

Plán standardizace – Program rozvoje metrologie 2017
Číslo úkolu: VII/5/17

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

Název úkolu:

„Podklad pro průběžné sjednocování výpočtu CMC v akreditovaných kalibračních laboratořích v oboru teplota“

Řešitel: Ing. Martin Valenta, ČIA
Spoluřešitelé: Dr. Ing. Radek Strnad, PhD., ČMI
Ing. Lenka Kňazovická, Ph.D., ČMI

Schválil: Ing. Jiří Růžička, MBA

Datum: 15.11.2017

Rozdělovník: 2 x ÚNMZ
2 x ČIA
3 x oponenti

Výtisk č.:

Obsah

1.	ÚVOD	4
2.	POPIS ŘEŠENÍ ÚKOLU TECHNICKÉHO ROZVOJE	5
2.1.	Cíl úkolu.....	5
2.2.	Vlastní řešení	5
3.	OBEČNÁ PRAVIDLA PRO VYJADŘOVÁNÍ NEJISTOT A SESTAVENÍ ROZPOČTU NEJISTOT PRO STANOVENÍ CMC.....	6
3.1.	Požadavky normativních dokumentů ve vztahu k výpočtu a uvádění nejistoty a stanovení hodnoty CMC pro akreditované laboratoře	7
	ČSN EN ISO/IEC 17011:2005 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na akreditační orgány akreditující orgány posuzující shodu	7
	Plánovaná ISO/IEC 17011:2017 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na akreditační orgány akreditující orgány posuzování shody (<i>pracovní překlad FDIS</i>).....	7
	ILAC P14:01/2013 Politika ILAC pro nejistoty při kalibraci	7
	EA 04/02 M:2013 Vyjádření nejistoty měření při kalibraci	9
	MPA 30 - 02 – 13 Politika ČIA pro metrologickou návaznost výsledků měření	9
	JCGM 100:2008 „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření)	10
	ILAC G24:2007 Pokyny pro stanovení kalibračních intervalů měřících přístrojů	10
3.2.	Hodnoty CMC pro jednotlivé podrozsahy oboru kalibrací	11
3.3.	Vlastnost CMC jako vyjádření kvality laboratoře	12
4.	DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	14
4.1.	Obecně	14
4.2.	Vlivy na nejistotu měření - zdroje nejistot typu B	14
4.2.1.	Vlivy vázané na použité etalonáží zařízení	14
	Nejistota kalibrace etalonu.....	14
	Drift etalonu.....	14
	Rozlišení etalonu	15
4.2.2.	Vlivy vázané na kalibrační prostředí	15
	Krátkodobá stabilita pece, lázně nebo černého tělesa	15
	Homogenita pece, lázně nebo černého tělesa.....	15
4.2.3.	Vlivy vázané na kalibrované měřidlo.....	15
	Rozlišení kalibrovaného měřidla	16
	Opakovatelnost	16
4.3.	Přehled nejčastěji zastoupených druhů teploměrů a metod jejich kalibrace.....	16
4.3.1.	Termoelektrické snímače teploty	16
4.3.2.	Odporové snímače teploty.....	25
	SPRT nebo IPRT?.....	25
	Nejistoty kalibrace – CMC vs. realita.....	26

Nejistota interpolace	26
Stabilita IPRT	27
Vliv kabeláže	28
Vliv samoohřevu	28
Odvod tepla a vliv ponoru teploměru	32
Hystereze	39
4.3.3. Indikační teploměry	39
Základní popis a jejich členění	39
Převodníky teploty	40
4.3.4. Povrchové teploměry	41
Odvod/přívod energie sondou	41
Vliv úhlu náklonu sondy	43
Vliv proudění vzduchu	45
Vliv přitlaku	47
Vliv nehomogenity	49
4.3.5. Bezdotykové teploměry a termokamery	50
Složky spojené s etalonem a černým tělesem	50
4.1.1.1.1 Vliv vlnové délky a emisivity	50
4.1.1.1.2 Odražená okolní teplota	52
4.1.1.1.3 Tepelné ztráty	52
4.1.1.1.4 Homogenita černého tělesa	53
4.1.1.1.4.1 Desková černá tělesa	53
4.1.1.1.4.2 Dutinová černá tělesa	54
Složky spojené s kalibrovaným teploměrem	55
4.1.1.1.5 Okolní teplota	55
4.1.1.1.6 Atmosférická absorpce	57
4.1.1.1.7 SSE (size-of-source efekt)	57
4.4. Prahové hodnoty CMC pro jednotlivé vlivy	59
4.5. Minimální příspěvek k CMC	59
4.6. Nepodkročitelné hodnoty CMC	59
4.7. Zohlednění výsledků řešení úkolů	62
5. SHRNUTÍ	63
6. ČERPANÉ NÁKLADY NA ÚKOL	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.
7. ZÁVĚR	64

1. Úvod

V ČR je v současné době 131 (stav VII.2017) akreditovaných kalibračních laboratoří (dále i AKL), které poskytují služby v různých oborech měření. V oboru kalibrace teploměrů své služby poskytuje 53 laboratoří s různou mírou nejistoty kalibrace a velmi rozdílně udávanými hodnotami CMC. Dalšími aktivními účastníky je cca 200 zkušebních laboratoří, které působí v oblasti měření teploty.

Při jejich posuzování doposud chyběl nástroj pro sjednocování pohledu odborných posuzovatelů na rozpočty nejistot předkládané laboratořemi. Současně tyto rozpočty, které slouží jako základ pro stanovení CMC, jsou v jednotlivých laboratořích sestavovány velmi volně a často zahrnují jen některé z podstatných vlivů na nejistotu měření.

Dochází k situacím, kdy stejné hodnoty CMC pro stejný rozsah dané veličiny dvou různých laboratoří nemusí mít stejný význam. Může pak poněkud absurdně dojít k tomu, že laboratoř s nižší udanou hodnotou CMC nemusí být schopna provést kalibraci s nižší nejistotou než laboratoř s udanou hodnotou CMC vyšší.

Protože ne vždy je k dispozici dostatek času na podrobné přezkoumání předloženého rozpočtu nejistot a vlastní posuzování probíhá formou vzorkování, nemusí různí odborní posuzovatelé přisoudit jednotlivým vlivům stejnou váhu, porovnání výsledných hodnot CMC tak nemusí mít dostatečnou vypovídací schopnost. Protože norma ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 požaduje uvádění nejistot výsledku měření v případě porovnávání výsledku se specifikacemi, kvalifikovaný odhad nejistoty měření může být pro zákazníka zásadním kritériem při výběru laboratoře jako dodavatele služby.

2. Popis řešení úkolu technického rozvoje

2.1. Cíl úkolu

Úkol PRM č. VII/5/10 významně posílil jednotný postup posuzování v oboru teplota. Tento úkol se zaměřuje na jeden z klíčových prvků, podle kterých zákazník vnímá výkonnost laboratoře a hodnotí její vhodnost pro daný požadavek na kalibraci. Sjednocením pohledu odborné veřejnosti, především odborných posuzovatelů, na význam jednotlivých příspěvků k CMC a na tvorbu rozpočtu nejistoty se zvýší porovnatelnost informací obsažených v přílohách osvědčení o akreditaci, a tedy objektivita hodnocení vhodnosti jednotlivých laboratoří pro službu požadovanou zákazníkem.

Výsledky řešení úkolu budou prakticky využity pro školení odborných posuzovatelů, působících v rámci akreditačního systému ČR, dále poslouží jako informační zdroj během posuzování akreditovaných kalibračních laboratoří v oboru teplota. Pro širokou veřejnost bude připraven článek pro zveřejnění v periodiku Metrologie.

2.2. Vlastní řešení

Tento úkol navazuje na úkol PRM č. VII/5/10 a vypracovává podklady pro sjednocení pohledu na vliv příspěvků k nejistotě měření teploty jak na straně odborných posuzovatelů, tak na straně laboratoří a zákazníků.

Cílovými skupinami řešení jsou

- pracovníci ČIA, o.p.s., především vedoucí a odborní posuzovatelé,
- kalibrační laboratoře, především akreditované kalibrační laboratoře,
- zkušební laboratoře, především akreditované zkušební laboratoře,
- zákazníci výše uvedených laboratoří,
- odborná veřejnost a zájemci o kalibrace v oboru teplota.

V rámci řešení úkolu bude

- využita Zpráva k úkolu č. VII/5/10 z PRM 2010,
- sestaven přehled druhů teploměrů (nejčastěji zastoupených) a vhodných metod jejich kalibrace,
- sestaven přehled všech podstatných vlivů na nejistotu měření teploty ve vztahu k udávané úrovni CMC,
- vytvořeny podklady pro školení příslušných pracovníků ČIA, o.p.s. a
- vytvořeny podklady pro informování kalibračních, zkušebních a dalších laboratoří a pro odbornou veřejnost.

3. Obecná pravidla pro vyjadřování nejistot a sestavení rozpočtu nejistot pro stanovení CMC

V roce 2009 byl mezi Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) a regionálními metrologickými organizace (RMO) ve spolupráci s organizací ILAC a regionálními (akreditačními) spolupracujícími orgány dohodnut terminologický přechod z dříve uváděného měřítka kvality kalibrační laboratoře BMC (nejlepší měřicí schopnost) na aktuální pojem CMC (schopnost kalibrace a měření). Jeho podstatou bylo, že oba pojmy jsou rovnocenné, toto konstatování ale vyvolalo dojem, že jsou totožné. Důsledkem tohoto mylného výkladu dodnes přetrvávají rozdílné přístupy k rozpočtům nejistot a někdy i k posuzování jejich vhodnosti a přiměřenosti pro danou laboratoř.

Povinnost používat CMC jako součást rozsahu akreditace vyplývá z textu normy ČSN EN ISO/IEC 17011:2005 Zde se ještě objevuje pojem BMC, již ale s poznámkou možnosti použít ekvivalentní ukazatel, tedy CMC.

Za klíčové další podklady lze považovat dokumenty *ILAC-P14:01/2013 „Politika ILAC pro nejistoty při kalibraci“*, *JCGM 100:2008 „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření¹)* a *EA-04/02 M:2013 „Vyjádření nejistoty měření při kalibraci“*, které v akreditačním systému ČR ČIA interpretuje v dokumentu *MPA 30-02-13 „Politika ČIA pro metrologickou návaznost výsledků měření“*.

Zdroje dalších užitečných informací jsou například v dokumentech *ILAC-G24:2007 „Pokyny pro stanovení kalibračních intervalů měřících přístrojů“* a *ILAC-G08:03/2009 „Pokyny k uvádění shody se specifikací“*, nahlédnout lze také do dokumentu *EA-04/16 G:2003 „Směrnice EA o vyjadřování nejistoty v kvantitativním zkoušení“*.

Výše uvedené dokumenty vycházejí z následujících zásad:

- 1) Nejistota je vlastnost výsledku měření
- 2) Přes existenci obecných pravidel pro výpočet nejistoty je třeba pro každé měření vypočítat nejistotu samostatně s ohledem na všechny proměnlivé podmínky měření;
- 3) Hodnota CMC je vyjádřením předpokládané nejlepší hodnoty nejistoty, která je zákazníkům k dispozici za normálních podmínek: a) v souladu s popisem rozsahu akreditace dané laboratoře udělené signatářem dohody ILAC nebo b) v souladu s informacemi uveřejněnými v databázi klíčových porovnání BIPM (KCDB) vedené CIPM MRA.

¹ Přesnější překlad zní: Pokyn pro vyjadřování nejistot při měření

3.1. Požadavky normativních dokumentů ve vztahu k výpočtu a uvádění nejistoty a stanovení hodnoty CMC pro akreditované laboratoře

Pro stanovování a uvádění nejistot a CMC jsou ze strany EA, a tedy i ČIA, stanoveny určité zásady. Ty vyplývají z výše uvedených dokumentů, přehled vybraných textů je uveden dále.

ČSN EN ISO/IEC 17011:2005 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na akreditační orgány akreditující orgány posuzující shodu

7.9.5 Osvědčení o akreditaci musí také dále stanovit:

- c) pro kalibrační laboratoře:
 - 1) kalibrace, včetně typů prováděných měření, rozsahy měření a nejlepší měřicí schopnost (BMC) nebo ekvivalentní ukazatel

Poznámka pod čarou: Pojem nejlepší měřicí schopnosti je v současné době přezkoumáván z důvodů zahrnutí do VIM.

Plánovaná ISO/IEC 17011:2017 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na akreditační orgány akreditující orgány posuzování shody (*pracovní překlad FDIS*)

7.8.3 Rozsah akreditace musí přinejmenším obsahovat::

- c) Pro kalibrační laboratoře:
 - schopnost kalibrace a měření (CMC) vyjádřená jako:
 - měřený parametr nebo referenční materiál,
 - metoda nebo postup kalibrace nebo měření a typ přístroje nebo materiálu, který je kalibrován nebo měřen,
 - rozsah měření a, kde je to možné, další parametry, např. kmitočet nebo přiložené napětí a
 - nejistota měření.

ILAC P14:01/2013 Politika ILAC pro nejistoty při kalibraci

4.2 Kalibrační laboratoře akreditované akreditačními orgány musí provádět odhad nejistoty měření v souladu s „Pokynem k vyjádření nejistoty měření“ (GUM), včetně jeho doplňujících dokumentů nebo Pokynem ISO 35.

5.1 Rozsah akreditace akreditované kalibrační laboratoře musí zahrnovat měřicí schopnost kalibrace (CMC) vyjádřenou s ohledem na:

- a) měřenou veličinu nebo referenční materiál,
- b) metodu nebo postup měření/kalibrace nebo typ kalibrovaného/měřeného přístroje/materiálu,
- c) rozsah měření a tam, kde to přichází v úvahu, také na další parametry, jako např. kmitočet použitého napětí,
- d) nejistotu měření.

5.2 Pro daný rozsah akreditace nesmí být ve vyjádření CMC žádná nejasnost, tedy ani u nejmenší nejistoty měření, kterou může laboratoř očekávat v průběhu kalibrace nebo měření. Zvláštní pozornost je třeba věnovat případům, kdy měřená veličina zahrnuje rozsah hodnot. Tohoto se zpravidla dosahuje použitím jedné nebo několika z následujících metod pro vyjádření nejistoty:

- a) Jednou hodnotou platnou pro celý rozsah měření.
- b) Rozsahem². V tomto případě má kalibrační laboratoř mít řádně definovaný předpoklad pro interpolaci, aby zjistila nejistotu i u mezilehlých hodnot.
- c) Jednoznačnou funkcí měřené veličiny nebo měřeného parametru.
- d) Maticí, v níž hodnoty nejistoty závisejí na naměřených hodnotách a dalších parametrech.
- e) Grafickou formou za předpokladu, že každá osa má dostatečné rozlišení, umožňující získat pro nejistotu nejméně dvě platné číslice.

Otevřené intervaly (např. „U<x“) nejsou při udávání nejistoty přípustné.

5.3 Nejistota zahrnutá v CMC musí být vyjádřena jako rozšířená nejistota se specifickým rozšířením pravděpodobnosti na přibližně 95 %. Jednotka nejistoty musí být vždy stejná jako měřicí jednotka měřené hodnoty nebo je vůči ní vyjádřena relativně, např. v procentech. Zahrnutí příslušné jednotky většinou poskytuje potřebné vysvětlení.

5.4 Kalibrační laboratoře musí doložit, že jsou schopny poskytnout zákazníkům kalibraci v souladu s článkem 5.1 b) tak, aby se nejistoty měření rovnaly nejistotám zahrnutým do CMC. Při vyjádření CMC musí laboratoře vzít v úvahu vlastnosti „nejlepšího existujícího zařízení“, které je pro danou kategorii kalibrací k dispozici.

Složky nejistoty zahrnuté do CMC musí zahrnovat odpovídající příspěvek vyplývající z opakovatelnosti, a pokud je to vhodné, má obsahovat i příspěvek vyplývající z reprodukovatelnosti. Příspěvek k nejistotě zahrnutý do CMC vyplývající z fyzikálních vlivů, které je možno přisoudit i nejlepšímu existujícím kalibrovaným nebo měřeným zařízením, by na druhé straně neměl být významný.

Lze připustit, aby pro některé kalibrace „nejlepší existující zařízení“ neexistovalo nebo aby příspěvek k nejistotě připisovaný zařízení nejistotu významně ovlivňoval. Pokud je takový příspěvek k nejistotě možné oddělit od ostatních příspěvků, pak je možné příspěvek zařízení ze stanovení CMC vyloučit. V takovém případě však musí rozsah akreditace jasně uvádět, že příspěvky zařízení k nejistotě nejsou do CMC zahrnuty.

POZNÁMKA: Pojem „nejlepší existující zařízení“ je chápán jako zařízení určené ke kalibraci, které je komerčně nebo jinak dostupné zákazníkům, a to i v případě, že má zvláštní vlastnosti (stabilitu) nebo má dlouhou kalibrační historii.

² Řešitelé úkolu nepovažují tento způsob vyjádření CMC za vhodný vzhledem k možné nejednoznačnosti vyjádření hodnoty CMC a nemožnosti ani zhruba odhadnout konkrétní hodnotu nejistoty kalibrace bez dalších informací.

5.5 V případech, kdy laboratoře poskytují služby, jako např. poskytování referenčních hodnot, by nejistota obsažená v CMC měla obecně zahrnovat faktory vztahující se k postupu měření tak, jak bude toto prováděno na vzorku, tj. musí být zohledněny typické vlivy matrice, interference apod. Nejistota obsažená v CMC obvykle nezahrnuje příspěvky vyplývající z nestability nebo nehomogenity materiálu. CMC by měla vycházet z analýzy inherentních vlastností metody pro typické, stabilní a homogenní vzorky.

POZNÁMKA: Nejistota zahrnutá do CMC pro měření referenčních hodnot není totožná s nejistotou související s referenčním materiálem poskytnutým výrobcem referenčních materiálů. Rozšířená nejistota pro certifikovaný referenční materiál bude zpravidla vyšší než nejistota zahrnutá do CMC pro referenční měření na referenčním materiálu.

EA 04/02 M:2013 Vyjádření nejistoty měření při kalibraci

JCGM 100:2008 definuje základní pravidla pro stanovení a vyjadřování nejistot měření, která mohou být použita ve většině oborů fyzikálních měření,

Dokument se soustřeďuje na postupy, které jsou nejvhodnější pro měření v kalibračních laboratořích a popisuje jednoznačný a harmonizovaný postup vyjadřování a uvádění nejistoty měření, připouští se ale i jiné přístupy navržené dokumentem GUM (například metoda Monte Carlo). Dokument zahrnuje následující oblasti:

- základní definice pro účely dokumentu,
- metody pro stanovení nejistot měření odhadů hodnot vstupních veličin,
- vztah mezi nejistotou měření odhadu hodnoty výstupní veličiny a stanovenou nejistotou měření vstupních veličin,
- rozšířenou nejistotu měření odhadu hodnoty výstupní veličiny,
- vyjádření nejistoty měření,
- podrobný postup pro výpočet nejistoty měření.

MPA 30 - 02 – 13 Politika ČIA pro metrologickou návaznost výsledků měření

Účelem tohoto MPA je formulovat politiku Českého institutu pro akreditaci, o.p.s. (dále jen ČIA) v oblasti metrologické návaznosti výsledků měření. Politika ČIA týkající se metrologické návaznosti vychází ze Zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů, z ČSN EN ISO/IEC 17025:2005, ČSN EN ISO 15189:2007, ČSN EN ISO 15189:2013 a z dokumentu ILAC-P10:01/2013 Politika ILAC pro návaznost výsledků měření.

ČIA požaduje, aby všechny výsledky měření nezbytné pro řádné provádění kalibrací, zkoušek a vyšetření, jejichž správnost může ovlivnit správnost nebo platnost výsledků měření, zkoušení nebo vyšetření, byly návazné tam, kde je to prakticky možné, prostřednictvím nepřerušovaného řetězce porovnání na státní nebo mezinárodní etalony nebo jiné etalony, tak jak je to popsáno v dalších kapitolách tohoto dokumentu a aby každá kalibrace v rámci výše zmíněného řetězce porovnání byla prováděna dle příslušných technických postupů, které odpovídají danému účelu.

JCGM 100:2008 „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (Pokyn pro vyjadřování nejistoty měření)

1.1 Tento pokyn, který stanovuje základní pravidla pro vyhodnocování a vyjadřování nejistoty při měření, lze používat pro různé úrovně přesnosti a v mnoha oborech – od obchodu a výroby, až po základní výzkum. Postupy uvedené v tomto pokynu jsou určeny pro široké spektrum měření, zahrnující následující požadavky:

- podporu řízení kvality a prokazování kvality ve výrobě;
- dodržování a zavádění zákonů a předpisů;
- výzkumné práce v oblastech základního výzkumu, aplikovaného výzkumu a rozvoje ve vědě a technice;
- kalibraci etalonů a měřicích přístrojů a provádění zkoušek v rámci státního metrologického systému s cílem zajistit návaznost na státní etalony;
- rozvoj, uchovávání a porovnání mezinárodních a národních fyzikálních referenčních standardů včetně referenčních materiálů.

1.2 Tento pokyn se primárně týká vyjadřování nejistoty při měření dobře definované fyzikální veličiny – měřené veličiny – kterou lze charakterizovat jedinečnou a jednoznačnou hodnotou. Pokud sledovaný jev lze vyjádřit pouze jako rozdělení hodnot, nebo je závislý na jednom nebo více parametrech, například času, pak tvoří měřené veličiny potřebné k jeho popisu množinu veličin popisujících toto rozdělení nebo tuto závislost.

1.3 Tento pokyn lze též použít k vyhodnocování a vyjadřování nejistoty při koncepčním navrhování a teoretických analýzách experimentů, měřicích metod a komplexních komponent a systémů. Jelikož je dovoleno, aby výsledek měření a jeho nejistota byly abstraktní a založené výhradně na hypotetických údajích, má být pojem „výsledek měření“, tak jak jej používá tento pokyn, chápán v širších souvislostech.

1.4 Tento pokyn poskytuje pouze základní pravidla vyhodnocování a vyjadřování nejistoty měření, nikoliv podrobné technologické a specifikační instrukce. Nezabývá se ani způsoby využívání k různým účelům již vyhodnocené nejistoty konkrétního výsledku měření, například k posouzení míry shody s jinými podobnými výsledky, k určení tolerančních mezí ve výrobě, nebo k rozhodování, zda určitý proces může proběhnout bezpečně. Z toho důvodu je dovoleno jako užitečné vytvořit na základě tohoto pokynu speciální normy určené pro specifické oblasti měření nebo zaměřené na různá využití kvantitativních vyjádření nejistoty. Je dovoleno, aby takové normy byly zjednodušenými verzemi tohoto pokynu, ale mají obsahovat podrobnosti odpovídající míře přesnosti a složitosti popisovaných měření a jejich použití.

ILAC G24:2007 Pokyny pro stanovení kalibračních intervalů měřicích přístrojů

Úvod

Obecným účelem periodické kalibrace je:

- zlepšit odhad odchylky mezi referenční hodnotou a hodnotou získanou za použití měřicího přístroje a nejistoty u této odchylky v době, kdy se příslušný přístroj skutečně používá;
- znovu potvrdit nejistotu, kterou je možno dosáhnout pomocí příslušného měřicího přístroje; a

- potvrzení, zda došlo či nedošlo k nějaké změně měřicího přístroje, která by mohla vnést pochybnost ohledně výsledků dosažených v uplynulém období.

3.2. Hodnoty CMC pro jednotlivé podrozsahy oboru kalibrací

Základní pokyny pro uvádění informací o rozsahu akreditace kalibrační laboratoře na osvědčení o akreditaci jsou obsaženy v Návodu na zpracování přílohy č. 3, kde je uvedeno: „K jednotlivým rozsahům měřené veličiny náleží „Měřicí schopnost laboratoře“, kterou má laboratoř vypočítánu v rámci zavedeného systému managementu v souladu s požadavky dokumentu EA 4/02.“

Požadavek ILAC P14:01/2013, že „pro daný rozsah akreditace nesmí být ve vyjádření CMC žádná nejasnost, tedy ani u nejmenší nejistoty měření, kterou může laboratoř očekávat v průběhu kalibrace nebo měření“ byl interpretován tak, že je nezbytné přesně definovat, ve kterém rozsahu leží krajní bod, který dva následující rozsahy spojuje. Tedy že konkrétní hodnota je v jednom rozsahu, zatímco v druhém není a být nemůže. Tento požadavek vychází ze skutečnosti, že nejistota je v principu pro spojitě veličiny spojitá, nemůže mít tedy různé hodnoty pro jeden bod měření. V případě volby takových rozsahů, které na sebe navazují, není společný krajní bod porušením této zásady, protože hodnota nejistoty při kalibraci je za předpokladu stejných podmínek shodná pro oba rozsahy. Lišit se může pouze v případě, že některou z podmínek změníme, např. změnou nastavení kalibrátoru.

Příklad:

$(-40 \div 250) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,2 $^\circ\text{C}$
$(>250 \div 600) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,3 $^\circ\text{C}$

Jinou možností zápisu je:

$(-40 \div 250) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,2 $^\circ\text{C}$
$(250 \div 600) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,3 $^\circ\text{C}$

Hodnota 250 $^\circ\text{C}$ je hraniční hodnota, ovšem pokud vezmeme v úvahu nejistotu jejího stanovení, není ani tento bod jednoznačně daný a pevně ohraničený, jeho hodnota se podle rozsahu pohybuje od 249,8 $^\circ\text{C}$ do 250,2 $^\circ\text{C}$, případně od 249,7 $^\circ\text{C}$ do 250,3 $^\circ\text{C}$. Při nastavení přesné hodnoty je hodnota reálná v tomto rozmezí s pravděpodobností danou nejistotou, prakticky bude pod nebo nad hodnotou nastavenou. Nemůže se tedy jednat o hodnotu diskrétní.

Obecně mohou nastat tyto stavy (stejná hodnota na obou rozsazích znamená, že rozsah byl dělen z důvodů jiných, než je hodnota CMC):

- a) na nižším rozsahu je nižší hodnota CMC než na rozsahu vyšším,
- b) na nižším rozsahu je vyšší hodnota CMC než na rozsahu vyšším.

Zatímco v případě a) kalibrace na nižším rozsahu až do krajního bodu přináší nižší hodnotu nejistoty kalibrace a není tedy důvod pro kalibraci tohoto bodu na vyšším rozsahu. V případě b) může nastat (zřejmě výjimečná) situace, kdy zákazník požaduje nejmenší možnou nejistotu kalibrace a v tom případě kalibrační laboratoř může provést téměř celou kalibraci na nižším rozsahu, kalibraci v krajním bodu pak provede na rozsahu vyšším. Tím pro tento bod dosáhne nižší nejistoty kalibrace, než by tomu bylo na nižším rozsahu. Zvážení významu a potřeby takového způsobu kalibrace řešitelé úkolu ponechávají na čtenáři této zprávy.

Z výše uvedeného vyplývá, že ani v případě, kdy je krajní hodnota (zdánlivě) součástí pouze jednoho rozsahu měření, pro který je uvedena hodnota CMC, nelze jednoznačně stanovit, do kterého rozsahu má být nastavená hodnota reálně zařazena.

Druhou stranou téže mince je volba vlastní hodnoty CMC. Prakticky CMC vyjadřuje nejhorší hodnotu z nejlepších nejistot v daném rozsahu. Protože pro laboratoře nejsou stanovena pravidla pro stanovení rozsahů, může KL zvolit rozčlenění konkrétních rozsahů kalibrace zcela libovolně. Obvykle je vodítkem např. hodnota přepínání rozsahů na kalibrátoru apod. Lze tedy konstatovat, že v daném příkladu se může kalibrační laboratoř rozhodnout, že použije dekadické dělení a rozsahy rozčlení takto:

$(-40 \div 100) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,2 $^\circ\text{C}$
$(100 \div 250) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,2 $^\circ\text{C}$
$(250 \div 600) \text{ } ^\circ\text{C}$	0,3 $^\circ\text{C}$

Uvedené dělení respektuje původně uvedené hodnoty, doplňuje ale další podrozsah. Pro jednoduchost příkladu uvažujeme shodnou hodnotu CMC v prvních dvou podrozsazích. V tomto případě máme 3 krajní body, přestože se jedná o stejnou situaci. Současně hodnoty CMC mohou být shodné pouhou náhodou a uvedené dělení rozsahů může být zcela oprávněné i technicky. Bez posouzení konkrétní situace nelze rozhodnout, zda je uvedené dělení a přiřazené hodnoty CMC opodstatněné nebo ne.

Uvádění stejné hodnoty jako meze dvou navazujících rozsahů proto řešitelé úkolu nepovažují za prohřešek proti jednoznačnosti uváděné hodnoty. Menší počet znaků v buňce tabulky pak zvyšuje přehlednost informace a tabulky jako celku.

3.3. Vlastnost CMC jako vyjádření kvality laboratoře

Ne zřídka je prezentován názor, že hodnota CMC závisí i na tom, v jakém prostředí (pod jakými vlivy) se kalibrace provádí – různá pracoviště, různé vybavení apod. Podle řešitelů tento názor ne zcela respektuje definici CMC, která se neomezuje na konkrétní vlivy, ale je vyjádřena jako schopnost laboratoře poskytnout danou nejmenší nejistotu kalibrace za normálních, běžně dosažitelných podmínek všem zákazníkům.

Pokud chceme přijmout toto dělení pro hodnoty CMC, je nezbytné rozhodnout, které vlivy jsou ještě významné a je potřeba podle nich členit uváděné hodnoty CMC a které již lze shrnout do jedné hodnoty CMC, deklarované v osvědčení o akreditaci. Podstatným vlivem může být pracoviště, použité vybavení, ale stejně tak například schopnosti, zkušenosti a pečlivost pracovníka. Přesto se mezi názory, jak členit CMC, neobjevuje požadavek uvádět hodnoty CMC odděleně i podle pracovníků.

Nejčastěji se objevuje požadavek na uvádění hodnot CMC samostatně pro kalibrace v laboratoři a mimo ni, stejný základ má i požadavek pro uvádění hodnot CMC jednotlivá pracoviště. Argumentem pro tyto úvahy je skutečnost, že nejistota kalibrace je v každém případě jiná vlivem různých podmínek, které panují mimo laboratoř, resp. na jiném pracovišti. Ačkoli se jedná o nezpochybnitelný fakt, řešitelé úkolu tento fakt interpretují s vědomím rozdílu mezi CMC a nejistotou kalibrace.

Při stanovování rozpočtu nejistot se vliv řady ovlivňujících podmínek odhaduje nebo se využívá typická hodnota, případně se vlivy seskupují. Tento proces je velmi specifický a závislý na kompetencích pracovníka, který rozbor provádí, a jeho pohledu na význam jednotlivých vlivů. Pro jednu, i poměrně přesně definovanou a popsanou situaci, lze očekávat celé spektrum možných řešení. Naopak očekávat nelze, že by všichni zapojení odborníci došli k totožnému výsledku.

Z toho plyne, že případné stanovování vlivů, které by měly sloužit jako parametr pro rozhodování, zda je potřeba stanovovat samostatnou hodnotu CMC laboratoře pro daný vliv, nemá konečné řešení. Proto také nelze rozhodnout, který parametr je ještě tak významný, aby opodstatňoval uvádění samostatné hodnoty, resp. tabulky hodnot CMC.

Předpokládáme-li u zákazníka alespoň základní orientaci v oboru, nebude pro něj překvapením, že nejistota kalibrace je vyšší, než je hodnota CMC uvedená na příloze OA. Součástí přezkoumání poptávky je vyjasnění všech požadavků zákazníka, tedy i zjištění jeho představy o velikosti nejistoty provedené kalibrace. Zde si laboratoř musí vytvořit dostatečný prostor, aby zákazníkovi dokázala vysvětlit, jakou lze očekávat reálnou hodnotu nejistoty.

Z výše uvedených důvodů řešitelé úkolu podporují uvádění hodnot CMC pro akreditovanou laboratoř jako celek.

4. Dosažené výsledky

4.1. Obecně

Vzhledem k charakteru složek nejistot se tento úkol nevěnuje nejistotám typu A. Pozornost je soustředěna na kalibrace základních druhů teploměrů, zahrnutý jsou odporové a termoelektrické snímače teploty, indikační teploměry, bezdotykové teploměry, termokamery a teploměry pro měření teploty povrchu.

4.2. Vlivy na nejistotu měření - zdroje nejistot typu B

V rámci provedených prací byly identifikovány jednotlivé zdroje nejistot, které vstupují do výpočtu nejistoty kalibrace. Do této skupiny nejistot patří zdroje související s etalonážním zařízením, s prostředím, ve kterém jsou kalibrace realizovány, a s vlastnostmi kalibrovaného měřidla.

4.2.1. Vlivy vázané na použité etalonážní zařízení

Etalon slouží k přenosu jednotky. Jako takový se uplatňuje významnou měrou v celkovém rozpočtu nejistot. Základní složky nejistot, které je nutné brát v úvahu, jsou:

- Kalibrace etalonu.
- Drift etalonu.
- Rozlišení etalonu.
- Použití etalonu.

Kromě základních vlastností, které jsou standardně aplikovány (kalibrace a rozlišení) je nutné brát v úvahu drift etalonu z několika po sobě následujících kalibrací, popřípadě jeho odhad. Často opomíjenou složkou je správný rozbor nejistoty použití etalonu. Zde se jedná zejména o použití v jiném prostředí, než při kalibraci, v jiném ponoru, s jinou kabeláží, popřípadě za jiných podmínek (např. nutnost použití interpolace).

KL často tyto složky zanedbávají a jejich správná evaluace vede k výraznému navýšení nejistoty. V následující části bude uveden krátký popis těchto složek.

Nejistota kalibrace etalonu

Složka vyjadřuje nejistotu, s jakou byla provedená kalibrace použitého etalonu a najdeme ji v kalibračním listě etalonu. V mezilehlých bodech je nutné dodržovat zásady propagace nejistot. Jako etalon může být použitý odporový teploměr, termoelektrický článek, referenční infračervený teploměr nebo kalibrované černé těleso. Tato složka musí být pracovníky KL stanovena vždy a podle skutečnosti.

Drift etalonu

Složka je stanovována na základě kalibrační historie měřidla, tj. z kalibračních listů. Vyjadřuje hodnotu, popisující změnu měřených hodnot v průběhu kalibračního cyklu. Kalibrační cyklus by v případě etalonových černých těles a bezdotykových

teploměrů neměl překročit lhůtu dvou let, optimální kalibrační lhůta je cca 1 rok. U kontaktních teploměrů závisí doba kalibrace na četnosti používání a rozsahu měřidla. Pro termoelektrické články po absolvování cca 200 hodin při maximálních teplotách nebo po maximálně dvou letech (optimálně jeden rok). U odporových snímačů teploty dva roky. Tato složka musí být pracovníky KL stanovena vždy, podle skutečnosti.

Rozlišení etalonu

Polovina nejmenšího dílku, nebo polovina z hodnoty udávající rozlišení měřidla. Tato složka musí být pracovníky KL stanovena vždy, podle skutečnosti.

4.2.2. Vlivy vázané na kalibrační prostředí

Zde KL často správně zjišťují vliv homogenity a stability použitého prostředí a správně jej zahrnují do výsledné nejistoty. Při zjišťování velikosti jednotlivých položek nejistoty dochází k nesprávné nebo nepřesné evaluaci nejistoty použitého měření a podmínek na etalon a kalibrované přístroje.

Krátkodobá stabilita pece, lázně nebo černého tělesa

Regulátory udržují požadovanou (nastavenou) teplotu s určitou přesností a míra kolísání kolem nastavené teploty vyjadřuje krátkodobou stabilitu termostatu. Tato hodnota může být stanovena při kalibraci nebo při definování doby náběhu a stabilizace.

Homogenita pece, lázně nebo černého tělesa

Homogenita teplotního pole ukazuje míru fluktuace teploty v pracovním prostoru termostatu. Může být stanovena pomocí etalonových teploměrů při každém prováděném měření v laboratoři, na základě časového záznamu.

4.2.3. Vlivy vázané na kalibrované měřidlo

Do této kategorie spadají vlivy, které jsou vázány přímo na konkrétní kalibrované měřidlo a jeho chování v průběhu kalibrace. Tyto složky je nutné stanovit při každé prováděné kalibraci. Zde je nutné si uvědomit konkrétní vlivy, které dané kalibrační prostředí má na kalibrované měřidlo a na hodnotu etalonu. Pro každý typ měřidla se jedná o rozdílné komponenty, jejichž velikost je často významnou položkou celkové nejistoty kalibrace. Jedná se například o:

- hysterezi,
- kabeláž a spojovací prvky,
- odvod/přívod tepla,
- opakovatelnost (krátkodobá stabilita),
- parazitní napětí,
- rozdíl v dynamice etalonového a zkoušeného teploměru,
- rozlišení,
- rušení (vlivy – síť, GSM, triakové regulace),

- samoohřev,
- vyhodnocovací zařízení (AC/DC, most, multimetr - komutace),
- homogenitu a
- SSE.

Mezi společné složky nejistot, které je možné identifikovat u všech měřidel, patří:

Rozlišení kalibrovaného měřidla

Vliv rozlišení je stanoven obdobně jako u etalonového teploměru, tj. polovina nejmenšího dílku nebo polovina z hodnoty udávající rozlišení měřidla.

Opakovatelnost

Neopomenutelnou složkou při výpočtu nejistoty kalibrace je rozptyl měřených hodnot kalibrovaného měřidla. U bezdotykových měřidel teploty je mezi jednotlivými odečty vhodné kalibrované měřidlo odstínit od černého tělesa, aby zbytečně nedocházelo k zahřívání měřidla vlivem sálání. Tuto složku je možné stanovit na základě výpočtu směrodatné odchylky z naměřených dat. Další možností, jak stanovit tuto složku je výpočet hodnoty rozdílu mezi maximální a minimální měřenou hodnotou z provedených odečtů.

4.3. Přehled nejčastěji zastoupených druhů teploměrů a metod jejich kalibrace

Základní rozdělení teploměrů, uvažované v tomto PRM, vychází z četnosti běžně používaných teploměrů a jejich kalibrací v jednotlivých kalibračních laboratořích.

Dotykové teploměry

- termoelektrické (TC)
- odporové (OT)
- povrchové (PT)
- indikační (IT)

Bezdotykové teploměry

- bezdotykové teploměry (IČT)
- infračervené termokamery (TK)

Pro tyto skupiny je zpracována výsledná tabulka a jsou východiskem i pro další výstupy z úkolu.

V této kapitole budou dále uvedeny specifické složky nejistot, vztahující se k vybraným druhům měřidel, kterými se zabývá tento úkol.

4.3.1. Termoelektrické snímače teploty

Termoelektrický článek je jednoduchý, cenově výhodný a robustní senzor. V průmyslu a laboratořích je velmi oblíbený díky své univerzálnosti, širokému teplotnímu pásmu a možnosti použití. Existuje mnoho typů a provedení. Některé pokryjí široké teplotní pásmo, jiné odolají vysokým teplotám, či abrazi a vibracím. I přes tyto výhody přináší měření s termoelektrickými články úskalí, nad kterými je

nutno se zamyslet. Průmyslově používané TC jsou standardizovány normou ČSN EN 60584.

Interval kalibrace etalonu v případě TC by nikdy neměl přesáhnout 4 roky nebo více než 200 provozních hodin (v teplotách nad 80 % maximální používané teploty). Je doporučeno provádět alespoň každoroční kontrolu etalonu porovnáním s jiným kalibrovaným teploměrem se stejnou specifikovanou tolerancí. Do rozpočtu nejistoty by měly vstupovat složky, jako je kalibrace etalonu, jeho drift a rozlišení. Dále srovnávací spoj (směs ledu a vody v Dewarově nádobě) a prodlužovací/kompenzační vedení (včetně všech napojení, svorek, apod.). Pokud se chce uživatel či kalibrační laboratoř přiblížit k co nejnižším nejistotám, nesmí zapomenout ve svém rozpočtu nejistoty na homogenitu TC. Ve standardních podmínkách (AKL) se tato hodnota neurčuje jednoduchým způsobem, je často opomíjena, a přitom tvoří významnou část nejistoty. Samotná nehomogenita TC 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. Samotné změření homogenity se provádí povytažením TC z izotermního prostředí (pevné body Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 nebo kapalinové lázně). Délka povytažení je závislá na ponoru TC a parametrech izotermního prostředí. Pokud se při kalibraci TC toto měření neprovádí nebo nemůže být z nějakého důvodu provedeno, tak se v takových případech použije hodnota 20 % maximální dovolené chyby pro toleranční třídu 2. Jestliže se měření homogenity provádí, je nutné vhodně zvolit izotermní prostředí (co nejmenší teplotní gradient a použít etalon s velmi dobrou nejistotou). V případě, kdy je měření provedeno chybně, či v nevhodně zvoleném prostředí, může chyba dosahovat (0,2 až 2) °C, jelikož se sčítá chyba senzoru i prostředí.

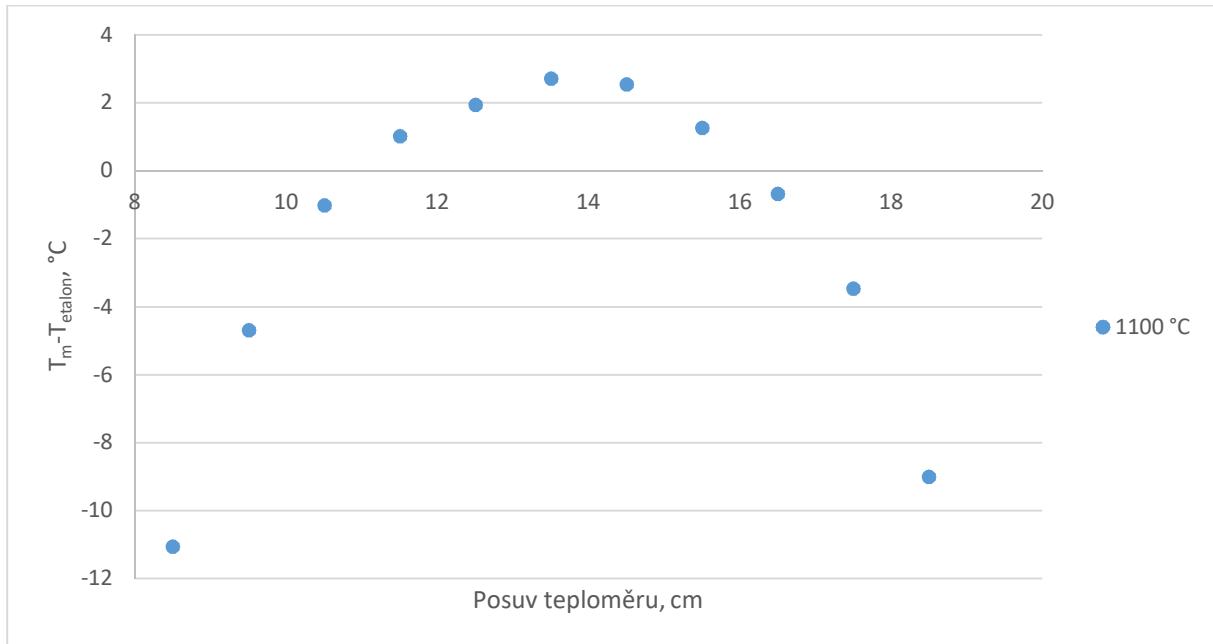
Pokud chce laboratoř nejistoty co nejlepší nejistoty, měla by dokladovat následující parametry:

- způsob určení homogenity TC,
- nejistota a způsob měření studeného konce,
- určení parazitních termoelektrických jevů kabeláže a přepínače a
- způsob určení chyby interpolace a extrapolace u etalonu.

Při výpočtu nejistoty je také nutné si uvědomit, že byla vypočtena za předpokladu použití velmi homogenních zařízení (lázně, pece) a etalonů, které jsou kalibrovány v pevných bodech teplotní stupnice. Není-li hodnota homogenity kalibrovaného TC měřena, je doporučeno připočíst hodnotu 20 % z maximální dovolené chyby pro třídu 2 s rovnoměrným rozdělením. Pokud je použitý etalon kalibrovaný porovnáním, je jen velmi obtížné se k prahovým nejistotám přiblížit.

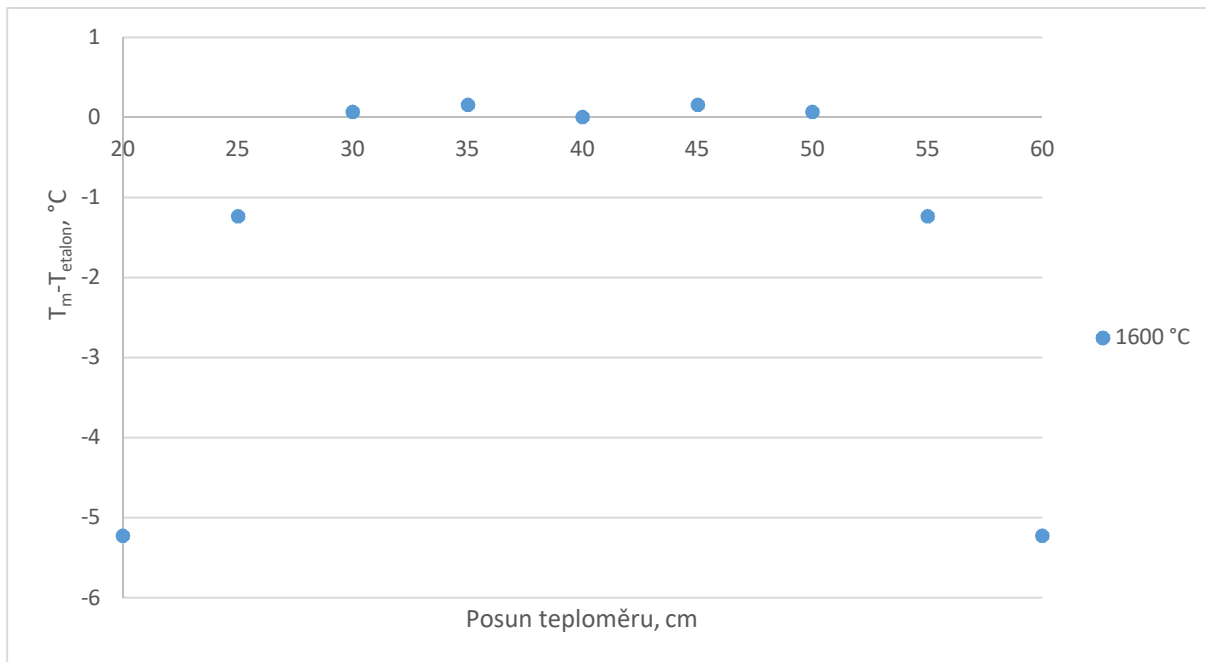
Obecně ani kvalitní pece nedosahují přesnosti a homogenity srovnatelné s lihovými, vodními, olejovými lázněmi či pevných bodů. Měření při zjišťování rozdílů při různých ponorech se stává komplikovanější a náročnější na volbu vhodného zařízení, jinak by mohla být změřena změna, která nekoresponduje s vlastností senzoru, ale pece. Ideální měření probíhá v pevných bodech nebo pecích s tepelnou trubicí. Na úvod je zde krátká rekapitulace několik základních informací ohledně pecí. Obecně je důležité znát parametry pece a měřidla. V praxi to znamená mít proměřenou homogenitu teplotního rozložení pece. Obecně se traduje, že např. u horizontálních pecí se bude teplotní maximum nacházet uprostřed. Toto však nemusí být nutně pravda, protože každá pec má jiné provedení. Na následujícím

obrázku je zobrazeno teplotní rozložení přenosné jednoduché pícky s horizontální trubicí o délce $l = 22,5$ cm na jedné straně slepé. Teplotní maximum bylo naměřeno v $l = 13,5$ cm od vstupu.



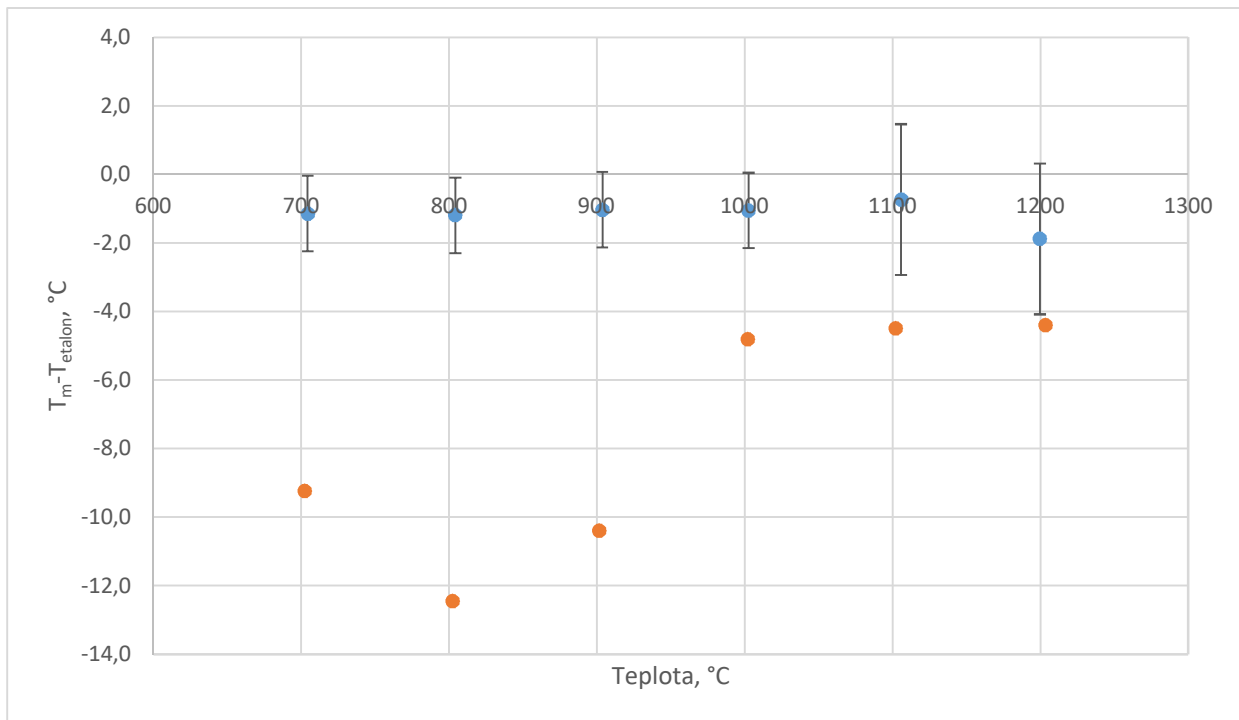
Obrázek 1: Teplotní rozložení v přenosné pícce

V praxi zjištění teplotního rozložení pece 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 $l = 80$ cm po 3 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 zobrazeno takové měření. Uvedené rozdíly odpovídají rozdílu mezi teploměrem v klidu a posunutým.



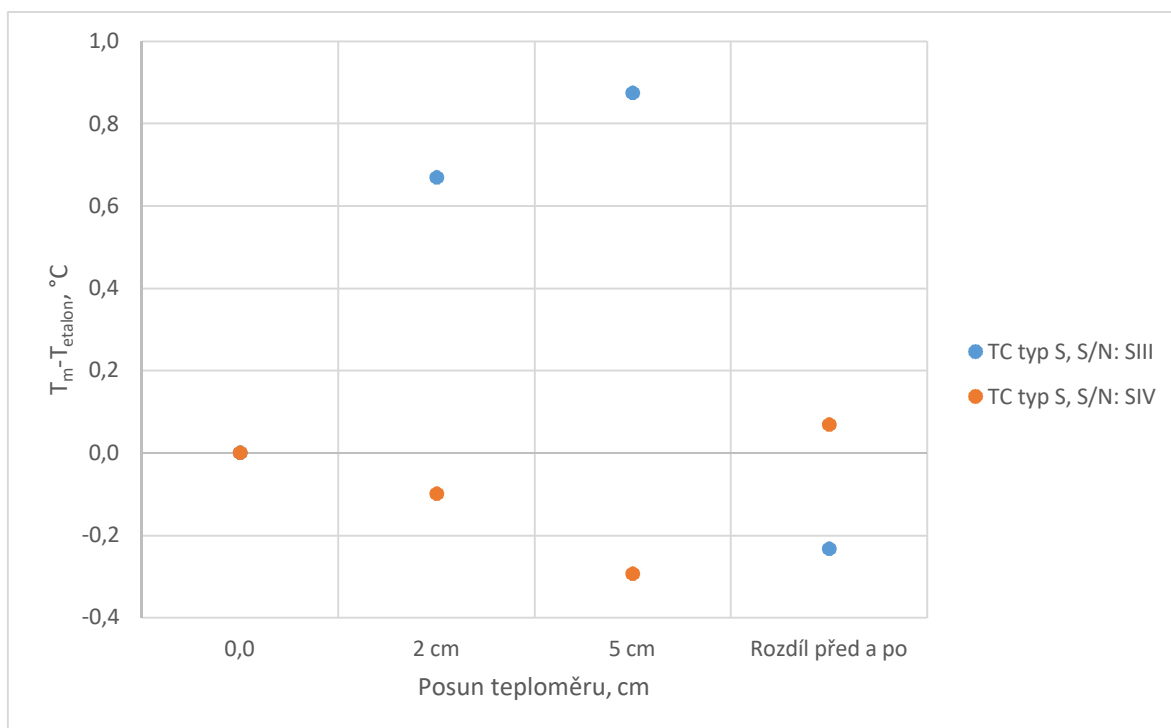
Obrázek 2: Výsledky proměření homogenity pece

Podle předchozích grafů je zřetelné, že u komerčně dostupných pecí se homogenita pece pohybuje v jednotkách stupňů i při vhodném nastavení regulátorů jednotlivých zón, v případě těch vícezónových. 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 a mít nepřesně vyznačené místo senzoru. V případě velmi homogenního prostředí se to nemusí projevit. Následující graf zobrazuje právě popsanou situaci, kde byl senzor (TC typ R) v ochranné trubici 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.



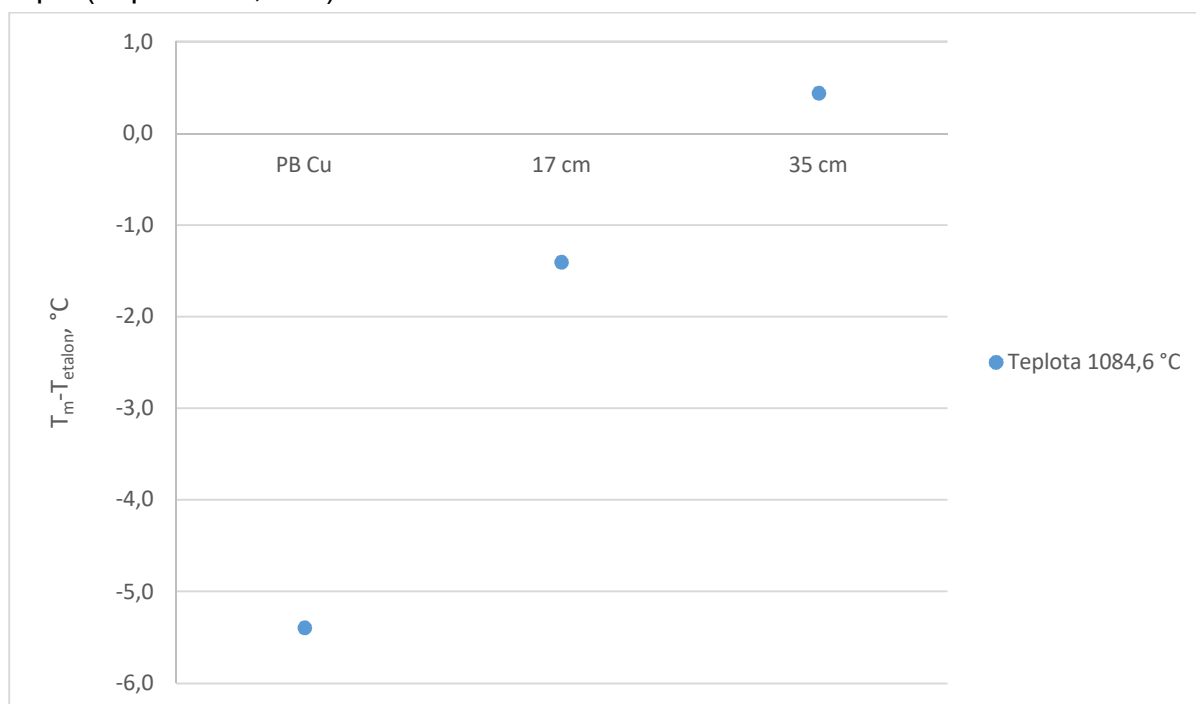
Obrázek 3: Kalibrace s posunutým senzorem oproti etalonu

Následující odstavec se již přímo zaměřuje na ponory TC. Obrázek 4 zobrazuje kalibraci provedenou v kovovém bodu Zn u dvou TC typu S s podobnými vlastnostmi. Při plné hloubce ponoření byl rozdíl, v rámci experimentu, minimální. Ovšem následovalo povytažení o 2 cm a následně o dalších 5 cm. Byť se vezme v úvahu povytažení 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.



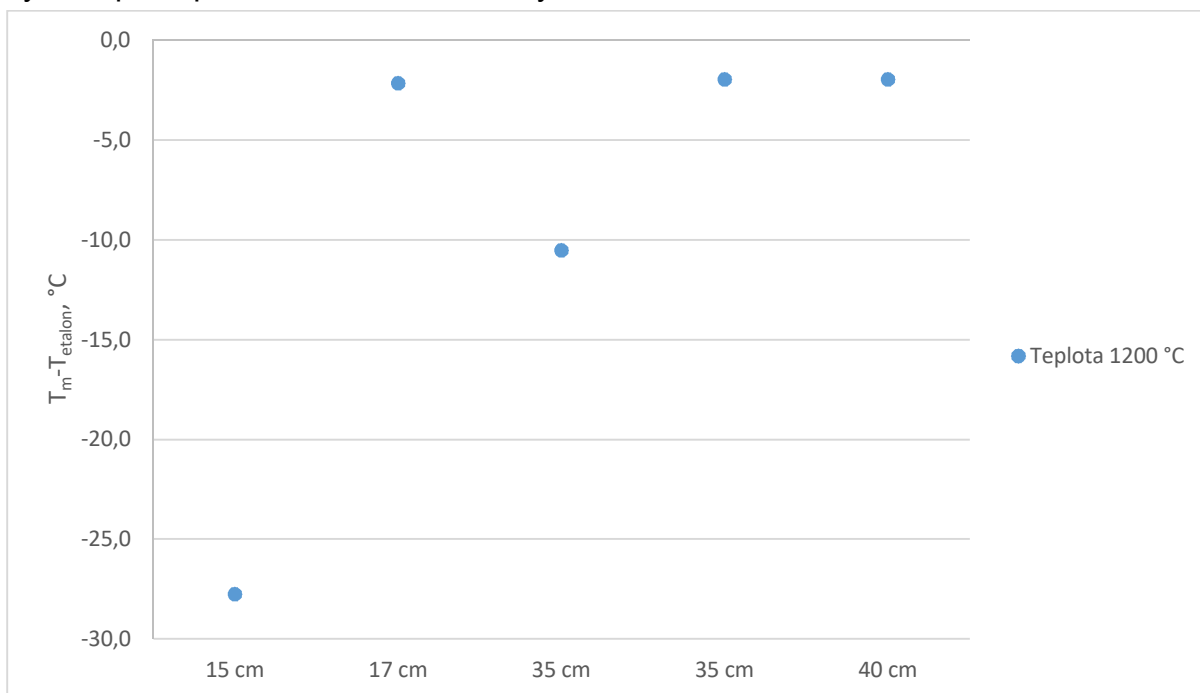
Obrázek 4: Změna ponoru měřena v pevném bodu Zn

Pro další experiment byla zvolena teplota 1084,6 °C (teplota tání Cu) a TC typu S byl změřen ve třech zařízeních: 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 μV (odpovídá 0,5 °C).



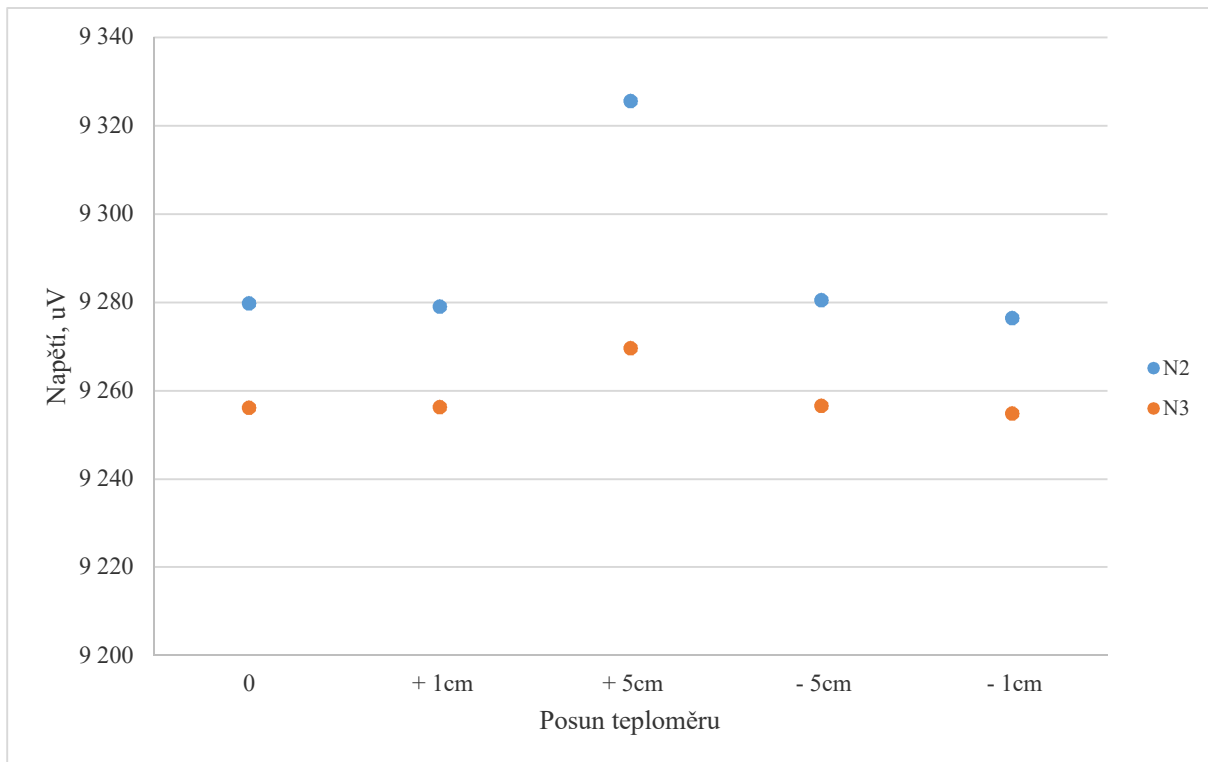
Obrázek 5: Výsledky měření pro termoelektrický snímač teploty typ S v různých zařízeních

V dalším experimentu byla realizována teplota 1200 °C ve 4 různých zařízeních: malé kalibrační píce Clasic (15 cm), v Cyclops (17 cm), Vecstar (35 cm), 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.

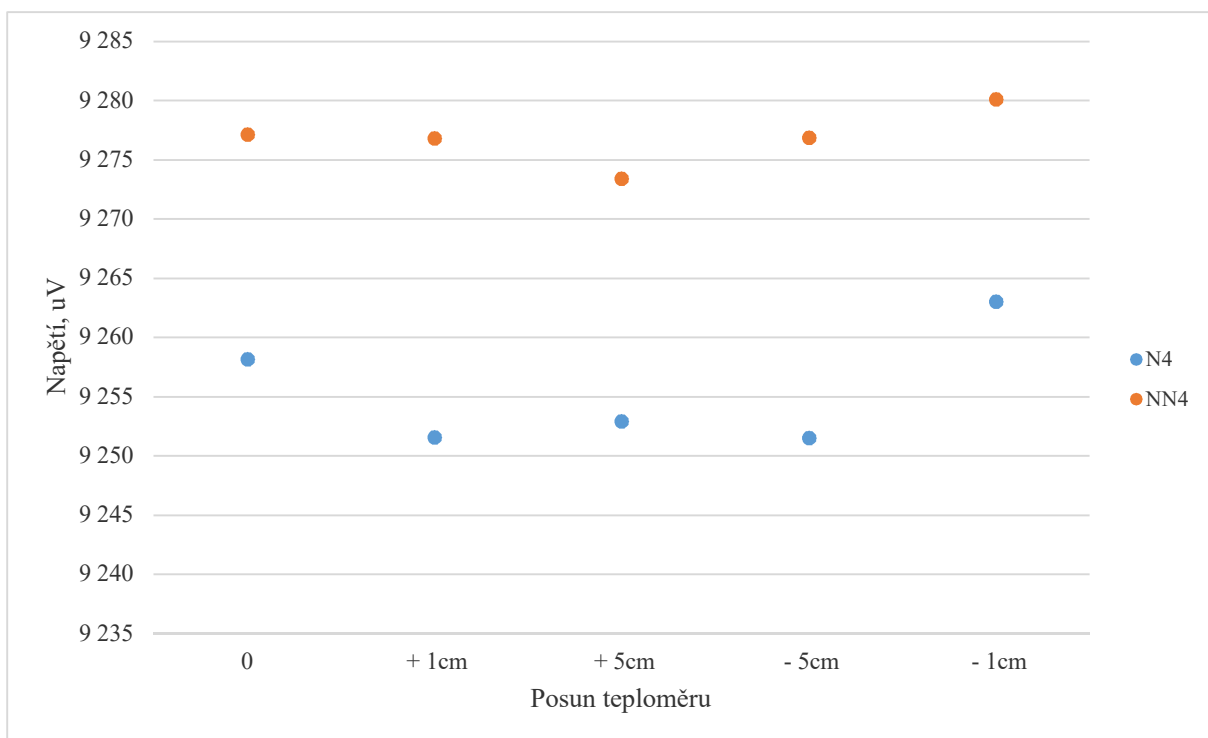


Obrázek 6: Výsledky měření pro termoelektrický snímač teploty typ S v různých zařízeních

Zatím zde byly řešeny pouze TC z drahých kovů. Následující grafy popisují typické chování TC typu N, které bylo měřeno ve stabilní solné lázni s hloubkou ponoření 40 cm. Na obrázku (Obrázek 7) je zaznamenán nárůst napětí u TC po povytažení a na obrázku (Obrázek 8) naopak pokles naměřeného napětí. Testováno bylo 6 TC stejného typu od jednoho výrobce. Z výsledků měření je patrné, že každý kus má své specifické chování, které bez experimentů nelze odhadnout.



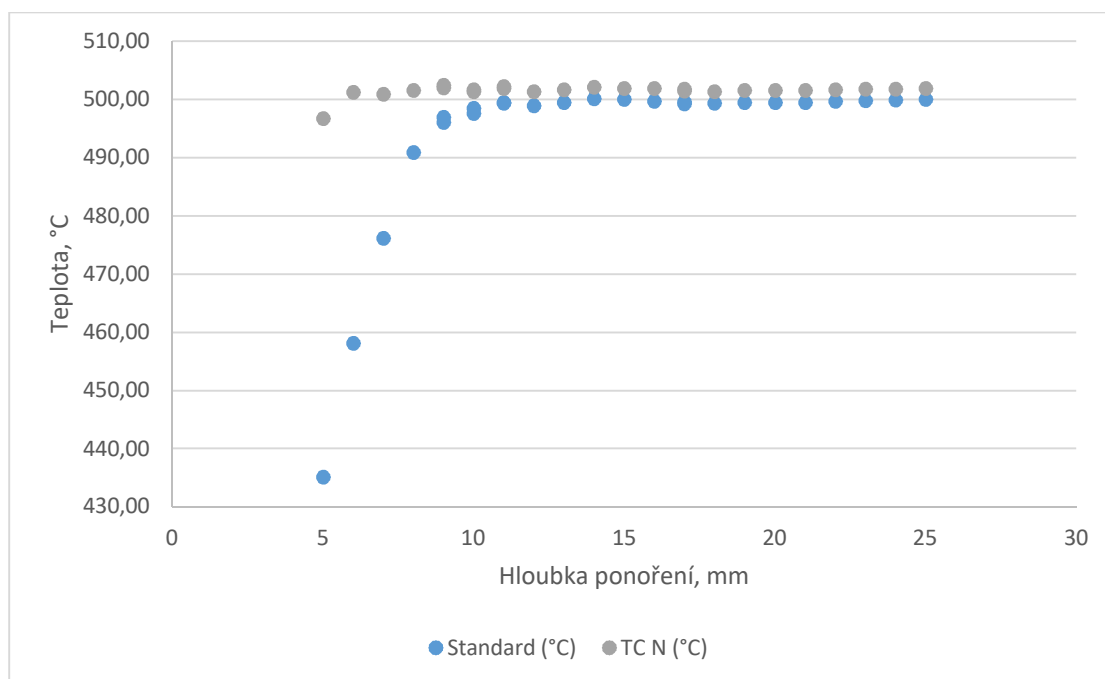
Obrázek 7: Vliv změny ponoru při měření TC typ N



Obrázek 8: Vliv změny ponoru při měření TC typ N

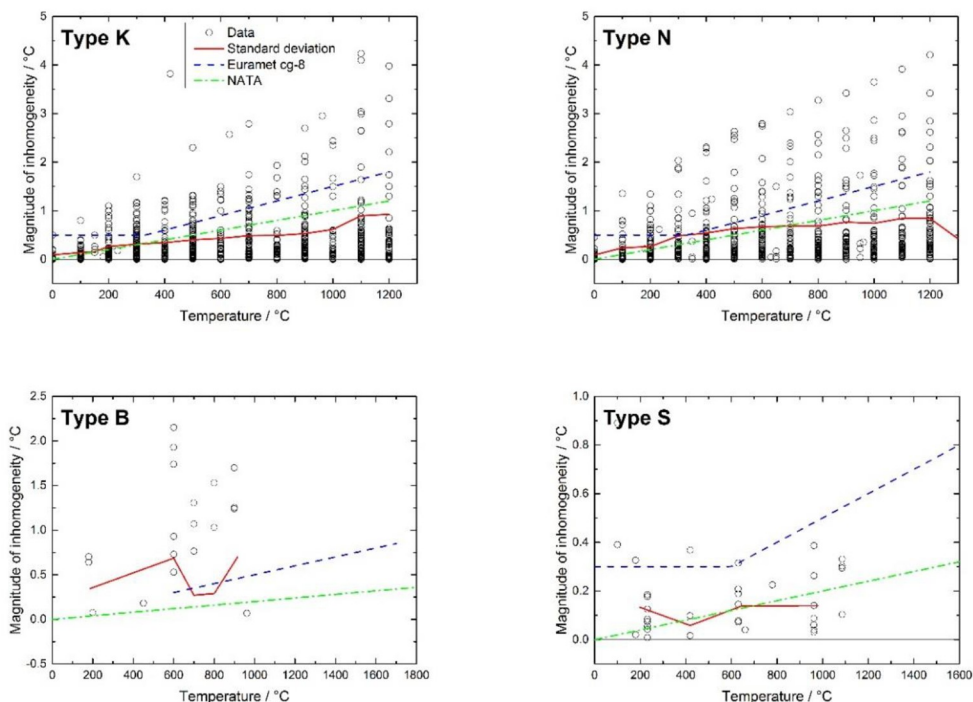
Pokud se pomine vlastnost zařízení, měření s TC je zatíženo nevyzpytatelnou vlastností tzv. nehomogenitou. Samotná nehomogenita TC je způsobena nekonzistencí mezi slitinami kovů vlivem teplotních šoků, mechanického namáhání a velkého počtu provozních hodin. Těmito vlivy mohou vznikat paralelní TC, které vytváří další napětí. Pokud se při kalibraci TC toto měření neprovádí nebo nemůže být z nějakého důvodu provedeno, tak se v takových případech použije hodnota 20 % maximální dovolené chyby pro třídu 2. Hodnocení na závěr tedy je, že hloubka ponoření TC jde ruku v ruce s homogenitou samotného TC.

Následující obrázky se zabývají problematikou, kdy se měří společně IPRT a TC. V tomto případě se jedná o IPRT 100 Ω , který je použit jako etalon pro kalibraci TC typu N. TC je měřidlo, jehož sensor je možné popsat jako „bodový“ (kulička – spojení vodičů). Na rozdíl od toho má sensor IPRT (SPRT) délku 2 až 4 cm. Existují v různých provedeních, nejčastěji je používán design navinutého drátku platiny na tzv. kostře. Díky rozdílnosti velikosti sensorů se jejich citlivosti liší. Následující obrázek reprezentuje experiment, kdy byly oba typy teploměrů vytahovány z pece. IPRT (modré značky) od hloubky ponoru 13 cm ukazoval zkreslený údaj. TC díky bodovému senzoru chybu zaznamenal až při hloubce ponoru 5 cm.



Obrázek 9: Rozdílné snímání teploty mezi IPRT a TC typ N

V současné době probíhají práce na úpravě postupu pro kalibraci termoelektrických článků EURAMET CG-8. Jako podklady pro jednotlivé hodnoty homogenity různých typů termoelektrických článků budou brána v úvahu následující data:



Obrázek 10: Různé hodnoty homogenit termoelektrických článků

4.3.2. Odporové snímače teploty

Odporové teploměry mají své nezpochybnitelné místo prakticky ve všech odvětvích průmyslu pro svou přesnost, relativně nízkou cenu a možnost využití v nejrůznějších aplikacích (ať už pro měření teploty hořlavých tekutin, jako součást měřidel tepla v potrubích, či pro měření teploty vzduchu v meteorologických aplikacích). Existuje nepřeberné množství provedení, avšak nejsledovanějším druhem jsou tzv. IPRT (*Industrial Platinum Resistance Thermometer*). Od tzv. SPRT (*Standard Platinum Resistance Thermometer*) se liší nižší čistotou platiny, a tudíž nesplňují podmínky pro vyhodnocování podle interpolačního aparátu mezinárodní teplotní stupnice (ITS-90 [9]). Na následujících řádcích jsou uvedeny nejvýznamnější zdroje nejistoty měření při kalibraci odporového teploměru (spojené s jeho vlastnostmi), které je třeba sledovat pro dosažení relevantních hodnot nejistoty kalibrace.

SPRT nebo IPRT?

Dělení odporových teploměrů na první a druhý řád (a dále pak na ostatní) již není v současné době preferováno. Uživatel si může zvolit za etalon i průmyslový teploměr s tím, že jej musí mít odpovídajícím způsobem metrologicky navázán včetně odpovídající nejistoty. Podmínky pro využití interpolačních nástrojů ITS-90 v rozsahu do 660 °C jsou

$$W_{\text{Ga}} \geq 1,11807,$$

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

kde W_{Ga} je poměr odporu v pevném bodě tání galia (29,7646 °C) a odporu v trojném bodě vody (0,01 °C). W_{Hg} je poměr odporu v trojném bodě rtuti

(-38,8344 °C) a odporu v trojném bodě vody (0,01 °C). Tím je garantována potřebná citlivost teploměru a tedy i čistota platiny. Pokud teploměr vyhovuje alespoň jedné z podmínek, lze jej oprávněně považovat za SPRT. Pokud podmínkám nevyhoví, jedná se o IPRT, tedy teploměr průmyslový a před využitím některého z matematických aparátů (ITS-90, ČSN EN 60751, obecný polynom, apod.) k popisu jeho chování by měl být proveden průzkum vhodnosti dané interpolace.

Často nemáme k dispozici kyvety trojného bodu vody nebo neměříme hodnoty W_{Ga} či W_{Hg} . Čistota platiny se však dá odhalit i podle koeficientu α . Platí následující vztah

$$\alpha = \frac{R(100\text{ °C}) - R(0\text{ °C})}{100\text{ °C} \cdot R(0\text{ °C})},$$

tedy $\alpha_{\text{SPRT}} \geq 0,003920\text{ °C}^{-1}$, $\alpha_{\text{IPRT}} < 0,003920\text{ °C}^{-1}$ (většinou okolo hodnoty $0,00385\text{ °C}^{-1}$). „Průmyslovost“ teploměru se dá zjistit ještě jednodušeji:

pro IPRT je $R(100\text{ °C})/R(0\text{ °C}) < 1,392$ (typicky okolo 1,385) a

pro SPRT platí $R(100\text{ °C})/R(0\text{ °C}) \geq 1,392$.

Nejistoty kalibrace – CMC vs. realita

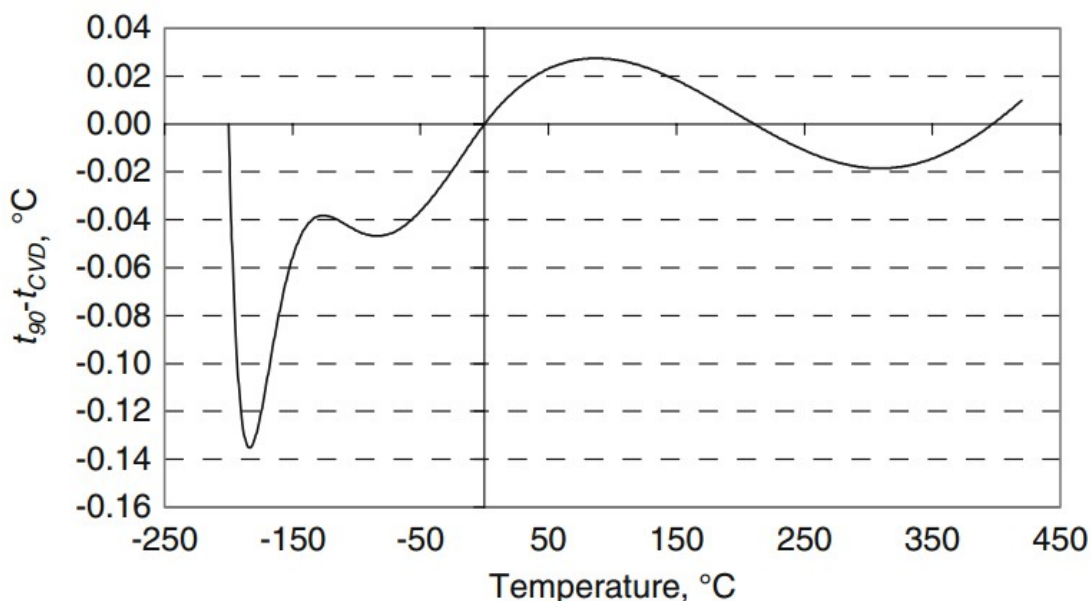
Přestože se nejistota kalibrace liší v závislosti na konkrétním měřidle, některé kalibrační laboratoře ke každému kalibračnímu listu přiřazují hodnoty nejistot schválené příslušným akreditačním orgánem jako CMC, tedy nejnižší dosažitelné. CMC by ve skutečnosti mělo sloužit jako kontrola toho, jestli se pracovník nedopustil chyby při výpočtu nejistoty a nevypočetl hodnotu nižší, než je ta nepodkročitelná. Rozpočet nejistoty se tedy optimálně počítá pro každou naměřenou teplotu a každý konkrétní teploměr (při každé kalibraci). V technické praxi se často připraví vzorové výpočty pro jednotlivé typy nejčastěji kalibrovaných teploměrů a ty se potom používají. Zde by ale měla být hodnota nejistoty kalibrace odpovídajícím způsobem navýšena oproti hodnotám CMC.

Nejistota interpolace

Používáme-li interpolační aparát ITS-90 v případě IPRT, můžeme se dopouštět chyby interpolace okolo $0,05\text{ °C}$ v rozsahu (-180 až 0) °C a zhruba $0,01\text{ °C}$ v rozsahu (0 až 420) °C. Pokud však při kalibraci není provedena analýza vhodnosti použité interpolační funkce, je třeba tyto chyby vzít v úvahu jako příspěvek celkové nejistoty měření. To platí pro určení nejistoty měření etalonu v AKL.

Callendar-Van Dusenovy rovnice (dále jen CVD) se do roku 1990 používaly k popisu jak IPRT, tak SPRT. Dnes se využívají pouze k popisu chování průmyslových odporových teploměrů.

Pro nadnulové teploty využívá aparát ITS-90 v některých podrozsazích odchylkovou funkci druhého řádu a CVD jsou druhého řádu samy o sobě. Mnoho studií také ukázalo, že míra vhodnosti využití aparátu ITS-90 je nezávislá na koeficientu α , a tudíž je možné jej využít k popisu IPRT. Na následujícím obrázku je znázorněn rozdíl CVD a rovnic využívaných k popisu teploměru podle ITS-90.



Obrázek 11: Příklad rozdílu mezi teplotou vypočtenou dle CVD a podle ITS-90 v rozsahu (-196 až 420) °C

Ani dva teploměry stejného typu od stejného výrobce nemají stejnou charakteristiku, a tudíž ani vhodnost popisu danou funkcí nemusí být stejná. Po každé kalibraci je tedy žádoucí udělat analýzu vhodnosti daného aparátu.

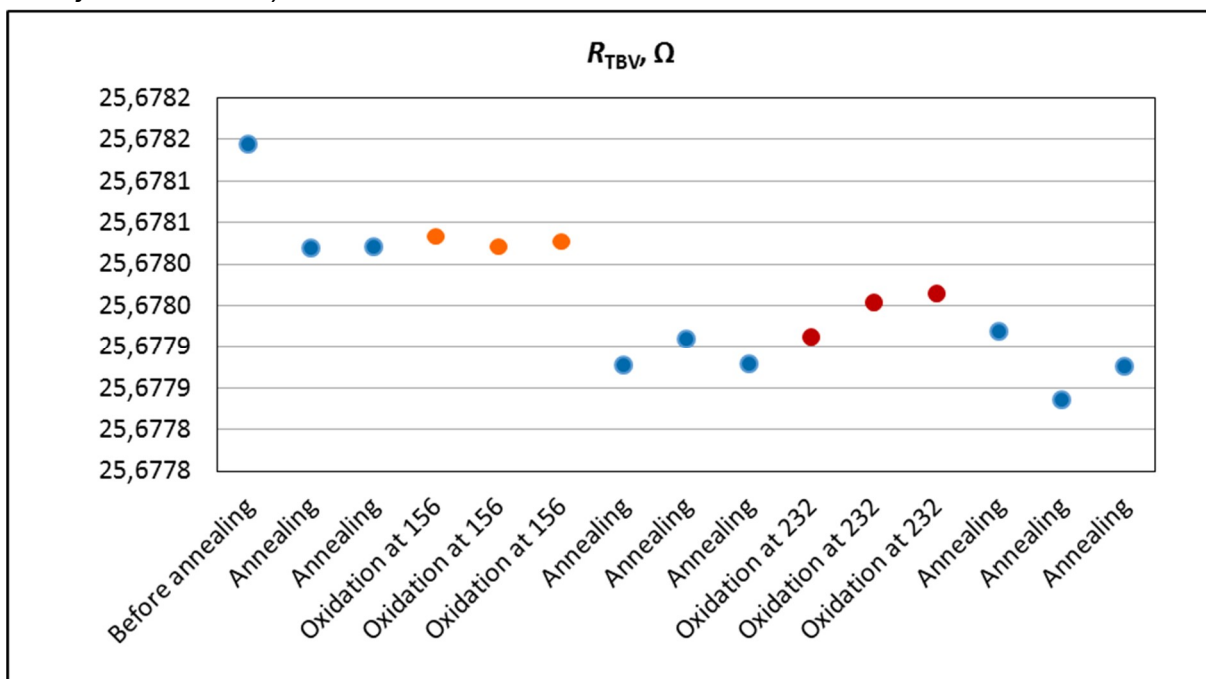
Chyba interpolace v naměřených bodech se určí např. výpočtem teploty z odporu za použití interpolační funkce a konstant, které jsou uvedené v kalibračním listu. Nejistota interpolace je způsobena faktem, že interpolační aparát pouze aproximuje chování teploměru mezi body měřenými. V těchto oblastech ale nemusí teploměr vůbec odpovídat tomu, co je z okolních bodů vypočteno. Proto se nejistota interpolace odhaduje zpravidla jako násobek velikosti chyby interpolace v okolních bodech (hodnota 1,2 bývá adekvátní).

Stabilita IPRT

Průmyslové teploměry jsou vyráběny tak, aby na rozdíl od SPRT odolávaly mechanickým šokům. Odlišná konstrukce je činí velmi robustními, ale zároveň snižuje stabilitu hodnoty základního odporu. Při teplotním cyklování vedou rozdíly v teplotní roztažnosti platiny a ostatních materiálů k vyšší míře pnutí (resp. kontrakcí) odporového drátku a ke změnám odporu v důsledku rozměrových deformací. Žíháním lze odstranit důsledky pnutí, ale ne důsledky změn rozměrů. Dalším důvodem nestability je kontaminace platiny při vyšších teplotách kvůli difuzi částic z okolního materiálu. Přestože opakovatelnost měření s IPRT nedosahuje kvalit SPRT, je stále lepší než u termoelektrických článků.

Před každým použitím etalonu by se měla změřit hodnota jeho základního odporu. Tato hodnota se s časem mění, a proto je její velikost uvedená v kalibračním listu platná pouze v době kalibrace. Tento drift je především způsoben oxidací platiny při teplotách v okolí (100 až 250) °C. Žíháním a vystavením teplotám nad 420 °C se pak oxidy rozkládají. Bez pravidelného měření základního odporu se můžeme dopouštět zásadních nepřesností v měření. Naopak sledováním vývoje se dá včas odhalit např. mechanický defekt. S časem se nemění jen základní odpor, ale také celá charakteristika teploměru. Proto by se měl pravidelně kalibrovat v závislosti na

četnosti a teplotě používání (etalon nejméně jednou za pět let, pracovní etalon pak ideálně jednou za rok).



Obrázek 12: Příklad vývoje hodnoty základního odporu SPRT v závislosti na předchozím vystavení teplotám 156 °C, 232 °C a žhání při teplotě vyšší než 420 °C

Složka nejistoty je kvůli nestabilitě pro každý teploměr odlišná a pohybuje se od desetin mK pro špičkové teploměry přes mK pro etalony SPRT až po setiny stupně pro IPRT.

Vliv kabeláže

Vliv vodičů lze zanedbat při čtyřvodičovém zapojení teploměru, v ostatních případech není prakticky možné dosáhnout přesnosti měření lepší než 0,2 °C, pokud není provedena příslušná korekce. Parazitní termoelektrické napětí bývá způsobeno velkými teplotními gradienty v měřicím obvodu a růzností použitých materiálů. Může být až v řádu mikrovoltů a v případě stejnosměrného měření běžně limituje přesnost měření na 0,02 °C. Řešením je měření střídavé, ať už s využitím střídavých odporových mostů, nebo stejnosměrných multimetrů (mostů) s komutací měřicího proudu.

Vliv samoohřevu

Stejně jako vliv parazitního termoelektrického napětí a odporu vodičů je nutné sledovat vliv samoohřevu odporového elementu. Eliminace samoohřevu prakticky znamená měřit při nulovém proudu, tedy měřit minimálně při dvou hodnotách proudu a provést příslušnou korekci. Měřicí proud procházející odporovým elementem má za následek vznik Jouleova tepla. Element má pak většinou vyšší teplotu než jeho okolí a teploměr tak měří odlišnou teplotu než jakou okolní prostředí má. Vliv samoohřevu způsobuje chyby typicky (0,002 až 0,02) °C pro teploměry se základním odporem okolo 100 Ω při měření v kapalinových lázních. Při měření na vzduchu se pak může jednat i o desetiny stupně Celsia. Míra samoohřevu je funkcí teploty a je úměrná druhé mocnině měřicího proudu.

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

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

kde R_1 je odpor při proudu I_1 (zpravidla nižším), R_2 je odpor při proudu I_2 . Pokud je $I_1 = 1 \text{ mA}$, a $I_2 = \sqrt{2} \text{ mA}$ pak $R_0 = R_1 - (R_2 - R_1)$, tedy rozdíl $R_2 - R_1$ udává hodnotu samoohřevu pro měřicí proud 1 mA.

Mnoho zařízení však změnu hodnoty měřicího proudu neumožňuje a nelze je tak použít pro měření vlivu samoohřevu. Pokud je teploměr používán ve stejných prostředích (lázně, pece, malé průmyslové pevné body) a při stejném proudu jako při kalibraci, lze považovat vliv samoohřevu na přesnost měření za zanedbatelný. V ostatních případech je nezbytné velikost vlivu zjistit, nebo počítat se složkou nejistoty, která značně zvýší její výslednou hodnotu. Počítat s hodnotami deklarovanými výrobcem teploměru by nebylo vůbec moudré, neboť se v drtivé většině případů jedná pouze o hodnoty pro rozsah (0 až 30) °C. V tomto rozsahu se totiž vliv samoohřevu zjišťuje při typových zkouškách před uvedením daného měřidla na trh.

Tabulka 1: Výsledek měření vlivu samoohřevem v rozsahu (0 až 30) °C

Teploměr	Prostředí	Samoohřev pro 1 mA, °C
IPRT	vzduch	0,029 až 0,786
IPRT	lázeň	0,007 až 0,025
IPRT	měděný blok	0,006 až 0,018
IPRT vyšší čistoty platiny	lázeň	0,007 až 0,010

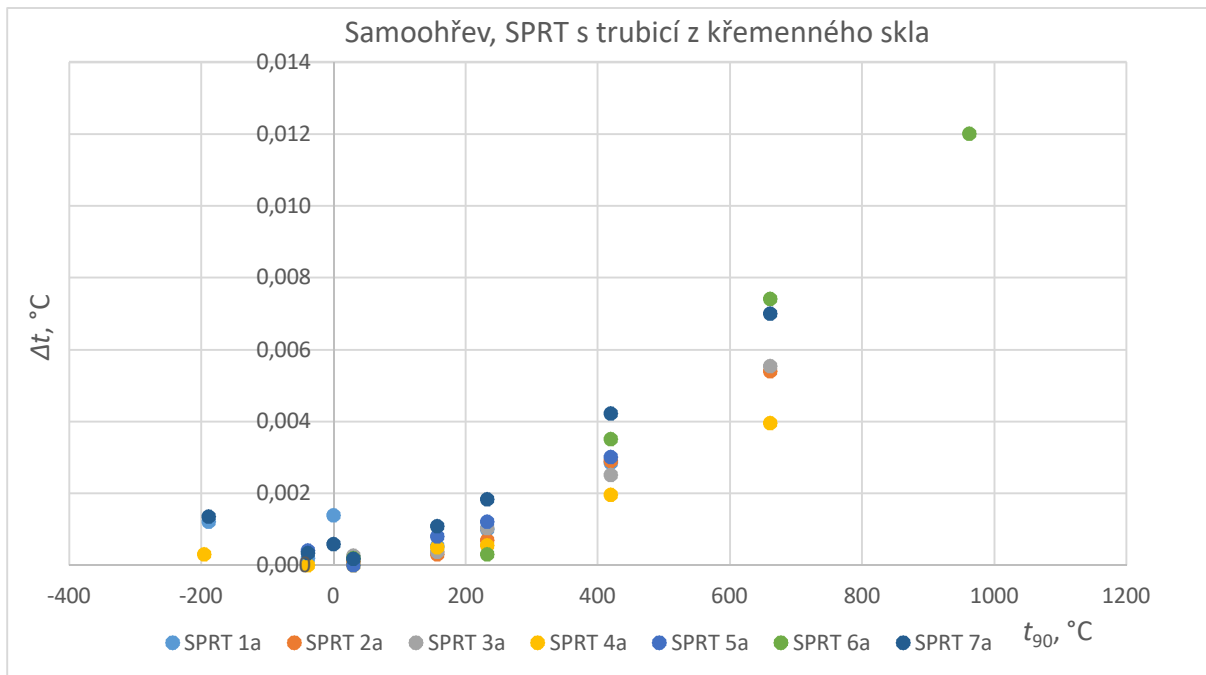
Je zřejmé, že vliv samoohřevu se liší pro každý konkrétní teploměr, druh a teplotu prostředí. Proto byla provedena série experimentů s různými typy teploměrů. Na grafech níže jsou zobrazeny typické hodnoty samoohřevu změřené s využitím typů teploměrů uvedených v následující tabulce. Samoohřev byl zkoumán pro měřicí proud o velikosti 1 mA.

Tabulka 2: Seznam typů teploměrů použitých pro měření velikostí samoohřevu

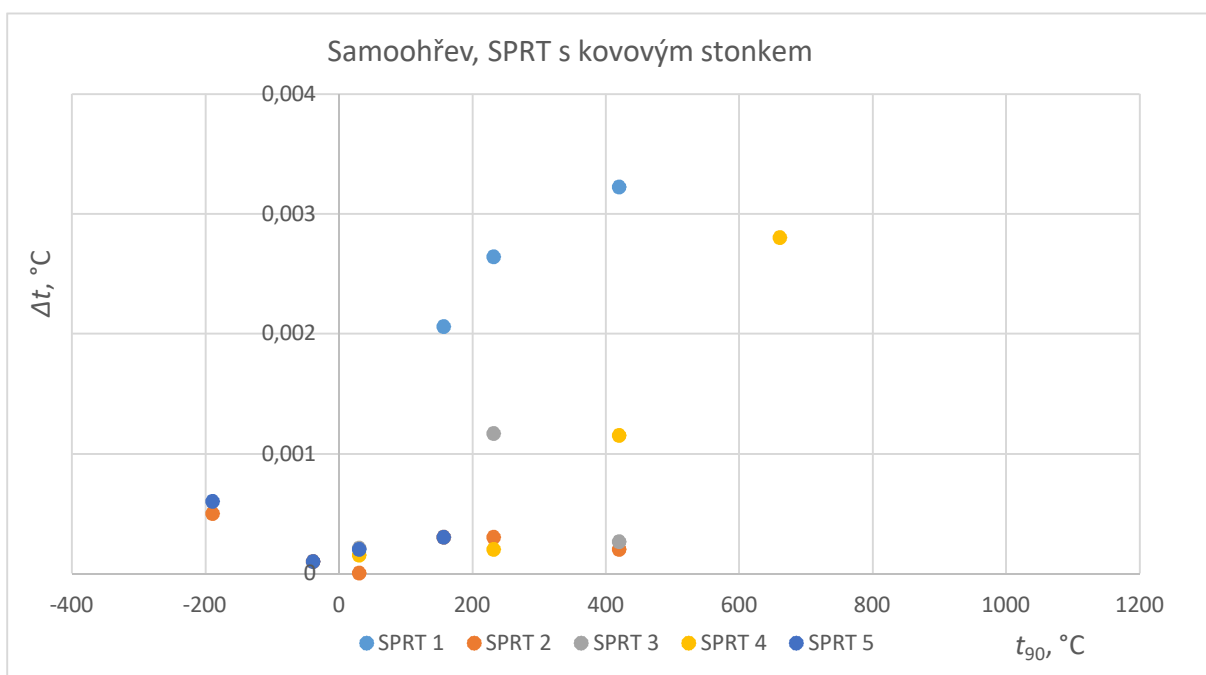
Druh teploměru	Ochranná trubice	Výrobce	Typ	l, cm	Ø, mm
IPRT	kovová	Ametek	STS-100 A 500	50	4
IPRT	kovová	Ametek	T-R100-300	50	3
IPRT	kovová	Ametek	T-R100-600	35	6
IPRT	kovová	Krohne	TRA-P 10 Special	39	6
IPRT	kovová	Rosemount	0065	44	4
IPRT	kovová	WIKA	CTP5000-450-B	35	6

Druh teploměru	Ochranná trubice	Výrobce	Typ	l, cm	Ø, mm
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

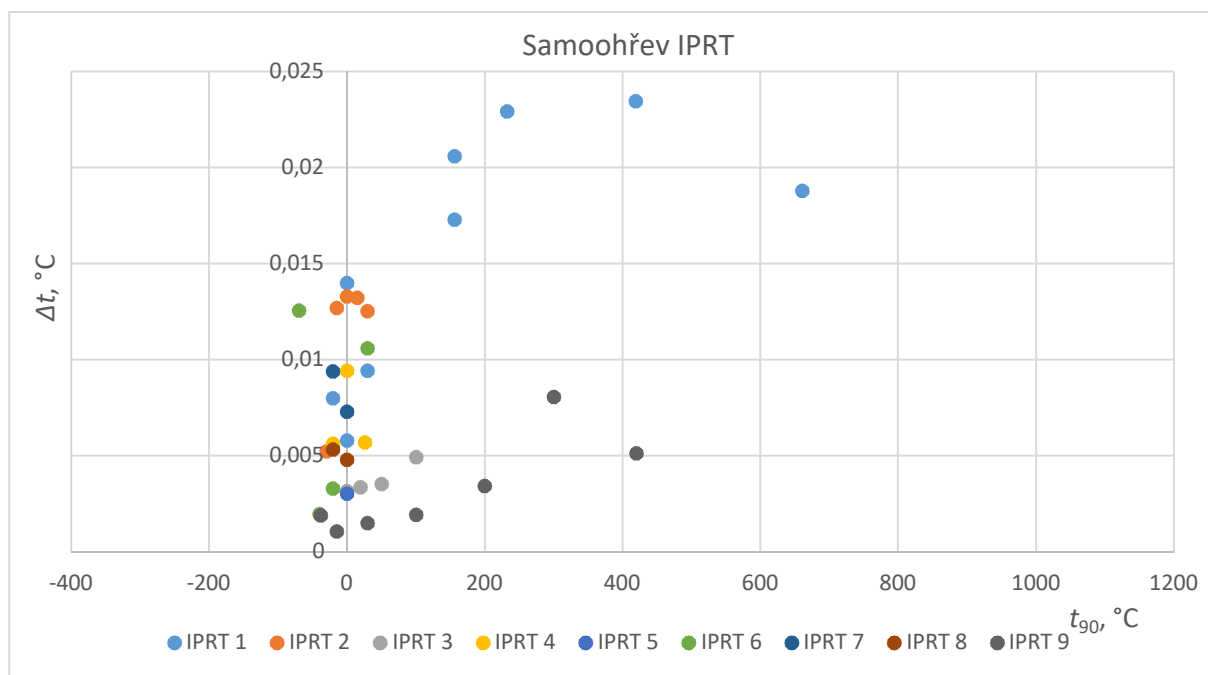
Míra samoohřevu byla spočtena v jednotkách elektrického odporu a následně podle citlivosti každého testovaného teploměru přepočtena na ekvivalent ve °C. Ve většině případů bylo zkoumáno více exemplářů daného typu teploměru. Protože bylo zjištěno, že v rámci daného typu mají teploměry takřka totožnou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



Obrázek 13: Míra samoohřevu ve $^\circ\text{C}$ v závislosti na teplotě prostředí, SPRT s trubicí z křemenného skla



Obrázek 14: Míra samoohřevu ve $^\circ\text{C}$ v závislosti na teplotě prostředí, SPRT s kovovým stonkem



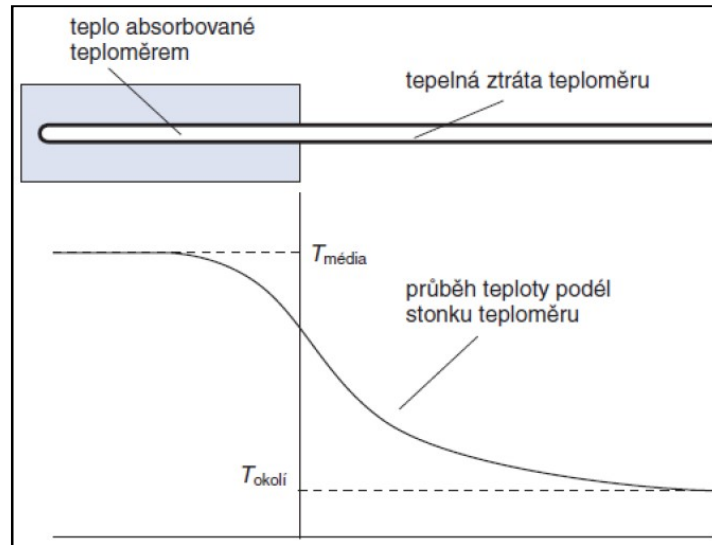
Obrázek 15: Míra samoohřevu ve °C v závislosti na teplotě prostředí, IPRT

Bez ohledu na provedení vnějšího obalu byl pro všechny zkoumané SPRT samoohřev velmi podobný. Z 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 budget nejistoty měření o setiny °C, nebo míru samoohřevu změřit při každé teplotě ve které je použit nebo kalibrován.

Odvod tepla a vliv ponoru teploměru

Odporový element ideálního teploměru má stejnou teplotu jako médium, ve kterém je ponořen. Vodiče a plášť typického IPRT však bohužel umožňují tepelnou výměnu mezi médiem a okolním prostředím. Odvod (resp. přívod) tepla se nejvíce projevuje u teploměrů s kovovým pláštěm.

Průmyslové teploměry mohou mít a etalony mají odporový element o velikosti až jednotek cm. Nedostatečný ponor teploměru se může projevit rozdílem teploty naměřené při daném ponoru a při ponoření plném. Většinou se velikost případné nedostatečnosti ponoru odhaduje jako rozdíl hodnot naměřených při plném ponoru a při takovém, který je o 10 % menší než plný.



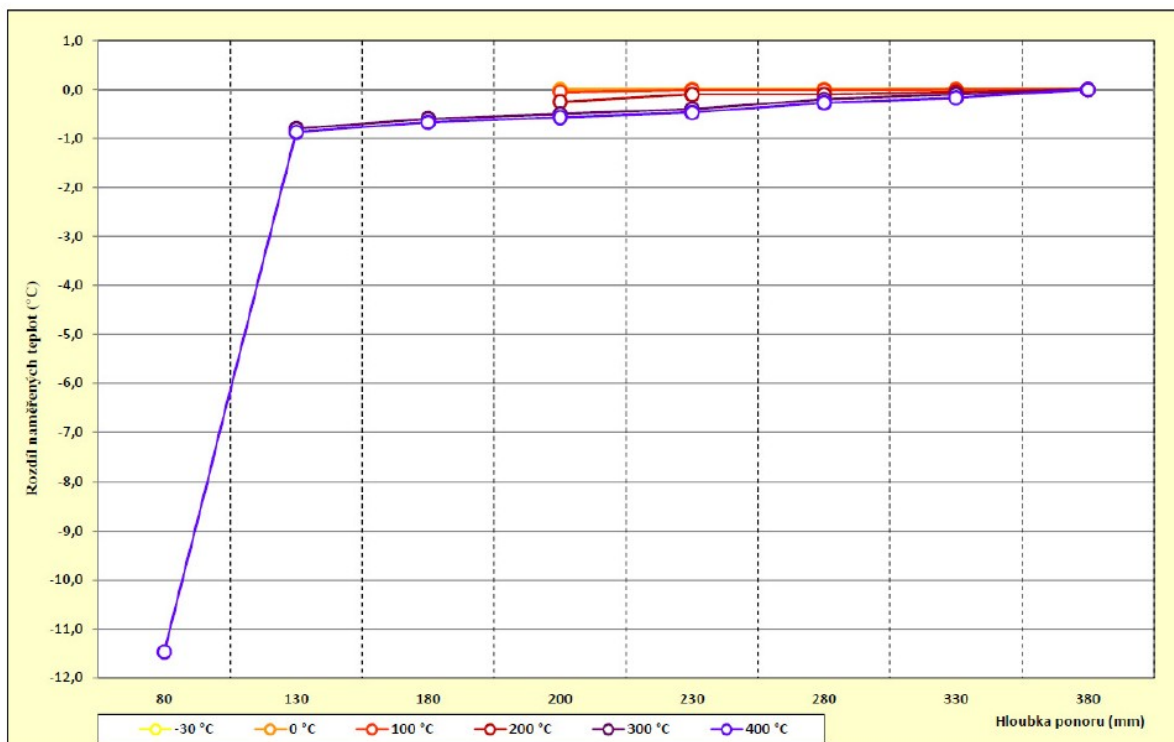
Obrázek 16: Závislost naměřené hodnoty na hloubce ponoru [15]

Pro případ dokonale promíchané kapalinové lázně lze rozdíl měřené a skutečné teploty vyjádřit jako

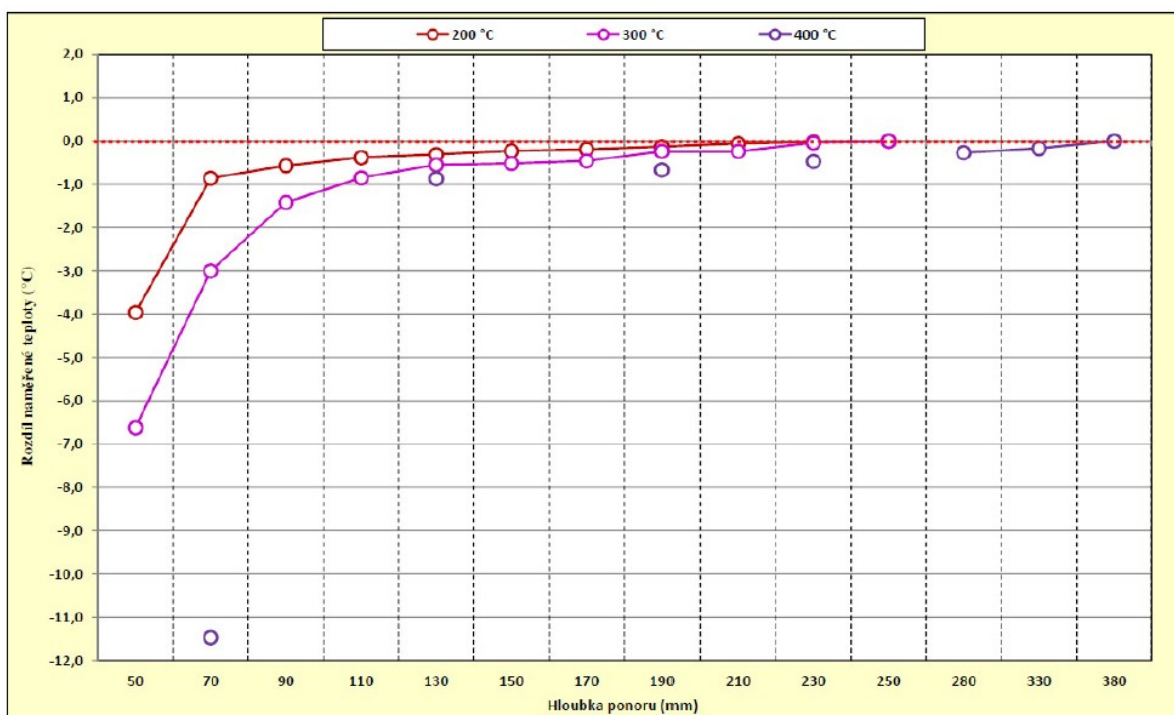
$$\Delta T = (T_{okolí} - T_{média}) k e^{-\frac{L}{D_{ef}}}$$

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

V následujících grafech je ukázán vliv ponoru v různých prostředích. Tyto údaje jsou velmi důležité zejména pro laboratoře, které používají termostaty (ať už kapalinové nebo blokové kalibrátory) s malým ponorem nebo s jiným ponorem než při kalibraci etalonu.



Obrázek 17: Typická chyba ponoru IPRT v kapalinové lázni



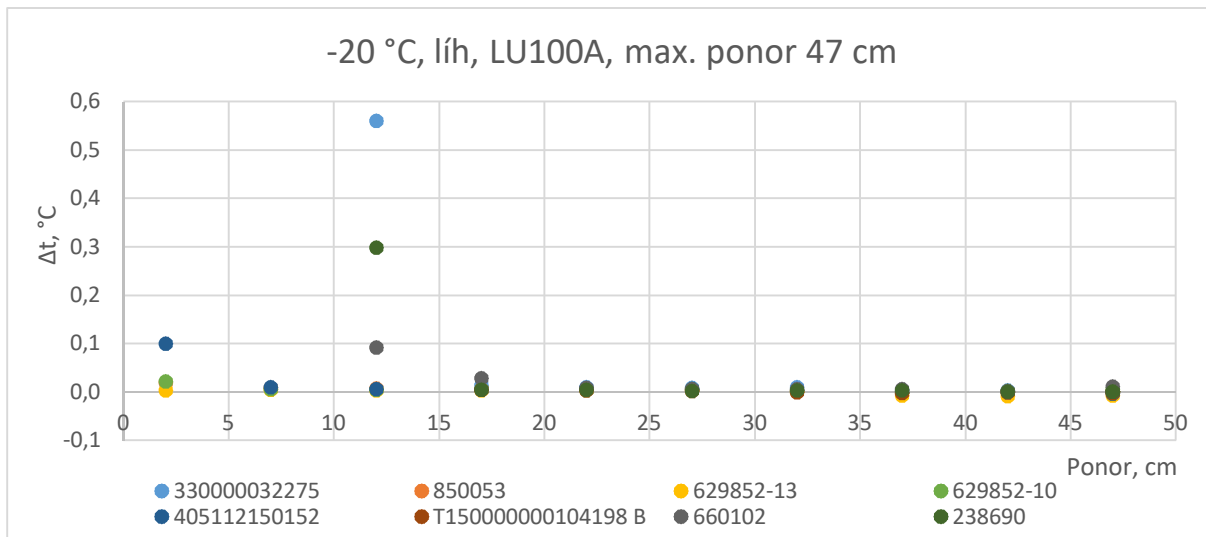
Obrázek 18: Typická chyba ponoru IPRT v blokovém kalibrátoru

Na následujících řádcích bude 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):

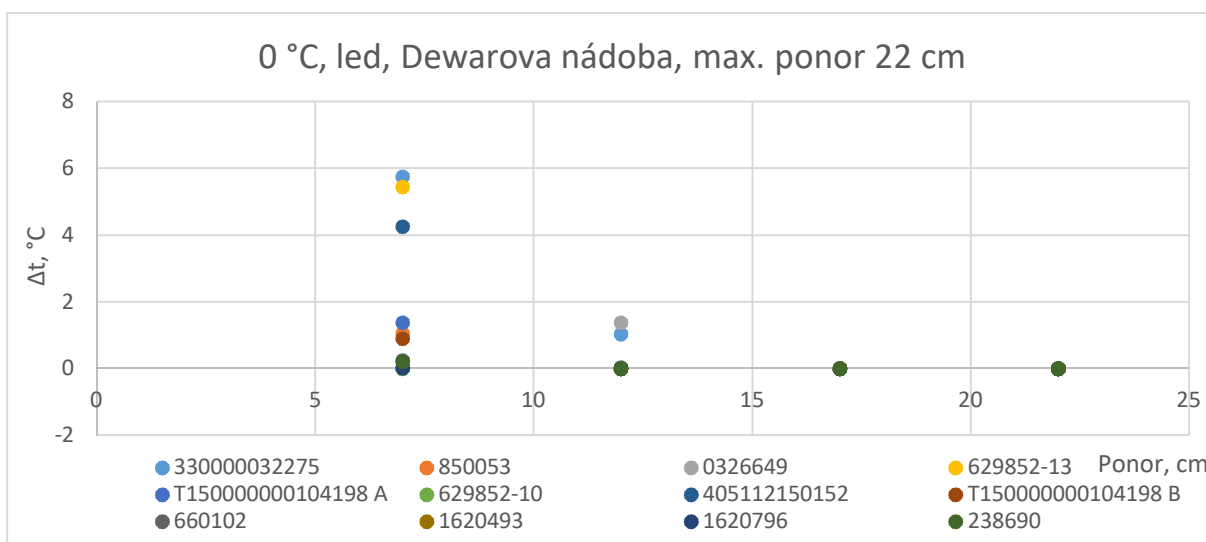
Tabulka 3 Seznam teploměrů použitých pro měření vlivu ponoru

Druh teploměru	Výrobce	Typ	S/N	l, cm	Rozsah, °C
IPRT	ZPA	11215	850053	50	-40 až 420
IPRT	ZPA	0348	405112150152	50	-70 až 500
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 konkrétní teploměr, teplotu a druh prostředí.

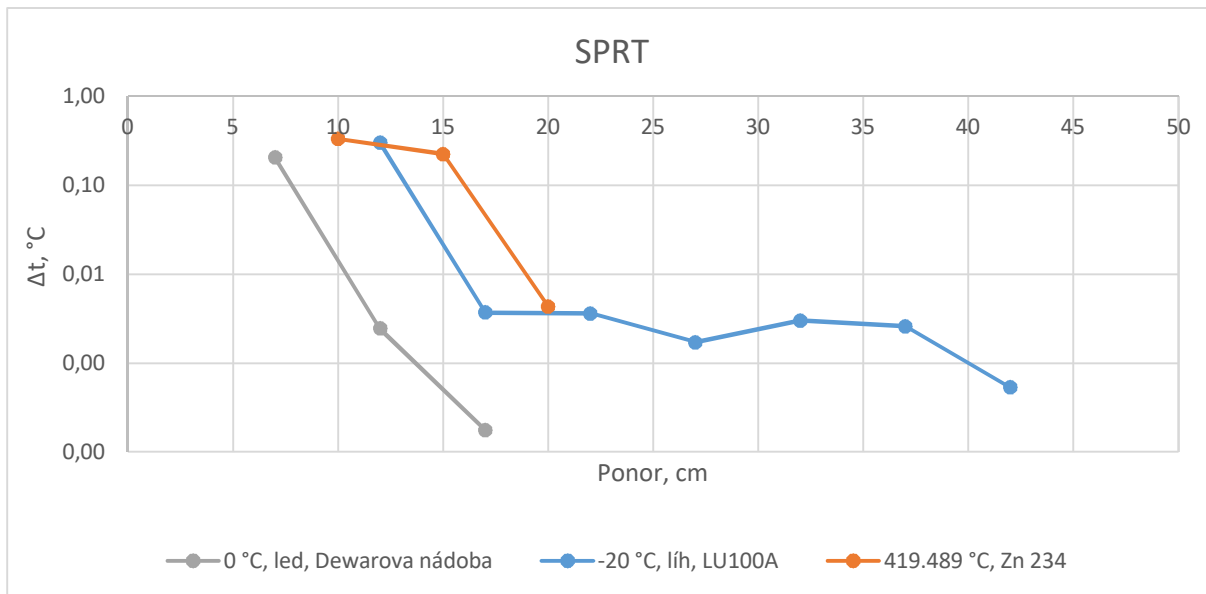


Obrázek 19: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různé teploměry v lihové lázni o teplotě -20 °C

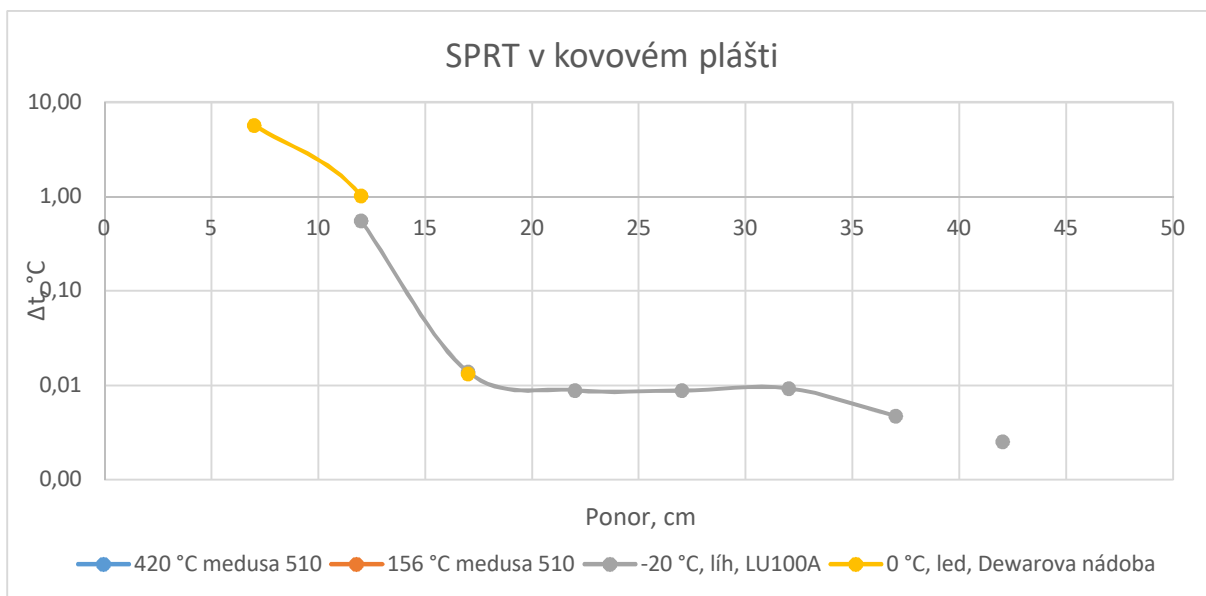


Obrázek 20: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různé teploměry v Dewarově nádobě s ledem, 0 °C

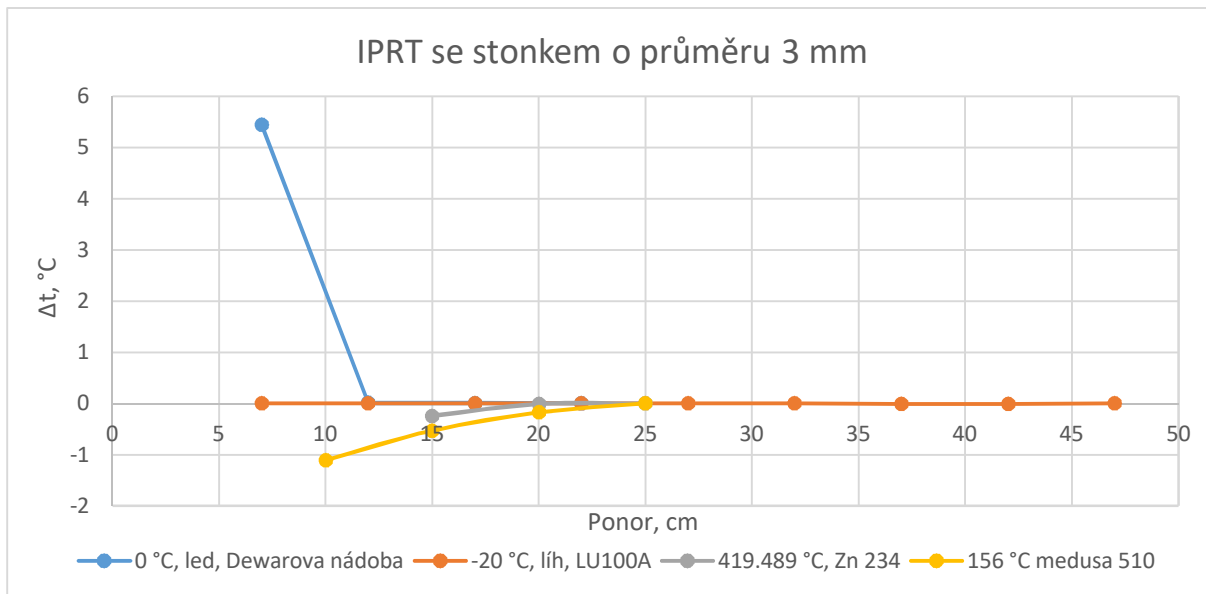
Na následujících grafech jsou vykresleny průměrné závislosti naměřené hodnoty na hloubce ponoření teploměru (pro SPRT a IPRT) v různých zařízeních. *LU100A* zde značí lihovou lázeň, *Zn234* malý pevný bod tání zinku a *Medusa 510* blokový kalibrátor teploty.



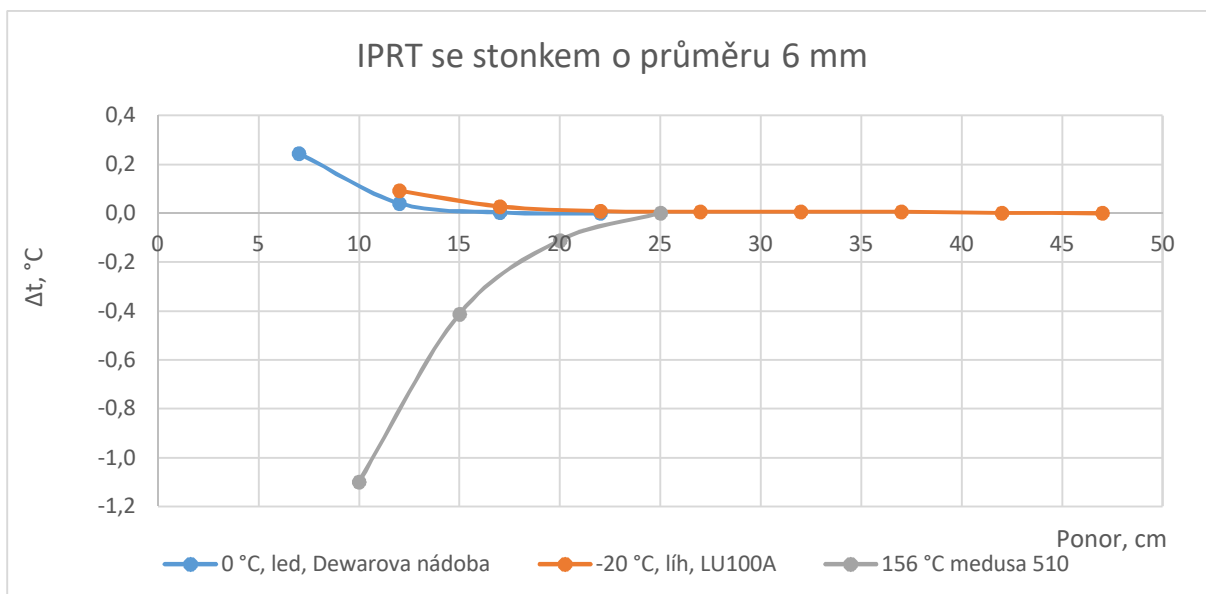
Obrázek 21: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro SPRT



Obrázek 22: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro SPRT v kovovém plášti



Obrázek 23: 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

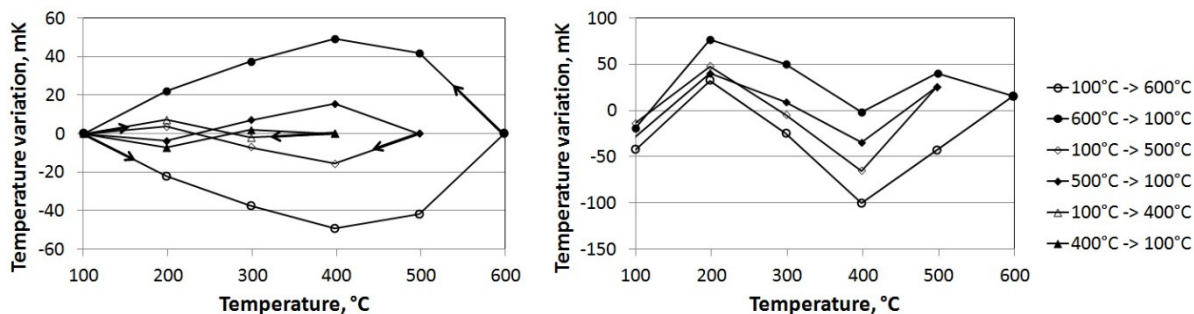


Obrázek 24: Rozdíl mezi teplotou změřenou při dané hloubce ponoru a při ponoru plném pro různá média a teploty; průměrné hodnoty pro IPRT se stonkem o průměru 6 mm

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.

Hystereze

IPRT při teplotním cyklování vykazují hysterezi, což znamená, že mohou mít rozdílnou (ale opakovatelnou) závislost odporu na teplotě podle toho, jestli bylo dané teploty dosaženo ohřátím, nebo ochlazením teploměru.



Obrázek 25: Typický příklad hystereze IPRT [16]

U IPRT je hystereze způsobena třemi hlavními jevy: mechanickým pnutím, vlhkostí a oxidací. U robustnějších provedení lze předpokládat výraznější rozdíly v hodnotách tepelné roztažnosti materiálů, a tudíž vyšší následky mechanického pnutí ve stonku teploměru. Na druhou stranu teploměry s velmi nízkou hysterezí bývají velmi citlivé na mechanické šoky a vibrace (typicky SPRT). Nejvyšší hodnoty hystereze IPRT vypočítané v praxi se pohybují okolo 0,1 % z teplotního rozsahu. Rozdíl mezi nestabilitou teploměru a hysterezí je jemný, avšak hystereze je jev oboustranný a oxidace způsobuje jednosměrnou změnu hodnoty základního odporu. Zjednodušeně lze říci, že hystereze pro danou teplotu (většinou uprostřed teplotního rozsahu kalibrace) je vyhodnocována jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou (při stejné teplotě) dosaženou ohřátím a ochlazením teploměru. Měření vývoje hodnoty základního odporu v průběhu kalibrace a vyhodnocení rozdílu maximální a minimální naměřené hodnoty nelze považovat za měření vlivu hystereze.

Při měření hystereze v lázni je nutné vyloučit hysterezi regulace lázně a teploměr, který monitoruje její teplotu, musí mít hysterezi prakticky nulovou. To byly důvody, proč se měření hystereze v teplotě (na rozdíl např. od tlaku) považovalo vždy za problematické.

Vliv výše uvedených faktorů bývá v technické praxi obtížné přesně stanovit. Pokud nejsou k dispozici přímá experimentální data, je možné pro odhad příslušných složek nejistoty použít typické hodnoty uvedené výše (rovnoměrné rozdělení).

4.3.3. Indikační teploměry

Základní popis a jejich členění

Pod tímto názvem se skrývají všechny typy elektronických teploměrů včetně měřících 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 tisícin 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 číselníkové, tj. tlakové (změna teploty souvisí se směnou tlaku tekutiny) a bimetalické (dvojice pevně spojených kovových pásků s rozdílnou teplotní roztažností).

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. Teplotní sondou elektronického teploměru může být odporový snímač teploty kovový nebo polovodičový případně termoelektrický snímač.

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

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

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:

- Jednouúčelové
- Nastavitelné
- Inteligentní

Jednouúčelové 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 nejrozšířenější. Jedná se obvykle o programovatelný (pomocí přepínačů nebo speciálním SW vybavením) přístroj, který má na výstupu nějaký unifikovaný signál (nejčastěji 4-20 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 nemyslitelné.

Vlastní složky nejistot odpovídají nejistotám pro jednotlivé senzory, nebudou zde proto znovu probírány.

4.3.4. Povrchové teploměry

Při kalibraci sond pro měření povrchových teplot je nutné znát chování všech zařízení, které vstupují do procesu kalibrace a to včetně zahrnutí rozdílných podmínek při kalibraci etalonů a pracovních měřidel (zejména podmínky provozu).

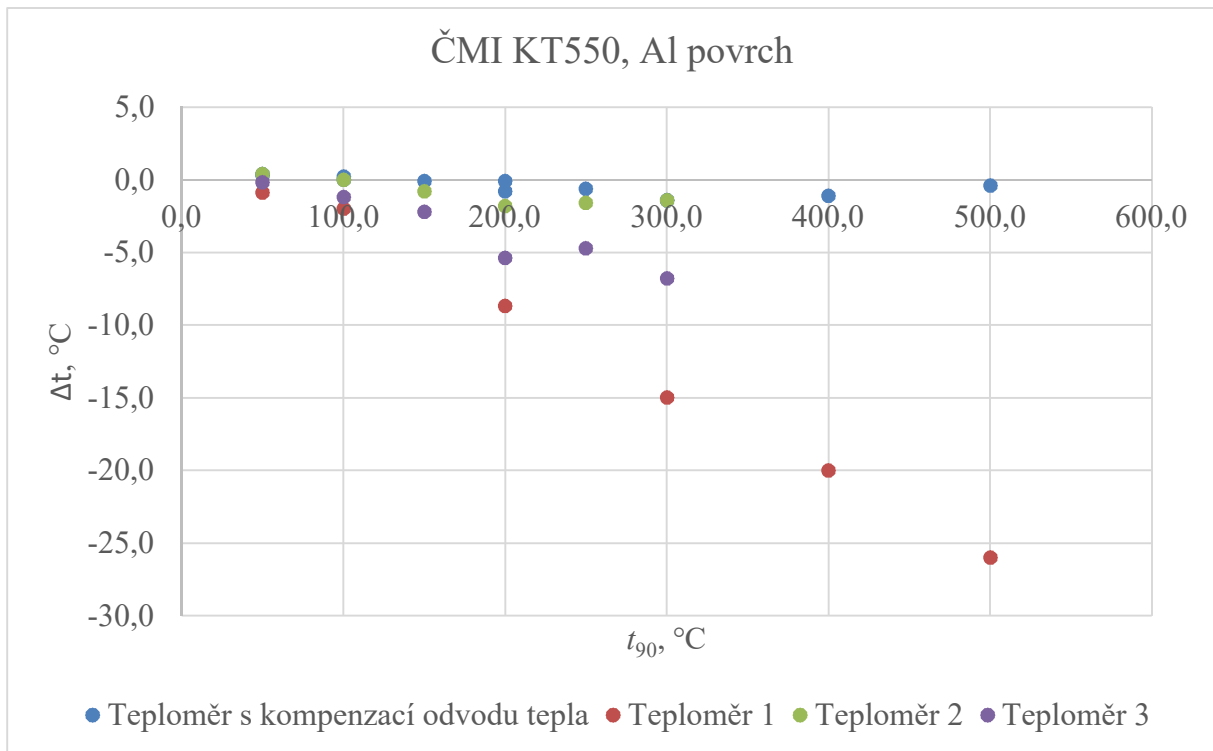
Při kalibraci odporového snímače teploty porovnáním s etalonovým IPRT nebo SPRT uvažujeme následující složky celkové nejistoty.

- Kalibrace etalonového teploměru (normální rozdělení)
- Drift etalonu od poslední kalibrace (rovnoměrné rozdělení)
- Odvod/přívod energie sondou (rovnoměrné rozdělení)
- Krátkodobý drift (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv úhlu náklonu sondy (rovnoměrné rozdělení)
- Nejistota typu A teploměru (normální rozdělení)
- Nejistota interpolace etalonového teploměru (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv okolní teploty (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv kolísání okolní teploty (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv proudění vzduchu (rovnoměrné rozdělení)
- Opakovatelnost realizace teploty povrchu (rovnoměrné rozdělení)
- Nestabilita teplotního pole povrchu (rovnoměrné rozdělení)
- Nehomogenita teplotního pole povrchu (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv nerovnosti měřeného povrchu (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv oxidace měřeného povrchu (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv náklonu měřeného povrchu (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv přítlaku (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv rozdílné dynamiky měření (rovnoměrné rozdělení)
- Vliv rozdílné hmotnosti sond (rovnoměrné rozdělení)
- Ostatní vlivy (normální rozdělení)

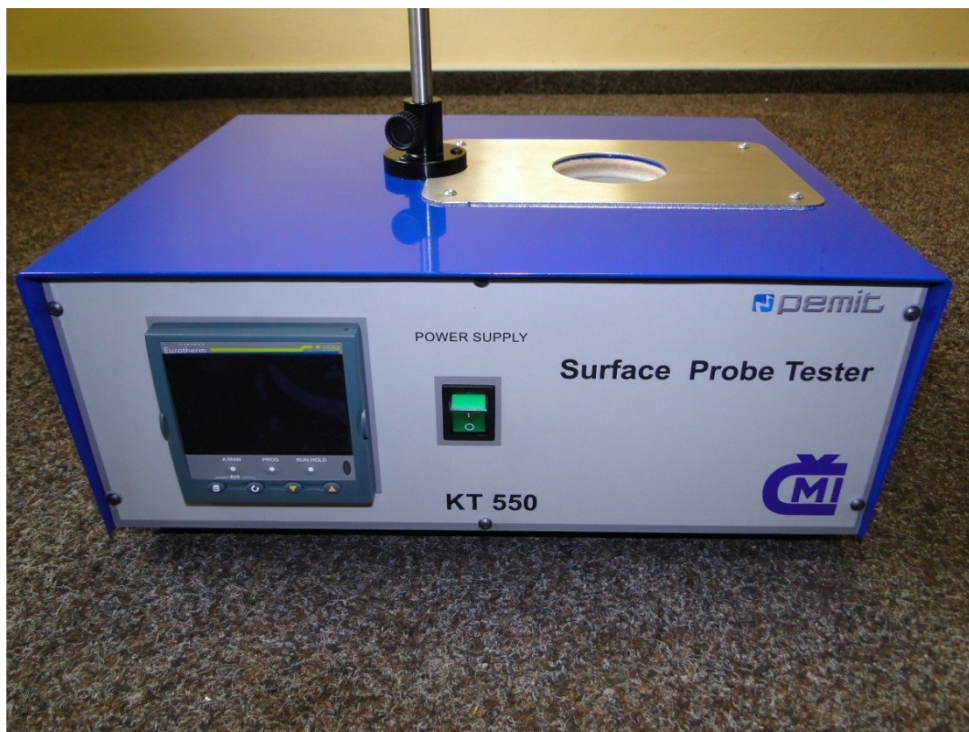
Některé složky celkové nejistoty měření jsou uvedeny na následujících řádcích.

Odvod/přívod energie sondou

Velikost tohoto příspěvku do celkového budgetu nejistot se dá odhadnout, pokud je k dispozici teplota s kompenzací odvodu tepla. Na následujícím grafu je příklad porovnání měření teploměry bez kompenzace a teploměrem s kompenzací. Na ose y je vyneseno rozdílné mezi teplotou změřenou daným povrchovým teploměrem a teplotou změřenou termoelektrickým snímačem teploty 1 mm pod povrchem vzorku.



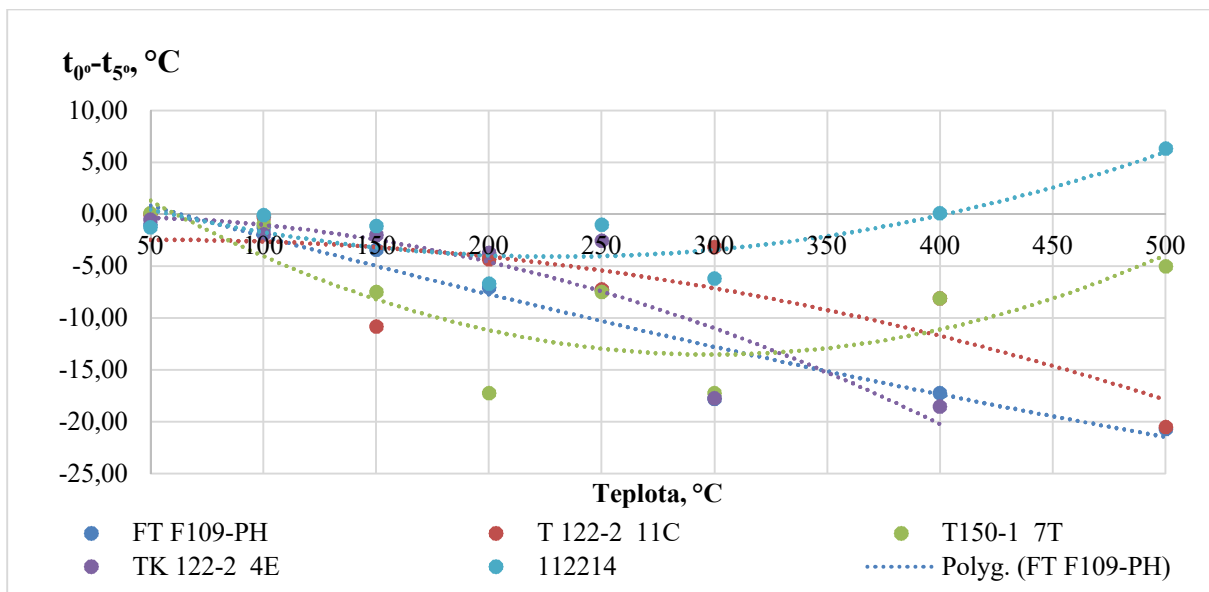
Obrázek 26 Rozdíl mezi teplotou změřenou povrchovým teploměrem a termoelektrickým snímačem teploty 1 mm pod povrchem



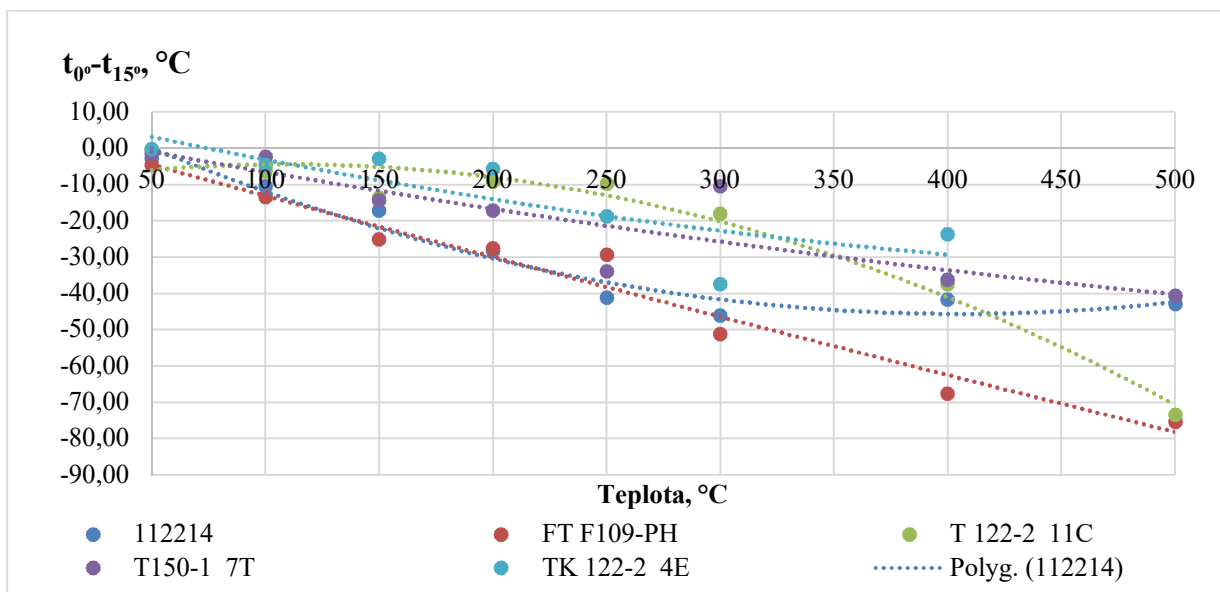
Obrázek 27 Kalibrátor povrchové teploty s Al povrchem, ČMI KT550, použitý ve výše popsaném měření

Vliv úhlu náklonu sondy

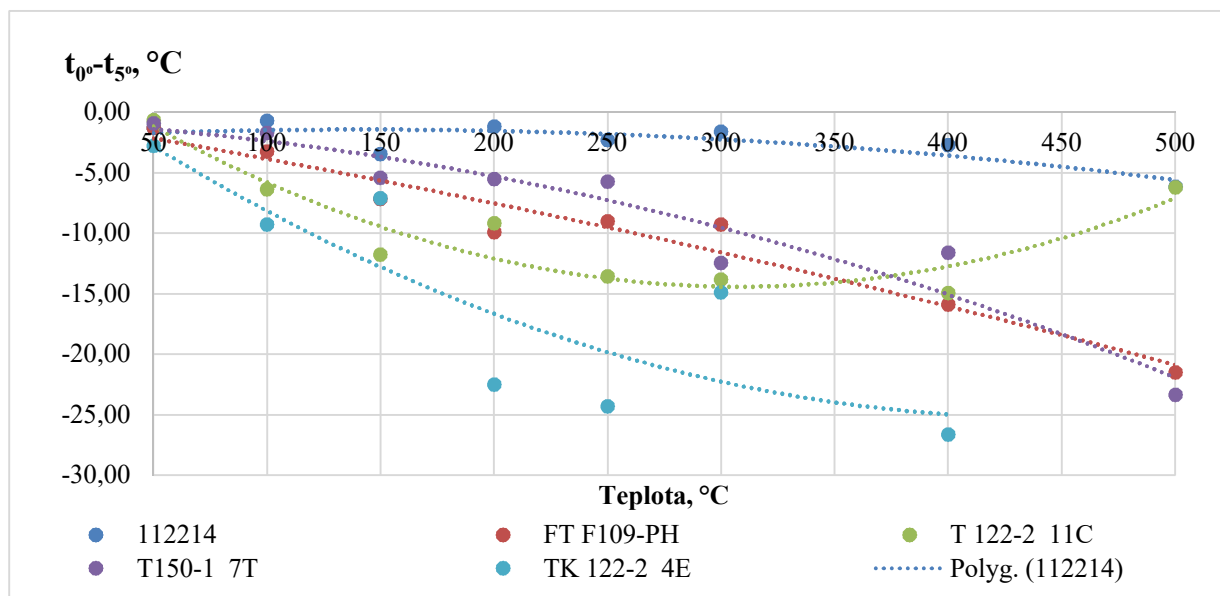
Při běžném měření se často předpokládá, že dvě nezávislá měření provedená za stejných podmínek jsou opakovatelná ve smyslu náklonu sondy, ale v praxi se úhel mezi osou teploměru a rovinou kolmou na rovinu povrchu vždy liší (dokonce i v průběhu jednoho měření). Z tohoto důvodu se nedoporučuje ponechávat teploměr v ruce. Teploměr by měl být upevněn ve stojanu. Možné chyby způsobené vychýlením teploměru od pomyslné kolmice k povrchu jsou znázorněny na následujících grafech. Z nich je také patrné, že závislost se liší pro každý konkrétní teploměr.



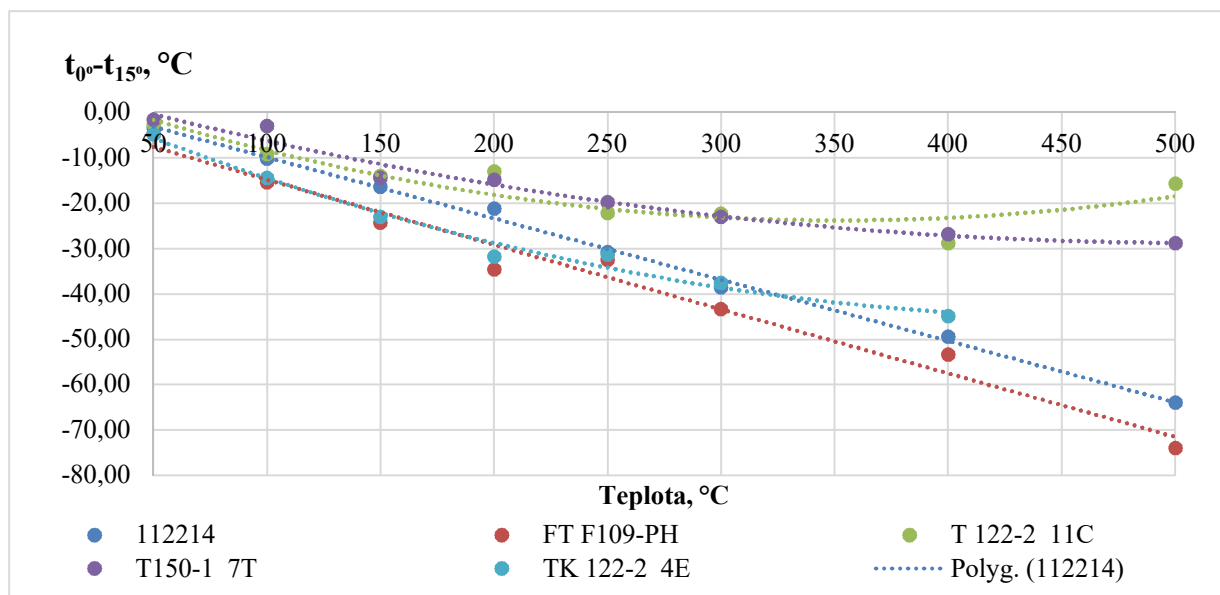
Obrázek 28 Rozdíl mezi teplotou změřenou při náklonu 5° a 0° (Δt) v závislosti na teplotě Al povrchu



Obrázek 29 Rozdíl mezi teplotou změřenou při náklonu 15° a 0° (Δt) v závislosti na teplotě Al povrchu



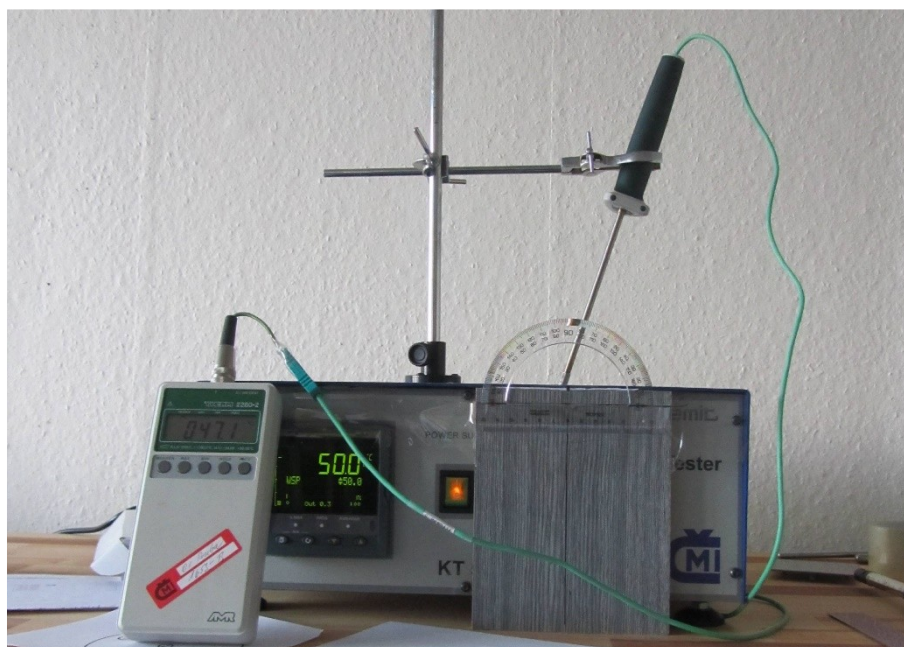
Obrázek 30 Rozdíl mezi teplotou změřenou při náklonu 5° a 0° (Δt) v závislosti na teplotě povrchu z nerezavějící oceli



Obrázek 31 Rozdíl mezi teplotou změřenou při náklonu 15° a 0° (Δt) v závislosti na teplotě povrchu z nerezavějící oceli

Tabulka 4 Povrchové teploměry využitě k měření výše znázorněných závislostí

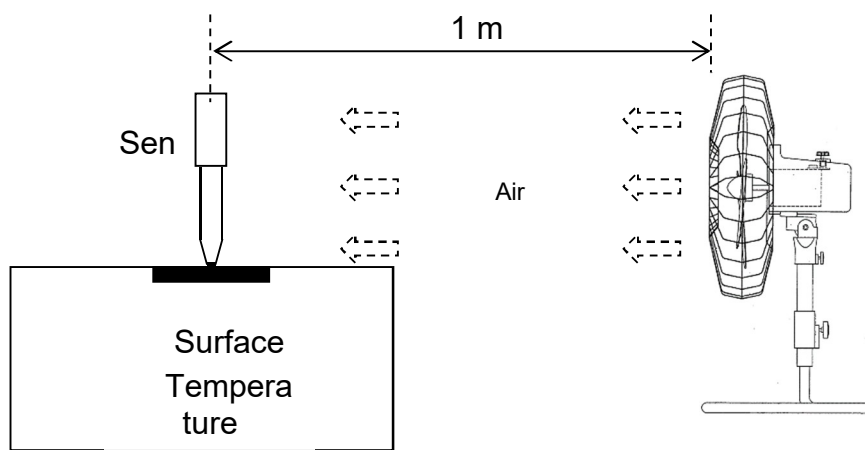
Výrobce	Typ	Teplotní rozsah, °C	Typ vnitřního termočlánku	Délka, mm
Dostmann	112214	-100 to 900	K	130
Ahlborn	TK122-2 4E	0 to 400	K	100
Ahlborn	T122-2 11C	0 to 500	K	160
Ahlborn	T150-1 7T	0 to 950	K	300
Ahlborn	FTF109-PH	-50 to 500	K	180



Obrázek 32 Příklad jednoduchého uspořádání úloh pro měření vlivu náklonu na rozdíl mezi teplotou měřidla a etalonu

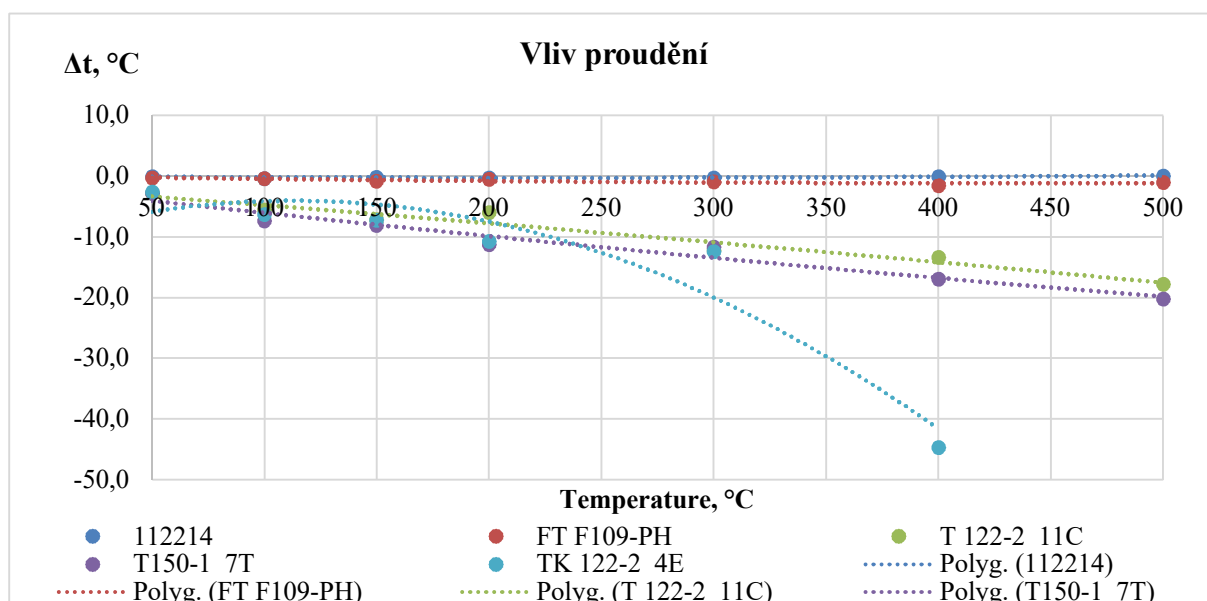
Vliv proudění vzduchu

Doporučuje se provádět veškerá měření povrchové teploty bez přítomnosti proudění vzduchu. Vliv proudění vzduchu o teplotě okolí na měřenou teplotu povrchu se liší pro každý konkrétní teploměr.

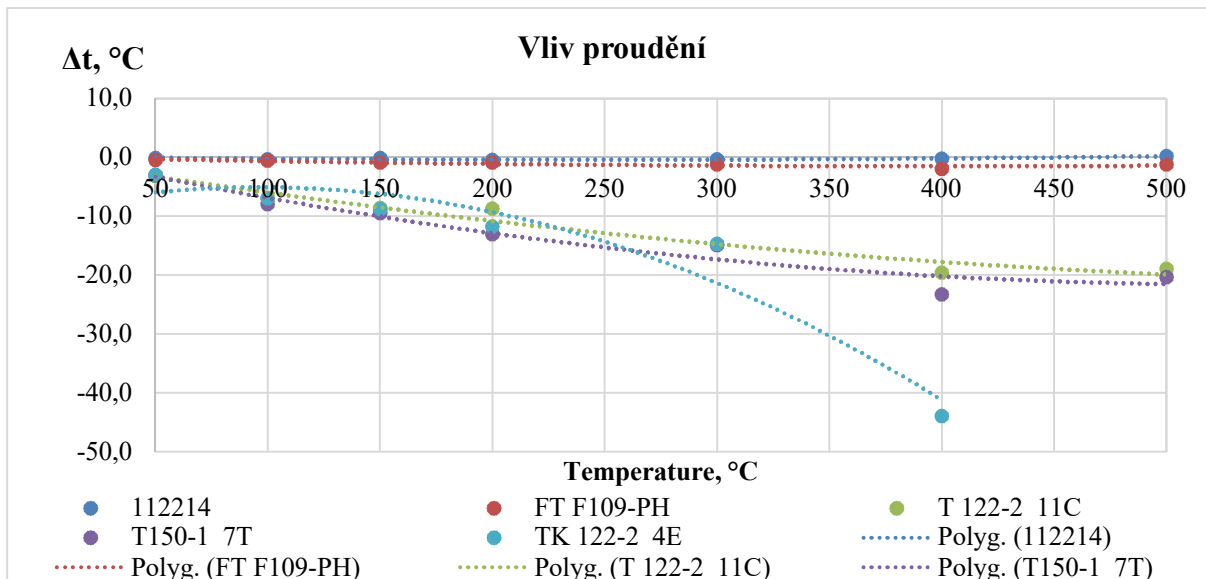


Obrázek 33 Příklad jednoduché úlohy pro měření vlivu proudění vzduchu na teplotu měřenou povrchním teploměrem

Na následujících grafech je nastíněna možná velikost chyby způsobené přítomností proudění vzduchu v laboratoři.



Obrázek 34 Rozdíl mezi teplotou měřidla při proudění o rychlosti 1 m/s a stavu bez proudění vzduchu



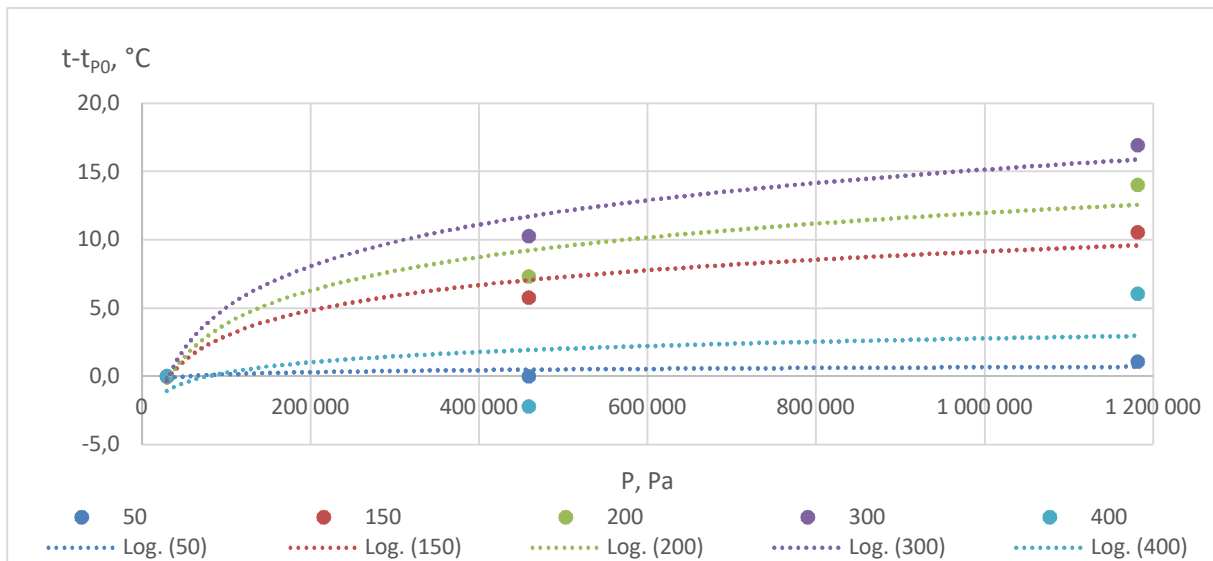
Obrázek 35 Rozdíl mezi teplotou měřidla při proudění o rychlosti 1,4 m/s a stavu bez proudění vzduchu

Vliv přítlaku

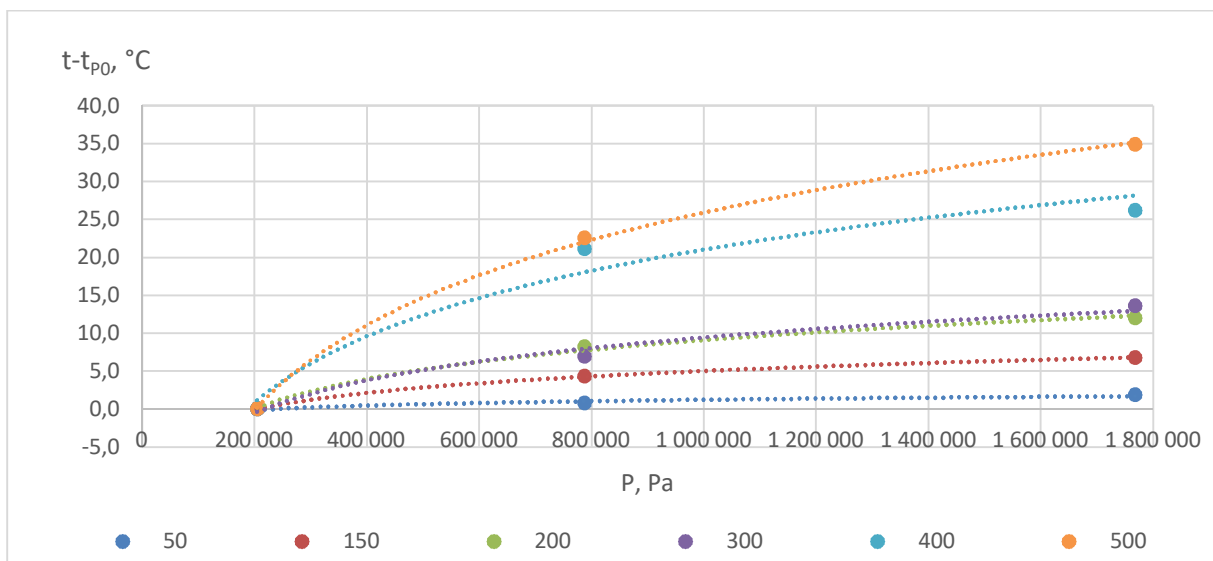
V závislosti na přítlaku a typu senzoru se přenos tepla mezi snímačem a měřeným povrchem mění. Pro účely charakterizace vlivu přítlaku na daný kalibrovaný snímač je nezbytné nejprve zvážit sondu teploměru, a zjistit tak její hmotnost resp. statický tlak vyvíjený na povrch hmotou sondy bez působení vnější mechanické síly (tuto hodnotu následně od výsledku měření vlivu přítlaku odečteme).



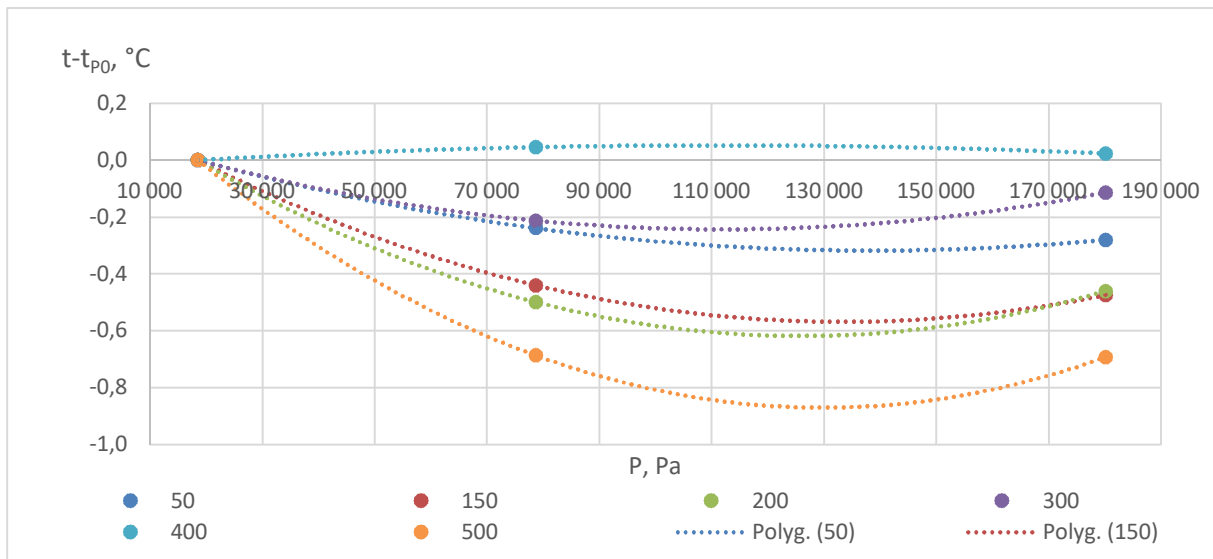
Obrázek 36 Správná orientace při vážení sondy povrchového teploměru



Obrázek 37 Příklad rozdílu mezi teplotou změřenou při přtlaku zvýšeném a při statickém přtlaku (hmotou sondy), pro různé jmenovité teploty, sonda č. 1



Obrázek 38 Příklad rozdílu mezi teplotou změřenou při přtlaku zvýšeném a při statickém přtlaku (hmotou sondy), pro různé jmenovité teploty, sonda č. 2

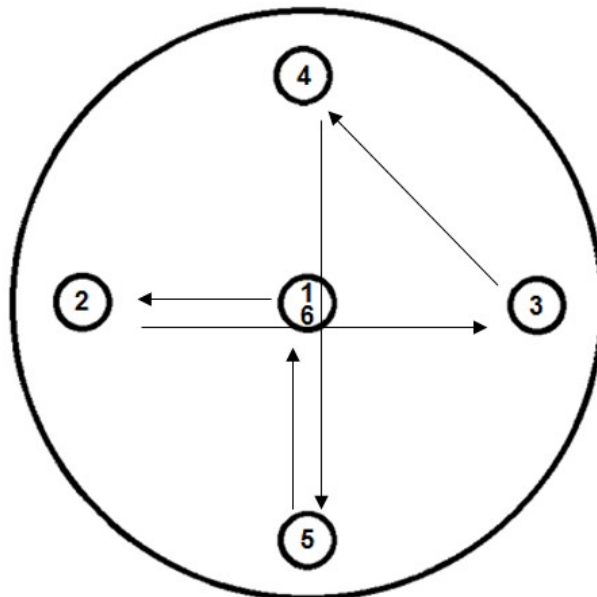


Obrázek 39 Příklad rozdílu mezi teplotou změřenou při přtlaku zvýšeném a při statickém přtlaku (hmotou sondy), pro různé jmenovité teploty, sonda č. 3

Z výše uvedených příkladů je patrné, že se závislost mění pro každý konkrétní teploměr.

Vliv nehomogenity

Nehomogenita teploty měřeného povrchu by se měla měřit alespoň v pěti bodech plochy, rovnoměrně rozložených.



Obrázek 40 Doporučený postup měření rozložení teploty na povrchu

4.3.5. Bezdotykové teploměry a termokamery

Složky spojené s etalonem a černým tělesem

4.3.5.1.1 Vliv vlnové délky a emisivity

Vliv těchto dvou veličin spolu v praxi úzce souvisí, a proto se jimi budeme zabývat dohromady.

Emisivita je bezrozměrná veličina popisující schopnost vyzařování objektu. Je závislá na materiálu a jeho opracování, geometrii měřeného objektu a také na jeho teplotě. Emisivita je u plochých objektů také výrazněji závislá na vlnové délce měření než emisivita dutinových objektů.

Na deskových (terčovách) černých tělesech je možné kalibrovat pouze teploměry a termokamery, které pracují v rozsahu vlnových délek (7(8) až 14 (15)) μm . Kavitová (dutinová) černá tělesa je možné použít na kalibraci měřidel, které pracují v širokém spektru vlnových délek, nejen v pásmu (8 až 14) μm . Příklad popisující vliv vlnové délky na výsledek měření zobrazuje následující tabulka. Prezentovány jsou výsledky měření, kdy deskové a dutinové černé těleso byly změřeny několika teploměry pracujícími při různých vlnových délkách. Z výsledků je vidět, že chyba, které se můžeme dopustit v případě, že na deskovém černém tělese budeme kalibrovat teploměr pracující při jiné vlnové délce (se stejně nastavenou emisivitou jako při (8 až 14) μm), se pohybuje v řádu jednotek $^{\circ}\text{C}$. V případě, že kalibraci provádíme pomocí dutinových černých těles, případně provádíme měření v dutinách objektů, závislost měřené hodnoty na vlnové délce výrazně klesá. To však neznamená, že bychom ji mohli zanedbat.

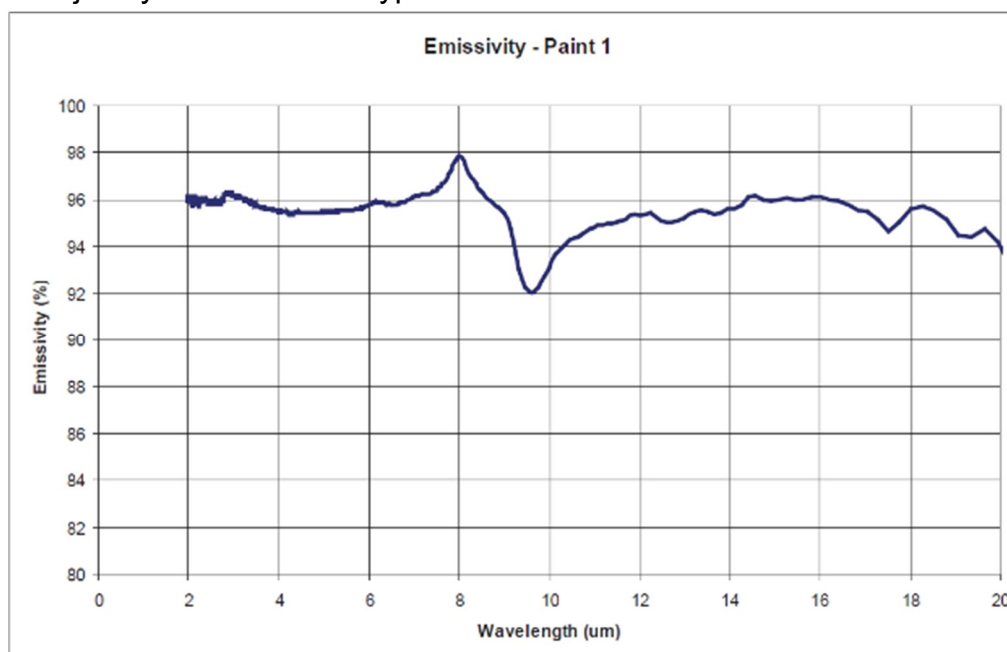
Tabulka 5 Vliv vlnové délky na výsledek měření

<i>Deskové černé těleso</i>			
Teplota etalonu, $^{\circ}\text{C}$	(8 až 14) μm		3,9 μm
200,0	199,8 $^{\circ}\text{C}$		200,9 $^{\circ}\text{C}$
300,0	299,9 $^{\circ}\text{C}$		302,1 $^{\circ}\text{C}$
<i>Dutinové černé těleso</i>			
Teplota etalonu, $^{\circ}\text{C}$	(8 až 14) μm	3,9 μm	1,569 μm
300,0 $^{\circ}\text{C}$	299,0 $^{\circ}\text{C}$	299,5 $^{\circ}\text{C}$	299,5 $^{\circ}\text{C}$

Pro korektnost měření je nezbytné znát spektrální charakteristiku detektoru a optiky IČ teploměru. Z té je možné stanovit, s jakou efektivní vlnovou délkou teploměr pracuje. Důležitost této znalosti si vysvětlíme na obrázku (Obrázek 41). Ten znázorňuje závislost emisivity běžně dostupného deskového černého tělesa na vlnové délce. Za povšimnutí stojí oblast zvýrazněná obdélníkem. Jedná se o vymezení pásma vlnových délek (8 až 14) μm , tj. pásma, ve kterém pracují nejběžnější ruční IČ teploměry.

Zde je možné pozorovat, že v této oblasti se emisivita pohybuje v rozmezí (0,92 až 0,98), přičemž výrobce udává, že emisivita černého tělesa je pro toto pásmo vlnových délek 0,95. Z obr. 1 je patrné, že se jedná o průměrnou hodnotu emisivity v této oblasti. Proto může docházet k rozdílným výsledkům měření s různými typy teploměrů, i když výrobci deklarují, že všechny pracují ve stejném pásmu vlnových

délek. Důvodem je, že každý z těchto teploměrů pracuje s jinou vlnovou délkou, nazývanou efektivní. Podle té bychom pak měli emisivitu měření upravit na základě znalosti závislosti emisivity na vlnové délce pro každý měřený objekt. Zde se však objevují dva problémy. První je, že u běžných ručních IČ teploměrů je efektivní vlnová délka neznámá a získat tuto informaci od výrobce je téměř nemožné. Druhou komplikací je, že pro každý povrch či nátěr na měřeném objektu bychom potřebovali znát závislost emisivity na vlnové délce a tyto informace také nejsou ve většině případů známé. Proto je důležité tento vliv nepodceňovat a nezanedbávat při výpočtu nejistot. Pomůckou při stanovení hodnoty této složky nejistoty může být jednoduchý test. Na kalibrovaném měřidle je nastavená emisivita, která se od té kalibrační liší o nejmenší možnou hodnotu. V případě, že provádím kalibraci při emisivitě rovné 0,950, pro odhad této složky si na teploměru (termokameře) nastavím emisivitu 0,951 nebo 0,949 umožňuje-li měřidlo nastavení emisivity na tři desetinná místa. Umožňuje-li měřidlo nastavení hodnoty pouze na dvě desetinná místa, je pro účely tohoto testu na něm nastavená emisivita na hodnotu 0,94 nebo 0,96. Rozdíl v měřených hodnotách při správné a změněné emisivitě je následně použit jako příspěvek nejistoty do celkového výpočtu.



Obrázek 41 Závislost emisivity černého tělesa Fluke 4181/4180 na vlnové délce měření [1]

V případě, že se laboratoř nebude zabývat stanovením této složky nejistoty, je nutné do rozpočtu nejistot použít typové hodnoty uvedené v následující tabulce.

Tabulka 6: Tabulka hodnot pro složku vliv emisivity a vlnové délky

Teplota, °C	Příspěvek k nejistotě, °C	
	kavita	terč
-30	0,3	0,6
0	0,2	0,4
30	0,1	0,2
100	0,1	0,2
200	0,1	0,3
300	0,2	0,4
400	0,3	0,6
500	0,3	0,7

4.3.5.1.2 Odražená okolní teplota

Určitá část měřené hodnoty je ovlivněna radiací okolí (světlo zářivek, odražená záření, tepelné zdroje, atd.). Záření těchto parazitních zdrojů vstupuje do kavity ČT nebo dopadá na plochu deskového černého tělesa a vrací se zpět po (několikanásobném) odrazu. Nejvyšších hodnot dosahuje tato složka při nízkých teplotách (měřená teplota je nižší, než teplota okolí) pomocí měřidla pracujícího v oblasti vlnových délek (7 až 15) μm .

Tabulka 7: Tabulka hodnot pro složku vliv odražené okolní teploty

Teplota, °C	Příspěvek k nejistotě, °C	
	kavita	terč
-30	0,1	0,5
0	0,05	0,3
30	0,05	0,2
100	0,1	0,2
200	0,05	0,1
300	0,05	0,1
400	0,05	0,05
500	0,05	0,05

4.3.5.1.3 Tepelné ztráty

Černá tělesa nejsou uzavřené objekty a jejich plochou nebo vstupní štěrbinou dochází k odvodu tepla. To má za následek rozdílné teploty naměřené na senzoru měřícím teplotu povrchu černého tělesa a radiační teplotou. Mezi faktory ovlivňující tuto složku patří materiál, z jakého je kavita či povrch černého tělesa vyroben a jeho tepelná vodivost, tloušťka stěny a geometrické rozměry.

K tepelným ztrátám dochází také díky přítomnosti okolního vzduchu v dutině. Tyto ztráty mají významný vliv pro teploty nižší než je teplota okolí resp. teploty, kdy dochází k namrznání vzdušné vlhkosti na stěnách černého tělesa a tím k nedefinovatelným změnám jeho emisivity. Tento vliv lze redukovat ofukováním stěn černého tělesa inertním plynem temperovaným na teplotu černého tělesa.

Tabulka 8: Tabulka hodnot pro složku tepelné ztráty

Teplota, °C	Příspěvek k nejistotě, °C	
	kavita	terč
-30	0,2	1
0	0,1	0,5
30	0,05	0,1
100	0,1	0,2
200	0,2	0,4
300	0,3	0,6
400	0,4	0,8
500	0,5	1

4.3.5.1.4 Homogenita černého tělesa

4.3.5.1.4.1 Desková černá tělesa

Výrazný vliv má tato složka u deskových těles. Stanovení homogenity je možné pomocí referenčního bezdotykového teploměru s vysokým optickým rozlišením, kterým skenujeme plochu černého tělesa od středu směrem k jeho okraji. Homogenitu je nutné stanovit z odchylek naměřených v jednotlivých plošných bodech povrchu černého tělesa při různých teplotách. Obecně lze říct, že se zvyšující se měřenou teplotou se homogenita deskových černých těles zhoršuje a výjimkou nejsou teplotní rozdíly v řádu několika jednotek °C. V případě, že laboratoř nemá homogenitu ČT změřenou, je nutné do rozpočtu použít typové nejistoty uvedené v následujících tabulkách. Homogenita je také závislá na velikosti zářivé plochy, proto jsou zde uvedeny hodnoty pro dva nejčastěji používané rozměry deskových černých těles o průměru 5 cm a 15 cm.

Výsledek z charakterizace deskových černých těles by se měl pohybovat kolem uvedených hodnot ve sloupci „Příspěvek do nejistoty“, ale v mnoha případech může být výrazně lepší. Nelze však vyloučit že skutečnost bude horší, což dokládá poslední sloupec v tabulkách s označením „Maximální pozorovaná odchylka“.

Tabulka 9: Tabulka hodnot pro složku homogenita deskového černého tělesa s průměrem 5 cm

Teplota, °C	Příspěvek do nejistoty, °C	Maximální pozorovaná odchylka, °C
35	0,15	0,2
50	0,36	0,6
100	0,6	1,1
150	1,2	2,3
200	1,4	1,7
250	1,7	3,0
300	1,6	3,8

350	1,5	2,1
400	1,6	2,1
500	2,1	3,4

Tabulka 10: Tabulka hodnot pro složku homogenita deskového černého tělesa s průměrem 15 cm

Teplota, °C	Příspěvek do nejistoty (prům.), °C	Příspěvek do nejistoty (max.), °C
-15	-0,3*	1,6
0	0,4*	1,1
20	0,1	0,15
35	0,1	0,13
50	0,13	0,31
100	0,4	0,71
120	0,54	0,96
200	0,61	1,0
300	0,9	1,3
400	1,1	1,4
500	1,8	2,2

Hodnoty označené * jsou platné při speciálním nastavení pro černé těleso, kdy je možné ofukovat plochu dusíkem, v opačném případě je vhodné použít hodnoty z třetího sloupce tabulky.

4.3.5.1.4.2 Dutinová černá tělesa

Situaci ohledně dutinových černých těles není možné jednoduše shrnout do přehledných tabulek. Existuje jich celá řada a navzájem se liší svojí geometrií, tj. průměrem a hloubkou kavity i realizací topení. Proto je nutné ke každému kavitovému černému tělesu přistupovat individuálně a snažit se charakterizovat jeho homogenitu individuálně, případně při kalibraci v kalibrační laboratoři.

Následující tabulka je pouze ilustrativní, jaké hodnoty může homogenita kavitových černých těles dosahovat.

Tabulka 11: Tabulka hodnot pro složku homogenita dutinového černého tělesa – ilustrativní!

Teplota, °C	Příspěvek do nejistoty, °C
-30	0,2
0	0,1
100	0,1
200	0,2
300	0,3
400	0,4
500	0,5
600	0,6
700	0,7
800	0,8
900	0,9
1000	1,0
1100	1,2
1200	1,5

Složky spojené s kalibrovaným teploměrem

4.3.5.2 Okolní teplota

Při standardních laboratorních podmínkách, ve kterých by měly kalibrace probíhat, je vliv této složky minimální. V případě, že měření probíhají v jiných než standardních podmínkách, je vhodné zjistit, jaký vliv má jiná teplota okolí na výsledek měření. Výrazný vliv je možné pozorovat na měřidlech bez interní stabilizace teploty, tj. většina běžné dostupných bezdotykových teploměrů a termokamer. Tento vliv by u měření v terénu neměl být podceňovaný, protože může do měření zanášet chybu v řádu jednotek °C.

V následujících tabulkách jsou uvedeny hodnoty této složky nejistoty při standardní kalibraci v laboratoři a pak také ukázka vlivu okolních podmínek na čtenou hodnotu z teplotního měřidla.

Tabulka 12: Tabulka hodnot pro složku vliv okolní teploty při kalibraci v laboratoři

Teplota, °C	Příspěvek k nejistotě, °C	
	kavita	terč
-30	0,01	0,05
0	0,01	0,05
30	0,01	0,05
100	0,01	0,05
200	0,01	0,1
300	0,01	0,1
400	0,01	0,2
500	0,01	0,2

Tabulka 13: Příklad závislosti čtené hodnoty u teplotního měřidla při různých okolních podmínkách – měřidlo bez interní stabilizace

Podmínky okolí		Teplota černého tělesa, °C	Měřená teplota, °C
Teplota, °C	Vlhkost, %		
23,0	26,0	30,0	31,2
-6,9	12,0	30,0	30,9
-14,7	10,0	30,0	29,7
-15,0	9,0	30,0	29,2
15,4	12,5	30,0	30,4
40,0	20,2	30,0	31,0
40,0	80	30,0	32,0
23,0	24,0	30,0	31,3
$\Delta t =$			2,8

Tabulka 14: Příklad závislosti čtené hodnoty u teplotního měřidla při různých okolních podmínkách – měřidlo s interní stabilizací

Podmínky okolí		Teplota černého tělesa, °C	Měřená teplota, °C
Teplota, °C	Vlhkost, %		
22,2	18,7	29,9	30,1
-9,7	71,2	29,9	30,2
38,4	20,1	29,9	30,0
39,7	79,6	29,9	30,0
38,8	19,8	29,9	29,9
23,1	16,7	29,9	30,1
$\Delta t =$			0,3

4.3.5.2.1 Atmosférická absorpce

Bezkontaktní měření teploty je ovlivněno prostředím, ve kterém měření probíhají. Standardně probíhají měření na vzduchu, který obsahuje vodní páru a oxid uhličitý částečně pohlcující infračervené záření. Proto se bezdotykové teploměry a termokamery vyrábí s detektory pro vlnové délky, při kterých vzduch absorbuje záření minimálně. Dalším faktorem, který je nutno vzít při měření do úvahy, je vzdálenost, ze které probíhají měření. Je to dáno tím, že při větší měřicí vzdálenosti máme mezi měřidlem a měřeným objektem více pohlcujícího média, a proto může dojít ke zkreslení měřené hodnoty.

Tabulka 15 Příspěvek k nejistotě z atmosférické absorpce

Teplota, °C	Příspěvek k nejistotě, °C
-30	0,005
0	0,005
30	0,005
100	0,005
200	0,005
300	0,005
400	0,005
500	0,005

4.3.5.2.2 SSE (size-of-source efekt)

Při bezkontaktním způsobu měření teploty hraje zásadní roli vzdálenost, z jaké provádíme měření, a geometrie/velikost objektu, který je měřen. To je velmi úzce spojeno s konstrukcí bezdotykového teploměru, zejména jeho optiky. Bohužel, není dost dobře možné od sebe oddělit všechny faktory vstupující do této chyby, proto je

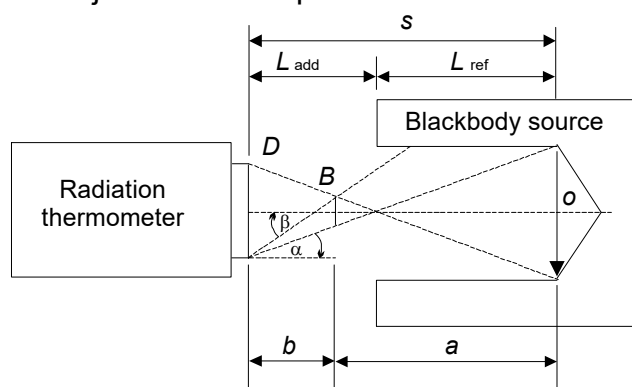
nutné na tuto složku nahlížet jako na kombinaci způsobenou vzdáleností měření, velikostí objektu, který je měřen, a také jeho geometrií a teplotní homogenitou.

Výrobci optické chování teploměru většinou popisují pomocí tzv. parametru $D:S$ (*distance to spot ratio*), který udává vztah mezi měřicí vzdáleností a velikostí měřicího bodu. Např. parametr 50:1 znamená, že ze vzdálenosti 50 cm bude mít měřicí bod průměr 1 cm. Tato charakteristika bývá velmi často platná pouze v úzkém pásmu vzdáleností a při jiných se tento údaj může značně lišit.

Na základě jednoduchého výpočtu je možné stanovit optimální vzdálenost kalibrace IČ teploměru:

$$s = l_{ref} + l_{add} \quad , \quad s = b \frac{D + o}{D + B} \quad (2),$$

kde s znamená vzdálenost od dna kavity nebo terče, l_{ref} je hloubka (délka) kavity, (v případě terče je tato vzdálenost rovná 0), l_{add} je vzdálenost od optiky teploměru k otvoru kavity nebo desce černého tělesa, b je zaměřovací vzdálenost bezdotykového teploměru, D efektivní průměr čočky bezdotykového teploměru, B je velikost měřeného objektu při vzdálenosti b , a o je průměr dna kavitového černého tělesa nebo průměr deskového černého tělesa. Je-li vypočtená vzdálenost nevhodně velká (např. vzhledem k možnostem laboratoře), je nutné ji zkrátit na základě možností laboratoře. Při zaměřování je důležité dát pozor, aby paprsek IČ teploměru se nedotýkal stěny kavity černého tělesa. Jinak bude výsledek měření zkreslený a je potřeba zvolit jinou, vhodnější vzdálenost pro kalibraci.



Obrázek 42: Zaměřování bezdotykového měřidla teploty

Co se týče vlivu vzdálenosti, může kalibrovaný teploměr vykazovat na každém černém tělese jiné chování. Pro ilustraci je uveden výsledek měření pomocí IČ teploměru (75:1). Při teplotě 500 °C byla provedena kalibrace teploměru pomocí tří černých těles s různou geometrií:

- válcová dutina s průměrem 50 mm a hloubkou 370 mm,
- sférická dutina s průměrem vstupního otvoru 50 mm, průměr sférické části 260 mm a celková hloubka dutiny 360 mm a
- deskové černé těleso s průměrem 156 mm.

Popsaná měření byla prováděna při využití celého průměru plochy/vstupních otvorů černých těles. V tabulce jsou uvedeny hodnoty rozdílů naměřených hodnot při

změně vzdálenosti. Jako referenční je brána hodnota změřená z nejkratší možné vzdálenosti.

Tabulka 16: Vliv vzdálenosti na výsledek měření teploty objektů s různou geometrií při 500 °C

Vzdálenost měření, mm	Naměřené hodnoty rozdílů, °C		
	Válcová dutina	Sférická dutina	Deskové černé těleso
200	-	-	0,0
300	-	-	-0,6
400	0,0	0,0	-1,2
500	-1,9	-2,5	-1,7
600	-3,6	-4,2	-2,4
700	-4,9	-5,6	-3,3
800	-5,9	-6,7	-

Z tabulky je vidět, že výsledná měřená hodnota je značně závislá jak na typu objektu, na kterém je měření prováděno, tak na vzdálenosti měření. Už relativně malý posun o 10 cm vnáší do měření chybu o velikosti cca 1 °C. Při kalibracích je proto nutné tento jev kvantifikovat a započítat ho v plné míře do výsledné nejistoty kalibrace.

4.4. Prahové hodnoty CMC pro jednotlivé vlivy

Prahovou hodnotou CMC se rozumí nejmenší hodnota CMC, pro kterou je nutné s daným vlivem počítat. Tedy pokud laboratoř deklaruje nebo má v úmyslu deklarovat svou hodnotu CMC pod touto prahovou hodnotou, musí být daný vliv řádně zahrnut do rozpočtu nejistot. Jestliže laboratoř deklaruje svou hodnotu CMC nad touto hodnotou, může tento vliv zanedbat.

4.5. Minimální příspěvek k CMC

Hodnota minimálního příspěvku souvisí s předchozí prahovou hodnotou a s nepodkročitelnými hodnotami, uvedenými dále. Je to nejmenší hodnota nejistoty, kterou je nutno zahrnout v případě započítávání daného vlivu do rozpočtu nejistot.

4.6. Nepodkročitelné hodnoty CMC

Výsledná hodnota CMC, stanovená na základě rozboru nejistot při respektování prahových hodnot a minimálních příspěvků k nejistotě. V mezinárodní praxi, při špičkových podmínkách je to nejnižší reálná hodnota CMC, kterou lze při kalibraci dosáhnout. Při správně provedené analýze všech vlivů na nejistotu kalibrací je velmi

obtížné dosáhnout lepší hodnoty CMC. Výsledná hodnota nižší než tato prahová hodnota může svědčit o nesprávně provedené analýze vlivů na nejistotu kalibrací, a při posuzování je nutné, aby odborný posuzovatel prošel předkládaný kalibrační postup a s ním související analýzu vlivů nejistot velmi pečlivě, protože je velmi málo pravděpodobné, že při sestavování rozpočtu nejistot nedošlo k chybě či omylu. Mezinárodní prahové hodnoty CMC jsou připravovány pro potřeby národních metrologických institutů, proto nejsou vhodné pro použití při akreditaci běžných kalibračních laboratoří – není totiž možné, aby se k uvedeným hodnotám jednotlivé laboratoře přiblížili. V rámci řešení úkolu byla proto provedena podrobná analýza jednotlivých složek nejistot, jejich vlivu na výslednou nejistotu a analýza CMC hodnot jednotlivých kalibračních laboratoří. Na základě toho byly stanoveny nové prahové hodnoty, které odráží úroveň CMC hodnot běžně dosažitelných v kalibračních laboratořích. Prahové hodnoty je nutné vnímat jako jakési vodítko při sestavování rozpočtů nejistot a při posuzování laboratoří. Udávají hranici, která stanovuje, jakým způsobem je nutné se vypořádat s jednotlivými složkami nejistot. Naznačí, jestli je nutné se s určitými složkami do detailu zabývat, nebo stačí použít typové hodnoty.

Prahové hodnoty pro jednotlivé druhy měřidel jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 17: Prahové hodnoty pro kalibraci odporových snímačů teploty

Jmenovitá teplota, °C	Prahová hodnota CMC, °C Kalibrace v lázních	Prahová hodnota CMC, °C Kalibrace v pískách a v blokových kalibrátorech
-50	0,07	0,10
-10	0,03	0,10
0	0,02	0,08
50	0,06	0,10
100	0,06	0,12
200	0,07	0,22
300	0,10	0,32
400	0,10	0,42
500		0,52
600		0,62

Tabulka 18: Prahové hodnoty pro kalibraci termoelektrických snímačů teploty.

Jmenovitá teplota, °C	Prahová hodnota CMC, °C	
	TC z obecných kovů	TC z drahých kovů
0	0,5	0,3
100	0,5	0,3
200	0,5	0,3
300	0,5	0,4
400	0,6	0,4
500	0,8	0,5
600	0,9	0,5
700	1,1	0,6
800	1,2	0,6
900	1,4	0,7
1000	1,5	0,7
1100	1,7	0,8
1200	1,8	0,8
1300	2,0	0,9
1400	2,1	0,9
1500	2,3	1,0
1600	2,4	1,0

U indikačních teploměrů jsou prahové hodnoty stanoveny stejně jako pro jednotlivé senzory, kde je přičtena určitá část na indikační jednotku.

Tabulka 19: Prahové hodnoty pro kalibraci bezdotykových teploměrů

Jmenovitá teplota, °C	Prahová hodnota CMC, °C
-15	1,8
0	1,6
30	1,4
100	1,7
200	1,8
300	2,2
400	2,8
500	3,1

Pro oblast kalibrace termokamer byly prahové hodnoty stanoveny takto.

Tabulka 20: Prahové hodnoty pro kalibraci termokamer

Jmenovitá teplota, °C	Prahová hodnota CMC, °C
-15	1,6
0	1,6
30	1,3
100	1,4
200	1,8
300	2,0
400	2,8
500	3,1

4.7. Zohlednění výsledků řešení úkolů

Výsledné řešení je měřítkem pro sjednocování požadavků na kalibrační laboratoře při stanovování rozpočtu nejistot a následně i vlastní hodnoty CMC. Práce je určena jako studijní materiál pro odborné posuzovatele v oboru teplota, aby byl jejich přístup a posuzování rozpočtu nejistot v tomto oboru lépe harmonizován a minimalizoval se nejednotný pohled.

Slouží k tomu i související prezentace, pro širší odbornou veřejnost je věcná stránka zprávy upravena do podoby článku pro časopis Metrologie.

5. Shrnutí

Úkol navázal na úkol PRM č. VII/5/10 *Zpracování podkladů pro průběžné sjednocování posuzování akreditovaných kalibračních laboratoří v oboru teploty*. Zpráva z tohoto úkolu uvádí rozbor akreditovaných oborů, rozsahů a přidružených hodnot CMC. Tento rozbor byl východiskem pro členění této zprávy, především kapitoly 4. Při řešení úkolu byly dále shromážděny informace o jednotlivých vlivech na nejistotu měření teploty. Výsledkem je podklad pro sjednocování pohledu na vliv příspěvků k nejistotě měření teploty na straně odborných posuzovatelů, laboratoří i zákazníků, který uvádí přehled nejčastěji zastoupených druhů teploměrů a podstatných vlivů na nejistotu měření teploty ve vztahu k udávané úrovni CMC. Součástí řešení jsou přílohy, které uvádějí shrnutí obsahu zprávy pro konkrétní typ měřidla a jsou určeny pro rychlou orientaci především odborných posuzovatelů a pracovníků kalibračních laboratoří. Jsou také základem pro přípravu prezentace pro seminář, který ČIA plánuje uspořádat pro akreditované subjekty a odborné posuzovatele v březnu 2018.

Odborná část textu je připravena po drobných úpravách k použití jako text článku pro časopis *Metrologie*, definitivní podoba bude záviset na prostoru, který redakce poskytne.

Jak z předložené zprávy vyplývá, řešení úkolu probíhalo v souladu se zadáním s cílem připravit základní dokumenty pro usnadnění posuzování a vůbec pohledu na stanovování hodnot CMC v oboru teplota, aby bylo možné lépe prokázat jednotný způsob posuzování kalibračních laboratoří a minimalizoval se osobní vliv jednotlivých odborných posuzovatelů, přestože určitá míra individuálního přístupu je nevyhnutelná a zůstane součástí posuzování i nadále.

6. Závěr

Na základě provedeného rozboru metod a zařízení pro měření teploty byl sestaven přehled druhů a typů teplotních měřidel a byla vybrána reprezentativní skupina teploměrů, pro které byly stanoveny všechny podstatné vlivy na nejistotu měření. K dispozici je tabulka, která přehledně shrnuje informace z této zprávy a umožňuje filtrování podle jednotlivých kritérií. Tím dovoluje zobrazit všechny podstatné informace např. pro daný typ teploměru a danou kategorii vlivu s jejich zhodnocením z hlediska významnosti pro cílovou hodnotu CMC laboratoře.

Dále je prezentace vhodným základem pro školení příslušných pracovníků ČIA, o.p.s. se samostatnou verzí, jejímž účelem je předat informace z této zprávy pracovníkům především kalibračních laboratoří, ale i laboratoří zkušebních a dalších. Tato prezentace bude vhodná i pro odbornou veřejnost, které je určen i text článku, připravený pro časopis Metrologie.

Po ukončení tohoto úkolu budou jeho závěry použity jako podklad při revizi příslušných metodických pokynů pro akreditaci (MPA), která uvádějí politiku ČIA pro metrologickou návaznost výsledků měření, která souvisí s revizí normy ČSN EN ISO/IEC 17025.

Po ukončení úkolu má být tento dokument využit při posuzování kalibračních laboratoří jako informační základ pro zhodnocení, zda laboratoř správně stanovila všechny podstatné a neopominutelné vlivy na nejistotu kalibrace. Cílem samozřejmě je sjednotit přístup k rozpočtu nejistot a stanovení CMC a v budoucnu i v dalších oborech kalibrací.