postupu je uložen u zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku na titulní straně písemně nebo elektronickým přístupem. Kalibrační postup podléhá řízení podle normy ČSN EN ISO řady 9000 nebo ČSN EN ISO/IEC 17025 v platném znění. Změny, popřípadě revize kalibračního postupu provádí jeho zpracovatel. Schvaluje je vedoucí zpracovatele (vedoucí kalibrační laboratoře nebo metrolog organizace).

14 Rozdělovník, úprava a schválení, revize**14.1 Rozdělovník**

Kalibrační postup		převzal		
výtisk číslo	obdrží útvar	jméno	podpis	datum

14.2 Úprava, schválení

Kalibrační postup	jméno	podpis	datum
upravil			
úpravu schválil			

14.3 Revize

strana	popis změny	zpracoval	schválil	datum

14 Výpočtu nejistoty měření při kalibraci odporového snímače teploty (příklad)

Příklad se týká kalibrace odporového snímače teploty Pt 100 toleranční třídy B při teplotě 200 °C v kapalně termostatické lázni metodou přímého porovnání s odporovým etalonovým snímačem teploty Pt 100 SPRT.

Chyba údaje měřené teploty kalibrovaného snímače E_X je definována:

$$E_X = t(R_X) - t(R_E) + C_1 \cdot \delta R_{B1} + C_2 \cdot \delta t_{B2} - C_3 \cdot \delta R_{B3} + C_4 \cdot \delta R_{B4} - C_5 \cdot \delta R_{B5} + C_6 \cdot \delta R_{B6} + C_7 \cdot \delta R_{B7}$$

Za předpokladu dodržení výše popsaného postupu kalibrace lze standardní nejistotu typu A zahrnout do standardní nejistoty typu B. Majoritní zdroje standardní nejistoty typu B jsou:

- u_{B1} teplotní profil lázně (δt_{B1})
- u_{B2} přesnost měření odporu (δR_{B2})
- u_{B3} nejistota kalibrace etalonu (δR_{B3})
- u_{B4} vliv přepínače (δR_{B4})
- u_{B5} drift etalonu (δR_{B5})
- u_{B6} zdroje nejistoty od kalibrovaného snímače (stabilita TBV, hystereze apod.) (δR_{B6})
- u_{B7} vliv samoohřevu snímačů (δR_{B7})
- C_i citlivostní koeficienty

Teplotní profil lázně u_{B1}

Základními vlastnostmi lázní jsou stabilita při měření (0,01 °C), radiální homogenita (0,01 °C) a axiální homogenita (0,02 °C). V závorce jsou uvedeny maximální zjištěné hodnoty uvedených vlastností použité olejové lázně pro 200 °C, pro rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti platí:

$$u_{stab} = \frac{z_{stab}}{\chi_{stab}} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \cong 0,0058 \text{ °C}$$

kde je:

$$\chi_{stab} = \sqrt{3} \quad (\text{rovnoměrné rozložení});$$

obdobně $u_{rad} = 0,0058 \text{ °C}$ a $u_{axial} = 0,0115 \text{ °C}$

Výsledná složka nejistoty je tedy:

$$u_{B1} = (u_{stab}^2 + u_{rad}^2 + u_{axial}^2)^{0,5} = 0,014 \text{ °C}$$

Přesnost měřidla odporu u_{B2}

Při měření byl použit multimetr Keithley 2100, jeho přesnost na rozsahu 1 k Ω dle výrobce ... 0,015 % čtení + 0,002 % FS; nejistota kalibrace dle kalibračního listu 0,003 Ω (zanedbatelná). Teplotě 200 °C odpovídá dle normy [L13] hodnota odporu 175,86 Ω ; přesnost multimetru na této hodnotě je tedy $z_{DMM1} = (0,0264 + 0,02) = 0,0464 \text{ } \Omega$. Citlivost přepočtu odporu na °C při teplotě 200 °C je dle [L13] 0,36 Ω na 1 °C; přesnost přepočtena na °C ... $z_{DMM} = 0,0464 / 0,36 = 0,13 \text{ °C}$. Obě měřidla jsou odečítána přes přepínač na stejném multimetru, vliv DMM je zahrnut pouze jednou. Nejistota měření odporu je tedy:

$$u_{B2} = \frac{z_{DMM}}{\chi_2} = \frac{0,13}{\sqrt{3}} \cong 0,075 \text{ °C},$$

kde je:

$$\chi_2 = \sqrt{3} \quad (\text{rovnoměrné rozložení})$$

Nejistota kalibrace etalonového snímače teploty u_{B3}

Na kalibračním listu etalonu je uvedena rozšířená nejistota kalibrace při teplotě 200 °C pro koeficient rozšíření $k = 2 \dots U_3 = 0,02$ °C. Standardní kombinovaná nejistota je tedy:

$$u_{B3} = \frac{U_3}{k_3} = \frac{0,02}{2} = 0,01 \text{ °C},$$

kde je:

U_3 rozšířená standardní nejistota podle kalibračního listu etalonu

k_3 koeficient rozšíření podle kalibračního listu etalonu

Vliv přepínače u_{B4}

Zkratové napětí přepínače nepřesahuje hodnotu 1,0 μV a může ovlivňovat měřenou hodnotu etalonu i kalibrovaného snímače. Obě měřidla jsou stejná (Pt 100), při napájecím proudu 1 mA je vliv zkratového napětí přepočten dle Ohmova zákona na hodnotu odporu ... 0,001 Ω. Citlivost Pt 100 při teplotě 200 °C je 0,36 Ω/°C. Přepočtem na °C získáme $z_{\max 4} = 0,003$ °C.

$$u_{B4} = \frac{z_{\max 4}}{\chi_5} = \frac{0,003}{\sqrt{3}} \cong 0,0017 \text{ °C},$$

kde je:

$$\chi_4 = \sqrt{3} \quad (\text{rovnoměrné rozložení})$$

Drift etalonu u_{B5}

Na základě posledních tří kalibrací etalonu byl stanoven maximální roční drift etalonu $z_{\max 5} = 0,02$ °C.

$$u_{B5} = \frac{z_{\max 5}}{\chi_5} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} \cong 0,012 \text{ °C},$$

kde je:

$$\chi_5 = \sqrt{3} \quad (\text{rovnoměrné rozložení})$$

Kalibrovaný snímač u_{B6}

Kalibrovaný snímač se podílí na výsledné nejistotě svými vlastnostmi, mezi které patří např. nestabilita TBV při měření mezi jednotlivými teplotami, hystereze apod. Kalibrace proběhla v kapalně lázni, kde tyto vlivy nepřesahují hodnotu $z_{\max 6} = \pm 0,01$ °C, rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{B6} = \frac{z_{\max 6}}{\chi_6} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \cong 0,0058 \text{ °C},$$

kde je:

$$\chi_6 = \sqrt{3} \quad (\text{rovnoměrné rozložení})$$

Vliv samoohřevu u_{B7}

Při měření odporu je nutné, aby senzorem procházel elektrický proud. Při jeho průchodu se část energie ztrácí ve formě tepla, které otepluje vlastní senzor a tím mění jeho teplotu. Chyba samoohřevem je závislá na podmínkách měření. Detailně je tento vliv popsán v metodice ČMS č. MPM 3.1.3/01/17 [L20]. Pro měření v kapalně lázni předpokládáme, že tento vliv nepřesahuje hodnotu $z_{\max 7} = \pm 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$, rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{B7} = \frac{z_{\max 7}}{\chi_7} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} \cong 0,012 \text{ } ^\circ\text{C},$$

kde je:

$$\chi_7 = \sqrt{3} \quad (\text{rovnoměrné rozložení})$$

Rozlišení multimetru ($0,001 \text{ } \Omega$) bylo zanedbáno stejně jako vliv odvodu tepla (oba snímače mají stejný průměr stonku a byly umístěny v lázni ve stejné hloubce).

Standardní kombinovaná nejistota u_C

Vzhledem k předpokladu nekorelovaných zdrojů nejistot aplikujeme Gaussův zákon šíření nejistot:

$$u_C = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2 + u_{B7}^2} = \\ = \sqrt{0,014^2 + 0,075^2 + 0,01^2 + 0,0017^2 + 0,012^2 + 0,0058^2 + 0,012^2} \cong 0,079 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dominantním členem nejistoty je příspěvek zahrnující vlastnosti DMM, podíl zbývajících členů tvoří část nejistoty o velikosti $u_{C \min} = 0,025 \text{ } ^\circ\text{C}$. Poměr $u_{C \min} / u_{B1}$ má velikost cca 0,33; není tedy menší, než hodnota 0,3, která by svědčila pro výsledné rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti v souladu s příkladem S9 dokumentu EA 4/02 M. Můžeme tedy předpokládat výsledné rozdělení normální.

Standardní rozšířená nejistota U

Standardní rozšířenou nejistotu U počítáme pro konfidenční pravděpodobnost 95 %:

$$U = k * u_C = 2 * 0,079 = 0,158 \text{ } ^\circ\text{C} \cong 0,16 \text{ } ^\circ\text{C}$$

kde $k = 2$ je koeficient rozšíření.

Dovolená chyba snímače dle toleranční třídy B odpovídá hodnotě $\Delta_{\text{DOV}} = 1,3 \text{ } ^\circ\text{C}$, nejistota měření lehce přesahuje desetinu dovolené chyby.

Přehled nejistot viz tabulka 1.

16 Validace

Metody použité v tomto kalibračním postupu byly validovány. Doklad o validaci je uložen u České metrologické společnosti.

Tabulka 1: Přehled ovlivňujících veličin

I	Veličina X_i	odhad x_i	$z_{\max i}$ °C	rozložení	χ_i	$u(x_i)$ °C	c_i °C/°C	$u_i(y)$ °C
1	tepl. profil	0	kombin. složky	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,014	1	0,014
2	měřidlo odporu	0	0,13	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,075	1	0,075
3	etalon teploty	t_{90}	0,02	normální	2	0,01	1	0,01
4	přepínač	0	0,003	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,0017	1	0,0017
5	drift etalonu	0	0,02	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,012	1	0,012
6	kalibr. snímač	t_m	0,01	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,0058	1	0,0058
7	samoohřev	0	0,02	rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,012	1	0,012

Význam symbolů:

- $z_{\max i}$ maximální odchylka způsobená i-tým zdrojem nejistoty
 χ_i koeficient pro příslušné pravděpodobnostní rozložení
 $u(x_i)$ příspěvek i-tého zdroje nejistoty v původních jednotkách
 $u(y)$ příspěvek i-tého zdroje nejistoty v jednotkách výsledné nejistoty
 c_i citlivostní koeficient pro i-tý zdroj nejistoty

Upozornění

Tento kalibrační postup byl zpracován a posouzen v rámci úkolu rozvoje metrologie, řešeného pro Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví pod číslem PRM/VII/2/24. Šíření a využívání tohoto kalibračního postupu nebo jeho částí jakýmkoli komerčním způsobem je nepřípustné.

Tento kalibrační postup je třeba považovat za vzorový. Doporučuje se, aby jej organizace přizpůsobila svým požadavkům a doplnila s ohledem na své metrologické vybavení a konkrétní podmínky kalibrace.

Příloha 1:**Doporučené prostředky pro kalibraci platinových odporových snímačů teploty:**

- Kyveta trojného bodu vody nebo přípravek na realizaci bodu tání ledu (0 °C) má umožnit současné zkoušení nejméně pěti snímačů a jejich ponor do hloubky nejméně 200 mm.
- Kalibrační pícka nebo sestava kalibračních píček pro požadovaný rozsah kalibrace.
- Vodní lázeň pro měření v rozsahu teplot (20 až 95) °C, s pracovním prostorem o průměru minimálně 80 mm a s výškou minimálně 200 mm. Teplotní pole v pracovním prostoru při všech pracovních teplotách nesmí mít větší odchylky než 0,01 °C, kolísání teploty v pracovním prostoru musí být menší než 0,01 °C.
- Olejová lázeň pro měření v rozsahu teplot (20 až 300) °C s pracovním prostorem o průměru minimálně 80 mm a s výškou minimálně 200 mm. Teplotní pole v pracovním prostoru při všech pracovních teplotách nesmí mít větší odchylky než 0,02 °C, kolísání teploty v pracovním prostoru musí být menší, než 0,02 °C.
- Solná lázeň pro měření v rozsahu teplot (200 až 600) °C s pracovním prostorem o průřezu minimálně 40 cm² a s výškou minimálně 250 mm. Teplotní pole v pracovním prostoru při všech pracovních teplotách nesmí mít větší odchylky než 0,05 °C, kolísání teploty v pracovním prostoru musí být menší než 0,03 °C. Solná lázeň musí mít jímky pro vkládání snímačů. Vůle snímačů v jímkách musí být malá, s mezerou asi (0,5 až 1) mm.
- Fluidní lázeň (lázeň se suchými částicemi) v rozsahu teplot (50 až 700) °C. Doporučuje se v lázni umístit kovový homogenizační blok, který vyrovnává teplotní pole a kolísání teploty. Homogenita teploty v pracovním prostoru lázně (resp. v otvorech bloku) musí být lepší, jak 0,02 °C při 200 °C; 0,2 °C při 500 °C a 0,3 °C při teplotě 850 °C. Tato lázeň není vhodná pro krátké a přesné snímače.
- f) Kapalinový kryostat s výškou pracovního prostoru min. 250 mm.
- g) Etalonový platinový odporový teploměr SPRT (IPRT).

Zařízení pro měření odporu:

Odpor snímačů teploty se měří buď' stejnosměrným nebo střídavým proudem. Střídavé měřicí můstky obvykle měří poměr mezi odporem snímače a etalonovým odporem, za kterého vyhodnocují odpor měřeného snímače (při použití přepínače etalonu a měřených snímačů). Stejnosměrné měřicí můstky pracují obdobně, protože u těchto zařízení může hrozit výrazný vliv termoelektrického parazitního napětí na svorkách, jsou stejnosměrné můstky vybaveny automatickou komutací. Digitální multimetry umožňují standardní měření odporu (preferováno je čtyřvodičové měření). Použití všech zařízení je podrobně popsáno v dokumentaci výrobce zařízení.

Příloha 2**Výpočet teploty**

Vztahy teplota/odpor platinových odporových snímačů teploty dle [L13] jsou uvedeny v kap. 9 postupu. Pro platinové odporové snímače teplot, které splňují uvedené vztahy, je definován teplotní koeficient α jako poměr:

$$\alpha = \frac{(R_{100} - R_0)}{100 \times R_0}$$

který má hodnotu $0,003\ 850\ 55\ ^\circ\text{C}^{-1}$

kde R_{100} je odpor snímače při teplotě $100\ ^\circ\text{C}$,

R_0 je odpor snímače při teplotě $0\ ^\circ\text{C}$

V rozsahu teplot (0 až 850) $^\circ\text{C}$ se teplota t vypočítá z výrazu:

$$t = -\frac{A}{2B} - \sqrt{\frac{A^2}{4B^2} + \frac{1}{B} \frac{R_t - R_0}{R_0}}$$

Základní odpor platinového snímače R_0 je $100\ \Omega$, rozsah základního odporu platinových rezistorů se pohybuje od $0,25\ \Omega$, do $1000\ \Omega$.

Přesnost platinových odporů a snímačů teplot:

Přesnost rezistorů i kompletních snímačů teplot je definována tzv. toleranční třídou, která udává dovolenou chybu v závislosti na absolutní hodnotě teploty ve $^\circ\text{C}$.

Doporučení OIML [L14], ve kterém jsou uvedeny vlastnosti platinových, měděných a niklových odporových snímačů teplot, uvádí pro platinové odporové snímače pět tolerančních tříd:

Tabulka č. 2: Toleranční třídy odporových snímačů dle [L14]

Toleranční třída	Teplotní rozsah, v němž je tolerance validována $^\circ\text{C}$	Hodnoty tolerance $^\circ\text{C}$
AA	- 50 ... +250	$0,1 + 0,0017 t $
A	- 100... +450	$0,15 + 0,002 t $
B	- 196... +650	$0,3 + 0,005 t $
C	- 196... +650	$0,6 + 0,01 t $
D	- 196... +650	$1,2 + 0,012 t $

Aktuální platná norma na odporové snímače teploty [L13] rozlišuje tři soustavy značek tolerančních tříd – dvě z nich platí pro vlastní rezistory (drátové nebo fóliové) a jedna pro kompletní snímače teploty.

Tabulka č. 3: Toleranční třídy platinových rezistorů dle [L13]

snímač drátový		foliový snímač		Hodnoty tolerance ^{a)} $^\circ\text{C}$
Třída tolerance	Teplotní rozsah $^\circ\text{C}$	Třída tolerance	Teplotní rozsah $^\circ\text{C}$	
W 0.1	- 100 až + 350	F 0.1	0 až +150	$\pm (0,1 + 0,0017 t)$
W 0.15	- 100 až +450	F 0.15	- 30 až +300	$\pm (0,15 + 0,002 t)$
W 0.3	- 196 až +660	F 0.3	- 50 až +500	$\pm (0,3 + 0,005 t)$
W 0.6	- 196 až +660	F 0.6	- 50 až +600	$\pm (0,6 + 0,001 t)$

^{a)} $|t|$ je absolutní hodnota teploty ve stupních Celsia bez ohledu na znaménko

Tabulka č.4: Toleranční třídy platinových odporových snímačů dle [L13]

Třída tolerance	Teplotní rozsah °C		Hodnoty tolerance ^{a)} °C
	drátěný	foliový	
AA	- 50 až +250	0 až +150	$\pm (0,1 + 0,0017 t)$
A	- 100 až +450	- 30 až +300	$\pm (0,15 + 0,002 t)$
B	- 196 až +600	- 50 až +500	$\pm (0,3 + 0,005 t)$
C	- 196 až +600	- 50 až +600	$\pm (0,6 + 0,001 t)$

^{a)} | t | je absolutní hodnota teploty ve stupních Celsia bez ohledu na znaménko

Někteří dodavatelé nabízejí odvozené třídy, např. 1/3 DIN, 1/10 DIN apod. Odvození se vztahuje na toleranční třídu B dle [L13]. Vedle průmyslových platinových snímačů s čistotou platiny $R_{100}/R_0 = 1,385$ se používají platinové snímače s vyšší čistotou platiny s poměrem $R_{100}/R_0 = 1,391$ (např. etalonové snímače). Jejich vlastnosti jsou uvedeny v [L14].