



Česká metrologická společnost, z.s.

Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1

tel/fax: 221 082 254

e-mail: cms-zk@csvts.cz

www.csvts.cz/cms

Metodika provozního měření

MPM 3.1.3/02/17

**METODIKA PROVOZNÍHO MĚŘENÍ TEPLoty
TERMOELEKTRICKÝMI ČLÁNKY V PRŮMYSLU**

Praha

říjen 2017

Vzorový metodický postup byl zpracován a financován ÚNMZ v rámci Plánu standardizace – Program rozvoje metrologie 2017

Číslo úkolu: VII/3/17

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 metodiky

Termoelektrický článek (TC) je nejčastěji používaný elektrický senzor pro měření teploty v průmyslu a výzkumu. Široký rozsah dostupných materiálů a slitin umožňuje měřit rozsahy od nízkých teplot $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do vysokých teplot $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nízká cena TC a jednoduchost přispívá k hojnému využívání. Aspekty, které omezují výběr TC pro libovolnou aplikaci jsou teplotní rozsah, prostředí (oxidační/redukční atmosféra, vakuum atd.), kontaktní materiál a mechanické limity. Průmyslově používané TC jsou standardizovány normou ČSN EN 60584.

Tato metodika je používána při měření termoelektrickými články v průmyslových aplikacích.

2 Související normy a metrologické předpisy

ČSN EN 60584-1 ed.2	Termoelektrické články. Část 1: Údaje napětí a tolerance (od 2. 10. 2016 náhrada za ČSN EN 60584-1 a ČSN IEC 584-2).	[L1]
ČSN EN 60584-1	Termoelektrické články. Část 1: Referenční tabulky (zrušena)	[L2]
ČSN IEC 584-2	Termoelektrické články. Část 1: Tolerance (zrušena)	[L3]
ČSN EN 60584-3	Termoelektrické články. Část 3: prodlužovací a kompenzační vedení. Systém tolerancí a značení	[L4]
ČSN EN 60770-1 ed. 2	Měřicí převodníky pro řídicí systémy průmyslových procesů – Část 1: Metody hodnocení vlastností	[L5]
ČSN EN 61298-2 ed. 2	Zařízení pro měření a řízení průmyslových procesů – Obecné metody a postupy hodnocení vlastností – Část 2: Zkoušky při referenčních podmínkách	[L6]
EA 4/02: M2013	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích	[L7]
ČSN 258005	Názvosloví z oboru měření teplot	[L8]
ČSN 258010	Směrnice pro měření teplot v průmyslu	[L9]

Podle potřeby předmětné normy ČSN řada 2580 xx, 2581 xx, 2582 xx, 2583 xx.

3 Kvalifikace pracovníků provádějících měření

Kvalifikace pracovníků provádějících měření teploty termoelektrickými články v průmyslových aplikacích je dána příslušným předpisem organizace. Tito pracovníci se seznámí s měřicím postupem upraveným na konkrétní podmínky pracoviště provádějícího kontroly měřidel a souvisejícími předpisy.

Doporučuje se potvrzení odborné způsobilosti těchto pracovníků prokázat vhodným

způsobem, například osvědčením o odborné způsobilosti, osobním certifikátem apod.

4 Názvosloví, definice

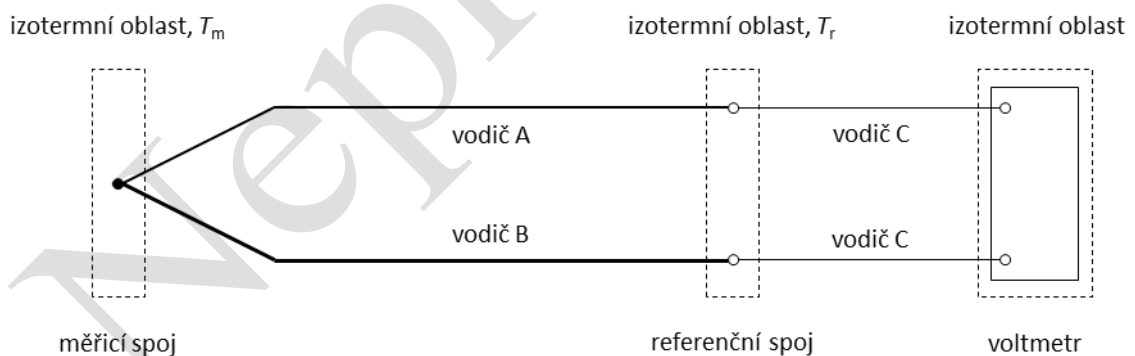
Termoelektrické snímače teploty jsou jedny z nejčastěji používaných senzorů teploty v průmyslu nebo v oblasti vědeckého výzkumu. Jejich značná variabilita umožňuje měření teploty v širokém teplotním rozsahu (-270 °C až 2700 °C), v různých prostředích a při různých okolních podmínkách.

4.1 Princip funkce termoelektrických snímačů teploty

Princip fungování termočlánků je založen na tzv. Seebeckově jevu, který se spolu s Thomsonovým a Peltiérovým řadí mezi termoelektrické jevy. Zjednodušeně řečeno, pokud umístíme elektrický vodič do prostředí s rozdílnými teplotami, vzniká na vodiči teplotní gradient, který má za následek vznik elektromotorického napětí, přičemž velikost tohoto napětí je závislá na materiálu vodiče. V případě, že spojíme dva vodiče z různých materiálů, dostaneme termoelektrický článek, jehož chování je možné popsat následující rovnicí:

$$dE = S(T) \cdot dT$$

kde dE značí diferenciální napětí generované v důsledku teplotního gradientu dT a $S(T)$ je tzv. Seebeckův koeficient, který odpovídá citlivosti termočlánku a je obecně závislý na teplotě. Jednoduchý případ zapojení termočlánku je uveden na obr. 9 Termoelektrický článek, který je tvořený dvěma vodiči rozdílných materiálů A a B, generuje napětí úměrné rozdílu teplot mezi měřicím a referenčním spojem. Vodiče C jsou použity pro připojení k měřicímu zařízení (např. digitálnímu voltmetru).

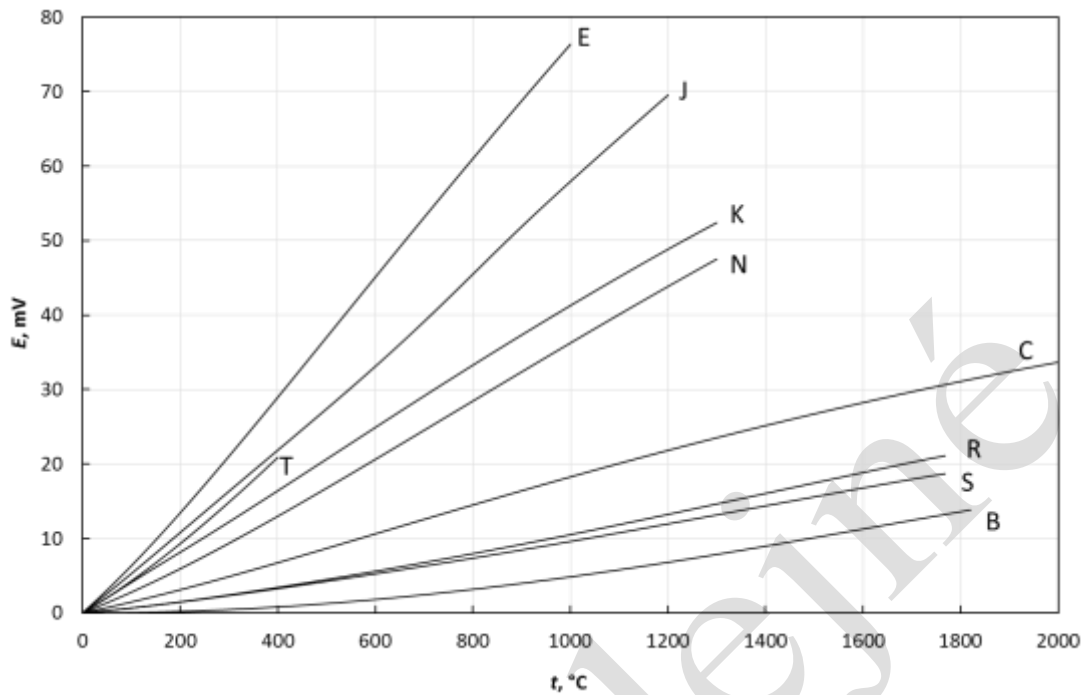


Obr. č. 1: Jednoduchý měřicí obvod s termoelektrickým článkem

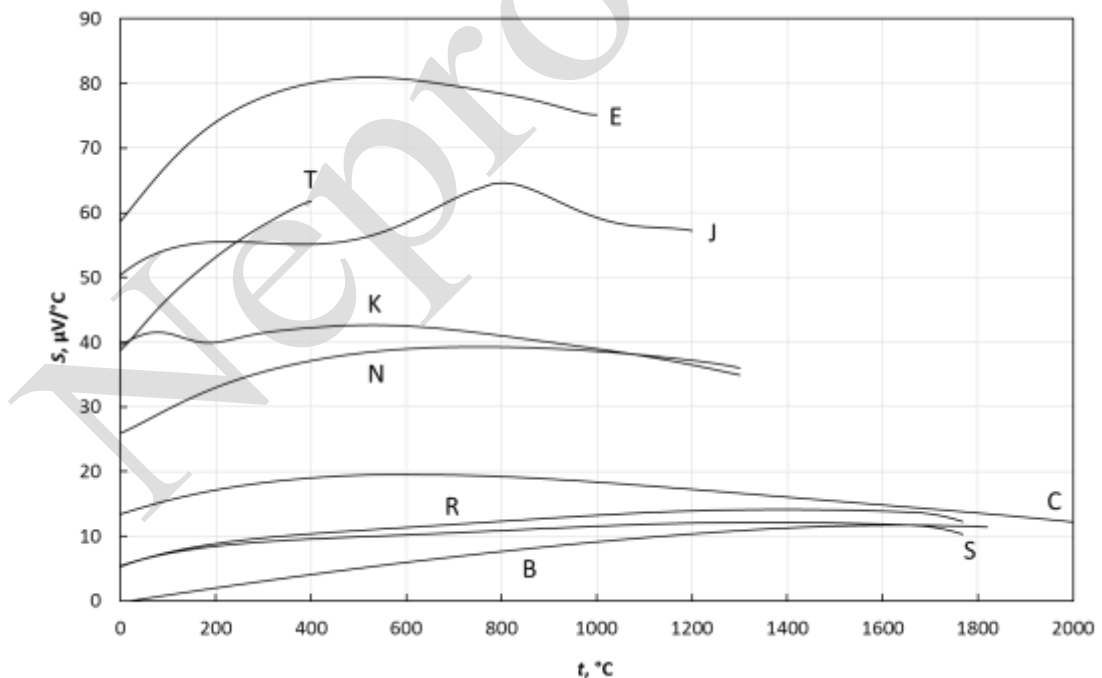
4.2 Typy termoelektrických snímačů teploty

Na základě použitých materiálů jsou jednotlivé termočlánky standardizovány. Běžné typy termočlánků se obvykle označují velkým písmenem (např. J, K, E, T, N, R, S, B) a jejich termoelektrické vlastnosti jsou popsány např. v normě ČSN EN 60584-1. Jednotlivé typy termočlánků se liší citlivostí (velikostí Seebeckova koeficientu), teplotním rozsahem a prostředím nebo podmínkami, ve kterých mohou být používány. Pro ilustraci jsou teplotní závislosti termoelektrického napětí a Seebeckova koeficientu vybraných typů článků

uvedeny na následujících obrázcích.



Obr. č. 2: Teplotní závislost termoelektrického napětí několika typů termoelektrických článků dle ČSN EN 60584-1



Obr. č. 3: Teplotní závislost Seebeckova koeficientu pro vybrané termoelektrické články dle ČSN EN 60584-1

Z hlediska použitých materiálů se termoelektrické články dělí na termočlánky z obecných kovů (např. J, K, N, T, E) a termočlánky ze vzácných kovů (např. R, S, B). Výhodou

termočlánků z obecných kovů je většinou nízká pořizovací cena a relativně vysoká citlivost. Jejich nevýhodou je však sklon k tvorbě nehomogenit (lokálních změn ve složení slitiny vodiče) při tepelném zatížení, které mají za následek změnu chování termočlánku. Naproti tomu termočlánky z drahých kovů sice vykazují znatelně nižší citlivost, ale jejich termoelektrické vlastnosti jsou v průběhu času stabilní. Z tohoto důvodu se termočlánky typu R, S a B využívají často jako etalonové nebo referenční teploměry. Nejběžnější typy termoelektrických článků jsou stručně popsány v tabulce.

Typ	Složení	Typický teplotní rozsah	Vlastnosti a oblast použití
K	chromel (+) alumel (-)	-200 °C až 1300 °C	odolný proti oxidaci při vysokých teplotách, nejběžnější průmyslový termočlánek, nevhodný pro použití v redukční atmosféře a vakuu
N	nicrosil (+) nasil (-)	-200 °C až 1300 °C	vyvinutý jako náhrada za typ K, odolný proti oxidaci při vysokých teplotách, nevhodný pro použití v redukční atmosféře a vakuu
E	chromel (+) konstantan (-)	-230 °C až 900 °C	nejvyšší citlivost (Seebeckův koeficient), vhodný pro měření nízkých teplot, nevhodný pro použití v redukční atmosféře a vakuu
J	železo (+) konstantan (-)	0 °C až 760 °C	vhodný pro použití ve vakuu a oxidační nebo redukční atmosféře, železný vodič je náchylný ke korozi
T	měď (+) konstantan (-)	-200 °C až 400 °C	vhodný pro obecné použití a měření nízkých teplot, použití ve vakuu, inertních nebo redukčních atmosférách
R	platina-rhodium (13 %) (+) platina (-)	-50 °C až 1700 °C	velice přesný do 1100 °C, náchylný ke kontaminaci termoelektrických vodičů, nevhodný pro měření v redukční atmosféře
S	platina-rhodium (10 %) (+) platina (-)	-50 až 1700 °C	velice přesný do 1100 °C, náchylný ke kontaminaci termoelektrických vodičů, nevhodný pro měření v redukční atmosféře
B	platina-rhodium (30 %) (+) platina-rhodium (6 %) (-)	0 °C až 1800 °C	vysoce stabilní pro měření teplot vyšších než 1100 °C, náchylný ke kontaminaci termoelektrických vodičů, prakticky zanedbatelné napětí do 50 °C, nevhodný pro měření v redukční atmosféře
C	wolfram-rhenium (5 %) (+) wolfram-rhenium (26 %) (-)	0 °C až 2315 °C	vhodný zejména pro měření vysokých teplot v inertní nebo redukční atmosféře nebo ve vakuu

Tab. č. 1: Nejběžnější typy termoelektrických snímačů teploty

Pro jednotlivé typy termoelektrických článků norma ČSN EN 60584-1 definuje vztah mezi termoelektrickým napětím a teplotou pomocí polynomické referenční funkce

$$E = \sum_{i=0}^n a_i t^i$$

kde a_i jsou parametry specifické pro daný typ termočlánku a t je teplota měřicího spoje.

Referenční funkce je vztažena k teplotě srovnávacího spoje termočlánku 0°C , kterou je možno docílit v laboratoři např. pomocí směsi ledové tříště s destilovanou vodou. Je zřejmé, že pro správné měření pomocí termoelektrického článku je zapotřebí znát teplotu srovnávacího spoje. V praxi ovšem bývá často teplota srovnávacího spoje odlišná od referenční teploty 0°C a tuto skutečnost je potřeba při výpočtu teploty zohlednit a měřené termoelektrické napětí E_m korigovat o hodnotu napětí $E(t_s)$, která přísluší teplotě srovnávacího spoje t_s .

$$E(t_m) = E_m + E(t_s)$$

Měřenou teplotu t_m je možné získat z $E(t_m)$ výpočtem pomocí inverzních funkcí, které jsou rovněž uvedeny v ČSN EN 60584-1. Z hlediska posouzení kvality termoelektrických snímačů teploty dále ČSN EN 60584-1 definuje toleranční třídy (1, 2 a 3), které stanovují maximální možné teplotní odchylky od referenční funkce pro dané typy termočlánků.

4.3 Provedení termoelektrických snímačů teploty

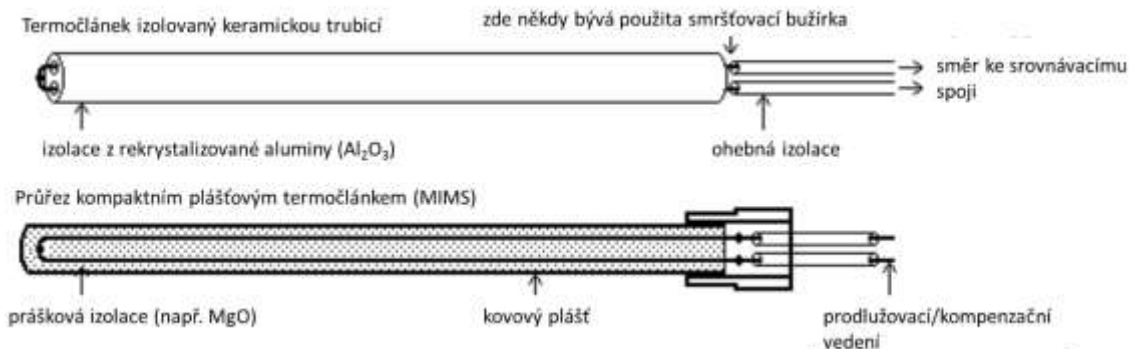
Vlastní snímač teploty se sestává ze vzájemně spojených termoelektrických vodičů, elektrické izolace a případně ochranného obalu. Podle oblasti použití se vyskytuje několik provedení:

- termočlánky v podobě holých vodičů umístěných v pevné keramické izolační trubici (např. z Al_2O_3),
- termočlánky izolované keramickým práškem (např. MgO) a opláštěné odolným kovovým materiálem (MIMS, mineral-insulated metal-sheathed),
- termočlánky izolované nekeramickými materiály.

Aby nedocházelo ke kontaminaci holých termoelektrických vodičů v nehostinném prostředí, vkládají se dále termočlánky do ochranných trubic nebo jímek. Kompaktní termočlánky s kovovým pláštěm (MIMS), které jsou vyráběny v ohebných variantách s malým vnějším průměrem, umožňují měření s rychlou odezvou i na těžko dostupných místech.

V ideálním případě je termočlánek tvořen pouze termočlánekovými vodiči, které vedou přímo do místa, kde je realizován srovnávací (referenční) spoj a kde jsou dále napojeny např. na měděné vodiče. V některých situacích, kdy je místo měření více vzdáleno od srovnávacího spoje, je použití dlouhých vodičů vlastních termočlánků značně neekonomické (např. v případě termoelektrických článků z drahých kovů). Z tohoto důvodu se při konstrukci termočlánekových teploměrů využívají kompenzační vedení, která jsou vyrobena z jiných kovů než vlastní termoelektrický senzor, ale mají podobné termoelektrické vlastnosti (Seebeckův koeficient). V praxi se rovněž využívají prodlužovací vedení, která jsou tvořena stejnými materiály jako termoelektrický senzor a která slouží k prodloužení (nastavení termočlánku).

Možné typy konstrukčního provedení termočlánků jsou schematicky znázorněny na obr. č. 12.



Obr. č. 4: Příklady provedení termoelektrických snímačů teploty

5 Měřidla a pomocná měřicí zařízení

Mezi základní části měřicího řetězce teploty patří:

- snímače teploty různých typů,
- převodníky na unifikovaný signál,
- napájecí zdroje,
- měřicí ústředny,
- zobrazovací jednotky,
- ovládací software,
- (termostaty srovnávacích spojů, odmocňovací členy, kompenzační krabice – u starších zařízení),
- montážní prostředky (kabely, svorkovnice, lišty, konektory – nepatří sice do aktivních prvků, ale způsob zapojení také ovlivní kvalitu měřicího řetězce).

Všechna použitá měřidla a pomocná měřicí zařízení musí být navázána na etalon vhodného rozsahu a přesnosti a musí mít platnou kalibraci.

6 Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření

Interval kalibrace TC by nikdy neměl přesáhnout 4 roky nebo více než 200 provozních hodin (v teplotách nad 80 % maximální používané teploty). Je doporučeno provádět alespoň každoroční kontrolu etalonu porovnáním s jiným kalibrovaným teploměrem se stejnou specifikovanou tolerancí.

Průmyslová měření a regulace teploty jsou dvě z nejvíce dynamických částí oboru průmyslové automatizace. Sensory pro měření teploty jsou vyráběny v mnoha rozměrech, úhlech, délkách i přesnostech pro splnění požadavků konkrétní aplikace. V mnoha případech je konkrétní technické řešení návrhu přístroje poplatné jiným než technickým požadavkům aplikace. Jedná se zejména o cenu, zkušenosti a dostupnost konkrétního produktu.

Pro správnou funkci měřidla teploty je, kromě technických a aplikačních záležitostí, důležitá jeho pravidelná kalibrace. Při kalibraci se správnými velikostmi nejistoty je možné

optimalizovat výkonnost jednotlivých částí technologie a tím zefektivnit její provoz.

Instalace teploměru do jímky a do potrubí je důležitou součástí postupu správného měření teploty. Do současné doby neexistuje postup, který upravuje hloubku ponoru teploměru v potrubí.

Pro správný návrh měřicího systému je nutné postupovat podle následujících kroků:

- porozumění dynamice a vlastnostem měřeného procesu,
- nalezení správného typu senzoru pro danou aplikaci,
- kalibrace celého měřicího řetězce za podmínek co nejvíce odpovídajících reálnému použití s odpovídající nejistotou,
- správná instalace měřicího řetězce pro zaručení korektnosti měření,
- plánování periodických kontrol funkčnosti zařízení a jeho recalibrace s odpovídající nejistotou.

Na trhu je, v současné době, k dispozici velké množství různých typů a provedení přístrojů pro měření teploty. Je také mnoho zdrojů častých chyb při jejich výběru i instalaci. Není možné v tomto článku pojmut všechny zdroje těchto chyb a nepřesností. Budeme se věnovat některým základním problémům, které jsou bezpodmínečně nutné pro správné měření teploty.

6.1 Postup výběru vhodného měřidla

6.1.1 Poznání aplikace

Prvním krokem pro návrh měření teploty pro konkrétní aplikaci je porozumění procesům ve vlastní technologii. Je nutné si položit následující otázky:

- Je teplotní pole v systému ustálené? Co je hnací silou nehomogenit a jak jsou velké?
- Jaký je převládající mechanismus sdílení tepla?
- Jedná se o proces statický nebo dynamický?
- Proč měřím?
- S jakou nejistotou potřebuji měřit teplotu?
- Jaké je okolní prostředí?
- Jaké jsou přítomny agresivní látky v měřeném médiu a v okolí?
- Co způsobí špatné měření, popřípadě jeho výpadek?

Existuje celá řada dalších otázek, jako například legislativní požadavky, certifikace pro čistá prostředí, validace pro farmaceutický průmysl, certifikáty pro používání měřidel v obchodním styku, pro prostředí s nebezpečím výbuchu, a podobně.

6.1.2 Kalibrace

Pokud je pro konkrétní aplikaci nutné měření, je odůvodněné předpokládat, že výsledný údaj je, z nějakého hlediska, důležitý. Proto je důležité validovat tento měřený údaj. Systém řízení jakosti na měřidla pamatuje jejich kalibraci, popřípadě periodickou recalibraci, definovaným způsobem.

Protože existuje nepřeberné množství typů, velikostí a tvarů jednotlivých senzorů teploty, je někdy obtížné provést vlastní kalibraci. Protože byl typ a tvar přístroje vybrán tak, aby odpovídal dané aplikaci, je nutné vytvořit takový scénář kalibrace, který co možná nejvěrohodněji kopíruje skutečné poměry při vlastní instalaci. V praxi se provádějí dva různé přístupy:

1. Zaměřit se na vlastní teploměrný element. Jedná se o klasickou kalibraci v akreditované kalibrační laboratoři. Míra dosahované nejistoty kalibrace je obvykle velmi nízká. Nevýhodou ovšem zůstává skutečnost, že je provedena kalibrace pouze vlastního elementu, a ne celého měřicího řetězce za provozních podmínek.
2. Zaměřit se na celou instalaci – měřicí řetězec. Jedná se vlastně o proměření vlastností měřicího řetězce pomocí referenčního zařízení IN SITU. Pokud jsou dodrženy základní podobnostní parametry mezi oběma zařízeními, je možné dosáhnout rozumné míry nejistoty. Výhoda tohoto procesu je proměření celého měřicího řetězce za provozních podmínek. Nevýhodou bývá časté proměření pouze v jednom pracovním bodě.

Pro vlastní měření je důležitá také otázka stanovení nekalibračního intervalu. Jeho velikost je v rukách uživatele. Ten by měl provádět periodická zjišťování vlivu vlastního prostředí aplikace na drift měřidla a v závislosti na důležitosti a typu měřidla provádět jeho pravidelnou recalibraci včetně všech ostatních částí měřicího řetězce.

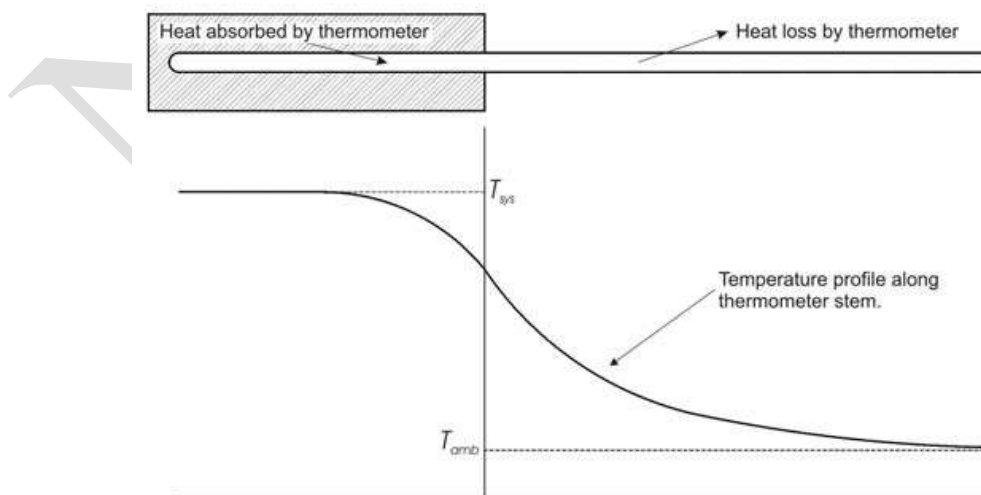
Jedna ze základních pouček, které je nutné si uvědomit, je skutečnost, že teploměr měří teplotu svého senzoru.

6.1.3 Chyba ponoru

Literatura tento problém řeší jen okrajově a říká:

Teploměr je správně ponořený (rozuměj - má správný ponor), nezjistíme-li žádnou změnu indikované teploty, pokud ponoříme teploměr hlouběji.

Závislost indikované teploty na délce ponoru je exponenciální funkce velikosti senzoru, jeho délky a rozdílu teplot měřené a okolní teploty – viz obrázek č. 5.

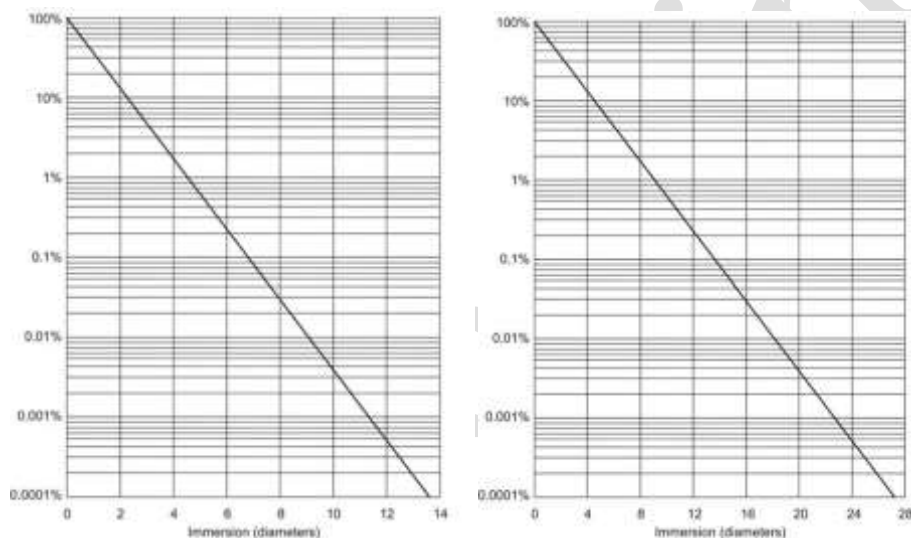


Obr. č. 5: Závislost indikované teploty na ponoru senzoru.

Tuto závislost lze popsat pomocí vztahu

$$\Delta T = (T_{\text{okolí}} - T_{\text{média}}) k e^{-\frac{L}{D_{\text{eff}}}},$$

kde ΔT je rozdíl měřené a skutečné teploty, L je ponor teploměru, D_{eff} je efektivní průměr teploměru (souvisí s velikostí jeho senzoru) a k je konstanta blízká 1. Tento vztah se ukazuje být velmi jednoduchý a snadno použitelný. Jediné, co je nutné si uvědomit, že odvození bylo provedeno pro dokonale promíchávanou kapalnou lázeň. Na vzduchu nebo v proudícím médiu je hodnota k jiná a je nutné ji pro každý případ stanovit separátně. Na obrázku č. 6 je vidět graf závislosti relativní chyby $\frac{\Delta T}{(T_{\text{okolí}} - T_{\text{média}})}$ na poměru $\frac{L}{D_{\text{eff}}}$ pro kapalnou lázeň a vzduch.



Obr. č. 6: Grafické znázornění chyby ponoru teploměru pro kapalnou a vzdušnou lázeň.

Je možné uvedený vztah shrnout do následujících pouček:

- pro průmyslové teploměry je doporučeno ponořit teploměr minimálně 5 průměrů senzoru pro zajištění 1 % přesnosti,
- pro dobré laboratorní měření je doporučeno ponořit teploměr minimálně 10 průměrů senzoru pro zajištění 0,01 % přesnosti,
- pro nejlepší laboratorní měření je doporučeno ponořit teploměr minimálně 15 průměrů senzoru pro zajištění 0,0001 % přesnosti.

Také platí, že každým zvýšením ponoru o jeden průměr senzoru eliminujeme 60 % chyby způsobené špatným ponorem.

6.1.4 Chyba rychlosti odezvy

Ať už při kalibracích, tak i při vlastním měření je důležité si uvědomit rychlost odezvy teploměru na změny měřené teploty. Opět platí jednoduchý model

$$\Delta t = (t_{poč} - t_{kon}) e^{-\frac{\tau}{\tau_0}},$$

kde $t_{poč} - t_{kon}$ je rozdíl počáteční a koncové teploty, τ je doba od počátku změny a τ_0 je časová konstanta systému. Jedná se vlastně o systém prvního řádu (tedy senzor bez jímky). Pro průmyslové provedení se jedná o systém druhého řádu obvykle bez harmonické složky, ale s inflexním bodem. Jinými slovy, doba odezvy je delší.

Stejně jako s problémy délky ponoru, i u rychlosti odezvy platí, že v praktickém měření (např. proudící vzduch) je chyba výrazně větší než u kalibrace v lázni. Opět platí jednoduchá poučka

Po změně teploty je nutné počkat minimálně pětinasobek časové konstanty pro chybu menší než 1 %.

Při dynamických změnách teploty je odhad chyby bez znalosti fyzikálního modelu celé soustavy obtížný. Například při periodických změnách teploty je čtení teploměru menší o faktor

$$G(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 \tau_0^2 f^2}},$$

Kde f je frekvence periodické změny teploty.

6.1.5 Chyba přenosem tepla

Teplu může být transportováno třemi různými způsoby:

- *vedením* – například vedení tepla po stonku teploměru,
- *prouděním* – například přenos tepla teplosměnnou kapalinou nebo vzduchem,
- *sáláním* – například z lampy, pece nebo i slunečního svitu.

Většinu chyb můžeme odstranit správnou izolací elementu. Mezi velmi kritickou část ale patří vedení radiací. Velmi často si neuvědomíme, že lampa nebo jiný předmět přenáší teplo a vzniklé chyby potom mohou být značné. To je nejčastější problém například při povrchovém měření teploty.

7 Metrologické meze využití metody měření

Při měření teploty pomocí TC je nutné brát v úvahu rozsah jeho kalibrace a mechanické možnosti instalace příslušného měřidla do zkoušeného prostředí. Vždy je nutné počítat s vlivem odlišnosti reálného prostředí od podmínek v laboratoři, popřípadě při kalibraci.

8 Kontrola měřidla před použitím a příprava na měření

Při vnější prohlídce se zjišťuje, zda snímače nemají vady zjistitelné zrakem. Zjišťuje se zejména:

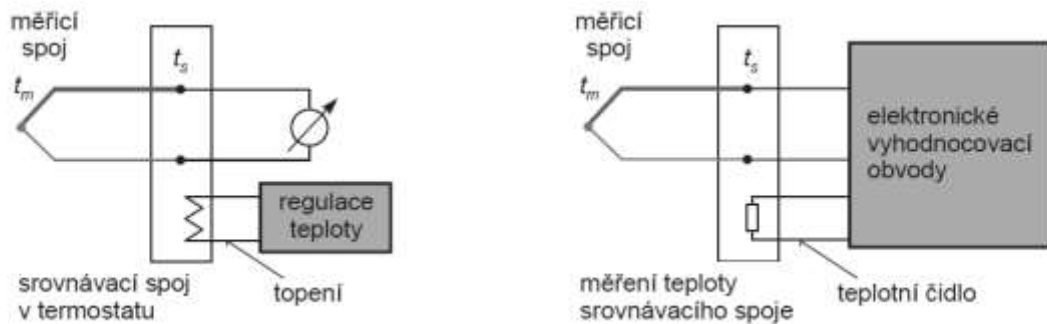
- zda není snímač poškozen mechanicky nebo tepelným namáháním a zda není poškozena hlavice nebo připojení větví na svorky,
- zda je k dispozici příslušná dokumentace (návod k použití, schéma zapojení, ...),
- zda jsou k dispozici podklady o zapojení napájení a nastavení převodníku u snímačů s převodníkem,
- zda nejsou znečištěny větve, izolační keramika, ochranná keramika, resp. ochranná trubka,
- zda větve z drahých kovů a měřicí spoj mají lesklý povrch, jsou čisté nebo mají pouze rovnoměrnou oxidační vrstvu.

U měřicích řetězců kontrolujeme stav připojovacích svorek a kabelů a mechanický stav snímačů teploty. Při používání měřicího řetězce s termoelektrickým snímačem teploty je nutné kontrolovat provedení a teplotu srovnávacího konce (teplota okolí nebo termostat s definovanou teplotou, umístění převodníku s referenční teplotou apod.). Současně kontrolujeme stav a správnost prodlužovacího vedení. Do homogenizačních bloků vkládáme snímače teploty vyjmuté z ochranné jímky a řádně očištěné.

Standardní referenční podmínky digitálních měřidel používaných pro měření představují teplota v rozmezí $t = (23,0 \pm 5,0) \text{ } ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkost ovzduší nekondenzující (cca do 90 % RH). Podmínky prostředí mimo laboratoř ale často referenční podmínky překračují oběma směry. Pokud známe teplotní závislost měřidel, můžeme kalibrace provádět v rámci pracovních podmínek (obvykle $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ až $40 \text{ } ^\circ\text{C}$) a vliv teploty zahrnout do složek nejistoty měření. Zásadní rozdíl oproti měření v laboratoři je, že používáme měřidla, která jsou umístěna v provozních podmínkách a temperována na pracovní teplotu.

9 Postup měření

Termoelektrické napětí se obvykle měří obvykle pomocí digitálních voltmetrů nebo různých napěťových převodníků. Způsob měření a vyhodnocení je ovlivněn zejména způsobem realizace srovnávacího spoje termočlánku. Pro účely měření v laboratorních podmínkách se referenční spoj realizuje v izotermních podmínkách při $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ pomocí směsi ledové tříště s destilovanou vodou umístěné v Dewarově nádobě. V praxi ale může být srovnávací spoj termostatován na jinou teplotu. V případě, že není teplota srovnávacího spoje udržována na konstantní hodnotě, měla by být monitorována jiným teploměrem (např. odporovým teploměrem Pt100). Obě tyto situace jsou schematicky znázorněny na následujícím obrázku.



Obř. č. 6: Příklady realizace teploty srovnávacího spoje: umístění srovnávacího spoje v termostatu (vlevo), měření aktuální teploty srovnávacího spoje s automatickým vyhodnocením (vpravo)

Při měření provádíme obvykle min. 3 odečty ustáleného stavu. Některá zařízení se základním typem regulace (muflové pece, starší typy sušáren) udržují teplotu v tzv. regulačním rozpětí (dvoustavová regulace ON ... OFF). Po ustálení regulace je vhodnější odečítat dolní a horní mez regulačního rozpětí a stanovit střední hodnotu regulace. Hloubka ponoru snímačů je dána jejich konstrukcí a řídí se doporučením výrobce pro daný typ sondy. Je třeba zajistit pokud možno co nejhlubší ponor snímačů k zabezpečení minimalizace teplotních odvodů. Při rozdílném průměru snímače a otvoru bloku nebo při nedostatečné hloubce ponoru použijeme keramickou vatu k zakrytí otvorů bloku a zlepšení homogenity teplotního pole kalibrační píčky. Postup při nastavování a odečtu teploty je obdobný kalibraci indikačních teploměřů. Teplota okolí při kalibraci musí ležet v povoleném rozsahu pracovních teplot dle specifikace přístroje. U digitálních měřicích řetězců lze nastavit korekci měřidla v ovládacím SW (ofset dolní a horní meze měření, linearita apod.) Je-li uvedena samostatná metrologická specifikace přístroje, lze výsledky porovnat s touto specifikací.

10 Stanovení nejistoty měření teploty pomocí termoelektrického článku

Je stanoven v souladu s dokumentem EA 4/02: M 2013. Pro jednotlivé měřené teploty se provede vyhodnocení nejistot měření. Při vyhodnocování nejistot se pracuje pouze se standardní nejistotou ($k = 1$). Výpočet se provádí μV , případně ve $^{\circ}\text{C}$. Nejistoty údaje měřidla podle jeho kalibračního listu jsou obvykle rozšířené s koeficientem rozšíření $k = 2$. Vydělením rozšířené nejistoty tímto koeficientem se dostane hodnota standardní nejistoty ($k = 1$), se kterou se provádí výpočet nejistoty.

10.1 Standardní nejistota typu A u_A .

Vychází ze statistické analýzy opakované série měření. Odhad výsledné hodnoty pro počet měření N je vyjadřován aritmetickým průměrem:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Nejistota tohoto odhadu se určí jako výběrová směrodatná odchylka této hodnoty podle vztahu:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

10.2 Nejistota typu B u_B

Do rozpočtu nejistoty by měly vstupovat složky, jako je kalibrace měřidla, jeho drift a rozlišení. Dále srovnávací spoj (směs ledu a vody v Dewarově nádobě, popřípadě jiný způsob určení referenční teploty) a prodlužovací/kompenzační vedení (včetně všech napojení, svorek, apod.). Nedílnou součástí odhadu výsledné nejistoty je rozdíl podmínek měření od podmínek při kalibraci.

Pro každou část zařízení je nutné uvažovat následující složky:

- nejistota kalibrace,
- drift od poslední kalibrace,
- rozlišení v případě odečítání měřeného údaje a
- rozdílnost použití oproti kalibraci. Jedná se zejména o:
 - jiné okolní podmínky,
 - jiná kabeláž,
 - jiný měřicí bod,
 - jiný ponor,
 - jiná dynamika procesu
 - vliv hystereze a homogenity (u TC).

Pro odhad hodnoty nejistoty měření napětí TC v teplotním prostředí je nutné znát velikosti následujících složek nejistoty:

- nejistota kalibrace TC, je uvedena v kalibračním listě,
- časová nestálost TC,
- nestabilita teplotního pole, nehomogenita teplotního pole,
- rozdílný odvod tepla TC oproti kalibraci, hodnota se určuje odhadem dle konkrétního měření,
- vliv rozdílné instalace TC oproti kalibraci (hlavně ponor),
- vliv multimetru (kalibrace, drift, rozlišitelnost...),
- parazitní termonapětí v obvodu TC, hodnota se určuje odhadem dle konkrétního měření,
- nepřesnost měření teploty srovnávacího spoje TC, je dána změnami teploty termostatu srovnávacích spojů (Dewarovy nádoby) a nejistotou měření této teploty,
- nehomogenita kalibrovaného TST.

10.3 Kombinovaná standardní nejistota u_c

vypočte se podle vztahu:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Takto vypočtená kombinovaná standardní nejistota se přepočte na rozšířenou nejistotu s koeficientem rozšíření $k = 2$:

$$U = k u_c$$

Nejistoty jsou uváděny pro jednotlivé zkušební teploty. Výsledná nejistota může být vyjádřena také rovnicí jako funkce teploty.

Je-li poměr maximální a minimální nejistoty pro měřicí teplotní rozsah ≤ 2 může se výsledná nejistota vyjádřit jako jediná pro celý měřicí rozsah, kdy je rovna maximální hodnotě nejistoty z jednotlivých zkušebních teplot. V opačném případě se udávají nejistoty pro jednotlivé zkušební teploty. Výsledná nejistota může být vyjádřena také rovnicí jako funkce teploty. Ukázkový rozpočet nejistoty je zobrazen následující tabulce:

zdroj nejistoty	z_{max}	rozložení	κ	u_x	k	u_y
nejistota kalibrace TC	2 μV	Gaussovo	2,000	1,000 μV	1,000 $\mu\text{V} \cdot \mu\text{V}^{-1}$	1,000 μV
časová nestálost TC	1 μV	bimodální t.	1,414	0,707 μV	1,000 $\mu\text{V} \cdot \mu\text{V}^{-1}$	0,707 μV
Nepřesnost výpočtu mezi body kalibrace	3 μV	rovnoměrné	1,732	1,732 μV	1,000 $\mu\text{V} \cdot \mu\text{V}^{-1}$	1,732 μV
Nestabilita teplotního pole	0,3 $^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,173 $^{\circ}\text{C}$	10,500 $\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,819 μV
Nehomogenita teplotního pole	0,3 $^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,231 $^{\circ}\text{C}$	10,500 $\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,819 μV
Rozdílný odvod tepla včetně rozdílné instalace	0,4 $^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,289 $^{\circ}\text{C}$	10,500 $\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	2,425 μV
Nepřesnost měření TC multimetrem	2 μV	rovnoměrné	1,732	1,154 μV	1,000 (-)	1,154 μV
Parazitní termonapětí v obvodu TC	2 μV	rovnoměrné	1,732	1,154 μV	1,000 (-)	1,154 μV
Nepřesnost 0 $^{\circ}\text{C}$ srov. konce TC	0,2 $^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,116 $^{\circ}\text{C}$	5,400 $\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	0,624 μV
Nehomogenita TC	0,2 $^{\circ}\text{C}$	rovnoměrné	1,732	0,115 $^{\circ}\text{C}$	10,500 $\mu\text{V} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	1,212 μV
Nejistota typu A	---	---	---	1 μV	1,000 (-)	1,000 μV
Kombinovaná standardní nejistota	4,582 μV					
Koeficient rozšíření	2					
Rozšířená standardní nejistota	9,485 μV					

11 Záznamy o měření

Formální podoba záznamu o měření by se měla řídit předpisy dané organizace. Z pohledu všeobecných zásad tvorby formulářů by měl záznam obsahovat vždy alespoň:

- identifikaci pracoviště provádějícího měření,
- pořadové číslo záznamu, očíslování jednotlivých stran, celkový počet stran,
- informace o použitém měřidle,
- hodnoty veličin ovlivňujících měření (teplota a vlhkost okolí, způsob instalace, měření...),
- datum měření, (případně i čas),
- označení použité metodiky měření nebo její popis
- informace o měřidlech použitých při měření ovlivňujících veličin,
- vyjádření o návaznosti výsledků měření,
- výsledky měření a s nimi spjatou rozšířenou nejistotu měření,
- jméno pracovníka, provádějícího měření, jméno a podpis odpovědného (vedoucího) pracovníka, razítko pracoviště.

12 Péče o metodický postup

Originál metodického postupu je uložen u jeho zpracovatele, další vyhotovení jsou předána příslušným pracovníkům podle rozdělovníku zpracovatele. Změny, popř. revize metodického postupu provádí jeho zpracovatel. Změny schvaluje vedoucí zpracovatele

nebo metrolog organizace.

13 Rozdělovník, úprava a schválení, revize

Uvedený příklad je pouze orientační a subjekt si může tuto dokumentaci upravit podle interních předpisů o řízení dokumentů.

13.1 Rozdělovník

Metodický postup		Převzal		
Výtisk číslo	Obdrží útvar	Jméno	Podpis	Datum

13.2 Úprava a schválení

Metodický postup	Jméno	Podpis	Datum
Upravil			
Úpravu schválil			

13.3 Revize

Strana	Popis změny	Zpracoval	Schválil	Datum

Upozornění

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