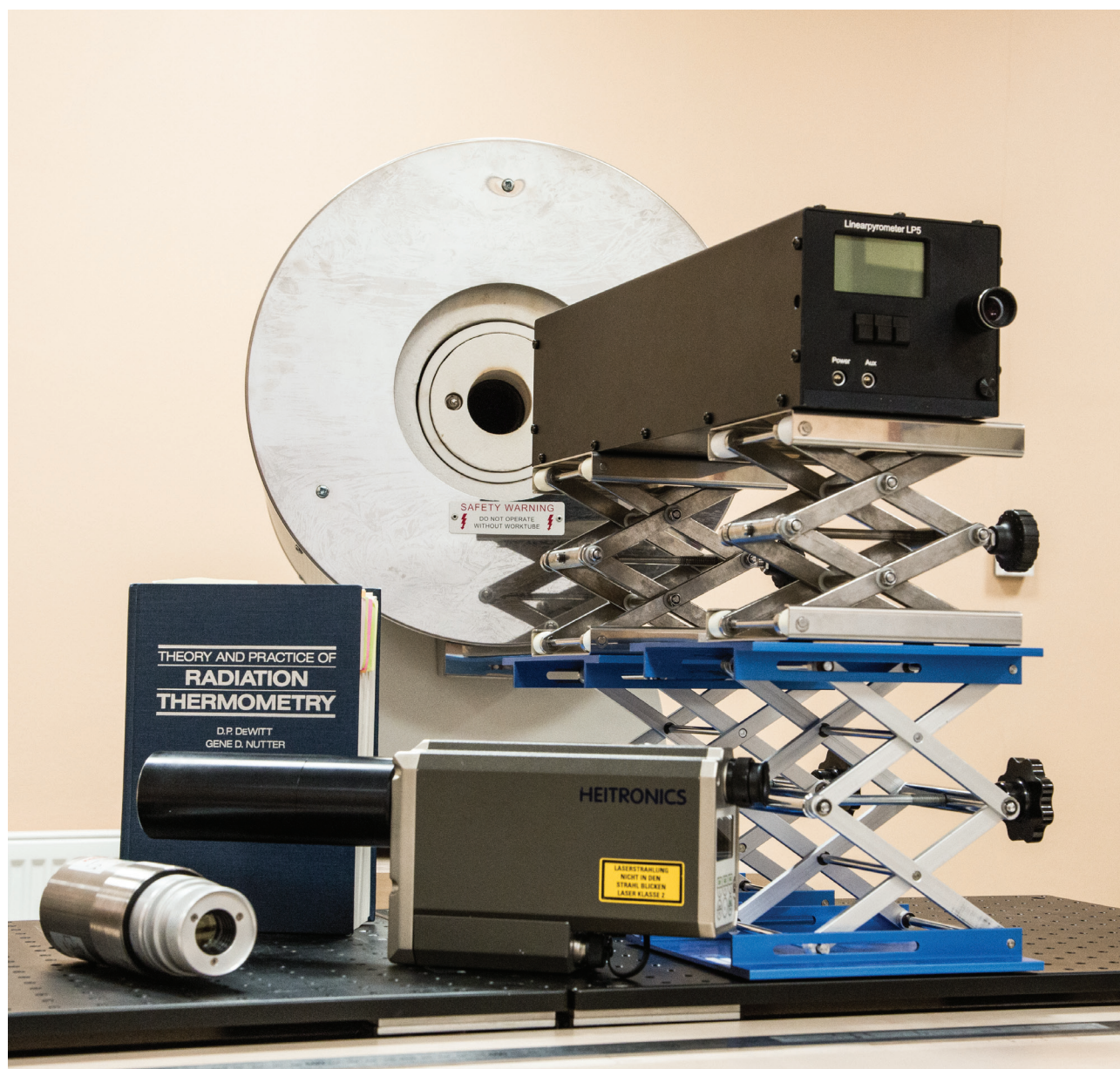


TEMATICKÁ PŘÍLOHA č. 1/2018

Teplota – její měření a aplikace

METROLOGIE

VĚDECKÁ
LEGÁLNÍ
PRAKTICKÁ



1. HISTORIE MĚŘENÍ TEPLoty

1. Vývoj metrologie teploty ve světě

Počátky měření teploty spadají do období antiky, kdy staří Řekové považovali teplo a chlad za zvláštní vlastnosti hmoty (společně se suchem a vlhkem) [1]. Výroba opravdu prvního teploměru asi zůstane navždy zahalena tajemstvím. Za nejstarší přístroj k indikaci tepelných stavů se považuje vzduchový termoskop, (využívající teplotní roztažnosti tekutiny), který popsal a používal alexandrijský Heron. Jeho spisy koncem 16. století studoval italský přírodopisec Galileo Galilei, který si takový termoskop sestrojil. Podstatně jej zdokonalil K. Schott (1608–1666), a to tím, že použil uzavřený systém se dvěma baňkami na koncích spojovací trubice ve tvaru písmene U, v níž byla indikační kapalina. Byl to vlastně rozdílový teploměr se vzduchem jako teploměrnou látkou. Francouzský lékař Jean Rey použil v roce 1631 jako teploměrnou látku vodu v otevřené baňce. Další zdokonalení navrhl a realizoval Galileův žák, toskánský vévoda Ferdinand II., v roce 1641; ten plnil lihem teploměry tvarem již podobné současným. Stupnice však byly nezávisle volené, takže údaje se navzájem lišily. Později florentinská Akademie používala pro meteorologické účely teploměry se spirálovitě stočenou trubičkou rozdělenou na 300 až 400 stejných dílků. Tyto teploměry byly velmi citlivé a členové Akademie s jejich pomocí zjistili, že teplota tajícího ledu je velmi stabilní. Tuto teplotu začal používat jako základní R. Boyle v roce 1664.

Vývoj spolehlivého přístroje pro měření teploty vyžadoval vytvoření vědecké teorie tepla a teploty tak, aby jeho údaj byl opakovatelný a nezávislý na místě, času, metodě a pracovníkovi. Proto bylo nutné definovat stupnici pro měření teploty.

O stanovení všeobecné teplotní stupnice se jako první zasloužil D. G. Fahrenheit. Teplotní stupnici založil na třech teplotách a teploměru naplněném lihem. Za základní bod použil teplotu chladicí směsi ledu a salmiaku (NH_4Cl) a označil ji nulou (domníval se, že nelze vytvořit teplotu nižší). Jako druhou zvolil teplotu tání ledu a označil ji hodnotou čtyři. Třetím bodem byla teplota zdravého lidského těla, označená hodnotou dvanáct. Od roku 1720 plnil teploměry rtuť. Poněvadž dosavadní díly se mu zdály velké, rozdělil každý na osm částí, které nazval stupně, takže teplota tání ledu má na jeho stupnici hodnotu 32 stupňů (značka °F), teplota zdravého lidského těla je 96 °F a teplota varu vody je 212 °F. Teploměry vyráběné Fahrenheitem se rychle rozšířily a stupnice označená jeho jménem se dodnes používá v Anglii a v USA.

V Evropě se delší dobu používala teplotní stupnice, kterou asi v roce 1740 navrhl pařížský zoolog René de Réaumur. Teplotu tání ledu na ní označil hodnotou 0 a teplotu varu lihu hodnotou 80. Později, u rtuťových teploměrů, odpovídala hodnota 80 teplotě varu vody (s připojenou značkou °R).

Švédský matematik a geodet Anders Celsius (1701–1744) zavedl v roce 1742 do měření teplot desítkovou soustavu. Teplotu tání ledu označil hodnotou 100, teplotu varu vody 0. Po něm profesor Martin Strömer (1707–1770) navrhl v roce

1750 Švédské akademii, aby úsek mezi teplotou tání ledu a teplotou varu vody byl ponechán rozdělený na sto stupňů, ale označení teploty tání ledu se změnilo na 0 a teplotě varu vody byla přiřazena číselná hodnota 100. Tato stupnice se dodnes nazývá Celsiova (se značkou °C).

Pokrok termodynamiky vedl k termodynamické teplotní stupnici (značka K¹), kterou v roce 1852 popsal lord Kelvin: Teplotu je možné definovat nezávisle na jakémkoliv látku podle základních zákonů termodynamiky, které popisují přeměnu tepla v práci. Poměr teplot dvou těles lze považovat za poměr dvou tepelných množství – tepla odebraného a tepla odevzdaného ve vratném Carnotově cyklu, pracujícím mezi dvěma teplotami, takže měření teploty se převádí na měření množství tepla. Je nutné zvolit jeden pevný bod a stanovit jeho teplotu. To později udělala 13. generální konference pro míry a váhy v roce 1967, když stanovila, že jeden kelvin, jak byl nazván základní díl Kelvinovy termodynamické teplotní stupnice (přijaty také za jednotku rozdílu teplot), je 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody.

Termodynamická teplotní stupnice je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost těchto vratných cyklů pracujících mezi stejnými lázněmi určitých teplot je závislá jen na těchto teplotách a nezávislá na použité teplotněm látky. Pro teplotu $T_2 > T_1$ platí

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (1)$$

kde η je účinnost cyklu, T je termodynamická teplota, Q_2 je teplo odebrané teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_2 a Q_1 je teplo odebrané teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_1 .

Termodynamickou teplotní stupnici založenou na Carnotově vratném cyklu nelze v praxi realizovat. Proto termodynamická teplotní stupnice vychází z vlastností ideálního plynu a k její realizaci slouží plynový teploměr. Údaje získané prostřednictvím skutečného plynu, kterým je použitý teploměr naplněn, je nutné korigovat. Plynový teploměr je založen na stavové rovnici ideálního plynu

$$PV = NkT, \quad (2)$$

kde P je tlak plynu, V je jeho objem, N je počet molekul plynu v daném objemu, k je Boltzmannova konstanta a T je termodynamická teplota.

Protože je absolutní měření přesných hodnot veličin z rovnice (2) obtížné, používá se v praxi poměrové verze tohoto zákona (vztahované na nějaký pevný bod s indexem 0)

$$\frac{PV}{P_0V_0} = \frac{T}{T_0}. \quad (3)$$

Pro velmi přesná měření je výsledná rovnice komplikovanější korekcemi na neideální chování plynu a na reálné chování vlastní aparatury. Jako médium se obvykle používají izotopy hélia.

¹ Původní označení bylo °K, v současné době jen K.

Pro praktické účely jsou používány tzv. *primární teploměry*. Jedná se o zařízení, které je možné popsat explicitní rovnicí, vyjadřující vztah mezi měřenými hodnotami a teplotou. Tato rovnice neobsahuje žádné další konstanty nebo funkce závislé na teplotě.

Prvním příkladem primárního teploměru je plynový teploměr. Častěji zde bývá využívána modifikace rovnice (2)

$$PV = nRT, \quad (4)$$

kde n je počet molů média a R je univerzální plynová konstanta. Tento vztah platí pro ideální plyn. Pro reálný plyn je využívána viriálová rovnice

$$PV = nRT \left(1 + B(T) \frac{n}{V} + C(T) \left(\frac{n}{V} \right)^2 + \dots \right), \quad (5)$$

kde B a C je druhý a třetí viriálový koeficient (závislý na teplotě). Vztahy pro výpočet těchto koeficientů jsou poměrně složité i pro plyny blízké ideálnímu chování (používá se helium). Proto se v praxi obvykle používá dvoukomorového zapojení s jednou komorou referenční (na známé teplotě, nejčastěji 273,16 K). Výsledkem měření je termodynamická teplota.

Další možností je tzv. šumový teploměr. Na vývodech každého rezistoru je v důsledku teplotně závislého volného pohybu elektronů ve vodivostním pásmu měřitelné elektrické napětí, které má stochastický charakter. Toto napětí se označuje jako *Johnsuův*, *Nyquistův* nebo jednoduše tepelný šum. Energie tohoto šumu je rovnoměrně rozložena po celém frekvenčním pásmu, odpovídá tedy bílému šumu. Tepelný šum je dán spektrální výkonovou hustotou S podle následujícího vztahu

$$S(f) = 4kT \operatorname{Re}(Z(f)), \quad (6)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, f je frekvence a $\operatorname{Re}(Z)$ je reálná část impedance rezistoru. Obvykle používá vztahu

$$\bar{u}^2(T) = 4kTR\Delta f$$

nebo

$$u_{\text{eff}} = \sqrt{\bar{u}^2(T)} = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (7)$$

kde u_{eff} je efektivní hodnota šumu a R je zde elektrický odpor, který je v daném frekvenčním pásmu Δf frekvenčně nezávislý. Při měřeních se volí poměrová realizace, která má menší nároky na instrumentaci.

Velmi často používaným primárním teploměrem je pyrometr *celkového záření*. Celková intenzita vyzařování černého tělesa L při teplotě T je dána vztahem

$$L(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2} T^4 = \sigma T^4, \quad (8)$$

kde c je rychlost světla, h je Planckova konstanta, k Boltzmannova konstanta a σ je Stefan-Boltzmannova konstanta. Podobně jako u předešlých typů bývá používán poměrový vztah (vůči teplotě trojného bodu vody)

$$\frac{L(T)}{L(T_{273,16})} = \left(\frac{T}{273,16} \right)^4. \quad (9)$$

Výše uvedené typy jsou nejčastěji používané primární teploměry. Slouží k určování termodynamické teploty. Jejich používání je ale drahé a náročné. Proto bývají používány pro úkoly vědeckého charakteru.

Postupem času se vývoj začal ubírat čtyřmi hlavními směry:

- 1. Fyzikální interpretace** – co je podstata teploty? Trvalo téměř 300 let od prvního praktického teploměru k vytvoření dobré fyzikální teorie měření teploty.
- 2. Stupnice** – jak by měla být definována stupnice teploty? V průběhu let docházelo k vývoji teplotních stupnic a do současné doby se jedná o oblast neustálého vylepšování.
- 3. Měření** – výsledek měření teploty je ovlivňován celou řadou faktorů. Vědecká interpretace výsledných vlivů a chyb vyžaduje systematický přístup.
- 4. Návaznost** – co je vyžadováno, aby byl výsledek měření akceptován ostatními? Návaznost jako koncept je neustále rozvíjena. Pouze laboratoře, které se systematicky věnují výše uvedeným problémům a mají zajištěnu metrologickou návaznost výsledků měření, mohou dosáhnout toho, že jejich výsledky jsou obecně akceptovány.

2. Teplotní stupnice

Jak bylo výše ukázáno, měření teploty je zprostředkováno měřením jejího vlivu na jinou veličinu, například objem nebo tlak. Lineární interpolací mezi dvěma pevnými teplotami bylo zavedeno více teplotních stupnic, realizovaných jako například rtuťová, lihová, platinová. Ty se od sebe lišily tím více, čím větší byla vzdálenost měřené teploty od zvolených pevných teplotních bodů, protože měřená veličina (např. objem nebo tlak) se v závislosti na teplotě u různých realizací liší.

V roce 1887 přijal Mezinárodní výbor pro váhy a míry (CIPM) dohodu o způsobu měření teplot. Vyšel ze stodílkové stupnice vodíkového teploměru se dvěma pevnými teplotami. Byly to teplota tání ledu (0 °C) a teplota varu destilované vody při normálním atmosférickém tlaku (100 °C). Počáteční tlak vodíku v plynovém teploměru byl 1 000 torrů (133,32 kPa). V téže době P. Chappius porovnal čtyři rtuťové teploměry z tvrdého skla mezi 0 °C až 100 °C a mezi 0 °C až 32 °C se svým vodíkovým teploměrem. Tyto velmi přesné rtuťové teploměry vyráběla francouzská firma Tonnelot. Od roku 1898 je vyráběla i firma Boudin, takže si je mohla opatřit, a poté měřit teplotu v rozmezí 0 °C až 100 °C s rozlišením $\pm 0,01$ stupně, každá laboratoř.

V roce 1911 se ředitelé národních laboratoří Německa (PTR), Velké Británie (NPL) a Spojených států amerických (NBS) dohodli na sjednocení teplotní stupnice pro použití ve svých zemích. Toto úsilí bylo formálně schváleno v roce 1913 na 5. Generální konferenci pro váhy a míry. Postupně se chystal návrh teplotní stupnice. Prvním příspěvkem bylo oznámení německé laboratoře PTR, jakým způsobem bude kalibrovat teploměry od 1. 4. 1916. Mezinárodní spolupráci omezila válka, takže výsledek práce vykonané s cílem vytvořit praktickou teplotní stupnici byl zveřejněn až v roce 1927 na 7. Generální konferenci pro váhy a míry, kde se sešli zástupci 31 států. Na doporučení tří zmíněných laboratoří, které se

poradily o problematice nízkých teplot s Leidenskou kryogennickou laboratoří, byla na této konferenci jednomyslně přijata rezoluce navržená CIPM: „Výbor uznává praktický význam ustanovení mezinárodní teplotní stupnice a doporučuje konferenci prozatímně přijmout základní teplotní body, interpolační vzorce a metody měření společně navržené třemi národními laboratořemi: Německa, Anglie a Spojených států amerických. Výbor také doporučuje, aby prozkoumání připojeného textu bylo zařazeno jako zvláštní bod programu konference o termometrii, která bude pořádána pod jeho dohledem.“ Tak byla přijata tzv. Mezinárodní teplotní stupnice 1927 (The International Temperature Scale of 1927 – ITS-27).

Teplotní stupnice se vyznačuje minimální a maximální hodnotou, pevnými body a interpolačním postupem pro urovnání teploty mezi nimi.

Pevný bod je reprezentován fyzikálním systémem s reprodukovatelným chováním. Nejběžněji se jedná o velmi čistou látku (nominální čistota často přesahuje 99,99999 %), která taje, tuhne, vypařuje se nebo je v tzv. *trojném bodě*. Z obecně platných zákonů vyplývá, že pokud se vyskytuje v koexistenci jedna látka o dvou fázích (např. kapalina, pevná látka) v izobarickém systému není možné měnit teplotu, aniž by došlo k vymizení jedné fáze. Pro systém v trojném bodě (koexistence všech tří fází média) nemusí být splněna ani podmínka izobarického systému, počet stupňů volnosti je nulový, tedy není možné změnit ani tlak ani teplotu, aniž by došlo k vymizení jedné fáze.

Do současné doby vzniklo několik teplotních stupnic, vždy pojmenovaných podle roku zavedení. Liší se od sebe svojí přesností, metodami interpolace, rozsahem a typem jednotlivých fixních bodů. Jednalo se postupně o stupnice ITS-27, ITS-48 (s modifikací z roku 1960), ITS-68 (s modifikací z roku 1975) a poslední ITS-90 (s modifikací z roku 2000). **Tab. 1** ukazuje příklady pevných bodů používaných v těchto teplotních stupnicích.

Tabulka 1: Vybrané body mezinárodních teplotních stupnic
Označení prodlév: V – var; T – trojný bod; M, F – tání, tuhnutí

Látka (prvek)	Prodléva	Teplota v °C pro mezinárodní teplotní stupnici z roku					
		1927	1948	1960	1968	1975	1990
vodík	T				-259,34	-259,34	-259,346 7
vodík	V				-252,87	-252,87	
dušík	T				-210,002	-210,004	
kyslík	T				-218,789	-218,789	-218,791 6
argon	T					-189,352	-189,344 2
rtuť	T	-38,87	-38,87	-38,87	-38,862	-38,841	-38,834 4
voda	M, F	0	0	0	0	0	
voda	T			0,01	0,01	0,01	0,01
galium	M						29,764 6
voda	V	100	100	100	100	100	
indium	F			156,61	156,634	156,634	156,598 5
cejn	F	231,85	231,9	231,91	231,9681	231,9681	231,928
kadmium	F	320,9	320,9	321,03	321,108	321,108	
rtuť	V	356,58	356,58	356,66	356,66		
hliník	F						660,323
stříbro	F	960,5	960,8	960,8	961,93		961,78
zlato	F	1 063	1 063	1 063	1 064,43		1 064,18
měď	F	1 083	1 083	1 083	1 084,50		1 084,62
platina	F		1 769	1 769	1 772		

V současně platné stupnici ITS-90 je jako základní bod vzat *trojný bod vody* s definovanou hodnotou 273,16 K. Trojný bod vody (TPW) je realizován v baňce z křemenného nebo borosilikátového skla, uložené ve speciální lázni nebo v Dewarově nádobě s ledem – **obr. 1**.



Obr. 1: Kyveta trojného bodu vody

Pro přesné měření teploty (kalibrace) je důležité tento základní bod realizovat s nejistotami co nejlepšími (primární laboratoř teploty ČMI OI Praha vlastní banku několika trojných bodů a realizuje tento základní bod s nejistotou 0,07 mK).

3. Metrologie měření teploty v České republice

Primární laboratoř teploty ČMI je součástí oblastního inspektorátu Praha. Ten měl již v době cejchovních úřadů značnou váhu vzhledem k umístění v metropoli a k velké územní působnosti a tedy se značným objemem obchodu a následně také počtem ověřovaných měřidel. Kromě samotné cejchovní služby vykonával také funkce Inspektorátu pro věci cejchovní, zajišťoval metrologický dozor i výchovu nových pracovníků. Opravdu



Obr. 2: Obrázek z prvního stěhování laboratoře OI Praha



Obr. 3: Stav budovy na Betlémském náměstí, druhé působiště oblastního inspektorátu ČMI v Praze

těžkými podmínkami inspektorát prošel počínaje koncem sedmdesátých let minulého století a konče zhruba rokem 1994. V této době se laboratoře inspektorátu postupně stěhovaly, se všemi negativními průvodními jevy, ze sídla v ulici V Celnici č. 5/1027 (muselo být uvolněno kvůli stavbě metra a sanaci území) do provizorní (nebylo známo, na jak dlouhou dobu provizorní) budovy na Betlémském náměstí. Tato budova byla silně zdevastovaná a do podoby, kdy zde bylo možné umístit laboratoře, musely být prováděny rekonstrukce, často vlastními silami zaměstnanců. V této budově bylo sídlo inspektorátu od roku 1980 do r. 1994.

Obr. 2 zachycuje první stěhování laboratoří OI Praha. **Obr. 3** charakterizuje vnější stav budovy na Betlémském náměstí, mimochodem už po částečné rekonstrukci. Tento stav přetrval potom až do devadesátých let. Bylo to sice místo poetické, v centru prastaré historické části města, ale pro laboratoře zcela nevhodné. Změna nastala až po roce 1989 a zejména v době vzniku ČMI. Inspektorát se sice opět stěhoval, tentokrát už ale do perspektivních prostor v Hostivaři (stěhování bylo skončeno v roce 1994).

Pražský oblastní inspektorát se v roce 1994 přestěhoval do budovy v Radiové, která byla původně v majetku federálního ministerstva financí a to ji nadále nepotřebovalo (působily zde i peripetie dělení majetku mezi ČR a SR). Značné úsilí si potom, zejména při přípravě rekonstrukce, vyžádalo rozpletení vlastnických nároků k parcelám, na kterých jsou budovy a zřízení inspektorátu umístěny.

Z původního stavu se opláštění budovy (včetně výměny oken) změnilo v roce 2003 k nepoznání (**obr. 4 a 5**), v roce 2010 potom byla dokončena výstavba nové paralelní budovy s laboratorními prostory, včetně laboratoří umístěných pod úrovní terénu (**obr. 6**)



Obr. 4: Původní stav budovy, kde dnes sídlí ČMI OI Praha



Obr. 5: Budova ČMI OI Praha po rekonstrukci



Obr. 6: Nová budova oblastního inspektorátu v Praze (vpravo)

Nová historie měření teploty v České republice se začala psát v roce 1993 po rozdělení Československa. Do té doby pracovala laboratoř teploty v Praze jako klasická kalibrační laboratoř s hlavní náplní práce v oblasti ověřování a kalibrace snímačů teploty. Po rozhodnutí o vybudování primární laboratoře bylo přistoupeno k zakoupení moderního vybavení od firem Isotech a AΣΛ. Po základním metrologickém zhodnocení a klíčovém mezinárodním porovnání bylo přistoupeno k vyhlášení státního etalonu teploty (v rozsahu od $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+419\text{ }^{\circ}\text{C}$) v roce 2003 [3].

Bouřlivý rozvoj průmyslu a personální posílení laboratoří primární a sekundární laboratoře teploty umožnily vybudování a koupi dalších měřicích přístrojů a zavedení celé řady nových oborů v souvislosti s tepelně – technickými vlastnostmi materiálů. ČMI se v tomto oboru stalo dobře etablovaným partnerem v různých oblastech průmyslu, jako je např. automobilový, petrochemický a letecký. V současné době je zaměření sekundární laboratoře teploty orientováno hlavně do oblastí externích kalibrací přímo u zákazníka.

Práce na vylepšování jednotlivých částí laboratoře teploty vedly v roce 2011 k rozšíření státního etalonu teploty v rozsahu od $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+1084\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V oblasti bezdotykového měření teploty byla zpočátku zabezpečena návaznost zejména pro subjektivní jasové pyrometry v teplotním rozsahu cca (700 až 2300) $^{\circ}\text{C}$. Pro moderní bezdotykové teploměry byla návaznost zabezpečena na sekundární úrovni v omezeném teplotním rozsahu cca (450 až 1100) $^{\circ}\text{C}$ pomocí termoelektrického snímače typu N. Nejistota kalibrace etalonu byla úrovni cca 1,2 $^{\circ}\text{C}$, což se dá považovat za dostatečné pro kalibrace na sekundární úrovni. Jako zlom ve směřování laboratoře je možné považovat tři události:

- nákup nového vybavení,
- personální rozšíření pracovníků primární laboratoře na OI Praha a
- poruchu na klimatizaci z r. 2007, kdy byla velká část stávající laboratoře poškozena (**obr. 7**).



Obr. 7: Laboratoř pyrometrie v r. 2007 po vytopení od nefunkční klimatizace

Na trhu ale i v praxi se stále častěji začaly objevovat moderní, objektivní, bezdotykové teploměry, které jsou v současné době schopny měřit teplotu v široké oblasti teplot, od těch podnulových až k teplotám v jednotkách tisíců $^{\circ}\text{C}$. Postupně se na trhu začaly objevovat i termokamery, které se také stávají populárním nástrojem jak pro měření teploty, tak pro různé preventivní úkony. Návaznost tohoto druhu měřidel, stejně jako černých těles nebyla v rámci České republiky definována.

Proto byla v Českém metrologickém institutu vybudována laboratoř, která je schopna zabezpečit návaznost měření na státní etalon a teplotní stupnici ITS-90 s adekvátní přesností. Nezbytnou součástí provedených prací tvořila charakterizace používaných měřidel a zařízení, vytvoření pracovních metod a kvantifikace měřicích schopností laboratoře neboli výpočet nejistot měření.

Na začátku prací byla provedena charakterizace dostupného zařízení a bylo zjištěno, že vybavení je zcela nedostačující



Obr. 8: Současný stav laboratoře bezkontaktního měření teploty

k pokrytí teplotního rozsahu (-30 až 1800) °C na úrovni blízké se té primární. Chyběly zde jak etalony, pomocí kterých by bylo možné provádět návaznost, tak i černá tělesa, která jsou potřebná pro realizaci požadovaných teplot. Proto byla laboratoř postupně dovybavena chybějícími tělesy, teploměry a pevnými body poskytující základní stavební kámen návaznosti. Pro rozvoj laboratoře byla klíčová také výstavba nové budovy v r. 2010 na pražském oblastním inspektorátu ČMI, kdy byly získány vhodné prostory. Současný vzhled laboratoře je zobrazen na obr. 8.

4. Reference

- [1] Quinn et al., Temperature, 2nd edition, London: Academic Press, 1972, ISBN 0-12-569681-7
- [2] František Jelínek, 20 let Českého metrologického institutu 1993-2013, ISBN 978-80-905619-0-8.
- [3] Oznámení o vyhlášení státního etalonu, http://www.unmz.cz/files/metrologie/st%C3%A1tn%C3%AD%20etalony/ECM%20320-1%2003-028_ozn%C3%A1men%C3%AD.pdf

2. MĚŘENÍ TEPLoty – ZÁKLADNÍ PRINCIPY

1. Úvod

Znalost teploty hraje důležitou roli v mnoha odvětvích a vědních oborech. Teplota podstatně ovlivňuje celou řadu dalších veličin a materiálových vlastností ať už se jedná např. o objem, délku, elektrický odpor, skupenství, tlak nasycených par nebo např. kinetiku chemických reakcí. S ohledem na konkrétní aplikaci je vyžadována různá úroveň přesnosti měření teploty.

1.1 Teplota a mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 v současnosti

Teplota je oproti délce nebo hmotnosti poměrně abstraktní veličinou. Z hlediska jejího charakteru se jedná o veličinu intenzivní. Měření teploty je obvykle standardizováno ve formě teplotní stupnice. V principu se jedná o sadu definovaných pevných bodů a interpolační způsob určování teploty mezi nimi. V průběhu času prošly mezinárodní teplotní stupnice (ITS, International Temperature Scale) značným vývojem a v příslušných letech byly postupně publikovány stupnice ITS-27, ITS-48, ITS-68. Aktuálně platnou teplotní stupnicí je ITS-90 [1] z roku 1990 s dodatkem pro nízké teploty PLTS-2000.

Jednotkou termodynamické teploty (T) je kelvin (K), který je rovněž základní jednotkou soustavy SI. Kelvin je definován jako zlomek $1/273,16$ termodynamické teploty trojného bodu vody. Vztah mezi termodynamickou teplotou T a běžně užívanou Celsiovou teplotou t udávanou ve stupních Celsia ($^{\circ}C$) je následující

$$t/^{\circ}C = T/K - 273,15; \quad (1)$$

přičemž velikost jednoho stupně Celsia je shodná s velikostí jednoho kelvinu. Z tohoto důvodu může být stejná hodnota teplotního rozdílu vyjádřena v kelvinech nebo ve stupních

Celsia. Teplotní stupnice ITS-90 definuje jak termodynamické teploty T_{90} tak Celsiovy teploty t_{90} .

ITS-90 pokrývá rozsah od 0,65 K až po nejvyšší prakticky měřitelnou teplotu ve smyslu Planckova radiačního zákona s využitím monochromatického záření. Stupnici je možno rozdělit v zásadě na tři podoblasti:

- oblast definována na základě stavového chování vzácných plynů helia a neonu
- oblast od -259,3467 °C (trojný bod vodíku) do 961,78 °C (teplota tuhnutí stříbra), která je definována na základě odporových teploměrů kalibrovaných v tzv. pevných bodech
- oblast nad 961,78 °C, která je definována radiometricky pomocí definičních pevných bodů a Planckova vyzařovacího zákona

Jako pevné body teplotní stupnice jsou zejména voleny teploty fázových rovnováh čistých látek (teplota tání/tuhnutí, teplota varu, teplota trojného bodu). Speciálním případem je trojný bod, při kterém koexistují tři fáze současně (plynná, kapalná a pevná). Pro názornost jsou vybrané definiční pevné body ITS-90 uvedeny v tab. 1.

Tabulka 1: Vybrané definiční body teplotní stupnice ITS-90

Látka	Popis	T_{90} , K	t_{90} , $^{\circ}C$
H ₂ (vodík)	teplota trojného bodu	13,8033	-259,3467
Ne (neon)	teplota trojného bodu	24,5561	-248,5939
O ₂ (kyslík)	teplota trojného bodu	54,3584	-218,7916
Ar (argon)	teplota trojného bodu	83,8058	-189,3442
Hg (rtuť)	teplota trojného bodu	234,3156	-38,8344
H ₂ O (voda)	teplota trojného bodu	273,16	0,01
Ga (galium)	teplota tání	302,9146	29,7646

Látka	Popis	T_{90} , K	t_{90} , °C
In (indium)	teplota tuhnutí	429,7485	156,5985
Sn (cín)	teplota tuhnutí	505,078	231,928
Zn (zinek)	teplota tuhnutí	692,677	419,527
Al (hliník)	teplota tuhnutí	933,473	660,323
Ag (stříbro)	teplota tuhnutí	1234,93	961,78
Au (zlato)	teplota tuhnutí	1337,33	1064,18
Cu (měď)	teplota tuhnutí	1357,77	1084,62

V říjnu 2005 přijalo CIPM doporučení komise CCT na specifikaci isotopické čistoty vody, používané v definici jednotky kelvin. Takto definované složení má označení V-SMOW. Po této specifikaci bylo možné vysvětlit rozdíly mezi jednotlivými laboratořemi primární metrologie na úrovni 0,17 mK. Další úlohou bylo používání kyvet z křemenného skla, které jsou časově stálější než kyvety borosilikátové. V současné době se pohybuje standardní nejistota předních světových pracovišť na úrovni 30 μ K ($k = 2$). Podobné aktivity jsou pozorovány i pro ostatní pevné body, kde je možné pozorovat varianty v isotopickém složení, hlavně v pevném bodě vodíku. Stávající výsledky ale zatím nejsou dostatečně konzistentní, a proto je nutné provést další sérii nezávislých měření. Přípravuje se dodatek teplotní stupnice, věnovaný problémům isotopického složení látek, problémům isotopické segregace při tání kovů a vlivu chemických nečistot. Problém realizace teplotní stupnice ilustruje **tab. 2** několika příklady rozdílu při měření teploty primárním teploměrem (označené T) s měřením teploty podle platné teplotní stupnice (označené T_{90}). Nejistota u je v tabulce uvedena pro koeficient rozšíření rovný 1.

Tabulka 2: Rozdíl realizace termodynamické teploty a teploty podle teplotní stupnice ITS-90

T_{90} K	$T - T_{90}$ mK	u mK	T_{90} K	$T - T_{90}$ mK	u mK
4,2	-0,02	0,12	290	2,19	0,4
17,035	0,51	0,16	335	7,62	0,5
20,27	0,32	0,17	373,124	9,74	0,6
70	-1,57	1,9	692,677	13,8	6,9
130	-8,07	1,6	903,778	27,6	7,6
195	-6,97	1,8	1150	46,3	20
273,16	0	0	1357,77	52,1	20

Stále se zvyšující disproporce mezi měřením termodynamické teploty a realizací teplotní stupnice vytváří prostor pro vývoj realizace jednotky kelvin změnou mezinárodní teplotní stupnice. Výhodou zavedení nové stupnice bude zejména:

- Nová stupnice bude blíže k termodynamické teplotě.
- Nebude nutné uvádět referenci, jedná-li se o teplotu podle ITS-90, PLTS-2000 nebo termodynamickou.
- Nová stupnice zahrne nejnovější vědecké poznatky o pevných bodech, měřicích přístrojích a interpolačních rovnicích.
- Nová stupnice umožní odstranění nestandardního chování výpočtových funkcí pro průmyslové teploměry.

Nelze ale vyloučit ani nevýhody:

- Náklady pro implementaci nové stupnice v NMI budou značné a v průmyslu mohou být také nenulové. Výhody, které to průmyslu přinese, budou minimální, protože současná stupnice je pro průmyslové účely dostatečná. Jedná se o změny v programovém vybavení, převodnicích a přístrojích.
- Hodnoty jednotlivých pevných bodů musí být konzistentní napříč různými implementacemi různých metod primární termometrie. Nedílnou součástí těchto úvah musí také být připravovaná nová definice jednotky kelvin.

1.2 Redefinice jednotky Kelvin

Teplota se svojí jednotkou kelvin pořád patří do skupiny fyzikálních veličin, jejichž definice je založena na existenci artefaktů (TBV). Ty však postupem času stárnou a dochází ke změnám jejich metrologických vlastností. Proto byla představena koncepce redefinice fyzikálních jednotek tak, aby byla definice všech SI jednotek založena na známých fyzikálních konstantách. V současné době probíhá v mezinárodních metrologických institutech masivní výzkum, na základě kterého budou potřebné fyzikální konstanty redefinovány. Pro teplotu bude jednotka kelvin definována pomocí Boltzmannovy konstanty a v této oblasti probíhá několik výzkumných projektů, ve kterých odborníci experimentálně stanovují hodnotu této konstanty [2, 3, 4, 5]. Nová definice kelvinu by pak měla být známá v podobě:

Kelvin „K“ je jednotka termodynamické teploty; jeho velikost je určena číselnou hodnotou Boltzmannovy konstanty tak, aby byla rovna přesně $1,380649 \cdot 10^{-23}$, je-li vyjádřena v jednotkách SI $s^{-2} \cdot m^2 \cdot kg \cdot K^{-1}$, což je ekvivalent jednotky $J \cdot K^{-1}$.

Význam definice můžeme chápat také tak, že kelvin je takové změna termodynamické teploty, která odpovídá změně tepelné energie kT o hodnotu $1,380\ 649 \cdot 10^{-23}$ Joulu.

Důsledky změny definice jednotky se v běžné praxi měření a kalibrace na průmyslové úrovni neprojeví, znatelné ale budou v laboratořích národních metrologických institutů a ve vědeckých laboratořích.

Společně s redefinicí kelvinu se přemýšlí i na úpravě stávající teplotní stupnice pro teploty vyšší než teplota tání stříbra (961,87 °C). V současné době je návaznost prováděna extrapolací z jednoho ze tří dostupných pevných bodů, což nezabezpečuje jedinečnost návaznosti. Proto je připravována změna, kdy bude návaznost definovaná pomocí primární radiometrie a za použití vysokoteplotních pevných bodů. To povede k výraznému snížení nejistot měření v porovnání se současnou definicí ITS-90. Nevýhodou současné definice je také její provázanost s Planckovým zákonem, která předpokládá striktně monochromatické záření z černého tělesa ve vakuu, což jsou v praxi nedosažitelné podmínky. Extrapolace teplotní stupnice směrem k vyšším teplotám ze současných definičních pevných bodů je hlavním důvodem vysokých hodnot nejistot. Současná definice znamená, že nejistota spojená s realizací teplotní stupnice roste s kvadrátem nejistoty referenčního pevného bodu. Primární radiometrie se dokáže od výše zmíněných komplikací zcela oprostit. Na základě

výzkumných prací probíhajících v oblasti vysokoteplotních bodů (HTFP) je možné předpokládat, že nejistoty realizace HTFP budou minimálně porovnatelné s ITS-90 a více opakovatelné než nejistoty získané pomocí absolutní radiometrie.

Přímé stanovení termodynamické teploty bude možné pomocí primární, absolutní radiometrie. Nutnými předpoklady pro tuto metodu jsou:

- černé těleso se známou (a vysokou) hodnotou spektrální emisivity,
- měření spektrální záře nebo celkového záření černého tělesa s návazností na jednotky SI.

Ne všechny laboratoře mají k dispozici potřebné vybavení pro přímé stanovení T a proto se část laboratoří (včetně ČMI) bude klonit k nepřímé metodě za použití vysokoteplotních pevných bodů. Jako relevantní se ukázalo jít cestou tzv. eutektických a peritektických pevných bodů [6, 7, 8, 9], které vykazují vysokou míru časové stability a opakovatelnosti jejich teploty realizace.

Pro tvorbu eutektických pevných bodů s teplotou realizace nad 1100 °C se využívá kombinace kovu s uhlíkem, v literatuře často značeno jako M-C (*metal – carbon*). Přehled zkoumaných a realizovaných bodů je uveden v následující **tab. 3**.

Tabulka 3: Teploty realizace eutektických pevných bodů

Eutektický bod	Teplota realizace, °C
Fe-C	1153
Co-C	1324
Ni-C	1329
Pd-C	1492
Rh-C	1657
Pt-C	1738
Ru-C	1954
Ir-C	2291
Re-C	2474

Pro návaznost teplot do cca 3200 °C je možné využít metal-carbid-carbonové eutektické body nebo metal-carbid-carbon peritektické pevné body (dvousložkový systém s existencí třech fází) [10]. Přehled včetně teploty realizace je uveden v **tab. 4**.

Tabulka 4: Nominální teploty tání dalších vysokoteplotních pevných bodů

Pevný bod	Teplota realizace, °C
<i>Metal-carbid-carbonové eutektikum</i>	
B ₄ C-C	2386
δ(MoC)-C	2583
TiC-C	2760
ZrC-C	2882
HfC-C	3185
<i>Metal-carbid-carbonové peritektikum</i>	
Mn ₇ C ₃ -C	1331
Cr ₃ C ₂ -C	1826
WC-C	2749

1.3 Měření teploty

Teplota je jednou z fyzikálních veličin, kterou není možné měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin, které na ni závisí. Měření teploty je tedy měření nepřímé. Jednotlivé měřicí principy umožňují ať už dotykové nebo bezdotykové měření teploty s různou přesností v omezených teplotních rozsazích [11]. Nejběžnější fyzikální principy používané pro měření teploty jsou shrnuty v následující **tab. 5**.

Tabulka 5: Nejběžnější principy využívané pro měření teploty

Skupina	Typ teploměru	Princip měření
dílatační teploměry	plynový	změna tlaku plynu
	tenzní	teplotní závislost tlaku nasycených par
	kapalinový	objemová teplotní roztažnost kapalin, např. teplotní roztažnost rtuť
	kovový	délková roztažnost, např. bimetalové (dvojkovové) teploměry využívají rozdílu teplotní roztažnosti dvou kovů
elektrické teploměry	termoelektrický	Seebeckův termoelektrický jev
	odporový kovový	teplotní závislost elektrického odporu
	odporový polovodičový	teplotní závislost elektrického odporu
	diodové	změna prahového napětí
indikátory změny teploty	teploměrná tělíska	změna skupenství, např. tání
	teploměrné barvy	změna barvy
bezdotykové teploměry	širokopásmové pyrometry	detekce teplotního záření v širokém pásmu vlnových délek
	úzkopásmové pyrometry	detekce teplotního záření v definovaném úzkém pásmu vlnových délek
	monochromatické	detekce teplotního záření při vybrané vlnové délce
	poměrové	detekce teplotního záření při dvou vybraných vlnových délkách
	infračervené termokamery	detekce teplotního záření s cílem získání teplotního obrazu tělesa
speciální teploměry	optovláknové senzory	změna amplitudy nebo fáze světelného záření
	akustické	teplotní závislost rychlosti zvuku
	šumové	teplotní závislost šumového napětí rezistorů

Následující text se věnuje v současné době nejběžněji používaným elektrickým sensorům teploty – skleněným teploměrům, kovovým odporovým teploměrům (zejména platinovým odporovým teploměrům), termistorům a termoelektrickým článkům. Vzhledem k oblíbenosti použití bez-

dotykových teploměrů je závěrečná část věnována infračerveným (IČ) teploměrům.

2. Skleněné teploměry

Skleněné teploměry patří do skupiny teploměrů, která pro měření využívá změny objemu kapaliny v závislosti na změně teploty. Jejich výhodou je jednoduchost a přesnost měření společně s nízkou pořizovací hodnotou. Nejčastěji bývají plněné rtuť nebo alkoholem. Jejich hlavní nevýhodou je možnost snadného rozbití a vylití náplně teploměru. S ohledem na toxicitu rtuti a její nepříznivé vlivy na životní prostředí není možné od roku 2009 poříditi nový rtuťový teploměr. To přineslo spoustu komplikací, zejména ve zdravotnictví, jelikož za ně neexistuje adekvátní náhrada se stejnou přesností. Umožňují měřit teplotu v širokém rozsahu teplot (-200 až +600) °C. Senzor teploměru tvoří nádobka s náplní, která plynule přechází v kapiláru se stupnicí. Na konci může být kapilára rozšířená o expanzí baňku, která zabraňuje poškození teploměru při překročení teplotního rozsahu teploměru. Nevýhodou u tohoto typu teploměrů, zejména v provozních aplikacích, je nutnost přímého odečtu měřené teploty ze stupnice teploměru.

Z pohledu konstrukce je možné skleněné teploměry rozdělit na obalové a tyčinkové. U obalových teploměrů je kapilára obklopena vloženou stupnicovou destičkou, na jejíž zadní straně bývá vyznačen výrobce, číslo rozměrové normy, měsíc a rok výroby neb druh skla. Tyčinkový teploměr se vyznačuje silnostěnnou kapilárou, na jejímž povrchu je přímo vyznačená stupnice. U obou druhů je důležité dbát na správný ponor teploměru při měření (plný nebo částečný vyznačený na teploměru).

Dále je možné teploměry rozdělit podle smáčivosti teploměrné kapaliny. Mezi teploměry s nesmáčivou náplní patří ty, jež jsou naplněny rtuť nebo amalgamem thalia, mezi smáčivé náplně patří líh, toluen nebo pentan.

3. Kovové odporové teploměry

Měření teploty pomocí kovových odporových teploměrů využívá faktu, že elektrický odpor kovů je závislý na teplotě. Pro daný kov je míra závislosti elektrického odporu na teplotě charakterizována prostřednictvím teplotního součinitele odporu α , který je definován jako

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T}, \quad (2)$$

kde R je elektrický odpor a T teplota.

V úzkém rozsahu teplot např. 0 °C až 100 °C je možné odpor při teplotě t spočítat na základě zjednodušeného vztahu

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (3)$$

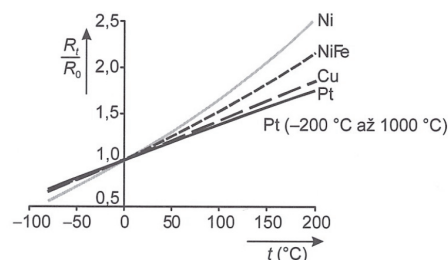
kde R_0 značí hodnotu odporu při teplotě 0 °C.

Pokud za t dosadíme 100 °C, získáme z výše uvedené rovnice často používaný vztah pro vyčíslení teplotního součinitele odporu

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}, \quad (4)$$

kde R_{100} odpovídá odporu teplotního senzoru při 100 °C. Koeficient α vyjadřuje citlivost daného teploměru a jeho hodnota vypovídá o čistotě příslušného kovu – čím vyšší je jeho hodnota, tím vyšší je čistota kovu.

Kromě vysoké citlivosti jsou na odporové senzory teploty kladeny další požadavky: časová stabilita odezvy (časová stálost součinitele α), chemická a mechanická odolnost, odolnost vůči vysokým teplotám. Nejběžnější jsou odporové teploměry realizované pomocí vysoce čistých kovů jako např. platina, nikl, měď. Pro představu o teplotní citlivosti odporu jednotlivých kovů jsou na **obr. 1** uvedeny závislosti poměru odporů R_t/R_0 na teplotě. V grafu je rovněž uvedena závislost pro slitinu NiFe.



Obr. 1: Teplotní závislost odporu vybraných kovových materiálů [11]

Pro výrobu odporových senzorů teploty se nejvíce využívá platina díky jejím příznivým vlastnostem jako jsou vysoká chemická netečnost, časová stálost nebo vysoká teplota tání. Vzhledem k výsadnímu postavení platinových odporových snímačů teploty bude následující text věnován především platinovým odporovým teploměrům, které patří k nejrozšířenějším a nejpřesnějším měřidlům v teplotním rozsahu (-196 až 962) °C a pomocí kterých je částečně definována teplotní stupnice ITS-90.

3.1 Platinové odporové snímače teploty

Důležitou vlastností, která ovlivňuje kvalitu teploměru (jeho metrologické vlastnosti) je především čistota platiny. Čistota platiny je jedním z důležitých kritérií, na základě kterého se teploměry dělí na tzv. standardní platinové odporové teploměry (SPRT – Standard Platinum Resistance Thermometer) a průmyslové (IPRT – Industrial Platinum Resistance Thermometer). Jako ukazatele čistoty slouží koeficienty α , poměrné odpory W ve trojném bodu galia (W_{Ga}) a rtuti W_{Hg} , nebo např. poměr odporů R_{100}/R_0 . Kritéria dělení jsou uvedena v **tab. 6**.

Tabulka 6: Přehled vybraných kritérií pro klasifikaci platinových odporových teploměrů

	$\alpha, ^\circ\text{C}^{-1}$	W_{Ga}	W_{Hg}	R_{100}/R_0
SPRT	$\geq 0,003920$	$\geq 1,11807$	$\leq 0,844235$	$\geq 1,392$
IPRT	$< 0,003920$	$< 1,11807$	$> 0,844235$	$< 1,392$

SPRT se používají pro měření teploty na nejvyšší úrovni především jako tzv. interpolační nástroje teplotní stupnice ITS-90, přičemž výpočet teploty z naměřené hodnoty odporu dle ITS-90 je značně složitější než v případě průmyslových teploměrů. Z hlediska měření elektrického odporu matematický aparát ITS-90 pracuje s poměrným

odporem W , který je definován jako poměr odporu při dané teplotě k odporu teploměru v trojném bodě vody

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16 \text{ K})} \quad (5)$$

Teplotní závislost odporu průmyslových platinových odporových senzorů je standardizována a uvedena v normě ČSN EN 60751 [12].

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3), \quad (6)$$

kde

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

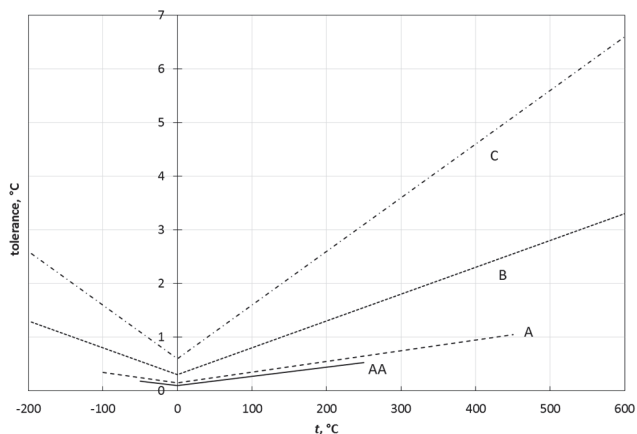
$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2},$$

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

$$C = 0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-4} \text{ pro } t \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

jsou koeficienty referenční funkce a R_0 je jmenovitý odpor při teplotě 0 °C. Např. běžně uváděné označení teplotních senzorů Pt100 značí, že R_0 platinového odporového senzoru je 100 Ω. Nutno podotknout, že poslední člen rovnice uvozený parametrem C se používá pouze pro podnulové teploty ($t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$) a pro kladné teploty odpadá. Dokument ČSN EN 60751 rovněž stanovuje toleranční třídy (AA, A, B, C) pro odporové teploměry. Toleranční limity jednotlivých tříd pro teploměry v drátkovém provedení jsou pro ilustraci znázorněny v grafu na obr. 2. Rovnice uvedená v normě ČSN EN 60751 vychází z tzv. Callendar-Van Dusenovy rovnice. Ta má tvar

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right) - \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \right\} \quad (7)$$

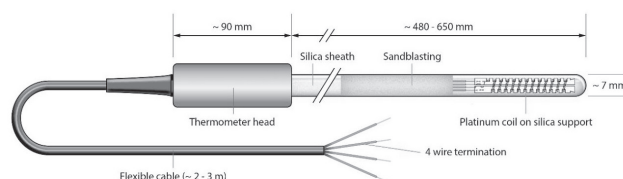


Obr. 2: Absolutní hodnoty tolerancí pro jednotlivé třídy platinových odporových senzorů teploty (provedení drátový rezistor) dle ČSN EN 60751

3.2 Konstrukce platinových odporových snímačů teploty

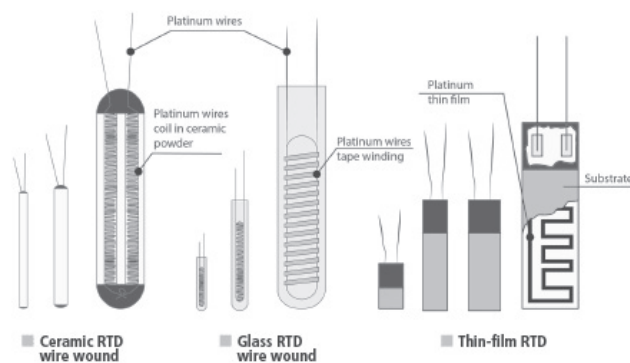
Konstrukce platinových odporových teploměru je silně spojena s jeho určením. Provedení SPRT se podstatně liší od průmyslových teploměru, na které jsou kladeny mnohé další požadavky jako např. mechanická odolnost, odolnost proti vibracím, možnost umístění v agresivním prostředí apod. Vlastní odporový element může být realizován ve formě drátku vinutého rozličnými způsoby nebo tenkého filmu, který je nanesen na vhodném substrátu (např. destičce Al_2O_3).

Na obr. 3 je uveden příklad provedení SPRT s dlouhým stonkem, který je zhotovený z křemenného skla. Vlastní senzor je tvořen platinovým drátkem, který je volně navinut ve formě šroubovice na izolační podpůrné tělísko. Toto uspořádání umožňuje minimalizovat vliv rozdílné tepelné roztažnosti platiny a podpůrného materiálu, který vede ke vzniku mechanického stresu negativně ovlivňujícího přesnost měření. Vzduchotěsná křemenná trubice bývá obvykle vyplněna směsí interního plynu a malého množství kyslíku, aby nedocházelo k chemické degradaci vysoce čistého platinového drátku. Jak je z obrázku patrné, teploměr je vyroben ve čtyřvodičovém provedení, které umožňuje přesné měření elektrického odporu teplotního senzoru eliminující vliv odporu přívodních vodičů.



Obr. 3: Příklad provedení SPRT, převzato z [13]

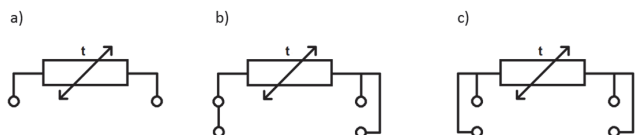
V případě průmyslových odporových teploměru je škála provedení vlastních senzorů široká: platinový drátek může být např. fixovaný uvnitř keramického tělíska, navinutý na keramickém nebo skleněném válečku nebo zatavený do skla. Široká je rovněž paleta senzorů vyrobených tenkovrstvou technologií. Před vnějším prostředím je obvykle senzor chráněn kovovou trubicí nebo pouzdrem. Obr. 4 ilustruje tři rozdílná provedení senzorů.



Obr. 4: Příklad provedení senzorů průmyslových platinových odporových teploměru, převzato z [14]

3.3 Zapojení odporových snímačů teploty a měření odporu teploměru

Odporové teploměry se vyrábějí v provedeních s různým počtem výstupních vodičů, obvykle s dvěma, třemi nebo čtyřmi vodiči. Je to z důvodu, že přístroje pro měření elektrického odporu umožňují při vícevodičových zapojeních eliminovat vliv odporu přípojovacích vodičů na měření elektrického odporu vlastního senzoru. Nejběžnější způsoby zapojení rezistorů při měření jsou uvedeny na obr. 5.



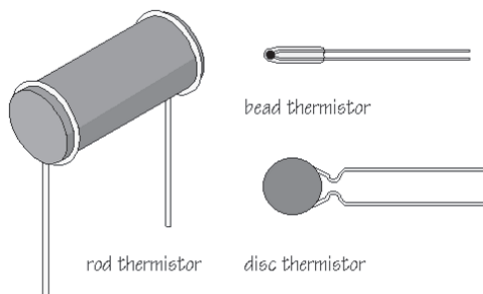
Obr. 5: Příklady zapojení odporového senzoru teploty: a) dvou vodičové, b) třívodičové, c) čtyřvodičové

V dvojvodičovém zapojení se měřený odpor skládá z odporu vlastního senzoru a odporu přívodních vodičů. Přístroje umožňující třívodičové zapojení jsou schopny si proměřit odpor přívodních vodičů a výslednou hodnotu měřeného odporu korigovat o tento příspěvek. Důležitým předpokladem je, že všechny tři přívodní vodiče mají stejný odpor. Nejlepším z uvedených zapojení je zapojení čtyřvodičové – rezistor je jedním párem vodičů připojen ke zdroji měřicího proudu, druhý pár slouží k měření úbytku napětí přímo na rezistoru – tím dochází k eliminaci vlivu odporu přívodních vodičů na výsledek měření. Je nutné si uvědomit, že z hlediska povahy měření jsou odporové senzory pasivní. To znamená, že samy o sobě negenerují výstupní signál. Aby bylo možné měřit elektrický odpor, musí rezistorem protékat určitý elektrický proud, který má však za následek, že se rezistor více či méně jeho průchodem ohřívá (v důsledku Jouleova tepla). Měřicí přístroje proto používají takový měřicí proud, aby efekt tzv. samoohřevu teplotního senzoru byl minimální.

Elektrický odpor se měří stejnosměrně nebo střídavě v závislosti na zdrojovém proudu, se kterým pracuje dostupné zařízení. Odpor teplotních senzorů je možné měřit např. digitálním multimetrem, nejpřesnější měření jsou ale realizována prostřednictvím odporových mostů, které v principu měří poměr odporů mezi měřeným rezistorem a etalonovým rezistorem. Výhodou střídavé technologie měření je mimo jiné to, že dochází k potlačení vlivu parazitních termoelektrických napětí, která se mohou generovat v elektrickém obvodu vlivem teplotních gradientů.

4. Termistory

Termistory jsou jedny z nejpoužívanějších senzorů v elektronice a klasifikují se jako polovodičové odporové senzory teploty. Pro měření teploty se využívá závislost jejich elektrického odporu na teplotě, která má však rozdílnou fyzikální podstatu oproti kovovým odporovým teploměrům a která je spojená s teorií polovodičového přechodu.



Obr. 6: Příklady typů konstrukcí termistorů, převzato z [14]

Hlavní výhodou termistorů jsou jejich značná citlivost (typicky 10 násobně vyšší v porovnání s platinovými teploměry), malé rozměry senzoru, nízká časová odezva a jejich cenová dostupnost. Nevýhodou je vysoká nelinearita, omezený teplotní rozsah použití (běžně $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $300\text{ }^{\circ}\text{C}$) a riziko samoohřevu senzoru způsobené průchodem měřicího proudu. V úzkém teplotním rozmezí $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mohou nejlepší termistory blížit kvalitou měření teploty dokonce standardním platinovým senzorům (SPRT). Termistory se obvykle dělí na dva typy podle trendu teplotní závislosti jejich odporu: NTC termistory (negastory) a PTC termistory (pozistory). Nejběžnější konstrukční provedení termistorů jsou znázorněna na obr. 6.

4.1 NTC termistory (negastory)

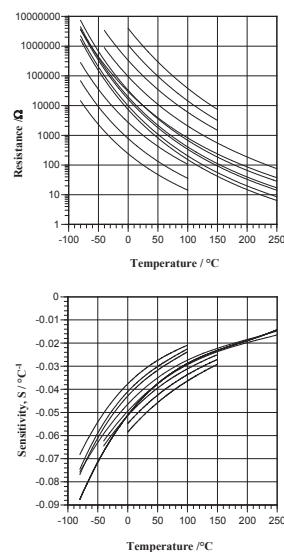
Anglická zkratka NTC (Negative Temperature Coefficient), tedy záporný teplotní součinitel, vystihuje chování negastorů – s rostoucí teplotou se jejich odpor snižuje. NTC termistory se vyrábí spékáním vybraných oxidů (např. Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , MnO , NiO , CoO , BaO) za vzniku polokrytalické keramické hmoty. Závislost odporu negastorů se obvykle vyjadřuje ve tvaru

$$R(T) = R(T_0) e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}, \quad (8)$$

kde $R(T)$ je hodnota odporu při absolutní teplotě T a $R(T_0)$ je jmenovitá hodnota odporu při referenční teplotě T_0 . Jako referenční teplota se často volí teplota $298,15\text{ K}$ ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$). Parametr β je materiálovou konstantou daného termistoru a typicky nabývá hodnot mezi 2000 K a 6000 K . Pro teplotní citlivost NTC termistorů S je možné na základě rovnice 7 odvodit následující vztah

$$S = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = -\frac{\beta}{T^2} \quad (9)$$

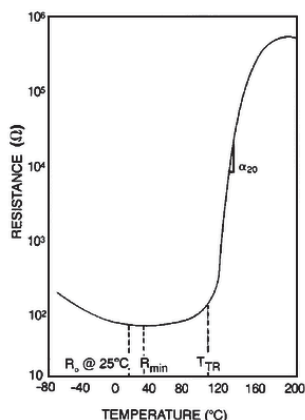
ze kterého plyne, že s rostoucí teplotou absolutní hodnota citlivosti negastorů klesá. Obvyklé teplotní chování řady dostupných termistorů je uvedeno na obr. 7.



Obr. 7: Teplotní závislost odporu dostupných NTC termistorů (nahore) a teplotní závislost jejich citlivosti (dole), převzato z [15]

4.2 PTC termistory (pozistory)

PTC termistory mají kladný koeficient teplotní závislosti odporu, ale jak je patrné z typické charakteristiky PTC termistorů uvedené na **obr. 8**, pouze v určitém rozsahu teplot. Jejich odpor s rostoucí teplotou nejprve mírně klesá a po překročení tzv. Curieovy teploty strmě roste. Po nárůstu zhruba o tři řády hodnota odporu opět mírně klesá (s touto částí charakteristiky se však již obvykle npracuje). PTC termistory se vyrábí z polykrystalické keramiky (např. BaTiO₃) sintrováním přesně řízených práškových směsí obvykle do tvaru malého disku. Referenční teplota PTC termistorů (teplota přechodu) závisí na chemickém složení a obvykle se pohybuje v rozsahu (60 až 180) °C. Použití PTC termistorů plyne z tvaru jejich charakteristiky. Lze využít jejich velmi vysokého teplotního součinitele odporu pro měření teploty ve velmi úzkém teplotním pásmu nebo lze PTC termistory použít jako dvoustavové senzory například pro signalizaci překročení určité teploty.



Obr. 8: Závislost odporu PTC termistorů na teplotě, převzato z [14]

5. Termoelektrické snímače teploty

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.

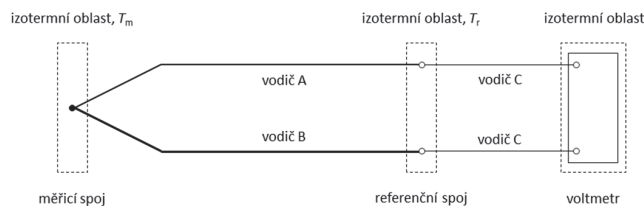
5.1 Princip funkce termoelektrických snímačů teploty

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

$$dE = S(T) \cdot dT, \quad (10)$$

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).

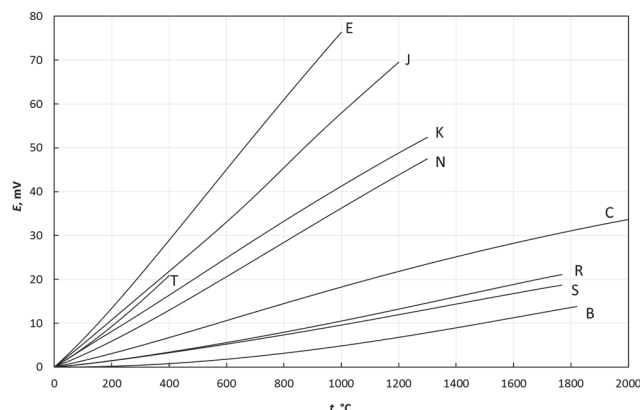
ných materiálů A a B, generuje napětí úměrné rozdílu teplot mezi měřicím a referenčním spojem. Vodiče C jsou použity pro připojení k měřicímu zařízení (např. digitálnímu voltmetru).



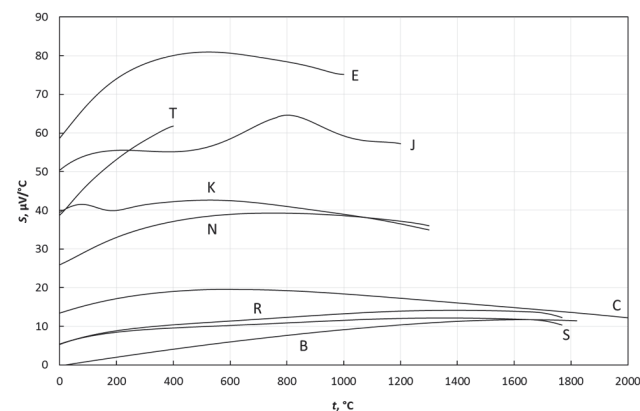
Obr. 9: Jednoduchý měřicí obvod s termoelektrickým článkem

5.2 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 ed. 2 [16]. 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 **obr. 10 a 11**.



Obr. 10: Teplotní závislost termoelektrického napětí několika typů termoelektrických článků dle ČSN EN 60584-1



Obr. 11: Teplotní závislost termoelektrického napětí několika typů termoelektrických článků 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 z drahých kovů (např. R, S, B). Výhodou ter-

močlánků 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 **tab. 7**.

Tabulka 7: Nejběžnější typy termoelektrických snímačů teploty

Typ	Složení	Typický teplotní rozsah	Vlastnosti a oblast použití
K	nikl-chrom (+) nikl-hliník (-)	-200 °C až 1300 °C	odolný proti oxidaci při vysokých teplotách, nejběžnější průmyslový termočlánek, nevhodný pro použití v redukční atmosféře a vakuu
N	nikl-chrom-křemík (+) nikl-křemík (-)	-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	nikl-chrom (+) měď-nikl (-)	-230 °C až 900 °C	nejvyšší citlivost (Seebeckův koeficient), vhodný pro měření nízkých teplot, nevhodný pro použití v redukční atmosféře a vakuu
J	železo (+) měď-nikl (-)	0 °C až 760 °C	vhodný pro použití ve vakuu a oxidační nebo redukční atmosféře, železný vodič je náchylný ke korozi
T	měď (+) měď-nikl (-)	-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

Pro jednotlivé typy termoelektrických článků (kromě typu K) norma ČSN EN 60584-1 ed. 2 definuje vztah mezi termoelektrickým napětím a teplotou pomocí polynomicke referenční funkce

$$E = \sum_{i=0}^n a_i t^i, \quad (11)$$

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.

Pro termoelektrický snímač teploty typu K je referenční funkce definována jako

$$E = \sum_{i=0}^n a_i t^i + c_0 \cdot e^{c_1 \cdot (t-126,9686)^2}, \quad (12)$$

kde c_0, c_1 jsou konstanty uvedené v [16].

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 .

$$E(t_m) = E_m + E(t_s). \quad (13)$$

Měřenou teplotu t_m je možné získat z $E(t_m)$ výpočtem pomocí inverzních funkcí, které jsou rovněž uvedeny v [16]. Z hlediska posouzení kvality termoelektrických snímačů teploty dále [16] definuje toleranční třídy (1, 2 a 3), které stanovují maximální možné teplotní odchylky od referenční funkce pro dané typy termočlánků.

5.3 Provedení termoelektrických snímačů teploty

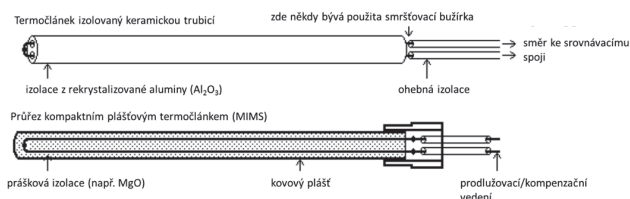
Vlastní snímač teploty se sestává ze vzájemně spojených termoelektrických vodičů, elektrické izolace a případně ochranného obalu. Podle oblasti použití se vyskytuje několik provedení:

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

Abyste nedocházelo ke kontaminaci holých termoelektrických vodičů v nehostinném prostředí, vkládají se dále termoelektrické snímače teploty do ochranných trubíc 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 termočlánekový teploměr tvořen pouze termoelektrickými 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) termoelektrického snímače teploty.

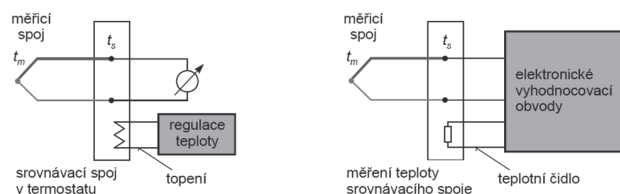
Možné typy konstrukčního provedení termoelektrických snímačů teploty jsou schematicky znázorněny na **obr. 12**.



Obr. 12: Příklady provedení termoelektrických snímačů teploty

5.4 Měření teploty pomocí termoelektrických snímačů teploty

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 °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 **obr. 13**.



Obr. 13: Příklady realizace teploty srovnávacího spoje: umístění srovnávacího spoje v termostatu (vlevo), měření aktuální teploty srovnávacího spoje s automatickým vyhodnocením (vpravo) [17]

6. Indikační teploměry

6.1 Základní popis a jejich členění

Pod tímto názvem se skrývají všechny typy elektronických teploměrů včetně měřicích řetězců teploty. Řadí se k nejoblíbenějším měřidlům teploty pro jejich snadnou odečitelnost, relativně jednoduchou obsluhu a přenosnost. Spadají sem měřidla, která měří teplotu s přesností v řádech tisícín stupně Celsia ale i takové, u nich není zaručena přesnost měření v řádu stupňů Celsia. Nejčastěji se tento druh teploměrů používá pro ponorná, prostorová i povrchová měření tekutin a pevných látek. Měřicí řetězce zobrazují měřenou hodnotu na panelových měřidlech nebo ovládacích terminálech zařízení. Do této skupiny měřidel řadíme mimo jiné také teploměry tlakové (změna teploty souvisí se směnou tlaku tekutiny) a bimetalické (dvojice pevně spojených kovových pásků s rozdílnou teplotní roztažností).

Číselníkové teploměry se skládají z měřicího stonku (kovového, dvojkovového, tlakového) a ukazatele, event. tlakového spojovacího vedení – trubicové kapiláry.

Indikační teploměry se obecně skládají ze snímače teploty a vyhodnocující jednotky se stupnicí nebo s displejem. Můžeme je rozdělit do dvou velkých skupin na teploměry elektronické a mechanické (číselníkové). Teplotní sondou elektronického teploměru může být odporový snímač teploty kovový nebo polovodičový případně termoelektrický snímač.

Číselnicový ukazovací přístroj často zahrnuje ve společné indikační jednotce blok zpracování signálu (linearizaci, přepočítání na teplotu), síťový napáječ, případně signalizaci mezních stavů a přenos do PC.

6.2 Převodníky teploty

V současné době jsou jednotlivé typy teploměrů již ustálené a není pravděpodobné hromadné nasazení nějaké zcela nové technologie. Proto je velká pozornost věnována vývoji elektroniky k již existujícím sensorům. Stále více a více se stává neakceptovatelná situace, kde přímo na svorky nějakého řídicího, popřípadě monitorovacího systému jsou přivedeny surové signály ze snímače teploty a ty jsou podle obecné (tabelované) charakteristiky zobrazovány uživateli. Převodníky je možné rozdělit na tři základní typy:

- jednoúčelové,
- nastavitelné,
- inteligentní.

Jednoúčelové převodníky jsou analogové přístroje, které se vyrábějí jen pro konkrétní druh senzoru teploty, a není možné provést libovolnou změnu. Jsou obvykle velmi levné a méně přesné. Pro náročné aplikace se nehodí.

Nastavitelné převodníky jsou asi nejrozšířenější. Jedná se obvykle o programovatelný (pomocí přepínačů nebo speciálním SW vybavením) přístroj, který má na výstupu nějaký unifikovaný signál (nejčastěji 4 mA až 20 mA). Komunikaci používá hlavně pro nastavení parametrů snímače a výstupního signálu. Obvykle není možné využívat kalibrační listy sensorů.

V současné době je viditelný výrazný trend využívání inteligentních přístrojů. Převodník se stává serverem informací o několika proměnných. Dokáže korigovat výstupy podle kalibračního listu senzoru, dokáže zobrazovat také diagnostická data o sobě, o senzoru, včetně možnosti dálkového nastavení. Jako samozřejmost je u moderních přístrojů poskytována informace o relevantnosti měření, a to podle druhu použitého přístroje, popřípadě technologie přenosu. Velká pozornost je také věnována univerzálnosti přístrojů, jejich automatickému rozpoznávání zvláštností procesu a adaptaci chování měřicího algoritmu. Dokonce je možné osadit regulační smyčku přímo do inteligentního převodníku teploty a ulehčit tak řídicímu systému. Právě tento vývoj umožňuje posouvat meze použitelnosti výrazně za hranice ještě před nedávnou dobou naprosto nemyšlitelné.

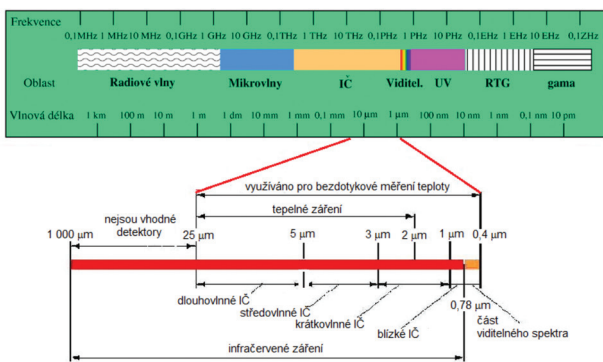
Hlavní směry vývoje elektroniky jsou:

- komunikace moderními prostředky (TCP/IP, internet, GPRS, SMS, apod.),
- zlepšení jednoduchosti a flexibility přístrojů,
- rozšíření aplikačních možností,

- více inteligence a diagnostiky,
- multifunkční univerzální přístroj.

7. Bezdotykové měření teploty

Bezdotykové měření teploty využívá faktu, že všechna tělesa vyzařují elektromagnetické záření v závislosti na jejich teplotě. Dostupné detektory elektromagnetického záření jsou schopny pokrýt teplotní rozsah cca -50 °C až 10 000 °C v závislosti na jejich principu a pracovních vlnových délkách. Maximální teplota zatím není fyzikálně omezena. Toto rozmezí teplot odpovídá řádově pásmu vlnových délek 0,4 μm až 25 μm, přičemž elektromagnetické záření o vlnových délkách v podoblasti od 2 μm do 25 μm se někdy nazývá jako tepelné záření. Historicky se bezdotykové teploměry (tzv. pyrometry) používaly hlavně pro měření vysokých teplot. Postupem času se s vývojem detektorů záření, elektroniky a optiky teplotní rozsah bezdotykového měření podstatně rozšířil. Dnes jsou běžné např. bezdotykové teploměry pro měření tělesné teploty. Oblast vlnových délek elektromagnetického záření, která se využívá pro měření teploty, je znázorněna na obr. 14.



Obr. 14: Oblast vlnových délek používaných pro bezdotykové měření teploty [18]

Bezdotykový způsob nabízí oproti kontaktnímu měření teploty značné výhody, skýtá ale také řadu úskalí často zneumožňující dostatečně přesná měření. Výhodami bezkontaktního způsobu měření jsou např.:

- možnost měřit vysoké teploty, které by vedly k destrukci kontaktního snímače,
- možnost měřit teplotu vzdálených nebo pohybujících se těles,
- zanedbatelný vliv na teplotní profil měřeného tělesa (na rozdíl od kontaktního způsobu měření, kdy může např. docházet k odvodu tepla stonkem teploměru),
- možnost měřit rozložení teplot na povrchu objektů v jednom okamžiku např. pomocí termovizních kamer.

Nevýhody bezkontaktního měření teploty jsou spojeny se složitostí vyhodnocení měření, kdy leckdy není možné dostatečně dobře zjistit nebo zajistit parametry ovlivňující měření (např. emisivita povrchu tělesa, odrazivost povrchu tělesa (s tím souvisí i odraz záření jiných těles), spektrální propustnost atmosféry mezi objektem a detektorem teploměru atd.).

Pro lepší pochopení souvislostí při bezdotykovém měření teploty je následující podkapitola věnovaná teoretickým základům.

7.1 Teoretické základy bezdotykového měření teploty

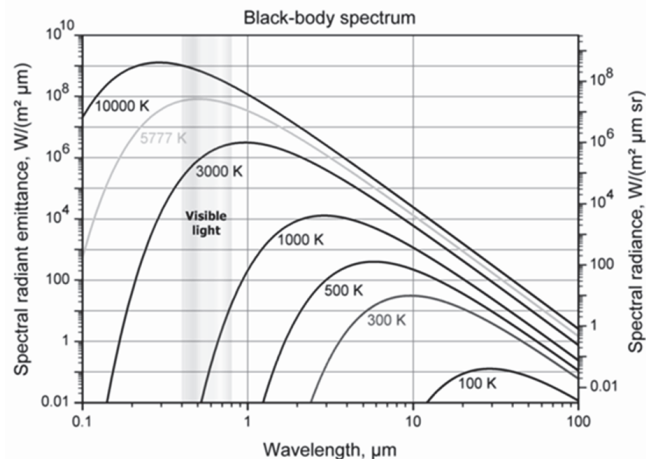
Princip měření teploty bezdotykovým způsobem vychází z Planckova zákona, který uvádí vztah mezi spektrální hustotou vyzařování tzv. černého tělesa a jeho termodynamickou teplotou:

$$M_{0\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right)^{-1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \tag{14}$$

kde $M_{0\lambda}$ je spektrální hustota vyzařování černého tělesa, c , h , k jsou fundamentální fyzikální konstanty (rychlost světla, Planckova konstanta, Boltzmannova konstanta), λ je vlnová délka záření a T značí termodynamickou teplotu. Sdružením výše uvedených matematických a fyzikálních konstant jsou pak definovány konstanty c_1 a c_2 (první a druhá vyzařovací konstanta). Z rovnice 14 je patrné, že spektrální hustota vyzařování černého tělesa závisí na vlnové délce, což je ilustrováno v grafu na obr. 15 pro několik izoterm (křivka s konstantní teplotou). Z uvedeného grafu je zřejmé, že při jednotlivých teplotách nabývá spektrální hustota vyzařování pro určitou vlnovou délku maxima. Tuto skutečnost vystihuje tzv. Wienův zákon posuvu

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T / K} \mu\text{m}, \tag{15}$$

kdy se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování s rostoucí teplotou posouvá k nižším vlnovým délkám. Tento jev se zohledňuje při volbě bezdotykových teploměřů pro měření určitého teplotního rozsahu. Např. pro měření vysokých teplot se volí teploměry obsahující detektory, které jsou schopny detekovat záření o nízkých vlnových délkách (obr. 15).



Obr. 15: Závislost spektrální hustoty vyzařování (spectral radiance) černého tělesa na vlnové délce (wavelength) pro několik izoterm [19]

Integrací Planckova zákona přes všechny vlnové délky je možné dospět k Stefanovu-Boltzmannovu zákonu

$$M_0 = \sigma T^4, \tag{16}$$

kteří říká, že intenzita vyzařování černého tělesa v celém rozsahu vlnových délek je úměrná čtvrté mocnině termodynamické teploty. Konstanta úměrnosti σ se nazývá Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,7604 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$).

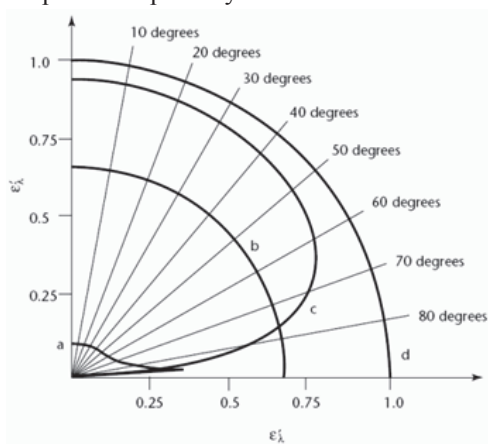
Ve skutečnosti se reálná tělesa více či méně liší od ideálního černého tělesa. K vyjádření míry odlišnosti od chování ideálního černého tělesa slouží veličina nazývaná emisivita (ϵ), která udává poměr vyzařování obecného tepelného zářiče k vyzařování černého tělesa při stejné teplotě.

$$\epsilon = \frac{M}{M_0}, \quad (17)$$

M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa a M značí intenzitu vyzařování příslušného objektu. Emisivita je bezrozměrná veličina a nabývá hodnot v rozmezí 0 až 1 a je obecně funkcí vlnové délky, teploty a směru emitovaného záření. Z tohoto důvodu se zavádí pojmy jako např. celková emisivita, spektrální emisivita a směrová spektrální emisivita. Spektrální emisivita ϵ_λ je definována jako poměr spektrálních hustot intenzity vyzařování vztahených ke konkrétní vlnové délce λ .

$$\epsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}}. \quad (18)$$

Příklad závislosti emisivity na úhlu pozorování je uveden na obr. 16 pro různé povrchy.



Obr. 16: Závislost směrové spektrální emisivity ϵ'_λ na úhlu: a – leštěný kov, b – tzv. Lambertovský povrch, c – nepropustné dielektrikum, d – ideální černé těleso [20]

Z hlediska měření teploty je rovněž důležitý Kirchhoffův zákon, který uvádí, že pokud je těleso ve stavu tepelné rovnováhy, vyzařovaná energie se rovná energii pohlcované a jeho emisivita se rovná jeho pohltivosti (absorbanci) α (i s ohledem na vlnovou délku):

$$\epsilon = \alpha \text{ resp. } \epsilon_\lambda = \alpha_\lambda. \quad (19)$$

Na rozdíl od ideálního černého tělesa mohou reálná tělesa záření nejen pohlcovat nebo vyzařovat, ale také odrážet nebo jimi může záření prostupovat. Proto se pro reálná tělesa definují odrazivost (reflektance) a propustnost (transmitance). Na základě zákona o zachování energie platí následující důležité vztahy

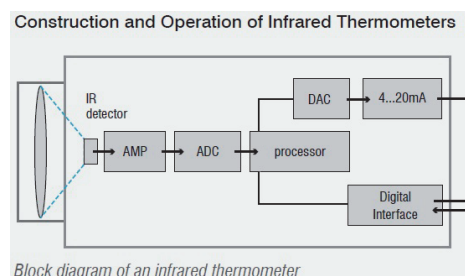
$$\alpha + \tau + \rho = 1 \text{ nebo } \epsilon + \tau + \rho = 1. \quad (20)$$

Z výše uvedené rovnice např. plyne, že pokud máme těleso nepropustné pro záření ($\tau = 1$), které má velice nízkou emisivitu ($\epsilon \rightarrow 0$), tak prakticky veškeré dopadající záření odrazí.

Z tohoto vztahu je také patrné, že pokud chceme měřit teplotu s dostatečnou přesností, musíme znát dobře emisivitu, odrazivost a pohltivost měřených těles.

7.2 Konstrukce bezdotykových teploměrů

Obecnou konstrukci bezdotykových teploměrů je možné popsat pomocí obr. 17. Radiační záření dopadá na detektor přes čočku. Elektrický signál vygenerovaný na detektoru úměrný teplotě objektu je zesílen zesilovačem. Tento signál je digitálně zpracován a následně převeden na výstupní signál odpovídající měřené teplotě. Měřená hodnota může být zobrazena přímo na displeji teploměru nebo ve formě analogového signálu.



Obr. 17: Příklad konstrukce infračerveného teploměru, převzato z [9]

Detektory můžeme rozdělit do dvou hlavních skupin a dalších podskupin:

- tepelné detektory
 - o termočláneková baterie (thermopile),
 - o pyroelektrické detektory,
 - o FPA bolometrické detektory (kamery) a
- kvantové detektory.

U tepelných detektorů dochází ke změně jejich vlastní teploty na základě množství dopadajícího záření na ně.

Jak již napovídá název, termočláneková baterie je složená z několika desítek měřicích spojů (termoelektrických snímačů teploty) umístěných na malé ploše. Vlivem dopadajícího radiačního záření dochází ke změně teploty měřicích spojů. Tím dojde ke změně výstupního napětí a to je následně převedeno na měřenou teplotu.

Základ pyroelektrických detektorů tvoří citlivý prvek vytvořený z pyroelektrického materiálu a dvou elektrod. Absorbované infračervené záření se projeví změnou teploty citlivého prvku. To má za výsledek vznik dočasného elektrického potenciálu jako důsledek pyroelektrického jevu. Před dalším zpracováním musí být signál zesílen. Důležité je, aby dopadající záření na detektor bylo pravidelně přerušováno.

Bolometry pracují na principu změny elektrického odporu v závislosti na změně teploty. Citlivý prvek se skládá z odporu s vysokým teplotním koeficientem. Změna v odporu prvku vede ke změně výstupního napětí.

Kvantové detektory reagují na dopadající radiační záření rychleji, než detektory tepelné. Patří do skupiny polovodičových detektorů, které zaznamenávají jednotlivé dopadající fotony. Počet dopadajících fotonů je závislý na intenzitě dopadajícího záření. Při dopadu fotonů na detektor dochází k fotoelektrickému jevu, kdy je dopadající záření přeměňováno přímo na elektrický proud. Detektory pracují v úzkém pásmu vlnových délek, jsou citlivější než tepelné detektory, ale vyžadují chlazení.

Záření dopadající na detektor před jeho samotným dopadem prochází přes optiku teploměru (nebo termokamery). Kromě fokusace dopadajícího záření přímo na detektor bývá optika pokrytá antireflexní vrstvou, která zabraňuje odrazu záření od povrchu čočky. Dále většinou čočka vystupuje také jako filtr, který na detektor propouští záření pouze o určité vlnové délce.

Čočky a také v některých provezech používaná měřicí okna, jsou vyráběny z různých materiálů, které jsou propustné pro infračervené záření. Na **obr. 18** jsou uvedeny závislosti propustnosti na vlnové délce záření pro několik materiálů typicky používaných pro konstrukci IČ optiky.

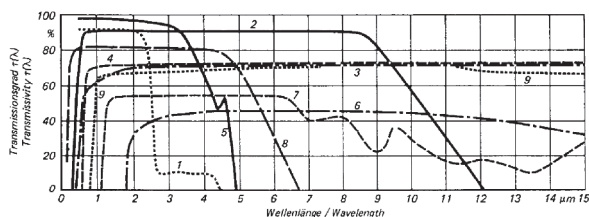


Fig. 13: Transmittance of typical IR materials (1 mm thick)

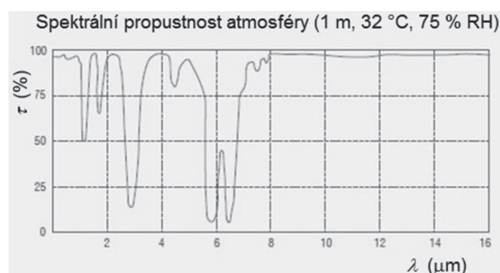
- 1- Optical glass
- 2- Calcium fluoride (CaF)
- 3- Zinc selenide (ZnSe)
- 4- Germanium
- 5- Silicon
- 6- Lithium fluoride
- 7- Silicon
- 8- Lithium fluoride
- 9- Silicon

Obr. 18: Propustnost (transmittance) v závislosti na vlnové délce pro materiály, které jsou využívány pro konstrukci IČ optických elementů [22]

Vysvětlení toho, že infračervené teploměry pracují pouze v určitých oblastech vlnových délek, nalezneme ve spektrální propustnosti atmosféry. Jelikož se jedná o bezdotykový způsob měření teploty, je zřejmé, že mezi měřeným objektem a teploměrem se nachází nějaké médium, nejčastěji vzduch, které pohlcuje více či méně infračervené záření. V principu se volí takový rozsah vlnových délek, kdy je propustnost atmosféry nejvyšší. Pro vzduch je to typicky oblast (8 až 14) μm a diskrétní vlnové délky 0,65 μm , 0,9 μm , 1,6 μm nebo 3,9 μm . Příklad oblastí vlnových délek pro vzduch, které jsou výhodné díky vysoké propustnosti IČ záření, je zobrazen na **obr. 19**.

7.3 Měření s pomocí bezdotykových teploměrů

Pro správné měření teploty s pomocí bezdotykových teploměrů je zapotřebí znát s dostatečnou přesností emisivitu měřeného povrchu, kterou je obvykle nutné nastavit na příslušném přístroji pro výpočet teploty. Pro správné vyhodnocení teploty je rovněž nutné kvantifikovat nebo minimalizovat nepříznivé vlivy okolí (např. propustnost atmosféry, odrazy záření jiných těles v okolí). Během měření je důležité věnovat pozornost za-



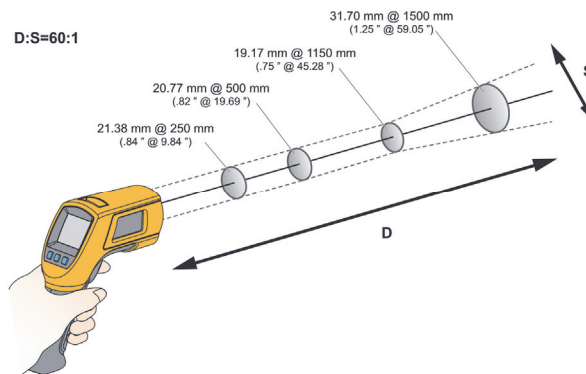
Obr. 19: Spektrální propustnost atmosféry τ v závislosti na vlnové délce záření [23]



Obr. 20: Princip zaměření bezdotykových teploměrů

měření teploměru na měřený objekt. Je důležité, aby měřená plocha byla výrazně větší, než je velikost měřicího bodu bezdotykového teploměru (**obr. 20**).

Velikost měřicího bodu je možné určit na základě specifikace, kterou udává výrobce. Většinou to bývá optická charakteristika teploměru popsána pomocí vztahu mezi měřenou vzdáleností a velikostí měřeného bodu (D:S parametr), nebo v grafické podobě (**obr. 21**).



Obr. 21: Příklad optické charakteristiky bezdotykového teploměru [24]

U termokamer jsou jejich optické vlastnosti charakterizovány pomocí rozlišení termokamery (počet prvků v matricovém detektoru), zorným polem termokamery (FOV, plochou, kterou lze pomocí termokamery vidět) a okamžitým zorným polem termokamery (IFOV, velikost jednoho pixelu při dané vzdálenosti).

Kalibrace infračervených teploměrů a termokamer probíhá prostřednictvím tzv. černých těles, která se svými vlastnostmi blíží ideálnímu černému tělesu ($\epsilon \rightarrow 1$). Kalibrační černá tělesa generují tepelné záření pro zvolenou teplotu. Podle geometrie rozlišujeme kalibrační tělesa dutinová (kavitová) a desková. Výhodou dutinových kalibračních těles je, že poskytují vyšší hodnoty emisivity než desková tělesa. Jejich nevýhodou však může být poněkud malý vstupní otvor,



Obr. 22: Příklady komerčně dostupných černých těles pro kalibraci infračervených teploměrů: dutinová kalibrační tělesa (vlevo), desková kalibrační tělesa (vpravo)

jehož průměr (typicky jednotky cm) může být mnohdy menší než doporučený průměr měřené oblasti příslušného teploměru. Takové teploměry se většinou kalibrují pomocí deskových černých těles, které mohou dosahovat průměru např. 150 cm. Příklady komerčně dostupných kalibračních těles jsou uvedeny na obr. 22.

8. Reference

- [1] H. Preston – Thomas, The international temperature scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27, 3-10, 1990, dostupné na www.bipm.org/utis/common/pdf/its-90/ITS-90_metrologia.pdf
- [2] L. Moretti, A. Castrillo, E. Fasci, M. D. De Vizia, G. Casa, G. Galzerano, A. Merlone, P. Laporta, and L. Gianfrani, Determination of the Boltzmann Constant by Means of Precision Measurements of H₂O Line Shapes at 1.39 μm, *Physical Review Letters* PRL 111, 060803, 2013
- [3] M. R. Moldover, R. M. Gavioso, J. B. Mehl, L. Pitre, M. de Podesta and J. T. Zhang, Acoustic Gas Thermometry, *Metrologia*, 51, R1-R19 (2014)
- [4] Castrillo, L. Moretti, E. Fasci, M. D. De Vizia, G. Casa, L. Gianfrani 'The Boltzmann constant from the shape of a molecular spectral line' *J. Molecular Spectroscopy JMS*, published online, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jms.2014.04.001>
- [5] M. de Podesta 'The Redefinition of the Kelvin' *Measurement and Control*, 47, (2014) 6
- [6] Yamada, Y., Sakate, H., Sakuma, F. and Ono, A., "A possibility of practical high temperature fixed points above the copper point," *Metrologia*, 38, 213-219, 2001
- [7] Woolliams, E., Machin, G., Lowe, D., Winkler, R., "Metal (carbide)-carbon eutectics for thermometry and radiometry: A review of the first seven years", *Metrologia*, 43, R11-R25, 2006
- [8] Machin, G., "Realising the Benefits of Improvements in High Temperature Metrology", *Acta Metrologica Sinica*, 29, 10-17, 2008
- [9] Bloembergen, P., Yamada, Y., Yamamoto, N., Hatrmann, J., "Realising the high-temperature part of a future ITS with the aid of eutectic metal-carbon fixed points", In: *Temperature its measurement and control in science and industry*, Vol 7 part 1, ed. Dean Ripple, AIP Conference proceedings, 291-296, 2003
- [10] Yamada, Y., Wang, Y., Sasajima, N., "Metal carbide-carbon peritectic systems as high-temperature fixed points in thermometry", *Metrologia*, 43, L23-L27, 2006
- [11] M. Kreidl, *Měření teploty – senzory a měřicí obvody*, BEN – technická literatura, Praha 2005
- [12] ČSN EN 60751, Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory
- [13] BIPM, Guide to the realization of the ITS-90 – Platinum resistance thermometry, dostupné na <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide-ITS-90-Platinum-Resistance-Thermometry.pdf>
- [14] <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-publications/intech-magazine/automation-basics/thermocouples-versus-rtds/>
- [15] BIPM, Guide on secondary thermometry – Thermistor thermometry, dostupné na <http://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide-SecTh-Thermistor-Thermometry.pdf>
- [16] ČSN EN 60584-1 ed. 2, Termoelektrické články – Část 1: Údaje napětí a tolerance
- [17] Škola teploty a vlhkosti 2013 – blok 2, sborník školy teploty a vlhkosti ČMI, 2013
- [18] <http://docplayer.cz/docs-images/52/30731581/images/35-0.png>
- [19] <http://www.sun.org/encyclopedia/black-body-radiation>
- [20] http://images.slideplayer.com/14/4495215/slides/slide_17.jpg
- [21] <http://www.bestech.com.au/wp-content/uploads/products/Infrared-Thermometer-principle.jpg>
- [22] https://automatizace.hw.cz/images/omega_thermopile/optika.gif
- [23] www.micro-epsilon.cz
- [24] <http://en-us.fluke.com/products/thermometers/>

3. KONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty A JEHO NÁVAZNOST

Celá návaznost měření teploty v České republice se odvíjí od realizace teplotní stupnice ITS-90. Ta je jako státní etalon zaštitěná pracovištěm ČMI OI Praha.

1. Státní etalon

Vybudování etalonu na této úrovni předcházela ekonomická rozvaha, která záměr zajistit pro ČR primární etalon teploty potvrdila. Na základě analýz bylo rozhodnuto vybavit obor teplota primární etalonáží ve středním rozsahu teplot. Protože měření teplot se provádí ve velmi širokém rozsahu, střední oblast teplot byla realizována z hlediska používaných přístrojů a teplot v rozsahu –189 °C až 1768 °C.

Dále bylo nutné zohlednit skutečnost, že stále se zvyšující požadavky na přesnost měření teploty se přenášejí z úrovně sekundárních laboratoří do úrovně primárního eta-

lonážního řádu. Sekundárními pracovišti, schopnými svým technickým vybavením využít možností kalibrace etalonů 1. řádu v primární laboratoři teploty jsou např. laboratoře ČMI OI Brno, ČMI OI Praha, ČEZ Jaderná Elektrárna Dukovany a Temelín.

Výsledky technicko – ekonomické rozvahy původně provedené v r. 1993 (po rozdělení tehdejší ČSFR), kdy většina nejvyšších etalonů zůstala v ČSMÚ Bratislava, byly následující:

- Finanční náročnost na ověřování etalonů 1. řádu stoupala relativně o 12 % ročně. Zakoupení primárních etalonů pro oblast středních teplot se rovnala objemu financí, které bylo nutno vynaložit dohromady na dobu čtyři a půl roku na ověřování sek. etalonů 1. řádu v této oblasti.
- Nezanedbatelnou se zdála být též skutečnost, že každoročně by musely být etalony shromážděny a dodány

na kalibraci do zahraničí (PTB, NPL) včetně nebezpečí jejich poškození dopravou a následné neschopnosti kalibrovat teploměry do doby zakoupení nového etalonu.

- V případě doplnění laboratoře vybavením v oblasti středních teplot to znamenalo možnost kalibrací s nejvyšší dosažitelnou přesností bez rušivých vlivů během celého roku, bez nebezpečí výpadků poškozením etalonů dopravou a v celém rozsahu od 77 K do 2041 K (t.j. od -196 °C do 1768 °C). V tomto případě vazba na zahraničí zanikla, omezila se na případná mezinárodní porovnání a při opravách na nákup náhradních dílů.

Základní přístrojové vybavení bylo s ohledem na komplexnost nabídky zakoupeno od firem ISOTECH Ltd. a AΣΛ Ltd. z Velké Británie. Interpoláční nástroje (odporové snímače teploty) a pevný bod Al byly zakoupeny od firem Hart Scientific a Tinsley. Úprava pracovišť a výroba doplňujících přípravků byla provedena různými českými firmami na základě doporučení výše zmíněných firem, údajů v literatuře a vlastních zkušeností s provozem pevných bodů Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 během dalších několika let.



Obr. 1: Pohled na termostaty státního etalonu

Návaznost měření teploty je spjatá s mezinárodní teplotní stupnicí ITS-90. Ta je definovaná pomocí konečného počtu definičních pevných bodů a pomocí přesně určených postupů realizace teplotní stupnice v intervalech mezi definičními pevnými body, které se uskutečňují pomocí SPRT.

Státním etalonem teploty pro kontaktní měření je v České republice realizovaná teplotní stupnice ITS-90 v rozsahu hodnot (-189,3442 až 1084,62) °C. Realizace teplotní stupnice umožňuje kalibrovat etalonové odporové teploměry a termoelektrické snímače teploty. Etalon se skládá z:

- pevných bodů ITS-90,
- zařízení pro jejich provoz a údržbu,
- interpoláčních platinových odporových teploměrů (SPRT),
- kontrolních termoelektrických článků (TC),
- měřicích zařízení pro stanovení velikosti elektrického odporu SPRT, elektrického napětí TC,

- interpoláčních vztahů definovaných ITS-90 a
- nástrojů pro zpracování dat získaných při měření.

Pevný bod je složený z grafitového kelímku naplněného jasně definovanou látkou v obalu z křemenného skla nebo nerezové oceli. Pro některé aplikace (zejména bezkontaktní měření teploty) je možné využít konstrukci bez ochranného obalu. Součástí státního etalonu jsou pevné body, uvedené v **tab. 1**. Nejnížší dosažitelné nejistoty jsou zobrazeny pro koeficient rozšíření $k = 2$.

Tabulka 1: Charakteristika státního etalonu teploty pro kontaktní měření

Pevný bod	Teplota realizace, °C	Odporový teploměr	Termoelektrický snímač teploty
		Nejistota, mK	Nejistota, °C
Argon	-189,3442	0,7	-
Rtuť	-38,8344	0,4	-
Trojný bod vody	0,01	0,15	-
Galium	29,7646	0,4	-
Indium	156,5985	0,8	-
Cín	231,928	0,8	-
Zinek	419,527	0,9	0,12
Hliník	660,323	2	0,12
Stříbro	961,78	5	0,17
Měď	1084,62	-	0,17

1.1 Etalonové odporové teploměry a zařízení pro měření jejich odporů

SPRT se používají pro definici teploty mezi jednotlivými pevnými body a jako nástroj pro vzájemné porovnávání pevných bodů. Velikost jejich odporů se měří pomocí střídavého mostu, který měří poměr odporů mezi odporovým teploměrem a etalonovým odporem. Mezi mostem a odporovými teploměry je zařazen přepínač, který umožňuje měřit současně až sedm teploměrů bez nutnosti přepojování kontaktů teploměru v průběhu měření. Jedná se o:

- Etalon elektrického odporu se jmenovitou hodnotou 25 Ω, 100 Ω a 300 Ω. Používá se pro měření velikosti odporu odporového etalonového teploměru. Navazuje se v primární laboratoři elektrického odporu.
- Můstky F18 a F900 – střídavé indukční mosty, které jsou schopny měřit poměr dvou odporů.
- Přepínač – umožňuje připojovat více měřených odporů k mostu pomocí dálkového ovládání. Současně jsou všechny připojené odpory napájeny stejným měřicím proudem.

Součástí etalonu teploty je platinový odporový teploměr (celkem šest kusů). Teploměry slouží k interpolaci při měření teploty mezi jednotlivými pevnými body v rozsahu Ar – Cu.

1.2 Etalonové termoelektrické články a zařízení pro měření jejich napětí

Podobně jako u odporových teploměrů, je nutné používat systém měření napětí pro termoelektrické články. Multime-

tr se používá pro měření velikosti napětí termoelektrického teploměru. Navazuje se v laboratoři elektrických veličin. K dispozici jsou dvě řady kontaktů A a B, vybírá se řada s minimálními hodnotami parazitního termonapětí.

2. Validace systému laboratoře

V laboratoři primární metrologie je používána metoda validace, která vyplývá ze standardních postupů při realizaci teplotní stupnice ITS-90. Hlavním úkolem validačního procesu je kontrola správnosti měření. Principy této kontroly jsou založeny na informacích z jiných metrologických institutů a z vlastních interních dokumentů.

Pro zabezpečení správnosti výsledků kalibrací v pevných bodech podle ITS-90 je možno proces rozdělit do šesti stupňů, které budou podrobněji rozebrány:

- kyvety pevných bodů (PB),
- pece pro realizaci PB,
- teploměry,
- měřicí systém a
- realizace jednotlivých technik a záruka správnosti měření.

2.1 Kyvety pevných bodů

Základním faktorem při hodnocení kvality pevného bodu je čistota kovu uvnitř bodu. Pro přesně provedené měření je jedním ze základních požadavků mít k dispozici kyvetu s co nejčistším kovem, protože jenom tak je možné přiblížit se nejbližší teoretické hodnotě teploty realizace daného pevného bodu (PB). Kyvety PB, které laboratoř vlastní, jsou zakoupeny od výrobců, a každá byla dodaná s certifikátem, garantujícím čistotu kovu (alespoň 99,999 %), a s procentuálním zastoupením jednotlivých nečistot.

Každý rok jsou také zaznamenávány křivky tání a tuhnutí jednotlivých PB, a na základě vyhodnocování změn mezi jednotlivými naměřenými prodlevami je sledován aktuální stav jednotlivých kyvet. U bodů, z nichž laboratoř vlastní více než jednu kyvetu, probíhá jednou ročně porovnání všech kyvet, které laboratoř vlastní, mezi sebou.

Speciální pozornost je třeba věnovat trojným bodům vody (TBV), které jsou uchovávány v lázních. K těmto kyvetám taktéž laboratoř vlastní certifikáty ohledně složení vody, která je uvnitř skleněné baňky, které garantuje realizaci hodnoty trojného bodu vody s nejvyšší možnou přesností. TBV jsou uschovány ve vodní lázni, a po namražení jsou pravidelně kontrolovány, jestli nedošlo např. k odtávání ledového okraje a jestli je tedy možné použít daný bod při kalibraci.

2.2 Pece – termostaty

Vlastnictví soustavy definičních PB však k zabezpečení realizace teplotní stupnice ITS-90 nestačí. Neoddělitelnou součástí realizace teplotní stupnice jsou pece, lázně a termostaty, ve kterých se pevné body realizují a jejichž údržba musí být důsledná. Pece musí splňovat náročná kritéria, která souvisí s teplotním profilem, zejména ve vertikálním směru.

Jednou ročně jsou měřeny vertikální teplotní profily jednotlivých sestav PB – pec jak v pevné tak kapalně fázi bodu. Maximální nehomogenita teplotního pole je pro správnou realizaci prodlev pevných bodů 0,01 °C.

Každých šest měsíců probíhá kontrola správnosti nastavení set-pointu a také jaké skutečné hodnotě tato nastavená hodnota odpovídá. V tomtéž časovém rozmezí je kontrolována stabilita pecí a lázní. Dle interních předpisů laboratoře nesmí být odchylka větší než 0,01 °C. Jednou ročně probíhá důsledné vyčištění všech pecí.

2.3 Teploměry (SPRT)

U této složky můžeme interní validační systém rozdělit do dvou částí:

- kontrola kvality měření kalibrovaného teploměru a
- kontrola pomocí monitorovacího teploměru.

Pro správnou hodnotu měření je důležité mít teploměr v teplotní rovnováze s rozhraním fázového přechodu pevného bodu. Ověření této skutečnosti se provádí povytažením jak kalibrovaného, tak i monitorovacího teploměru. Při povytažení do vzdálenosti tří centimetrů ode dna PB, musí teploměr kopírovat vliv hydrostatického tlaku popsaného v ITS-90, tak aby bylo potvrzeno, že se teploměr nachází v rovnováze s bodem.

Když laboratoř obdrží teploměr na kalibraci poprvé, je změřen jeho teplotní profil (*immersion profile*) – změna odezvy teploměru při různém zasunutí do pevného bodu. Pro monitorovací teploměr laboratoře je tento profil určován jednou ročně.

Dalším parametrem, který nesmí být zanedbán, je samoohřev. K zahřívání senzoru SPRT dochází při realizaci prodlevy pevného bodu, ve kterém je vložen teploměr. Nejistota tohoto měření je určena z pěti měření při procházejícím proudu (platí pro měření v každém pevném bodě), a extrapolací odporu odpovídajícímu nulovému procházejícímu proudu. Tento typ měření se pro zákaznické teploměry provádí při jeho první kalibraci, pro monitorovací teploměr, jenž je ve vlastnictví laboratoře se tato měření provádí jednou ročně.

Důležitou roli při kalibracích hraje také stabilita používaného teploměru, ať už kalibrovaného nebo monitorovacího. Naměřená hodnota TBV musí být opakovatelná s odchylkou do 0,4 mK mezi dvěma žiháními a s přesností do 0,8 mK v průběhu kalibrace, aby bylo možné splnit požadavky kladené na hodnotu nejistoty.

2.4 Měřicí systém

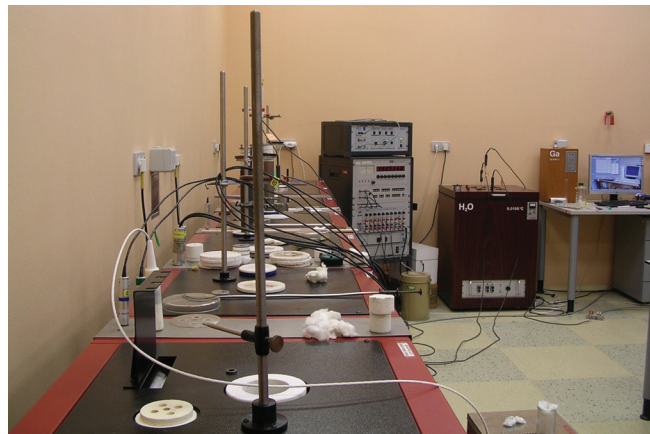
Kontrola měřicího systému spočívá zejména v kontrole můstků a referenčních odporů a není možné tento bod zanedbat. Jednou ročně probíhá validace střídavého (AC) mostu pomocí přímého porovnání s jiným AC mostem se zaměřením na stabilitu při měření, nelinearitu, chybu měřeného poměru, přidavné komplexní složky měřeného signálu a měřicí proudy. Validace parametrů zařízení, v němž jsou uchovávány etalony elektrického odporu, probíhají rovněž jednou ročně.

2.5 Konzistence naměřených výsledků

Hlavním principem této procedury je zkontrolovat, jestli byla všechna měření udělána s takovou přesností, jaká vyplývá z dokládáných nejistot. Každé měření v PB je kontrolováno monitorovacím teploměrem. Měření jsou prováděna před a po každé kalibraci, a změna zaznamenaná

monitorovacím teploměrem by měla být v bezpečnostním limitu (*assurance limit*), který je obvykle 0,1 mK. Limit pro posouzení stability monitorovacího teploměru je 1 mK.

Na základě těchto poznatků byl v laboratoři sestaven plán kalibrací a údržby jednotlivých měřidel a zařízení.



Obr. 2: Celkový pohled na státní etalon teploty

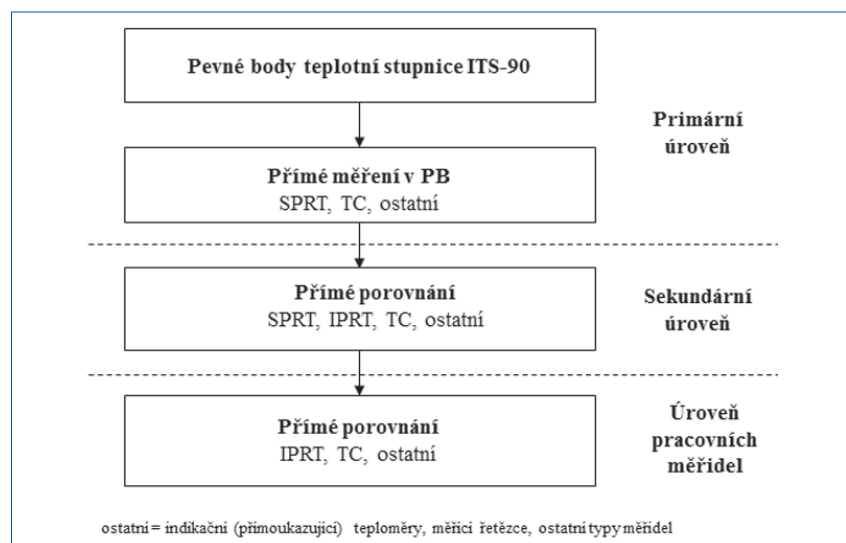
3. Realizace návaznosti měření v České republice

Na obr. 3 je zobrazeno schéma, které popisuje realizaci návaznosti kontaktních měřidel teploty na teplotní stupnici ITS-90. Ta stanovuje nepřerušovanou posloupnost kalibrace měřidel od primárního etalonu teploty směrem k etalonům nižších metrologických úrovní a pracovních měřidel.

Primární etalonážní řád v oboru kontaktní termometrie umožňuje návaznost měřidel teploty v rozsahu (-196 až 1768) °C.

Sestává se z:

- realizovaných definičních bodů teplotní stupnice,
- realizovaných sekundárních bodů teplotní stupnice,
- interpolačních odporových teploměrů a příslušného měřicího zařízení,
- interpolačních termoelektrických článků z drahých kovů (typu R, S, B, Pt-Au a Pt-Pd) a
- předepsaných interpolačních vztahů.



Obr. 3: Schéma návaznosti realizace teplotní stupnice ITS-90 pro kontaktní způsob měření teploty

Interpolační etalonové odporové teploměry slouží k interpolaci teploty v rozsahu mezi definičními pevnými body ITS-90 a k navazování etalonů. Představují skupinu přístrojů se vzájemně se překrývajícími rozsahy od (-196 do +962) °C. Interpolační etalonové termoelektrické články slouží k interpolaci zejména mezi sekundárními pevnými body. Představují skupinu přístrojů se vzájemně se překrývajícími rozsahy od 660 °C do 1768 °C.

Kromě primárních pevných bodů teplotní stupnice ITS-90 uvedených v tab. 1 můžou být v laboratoři realizovány ještě sekundární body teplotní stupnice pro kalibraci termoelektrických snímačů teploty, které jsou uvedeny v tab. 2.

Při kalibracích by mělo být dodržováno pravidlo, že navazovány jsou přednostně shodné druhy měřidel.

Tabulka 2: Charakteristika sekundárních pevných bodů používaných pro kalibraci termoelektrických snímačů teploty

Pevný bod	Teplota realizace, °C	Nejistota ($k = 2$), °C
bod tání zlata (Au)	1064,18 – miniaturní pevný bod	0,6
bod tání zlata (Au)	1064,18 – metoda malého množství	0,7
bod tání palladia (Pd)	1554,8 – miniaturní pevný bod	1,7
bod tání palladia (Pd)	1553,53 – metoda malého množství	2,0

4. Kalibrační schopnosti laboratoře

Laboratoře teploty ČMI poskytují pro zákazníky širokou škálu služeb v oblasti kalibrací kontaktních teploměrů. Kalibrační schopnosti jsou deklarovány pomocí hodnot CMC, které jsou posouzeny nezávislou třetí stranou na národní nebo mezinárodní úrovni. Národní úroveň je realizována akreditací pomocí Českého institutu pro akreditaci, mezinárodní deklarace hodnot CMC je prováděna zápisem nejistot do mezinárodní databáze KCDB. Nezbytnou součástí procesu deklarace nejistot je úspěšná účast v mezilaboratorním porovnávání měření. Podrobnější informace o této problematice jsou uvedeny v části věnované bezkontaktnímu měření teploty a jeho návaznosti.

4.1 Akreditace

ČMI má v rámci své organizace tři laboratoře: primární v Praze a sekundární v Praze a v Brně. Sekundární laboratoře jsou na metrologické výkony akreditované, celou přílohu je možné nalézt na stránkách ČIA, str. 24 až 28 přílohy akreditace Českého metrologického institutu. Primární laboratoř má většinu svých výkonů pokrytou mezinárodním logem CIPM-MRA. Pod akreditací má v rámci kontaktního měření teploty zahrnutou pouze kalibraci odporového teploměru v trojném bodě argonu, které se zatím nepovedlo začlenit pod logo CIPM-MRA.

Tabulka 3: Hodnoty CMC pokryté akreditací. P znamená primární laboratoř, S sekundární laboratoř

Metoda kalibrace	Rozsah, °C	CMC	Laboratoř
Platinové odporové teploměry v definičních bodech teplotní stupnice ITS-90	-189,3442 (TB Ar)	0,7 mK	P
Skleněné teploměry	-80 až 550	(0,015 až 0,6) °C	S
Odporové teploměry	-196 až 660	(0,03 až 0,09) °C	S
Termoelektrické snímače teploty	0 až 1600	(0,4 až 1,7) °C	S
Indikační teploměry	-196 až 1600	(0,01 až 1,7) °C	S
Měřicí řetězce včetně charakterizace teplotních komor	-196 až 1600	0,1 °C až 0,25 % z měřené hodnoty	S

4.2 Zápisy nejistot do databáze KCDB

Primární laboratoř má téměř všechny své činnosti v této oblasti pokryté pomocí loga CIPM-MRA. Jedná se o 71 řádků. Jejich souhrnný přehled je uveden v následující tab. 4.

Tabulka 4: Hodnoty CMC pokryté logem CIPM MRA

Měřidlo	Metoda kalibrace	Rozsah	Počet řádků CMC	CMC
IPRT	porovnáním	(-196 až 800) °C	9	(4 až 60) mK
Termistor	porovnáním	(-30 až 90) °C	1	10 mK
IPRT + displej	porovnáním	(-80 až 663) °C	6	(10 až 44) mK
TC z drahých kovů, R S B	porovnáním	(0 až 1554) °C	5	(0,4 až 2,2) °C
TC z obecných kovů	porovnáním	(-196 až 1400) °C	5	(0,3 až 1,5) °C
TC z drahých kovů, R S B	v pevných bodech	Zn až Pd	8	(0,12 až 1,7) °C
TC z drahých kovů, Pt-Au, Pt-Pd	v pevných bodech	Zn až Cu	4	(0,12 až 0,17) °C
Skleněné teploměry	porovnáním	(-80 až 550) °C	10	30 mK až 0,6 °C
Kalibrace pevných bodů	porovnáním s PB	Hg až Cu	9	(0,12 až 170) mK
SPRT (HTSPRT)	v pevných bodech a jejich kombinace	Hg až Ag	14	(0,55 až 20) mK

5. Mezilaboratorní porovnání (MPZ)

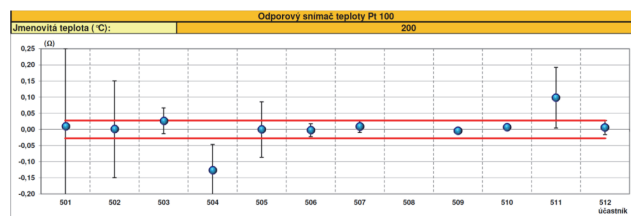
Český metrologický institut každoročně organizuje široké množství mezilaboratorních porovnání, kterých se můžou jednotlivé komerční akreditované laboratoře zúčastnit. Úspěšná účast v MPZ je důležitým kritériem při posuzování kalibračních schopností komerčních laboratoří. Samozřejmostí by mělo být, že laboratoř vstupuje do porovnání s hodnotami CMC, které chce mít uvedené v příloze o akreditaci.

V další části je uveden stručný přehled porovnání, které byly v posledních letech organizovány společně s krátkou analýzou výsledků.

5.1 Odporový snímač teploty Pt100, MPZ 32-500-11

V roce 2011 proběhlo porovnání zaměřeno na čtyřvodičový odporový snímač teploty Pt100. Do porovnání se zapojilo 12 laboratoří z ČR, SR a Francie. Úkolem účastníků MPZ bylo provést kalibraci odporového teploměru metodou porovnání s použitím postupů a metod měření, které jsou v laboratoři běžně používány.

Kalibrace byla provedena v teplotních bodech (-38, -15, 0, 100, 200, 300 a 400) °C nebo v bodech, které odpovídaly jejím technickým možnostem nebo rozsahu akreditace. Příklad výsledku měření pro teplotní bod 200 °C je znázorněn v obr. 4.



Obr. 4: Výsledky porovnání pomocí odporového snímače teploty při 200 °C pro různé účastníky

Pro úspěšné absolvování porovnání bylo nutné, aby celkový počet přijatelných měření v procentech účastníka byl větší nebo roven 90 %. Výsledky porovnání ilustrují následující tabulky. Z nich je možné vidět, že z celkového množství provedených měření měla nevyhovující měření podíl pouze 8 % (tab. 5).

Tabulka 5: Souhrnný přehled o přijatelných a nepřijatelných měřeních jednotlivých účastníků v MPZ 32-500-11

Počet laboratoří	Celkový počet měření	Počet měření vyhovujících	Počet měření vyhovujících v %	Počet měření nevyhovujících	Počet měření nevyhovujících v %
12	63	58	92,1	5	7,9

Po provedení analýzy úspěšnosti účasti jednotlivých laboratoří v porovnání lze konstatovat, že kritérium pro úspěšné absolvování porovnání splnilo 2/3 zúčastněných laboratoří.

Tabulka 6: Rozdělení účastníků podle přijatelných výsledků měření v MPZ 32-500-11

Počet laboratoří	Počet laboratoří podle počtu procent přijatelných výsledků měření laboratoře				
	100 %	99,9 % – 95 %	94,9 % – 90 %	89,9 % – 70 %	69,9 % – 0 %
12	8	-	-	3	1

5.2 Indikační teploměr, MPZ 32-500-12

O rok později bylo porovnání zaměřené na kalibraci indikačních teploměrů. Celkově se jej zúčastnilo 19 laboratoří, kromě ČR a SR také účastníci z Estonska, Norska a Itálie. Jako kolující měřidlo byl zvolen odporový teploměr s převodníkem Rosemount typ 3144P. Porovná-

ni probíhalo v teplotních bodech (-30, 0, 100, 200, 300 a 400) °C a odečet měřených hodnot mohl probíhat třemi způsoby:

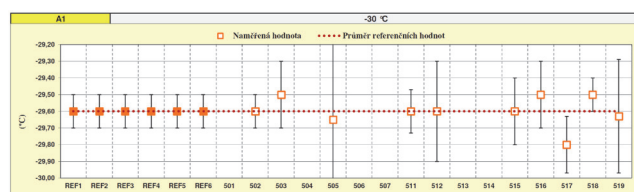
- přímý odečet z LCD displeje,
- odečet pomocí komunikačního protokolu HART a
- pomocí proudového výstupu (4 až 20) mA.

Výsledky porovnání byly pro některé laboratoře nepřijemným překvapením, úspěšně porovnání absolvovalo pouze 10 laboratoří z celkového počtu 19 (**tab. 7**).

Tabulka 7: Rozdělení účastníků podle přijatelných výsledků měření MPZ 32-500-12

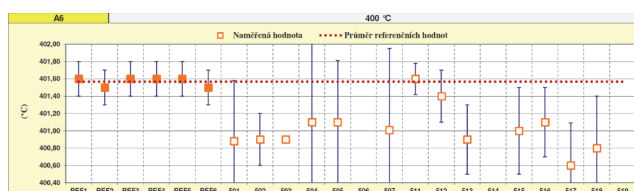
Počet laboratoří	Počet laboratoří podle počtu procent přijatelných výsledků měření laboratoře				
	100 %	99,9 % – 95 %	94,9 % – 90 %	89,9 % – 70 %	69,9 % – 0 %
19	9	-	1	4	5

Obr. 5 ukazuje výsledky jednotlivých kalibračních laboratoří pro nízkou teplotu. Výsledky všech laboratoří byly v mezích nejistoty referenční hodnoty. To je způsobeno nízkou hodnotou vlivů kalibračního zařízení (hlavně ponor).



Obr. 5: Výsledky porovnání indikačního teploměru při teplotě -30 °C. Ref jsou jednotlivá měření referenční laboratoře, účastníci jsou označeni jejich čísly

Obr. 6 naproti tomu ukazuje markantní rozdíl některých kalibračních laboratoří od referenční hodnoty. To bylo, způsobeno hlavně nízkým ponorem v blokovaných kalibrátorech.



Obr. 6: Výsledky porovnání indikačního teploměru při teplotě 400 °C. Ref jsou jednotlivá měření referenční laboratoře, účastníci jsou označeni jejich čísly

Celkově jednotlivé laboratoře provedly 162 měření. Zde byla celková úspěšnost o poznání vyšší, nevyhovujících měření bylo pouze 25, což tvoří cca 15 % z celkového počtu měření. Zajímavostí může být pohled na výsledek porovnání z pohledu jednotlivých možností odečtů měřených hodnot (**tab. 8**).

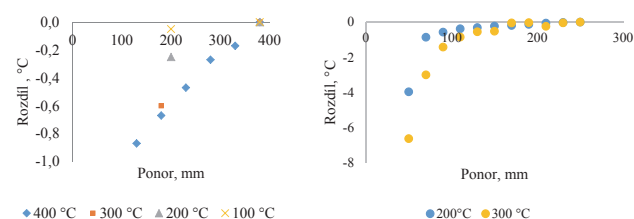
Nejhůře dopadla varianta výčtu měřených hodnot pomocí HART protokolu, naopak nejlépe měření pomocí proudového výstupu. To je pravděpodobně způsobeno vyšší nejistotou měření.

Tabulka 8: Analýza výsledků porovnání MPZ 32-500-12 na základě zvoleného způsobu odečtu měřených hodnot

Typ výstupu	Počet úspěšných laboratoří	Počet neúspěšných laboratoří
LCD displej	9	7
HART protokol	2	5
Proudový výstup (4 až 20) mA	7	-

Při analýze výsledků všech účastníků měření byl zkoumán důvod vysokého počtu laboratoří s nevyhovujícím výsledkem. Jako jedním z předpokladů bylo nesprávné zhodnocení teplotního pole použitého zařízení společně s odvody tepla z etalonu a z kalibrovaného snímače. Dalším z důvodů mohla být rozdílnost ponorů při kalibracích a nesprávné stanovení vlivu hystereze kalibrovaného snímače a dynamiky etalonu i snímače.

Proto byla provedena analýza vlivu ponoru použitého teploměru v kalibrační píce a v lázni. Výsledky plně korespondují s odchylkami jednotlivých laboratoří a ukazují jejich nesprávnou implementaci vlivu ponoru – **obr. 7**.



Obr. 7: Výsledky měření vlivu ponoru pro indikační teploměr, vlevo pro kapalinovou lázeň, vpravo pro blokovou píčku

5.3 Termoelektrické snímače teploty z drahých kovů, MPZ 32-1400-14

Porovnání zaměřené na termoelektrické snímače teploty typu S a B proběhlo v r. 2014. Zúčastnilo se ho 20 kalibračních laboratoří z České republiky, Chorvatska, Izraele, Slovenské republiky a Slovinska. Úkolem pro jednotlivé účastníky porovnání bylo provést kalibraci alespoň jednoho ze dvou dodaných termoelektrických snímačů teploty (TC) pomocí metod, které běžně používají v laboratoři pro jejich kalibrace. V případě TC typu S byly kalibrační teploty zvoleny v blízkosti definičních pevných bodů, tj. (420, 660, 960 a 1084) °C a pro typ B (660, 960, 1084 a 1553) °C. Devatenáct laboratoří se podílelo na porovnání pomocí typu S a osm účastníků do porovnání s typem B. Pro termoelektrický článek typu B byly úspěšné všechny laboratoře. V případě TC typu S jsou výsledky shrnuty v **tab. 9**.

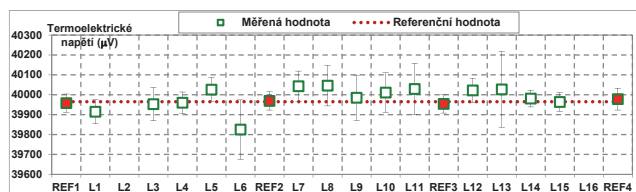
Tabulka 9: Rozdělení účastníků podle přijatelných výsledků měření MPZ 32-1400-14

Počet laboratoří	Počet laboratoří podle počtu procent přijatelných výsledků měření laboratoře				
	100 %	99,9 % – 95 %	94,9 % – 90 %	89,9 % – 70 %	69,9 % – 0 %
19	14	-	-	3	2
8	8	-	-	-	-

5.4 Termoelektrický snímač teploty typu N, EA ILC T/TEMP/2016

Rozsáhlé mezilaboratorní porovnání pomocí termoelektrického snímače typu N se uskutečnilo od února 2016 do března 2017. Dohromady se účastnilo 47 laboratoří (mimo referenční laboratoře) z 20 zemí celé Evropy (např. Finsko, Německo, Portugalsko, Švýcarsko, Velká Británie nebo Turecko). Z důvodu vysokého počtu účastníků probíhalo porovnání ve čtyřech paralelních skupinách a každá skupina měla k dispozici jeden TC typu N. Nutno podotknout, že celé měření bylo zatíženo vlastnostmi TC jako krátkodobý i dlouhodobý drift, nehomogenita nebo hystereze. Všechny TC byly vystaveny velkému zatížení nejen v počtu měření, ale i leckdy komplikovanými podmínkami při přepravě. Dva TC toto zatížení nevydržely a musely být nahrazeny jinými senzory stejného typu.

Kalibrační teploty byly (0, 50, 150, 300, 600, 800 a 1100) °C. Dohromady bylo účastníky porovnání provedeno 318 měření. Pro úspěšné absolvování porovnávacího měření bylo nutné dosáhnout hranice úspěšnosti 83,3 %. Obr. 8 ukazuje výsledky jednoho z TC, který byl postupně poslán do šestnácti laboratoří. Červené značky v zeleném rámečku s označením REF1 až REF4 jsou hodnoty naměřené referenční laboratoří před posláním do laboratoří, v průběhu (kontrolní měření) a po posledním účastníkovi. Ostatní značky představují výsledky jednotlivých laboratoří (označené L1 až L16).



Obr. 8: Výsledek porovnání šestnácti laboratoří v jedné větvi při teplotě 1100 °C

Tabulka 10: Rozdělení účastníků podle přijatelných výsledků měření EA ILC T/TEMP/2016

Počet laboratoří	Počet laboratoří podle počtu procent přijatelných výsledků měření laboratoře				
	100 %	85,7 %	83,3 %	83,2 % – 60 %	59,9 % – 0 %
47	36	6	1	2	2

5.5 Probíhající porovnání

V současné době probíhá mezilaboratorní porovnání pro kalibraci odporového snímače teploty Pt100 s označením 900-17. Porovnání bylo zahájeno v květnu a jeho ukončení se předpokládá počátkem ledna 2018. Přihlášených je 13 laboratoří mimo jiné ze Švédska, Rumunska, Itálie či Izraele. Porovnání probíhá v teplotních bodech (-38, -15, 0, 30, 100, 200, 300 a 420) °C.

5.6 Plánovaná porovnání

I v následujících letech jsou plánovaná další mezilaboratorní porovnání, která budou vyhlášena Referátem MPZ ČMI a jednotlivé laboratoře se do nich budou moci přihlásit. Přehled plánovaných porovnání shrnuje tab. 11. Roky uvedené pro indikační teploměry a termoelektrické snímače teploty jsou zatím předběžné.

Tabulka 11: Plánovaná mezilaboratorní porovnání

Rok MPZ	Měřidlo	Rozsah
2019	Indikační teploměry	Bude upřesněno
2018	Termoelektrické snímače teploty	(0 až 1100) °C

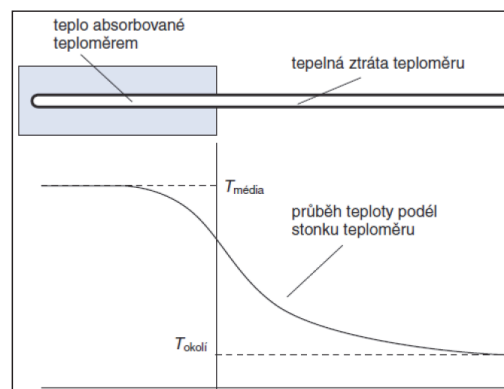
6. Reference

- [1] Zpráva státního etalonu teploty, interní materiál ČMI OI Praha.
- [2] Závěrečné zprávy mezilaboratorních porovnání MPZ, interní materiál ČMI.

4. VLIV PONORU A SAMOOHŘEVU U ODPOROVÝCH SNÍMAČŮ TEPLoty A TERMOELEKTRICKÝCH SNÍMAČŮ TEPLoty

1. Úvod do problematiky

Nedostatečný ponor teploměru se může projevit rozdílnými výsledky měření oproti měření při vhodné hloubce ponoření. Vysvětlení vhodné hloubky ponoření řeší odborná literatura pouze okrajově. Norma EN 60751 udává minimální hloubku ponoření pro změnu 0,1 °C, což je pro kalibrace a návaznost nedostatečné. Podle [1] se velikost případné nedostatečnosti ponoření odhaduje jako rozdíl hodnot naměřených při plném ponoření a při ponoření o 10 % menším. Článek [1] vysvětluje správnou hloubku ponoření následující větou: „Teploměr je správně ponořený (rozuměj – má správný ponor), nezjistíme-li žádnou změnu indikované teploty, pokud ponoříme teploměr hlouběji“. Následující obrázek reprezentuje obecný problém, kdy uniká stálý tok tepla podél stonku teploměru mezi médiem a okolím. Teplo může proudit pouze tam, kde je teplotní rozdíl. Právě tok tepla je důkazem, že měřicí konec teploměru má mírně odlišnou teplotu než má médium, které je předmětem zájmu.



Obr. 1: Závislost naměřené hodnoty na hloubce ponoření [1]

Jednoduchý model tohoto efektu se vztahuje k chybě čtení teploměru a hloubce ponoření. Pro případ dokonale

promíchávané kapalinové lázni lze rozdíl měřené a skutečné teploty (relativní teplotní chyba) vyjádřit jako:

$$\Delta T = (T_{\text{okolí}} - T_{\text{média}}) k e^{-\frac{L}{D_{\text{ef}}}}, \quad (1)$$

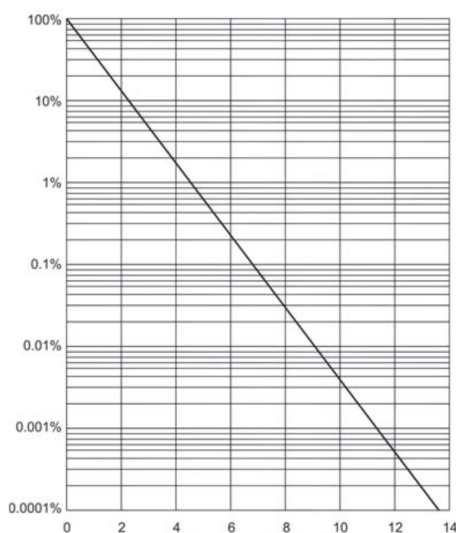
kde L je ponor teploměru, D_{ef} je efektivní průměr teploměru (závislý na velikosti odporového elementu, použitých materiálech teploměru a konstrukčním provedení) a k je konstanta blízká 1.) a e je konstanta blízká 1.

Následující obrázky popisují závislosti relativní chyby

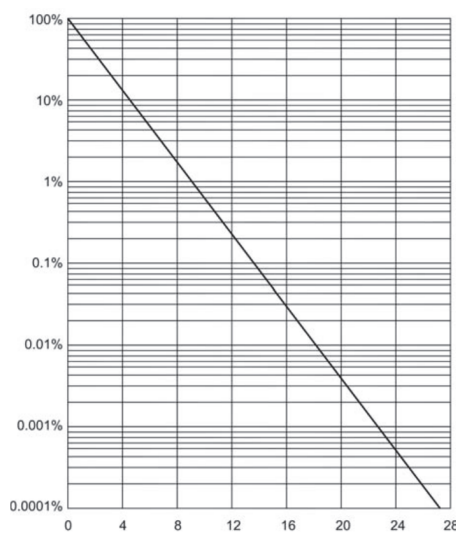
$$\frac{\Delta T}{T_{\text{okolí}} - T_{\text{média}}} \text{ na poměru } \frac{L}{D_{\text{ef}}}. \text{ Osa } x \text{ popisuje ponor tep-}$$

loměru („Immersion (Diameter)“) v násobcích efektivního průměru jeho stonku. Na ose y je vynesena relativní teplotní chyba ΔT (%). **Obr. 2 a 3** jsou v relativních jednotkách, tedy nezávislé na měřené teplotě a průměru stonku teploměru.

Příklad: pro průměr dířku teploměru $d = 4$ mm v přípa-



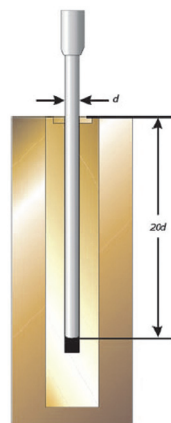
Obr. 2: Relativní teplotní chyba $[\Delta T / (T_{\text{média}} - T_{\text{okolí}})]$ je vynesena proti hloubce ponoření v průměru dířku teploměru ve stabilní kapaliné lázni s mícháním, $D_{\text{ef}} = 1$



Obr. 3: Relativní teplotní chyba $[\Delta T / (T_{\text{média}} - T_{\text{okolí}})]$ je vynesena proti hloubce ponoření v průměru dířku teploměru v blokové peci, $D_{\text{ef}} = 2$

dě průmyslového teploměru s napařovaným čidlem v případě průmyslového teploměru s napařovaným čidlem, v případě $\Delta T = 0,1$ % je zapotřebí sedminásobek průměru dířku, tedy hloubka ponoření bude 28 mm v kapalinové lázni ($D_{\text{ef}} = 1$) (**obr. 2**). Ve vzduchové peci ($D_{\text{ef}} = 2$) je zapotřebí ponor rovný asi čtrnáctinásobku průměru dířku, tedy 56 mm (**obr. 3**).

Dále bylo z článku [1] vyňato několik jednoduchých obecných pouček:



Obr. 4: Jednoduché určení hloubky ponoření odvozené z průměru dířku teploměru

- Pro průmyslové teploměry je doporučeno ponořit teploměr do hloubky minimálně 5 průměrů senzoru pro zajištění 1 % přesnosti.
- Pro dobré laboratorní měření je doporučeno ponořit teploměr do hloubky minimálně 10 průměrů senzoru pro zajištění 0,01 % přesnosti.
- Pro nejlepší laboratorní měření je doporučeno ponořit teploměr do hloubky minimálně 15 průměrů senzoru pro zajištění 0,0001 % přesnosti.
- Pro nej přesnější měření se volí hloubka ponoření senzoru 20 průměrů větší trubice teploměru (**obr. 4**). Každým zvýšením ponoru o jeden průměr senzoru eliminujeme 60 % chyby způsobené špatným ponorem.

2. Odporové teploměry

Ve všech platinových odporových teploměrech je měření teplot provedeno prostřednictvím snímacího prvku. Ten je v nejjednodušší formě typicky platinovým drátem namotaným na izolačním nosiči. Pro měření odporu je nutné napájet snímací prvek elektrickým proudem. Ten vyvolává emise tepla snímacím prvkem, a proto se jeho teplota s časem zvyšuje (samoohřev senzoru), dokud nedojde k rovnováze mezi teplem generovaným Jouleovým účinkem a teplem rozptýleným teploměrem do okolí. Toto zvýšení teploty ve snímacím prvku teploměru lze korigovat.

Chyba samoohřevem Δt_s je modelována podle rovnice

$$\Delta t_s = \frac{R_t I^2}{h}, \quad (2)$$

kde I je měřicí proud, R_t je odpor teploměru při dané teplotě a h je ztrátová konstanta, velmi často udávaná i jako převrácená hodnota s názvem „koeficient samoohřevu“. Hodnota ztrátové konstanty závisí na podmínkách měření. Následující **tab. 1** udává její nejčastější hodnoty.

Tabulka 1: Typické hodnoty ztrátového koeficientu a chyby způsobené samoohřevem v různých prostředích

Podmínky měření	h , mW/K	Δt_s , K
Vzduch bez proudění	1 – 10	0,01 – 0,1
Voda bez proudění	2 – 400	0,00025 – 0,05
Proudící voda	10 – 1000	0,0001 – 0,01

Tuto chybu je možné odstranit měřením při použití dvou měřicích proudů a korekce měřeného odporu na nulový proud.

To bývá prováděno jen při velmi přesných kalibracích. Následující postup pro zjištění velikosti samoohřevu teploměru pro daný měřicí proud se zakládá na předpokladu, že závislost odporu na čtverci měřicího proudu je v malém rozsahu lineární.

Pokud tento předpoklad přijmeme, pak pro odpor teploměru při nulovém proudu platí

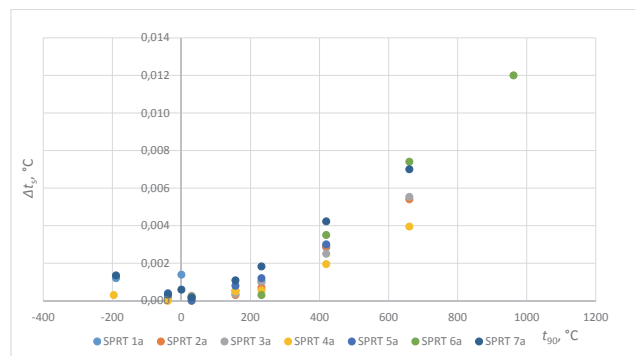
$$R_0 = R_1 - I_1^2 \left(\frac{R_2 - R_1}{I_2^2 - I_1^2} \right), \quad (3)$$

kde R_1 je odpor při proudu I_1 (zpravidla nižším), R_2 je odpor při proudu I_2 . Pokud je $I_1 = 1$ mA, a $I_2 = \sqrt{2}$ mA, potom $R_0 = R_1 - (R_2 - R_1)$, tedy rozdíl $R_2 - R_1$ udává hodnotu samoohřevu pro měřicí proud 1 mA. Na grafech níže jsou zobrazeny typické hodnoty samoohřevu změřené s využitím různých typů teploměrů uvedených v **tab. 2**. Samoohřev byl zkoumán pro měřicí proud o velikosti 1 mA.

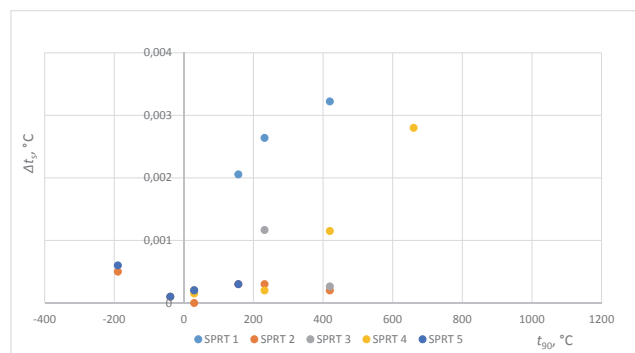
Tabulka 2: Seznam typů teploměrů použitých pro měření velikosti samoohřevu. SPRT – teploměr nejvyšší metrologické kvality splňující podmínky pro použití jako interpolační nástroj teplotní stupnice ITS-90. IPRT – průmyslový teploměr.

Druh teploměru	Ochranná trubice	Výrobce	Typ	L, cm	Ø, mm
IPRT	kovová	Ametek	STS-100 A 500	50	4
IPRT	kovová	Ametek	T-R100-300	50	3
IPRT	kovová	Ametek	T-R100-600	35	6
IPRT	kovová	Krohne	TRA-P 10 Special	39	6
IPRT	kovová	Rosemount	0065	44	4
IPRT	kovová	WIKA	CTP5000-450-B	35	6
IPRT	kovová	ZPA	11215	50	8
IPRT	kovová	ZPA	0348	50	8
IPRT	kovová	ZPA	11216	50	6
SPRT	kovová	Fluke	5680	48	6
SPRT	kovová	Fluke	5699	48	6
SPRT	kovová	Fluke	5628	30	6
SPRT	kovová	Isotech	670SH	48	6
SPRT	kovová	Isotech	670SL	48	6
SPRT	křemenné sklo	AccuMac	1950	48	7
SPRT	křemenné sklo	AccuMac	1960	48	7
SPRT	křemenné sklo	Fluke	5681	52	7
SPRT	křemenné sklo	Isotech	670SQ	48	7
SPRT	křemenné sklo	Isotech	909	48	8
SPRT	křemenné sklo	Isotech	96178	65	8
SPRT	křemenné sklo	Tinsley	5187 SA	48	7

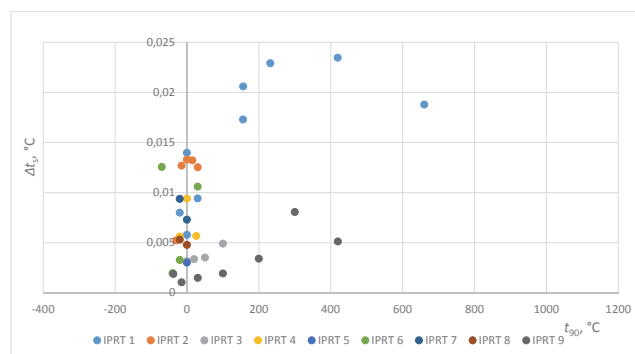
Míra samoohřevu byla vypočtena v jednotkách elektrického odporu a následně podle citlivosti každého testovaného teploměru přepočtena na ekvivalent ve °C. Ve většině případů bylo zkoumáno více exemplářů daného typu teploměru. Protože bylo zjištěno, že v rámci daného typu mají teploměry takřka totožnou závislost samoohřevu na teplotě prostředí, jsou v grafech níže znázorněny průměry těchto hodnot.



Obr. 5: Hodnota samoohřevu ve °C v závislosti na teplotě prostředí, SPRT s trubicí z křemenného skla



Obr. 6: Hodnota samoohřevu ve °C v závislosti na teplotě prostředí, SPRT s kovovým stonkem



Obr. 7: Hodnota samoohřevu ve °C v závislosti na teplotě prostředí, IPRT

Bez ohledu na provedení vnějšího obalu byl pro všechny zkoumané SPRT samoohřev velmi podobný hodnotám na **obr. 6**. průběhů je zřejmé, že jeho velikost závisí především na teplotě prostředí. Samoohřev IPRT se pohybuje od tisícín až po několik setin °C. Pro každý typ teploměru je tedy nezbytné navýšit rozpočet nejistoty měření o setiny °C, nebo míru samoohřevu změřit při každé teplotě.

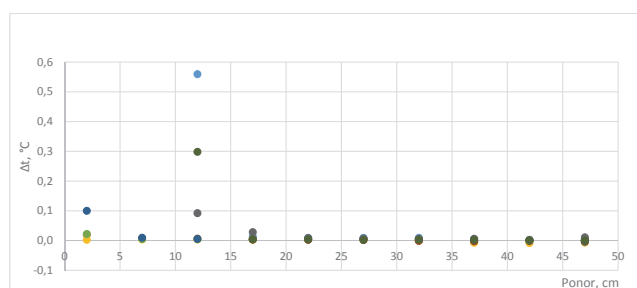
Na následujících řádcích je demonstrován vliv ponoru kalibrovaného teploměru na hodnotu jím změřenou. Pro účely měření, nezbytných k demonstraci vlivu ponoru, byly použity následující snímače teploty (L zde značí délku stonku teploměru):

Tabulka 3: Seznam teploměrů použitých pro měření vlivu ponoru

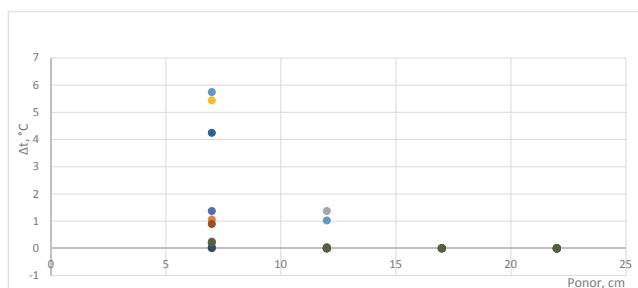
Druh teploměru	Výrobce	Typ	Výrobní číslo	L, cm	Rozsah, °C
IPRT	ZPA	11215	850053	50	-40 až 420
IPRT	ZPA	0348	405112150152	50	-70 až 500

Druh teploměru	Výrobce	Typ	Výrobní číslo	L, cm	Rozsah, °C
IPRT	Rosemount	0065	0326649	44	0 až 660
IPRT	Krohne	TRA-P 10 Special	T150000000104198 A	39	-50 až 300
IPRT	Krohne	TRA-P 10 Special	T150000000104198 B	39	-50 až 300
IPRT	Ametek	STS-100 A 500	629852-10	50	0 až 660
IPRT	Ametek	STS-100 A 500	629852-13	50	0 až 660
IPRT	ZPA	11215	660102	46	-40 až 420
SPRT	Isotech	935-14-77	330000032275	45	-50 až 670
SPRT	AccuMac	AM 1950	1620493	51	-200 až 500
SPRT	AccuMac	AM 1960	1620796	51	-200 až 670
SPRT	Tinsley	5187 SA	238690	48	-189 až 420

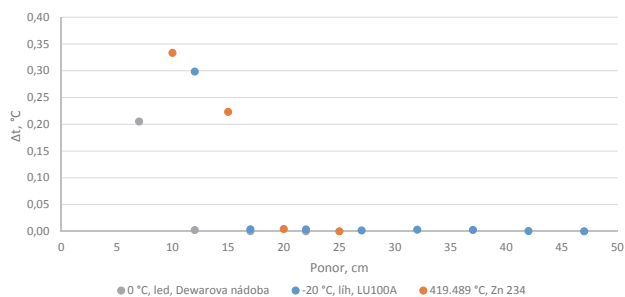
V seznamu jsou zastoupeny jak SPRT, tak IPRT o různých konstrukčních provedeních. Teploměry byly kalibrovány při různých hodnotách ponoru a v různých médiích v rozsahu (-20 až 420) °C. Jak je patrné z následujících obrázků, závislost naměřené teploty na hloubce ponoru se liší pro každý teploměr, teplotu a druh prostředí.



Obr. 8: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro SPRT (šedivá a tmavě zelená) a IPRT (ostatní barvy) v lihové lázni o teplotě -20 °C

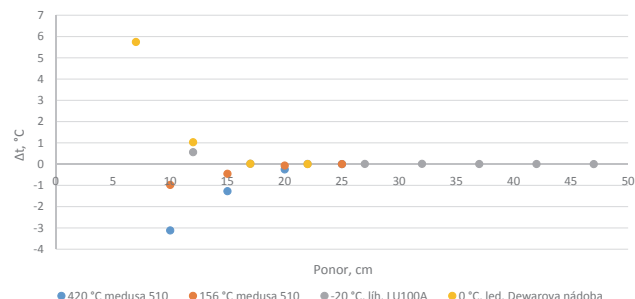


Obr. 9: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro SPRT (světle hnědá a zelená) a IPRT (ostatní barvy) v Dewarově nádobě s ledem, 0 °C

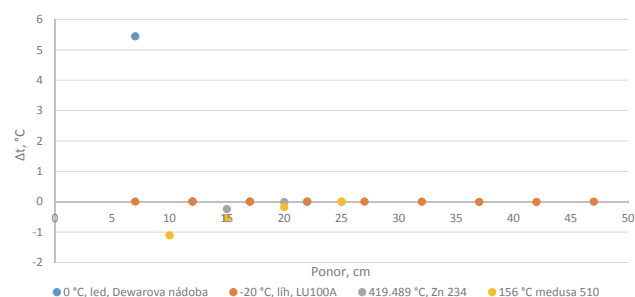


Obr. 10: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro SPRT

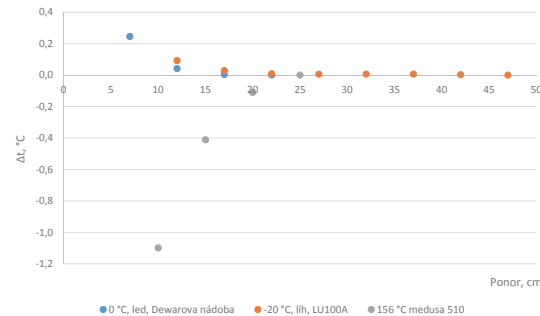
Na následujících grafech jsou vykresleny průměrné závislosti naměřené hodnoty na hloubce ponoření teploměru (pro SPRT a IPRT) v různých zařízeních. LU100A zde značí lihovou lázeň, Zn234 malý pevný bod tání zinku a Medusa 510 blokový kalibrátor teploty.



Obr. 11: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro SPRT v kovovém plášti



Obr. 12: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro IPRT se stonkem o průměru 3 mm



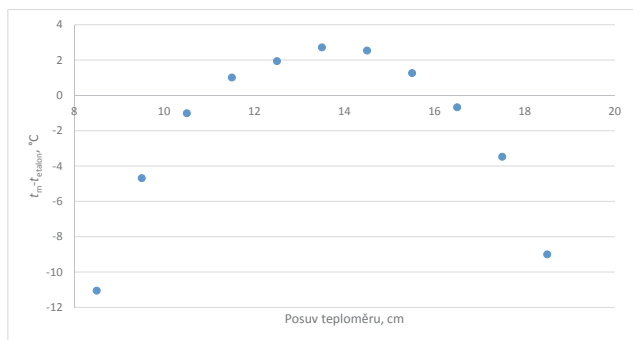
Obr. 13: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro IPRT se stonkem o průměru 6 mm

Ve výše uvedených grafech jsou některé charakteristiky záměrně vykresleny jen do určitého bodu, protože u ponorů nižších jsou již výsledky natolik odlišné od zbytku hodnot, že by tím utrpělo rozlišení daného grafu. Z měření vyplývá, že nedostatečný ponor má většinou za následek fatální chybu měření a minimální hodnota dostatečného ponoru musí být vždy dodržena.

3. Termoelektrické snímače teploty

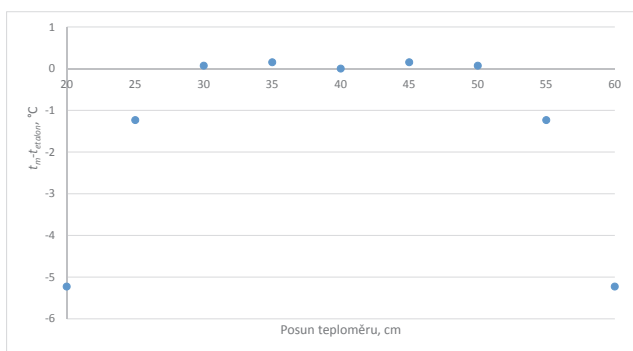
Termoelektrické snímače teploty (dále TC) vyžadují trochu rozdílný přístup oproti odporovým teploměrům. Tento příspěvek je zaměřen na měření teplot od 300 °C do 1600 °C pro typy z drahých kovů S, B a typy z obecných kovů N, při měření

převážně ve vzduchových horizontálních pecích, v pevných bodech a kapalinové lázni. Obecně i kvalitní pece nedosahují přesnosti a homogenity srovnatelné s lihovými, vodními, olejovými lázněmi či pevnými body. Ideální měření probíhá v pevných bodech nebo pecích s tepelnou trubicí. Obecně je vždy důležité znát parametry pece a měřidla. V praxi to znamená mít proměřenou homogenitu (teplotního rozložení) pece. Obecně se tvrdí, že např. u horizontálních pecí se bude teplotní maximum nacházet uprostřed. Toto však nemusí být nutně pravda, každá pec má jinou konstrukci, například topení. Na **obr. 14** je zobrazeno teplotní rozložení přenosné jednoduché pícky s horizontální trubicí o délce 22,5 cm na jedné straně slepé. Teplotní maximum bylo naměřeno v 13,5 cm od vstupu.



Obr. 14: Teplotní rozložení v přenosné pícce při teplotě 1100 °C

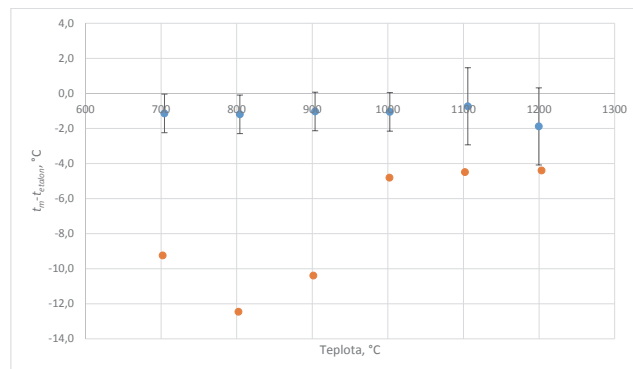
Zjištění homogenity pece v praxi znamená zasunutí 2 teploměrů s podobnými vlastnostmi do středu či na konec vnitřní trubice. Následně se jeden teploměr ponechá celé měření v klidu a druhý se povytahuje s vhodně zvoleným krokem (pro trubicí s délkou 80 cm po 3 cm až 5 cm) a sledují se rozdíly mezi teploměry. Výsledkem takového měření je nalezení homogenní části pece, teplotní maxima a stabilní části pece. V následujícím grafu je zobrazen příklad takové ho měření. Uvedené rozdíly odpovídají rozdílu mezi teploměrem v klidu a teploměrem posunutým.



Obr. 15: Výsledky proměření homogenity pece při teplotě 1600 °C

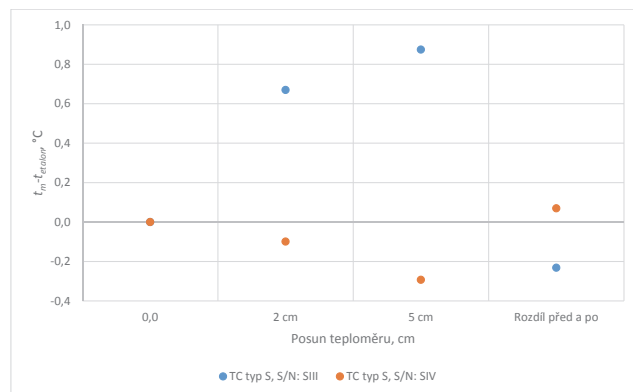
Podle předchozích grafů je zřetelné, že u komerčně dostupných pecí se homogenita pece pohybuje v desetinách až jednotkách stupňů. Je možné se setkat s případy, kdy nejsou senzory TC ve stejné poloze, aniž by se o tom vědělo. Jednoduše stačí mít TC zasunutý do ochranné trubice bez znalosti místa senzoru. V případě homogenního prostředí se to nemusí projevit. **Obr. 16** zobrazuje právě popsanou situaci, kde byl senzor (TC typ R) v ochranné trubicí posunut o 1,5 cm (oranžové značky), aniž by o tom uživatel věděl a výsledky

takového měření byly naprosto nepoužitelné. Modré značky zobrazují kalibraci se správným ponorem vůči etalonu.



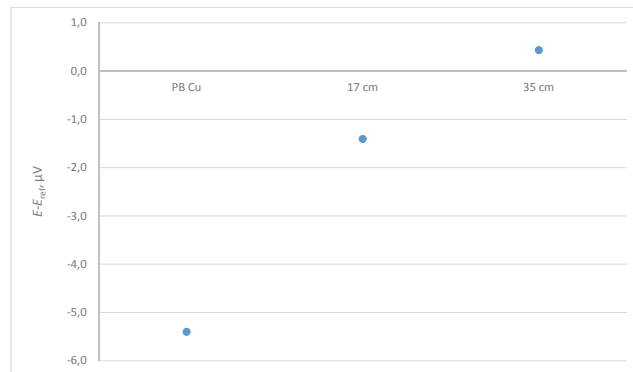
Obr. 16: Kalibrace s posunutým senzorem oproti etalonu, oranžové značky značí nesprávně zasunutý TC, modré značky značí kalibraci se správným ponorem

Následující odstavec se již přímo zaměřuje na ponory TC. **Obr. 17** zobrazuje kalibraci provedenou v kovovém bodu Zn u dvou TC typu S podobných vlastností. Při plné hloubce ponoření byl rozdíl v rámci experimentu minimální. Ovšem následovalo povytážení o 2 cm a následně o dalších 5 cm. Byť se vezme v úvahu povytážení pouze o 2 cm, dochází ke změně naměřených hodnot u obou teploměrů. Malý pevný bod Zn se dá považovat za velmi homogenní prostředí. Z takového měření je tedy patrné, že pokud by neměla hloubka ponoru vliv, hodnota po vytažení by se nezměnila.



Obr. 17: Změna ponoru měřena v pevném bodu Zn

Pro další experiment byla zvolena teplota 1084,6 °C (teplota tání Cu) a TC typ S byl změřen ve třech zařízeních:



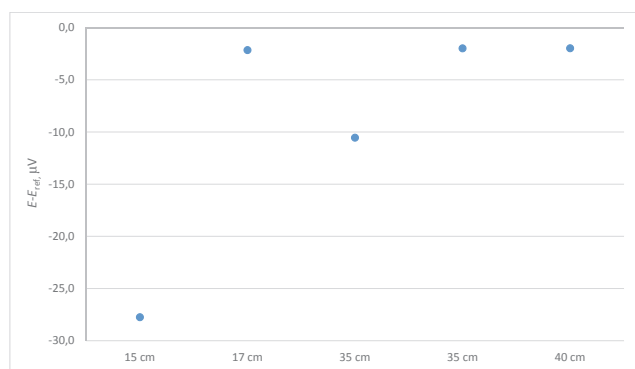
Obr. 18: Výsledky měření pro termoelektrický snímač teploty typ S v různých zařízeních při teplotě 1084,6 °C

- v pevném bodu Cu (součást státního etalonu),
- v kalibrační peci Cyclops s ponorem 17 cm a
- v horizontální peci Vecstar s ponorem 35 cm.

Ačkoliv byla v zařízeních realizovaná stejná teplota, TC naměřil rozdíly až $5 \mu\text{V}$ (odpovídá $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$). V dalším experimentu byla realizována teplota $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ve čtyřech různých zařízeních:

- malé kalibrační píccie Clasic (15 cm),
- v Cyclops (17 cm),
- Vecstar (35 cm) a
- ve velké horizontální peci Clasic (35 cm a 40 cm) – homogenní část pece má delší pásmo.

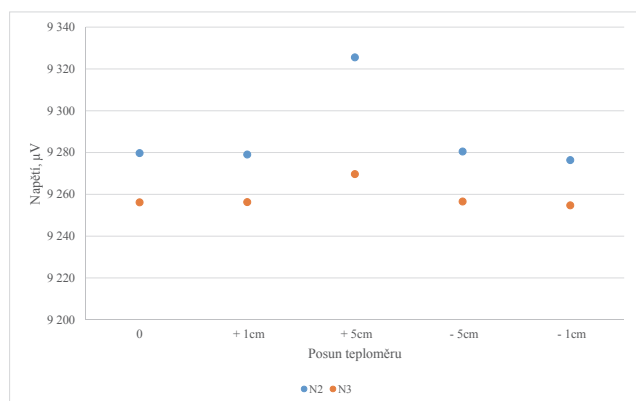
Stejně měřidlo naměřilo rozdílné výsledky, které se již pohybují v desítkách μV . Následující graf zobrazuje výsledky experimentů. Žádné měření nelze vyloučit a označit za špatné či naopak správné. Z grafu je patrné, že hloubka ponoření má při vyšší teplotě pro TC zásadní vliv na výsledek měření.



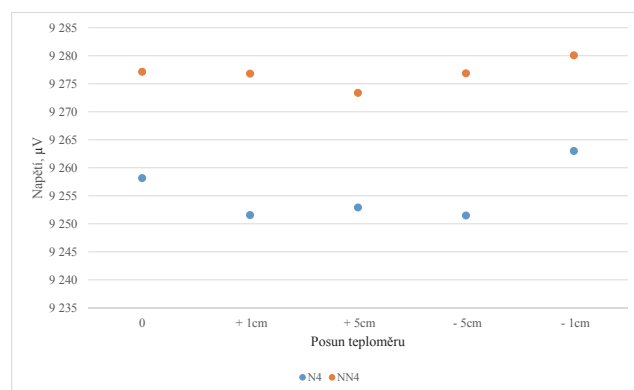
Obr. 19: Výsledky měření pro termoelektrický snímač teploty typ S v různých zařízeních při teplotě $1200 \text{ }^\circ\text{C}$

Zatím zde byly řešeny pouze TC z drahých kovů. Následující grafy popisují typické chování TC typ N, které bylo měřeno ve stabilní solné lázni s hloubkou ponoření 40 cm. V obr. 20 je zaznamenán nárůst napětí u TC po povytážení a v obr. 21 naopak pokles naměřeného napětí. Testováno bylo šest kusů TC stejného typu od jednoho výrobce. Z výsledků měření je patrné, že každý kus má své specifické chování, které bez experimentů nelze odhadnout.

Pokud se pomine vlastnost zařízení, měření s TC je zatíženo nevyzpytatelnou vlastností tzv. nehomogenitou. Ta



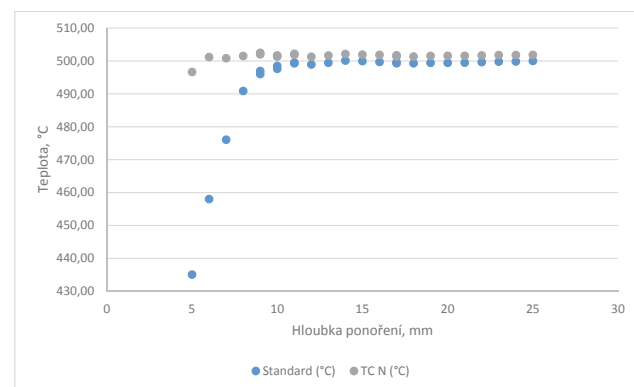
Obr. 20: Vliv změny ponoru při měření TC typ N



Obr. 21: Vliv změny ponoru při měření TC typ N

je způsobena nekonzistencí mezi slitinami kovů vlivem teplotních šoků, mechanického namáhání a velkého počtu provozních hodin. Těmito vlivy mohou vznikat paralelní TC, které vytváří další napětí. Pokud jsou podmínky používání TC jiné, než při jeho kalibraci, je nutné použít hodnotu 20 % maximální dovolené chyby pro třídu 2 [2]. Závěrem lze konstatovat, že hloubka ponoření TC jde ruku v ruce s homogenitou samotného TC.

Obr. 22 se zabývá problematikou společného měření IPRT a TC. V tomto případě se jedná o IPRT 100Ω , který je použit jako etalon pro kalibraci TC typ N. TC má jako senzor jeden bod (kulička – spojení vodičů). IPRT (SPRT) existují v různých provedeních a nejčastěji je používám design navinutého drátku platiny na tzv. kostře. Takový senzor má délku např. 2 až 3 cm. Díky této skutečnosti je citlivost obou senzorů jiná (IPRT a TC). Obr. 22 reprezentuje experiment, kdy byly oba typy teploměru vytahovány z pece. IPRT (modré značky) od hloubky ponoření 13 cm ukazoval zkreslený údaj. TC díky bodovému senzoru chybu zaznamenal až při hloubce ponoření 5 cm.



Obr. 22: Rozdílné snímání teploty mezi IPRT (modrá barva) a TC typ N (šedivá barva)

4. Literatura

- [1] <http://www.isotech.co.uk/assets/uploads/Technical%20Articles/Temperature%20Calibration-Depths%20of%20Immersion.pdf>
- [2] ČSN EN 60584-1 ed. 2, Termoelektrické články – Část 1: Údaje napětí a tolerance.

5. BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ TEPLoty A JEHO NÁVAZNOST

Bezkontaktní způsob měření tvoří alternativu k tradičnímu kontaktnímu měření teploty. V současné době je hojně využíván v řadě průmyslových, energetických, kontrolních ale i zdravotnických aplikacích. V každé z těchto oblastí je důležité zabezpečit správnost měření, jelikož pochybení může mít za následek finanční ztráty nebo v krajním případě i ohrožení lidského života. Z toho důvodu je nutné zabezpečit návaznost jednotlivých měření na teplotní stupnici ITS-90, která společně s kvalifikovanými pracovníky přispívá ke správnosti jednotlivých měření.

1. Státní etalon

Práce na budování laboratoře vyústily v r. 2014 k podání žádosti o vyhlášení státního etalonu v této oblasti měření teploty. Na konci roku 2014 proběhla úspěšná obhajoba předloženého konceptu státního etalonu. Oponenti byli dva přední pracovníci z evropských metrologických institutů z Velké Británie (NPL) a Finska (VTT, dříve MIKES).

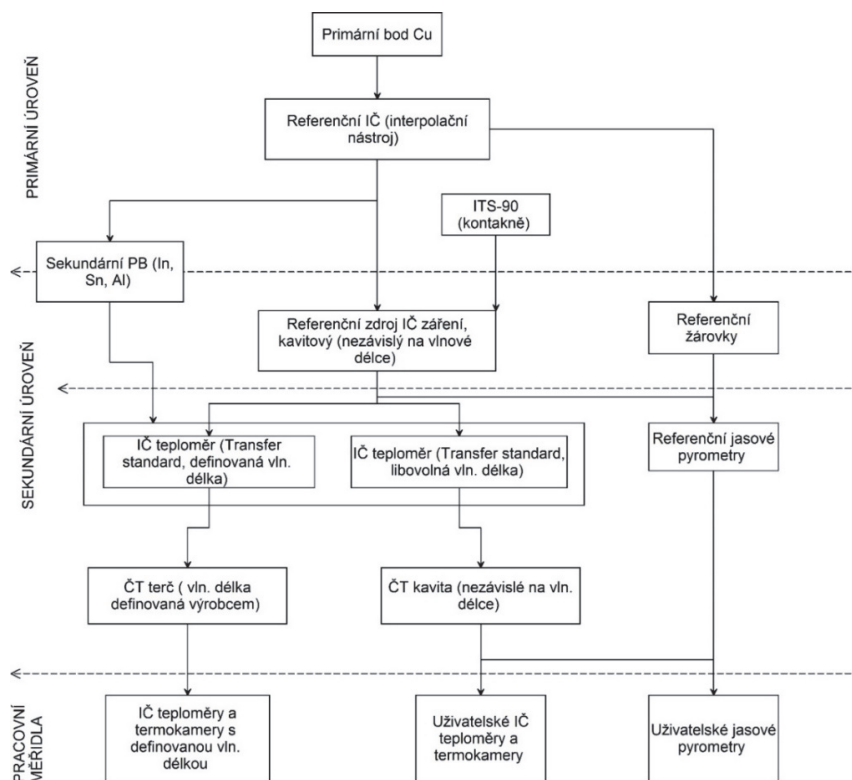
Etalon byl vyhlášen pod označením ECM 320-2/15-058 a jeho oficiální název zní „Státní etalon teploty pro bezkontaktní měření“ [1]. Mezi součásti státního etalonu patří pevné body, černá tělesa realizující teplotu v rozsahu (-30 až 1800) °C, sada kontaktních i bezkontaktních měřidel teploty a pomocná měřidla, jakými jsou odporový most s přepínačem nebo multimetr pro měření termoelektrického napětí. Vyhlášený státní etalon je realizován s následujícími nejistotami ($k = 2$):

Tabulka 1: Parametry státního etalonu ECM 320-2/15-058

Způsob realizace	Teplota, °C	Nejistota ($k = 2$), °C
černé těleso pro teploty blízké okolí	-30 až +30	0,3
pevný bod In	156,5985	0,2
pevný bod Sn	231,928	0,2
pevný bod Al	660,323	0,1
pevný bod Cu	1084,62	0,2
vysokoteplotní černé těleso	1200 až 1800	1,0

2. Realizace návaznosti měření v České republice

Pro jednoduchou ilustraci způsobu zabezpečení návaznosti bezdotykových měřidel teploty v ČR bylo definováno schéma návaznosti (obr. 1). Schéma bylo koncepčně připra-



Obr. 1: Schéma návaznosti pro bezkontaktní způsob měření teploty

veno tak, aby pokrylo návaznost všech druhů měřidel v oblasti podnulových i nadnulových teplot. V největší možné míře je zde kladen důraz na zabezpečení návaznosti všech měřidel na teplotní stupnici ITS-90.

Základem je pevný bod mědi (obr. 2a), který je definičním bodem teplotní stupnice ITS-90. Na ten jsou navazovány referenční bezdotykové teploměry. V případě laboratoře ČMI se jedná o lineární pyrometry LP5 pracující při definované vlnové délce (λ) 650 nm nebo 1,569 μm (obr. 2b). Teploměry, které je možné kalibrovat v pevných bodech, mají velikost měřicího bodu pouze několik málo mm. Nejistota této kalibrace se pohybuje v řádech setin °C.



Obr. 2: 2a – pevný bod, 2b – lineární pyrometr LP5

V dalším kroku je možné použít sekundární pevné body, pomocí kterých je možné kalibrovat etalonové ale i referenční bezdotykové teploměry (Transfer standard, TS), určené dále pro kalibraci uživatelských černých těles, případně pracovních měřidel.

Referenční teploměr kalibrovaný v definičním bodě ITS-90 může dále sloužit k měření teploty dutinových černých těles, která nejsou závislá na vlnové délce měření. Prostřednictvím těchto černých těles je také možné provádět kalibraci TS. Na této úrovni je možné využít také návaznost na kontaktní část schématu. Umožňuje-li to konstrukce dutinového černého tělesa, může být jako etalon použitý odporový teploměr nebo termoelektrický snímač teploty.

TS je dále možné použít v situaci, kdy je nutné kalibrovat teploměr (nebo termokameru), který pracuje při jiné vlnové délce než referenční IČ teploměr, nebo černé těleso. TS pracující na stejné λ jako kalibrované měřidlo je nejdříve navázán na vlnově nezávislý zdroj IČ záření. Až po tomto kroku je možné přistoupit k samotné kalibraci deskového černého tělesa nebo teploměru/termokamery porovnáním s TS.

Změna nastala i při navazování jasových pyrometrů. Je zde ponechána možnost návaznosti na teplotní žárovky, zejména pro teploty vyšší než 1800 °C. Díky pořízení lineárního pyrometru LP5 ($\lambda = 650$ nm) je možné provádět kalibrace žárovek přímo v laboratoři a není nutné žárovky posílat do zahraničí. Pro nižší teploty je možné provádět kalibrace na klasických černých tělesech, které se vyznačují vyšší stabilitou při měření.

Na sekundární úrovni se nachází přístroje a zařízení, které by měly patřit do standardního vybavení sekundárních kalibračních laboratoří a nejistota tohoto typu měřidel se pohybuje v rozmezí (0,5 až 1,5) °C.

Do kategorie pracovních měřidel patří běžné ruční bezdotykové teploměry a termokamery. Nejistoty na této úrovni se pohybují od 1 °C výše.

3. Kalibrační schopnosti laboratoře

Laboratoř poskytuje pro zákazníky služby v oblasti kalibrací bezdotykových teploměrů, černých těles a termokamer. Kalibrační schopnosti jsou deklarovány pomocí hodnot CMC (calibration measurement capability), které jsou posouzeny nezávislou třetí stranou na národní nebo mezinárodní úrovni. Národní úroveň je realizována akreditací přes Český institut pro akreditaci, mezinárodní deklarace hodnot CMC je prováděna zápisem nejistot do mezinárodní databáze KCDB [2].

3.1 Akreditace

Akreditace kalibračních laboratoří je prováděna podle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 [3]. Vybudovaná primární laboratoř byla poprvé akreditována pro kalibraci bezdotykových teploměrů v roce 2012 v teplotním rozsahu (500 až 1240) °C.

Další vylepšení v rámci vybavení laboratoře se postupně promítalo i do rozsahu akreditace laboratoře. V současné době jsou kalibrační možnosti, které poskytuje laboratoř, pokryty akreditací v plném rozsahu (-30 až 1800) °C. Aktuální hodnoty CMC pokryté akreditací, jsou shrnuty v **tab. 2**.

Tabulka 2: Hodnoty CMC pokryté akreditací pro primární laboratoř

Metoda kalibrace	Rozsah, °C	CMC, °C
Kalibrace bezdotykových teploměrů v pevných bodech	In, 156,6	0,2
	Sn, 231,9	0,2
	Al, 660,323	0,15
	Cu, 1084,62	0,10

Metoda kalibrace	Rozsah, °C	CMC, °C
Kalibrace bezdotykových teploměrů porovnáním	-30 až 35	0,4
	35 až 600	0,45
	600 až 1000	0,6
	1000 až 1300	1,0
	1300 až 1800	1,5
Kalibrace černých těles	-30 až +35	0,45
	35 až +500	0,5
	500 až 1000	0,5
	1000 až 1300	0,6
	1300 až 1800	1,0
Kalibrace termokamery porovnáním	-30 až 500	0,5
	500 až 1000	0,7
	1000 až 1300	1,0
	1300 až 1800	1,5

Souběžně s primární laboratoří poskytují kalibrační služby v této oblasti také naše sekundární laboratoře. Na obou pracovištích je možné kalibrovat bezdotykové teploměry do (500 až 700) °C, v Brně je navíc možné provádět kalibrace termokamer do 500 °C. Hodnoty CMC jsou uvedeny v následující **tab. 3**.

Tabulka 3: Hodnoty CMC pokryté akreditací pro sekundární laboratoře

Metoda kalibrace	Rozsah, °C	CMC, °C
Kalibrace bezdotykových teploměrů porovnáním	-30 až -15	2,2
	-15 až 0	1,6
	0 až 20	1,1
	20 až 100	1,0
	100 až 200	1,1
	200 až 300	1,4
	300 až 400	1,7
	400 až 500	2,2
	500 až 600	2,6
	600 až 700	2,9
Kalibrace termokamery porovnáním	-20 až -10	1,8
	-10 až 10	1,6
	10 až 35	1,4
	35 až 100	1,6
	100 až 200	1,8
	200 až 300	1,9
	300 až 400	2,8
	400 až 500	3,4

3.2 Zápis nejistot do databáze KCDB

Národní metrologické instituty se snaží své hodnoty CMC publikovat v mezinárodní databázi KCDB. Jedná se o jakýsi vyšší stupeň akreditace, jehož proces schvalování je výrazně komplikovanější. Řídí se příslušnými „review

protokoly“ [4] a v průběhu schvalovacího procesu je nutné poskytnout mnoho podkladů. Mezi ně patří doložení návaznosti konkrétního měření, účast v klíčových, doplňkových a dalších porovnávacích měřeních nebo detailní rozpis výpočtu nejistot. Tyto materiály jsou následně posuzovány v rámci evropského a celosvětového procesu schválení. V současnosti má laboratoř schválenou hodnotu nejistoty 0,4 °C pro teplotní rozsah (-30 až +35) °C s návazností na odporový teploměr. Počátkem roku 2017 odeslala laboratoř žádost na schválení dalších 11 hodnot CMC jak v oblasti kalibrace bezkontaktních teploměrů tak i termokamer do teploty 1200 °C.

Podpůrným argumentem ke schválení hodnot CMC bylo úspěšné absolvování klíčového porovnání v této oblasti. Bohužel od doby, kdy se začalo s budováním laboratoře, žádné klíčové porovnání neproběhlo. To je důvodem, proč je deklarovaná návaznost realizována přes odporové teploměry a termoelektrické snímače teploty, na které již ČMI hodnoty CMC schválené má.

Cílem vybudované laboratoře je pokrytí co nejširšího možného rozsahu pod logem CIPM MRA (CMC zapsané v databázi KCDB) a pod akreditací zachovat pouze doplňkové položky.

4. Mezilaboratorní porovnání

Mezilaboratorní porovnání slouží k vzájemnému porovnání výsledků měření laboratoře s výsledky měření referenční laboratoře, která je pro danou oblast měření nejvyšší autoritou. Pro české kalibrační laboratoře je nejjednodušším způsobem absolvovat porovnání organizované Českým metrologickým institutem. Každý rok je na web stránkách ČMI umístován přehled plánovaných, nebo již běžících porovnání (https://www.cmi.cz/mpz_program) včetně základních informací o druhu měřidla a porovnávaném rozsahu. Absolvování porovnávacího měření je nezbytné pro deklaraci správnosti měření v průběhu procesu akreditace. Důležité také je, aby laboratoř do výsledků vstupovala s hodnotami CMC, které chce mít uvedené v příloze o akreditaci.

V rozmezí let 2013 až 2014 bylo realizováno mezilaboratorní porovnání zaměřené na kalibraci bezdotykových teploměrů pod označením MPZ 32-1100-13. Zúčastnilo se ho 12 kalibračních laboratoří z České republiky, Chorvatska, Litvy,

Mexika, Norska, Slovenska a Vietnamu. Předmětem MPZ byla kalibrace teploměru FLUKE 572 (**obr. 3**) jako reprezentanta běžného typu teploměrů, se kterým můžou pracovníci kalibračních laboratoří přijít do kontaktu. Rozsah porovnávacího měření byl stanoven na (-20 až 900) °C s měřicími body (-20, 0, 20, 100, 300, 500, 700 a 900) °C.

Pro úspěšné absolvování porovnání bylo nutné vyhovět alespoň v 80 % realizovaných měření. Z **tab. 4** je vidět, že 2/3 účastnických laboratoří absolvovaly toto porovnání úspěšně.

Tabulka 4: Rozdělení účastníků podle přijatelných výsledků měření MPZ 32-1100-13

Počet laboratoří	Počet laboratoří podle počtu procent přijatelných výsledků měření laboratoře				
	100 %	99,9 %	89,9 %	79,9 %	49,9 %
		-	-	-	-
		90 %	80 %	50 %	0 %
12	6	-	2	2	2

Při analýze jednotlivých měření bylo zjištěno, že nevyhovující výsledek MPZ způsobila zejména nevhodně zvolená kalibrační vzdálenost a nesprávné zahnutí tohoto vlivu do výpočtu celkové nejistoty. Mezi další vlivy, které mohly negativně ovlivnit výsledky měření, patří nezalost homogenity černého tělesa, správné zaměření teploměru a SSE (size of source effect).

V roce 2018 je plánované další porovnání vhodné pro kalibrační laboratoře kalibrující bezdotykové teploměry v rozsahu (-25 až 1700) °C.

5. Budoucnost

V blízké budoucnosti je plánovaná redefinice jednotky kelvin, což přinese také změny v praktické realizaci teplotní stupnice. Výraznou změnu bude možné pozorovat v oblasti návaznosti měření teplot vyšších než 1100 °C začleněním vysokoteplotních eutektických pevných bodů. Nejbližší metou je tedy vylepšení schopností laboratoře v této oblasti měření teplot v podobě vytvoření a začlenění eutektických pevných bodů Fe–C, Co–C a Pd–C do vytvořeného systému. To přispěje k vylepšení kalibračních schopností laboratoře nejen v oblasti bezkontaktního měření teploty, ale také při kalibraci termoelektrických snímačů teploty. Laboratoř má také v plánu účastnit se mezinárodního porovnávacího měření, které je očekáváno v horizontu několika málo let. Dále bude nutné přizpůsobit systém práce v laboratoři požadavkům, které se objeví s novelizací normy ČSN EN ISO/IEC 17025.

6. Literatura

- [1] Oznámení ÚNMZ č. 37/15 o vyhlášení státního etalonu, <http://www.unmz.cz/files/metrologie/st%C3%A1tn%C3%AD%20etalony/ECM%20320-2%2015-058.pdf>
- [2] Databáze KCDB, <http://kcdb.bipm.org/>
- [3] ČSN EN ISO/IEC 17025:2005, Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří, ÚNMZ, 2005
- [4] CMC Review Protocol: Radiation Thermometry, 2010, záložka CIPM MRA – CMCs and KCs <http://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/publications-cc.html>



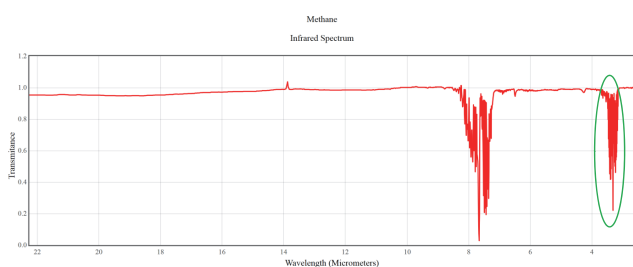
Obr. 3: Teploměr FLUKE 572 vybraný jako měřidlo kolující při porovnání

6. DETEKCE ÚNIKŮ PLYNŮ POMOCÍ TERMOKAMER

1. Úvod

Na trhu se před pár lety objevila nová zařízení, která mají sloužit k rychlému odhalení míst s unikajícím plynem. Zařízení pracují na stejném principu jako konvenční termokamery, tj. detekují infračervenou část elektromagnetického spektra. Výsledek inspekce je vidět na displeji kamery a je možné ihned provést potřebné kroky k zamezení úniku. Pomocí kamer je možné detekovat velkou skupinu různých plynů a prohlídky je možné bezpečně dělat i z větší vzdálenosti.

Každý plyn má vlastní charakteristické absorpční linie v IR spektru, např. těžké organické sloučeniny mají tyto linie v oblasti (3 až 4 a 7 až 8) μm (obr. 1). Detektor používaný v kamerách pro detekci úniků plynů je proto vyladěn v oblasti absorpčních linií daného plynu. Detekce úniků patří do kvalitativní části prováděných kontrol a je vysoce závislá na dovednostech pracovníka, který je provádí. Proces kalibrace klasických termokamer je znám a popsán v [4]. Ovšem získat detailnější informace ohledně detekčních schopností termokamer od výrobců pro jednotlivé plyny je značně komplikované, ne-li nemožné. K tomuto účelu ČMI vyvinula testovací zařízení a metodiku pro testování tohoto typu zařízení.



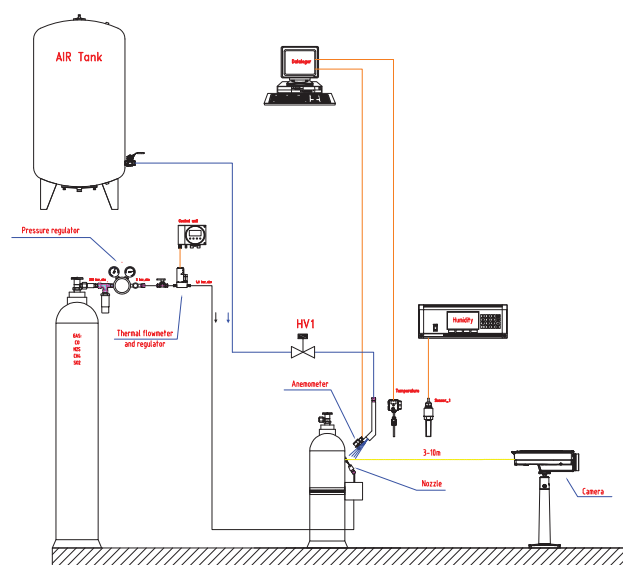
Obr. 1: IR spektrum metanu převzato z [5], zelená oblast vyznačuje oblast citlivosti kamery v oblasti IR spektra

2. Design testovacího zařízení a pracovní metodika

Vyvinuté zařízení bylo navrženo jako variabilní, pro možnost simulovat různé okolní podmínky kolem řízeného úniku (teplota, vlhkost a rychlost větru). Základní sestava se skládá z místa úniku na zakřivené kovové ploše, ke které je připojena lahev s testovanými plyny. Průtok plynu je možné řídit a měřit pomocí průtokoměru Brooks při známém tlaku. Dále jsou také monitorovány podmínky okolí, tj. teplota a vlhkost. Na této sestavě je možné provádět testy při normálních okolních podmínkách, kdy je kamera zaměřena na bod úniku a je stanoven minimální detekovatelný (viditelný) únik na obrazovce kamery. V průběhu měření je zaznamenáván průtok a tlak proudícího plynu, okolní podmínky a je vypočten minimální detekční limit pro daný plyn (MLDR).

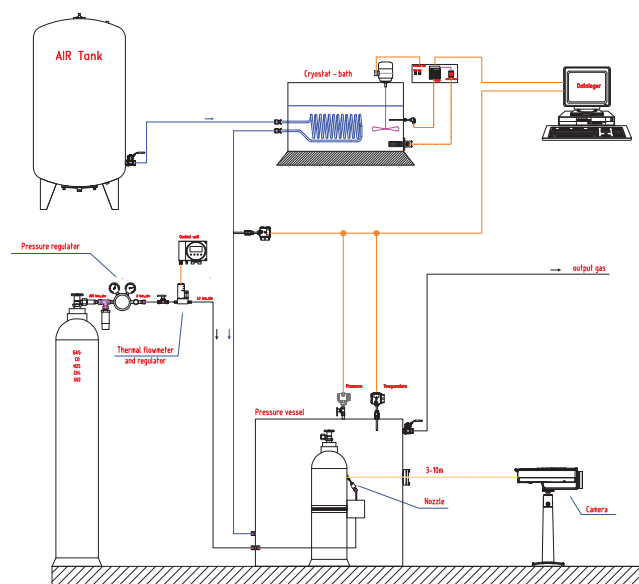
První modifikace sestavy umožňuje zkoumat vliv větru na detekční schopnost kamery (obr. 2). Základní sestava je doplněna o simulátor větru, který ovlivňuje bod úniku

a anemometr pro měření rychlosti proudění vzduchu. Druhá modifikace umožňuje realizovat změnu okolních podmínek v blízkosti místa úniku (obr. 3). Místo úniku je umístěno do boxu, který je možné temperovat na definovanou teplotu pomocí přívodu přehřátého nebo předchlazeného vzduchu. Během stabilizace požadovaných podmínek je box uzavřen a v něm je monitorovaná teplota a vlhkost. Box má otvor v úrovni úniku, aby bylo možné provádět měření. Prvotní návrh počítal s okénkem prostupným pro infračervené záření, bohužel výsledky získané s oknem byly neuspokojivé a nyní je otvor během měření ponechán otevřený.



Obr. 2: Testovací zařízení pro vliv vzdálenosti a větru na MLDR

Poslední modifikace umožňuje zkoumat vliv změny vlhkosti na zařízení MLDR (obr. 4). Kolem místa úniku je opět umístěn box, stejný jako v předchozím případě, ale



Obr. 3: Testovací zařízení pro vliv okolní teploty na MLDR

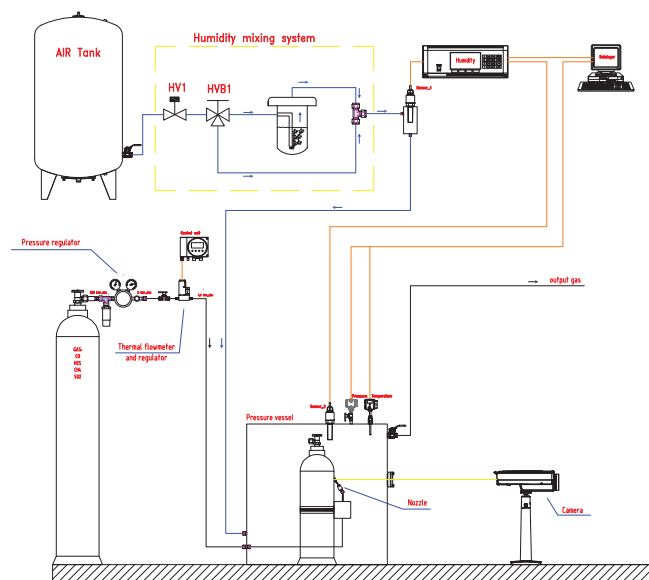
nyní je do boxu vháněn vzduch s definovanou vlhkostí pomocí generátoru vlhkosti. Opět jsou sledovány podmínky v blízkosti místa úniku a měření se provádějí otvorem ve stěně boxu.

3. Testování kamer

V průběhu testů pro francouzskou společnost EXERA byly testovány dvě kamery od různých výrobců. Testovací plyny byly dodány s certifikáty čistoty.

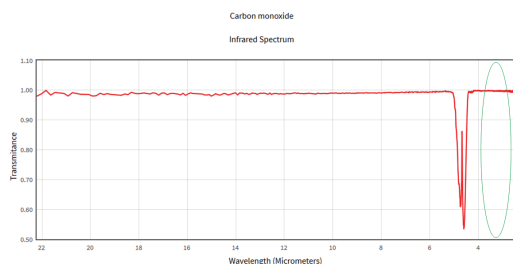
Jednalo se o:

- benzen,
- sirovodík,
- metan,
- oxid uhelnatý,
- oxid siřičitý,
- směs methanu a oxidu uhličitého,
- směs methanu a benzenu a
- oxid uhličitý.



Obr. 4: Testovací zařízení pro vliv vlhkosti na MLDR

Z bezpečnostních důvodů byly testy prováděny v exteriérech. V měřicí oblasti byly instalovány detektory pro každý testovaný plyn, aby byla zajištěna kontrola, že během měření nebyly překročeny meze bezpečnosti případně výbuchu. Všechna zařízení, která jsou v kontaktu s měřeným plynem, byla dodá-



Obr. 5: IR spektrum oxidu uhelnatého převzato z [5], zelená oblast zobrazuje oblast spektra, ve kterém byla testovaná kamera citlivá, plyn nebylo možné detekovat

na s certifikací pro prostředí s nebezpečím výbuchu – ATEX. Z bezpečnostních důvodů byly na místě přítomny pokaždé alespoň dvě osoby. Testované kamery byly upevněny v držáku nebo stativu, testy probíhaly ve vzdálenosti 3 m nebo 12 m.

Testovací kampaň zahrnovala měření na všech výše popsaných variantách testovacího zařízení. Nejdříve byla provedena série testů pro zjištění vlivu větru na detekční schopnost kamer pro všechny testovací plyny (tab. 1). Minimální detekční limit byl stanoven na základě nejnižšího průtoku plynu, který byl jasně pozorován na displeji kamery dvěma provozovateli.

Tabulka 1: První část zkoušek v testovací kampani pro všechny plyny

Číslo testu	Podmínky experiment	
	Rychlost větru, m/s	Vzdálenost měření, m
1	< 0,4	3
2	< 0,4	12
3	2,5	3
4	2,5	12
5	5	3
6	5	12

Testy ukázaly, že výsledek měření ovlivňuje jak vzdálenost měření, tak i vítr. V některých případech je možné nalézt informaci o detekčním limitu pro daný plyn přímo od výrobce. Není ovšem zřejmé, za jakých podmínek byla uváděná hodnota stanovena. Proto může vyvinuté zařízení sloužit k získání výrazného množství informací, které jinak nejsou dostupné. V tab. 2 je uveden příklad získaných výsledků, jako testovaný plyn byl použit metan.

Tabulka 2: Příklad výsledků s metanem jako testovacím plynem

Plyn	Nejnižší detekovaný průtok plynu, nml/min ¹	Rychlost větru, m/s	Vzdálenost měření, m	MLDR, g/h	Nejistota, g/h	Hodnota udaná výrobcem, g/h
CH ₄	8,7	0,0	3	0,34	0,06	0,8
	20,4	2,5	3	0,82	0,07	
	203,8	5,0	3	8,15	0,07	
	145,0	0,0	12	5,73	0,06	
	232,9	2,5	12	9,32	0,07	
	465,7	5,0	12	18,63	0,07	

¹ nml/min znamená normálové mililitry za minutu, tedy průtok při teplotě 0 °C a tlaku 101 325 Pa.

Vliv změny teploty a vlhkosti kolem bodu úniku byl zkoumán pouze u metanu, zkušební podmínky jsou popsány v tab. 3. Testovací místo úniku bylo umístěno do boxu o rozměrech (1 x 1 x 1) m. Uvnitř boxu byla měněna teplota a vlhkost, které byly monitorovány, stejně jako koncentra-

ce testovacího plynu, aby nedošlo k překročení meze jeho výbušnosti.

Tabulka 3: Parametry testování při různých okolních podmínkách

Číslo testu	Vlhkost, %	Vzdálenost, m	Teplota, °C	Rychlost větru, m/s
7	okolí	3 m	okolí	<0,4
8	okolí + 20	3 m	okolí	<0,4
9	okolí	3 m	okolí + (20±2)	<0,4

Ze získaných výsledků lze pozorovat, že vlhkost ovlivňuje schopnost detekce plynu více než zvýšená teplota okolí. Příklad výsledků je uveden v **tab. 4**.

Tabulka 4: Příklad výsledků testování při různých okolních podmínkách

Plyn	Okolní teplota, °C	Vlhkost okolí, % RH	Vzdálenost, m	MLDR, g/h	nejistota, g/h	Hodnota udávaná výrobcem, g/h
CH ₄	28,5	42,9	3	0,69	0,08	0,8
	25,5	63,0	3	3,44	0,08	
	45,5	21,3	3	0,57	0,08	

4. Závěr

ČMI vyvinulo zkušební metodiku a zařízení pro testování termokamer, které kromě měření teploty slouží zejména k detekci unikajícího plynu. Toto zařízení může poskytovat

odpovědi na neznámé limity detekce za dobře definovaných podmínek. Zařízení umožňuje provádět testy v několika provedeních, kdy lze zkoumat vliv rychlosti větru nebo změny teploty a vlhkosti v okolí úniku na detekční schopnost kamery. Zařízení je univerzální a lze pomocí něj provádět testy se širokou škálou plynů. Při zkoušce se klade důraz na vysoké bezpečnostní opatření, aby bylo zajištěno bezpečí obsluhy. Pro budoucnost je plánované doplnění sestavy o teploměr, který bude měřit aktuální teplotu unikajícího plynu a teplotní stabilizaci unikajícího plynu při jeho přepravě ze skladovací láhve do místa úniku.

Prezentovaná práce byla provedena s podporou společnosti PEMIT, s.r.o., která nám pomohla při budování zařízení a poskytla prostor pro testování úniků.

5. Literatura

- [1] http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T559177/T559177_APAC.pdf
- [2] J. F. Tegstam, R. Danjoux, *Gas leak detection in the oil and gas industry using infrared optical imaging*, Thermografie-Kolloquium 2007 – Vortrag 03, <http://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2007/Inhalt/v03.pdf>
- [3] *Remote detection and localization of gas leaks with autonomous mobile inspection robots in technical facilities*, <http://www.flir.eu/ogi/display/?id=62559>
- [4] OIML R141:2008 Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments
- [5] <http://webbook.nist.gov/>

7. MĚŘENÍ TEPLoty V PRŮMYSLových APLIKACÍCH

1. Obecné podmínky měření – veličiny ovlivňující výsledky měření

Průmyslové měření teploty je jednou z nejvíce dynamických částí oboru průmyslové automatizace. Senzory 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 správnou velikostí nejistoty je možné optimalizovat výkonost 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:

- a. Porozumění dynamice a vlastnostem měřeného procesu.
- b. Nalezení správného typu senzoru pro danou aplikaci.
- c. Kalibrace celého měřicího řetězce za podmínek co nejvíce odpovídajících reálnému použití s odpovídající nejistotou.
- d. Správná instalace měřicího řetězce pro zaručení korektnosti měření.
- e. 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. Ovšem existuje také mnoho zdrojů častých chyb při jejich výběru i instalaci. Není možné v tomto článku pojmout všechny zdroje těchto chyb a nepřesností. Příspěvek se zaměřuje pouze na některé základní problémy, které se musí řešit při zajištění správného měření teploty.

2. Postup výběru vhodného měřidla

Prvním krokem při návrhu systému 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 zdrojem 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.

3. Kalibrace

Pokud je pro konkrétní aplikaci nutné měření některé veličiny, lze předpokládat, že výsledný údaj bude z nějakého hlediska důležitý a je vhodné tento údaj validovat. Systém řízení kvality na měřidla pamatuje jejich kalibraci, popřípadě periodickou rekalicaci, definovaným způsobem.

Protože byl typ a tvar přístroje vybrán tak, aby odpovídal dané aplikaci, je nutné vytvořit takový scénář kalibrace, který co možná nejméně 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 na místě instalace (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 je, že pro realizaci více kalibračních bodů je nutné technologii odstavit. To má za následek vyšší energetickou i časovou náročnost vlastního procesu kalibrace.

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

4. Chyba rychlosti odezvy

Ať už při kalibracích, tak i při vlastním měření je důležité si uvědomit rychlost odezvy teploměru na změny měřené teploty Δt . Platí rovnice:

$$\Delta t = (t_{\text{poč}} - t_{\text{kon}}) e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}, \quad (1)$$

kde

$t_{\text{poč}} - t_{\text{kon}}$ 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 popsaný diferenciální rovnicí prvního stupně (tedy senzor bez jímky). Pro průmyslové provedení se jedná o systém druhého řádu obvykle bez harmonické složky, ale s inflexním bodem (provedení s jímkou). Jinými slovy, doba odezvy je delší.

Stejně jako u hloubky ponoru, i u rychlosti odezvy platí, že v praktickém měření (např. proudící vzduch) je chyba výrazně větší než u kalibrace v lázni. Platí jednoduché doporučení:

Po změně teploty je nutné počkat minimálně pětinašobek 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

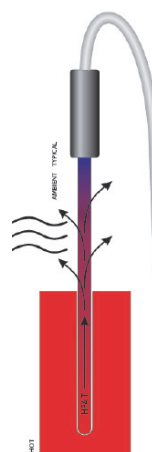
$$G(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi^2 \tau_0^2 f^2}}, \quad (2)$$

kde f je frekvence periodické změny teploty.

5. Chyba přenosem tepla

Teplu může být transportováno třemi různými způsoby:

- **Vedením** – například vedení tepla po stonku teploměru (**obr. 1**).
- **Prouděním** – například přenos tepla teplosměnnou kapalinou nebo vzduchem.
- **Zářením** (někdy také označován jako *sálání*) – například z lampy, pece nebo i slunečního svitu.



Obr. 1: Vedení tepla stonkem teploměru

Většinu chyb lze minimalizovat správnou izolací elementu. Mezi velmi kritickou částí ale patří sdílení tepla zářením. 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.

6. Měření teploty při aplikacích měření průtoku

Teplota je jednou z opomíjených veličin také při měření průtoku. Pro správný výpočet průtoku je ale její znalost nezbytná. Teplota vstupuje do výpočtových vztahů jednotlivých měřidel průtoku, protože ovlivňuje řadu důležitých parametrů, jako je hustota nebo viskozita měřeného média. Důležitá část výpočtu je také korekce průměru potrubí na skutečnou hodnotu pomocí koeficientu teplotní roztažnosti.

Jednou z kritických věcí je místo měření teploty. Stejně jako při měření tlaku je teplota často měřena na jiném místě než průtok (např. ve vzdálenosti 5D za měřidlem, kde D je průměr potrubí) a je proto nutné její hodnotu korigovat, jako by byla měřena před měřidlem. Při této korekci je nutné si uvědomit podmínky, za kterých je korekce platná. Velmi časté jsou vztahy na principu adiabatické expanze, tedy za

předpokladu nulové výměny tepla mezi měřenou tekutinou a okolím. V praxi to znamená mít zaizolované potrubí až po teploměr, což nebývá často splněno. Chyby tak mohou narůstat až na několik °C. Chyba 1 % z hodnoty termodynamické teploty zapříčiní 1 % chyby znalosti hustoty média. To má odpovídající vliv na velikost hodnoty průtoku.

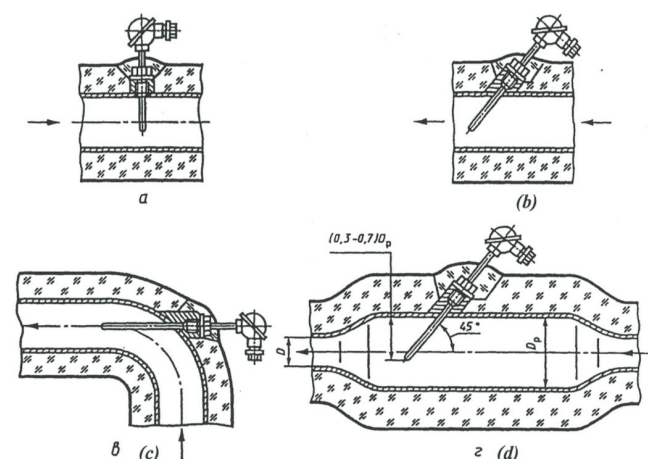
7. Instalace teplotních jímk do potrubí

Instalace teploměrů do potrubí je řešena rozdílnými normativními dokumenty pro každý daný typ aplikace. Vlastní odhad nejistoty měření není nikde specifikován a je ponechán zcela na uživatele konkrétní aplikace. Někdy je možné jej zanedbat, většinou je ale nutné počítat chybu v úrovni předpokládaného teplotního gradientu v potrubí (například při měření průtoku páry nebo horké vody může dosahovat i více než jeden stupeň).

Mezinárodní dokument pro legální metrologii *ISO 17089-1: 2010*, který by v současné době měl být základním normativním dokumentem pro oblast měření průtoku plynu pomocí ultrazvukových průtokoměrů, uvádí k dané problematice následující:

- hloubka zanoření jímk je zde doporučena mezi $D^1/10$ a $D/3$,
- hloubky větší než $D/3$ jsou možné, využívá se v těchto případech speciálních konstrukcí (provedení). Co je speciální konstrukce či provedení není jednoznačně uvedeno, lze to, pravděpodobně, chápat např. jako použití sklonu nebo zabudování do kolena ve smyslu filozofie níže uvedených dokumentů.

Ve stejném duchu lze čerpat informace i z amerického dokumentu AGA Report No. 9, neboť tvůrci výše uvedeného dokumentu ISO vycházeli ze stejného zdroje. V evropské normě EN ISO 5167-1 až EN ISO 5167-4, respektive v Technical Report ISO/TR 9464, který je výkladovým dokumentem pro výše uvedený soubor evropských norem [1, 2, 3, 4, 5], lze potom nalézt soubor doporučení podle **obr. 2**.



Obr. 2: Doporučená montáž teploměru do potrubí podle dokumentu ISO/TR 9464 [5]

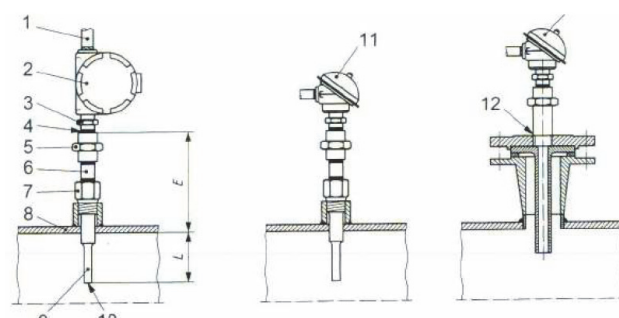
Dokument evidentně připouští významně vyšší hloubky zanoření jímk (až do $3/4 D$), ale při více jak $3/4 D$ již doporučuje zabudování do kolena nebo sklon pod úhlem 45° (**obr. 2 b, c, d**).

¹ D je vnitřní průměr potrubí.

Podle dokumentů [1, 2, 3, 4] je doporučeno instalovat jímký ve směru proudění média. Ovšem v dokumentu [6] je doporučena opačná orientace.

Mezinárodní dokument pro legální metrologii *ISO 15970: 2008* uvádí k dané problematice následující:

- zásadně se nedoporučuje umísťování více jímk v řadě za sebou,
- doporučuje se hloubka zanoření cca do $1/3 D$, u potrubí větších než 300 mm se považuje za akceptovatelnou i hloubka zanoření kolem 75 mm až 100 mm,
- v souladu s dokumentem *Technical Report ISO/TR 9464*: je doporučeno u menších průměrů zabudování jímký do kolena nebo pod úhlem 45° ve směru proudění plynu, pokud je hloubka zanoření větší než $3/4 D$ a
- je doporučena izolace potrubí v délce 5 D před a 5 D za umístěním měření teploty.



Obr. 3: Doporučená montáž teploměru do potrubí podle dokumentu [9]. Montáž na přírubu je vhodná v případě její tepelné izolace

Dalším mezinárodním dokumentem, který je zaměřen na měření průtoku zemního plynu, a který obsahuje také doporučení na zabudování snímačů teploty a teplotních jímk, je ČSN EN 1776: Požadavky, respektive doporučení zde uvedené jsou naprosto kompatibilní s doporučeními uvedenými ve výše uvedeném dokumentu ISO 15970, opět se zde doporučuje hloubka zanoření cca do $1/3 D$, u potrubí větších než 300 mm se považuje za akceptovatelnou i hloubka zanoření 75 mm (ale připouští se v tomto případě i reálná možnost nepatrného zhoršení přesnosti měření teploty).

Normativní dokument ČSN EN 1434-2 doporučuje umístění teplotního čidla do osy potrubí a v případě zabudování do kolena nebo pod úhlem 45° je doporučeno umístění proti směru proudění kapaliny (viz **tab. 2**).

8. Největší dovolená chyba

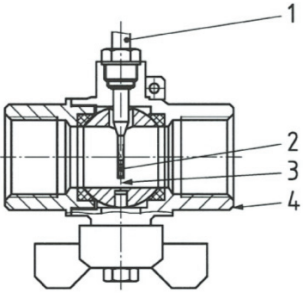
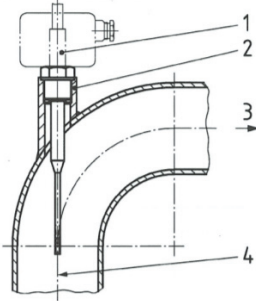
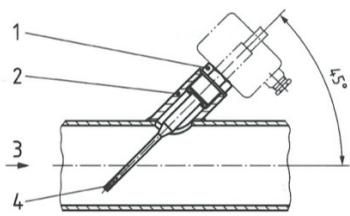
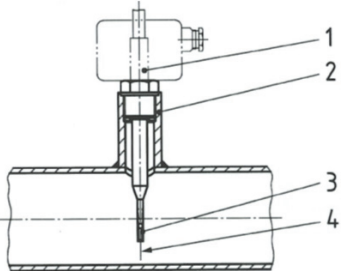
Největší dovolená chyba snímače teploty je definována požadavky na celý měřicí systém. Přednostně je vhodné používat snímače teploty ve třídě AA a A. Hodnoty největší dovolené chyby se počítají podle následujících vztahů:

Tabulka 1: Povolené tolerance odporových snímačů teploty podle normy [8]

Toleranční třída	Největší dovolená chyba ¹ , °C
AA	$\pm (0,1 + 0,0017 t)$
A	$\pm (0,15 + 0,002 t)$
B	$\pm (0,3 + 0,005 t)$
C	$\pm (0,6 + 0,01 t)$

¹ Symbol t znamená teplotu ve °C

Tabulka 2: Doporučená montáž teploměru do potrubí podle dokumentu [6].

Typ montáže snímače	Velikost potrubí	Doporučení pro montáž	Vysvětlivky
A Ve spojovacím prvku přímého potrubí	DN 15 DN 20 DN 25 DN 32 DN 40		1 Pouze pro senzory typu DS 2 Teplotní číslu je vloženo do osy spojovacího prvku nebo níže 3 Osa sondy je kolmá na osu spojovacího prvku potrubí a leží ve stejné rovině 4 Spojovací prvek potrubí viz. obr. A.10 [6]
B V kolenu	≤ DN 50		1 Snímač typu DL nebo teploměrová jímka se snímačem typu PL 2 Návarek, viz. obr. A.9 [6] 3 Směr proudění 4 Osa snímače je totožná s osou potrubí
C Úhlová montáž	≤ DN 50		1 Snímač typu DL nebo teploměrová jímka se snímačem typu PL 2 Návarek, viz. obr. A.9 [6] 3 Směr proudění 4 Teplotní čidlo je vloženo do osy potrubí nebo níže
D Kolmá montáž	DN 65 až DN 250		1 Snímač typu DL nebo teploměrová jímka se snímačem typu PL 2 Návarek, viz. obr. A.9 [6] 3 Teplotní čidlo je vloženo do osy potrubí nebo níže 4 Osa snímače teploty je kolmá na osu spojovacího prvku potrubí a leží ve stejné rovině

Při použití pro měření kapalin jiných než voda je nutné splnit v celém měřicím rozsahu také požadavky v následující tab. 3:

Tabulka 3: Povolené tolerance teploměrů pro měření kapalin jiných než voda

Největší dovolená chyba (MPE)	Třídy přesnosti měřicího systému				
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,5
Teplota	± 0,3 °C	± 0,5 °C			± 1,0 °C
Tlak	Menší než 1 MPa: ± 50 kPa Od (1 do 4) MPa: ± 5 % Větší než 4 MPa: ± 200 kPa				
Hustota	± 1 kg/m ³	± 2 kg/m ³		± 5 kg/m ³	

Pro párované snímače teploty platí, že každý snímač se nesmí lišit od hodnoty definované normou [8] o více než 2 K. Chyba páru nesmí být vyšší než hodnota E_p , definovaná jako

$$E_t = \pm (0,5 + 3^{\Delta\theta_{\min}} / \Delta\theta), \quad (3)$$

kde $\Delta\theta_{\min}$ je minimální teplotní rozdíl specifikovaný výrobcem a $\Delta\theta$ je měřený rozdíl teploty.

Tolerance jsou uvažovány jako celek, tedy snímač teploty se zabudovaným převodníkem.

9. Stanovení nejistoty měření teploty

Nejistota provozního měření pomocí odporového snímače teploty (popřípadě nejistota měřicího řetězce s tímto snímačem) je stanovena v souladu s dokumentem EA 4/02: M 2013 [10]. Každý uživatel měřidla si ji určí sám z nejistoty kalibrace a dalších parametrů (viz další text).

9.1 Standardní nejistota stanovená způsobem A u_A

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

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (4)$$

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

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (5)$$

9.2 Nejistota stanovená způsobem B u_B

Do rozpočtu nejistoty by měly vstupovat složky, jako je kalibrace měřidla, jeho drift a rozlišení. Nedílnou součástí odhadu výsledné nejistoty je rozdíl podmínek měření od podmínek při kalibraci (ponor, instalace, dynamika, homogenita prostředí, okolní podmínky, apod.).

Pro každou část zařízení je nutné uvažovat následující složky:

- nejistota kalibrace zařízení,

- 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,
 - vliv samoohřevu,
 - jiná dynamika procesu a
 - vliv hystereze.

9.3 Kombinovaná standardní nejistota u_c

Dále se vypočte kombinovaná standardní nejistota podle vztahu:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (6)$$

Takto vypočtená kombinovaná standardní nejistota se

přečte na rozšířenou nejistotu s koeficientem rozšíření $k = 2$:

$$U = ku_c \quad (7)$$

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.

Při použití převodníku teploty mohou být některé složky nejistoty kombinovány dohromady.

Ukázkový rozpočet nejistoty pro měření teploty vysoko-
teplotní páry včetně převodníku je zobrazen v **tab. 4**.

Tabulka 4: Ukázkový rozpočet nejistoty odporového snímače teploty Pt100 s převodníkem při měření teploty páry 400 °C

zdroj nejistoty	z_{\max}		rozložení	k	u_x		k	u_y		
nejistota kalibrace	0,2	°C	normální	2	0,1	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,10	°C
rozlišení převodníku	0,05	°C	rovnoměrné	1,732	0,03	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,03	°C
časová nestálost TC	0,1	°C	bimodální	1,414	0,1	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,07	°C
nepřesnost výpočtu mezi body kalibrace	0,1	°C	rovnoměrné	1,732	0,1	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,06	°C
vliv teplotního pole	0,5	°C	rovnoměrné	1,732	0,3	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,29	°C
rozdílný odvod tepla včetně rozdílné instalace a ostatních vlivů	0,3	°C	rovnoměrné	1,732	0,2	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,17	°C
nejistota typu A	0,1	°C	normální	1	0,1	°C	1	°C·°C ⁻¹	0,10	°C
kombinovaná standardní nejistota	0,38									
koeficient rozšíření	2									
rozšířená standardní nejistota	0,76									

10. Reference

- [1] ISO 17089-1:2010, Measurement of fluid flow in closed conduits – Ultrasonic meters for gas – Part 1: Meters for custody transfer and allocation measurement.
- [2] AGA Report No. 9, Measurement of Gas by Multipath Ultrasonic Meters (2007).
- [3] ČSN EN ISO 5167-1 až 4, Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu.
- [4] GOST 8.586.1-2005 (ISO 5167-1:2003), Measurement of Flowrate and Volume of Liquid and Gas by Means of Standard Pressure Differential Devices—Part 1. Principle of Method of Measurement and General Requirements. (Russian).
- [5] ISO/TR 9464:2008, Guidelines for the use of ISO 5167:2003.
- [6] ČSN EN 1434-1 až 6, Měřiče tepla.
- [7] ČSN EN 1776, Zařízení pro zásobování plynem – Systémy měření plynu – Funkční požadavky.
- [8] ČSN EN 60751, Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory.
- [9] ISO 15970: 2008: Natural gas – Measurement of properties – Volumetric properties: density, pressure, temperature and compression factor
- [10] EA-04/02 M:2013 Vyjádření nejistoty měření při kalibraci, <http://www.cia.cz/Download.ashx?Type=Document&Id=16811>

8. MĚŘENÍ TEPLoty POVRCHU – NOVÉ POZNATKY

1. Úvod

Měření teploty povrchu je jedna z nejzákladnějších oblastí měření teploty a ve většině případů je s ním spojena velká nejistota měření. Není se čemu divit, vždyť povrch jako takový je vlastně nekonečně tenkým rozhraním mezi pevnou látkou a okolujícím plynem a jeho teplota je měřena senzorem, který se nachází mimo toto rozhraní. Ve skutečnosti se tak vždy jedná pouze o výpočet odhadu teploty povrchu s využitím měření teploty blízké oblasti v jeho plynném okolí. Není proto žádným překvapením, že ani návaznost měření teploty povrchu zatím není ve světě exaktně stanovena.

Nejčastěji používané povrchové teploměry mají ve svém stonku ukrytý termoelektrický článek typu K a N. Měřicí spoj termočlánku je potom umístěn v blízkosti místa dotyku teploměru a měřeného povrchu. Teploměr při měření nebývá uchycen ve stojanu s definovaným přitlakem a úhlem mezi osou stonku snímače a kolmicí k ploše povrchu ani nebývá zabezpečeno prostředí bez proudění vzduchu. Tyto a další skutečnosti způsobují špatnou opakovatelnost a velkou nejistotu měření.

Další záležitost lze uvést na následujícím příkladu. V roce 2009 proběhlo pod vedením ČMI mezilaboratorní porovnání v oblasti měření teploty povrchu a všechny zúčastněné laboratoře jej úspěšně absolvovaly. Z **obr. 1** pro jmenovitou teplotu 250 °C by se mohlo zdát, že i přes výše uvedené skutečnosti lze spolehlivě měřit teplotu povrchu bez výraznějších obtíží s nejistotou okolo 2 °C. V tomto případě však byla úspěšnost porovnání způsobena faktem, že všechny laboratoře použily stejný postup měření bez bližší analýzy vlivu instalace a způsobu návaznosti.

K demonstraci možných chyb způsobených jednotlivými vlivy, které působí na výsledek měření teploty povrchu, byla provedena série jednoduchých experimentů. Tato měření proběhla v rámci tříměsíčního projektu 14IND04-RMG1 (RMG je tzv. Research mobility grant) a byla zajištěna zahraničním kolegou Kostadinem Aldevem (z Bulharského národního metrologického institutu) v prostorách ČMI. Prozkoumáno bylo několik nejvýznamnějších zdrojů nejistoty a chyby měření, které jsou spojeny s měřením povrchové teploty klasickými

komerčně dostupnými dotykovými teploměry v celkovém rozsahu teplot do 500 °C. Výsledek níže popsané práce bude využit k návrhu další generace kalibrátorů povrchové teploty. Přesto, že jsou v článku uvedeny výsledky pro konkrétní typy teploměrů, výsledky jsou platné pro dané podmínky a autor nijak nepreferuje žádný z použitých senzorů ani výrobců.

2. Popis činností

Cílem výzkumu bylo rámcově stanovit vliv následujících příspěvků celkové nejistoty na údaj teploty, indikovaný komerčně dostupnými dotykovými teploměry:

- hmotnost sondy,
- tlak, pod kterým je sonda aplikována na měřený povrch,
- orientace sondy vůči povrchu,
- rychlost proudění okolního vzduchu a
- teplotní pole měřeného povrchu.

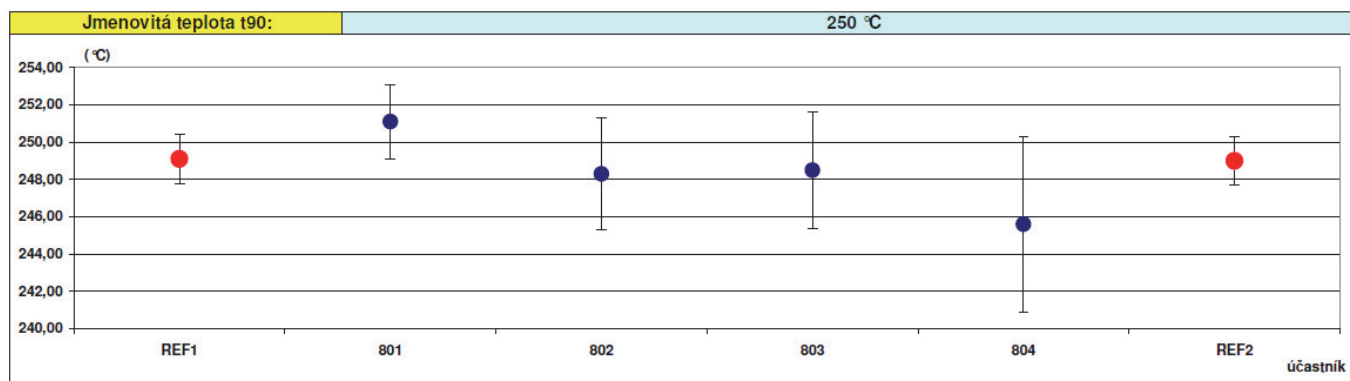
K měření bylo využito vybavení uvedené v **tab. 1**.

Tabulka 1: Seznam kalibrátorů povrchové teploty

Výrobce	Typ	Teplotní rozsah, °C
Isotech	983	35 až 350
Pemit	KT 550	50 až 550
Pemit	RKT-900	50 až 850

Komerčně dostupné snímače povrchové teploty byly při měření připojeny k vyhodnocovací jednotce s displejem Ahlborn Therm 2280-2 (počítající teplotu z měřeného napětí podle normy [2]).

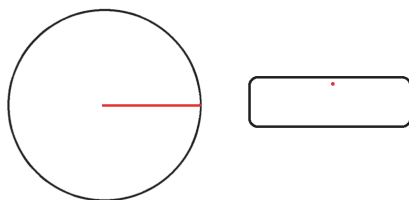
Laboratoř není vybavena klimatizací. Teplota laboratoře byla monitorována pomocí zařízení Comet D4130 k ujištění se, že hodnota teploty vzduchu je v rozmezí $(23,0 \pm 2,5)$ °C. Ke kontrole a pozorování potenciálního driftu etalonové kompenzované sondy Tectra Master (rozsah 0 °C až 550 °C) byl využit termoelektrický snímač teploty typu N v kovovém obalu. Jeho špička o průměru 1 mm byla vždy zasunuta 1 mm pod povrch měřeného vzorku a to do jeho středu. V případech měření bez vzorků bylo využito kalibrátorů, které skrývají stejným způsobem situovaný termočlánek jako součást svého regulačního řetězce.



Obr. 1: Naměřené hodnoty a nejistoty stanovené jednotlivými účastníky a referenční laboratoří při porovnávacím měření [1]



Obr. 2: Testované povrchové teploměry – nahoře zleva: Dostmann 112214 (A), Ahlborn TK122-2 4E (B), Ahlborn T122-2 11C (C), dole zleva: T150-1 7T (D), Ahlborn FTF109-PH (E)



Obr. 3: Náčrt polohy termočlánku (červeně) uvnitř měřeného vzorku (vlevo pohled shora, vpravo pohled ze strany), na náčrtu nejsou uvedeny rozměry

3. Výsledky měření

3.1 Hmotnost sond

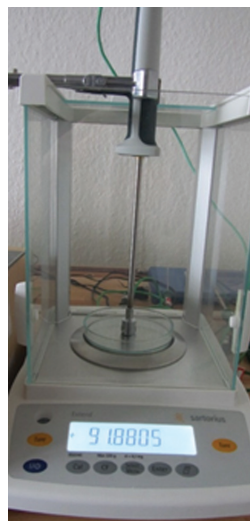
Jako první krok byla změřena hmotnost jednotlivých dotkových sond. Díky tomu byl umožněn přibližný výpočet tlaku, působícího na měřený povrch bez působení vnějších mechanických sil (tlak způsobený hmotou teploměru). Hmotnost byla měřena při stejné orientaci senzoru, jakou měl teploměr při následném měření teploty povrchu (obr. 4).

Tabulka 2: Výsledky měření (hmotnosti) a výpočtů. Zleva m je hmotnost, F je síla, S je plocha senzoru určená k dotyku s měřenou plochou a P_0 je tlak, který na povrch působí daná sonda vlastní hmotou.

Označení senzoru	m , g	F , N	S , mm ²	P_0 , Pa
A	59	0,6	6	100
B	21	0,2	7	29
C	68	0,6	6	100
D	106	1,0	5	200
E	92	0,9	49	18

V tab. 2 jsou uvedeny výsledky měření hmotnosti všech testovaných komerčně dostupných senzorů. Síla byla vypočtena na základě výsledků měření a předpokládané hodnoty gravitačního zrychlení $9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Přibližná velikost plochy senzoru, dotýkající se měřeného povrchu při měření, byla stanovena pro každý senzor. P_0 pak značí statický přítlak ovlivňující mechanický kontakt mezi povrchem a snímací částí teploměru, bez přítomnosti ostatních mechanických sil.

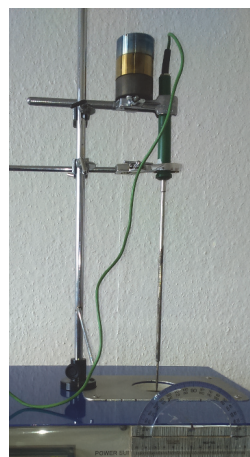
3.2 Tlak, pod kterým je sonda aplikována na měřený povrch



Obr. 4: Měření hmotnosti (sondy E)

Tabulka 3: Velikost přítlaku bez přítomnosti vzorků (P_0) a se zatížením hmotou m_1 (P_1) a m_2 (P_2)

Označení senzoru	P_0 , kPa	P_1 , kPa	P_2 , kPa
A	100	557	1 341
B	29	459	1 181
C	100	613	1 456
D	200	787	1 768
E	18	79	180



Obr. 5: Aplikace závaží pro účely zvýšení tlaku, pod kterým je senzor přiložen na měřený povrch

Výsledky měření povrchové teploty jsou silně závislé na velikosti přítlaku. Pokud je povrchový teploměr používán bez znalosti této závislosti, je nezbytné zahrnout do nejistoty měření složku „vliv přítlaku“, jejíž odhad může být usnadněn pohledem na tab. 4. V ní jsou uvedeny výsledky měření teploty hliníkového povrchu v rozsahu (50 až 500) °C po tři různé hodnoty přítlaku (P_0 , P_1 a P_2).

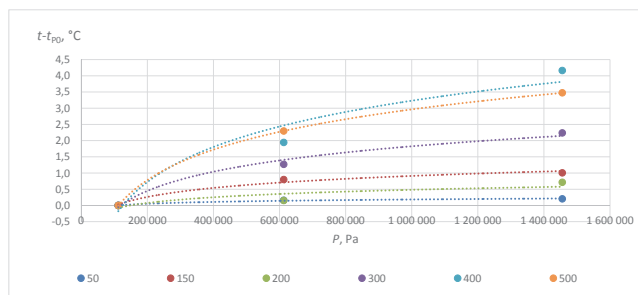
Tabulka 4: Naměřená teplotní data pro různé hodnoty přítlaku

Měřená teplota, °C	Údaj teploměru pro přítlak P_0 , °C					
	50,0	150,0	200,0	300,0	400,0	500,0
A	51,2	151,8	200,7	301,6	397,6	504,6
B	48,7	138,2	180,4	273,9	374,5	-
C	48,5	138,1	185,8	266,2	360,6	460,7
D	46,2	130,1	170,7	262,6	349,1	438,7
E	52,5	155,6	206,6	310,1	413,3	516,7

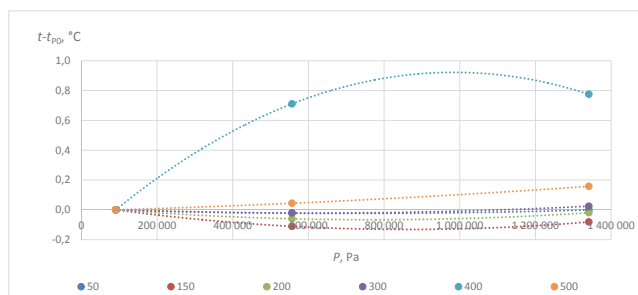
Údaj teploměru pro přítlak P_1 , °C						
Měřená teplota, °C	50,0	150,0	200,0	300,0	400,0	500,0
A	51,0	150,7	200,1	301,4	404,7	505,1
B	48,7	143,9	187,7	284,2	372,3	-
C	50,1	146,1	187,3	278,9	380,0	483,6
D	46,9	134,4	178,9	269,6	370,3	461,2
E	52,2	155,2	206,1	309,9	413,3	516,0

Údaj teploměru pro přítlak P_2 , °C						
Měřená teplota, °C	50,0	150,0	200,0	300,0	400,0	500,0
A	51,2	150,9	200,5	301,8	405,4	506,2
B	49,8	148,7	194,4	290,9	380,5	-
C	50,6	148,2	192,9	288,6	402,2	495,4
D	48,0	136,8	182,7	276,2	375,3	473,5
E	52,2	155,1	206,2	310,0	413,3	516,0

Z výsledků měření lze odhadnout tlakovou citlivost pro každý teploměr. Všechny snímače s tenkou špičkou vykazují narůstání indikované teploty s rostoucím přítlakem na měřený povrch (obr. 6). Teploměr A nebylo možné ve smyslu tlakové citlivosti popsat. Obr. 7 ukazuje, že závislost neexistuje, nebo je nejistota měření několikanásobně vyšší, než vliv přítlaku. Teploměr E s pružinovým kontaktem vykazuje opačné chování, než teploměry s tenkým hrotem, ale s menší směrnici křivky. Tento snímač teploty má totiž radiální štít a mnohem větší oblast dotyku než ostatní senzory.



Obr. 6: Rozdíly v měření při zatížení závažími a bez zatížení pro různé hodnoty teploty povrchu (teploměr C). Hodnoty teploty ve °C v grafu barevně odlišeny

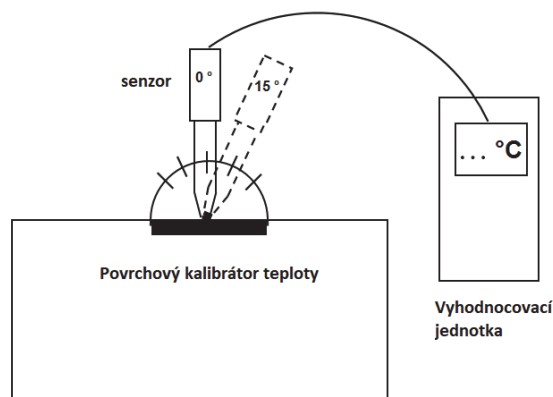


Obr. 7: Rozdíly v měření při zatížení závažími a bez zatížení pro různé hodnoty teploty povrchu (teploměr A). Hodnoty teploty ve °C v grafu barevně odlišeny

3.3 Orientace sondy vůči povrchu

V této části je zkoumán vliv úhlu mezi osou senzoru a rovinou kolmou na měřený povrch na výsledek měření teploty.

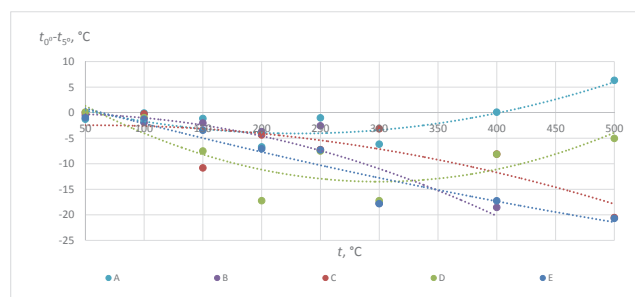
Při běžném měření se předpokládá, že dvě nezávislá měření povrchové teploty, provedená za stejných podmínek jsou opakovatelná ve smyslu náklonu sondy, ale v praxi je uvedený úhel vždy poněkud jiný a mění se i v průběhu jednoho měření. Proto se silně nedoporučuje fixovat polohu teploměru v průběhu měření pouze rukou. Možné chyby způsobené odklonem od kolmé orientace k povrchu jsou uvedeny v následujícím textu.



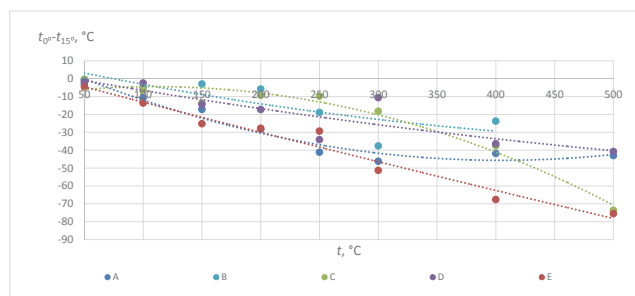
Obr. 8: Náčrt experimentu

Předběžná pozorování vlivu náklonu vedla k výběru zkoumaných hodnot úhlu. Hodnota kritického úhlu byla určena jako 15°. Veškerá měření byla provedena pouze pro náklon v jedné rovině prostoru.

Výsledky ukazují, že chyba způsobená náklonem sondy je jednotky až desítky stupňů Celsia, protože nedochází k dostatečnému kontaktu s měřeným povrchem. Dalším důvodem je přítomnost proudění vzduchu v mezeře mezi senzorem a povrchem. Na obr. 9 a 10 jsou znázorněny výsledky měření na hliníkovém povrchu. Pro povrch z nerezavějící oceli jsou výsledky obdobné.



Obr. 9: Rozdíl mezi náklonem 5° a 0° v závislosti na teplotě pro Al povrch



Obr. 10: Rozdíl mezi náklonem 15° a 0° v závislosti na teplotě pro Al povrch

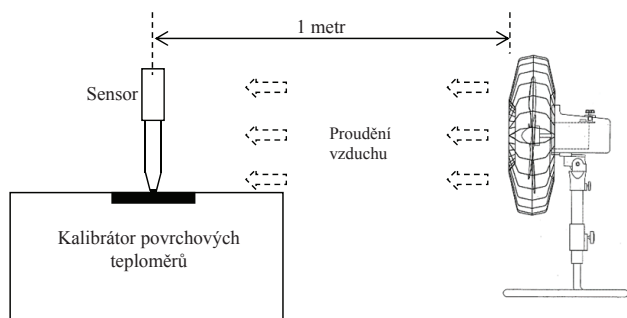
Z výsledků měření je zřejmé, že nejmenší závislost na náklonu vykazuje sonda A a E v rozsahu do 500 °C a to pro náklon 5°. To je způsobeno hlavně přítomností pružinového kontaktu a radiačním štítem pro snížení vlivu okolí senzoru.

Běžný uživatel používá sondy při měření pouze v ruce bez jakéhokoliv přípravku na fixování polohy. Kalibrace s přípravkem sice teoreticky vylepší nejistotu měření, ale neodpovídá praktickému použití. Toto takzvané praktické použití je v principu nesprávné a stejně jako u vlivu přítlaku i zde platí, že je nutné znát vliv náklonu sondy na výsledek měření povrchové teploty, nebo počítat s nejistotami v řádu desítek °C.

3.4 Rychlost proudění okolního vzduchu

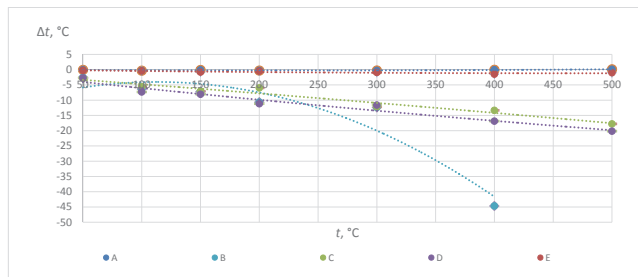
Při studování vlivu proudění vzduchu na výsledek měření bylo využito dvourychlostního kancelářského větráku a anemometru, umístěného v těsné blízkosti snímače povrchové teploty. Vzdálenost mezi středem větráku a osou snímače teploty byla nastavena na 1 m. Měření probíhala při třech různých rychlostech proudění vzduchu v laboratoři:

- vypnutý větrák,
- zapnutý větrák:
 - s rychlostí 1,0 m/s a
 - s rychlostí 1,4 m/s.

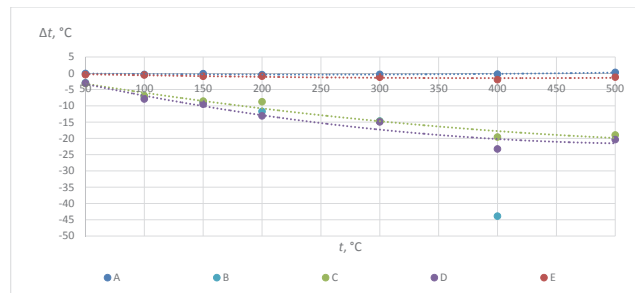


Obr. 11: Náčrt experimentu

Z výsledků měření (obr. 12 a 13) vyplývá možná překvapivý závěr: není tolik důležité, jaká je rychlost proudění, ale jestli je proudění přítomno. Některé teploměry vykazují mnohem větší odolnost vůči proudění než jiné. Pokud není míra této odolnosti u konkrétního měřidla zjištěna, může se uživatel teploměru dopouštět fatálních chyb. V těchto případech je tedy opět na řadě razantní zvýšení nejistoty měření.



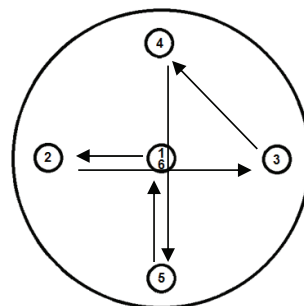
Obr. 12: Rozdíl mezi hodnotou teploty změřenou při rychlosti 1,0 m/s a stavem bez působení větráku; v závislosti na teplotě



Obr. 13: Rozdíl mezi hodnotou teploty změřenou při rychlosti 1,4 m/s a stavem bez působení větráku; v závislosti na teplotě

Z dat je patrné, že senzory E a A vybavené „štítem“ jsou méně závislé na rychlosti proudění okolního vzduchu než ostatní testované vzorky.

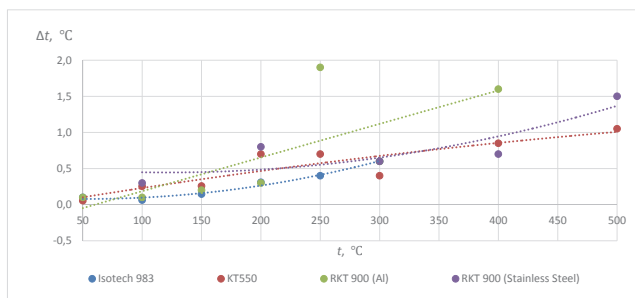
3.5 Teplotní pole měřeného povrchu



Pro určení velikosti vlivu homogenity teplotního pole na nejistotu měření bylo přistoupeno k určení maximální velikosti teplotních rozdílů pro každý z použitých kalibrátorů. Optimální postup posloupnosti měření nehomogenity byl navržen podle schématu na obr. 14.

Obr. 14: Postup měření nehomogenity

Výsledky měření homogenity jednotlivých kalibrátorů povrchové teploty jsou znázorněny na obr. 15.



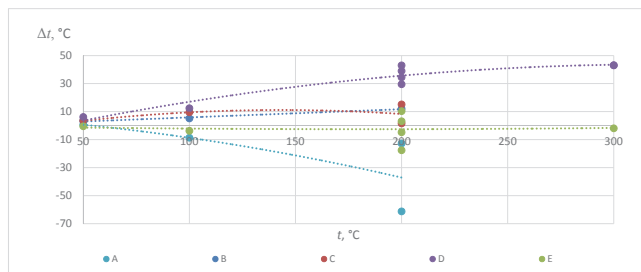
Obr. 15: Nehomogenita v závislosti na jmenovité teplotě povrchu

Protože ani v případě kvalitních kalibrátorů povrchové teploty není dosaženo rovnoměrného teplotního pole, je vhodné jeho velikost vždy stanovit a odpovídajícím způsobem zahrnout do výpočtu nejistot měření pro každou teplotu. Vzdálenost mezi měřnými body je nutné volit s ohledem na velikost sondy a na rozměry povrchu kalibrátoru.

3.6 Rozdíl mezi kalibrací dotykem a ponořením do lázně/pece

Již z podstaty a účelu povrchových teploměrů je jasné, že je nelze kalibrovat při jiném, než nulovém ponoru. Přesto se občas najdou lidé, kteří si myslí, že mezi kalibrací s využitím kalibrátoru povrchové teploty a kalibrací ponořením není

rozdíl. Proto byly provedeny experimenty, kde byly takové kalibrace porovnány. Typické výsledky jsou znázorněny na **obr. 16**. V této práci byl použit indikátor Ahlborn Therm 2280-2, s korekcí pro měření povrchové teploty. Při používání indikátoru je vždy nutné vědět, jestli je měřeno s korekcí, či bez.



Obr. 16: Rozdíl mezi kalibrací v lázni/peci s tepelnou trubicí a kalibrací na povrchovém kalibrátoru teploty

Je možné konstatovat, že naměřené rozdíly se pohybují v desítkách stupňů Celsia.

4. Závěr

Cílem příspěvku bylo přiblížit čtenářům nové poznatky získané v oblasti kalibrace měřidel povrchové teploty. Byly ukázány účinky nejvýznamnějších vlivů na přesnost a správnost měření teploty povrchu. Čtenáři tak může sloužit jako pomůcka při sestavování rozpočtu nejistoty měření anebo jako návod, jak jednoduše charakterizovat konkrétní snímač povrchové teploty. Článek není zaměřen na způsob, jak se s nežádoucími vlivy na výsledek měření vypořádat, avšak po charakterizaci daného teploměru lze provést příslušné korekce pro snížení celkové nejistoty měření.

Tato práce je součástí evropského výzkumného programu v oboru metrologie (EMPIR), společně financovaného zúčastněnými zeměmi v rámci organizace Euramet a EU.

5. Literatura

- [1] Zpráva o mezinárodním porovnávání zkoušek č. 0318-ZV-5800-09: Dotykové teploměry, Interní zpráva ČMI, Úsek legální metrologie – referát MPZ, Okružní 31, 638 00 Brno, Česká republika.
- [2] ČSN EN 60584-1 ed. 2, Termoelektrické články – Část 1: Údaje napětí a tolerance.



Redakční rada:

Ing. Zdeňka Pohořelá (předseda), Ing. Jiří Šabata (místopředseda), Ing. František Jelínek, CSc., Ing. Josef Vojtíšek, Ing. Jiří Kazda, Doc. RNDr. Jiří Tesař, Ph.D., Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Prof. Ing. Jaroslav Boháček, DrSc., Ing. Milan Badal, Mgr. Václava Holušová, RNDr. Klára Popadičová, Ing. Petr Pánek, CSc., Ing. Pavel Rubáš, Ph.D., Jitka Hrušková, PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + poštovné a balné + 10 % DPH. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Biskupský dvůr 1148/5, 110 00 Praha 1. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MIČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: únor 2018. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 1/2018 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

Foto na obálce:

Zabezpečení návaznosti bezkontaktního měření teploty

Photo on the front page:

Realisation of radiation thermometry

