



ČESKÝ INSTITUT PRO AKREDITACI, o.p.s.

Opletalova 41, 110 00 Praha 1 – Nové Město

Dokumenty EA

EA - Evropská spolupráce pro akreditaci

Číslo publikace: EA-4/21 (EAL - G31)

Kalibrace termočlánků

Tento dokument vytvořila EAL za účelem sjednocení postupů kalibrace termočlánků. Národním akreditačním orgánům poslouží jako návod při stanovení minimálních požadavků pro kalibraci termočlánků a poradí kalibračním laboratorům při vytváření metodických pokynů včetně výpočtů nejistot.

Tento dokument nesmí být dále rozšiřován.

březen 1999

Autor

Tento dokument prošel revizí 2. výboru EAL (Kalibrační zkušební činnosti). Dokument vychází z návrhu skupiny expertů EAL “Teplota a vlhkost”.

Úřední jazyk

Text smí být překládán do jiných jazyků podle potřeby. Verze v angličtině zůstává verzí směřodatnou.

Copyright

Autorské právo k tomuto textu přísluší EAL. Z textu nesmí být pořizovány kopie za účelem dalšího prodeje.

Publikace

Tento dokument představuje shodu názorů mezi stanoviskem členů EAL a reálnou praxí při aplikaci příslušných ustanovení akreditačních norem aplikována v souvislosti s předmětem tohoto dokumentu. Použité postupy nejsou povinné a jedná se jen o návody pro akreditační orgány a příslušné laboratoře. Dokument byl zpracován s cílem zabezpečení jednotného přístupu při akreditaci laboratoří mezi členy EAL a speciálně pak mezi signatáři Multilaterální dohody EAL.

Další informace

Další informace o této publikaci získáte u vašich národních zástupců v EAL, jejichž telefonní a faxová čísla jsou uvedena dále.

Český institut pro akreditaci, o.p.s.
Opletalova 41, Praha 1, PSČ 110 00
Telefon: 221 004501
Fax: 221004408
E-mail: mail@cai.cz

Obsah

0	Přehled	3
1	Úvod	3
2	Vlivy, které je nutno vzít v úvahu	4
3	Prodlužovací a kompenzační vedení	4
4	Srovnávací spoj	5
5	Vstupní prohlídka	6
6	Žihání (tepelné zpracování)	6
7	Tepelné zdroje	6
8	Hloubka ponoru	7
9	Měřicí procedura	7
10	Elektrická měření	8
11	Rekalibrace	8
12	Výsledky měření	9
13	Nejistoty kalibrace	10
14	Literatura	10
	Dodatek A	11
	Příklad výpočtu nejistot	11

0 PŘEHLED

- 0.1 Tento dokument byl napsán jako návod tak, aby splnil požadavky na základní směrnice pro laboratoře, které zajišťují kalibraci termočlánků. Je platný především pro termočlánky typů normalizovaných v souladu s referenční tabulkou závislosti termoelektromotorického napětí na teplotě¹ EN 60584–1:1996 a pokrývající teplotní rozsah od –200 °C do 1600 °C, přičemž kalibrace je prováděna ve smyslu Mezinárodní teplotní stupnice 1990 (ITS–1990). Většina zde uvedené problematiky může být také použita na ostatní “nestandardní” termočlánky. Mohou se ovšem vyskytnout některé jiné podstatné okolnosti mimo rozsah těchto směrnic, které by pak měly být brány v úvahu.

1 ÚVOD

- 1.1 Termočlánek sestává ze dvou rozdílných vodičů, spojených v měřicím (dříve též “horkém”) spoji; druhý konec – referenční (dříve též “studený”) je propojen buď přímo nebo jiným vhodným způsobem k zařízení, které měří termoelektrické napětí (dále jen U_T) vytvářené obvodem.
- 1.2 Termoelektrické napětí U_T vytvářené termočlánkem je funkcí rozdílu teplot měřicího a srovnávacího spoje; ještě přesněji řečeno, vzniká jako důsledek teplotních gradientů, které se vytvořily podél vodičů. Efektivní měření a kalibrace jsou možné jedině tehdy, jsou-li měřicí i srovnávací konec udržovány v oblastech s konstantní teplotou (izotermálních oblastech), a to natolik hluboko, aby bylo zabráněno ztrátám (nebo zisku) tepla, tedy aby bylo zaručeno, že každý spoj skutečně dosáhne teploty svého okolí.
- 1.3 Velikost U_T závisí na materiálech vodičů použitých pro termočlánek a na jejich metalurgickém stavu. Proto dodatečné změny složení a stavu materiálů (způsobené znečištěním, mechanickým napětím nebo tepelným šokem) rovněž ovlivňují a mění U_T i příslušné kalibrace. Nicméně každá taková změna může mít vliv jedině tehdy, nastane-li v oblasti s teplotním gradientem. Nemusí být tedy zjištělná při rekalibraci, pokud např. poškozený úsek vodiče leží celý uvnitř izotermální oblasti kalibrační lázně.
- 1.4 Stárnutím a používáním termočlánků degraduje (tj. jeho parametry se mění) a je nutno ho opět kalibrovat. z dlouhodobého hlediska je proto potřeba stanovit a dodržovat plán pravidelných zkoušek a eventuálních výměn. Pro termočlánky z obecných kovů pro vyšší teploty se však doporučuje raději jejich výměna než nová kalibrace.

¹ Je obsažena v ČSN EN 60584–1 z prosince 1997. (Pozn. překl.)

2 VLIVY, KTERÉ JE NUTNO VZÍT V ÚVAHU

- 2.1 Při kalibraci je třeba zaručit, aby byly minimalizovány dále vyjmenované vlivy. Tyto vlivy je třeba uvážit pro výpočet nejistot měření, uvedených v kalibračním listu.
- 2.2 Podstatné vlivy jsou:
- špatný kontakt nebo špatné vedení tepla podél termočlánku (nedostatečné ponoření)
 - změna teploty s časem a prostorové rozdělení teploty v tepelném zdroji (časová a prostorová nehomogenita lázně)
 - změna teploty ve srovnávacím spoji
 - parazitní termonapětí, např. při použití prodlužovacího nebo kompenzačního vedení nebo vícepolohového přepínače
 - elektromagnetická interference
 - mechanická napětí a deformace
 - nehomogenity
 - oxidace
 - vliv nečistot slitin
 - izolační odpor.

Tyto vlivy jsou diskutovány v dalších oddílech.

3 PRODLUŽOVACÍ A KOMPENZAČNÍ VEDENÍ

- 3.1 Je-li potřeba z praktických důvodů prodloužit termočlánek, lze tak učinit pomocí správného prodlužovacího nebo kompenzačního vedení. Prodlužovací vedení sestává z vodiče z téhož nominálního materiálu jako termočlánek, zatímco kompenzační vedení je vytvořeno z jiné dvojice slitin. Vedení jsou vyrobena tak, aby souhlasila s charakteristikami (se závislostí U_T na teplotě) příslušného termočlánku, ale v omezené teplotní oblasti, ne větší než -40 °C až $+200\text{ °C}$. (Výrobní tolerance jsou specifikovány v IEC 584-3.²)
- 3.2 Tato vedení by nejraději měla být trvale spojena s termočlánekem. Spoje k drátům termočlánků bývají také často provedeny pomocí speciálních vidlic a zásuvek (vyrobených rovněž z kompenzačních slitin). Je důležité zaručit, aby tyto sekundární spoje nebyly umístěny v oblasti s teplotním gradientem. Měly by být

² Tato norma je obsažena v ČSN 25 8331-3. (Pozn.překl.)

rovněž stíněny nebo izolovány od průvanu, záření a rychlých změn okolní teploty.

- 3.3 Nejistoty měření spjaté s použitím prodlužovacích a kompenzačních vodičů nebývají obvykle tak malé jako nejistoty těch termočlánků, které jsou tvořeny nepřerušovanými dráty. To lze přisoudit drobným rozdílům v materiálech a praktickým obtížím s měřením teplot na spojích mezi vodiči. Nejistoty měření mohou být podobné nejistotám na termočláncích s nepřerušovanými dráty, pokud byla prodlužovací nebo kompenzační vedení zahrnuta do kalibrace. Prodlužovací nebo kompenzační vedení jsou v takovém případě částí termočlánku a neměla by být nikdy nahrazována jinými dráty, a to ani téhož typu nebo šarže. Pro odhad příspěvku k nejistotám tohoto původu je nutno použít experimentální metodu zahrnující změny průběhu teplotního pole chlazením nebo zahříváním podél vodičů samostatně i společně, za udržování měřicího a srovnávacího spoje při konstantní teplotě.

4 SROVNÁVACÍ SPOJ

- 4.1 Tabulka $U_T(T)$ termočlánku má bod tání ledu $0\text{ }^\circ\text{C}$ jakožto referenční teplotu a tomuto tradičnímu pevnému teplotnímu bodu je třeba dát pro přesná a spolehlivá měření přednost. Může být snadno realizován rozdrčeným nebo naškrábaným ledem smíchaným s vodou. Deionizovaná voda (např. destilovaná) je nejlepší, třebaže v mnohých zemích může stačit voda z vodovodu.
- 4.2 Na referenčním spoji je každý vodič termočlánku měkce nebo tvrdě připájen nebo ovinut na měděný vodič. Na tomto spoji se může vyskytnout občasná nebo trvalá elektrická porucha, způsobená tenkou oxidovanou vrstvou vytvořenou na obecném kovu tvořícím termočlánek nebo na měděném drátu. Při přípravě spoje je potřeba vodiče lehce očistit jemným smirkovým papírem. Každý spoj drátů má být izolován a dráty upevněny v lehkých těsných pouzdrech před vsunutím do ledové lázně. Oba měděné dráty mají být z téhož výrobního zdroje³. Automatické termostaty pro srovnávací spoje se používají zvláště při velkém počtu termočlánků nebo tehdy, je-li potřeba dlouhodobé měření. Jejich použití je žádoucí doplnit pečlivou kontrolou, že hloubka ponoru odpovídá a že celková tepelná zátěž nepřekračuje kapacitu zařízení. Toho lze dosáhnout monitorováním činnosti jednoho nebo dvou termočlánků použitých v zařízení, a to jednak s plným zatížením termočlánků, jednak bez zatížení. Mohou být také provedena srovnání jejich činnosti v ledové lázni.
- 4.3 Tytéž poznámky se týkají skříní pro referenční spoje, které mohou mít formu izolovaných skříní, obsahujících referenční spoje, jejichž teplota je monitorována teploměrem buď za okolní teploty, nebo za teploty poskytované termostaticky řízeným vyhříváním. Správnost teploměrů a řízení skříní má být pravidelně kontrolována.

³ nejlépe z jednoho klubka (Pozn. překl.).

- 4.4 Kompenzace srovnávacího spoje je široce užívána v elektronických indikátorech a termostatech. Jsou k dispozici moduly elektronické kompenzace se síťovým nebo bateriovým napájením. Nejsou příliš vhodné pro systémy používající velkého počtu termočlánků; obvykle se požadují samostatné moduly pro každý spoj.
- 4.5 Je-li použita jiná referenční teplota než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro termočlánek kalibrovaný oproti $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, musí být přičteno **termonapětí U_T odpovídající zvolené referenční teplotě k** výstupu měřeného termočlánku.

5 VSTUPNÍ PROHLÍDKA

- 5.1 Na trhu jsou k dispozici termočlánky s různou formou izolace a ochranných obalů, stejně jako v provedení “holých drátů”. Vstupní prohlídka bude proto záviset na jejich konkrétní konstrukci a použití. Zřejmé známky mechanických defektů, znečištění atp. mají být zaznamenány a zákazník informován, zda se laboratoř domnívá, že platnost nebo nejistota měření při kalibraci mohla být negativně ovlivněna. Je třeba prověřit jakoukoliv přítomnost vlhkosti, zejména kolem kompenzačních nebo prodlužovacích spojů, protože vlhkost může snížit svodový odpor, případně vést k vytvoření elektrolytického galvanického napětí. Vhodnou metodou k určení jakékoliv vlhkosti v termočlánku je měření izolačního odporu.

6 ŽÍHÁNÍ (TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ)

- 6.1 Každý termočlánek, který má být kalibrován, má být homogenní. Nehomogenní termočlánky použité za jiných podmínek, než za jakých byly kalibrovány, speciálně při jiných teplotních gradientech, budou dávat chybné výsledky, které mohou představovat systematické odchylky o několik stupňů Celsia.
- 6.2 Na žíhání (tepelné zpracování, umělé stárnutí) termočlánků je třeba pohlížet jako na druh “nastavení” a v případě rekalibrace má být takové žíhání prováděno jen s předchozím souhlasem zákazníka.
- 6.3 Pro nejlepší výsledky má být kalibrovaný termočlánek nejprve zahřát při maximálním ponoru na nejvyšší teplotu požadovaného použití. Termočlánky typu K, u nichž nastávají materiálové strukturální změny při teplotě kolem $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo výše, mají být kalibrovány při vzrůstající teplotě, a první kalibrační bod má být nakonec pro kontrolu opakován. Tytéž úvahy se vztahují v menším rozsahu na jiné termočlánky z obecných kovů.

7 TEPELNÉ ZDROJE

- 7.1 Termočlánky jsou kalibrovány měřením buďto v řadě pevných teplotních bodů, např. bodů tání či tuhnutí, nebo porovnáním s etalonovými (referenčními) termočlánky v teplotně stabilizovaných lázních či pískách vhodných pro kalibraci, nebo kombinací technik, např. porovnáním a měřením v pevných teplotních bodech. Pevné body a etalonové teploměry mají mít návaznost na

národní etalony. Obecně vzato, kalibrace v pevných bodech je vyžadována jen pro kalibraci platino-rhodiových termočlánků při požadavku nejvyšší přesnosti.

- 7.2 Teplotně stabilizovaná lázeň nebo pírka vhodná pro kalibraci je taková, v níž prostorové rozložení teploty (tj. teplotní profil) leží v požadovaných mezích; toto rozložení se zpravidla měří dvěma nebo více etalonovými teploměry v celém pracovním objemu, a to při teplotách na obou koncích pracovního rozsahu a v jeho středu. Zahrnutí těchto údajů do kalibračního listu může pomoci vyřešit problémy s ponorem, třebaže profil v pírce může podstatně záviset na rozměrech termočlánku.
- 7.3 V rámci teplotně stabilizované lázně nebo píčky mohou být teplotní gradienty sníženy nebo minimalizovány použitím kovových vyrovnávacích bloků s vyvrtnými jímkami pro etalonové a kalibrované teploměry. Takový blok není vždycky nezbytný; např. ve vícezónové řízené pírce a bez bloku může být stabilizace teploty dosaženo rychleji.
- 7.4 V kapalinových lázních mají být teploměry umístěny ve vzdálenosti kolem 1 cm a nemají se dotýkat dna nebo stěn, které mohou mít teplotu lehce odlišnou od teploty lázně.
- 7.5 Etalonové a kalibrované termočlánky mohou být ochráněny před znečištěním v pírce tím, že jsou vsunuty do těsných tenkostěnných trubek z rekrystalizovaného korundu s uzavřeným koncem. Může však být zapotřebí hlubšího ponoru pro kompenzaci horšího teplotního kontaktu.

8 HLOUBKA PONORU

- 8.1 Pokud je to možné, měly by být termočlánky kalibrovány při stejném ponoru, jaký bude požadován při obvyklém použití. Termočlánky mají být však ponořeny do dostatečné hloubky, aby se zabránilo tepelným ztrátám resp. ziskům za vysokých resp. nízkých teplot. Takové jevy jsou vyvolány velkým průřezem drátů a izolační a ochrannou keramikou s velkým průřezem. Kdekoliv je to možné, měl by být termočlánek postupně vsouván tak hluboko, až se další ponor už neprojeví změnou měřeného U_T ; to ukazuje, že bylo dosaženo vhodné hloubky ponoru. Za některých okolností je potřeba izolační a ochrannou keramiku odstranit a nahradit ji vhodnější izolací.
- 8.2 Tyto úvahy se vztahují jak na kalibraci porovnáním, tak i na kalibraci v pevných bodech. Může být dosaženo stabilního napětí U_T , což však neznamená nezbytně, že bylo dosaženo správné teploty. Odpovídajícího ponoru je dosaženo až tehdy, když změna U_T při povytažení termočlánku o jeden nebo dva centimetry je malá ve srovnání s požadovanou nejistotou měření při kalibraci.

9 MĚŘICÍ PROCEDURA

- 9.1 Při měření v pevných teplotních bodech je prozíravé měřit bod tání nebo tuhnutí každé realizace teploty s referenčním etalonovým termočlánkem, který by měl být určen právě tomuto účelu. Chybné nebo nesprávné plato může vzniknout

použitím PID regulátoru k řízení teploty. Ten může udržovat píčku velice přesně poblíž, ale nikoli na pevném teplotním bodu. Je proto důležité ověřit si křivku tání, tuhnutí a podchlazení, které předchází nárůstu teploty do dosažení bodu tuhnutí.

- 9.2 Při kalibraci porovnáním se doporučuje použít dvou standardů, čímž se umožní jak jejich vzájemné porovnání, tak i porovnání s kalibrovaným systémem. Aby se snížil vliv kolísání teploty tepelného zdroje, je třeba použít následující měřicí

posloupnost:

$S_1, X_1, X_2, \dots, X_n, S_2, S_2, X_n, \dots, X_2, X_1, S_1$

kde S_1 a S_2 jsou oba referenční standardy a X_1, X_2, \dots, X_n jsou kalibrované termočlánky.

Tato posloupnost může být opakována, čímž získáme čtyři měření na každém přístroji. Z nich se vypočte střední hodnota při použití všech korekcí (např. daných kalibrací voltmetru). Jako teplota se uvažuje střední hodnota vypočtená z výsledků S_1 a S_2 .

10 ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ

- 10.1 Elektrická měření se normálně provádějí číslicovým voltmetrem nebo přímokazujícími teplotními indikátory. Ruční potenciometry (kompenzátory) se nyní již užívají málo, třebaže mohou být ke vzájemným porovnáním a kontrolám užitečné pro svou dlouhodobou stabilitu. Všechny elektrické měřicí systémy mají být pravidelně kalibrovány v návaznosti na národní etalony v plném rozsahu potřebných U_T a teplot.
- 10.2 Ruční komutátory, přepínače a ruční potenciometry mají být denně jemně protočeny asi dvacetkrát, aby se očistily oxidované vrstvy a odstranily možné přechodové odpory.
- 10.3 Je-li požadována nejvyšší přesnost, má být měření provedeno při obou polaritách - přímé i obrácené - použitím přepínače (komutátoru). Střední hodnota měření eliminuje nebo minimalizuje vliv parazitního U_T v měřicím systému. Parazitní U_T může vznikat v každém bodě měřicího obvodu, kde nastává změna teploty na spoji dvou různých kovů, např. měděného vodiče a mosazné svorky. Mělo by být zajištěno vhodné stínění nebo obložení tepelnou izolací a kontrola okolní teploty. Číslicové voltmetry se mohou chovat různě v kladném a záporném módu, takže má-li být užito obrácení chodu, mají být kalibrovány obě polarity. Pro každé zbytkové napětí může být měřicí obvod kontrolován (a korigován) měřením obvodu se zkratovanými svorkami namísto termočlánku.

11 REKALIBRACE

- 11.1 Četnost rekaliibrace termočlánků není nijak formálně určena, protože typy termočlánků, jejich teplotní rozsahy, konstrukce, aplikace i intenzita používání

jsou velmi početné a rozmanité. Lze očekávat, že interní předpisy – příručky jakosti - určí ověřovací a rekalibrační lhůty v souladu s požadavky a s praxí.

- 11.2 Tam, kde jsou termočlánky instalovány dlouhodobě, je nejlépe provádět v případě potřeby kalibrace přímo na místě zasunutím kontrolního termočlánku podél kalibrovaného. Lze též kalibrovaný termočlánek nahradit kontrolním termočlánkem a porovnat jejich U_T . V praxi je hodné doporučení provádět toto nahrazení pravidelně.
- 11.3 Změna U_T i kalibrace termočlánku jako důsledek používání, nebo i jako bezprostřední důsledek kalibrace, může být číselně vyhodnocena ponořením termočlánku do teplotně stabilizované lázně nebo pícky, udržované na příslušné teplotě, a měřením výstupního napětí v řadě různých hloubek ponoru, které překrývají obvyklou pracovní hloubku. Je-li nakonec termočlánek ponořen podstatně hlouběji, tj. za hranici kterékoliv předchozí pracovní hloubky, mělo by se U_T těsně přibližovat hodnotě, kterou za odpovídající teploty vykázal (první) kalibrační list a mělo by tím podepřít tím platnost dvou (možná různých) kalibračních systémů.
- 11.4 Pro termočlánky z obecných kovů je často výměna za kalibrovaný termočlánek nejlepším řešením, lepším než rekaliibrace. Jinak se doporučují kalibrace nebo kontroly přímo na místě (“in site”). Nehomogenitu lze někdy vylepšit opatrným žiháním.

12 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

- 12.1 Kalibrační list, ve kterém jsou prezentovány výsledky měření, by měl být pojat s patřičným ohledem na snadné přizpůsobení k zamýšlenému použití (resp. k uživatelskému pracovnímu stylu), aby se zabránilo nebezpečí nesprávného použití nebo nedorozumění.
- 12.2 Kalibrační list musí vyhovovat požadavkům publikace EAL-R1 [8]. Technický obsah by měl zahrnovat následující:
- jasnou identifikaci položek, které jsou předmětem měření včetně termočlánků, všech kompenzačních nebo prodlužovacích vedení, speciálně jsou-li to samostatné položky, a všech ostatních přístrojů (např. číslicových voltmetrů), které jsou součástí měřicího řetězce,
 - rozsah teploty pokrývaný kalibrací,
 - popis každého žihání provedeného před kalibrací,
 - hloubku ponoru senzoru, pokud možno spolu s charakteristikou teplotního pole tepelného zdroje nebo zdrojů, užitých při kalibraci,
 - použitou proceduru měření (např. měření v pevných bodech nebo porovnání s etalonovými senzory), kalibraci při rostoucí nebo klesající teplotě,
 - všechny relevantní podmínky okolního prostředí,

- g) všechny etalonové i jiné specifikace relevantní pro použitou proceduru (např. referenční tabulky ITS-90),
- h) vyhodnocení nejistot měření, tvořících součást výsledku.

13 NEJISTOTY KALIBRACE

- 13.1 Nejistoty měření mají být vypočteny ve shodě s publikací EAL-R2 “Vyjádření nejistot měření při kalibraci” [9]. Příklad kalibrace ukazující pravděpodobné zdroje nejistot je uveden v dodatku.

14 LITERATURA

- 1 American Society For Testing And Materials: *Manual on the use of thermocouples in temperature measurement*. ASTM Special Technical Publication 470A. Philadelphia
- 2 Quinn, T. J.: *Temperature*. Academic Press: London, 1983
- 3 Nicholas, J. V.; White, D. R.: *Traceable Temperatures*. John Wiley & Sons Ltd.; Chicester, England, 1994
- 4 BIPM: *Techniques for Approximating the International Temperature Scale of 1990*. 1990.
- 5 Burns, G. W. et al.: *Temperature-Electromotive Forces Reference Functions and Tables for the Letter-designated Thermocouple Types Based on the ITS-90*, NIST Monograph 175, US Dept. of Commerce, 1993
- 6 IEC 584-1: 1995 (EN 60584-1: 1996). *Thermocouples. Part 1, Reference tables*
- 7 IEC 584-3: 1989. *Thermocouples. Part 3, Extensions and Compensating Cables — Tolerances and Identification System*.
- 8 EAL-R1: 1995. *Requirements Concerning Certificates Issued by Accredited Calibration Laboratories*.
- 9 EAL-R2: 1997. *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*.

Dodatek A

Příklad výpočtu nejistot

A1 Kalibrace termočlánu typu N při 1000 °C.

A1.1 Termočlánek typu N je kalibrován porovnáním se dvěma referenčními termočlány typu R ve vodorovné píce při teplotě 1000 °C. Napětí U_T vytvářené termočlánu je měřeno číslicovým mikrovoltmetrem přes komutátor a přepínač. Všechny termočlány mají referenční spoj na 0 °C. Kalibrováný termočlánek je připojen k referenčnímu bodu kompenzačním vedením.

A1.2 Teplota měřicího spoje testovaného termočlánu je

$$t_X = t_S(V_{IS} + \delta V_{IS1} + \delta V_{IS2} + \delta V_R - \delta t_{0S}/C_{S0}) + \delta t_D + \delta t_F \cong \\ \cong t_S(V_{IS}) + C_S \cdot \delta V_{IS1} + C_S \cdot \delta V_{IS2} + C_S \cdot \delta V_R - (C_S/C_{S0}) \cdot \delta t_{0S} + \delta t_D + \delta t_F \quad (A1.1)$$

Svorkové napětí na termočlánu při srovnávacím spoji udržovaném v průběhu kalibrace na 0 °C je:

$$V_X(t) \cong V_X(t_X) + (\Delta t/C_X) - (\delta t_{0X}/C_{X0}) = V_{IX} + \delta V_{IX1} + \delta V_{IX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + (\Delta t/C_X) - \\ - (\delta t_{0X}/C_{X0}) \quad (A1.2)$$

kde značíme:

$t_S(V)$ teplotu etalonového termočlánu v údajích napětí se srovnávacím spojem při 0 °C (funkce je zadána v kalibračním listu);

V_{IS}, V_{IX} údaje voltmetru;

$\delta V_{IS1}, \delta V_{IX1}$ korekce napětí z kalibrace voltmetru;

$\delta V_{IS2}, \delta V_{IX2}$ korekce napětí z rozlišovací schopnosti voltmetru;

δV_R korekce napětí z kontaktního jevu přepínače;

$\delta t_{0S}, \delta t_{0X}$ korekce teplot z referenčních teplot;

C_S, C_X koeficient citlivosti termočlánu pro napětí při měřené teplotě 1000 °C;

C_{S0}, C_{X0} koeficient citlivosti termočlánu pro napětí při referenční teplotě 0 °C;

δt_D drift⁴ etalonového teploměru od poslední kalibrace;

δt_F teplotní korekce z nerovnoměrnosti teplotního pole pícky;

t teplota, při níž má být termočlánek kalibrován (kalibrační bod);

$\Delta t = t - t_X$ odchylka teploty kalibračního bodu od teploty pícky;

δV_{LX} korekce napětí pocházející z kompenzačních vodičů.

⁴ tj. trvalá změna údaje, např. stárnutím, poškozením apod. (Pozn. překl.)

- A1.3 Prezentovaný výsledek je výstupní napětí testovaného termočlánku při teplotě jeho měřicího spoje. Protože měřicí proces sestává ze dvou kroků — stanovení teploty píčky a stanovení U_T testovaného článku — je vyhodnocení nejistoty měření rozděleno na dvě části.
- A1.4 **Referenční standardy:** Etalonové termočlánky typu R se dodávají s kalibračními listy, které vztahují teplotu měřicího spoje při teplotě srovnávacího spoje $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ k napětí na vodičích. Rozšířená nejistota měření při $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ je $U=0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (koeficient rozšíření $k=2$). Drift hodnot referenčních standardů od předchozí kalibrace je odhadnut jako $(0 \pm 0,3)\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- A1.5 **Koeficienty napěťové citlivosti:** Koeficienty napěťové citlivosti etalonových a testovaných termočlánků jsou převzaty z referenčních tabulek.
- | | 1000 °C | 0 °C |
|-----------------------|---|--|
| etalonový termočlánek | $C_S=0,077\text{ }^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ | $C_{S0}=0,189\text{ }^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ |
| neznámý termočlánek | $C_X=0,026\text{ }^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ | $C_{X0}=0,039\text{ }^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ |
- A1.6 **Rozlišovací schopnost a kalibrace voltmetru:** Byl použit 4 1/2 číslicový mikrovoltmetr na rozsahu⁵ 10 mV, což dává rozlišovací meze $0,5\text{ }\mu\text{V}$ na každém údaji. Voltmetr byl kalibrován a byly provedeny příslušné korekce měřeného napětí ve všech výsledcích. Kalibrační list udává pro napětí nižší než 50 mV konstantní rozšířenou nejistotu měření $U = 2,0\text{ }\mu\text{V}$ (koeficient rozšíření $k = 2$)
- A1.7 **Parazitní napětí:** Zbytkový parazitní offset napětí způsobený kontakty spínačů byl odhadnut jako $(0 \pm 2)\text{ }\mu\text{V}$.
- A1.8 **Referenční teploty:** Teplota srovnávacího spoje každého termočlánku je $(0 \pm 0,1)\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- A1.9 **Teplotní gradienty:** Byly změřeny teplotní gradienty uvnitř píčky. Při $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ byla v měřené oblasti teplota $(1000 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tj. odchylky od rovnoměrnosti nepřekročily $1\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- A1.10 **Kompenzační vodiče:** Kompenzační vodiče byly testovány v rozsahu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíly napětí mezi vodiči a větvemi termočlánku byly odhadnuty jako menší než $5\text{ }\mu\text{V}$.
- A1.11 **Pozorování:** Údaje voltmetru byly čteny v následujícím pořadí, které dává čtyři odečty pro každý termočlánek a snižuje efekt driftu teploty v tepelném zdroji a parazitní teplotní napětí v měřicích obvodech:

⁵ Vzhledem k rozsahu 4 1/2 číslice má být snad spíše 20 mV. (Pozn. překl.)

1. cyklus:

1. etalon, kalibrovaný termočlánek, 2. etalon, 2. etalon, kalibrovaný termočlánek, 1. etalon

Změna polarity.

2. cyklus:

1. etalon, kalibrovaný termočlánek, 2. etalon, 2. etalon, kalibrovaný termočlánek, 1. etalon

Tento postup vyžaduje, aby rozdíl mezi dvěma etalonovými termočlánci nepřekročil 0,3 °C. Jestliže rozdíl není v těchto mezích, je třeba opakovat pozorování a vyšetřit důvody, které k tak velkému rozdílu vedly.

Termočlánek:	1. etalon	kalibrovaný	2. etalon
Indikované napětí	+10 500 μV	+36 245 μV	+10 503 μV
korigované	+10 503 μV	+36 248 μV	+10 503 μV
	-10 503 μV	-36 248 μV	-10 505 μV
	-10 504 μV	-36 251 μV	-10 505 μV
Střední napětí	10 502,5 μV	36 248 μV	10 504 μV
Teplota měřicího spoje	1000,4 °C		1000,6 °C
Teplota píčky		1000,5 °C	

A1.12

Ze čtyř odečtů na každém termočlánci je odvozena jedna střední hodnota napětí každého termočlánci. Střední hodnota napětí referenčních termočlánců je převedena na teplotu použitím vztahů mezi napětím a teplotou udaných v jejich kalibračních listech. Tyto teplotní údaje jsou silně korelovány a použitím střední hodnoty jsou zahrnuty do pozorování teploty píčky v místě kalibrovaného termočlánci. Podobně je vytvořena jedna hodnota napětí na kalibrovaném termočlánci. Pro vyhodnocení nejistot měření spjatých s těmito měřeními byla předem provedena řada deseti měření za téže teploty, čímž byly získány sjednocené odhady pro standardní odchylku teploty píčky a napětí kalibrovaných termočlánců.

Výsledné standardní nejistoty měření jsou:

sjednocený odhad standardní odchylky:	$s_p(t_S) = 0,10 \text{ °C}$
standardní nejistota:	$u(t_S) = s_p(t_S) / \sqrt{1} = 0,10 \text{ °C}$
sjednocený odhad standardní odchylky:	$s_p(V_{iX}) = 1,6 \text{ μV}$
standardní nejistota:	$u(V_{iX}) = s_p(V_{iX}) / \sqrt{1} = 1,6 \text{ μV}$

A1.13 **Rozpočet nejistot (teplota píčky):**

veličina X	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpo- dobnosti	koefficient citlivosti c	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
t_S	1000,5 °C	0,10 °C	normální	1,0	0,10 °C
δV_{iS1}	0 μ V	1,00 μ V	normální	0,077 °C/ μ V	0,077 °C
δV_{iS2}	0 μ V	0,29 μ V	pravoúhlé	0,077 °C/ μ V	0,022 °C
δV_R	0 μ V	1,15 μ V	pravoúhlé	0,077 °C/ μ V	0,089 °C
δt_{0S}	0 °C	0,058 °C	pravoúhlé	-0,407	-0,024 °C
δt_S	0 °C	0,15 °C	normální	1,0	0,15 °C
δt_D	0 °C	0,173 °C	pravoúhlé	1,0	0,173 °C
δt_F	0 °C	0,577 °C	pravoúhlé	1,0	0,577 °C
t_X	1000,5 °C				0,641 °C

A1.14 **Rozpočet nejistot (U_T kalibrovaného termočlánku):**

veličina X_i	odhad x_i	standardní nejistota $u(x_i)$	rozdělení pravděpo- dobnosti	koefficient citlivosti c_i	příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
V_{iX}	36 248 μ V	1,60 μ V	normální	1,0	1,60 μ V
δV_{iX1}	0 μ V	1,00 μ V	normální	1,0	1,00 μ V
δV_{iX2}	0 μ V	0,29 μ V	pravoúhlé	1,0	0,29 μ V
δV_R	0 μ V	1,15 μ V	pravoúhlé	1,0	1,15 μ V
δV_{LX}	0 μ V	2,9 μ V	pravoúhlé	1,0	2,9 μ V
Δt_X	0,5 °C	0,641 °C	normální	38,5 μ V/°C	24,5 μ V
δt_{0X}	0 °C	0,058 °C	pravoúhlé	-25,6 μ V/°C	-1,48 μ V
V_X	36 229 μ V				25,0 μ V

A1.15 Rozšířené nejistoty

Rozšířená nejistota sdružená s měřením teploty píčky je:

$$U = k \times u(t_X) = 2 \times 0,641 \text{ } ^\circ\text{C} \cong 1,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Rozšířená nejistota sdružená s měřením U_T kalibrovaného článku je:

$$U = k \times u(V_X) = 2 \times 25,0 \text{ } \mu\text{V} \cong 50 \text{ } \mu\text{V}$$

A1.16 Prezentovaný výsledek

Termočlánek typu N při teplotě $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ a se srovnávacím spojem při teplotě $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ vykazuje napětí U_T rovné $(36\,230 \pm 50) \text{ } \mu\text{V}$.

Prezentovaná rozšířená nejistota měření se rozumí jako standardní nejistota měření, násobená faktorem rozšíření $k=2$, který pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti rozšíření přibližně 95%.