



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

CHYBY A NEJISTOTY PŘI MĚŘENÍ TEPLoty

ERORS AND UNCERTAINTIES IN TEMPERATURE MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAKUB JIRMÁSEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Jirmásek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Chyby a nejistoty při měření teploty

v anglickém jazyce:

Erors and Uncertainties in Temperature Measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření teploty je velmi častou úlohou v technické praxi. Při jeho realizaci se ale vyskytuje také řada problémů, které mohou výrazně zkreslit výsledek.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vypracování studie, řešící negativní vlivy na výslednou přesnost měření teploty. Práce analyzuje zdroje chyb a nejistot při měření teploty i možnosti jejich kompenzace.

Doporučená osnova práce:

1. Měření teploty
2. Nejistoty měření
3. Zdroje chyb a nejistot při měření teploty
4. Možnosti kompenzace zásadních negativních vlivů
5. Ukázka řešení na zvoleném příkladu

Seznam odborné literatury:

JENČÍK, J; Volf, J.; Technická měření : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.

KREIDL, M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.

SLÁDEK, Z.; Vdoleček, F.; Technická měření : 1.vydání Brno : Nakladatelství VUT, 1992. 220 s. ISBN 80-214-0414-0.

TNI 01 4109-3:2011 Nejistota měření - Část 3: Pokyn pro vyjádření nejistoty měření. ÚNMZ Praha 2011.

Firemní literatura.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřená na zdroje nejistot při měření teplot a jejich vyjadřování. Je zde základní popis teploty jakožto fyzikální veličiny a její stupnice. V práci jsou popsány některé druhy teploměrů, se zaměřením především na teploměry elektrické, které mají dominantní postavení v oblasti automatizace a regulace. Dále je zde popsán význam nejistot měření a způsob jejich vyjádření. Větší prostor je věnován významu jednotlivým zdrojům nejistot a jejich možné kompenzaci. Na závěr je uveden příklad určení nejistoty měření.

ABSTRACT

Bachelor thesis is focused on sources of temperature measurement uncertainties and their expressing. There is a basic description of the temperature as a physical quantity and its scale. The study describes some kinds of thermometers, focusing primarily on electric thermometers which have a dominant position in the field of automation and regulation. Further the importance of measurement uncertainty is described and its expressing. More space is devoted to the importance of different sources of uncertainty and possible compensation. Finally there is an example of determining the measurement uncertainty.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplota, teploměr, nejistota měření, zdroje nejistot, kompenzace

KEY WORDS

temperature, thermometer, measurement uncertainty, sources of uncertainty, compensation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JIRMÁSEK, J. *Chyby a nejistoty při měření teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vdoleček, CSc.

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použitých zdrojů.

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za odborné vedení, trpělivost, a cenné rady při tvorbě bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	11
1 Měření teploty.....	13
1.1 Teplotní stupnice.....	13
1.2 Mezinárodní teplotní stupnice ITS 90	14
1.3 Teploměry a jejich rozdělení	16
1.3.1 Dilatační teploměry.....	18
1.3.2 Elektrické teploměry	19
1.3.2.1 Odporové teploměry	19
1.3.2.2 Teploměry termoelektrické	22
1.3.3 Optické teploměry.....	24
1.3.4 Termovize	24
1.3.5 Orientační měření teplot	24
2 Nejistoty měření.....	25
2.1 Chyby měření.....	25
2.2 Nejistoty měření.....	25
2.2.1 Standardní nejistota typu A.....	26
2.2.2 Standardní nejistota typu B.....	26
2.2.3 Standardní kombinovaná nejistota.....	27
2.2.4 Rozšířená nejistota	27
2.2.5 Nepřímá měření	27
3 Zdroje chyb a nejistot při měření teplot	29
3.1 Elektrické odporové teploměry.....	29
3.1.1 Platné normy	29
3.1.2 Časová stabilita	29
3.1.2.1 Hystereze.....	30
3.1.2.2 Fluktuace	30
3.1.2.3 Stárnutí	30
3.1.3 Konstrukce snímačů a spojovacích prvků	30
3.1.3.1 Izolační odpor	30
3.1.3.2 Ohřev procházejícím proudem.....	30
3.1.3.3 Vliv odporu vedení.....	31
3.1.3.4 Ostatní spojovací prvky	31
3.2 Termoelektrické teploměry.....	31
3.2.1 Platné normy	31
3.2.2 Časová stabilita	32

3.2.3	Vliv spojovacích prvků.....	32
3.2.4	Vliv kolísání srovnávací teploty	32
3.2.5	Vliv rušivých polí a vazeb	33
3.3	Měřicí přístroje	34
3.4	Doba odezvy	34
3.4.1	Přechodová charakteristika.....	35
3.4.2	Rychlostní charakteristika	36
3.5	Zabudování a umístění dotkových teploměrů	36
3.5.1	Přenos tepla kondukcí.....	37
3.5.2	Přenos tepla konvekcí	38
3.5.3	Přenos tepla radiací.....	38
4	Možnosti kompenzace zásadních negativních vlivů.....	39
4.1	Vliv odporu vedení u odporových teploměrů.....	39
4.1.1	Dvou vodičové zapojení	39
4.1.2	Třívodičové zapojení	40
4.1.3	Čtyřvodičové zapojení.....	40
4.2	Kompenzace studených spojů termočlánků	40
4.2.1	Kompenzace s termostatem	41
4.2.2	Kompenzační zapojení	41
4.2.3	Číslicová korekce	42
4.3	Potlačení vlivu šumu při měření termočlánky.....	42
4.4	Základní metody linearizace.....	43
4.4.1	Analogová linearizace	43
4.4.2	Linearizace založená na korekční tabulce	43
4.4.3	Linearizace založená na úsekové lineární interpolaci a interpolaci polynomem nebo splinem.....	44
4.4.4	Linearizace založená na aproximaci křivky	44
4.4.5	Linearizace založená na minimalizaci chyb	44
4.5	Zásady správného zabudování dotkových snímačů teploty	45
4.5.1	Měření teploty tekutin	45
4.5.2	Měření teploty tuhých těles	46
4.5.3	Měření povrchové teploty tuhých těles	46
4.5.4	Měření prostorové teploty v místnostech a budovách.....	47
5	Ukázka řešení na zvoleném příkladu	49
	Závěr	51
	Seznam použitých zdrojů a literatury	53

ÚVOD

Teplota je jednou z nejdůležitějších fyzikálních veličin a zároveň jednou ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Ovlivňuje prakticky všechny děje a pochody, ať už pozitivně či negativně. Její určení má pro nás mnohdy zásadní význam, ať už jde o průmyslové provozy, lékařství, otázku tepelné pohody, bezpečnost a hospodárnost provozů aj.

Člověk je schopen teplotu vnímat a přiřadit ji pocity studeného, teplého či horkého. S tím bychom si ovšem asi jen těžko vystačili, proto se snažíme ji nějakým způsobem kvantifikovat. K tomuto účelu nám slouží teploměry. Jejich historie začala v roce 1592 vynálezem italského fyzika, astronoma a filosofa Galilea Galileie, který sestrojil první teploměr založený na teplotní roztažnosti vzduchu. Od té doby vývoj teploměrů ušel značnou cestu a došlo k mnohým změnám a vylepšením v používaných metodách a přístrojích.

Měření teploty jsou měření nepřímá. Znamená to, že neměříme fyzikální veličinu teplotu přímo měřidlem se stejnou vlastností, ale měříme důsledek dané veličiny (např. délkovou nebo objemovou roztažnost, změnu elektrických vlastností, aj.). V této práci bude zaměřeno především na teploměry elektrické, které mají významné postavení v oblasti automatizace a regulace.

Každé měření jakékoliv fyzikální veličiny je zatíženo chybou, nejsme schopni vyvinout absolutně přesné měřidlo. Na zkoumaný objekt i měřicí přístroj působí různé vlivy, které ovlivňují velikost této chyby. Tato odchylka se dříve vyjadřovala jako chyba měření, neboli rozdíl mezi hodnotou pravou a naměřenou. V dnešní době se pomalu přechází k vyjadřování nepřesnosti měření pomocí nejistoty, čili určení intervalu, ve kterém se nachází hodnota pravá s určitou pravděpodobností.

Cílem této práce bylo seznámit se blíže s pojmem nejistoty měření a především se zdroji nejistot, které ovlivňují výslednou přesnost. V závěru práce jsou uvedeny některé vybrané metody kompenzace sloužící ke zmenšení intervalu nejistoty.

1 MĚŘENÍ TEPLoty

Teplota je jedna ze sedmi základních veličin soustavy SI. Je zároveň jednou ze základních stavových veličin popisujících stav hmoty. Určuje míru kinetické energie neustálého neuspořádaného pohybu částic (molekul, atomů, ...) a je důležitým faktorem v téměř všech odvětvích lidské činnosti a přírodních dějích. Za nejnižší teplotu se považuje stav, kdy ustává veškerý pohyb částic a definuje se jako absolutní nula.

1.1 Teplotní stupnice

V minulosti se k měření teploty používalo řady stupnic, které byly založeny na vlastnostech teploměrné látky. Pro objektivní měření by ovšem teplotní stupnice neměla být závislá na vlastnostech teploměrné látky. Tento požadavek splňuje termodynamická stupnice, která se definuje na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu vztahem

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}, \quad (1.1)$$

kde η je účinnost Carnotova cyklu, Q_1 je teplo odevzdané teploměrnou látkou s teplotou T_1 a Q_2 je teplo odebrané teploměrnou látkou s teplotou T_2 , přičemž platí $T_2 > T_1$ [1].

Pro případ ideálního Carnotova cyklu, kdy účinnost $\eta = 1$ je rovnice vyjádřena

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (1.2)$$

Teplotní stupnice se může tímto způsobem definovat pomocí termodynamických zákonů, nezávisle na vlastnostech teploměrné látky [1].

Základní jednotkou termodynamické teplotní stupnice je kelvin (K) definovaný jako 273,16-tý díl teploty trojného bodu vody. Trojný bod je stav, při kterém jsou v rovnováze všechny tři fáze (tuhá, kapalná i plynná) [2].

Ideální tepelný stroj pracující na principu vratného Carnotova cyklu nelze sestrojít, avšak jako teploměrná látka se může použít dokonalý plyn. V souladu s Carnotovým cyklem pro tento plyn platí termodynamická rovnice (pro jeden mol látky)

$$p \cdot V = R_m \cdot T, \quad (1.3)$$

kde R_m je molární plynová konstanta, V je objem plynu, p je tlak plynu a T je termodynamická teplota plynu [1].

V případě konstantního objemu V máme vztah používaný pro plynovou termometrii

$$p = T \frac{p_0}{T_0}, \quad (1.4)$$

přičemž za p_0 a T_0 dosazujeme normální fyzikální podmínky

$$\begin{aligned} p_0 &= 101325 \text{ Pa}, \\ T_0 &= 273,15 \text{ K}. \end{aligned}$$

Plynový teploměr se realizuje s přesností definice termodynamické teploty podle rovnice (1.1). Používají se plyny (vodík, helium), které se svými vlastnostmi blíží co nejvíce plynu dokonalému. Pro zvolený plyn se dále uplatňují známé korekce stavové rovnice mezi dokonalým a reálným plynem [1].

Další v praxi využívanou teplotní stupnicí je Celsiova, která je definována dvěma základními body: bod tuhnutí vody (0 °C nebo také 273,15 K) a bod varu vody (100 °C nebo také 373,15 K). Jednotkou této stupnice je Celsiův stupeň (°C). Velikost jednoho dílku Celsiovy i termodynamické stupnice je totožná, z čehož vyplývá následující vztah mezi nimi:

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15, \quad (1.5)$$

kde t je Celsiova teplota a T je termodynamická teplota [2].

V anglosaských zemích se dodnes používají stupnice Fahrenheitova (°F) a Rankinova (°R). Velikost jednoho dílku obou stupnic je stejná, podobně jako je tomu u termodynamické a Celsiovy stupnice. Ve Fahrenheitově stupnici teplota tání ledu odpovídá 32 °F a teplota varu vody 212 °F. Mezi těmito body je tudíž rozdíl 180 °F. V Rankinově stupnici zase absolutní nula odpovídá 0 °R. Pro přepočítání mezi Celsiovou a Fahrenheitovou stupnicí platí vztah (1.6) a mezi termodynamickou a Rankinovou platí vztah (1.7):

$$v(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}t(^{\circ}\text{C}) + 32, \quad (1.6)$$

$$T_R(^{\circ}\text{R}) = \frac{9}{5}T(\text{K}), \quad (1.7)$$

kde v je Fahrenheitova teplota, t je Celsiova teplota, T_R je absolutní teplota Rankinova a T je absolutní teplota Kelvinova [3].

1.2 Mezinárodní teplotní stupnice ITS 90 [4]

I když je plynová termometrie nej přesnější měřicí metodou, vyžaduje náročné laboratorní podmínky a je časově náročná. Proto byla stanovena praktická teplotní stupnice ITS 90 (The International Temperature Scale of 1990), jejíž poslední znění je z roku 1990. ITS 90 je empirickou teplotní stupnicí stanovenou na 17 definovaných teplotních bodech, které odpovídají rovnovážným stavům mezi fázemi vybraných látek.

Stupnici dělíme na 4 dílčí intervaly:

1) Rozsah 0,65 K až 5,0 K

Teplota T_{90} v tomto rozmezí je definována pomocí tlaku par ^3He a ^4He vztahem

$$T_{90} = A_0 + \sum_i^9 A_i \left[\frac{\ln(p - B)}{C} \right]^i, \quad (1.8)$$

kde T_{90} je teplota ITS 90, p je tlak plynu, a A_0, A_i, B, C jsou konstanty interpolace uvedené v [2].

2) Rozsah od 3,0 K do 24,556 K (trojný bod neonu)

V tomto rozsahu se teplota T_{90} definuje pomocí ^3He nebo ^4He plynového teploměru při konstantním objemu. Teploměr je kalibrován při třech teplotách – trojný bod neonu (24,556 K), trojný bod rovnovážného vodíku (13,8033 K) a pomocí teploty mezi 3,0 K až 5,0 K, která je určena metodou popsanou v předchozím bodě.

Pro ^4He teploměr použitý v rozmezí teplot 4,2 K a 24,556 K platí vztah

$$T_{90} = a + bp + cp^2, \quad (1.9)$$

kde a , b , c jsou konstanty získané při kalibraci, s tím, že jedna ze tří teplot je v rozmezí 4,2 K až 5,0 K a p je tlak plynu.

Pro ^4He teploměr použitý v rozmezí 3,0 K až 4,2 K a pro ^3He teploměr pracující v rozsahu 3,0 K až 24,556 K je potřeba počítat s neideálností plynu, která se kompenzuje pomocí koeficientu $B_x(T_{90})$. Zde platí vztah

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90}) \frac{N}{V}}, \quad (1.10)$$

kde a , b , c jsou konstanty získané při kalibraci, B_x je koeficient určený vztahem (1.11), resp. (1.12), v závislosti na použitém plynu (x nabývá hodnot 3 pro ^3He a 4 pro ^4He), p je tlak plynu a N/V je molární hustota plynu (jednotka mol/m³).

Vzorce pro B_x :

$$\begin{aligned} \text{pro } ^3\text{He} \quad B_3(T_{90}) = [16,69 - 336,98T_{90}^{-1} + 91,04T_{90}^{-2} \\ - 13,82T_{90}^{-3}] \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$\begin{aligned} \text{pro } ^4\text{He} \quad B_4(T_{90}) = [16,708 - 374,05T_{90}^{-1} - 383,53T_{90}^{-2} + 1799,2T_{90}^{-3} \\ - 4033,2T_{90}^{-4} + 3252,8T_{90}^{-5}] \cdot 10^{-6} \end{aligned} \quad (1.12)$$

3) Rozsah od 13,8033 K (trojný bod rovnovážného stavu vodíku) do 1234,93 °C (bod tuhnutí stříbra)

Definuje se pomocí platinového odporového teploměru, který se kalibruje v určených pevných bodech, a pomocí referenčních a odchylkových funkcí sloužících k interpolaci teplot ležících mezi pevnými body. Teploty jsou vyjádřeny jako poměr odporu teploměru $R(T_{90})$ při teplotě T_{90} a odporu $R(273,16 \text{ K})$ při teplotě trojného bodu vody. Tento odporový poměr je

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,16 \text{ K})}. \quad (1.13)$$

Teplota je pak počítána pomocí redukovaného poměru

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = \Delta W(T_{90}), \quad (1.14)$$

kde W je pozorovaná hodnota, W_r je hodnota určená z referenční funkce a ΔW je odchylková funkce.

Jelikož jediný platinový odporový teploměr není schopný pokrýt celý tento určený rozsah s dostatečnou přesností, dělí se dále na menší celky. Rozpětí teplot 13,8033 K až 273,16 K je popsáno referenční funkcí

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left(\frac{\ln\left(\frac{T_{90}}{273,16}\right) + 1,5}{1,5} \right)^i, \quad (1.15)$$

eventuálně inverzním vztahem

$$\frac{T_{90}}{273,16} = B_0 + \sum_{i=1}^{12} B_i \left(\frac{W_r^{\frac{1}{6}} - 0,65}{0,35} \right)^i, \quad (1.16)$$

kde A_0, A_i, B_0 a B_i jsou konstanty uvedené v [4]. Tento rozsah se dále dělí na čtyři menší podskupiny, které se liší odchylkovou funkcí (jednotlivé funkce uvedeny v [4]).

Rozsah 273,15 K až 1234,93 K je popsán referenční funkcí

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left(\frac{T_{90} - 754,15}{481} \right)^i, \quad (1.17)$$

popř. inverzním vyjádřením

$$T_{90} - 273,15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left(\frac{W_r - 2,64}{1,64} \right)^i, \quad (1.18)$$

kde C_0, C_i, D_0 a D_i jsou konstanty uvedené v [4]. Tento rozsah se dále dělí na šest menších podskupin, které se liší odchylkovou funkcí (jednotlivé funkce uvedeny v [4]).

4) Rozsah nad 1234,93 K

Teplota T_{90} nad 1234,93 K je určena radiační termometrií založené na Planckově vyzářovacím zákoně

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda(T_{90}(X))} = \frac{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T_{90}(X)}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T_{90}}\right)} - 1}, \quad (1.19)$$

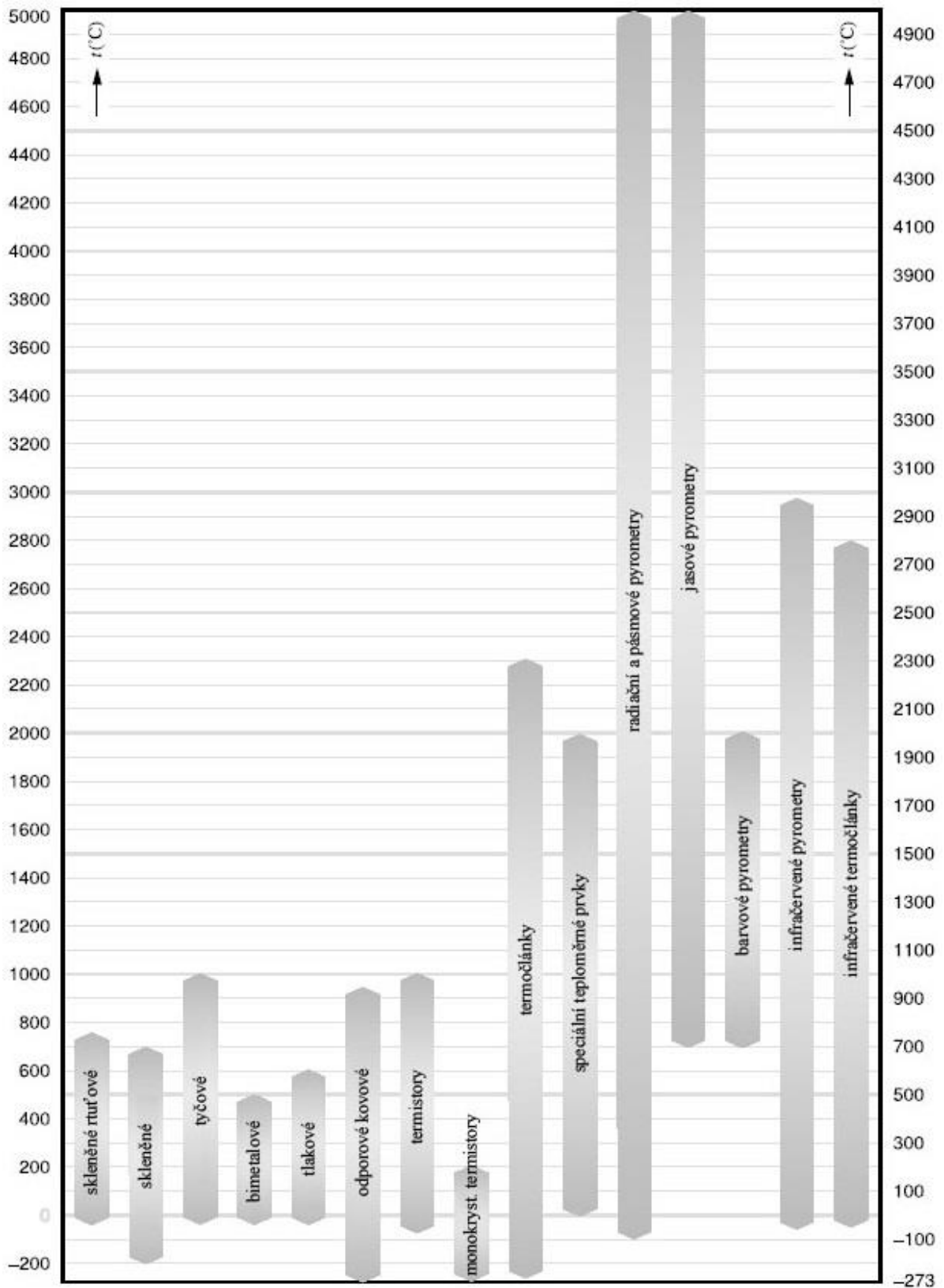
kde $T_{90}(X)$ odpovídá teplotě tuhnutí stříbra, zlata nebo mědi a $L_\lambda(T_{90})$, resp. $L_\lambda(T_{90}(X))$ jsou spektrální hustoty záře černého zářiče při vlnové délce λ a teplotě T_{90} , resp. $T_{90}(X)$ a $c_2 = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$.

1.3 Teploměry a jejich rozdělení

Teploměry jsou zařízení sloužící k měření teploty. Pro měření se dnes využívá různých fyzikálních principů, z čehož také vyplývá konstrukční rozmanitost.

Rozdělit teploměry můžeme z několika hledisek. Podle polohy snímací části při měření dělíme teploměry na *dotykové*, kdy je snímací část v přímém kontaktu s měřeným prostředím, a *bezdotykové*, které měří teplotu na dálku. Podle fyzikálního principu rozlišujeme teploměry na *dilatační*, *elektrické*, *optické* a *speciální*. Vzhledem k použité teploměrné látce máme teploměry *kapalinové*, *kovové*, *polovodičové*, *plynové* aj [1].

V praxi si pro měření teplot nevystačíme v celém rozsahu s jediným přístrojem, proto se jednotlivé skupiny vhodně překrývají a doplňují.



Obr. 1.1 Měřicí rozsahy používaných teploměrů [1]

1.3.1 Dilatační teploměry [1]

Tento typ teploměrů využívá délkové nebo objemové roztažnosti měřicí látky v závislosti na změně teploty. Příslušnou látkou může být pevná látka, kapalina nebo plyn.

Podle toho, jaké roztažnosti teploměr využívá, platí tyto vztahy

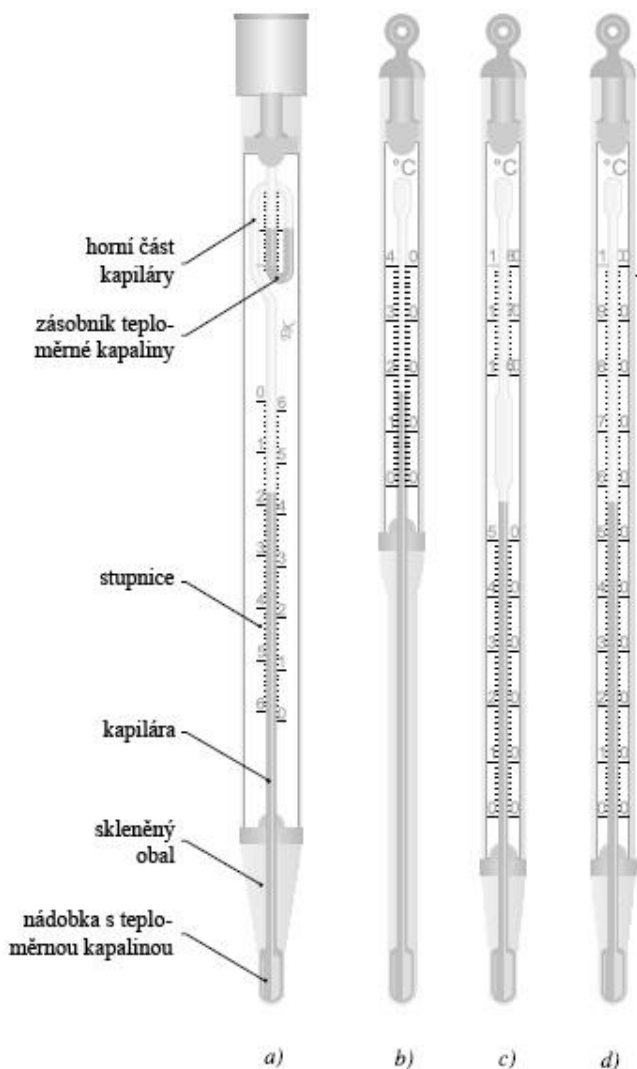
$$l = l_0(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (1.20)$$

$$V = V_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (1.21)$$

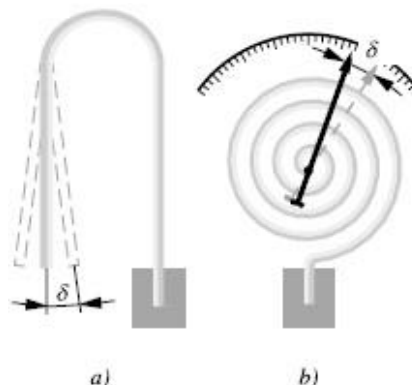
$$p = p_0(1 + \beta \cdot \Delta T), \quad (1.22)$$

kde l je výsledná délka, l_0 je počáteční délka, V je výsledný objem, V_0 je počáteční objem, p je výsledný tlak, p_0 je počáteční tlak, α je součinitel teplotní délkové roztažnosti, β je součinitel objemové teplotní roztažnosti a ΔT je teplotní rozdíl.

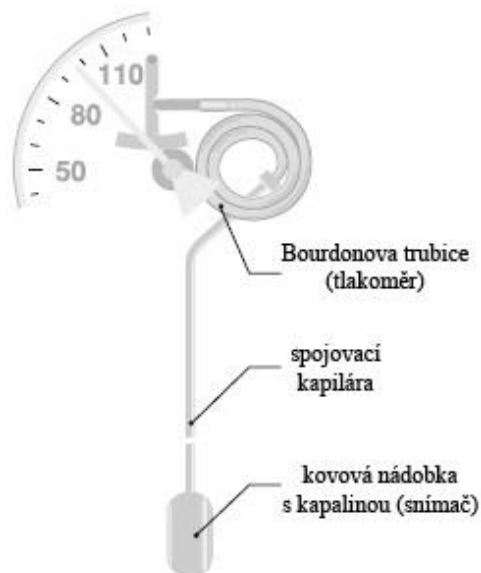
Některé typy používaných dilatačních teploměrů:



Obr. 1.2 Rtuťové teploměry
a) Beckmannův, b) stonkový, c) s potlačenou stupnicí, d) obalový [1]



Obr. 1.3 Provedení bimetalových teploměrů
a) ve tvaru písmene U, b) plochá spirála [1]



Obr. 1.4 Tlakový kapalinový teploměr [1]

1.3.2 Elektrické teploměry

Tyto teploměry využívají změny některé elektrické veličiny (odporu, výstupního proudu či napětí) snímače v závislosti na teplotě. Řadíme sem odporové teploměry a termočlánky.

Díky elektrickému výstupu jsou tyto teploměry nejrozšířenějšími zařízeními ke snímání teploty v automatizaci technologických procesů. Hlavními výhodami jsou malé rozměry, přesnost, jednodušnost výstupu, velké množství konstrukčních vyhotovení a také přijatelná cena.

1.3.2.1 Odporové teploměry

Odporové teploměry, jak už název napovídá, využívají změnu elektrického odporu vodiče v závislosti na teplotě. Dělí se na dvě skupiny podle použitého materiálu na výrobu snímače – kovové a polovodičové.

Odporové teploměry kovové

V kovech je elektrický proud veden tzv. „elektronovým plynem“ – volnými elektrony pohybujícími se v mřížce kovu. Kladné ionty krystalové mřížky zase kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Zatímco střední hodnota rychlosti neuspořádaného pohybu elektronů se mění s teplotou jen málo, má velký vliv zvýšení teploty na vlastní kmitočet atomů krystalové mřížky. Tím roste pravděpodobnost srážek volných elektronů s ionty mřížky a tím se brzdí pohyb volných elektronů. Tento fakt popisuje materiálová veličina konduktivita (měrná vodivost)

$$\gamma = \frac{e^2 n \tau}{m^*}, \quad (1.23)$$

kde γ je konduktivita, e je elementární náboj, n je počet elektronů v jednotkovém objemu, τ je relaxační doba (udává, jak rychle se systém narušený vnějším polem vrací do rovnováhy) a m^* je efektivní hmotnost nosiče náboje [5].

Převrácená hodnota konduktivity je rezistivita (měrný odpor), pomocí které se definuje známější vztah pro odpor vodiče

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (1.24)$$

kde R je odpor (rezistence) vodiče, ρ je měrný odpor materiálu vodiče, L je délka vodiče a S je obsah průřezu vodiče [5].

V praxi se setkáváme s materiálovou konstantou s názvem teplotní součinitel odporu α (jednotka K^{-1}), popsáný vztahem

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t}. \quad (1.25)$$

Pro malý rozsah teplot $0\text{ }^\circ\text{C}$ až $100\text{ }^\circ\text{C}$ lze poté s určitou nejistotou používat lineární vztah

$$R_t = R_0(1 + \alpha t), \quad (1.26)$$

kde R_t je odpor při Celsiově teplotě t a R_0 je odpor při teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$ [2].

Pro větší rozsahy teplot lineární vztah (1.26) už ovšem nestačí a zavádějí se proto rovnice v polynomickém tvaru, která záleží na příslušném použitém materiálu snímače.

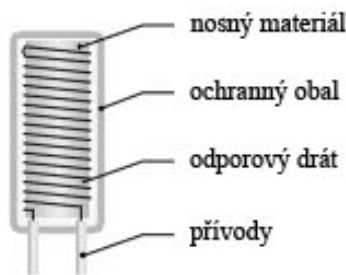
Dalším parametrem odporových teploměrů je poměr odporů čidla při teplotách $100\text{ }^\circ\text{C}$ a $0\text{ }^\circ\text{C}$ popsáný vztahem

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}, \quad (1.27)$$

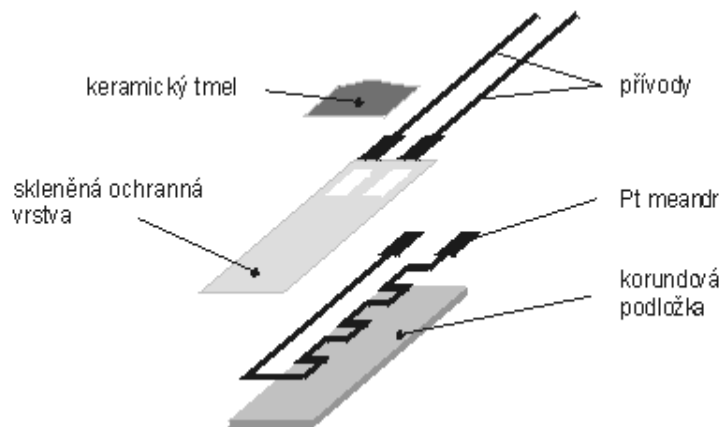
kde W_{100} je výsledný poměr, R_{100} , resp. R_0 je odpor při teplotě 100 °C, resp. 0 °C [3].

Odporový teploměr se skládá z vlastního snímače (čidlo, vnitřní vedení, izolační materiál a hlavice nebo konektor, spojovacího vedení a měřicího přístroje). Základním materiálem pro výrobu odporových kovových snímačů je platina o vysoké čistotě (99,9% až 99,99%). Vedle platiny se používá dalších odporových materiálů, především niklu, mědi, Balco (Ni-Fe) a pro nízké teploty slitiny Rh-Fe, Pt-Co, aj. Materiál by měl být chemicky i fyzikálně stálý v celém měřicím rozsahu, nesmí oxidovat a reagovat s izolačním a ochranným pouzdem. Jeho teplotní součinitel odporu α by měl být co největší a časově stálý [1].

Snímací prvky se vyrábí buď jako tenké drátky nebo ve formě fólie. V prvním případě bývá jádro čidla, tvořené tenkým drátkem o průměru 20 μm až 100 μm navinutém na nosném materiálu (sklo, keramika, ...), zatavené v ochranném obale. V druhém případě zase bývá tenká kovová fólie nalepená na podložce a spolu s podložkou uložená v ochranném obale [1].



Obr. 1.5 Snímač ve formě navinutého drátku [1]



Obr. 1.6 Odporový foliový snímač [7]

Odporové teploměry polovodičové

Polovodiče jsou látky, které jsou z hlediska elektrických vlastností mezi vodiči a izolanty. Vedení proudu se uvnitř polovodičů účastní volné elektrony a díry, které vzniknou po uvolnění elektronu. K uvolnění potřebuje elektron jistou dávku energie, aby se dostal přes tzv. zakázaný pás do pásu vodivostního [5].

Rovnice pro rezistivitu

$$\rho = \frac{m^*}{e^2 n \tau}, \quad (1.28)$$

kde e je elementární náboj, n je počet elektronů v jednotkovém objemu, τ je relaxační doba a m^* je efektivní hmotnost nosiče náboje [5].

V polovodičích na rozdíl od kovů je n sice malé, ale s rostoucí teplotou se rychle zvyšuje, protože je teplem excitováno stále více nosičů náboje. Podobně jako u kovů i zde dochází k nárůstu frekvence srážek, ale tento jev je zastíněn rychlým nárůstem n [5].

Polovodičové odporové senzory se dají rozdělit na: [3]

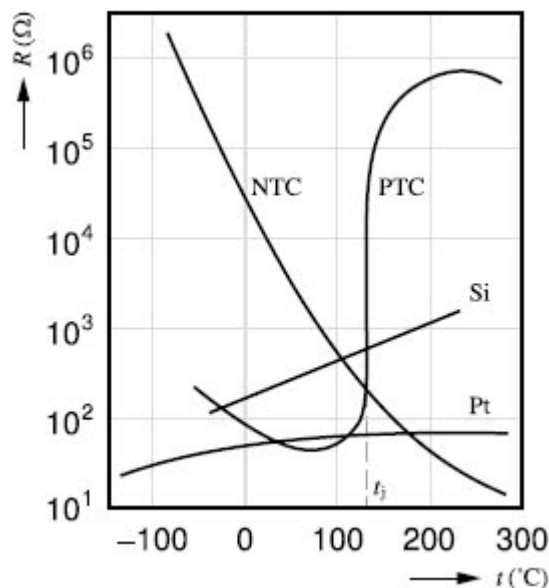
- Termistory
 - Negastory (NTC termistory)

➤ Pozistory (PTC termistory)

- Monokrystalické odporové senzory

Termistory se vyrábí z polovodičových feroelektrických keramických materiálů v různých tvarech (destičky, kapky, disky, ...). Jejich výhodou je velká teplotní citlivost, malé rozměry a jednoduchý převod odporu na elektrický proud nebo napětí. Nevýhodou je nelineární charakteristika [3].

Termistory mají buď záporný teplotní součinitel (negastory), nebo kladný teplotní součinitel (pozistory). V praxi se k měření používají převážně negastory, pozistory slouží k tepelné ochraně a teplotní regulaci [3].



Obr. 1.7 Charakteristiky odporových snímačů teploty [1]

Teplotní závislost negastoru popisuje exponenciální funkce

$$R = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (1.29)$$

kde R je odpor negastoru při teplotě T , R_0 je odpor negastoru při teplotě T_0 a B je materiálová konstanta [3].

Pro úzký teplotní rozsah lze vztah (1.29) linearizovat

$$R = R_0(1 - \alpha_T(T - T_0)), \quad (1.30)$$

kde α_T je teplotní koeficient odporu termistoru, pro který v případě negastoru platí

$$\alpha_T = -\frac{B}{T_0^2}. \quad (1.31)$$

Pro větší přesnost (zmenšení nejistoty způsobené nelinearitou) je lepší využít polynomických vztahů. Pro rozsah od -100 °C do 300 °C postačí polynomy třetího stupně, tzv. Steinhart-Hartova rovnice

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3, \quad (1.32)$$

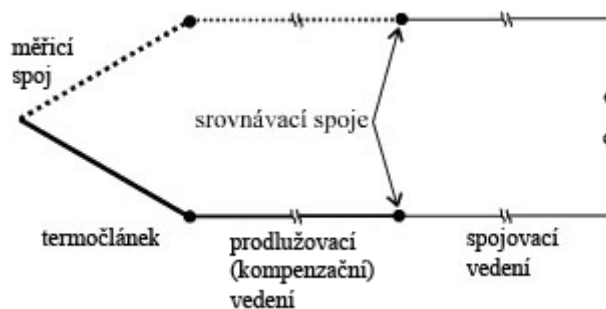
kde T je měřená teplota, R je odpor termistoru a A, B, C jsou konstanty, které se určí z trojího měření odporu R_1, R_2 a R_3 při teplotách T_1, T_2 a T_3 [1].

Monokrystalické senzory teploty se vyrábějí z křemíku, germania, india a jejich slitin. Vyznačují se velkou stálostí charakteristik a v příslušném rozsahu je lze považovat za kvazilineární. Používají se destičky vyříznuté z monokrystalu (např. křemíkový senzor typu N pro rozmezí -50 °C až 150 °C), nebo integrované monolitické senzory založené na teplotní závislosti PN přechodu (zde slouží jako čidlo vhodně zvolený prvek, např. dioda nebo tranzistor) [3].

1.3.2.2 Teploměry termoelektrické

Termočlánek je elektrický teploměr, který ke své funkci využívá Seebeckův jev. Ten vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii a proto dochází k jejich difuzi ve větším množství do chladnějších míst než chladnějších opačným směrem. Tak vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných [3].

Termočlánek se skládá se ze dvou vodičů z různých materiálů vodivě spojených v měřicím spoji. Vlivem rozdílných teplot konců termočláнку vzniká termoelektrické napětí, které měříme mezi srovnávacími spoji. Toto malé napětí je úměrné rozdílu teplot obou konců.



Obr. 1.8 Schéma termočláunku [6]

Závislost vzniklého elektromotorického napětí je nelineární, v malém teplotním rozsahu se však dá linearizovat vztahem

$$U_{te} = \alpha \cdot \Delta T, \quad (1.33)$$

kde U_{te} je vzniklé elektromotorické napětí, α je (Seebeckův) koeficient úměrnosti a ΔT je rozdíl teplot na koncích termočláunku [2].

Pro přesnější měření bychom si s tímto vztahem nevystačili, a proto používáme polynomické vyjádření

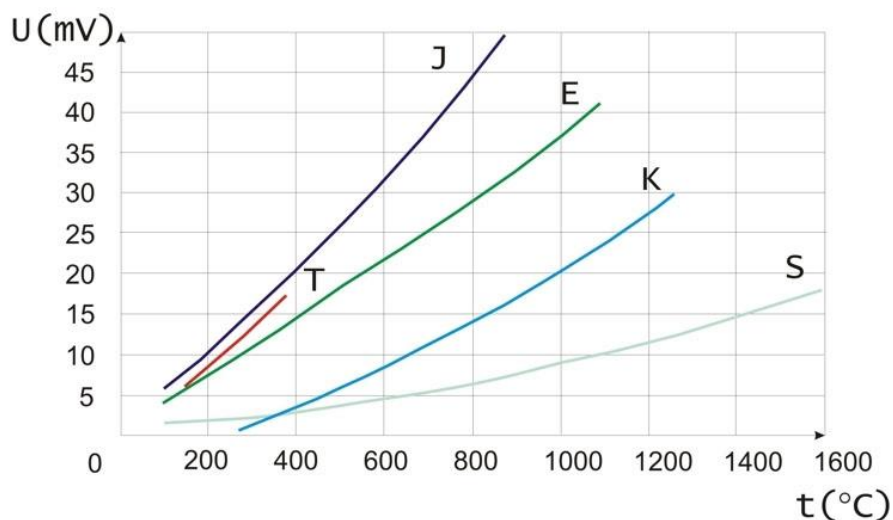
$$t = \sum_{i=0}^n a_i U_{te}^i, \quad (1.34)$$

kde t je neznámá teplota, a_i jsou příslušné koeficienty, odvozené pro daný typ termočláunku, U_{te} je termoelektrické napětí a n je řád polynomu [3].

Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termočlánků jsou normalizované. Dvojice materiálů vždy pokrývají předepsaný rozsah teplot s přijatelnou nelinearitou a zajišťují odolnost proti korozi, chemickým vlivům a dlouhodobou stabilitu měřené charakteristiky. Příklady některých kombinací uvádí Tab. 1.1

Tab. 1.1 Složení a měřicí rozsah vybraných typů termočlánků [2]

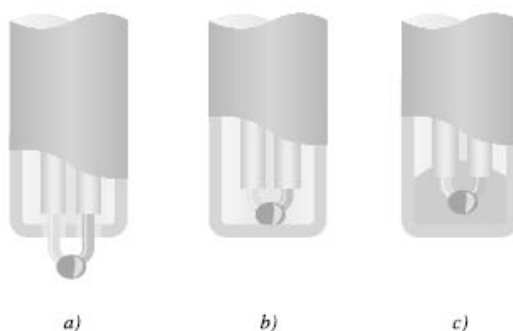
Typ	J	K	T	E	R	S
Složení	Fe (+) CuNi (-)	NiCr (+) NiAl (-)	Cu (+) CuNi (-)	NiCr (+) CuNi (-)	PtRh13 (+) Pt (-)	PtRh10 (+) Pt (-)
Rozsah použití [°C]	0 až 760	0 až 1370	-160 až 400	-100 až 1000	0 až 1000	0 až 1750



Obr. 1.9 Charakteristiky vybraných termočlánků [8]

Konstrukčně se termočlánekové teploměry řeší nejčastěji jako plášťové. Tyto mají vodiče uložené v kovovém plášti ve tvaru trubky. Uvnitř jsou vodiče izolovány keramickou hmotou (MgO nebo Al_2O_3). Plášťové termočlánky mohou být provedeny jako otevřené, uzemněné nebo izolované [2].

Měřicí spoj je se srovnávacím spojením pomocí spojovacího vedení. Rozlišujeme zde *prodlužovací* vedení, které je vyrobeno ze stejného materiálového složení jako vlastní termočlánek, a *kompensační* vedení, které se vyrábí z materiálů jiných, než z jakých je termočlánek, ale tato materiálová kombinace musí mít v omezeném teplotním rozmezí stejný termoelektrický koeficient.



Obr. 1.10 Provedení měřicího spoje

a) otevřený, b) uzemněný, c) izolovaný [1]

Termočlánky se řídí několika základními pravidly: [3]

- V případě homogenního materiálu vodičů závisí termoelektrické napětí jen na teplotách spojů, nikoli na rozložení teploty podél vodičů
- Termoelektrické napětí nezávisí na vložení dalších vodičů do obvodu, ale pouze za předpokladu, že tyto vložené konce vodičů mají stejnou teplotu. Takto je možné připojit do obvodu měřicí zařízení.
- Pokud není možné udržovat teplotu srovnávacích spojů na konstantní teplotě, je možné uspořádání s dalším termoelektrickým článkem, jehož vztažné spoje již budou v prostředí se stálou teplotou.

1.3.3 Optické teploměry

Optické teploměry patří do skupiny bezdotykových teploměrů a nazývají se pyrometry. Podle způsobu měření rozeznáváme pyrometry jasové, barvové a radiační. Pyrometry využívají k měření teploty infračerveného záření, které vyzařuje každé zahřáté těleso.

Základem bezkontaktního měření je teorie absolutně černého tělesa a čtyři fyzikální zákony: Kirchhoffův, Stefan-Boltzmannův, Planckův a Wienův.

1.3.4 Termovize

Termovize je dalším typem teplotního měřidla pracujícím s infračerveným zářením. Teplotní pole je snímáno speciální kamerou s detektorem infračerveného záření. Termovize se s výhodou používají pro sledování změn povrchových teplot. Výstupem termovize je termogram

1.3.5 Orientační měření teplot

Nejnámějšími metodami pro orientační měření teplot jsou keramické žároměrky, teploměrná tělíska, teploměrné barvy, tužky a křídly, teploměrné nálepky a tekuté krystaly. V praxi slouží k vizuální kontrole dosažení požadované teploty v procesu, kdy dojde ke změně barvy, tvaru nebo skupenství indikátoru teploty.

2 NEJISTOTY MĚŘENÍ

V praxi neexistuje žádný přístroj, žádné měření nebo měřicí metoda, které by byly dokonale přesné. Do výsledku měření zasahují různé negativní vlivy, které ovlivní výslednou naměřenou hodnotu. Výsledek se tedy pohybuje v určitém tolerančním poli, ale téměř nikdy nedosáhne hodnoty pravé. Snahou je tyto nepřesnosti kvantifikovat a zahrnout je do výsledku měření. Zhruba do začátku devadesátých let dvacátého století se v této problematice pracovalo s pojmem chyby měření, dnes je ovšem snaha je nahrazovat nejistotami měření.

2.1 Chyby měření [9]

Absolutní chyba měření se vyjadřuje jako rozdíl mezi naměřenou hodnotou a hodnotou pravou. Pokud absolutní chybu podělíme hodnotou pravou, dostaneme chybu relativní.

$$\Delta_x = x_m - x_s, \quad (2.1)$$

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s}, \quad (2.2)$$

kde Δ_x je absolutní chyba, δ_x je relativní chyba, x_m je hodnota naměřená a x_s je hodnota pravá.

Chyby měření se dále dělí na:

- *systematické* – Při stálých podmínkách jsou tyto chyby stálé, neměnné. Jsou způsobené např. stárnutím přístroje, nepřesnostmi jednotlivých částí měřicího řetězce nebo použitou metodou. Dají se z části eliminovat korekcí nebo kompenzací.
- *náhodné* – Tyto chyby vznikají zcela náhodně, nepředvídatelně a nelze je vyloučit. Pro jejich určení je potřeba několikeré měření, které se pak vyhodnotí pomocí statistických metod.
- *hrubé* – Jsou způsobené závadou přístroje, nevhodnou metodou měření, nepozorností. Tyto chyby znehodnocují celé měření, proto je potřeba je eliminovat a s hodnotami zatíženými hrubou chybou dále nepracovat.

2.2 Nejistoty měření [9]

Nejistoty měření nahrazují vyjádření přesnosti měření pomocí chyb měření. Nejistota měření je parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, v němž se s jistou pravděpodobností nachází hodnota pravá. Pro stanovení nejistoty máme principiálně dvě metody:

- Statistické zpracování naměřených údajů (nejistota typu A)
- jiné než statistické zpracování naměřených údajů (nejistota typu B)

Máme-li jednoduchou výstupní funkci několika vstupních parametrů

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), \quad (2.3)$$

kde y je odhad výstupní veličiny, x_i je odhad vstupní veličiny a f je známý funkční vztah, lze pak pro nejistotu u_y odhadu funkce y napsat obecný vztah

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_{xi}^2 u_{xi}^2}, \quad (2.4)$$

kde u_{xi} jsou jednotlivé složky nejistot a A_i je koeficient citlivosti (převodu) příslušného zdroje nejistoty, který je znám, popř. se určí jako parciální derivace funkce y podle příslušné vstupní veličiny x_i

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)}{\partial x_i}, \quad (2.5)$$

2.2.1 Standardní nejistota typu A [10]

Jak již bylo řečeno, nejistota typu A se stanoví statistickým zpracováním alespoň deseti nezávislých hodnot veličiny x naměřených za stejných podmínek. Z těchto hodnot se vypočítá odhad hodnoty měřené veličiny jako výběrový aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.6)$$

Standardní nejistota typu A k tomuto odhadu je poté rovna výběrové směrodatné odchylce aritmetického průměru podle vztahu

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (2.7)$$

Tato nejistota je tedy způsobena kolísáním naměřených hodnot. Je-li k určení této nejistoty málo naměřených údajů ($n < 10$), je tato hodnota málo spolehlivá. V tom případě je zapotřebí tuto nejistotu odhadnout pomocí metody typu B na základě jiných informací.

2.2.2 Standardní nejistota typu B [10]

Tato nejistota zahrnuje všechny ostatní nejistoty, které nejsou zahrnuty v nejistotě typu A. Její odhadnutí se provádí na základě dostupných informací a vlastních zkušeností. Charakteristika této problematiky neumožňuje stanovení jednotného postupu. Nejčastěji se vychází z údajů výrobce měřicího přístroje, zkušenosti z předchozích měření, údajů získaných při kalibraci a z certifikátů, nebo nejistoty referenčních údajů získaných z příruček a jiných pramenů.

Nejistota typu B se určí z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů. Známe-li maximální odchylku j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} , určí se pak daná nejistota u_{Bzj} podle vztahu

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k}, \quad (2.8)$$

kde k je součinitel, jehož hodnota je určena ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí. Pro rozdělení rovnoměrné, které je pro stanovení standardní nejistoty typu B nejčastější, je $k = \sqrt{3}$, pro rozdělení normální se volí $k = 2$ nebo $k = 3$.

Výsledná nejistota typu B pro p zdrojů se určí pomocí vztahu

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}^2}, \quad (2.9)$$

kde u_{Bzj} jsou nejistoty jednotlivých zdrojů a A_j jsou jejich součinitele citlivosti.

2.2.3 Standardní kombinovaná nejistota [10]

Slouží ke společnému vyjádření nejistoty typu A a nejistoty typu B jedním číslem. Určuje se podle vztahu

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (2.10)$$

2.2.4 Rozšířená nejistota [10]

Výsledek měření ve tvaru $y \pm u_c$ definuje pravou hodnotu s pravděpodobností přibližně 60%, která bývá nedostačující. Snahou je tuto pravděpodobnost zvýšit rozšířením intervalu tak, aby se blížila 100%. Zavádíme tedy rozšířenou nejistotu U podle vztahu

$$U(x) = k \cdot u_c(x), \quad (2.11)$$

kde k je koeficient rozšíření. Jeho hodnota závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výsledku měření. V případě normálního rozdělení se nejčastěji dosazuje $k = 2$, což pokrývá interval výsledku s pravděpodobností 95%.

2.2.5 Nepřímá měření [11]

Nepřímá měření jsou taková, u kterých je veličina Y vypočítaná pomocí funkční závislosti na veličinách přímo měřených veličinách X_1, X_2, \dots, X_m , tedy

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_m). \quad (2.12)$$

Jelikož pravé hodnoty X_1, X_2, \dots, X_m neznáme, neznáme ani pravou hodnotu veličiny Y . Proto se uvádí tvar (2.3) pracující s odhady těchto veličin.

V této problematice se také setkáme s pojmy korelace, koeficient korelace a kovariance. Korelace, resp. koeficient korelace určují míru vzájemné lineární závislosti dvou náhodných veličin. Obecný vzorec pro výpočet koeficientu korelace r je

$$r(x_i, x_j) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik} x_{jk} - \bar{x}_i \bar{x}_j}{s(x_i) s(x_j)} \quad (2.13)$$

kde x_i a x_j jsou zde hodnoty náhodných veličin, \bar{x}_i a \bar{x}_j jsou aritmetické průměry, $s(x_i)$ a $s(x_j)$ jsou směrodatné odchylky. Čitatel v tomto zlomku vyjadřuje kovarianci. Koeficient korelace nabývá hodnot $\langle -1; 1 \rangle$. Čím více se jeho hodnota blíží -1 nebo +1, tím je závislost bližší lineární závislosti. Naopak, blíží-li se hodnota r k nule, říká nám to, že závislost lineární není, popř. náhodné veličiny mohou být nezávislé.

V případě, že odhady x_1, x_2, \dots, x_m jsou nekorelované, tj. jednotlivé zdroje nejistot jsou na sobě nezávislé, se výsledná nejistota vypočítá podle vztahu (2.4).

Pokud koeficienty korelace zanedbat nelze, je třeba také uvažovat kovariance mezi jednotlivými odhady, které tvoří další složku výsledné hodnoty nejistoty. Nejistota se poté určí podle vzorce

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m A_i A_j \text{cov}(x_i, x_j)}, \quad (2.14)$$

kde $\text{cov}(x_i, x_j)$ je kovariance mezi navzájem korelovanými veličinami. Pro kovarianci nejistoty typu A platí vztah

$$\text{cov}_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j), \quad (2.15)$$

Pro kovarianci nejistoty typu B je vzorec

$$\text{cov}_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u_B(x_i) u_B(x_j), \quad (2.16)$$

kde r je výše zmíněný koeficient korelace.

3 ZDROJE CHYB A NEJISTOT PŘI MĚŘENÍ TEPLOT

Měření teplot, stejně jako všechna další měření, je zatíženo chybami. Je proto vždy nutné stanovit nejistotu měření. Pro její určení je potřeba vytipovat jednotlivé zdroje možných nejistot typu B a určit jejich význam pro celkovou nejistotu.

Jako zdroj nejistoty lze pak označit jakýkoliv jev, který určitým způsobem zvyšuje neurčitost jednoznačného určení výsledku a tím zvyšuje rozdíl hodnoty pravé a hodnoty naměřené. Jednotlivé zdroje je možné rozdělit do několika skupin [12]:

- nejistota z výrobních nebo normovaných tolerancí čidla
- nejistota z časové stability čidla
- nejistota z konstrukčního provedení a současného stavu snímače
- nejistota způsobená spojovacími prvky mezi snímačem a měřicím přístrojem
- nejistota měření plynoucí z nejistoty měřicích přístrojů, metody měření a případných přepočtů
- nejistota vyplývající ze způsobu zabudování a používání snímače

V této kapitole budou rozebrány možné zdroje nejistot vybraných druhů teploměrů.

3.1 Elektrické odporové teploměry

3.1.1 Platné normy

Pro průmyslové odporové snímače teploty s čidlem z platiny platila norma ČSN IEC 751, kterou v roce 2011 nahradila ČSN EN 60751. Tato norma definuje závislost odporu čidla na teplotě (ideální průběh) a dovolené odchylky a rozděluje teploměry do čtyř tříd přesnosti. V Tab. 3.1 jsou uvedeny jednotlivé třídy přesnosti, rozmezí teplot, ve kterých jsou definovány (horní rozsah platí pro vinuté snímače, dolní pak pro vrstevové), a velikost nejistoty, kde t je měřená teplota v °C.

Tab. 3.1 Toleranční třídy podle ČSN EN 60751 [13]

Třída	Rozsah teplot [°C]	Velikost nejistoty [°C]
AA	-50 až 250 0 až 150	$\pm (0,1+0,0017 \cdot t)$
A	-100 až 450 -30 až 300	$\pm (0,15+0,002 \cdot t)$
B	-196 až 600 -50 až 500	$\pm (0,3+0,005 \cdot t)$
C	-196 až 600 -50 až 600	$\pm (0,6+0,01 \cdot t)$

Nejistota údaje nových snímačů teploty leží v uvedených mezích a je jedním z hlavních zdrojů výsledné nejistoty. Snížit ji lze výběrem (snímač s vyšší třídou přesnosti) nebo kalibrací.

3.1.2 Časová stabilita [12]

Časová stabilita, respektive nestabilita, zahrnuje všechny změny hodnoty základního odporu R_0 čidla v průběhu celé doby používání snímače a závisí na čistotě platiny (mědi, niklu), izolační keramiky a ostatních materiálů použitých k výrobě snímače. Nestabilita se projevuje jako hystereze, fluktuace, nebo stárnutí.

3.1.2.1 Hystereze

Hystereze je jev, který se dostaví po zahřátí snímače na vyšší teplotu (více než 450 °C). Projevuje se jako rozdíl údajů na teploměru před a po průchodu pásmem vyšších teplot při téže měřené teplotě, jinak řečeno, pokud měření začíná na teplotě T_0 , pokračuje do oblasti vyšších teplot a následně se vrací zpět na teplotu T_0 , zjistíme rozdíl mezi naměřenými hodnotami těchto teplot. Velikost hystereze závisí na rychlosti ochlazování a na materiálech teplotního čidla. U čidel s keramickým podkladem platinového snímače dosahuje hystereze hodnoty do 0,5 °C (při 0 °C), použijeme-li ovšem čidlo s platinovým drátkem zataveným do speciálního skla, může hystereze dosáhnout až 1,5 °C (při 0 °C). Zhruba do 48 hodin se vrací snímač k původním hodnotám odporu.

3.1.2.2 Fluktuace

Fluktuací se označují změny odporu způsobené například chvěním, nárazy, teplotními šoky nebo změnou polohy platinového prvku. Projevuje se nepravidelnými skokovými změnami odporu, jehož nová hodnota se stává po určitou dobu konstantní. K odstranění obvykle postačí zahřátí na vyšší teplotu.

3.1.2.3 Stárnutí

Stárnutím je označován souhrn nevratných změn snímače, způsobených např. změnou chemického složení platiny, odpařováním platiny, změnou izolačního odporu materiálu kostry čidla nebo vodičů aj. Stejně tak má vliv na změnu odporových vlastností teploměru i rozmezí teplot, ve kterém teploměr pracuje. Vliv stárnutí se projevuje především u nových snímačů, kdy je změna měřených hodnot způsobená stárnutím výraznější, později dochází ke stabilizaci hodnot.

3.1.3 Konstrukce snímačů a spojovacích prvků

3.1.3.1 Izolační odpor

Nezbytným parametrem snímačů, který je potřeba kontrolovat, je odpor mezi měřicím obvodem a ochranným kovovým pláštěm, nazývaný izolační odpor. Nízké hodnoty tohoto odporu navyšují chybu měření, protože dochází k ovlivnění měřeného odporu snímače. Snížení tohoto odporu může způsobit vlhkost nebo nečistota, která se dostane dovnitř snímače, nebo mechanické poškození pláště. Izolační odpor je také závislý na teplotě, se zvýšením teploty dochází k jeho poklesu. Norma určuje minimální izolační odpor v závislosti na teplotě [15].

Tab. 3.2 Požadavky na izolační odpor [12]

Teplota [°C]	Minimální IO [MΩ]	Přibližná chyba senzoru 100 Ω [°C]
25	100	0,0003
100 až 300	10	0,013
301 až 500	2	0,12
501 až 850	0,5	1,0

3.1.3.2 Ohřev procházejícím proudem

Dalším zdrojem nejistoty měřené teploty je ohřev čidla procházejícím měřicím proudem. Ohřev závisí na provedení čidla, velikosti základního odporu, prostředí, ve kterém provádíme měření, na velikosti měřicího proudu a dalších faktorech. Měřicí proud se běžně pohybuje okolo 1 mA až 2 mA, u plošných čidel bývá menší. Chyba způsobená

vlastním ohřevem u nejběžnějších snímačů s hodnotou základního odporu 100 Ω v prostředích s dobrým odvodem tepla bývá menší než 0,01 °C. Větší chyby vznikají u senzorů s vyšší hodnotou základního odporu a umístěných v prostředí se špatným odvodem tepla.

3.1.3.3 Vliv odporu vedení

Důležitým zdrojem nejistot je přídavný odpor vnitřního a především spojovacího vedení. Odpor vnitřního vedení bývá udáván výrobcem. U spojovacího vedení závisí, jaká metoda zapojení je zvolena (dvouvodičové, třívodičové nebo čtyřvodičové zapojení). Tato problematika bude více rozebrána v další části zabývající se možnými kompenzacemi nepříznivých vlivů.

3.1.3.4 Ostatní spojovací prvky

Mezi spojovací prvky také patří šroubová spojení sloužící k připojení vodičů a kontakty přepínačů. Základním požadavkem je, aby tato spojení byla čistá, aby byly zaručeny minimální přechodové odpory a zároveň dostatečné izolační odpory mezi jednotlivými větvemi. Odhadnout vliv těchto spojovacích prvků je složité, jsou-li ovšem splněny základní požadavky (čistota, nepoškozená izolace, nepřekročená maximální teplota), lze tyto nejistoty zanedbat. Měříme-li stejnosměrným proudem, je možným zdrojem nejistoty také vznikající elektromotorické napětí v místech spojů z různých kovů. Při použití střídavého napětí je možné toto elektromotorické napětí zanedbat [12].

3.2 Termoelektrické teploměry

3.2.1 Platné normy

Dovolené odchylky termočlávkových teploměru od normovaných hodnot udává ČSN IEC 584-2. Ta dělí snímače do tří jakostních tříd, definuje interval teplot a určuje jejich maximální možné odchylky. Velikost tolerance závisí ještě navíc na typu termočlávků. Teplota t je hodnota teploty měřicího spoje při teplotě srovnávacích spojů 0 °C [12].

Tab. 3.3 Toleranční třídy termočlávků dle ČSN IEC 584-2 [12]

Typ	Jakostní třída 1		Jakostní třída 2		Jakostní třída 3	
	Rozmezí teplot [°C]	Tolerance [°C]	Rozmezí teplot [°C]	Tolerance [°C]	Rozmezí teplot [°C]	Tolerance [°C]
T	-40 až 125 125 až 350	±0,5 ±0,004 t	-40 až 133 133 až 350	±1 ±0,0075 t	-67 až 40 -200 až -67	±1 ±0,015 $ t $
E	-40 až 375 375 až 800	±1,5 ±0,004 t	-40 až 333 333 až 900	±2,5 ±0,0075 t	-167 až 40 -200 až -167	±2,5 ±0,015 $ t $
J	-40 až 375 375 až 750	±1,5 ±0,004 t	-40 až 333 333 až 750	±2,5 ±0,0075 t	-	-
N	-40 až 375 375 až 1000	±1,5 ±0,004 t	-40 až 333 333 až 1200	±2,5 ±0,0075 t	-167 až 40 -200 až -167	±2,5 ±0,015 $ t $
K	-40 až 375 375 až 1000	±1,5 ±0,004 t	-40 až 375 333 až 1200	±2,5 ±0,0075 t	-167 až 40 -200 až -167	±2,5 ±0,015 $ t $
S, R	0 až 1100 1100 až 1600	±1 ±[1+0,003(t -1100)]	0 až 600 600 až 1600	±1,5 ±0,0025 t	-	-
B	-	-	- 600 až 1700	- ±0,0025 t	600 až 800 800 až 1700	±4 ±0,005 t

3.2.2 Časová stabilita [12]

Na stabilitu termoelektrických teploměrů má vliv mnoho faktorů, které jsou stále předmětem výzkumu. Významným činitelem je provedení snímače. Plášťové termočlánky s celkovým průměrem nad 2 mm vykazují lepší stabilitu než termočlánky klasického provedení. Dalšími významnými činiteli jsou teplota při exploataci, doba a způsob exploatace, kvalita izolační keramiky, pracovní prostředí a průměr vodičů.

Stabilita plášťových termočlánků je závislá na materiálu pláště. Ty se zhotovují ze slitin niklu, ovšem jednotlivé slitiny se liší podle výrobce. Je tedy nutné se spoléhat na doporučení výrobců.

Pro stabilitu termočlánků je také důležité pracovní prostředí, zvláště u klasických termočlánků. Normy ovšem neobsahují žádná doporučení, je tedy nutné spolehnout se na zkušenosti z praxe.

3.2.3 Vliv spojovacích prvků

Prodlužovací (popř. kompenzační) vedení je téměř vždy zdrojem nejistot. Dovolené tolerance jsou vedeny v tabulce Tab. 3.4. Tyto nejistoty jsou poměrně významné, doporučuje se proto pořizovat termočlánek a prodlužovací vedení od jednoho výrobce a současně s termočlánekem kalibrovat i toto vedení. Nevhodnou volbou kombinace termočlánku a spojovacího vedení je měření zatěžováno velkou chybou [12].

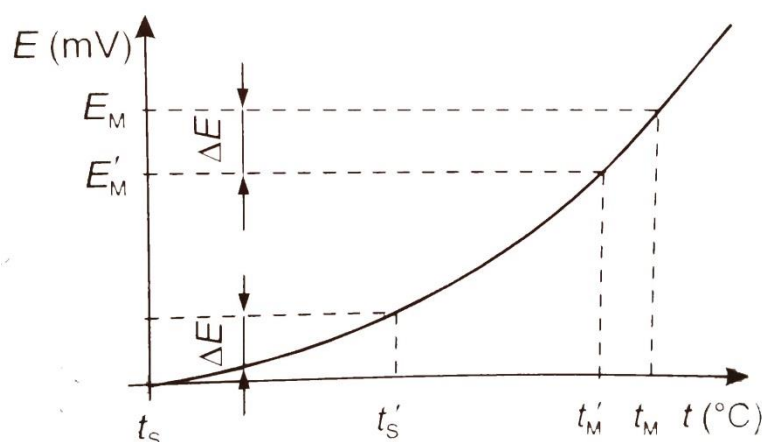
Dle normy ČSN EN 60584-3 se prodlužovací vedení značí písmenem „X“ uvedeným za označením termočlánku. Kompenzační vedení se značí písmenem „C“. V některých případech se pro stejný typ termočlánku udávají různé tolerance pro různé rozsahy teplot. Pro odlišení se přidává další písmeno (např. KCA a KCB) [16].

Tab. 3.4 Tolerance prodlužovacího vedení dle ČSN EN 60584-3 [16]

Druh vedení	Toleranční třída		Pracovní teplota vedení [°C]	Teplota měřicího spoje [°C]
	1	2		
JX	±85 μV (±1,5 °C)	±140 μV (±2,5 °C)	-25 až 200	500
TX	±30 μV (±0,5 °C)	±60 μV (±1,0 °C)	-25 až 100	300
EX	±120 μV (±1,5 °C)	±200 μV (±2,5 °C)	-25 až 200	900
KX	±60 μV (±1,5 °C)	±100 μV (±2,5 °C)	-25 až 200	900
NX	±60 μV (±1,5 °C)	±100 μV (±2,5 °C)	-25 až 200	900
KCA	-	±100 μV (±2,5 °C)	0 až 150	900
KCB	-	±100 μV (±2,5 °C)	0 až 100	900
NC	-	±100 μV (±2,5 °C)	0 až 150	900
RCA	-	±30 μV (±2,5 °C)	0 až 100	1000
RCB	-	±60 μV (±5,0 °C)	0 až 200	1000
SCA	-	±30 μV (±2,5 °C)	0 až 100	1000
SCB	-	±60 μV (±5,0 °C)	0 až 200	1000

3.2.4 Vliv kolísání srovnávací teploty [3]

Má-li teplota srovnávacích spojů jinou teplotu než teplotu vztažnou (udávanou normou nebo tabulkou), dochází k systematické chybě měření. Podle Obr. 3.1 jsou odvozeny následující vztahy



Obr. 3.1 Vliv kolísání teploty od vztažné teploty [3]

$$t_M = t'_M + \frac{\alpha_S}{\alpha_M} (t'_S - t_S), \quad (3.1)$$

$$E_M = E'_M + \frac{\alpha_S}{\alpha_M} (t'_S - t_S), \quad (3.2)$$

kde $\alpha_S = \frac{E}{t'_S - t_S}$, $\alpha_M = \frac{E}{t_M - t'_M}$; E'_M , t'_M a t'_S jsou naměřené hodnoty elektromotorického napětí a teploty měřicího a srovnávacího spoje.

Odečítáme-li hodnoty napětí z tabulky, kde $t_S = 0^\circ\text{C}$ a ve skutečnosti $t_S = t'_M$, pak správné elektromotorické napětí se určí podle vztahu

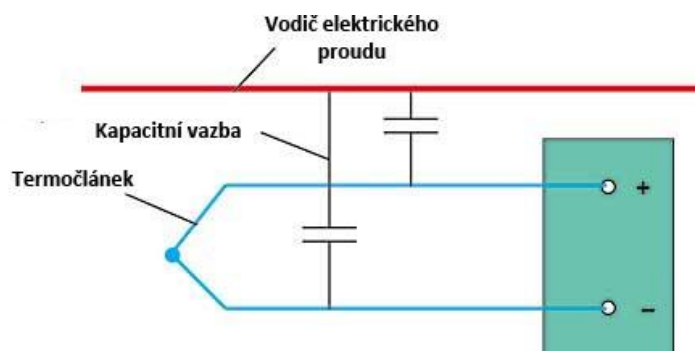
$$E = E_0 + \alpha_S t'_S, \quad (3.3)$$

kde E_0 je tabulková hodnota a E je hodnota vypočítaná pro danou srovnávací teplotu.

Vliv kolísání srovnávacích teplot od vztažné teploty se koriguje s určitou nejistotou buď použitím termostatu k udržení konstantní teploty spojů, nebo použitím kompenzačních zapojení, nebo číslicovou korekcí.

3.2.5 Vliv rušivých polí a vazeb

Termoelektrické napětí je velice malé, v řádech jednotek až desítek milivoltů. Změna napětí o $4 \mu\text{V}$ odpovídá změně teploty zhruba o $0,1^\circ\text{C}$. Vlivem rušivých prvků, jako jsou magnetická, elektrická a elektromagnetická pole, parazitní kapacitní vazby a proudové parazitní smyčky, dochází ke zkreslení signálu a navýšení výsledné nejistoty.



Obr. 3.2 Vodič v blízkosti termočlánu [17]

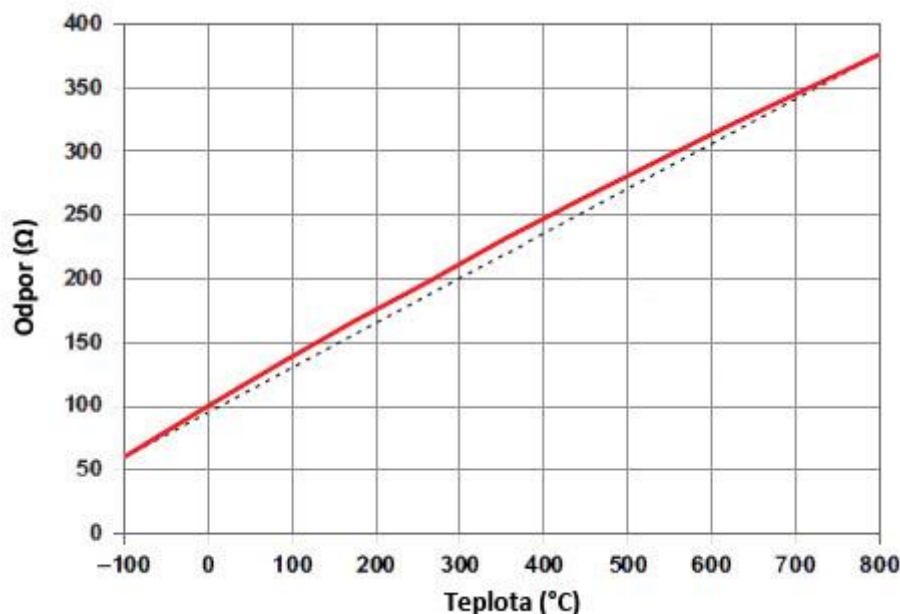
Příkladem takového zdroje nejistoty může být vodič střídavého proudu v blízkosti termoelektrického vedení (viz Obr. 3.2). Magnetické pole vodiče protíná vedení termočlánku. Vzniklá kapacitní vazba mezi elektrickým vedením a termočlánkem indukují rušivé napětí o stejné frekvenci, jako má střídavý proud. Amplituda šumu je přímo úměrná velikosti proudu a nepřímo úměrná vzdálenosti mezi vodičem a termočlánkem [17].

Možnostmi odstranění vlivu šumu se bude zabývat část další kapitoly.

3.3 Měřicí přístroje

Měřicí řetězec se skládá kromě vlastního snímače (čidlo, vnitřní vedení, izolační keramika, hlavice nebo konektor) a spojovacího vedení také z měřicího přístroje. Sem řadíme zařízení pro úpravu (zesilovače, převodníky, ...) a vyhodnocení signálu. I tyto přístroje jsou zdrojem nejistoty. Pro její určení je třeba vycházet především z údajů výrobce, popř. kalibrace. Podobně jako u čidel je nejistota měřicích přístrojů ovlivněná dlouhodobým používáním, proto se uvádí jejich časová stabilita. Dále je důležitá minimální doba mezi zapnutím přístroje a vlastním měřením a především provozní teplota [12].

S měřicími přístroji je také spojena nejistota způsobená linearizací statické charakteristiky (tj. v ustáleném stavu). Elektrické snímače teploty vykazují nelineární charakteristiku závislosti výstupní veličiny na vstupní (teplotě), pro nás je ovšem často výhodnější, aby výstupní charakteristika byla v přímkovém tvaru. Cílem linearizace je tedy kompenzace nelinearity snímače. Metod linearizace je vícero, principiálně se ale dělí na analogové a digitální.



Obr. 3.3 Odchylka statické charakteristiky Pt100 od přímkové aproximace [18]

3.4 Doba odezvy [3]

Kromě statické charakteristiky jsou senzory teploty určeny také dynamickými vlastnostmi, které popisují jejich reakci na změnu teploty v čase. Dynamické chování senzoru teploty lze popsat diferenciální rovnicí

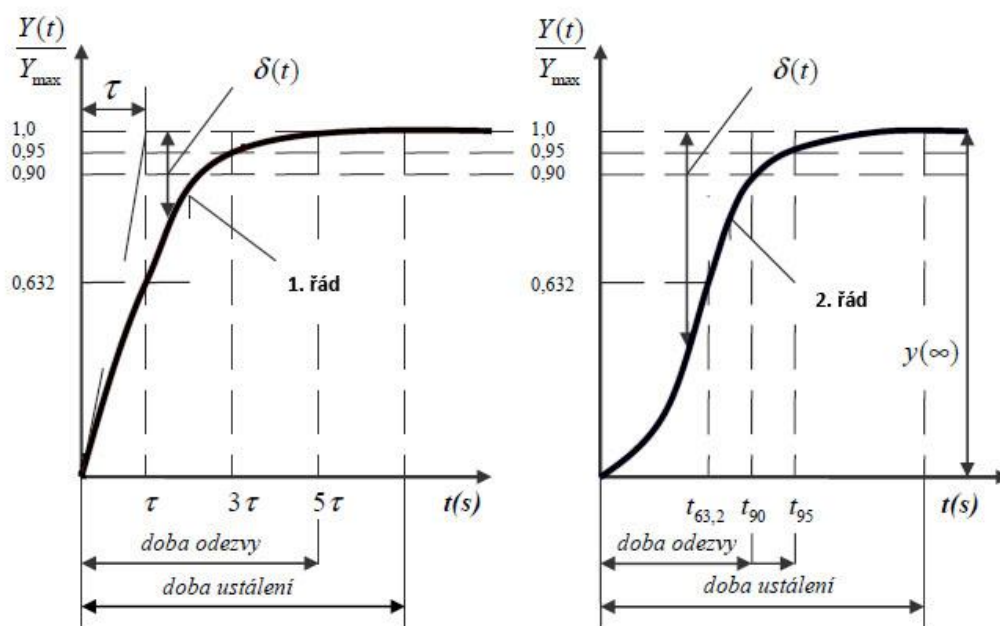
$$a_n \cdot Y^{(n)} + \dots + a_2 \cdot \ddot{Y} + a_1 \cdot \dot{Y} + a_0 \cdot Y = X, \quad (3.4)$$

kde měřenou veličinou X je teplota.

Dynamické vlastnosti senzorů teploty lze většinou popsat rovnicemi prvního a druhého řádu, výjimečně vyššího. Graficky se dají dynamické vlastnosti popsat přechodovou (odezva na jednotkový skok) nebo rychlostní (odezva na změnu konstantní rychlosti) charakteristikou.

3.4.1 Přechodová charakteristika

Jak již bylo zmíněno, přechodová charakteristika popisuje odezvu systému na jednotkový skok. Na následujícím obrázku je její grafické znázornění (pozn. t v celé kapitole 3.4 značí čas, nikoliv Celsiovu teplotu).



Obr. 3.4 Přechodová charakteristika 1. a 2. řádu [3]

Důležitým údajem je zde časová konstanta τ , což je čas, za který dosáhne odezva na skokovou změnu 63,2 % ustálené hodnoty. Za čas $t = 4,606\tau$ dosáhne odezva hodnoty 99% a za čas $t = 6,909\tau$ dosáhne 99,99 %. Sensory teploty jsou většinou popsány buď již zmíněnou časovou konstantou τ , nebo tzv. dobou odezvy, což je doba, za kterou nabude odezva 90 % nebo 95 % ustálené hodnoty (značení t_{90} nebo t_{95}).

Ze vztahu (3.4) je odvozena pro charakteristiku 1. řádu rovnice

$$\frac{Y(t)}{Y_{max}} = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (3.5)$$

kde t je čas a τ je časová konstanta.

Pro charakteristiku 1. řádu pro dynamickou odchylku od ustálené hodnoty lze využít vztah

$$\delta(t) = \frac{Y(t) - Y_{max}}{Y_{max}} = \frac{Y(t)}{Y_{max}} - 1, \quad (3.6)$$

Tato dynamická odchylka může posloužit jako zdroj pro výpočet nejistoty měření, ovšem pouze v laboratorním klimatizovaném prostředí.

Další možnost, jak určit nejistotu měření, je pomocí frekvenčního přenosu. Toho se využít při měření teploty termostatu. Pokud dynamické chování senzoru odpovídá diferen-

ciální rovnici 1. řádu a časový průběh regulované a měřené teploty lze aproximovat harmonickou funkcí s jedinou harmonickou, lze poté k popsání senzoru využít frekvenční přenos $F(j\omega)$. V symbolickém fázorovém vyjádření platí vztah

$$F(j\omega) = |F(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}, \quad (3.7)$$

Dynamická harmonická odchylka od ustálené teploty se poté vyjádří rovnicí

$$\Delta_D(j\omega) = X(j\omega)[F(j\omega) - K], \quad (3.8)$$

kde K je konstanta přenosové funkce.

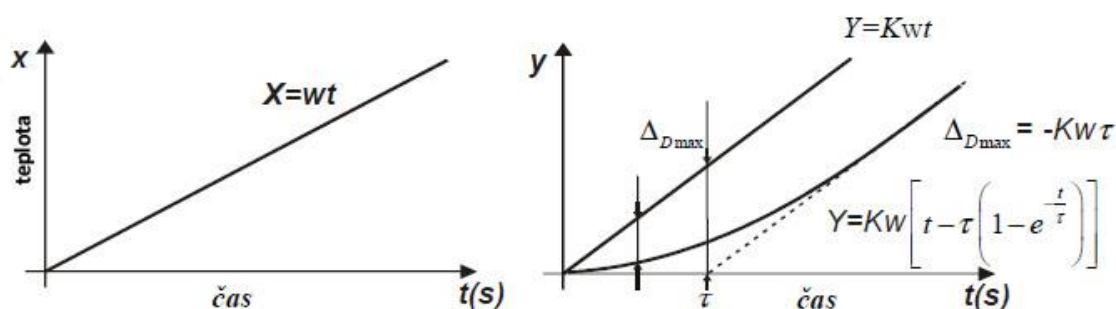
Pro výpočet standartní nejistoty typu B lze použít vztah

$$u_B(y) = \frac{|\Delta_D(j\omega)|_{max}}{\sqrt{3}}, \quad (3.9)$$

3.4.2 Rychlostní charakteristika

Výpočet nejistoty pomocí rychlostní charakteristiky je v praxi výhodnější. Pro odhad maximální odchylky měřené teploty stačí zjistit maximální možnou rychlost w změny teploty senzoru a nejistota typu B se pak stanoví ze vztahu

$$u_B(y) = \frac{\Delta_{Dmax}}{\sqrt{3}}, \quad (3.10)$$



Obr. 3.5 Rychlostní charakteristika 1. řádu [3]

Pokud je senzor popsán rovnicí vyššího řádu a známe-li časové konstanty, lze pro výpočet maximální odchylky použít vztah

$$\Delta_{Dmax} = -wK(T_D + T_1 + T_2 + \dots + T_n), \quad (3.11)$$

3.5 Zabudování a umístění dotkových teploměru

Zabudování a umístění snímačů patří mezi ty významnější zdroje nejistot, jsou však zároveň hůře postižitelné. K jejich posouzení je obvykle nutné speciální měření a dlouhodobější monitorování v procesu. Je tedy potřeba při měření věnovat této problematice zvýšenou pozornost.

Tato nejistota je vždy spojena s nežádoucím nebo nedostatečným přenosem tepla mezi snímačem a okolím. Přenos tepla probíhá třemi možnými způsoby: kondukcí, konvekcí a radiací.

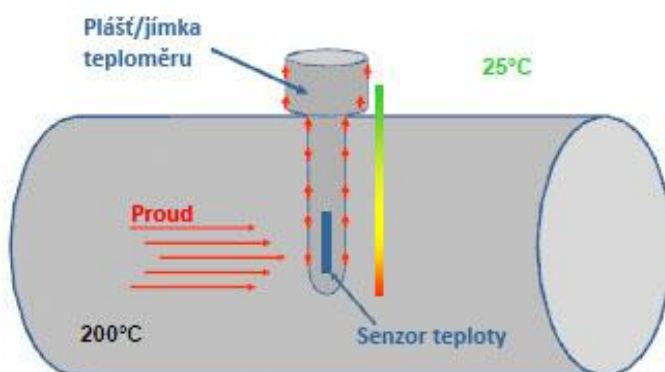
3.5.1 Přenos tepla kondukcí

Ke kondukcí neboli přenosu tepla vedením dochází v místě teplotního gradientu v plynech, kapalinách a pevných látkách, děje se tedy jen mezi zcela bezprostředně sousedícími částicemi hmoty. Molekuly teplejší části kmitají kolem svých rovnovážných poloh s větší frekvencí, přičemž dochází k jejich srážkám se studenějšími a předání části pohybové energie, čímž dochází k přenosu tepla. Zjednodušená rovnice přenosu tepla kondukcí q_{cond} v jednom směru je následující

$$q_{cond} = \lambda S \frac{(T_2 - T_1)}{L}, \quad (3.12)$$

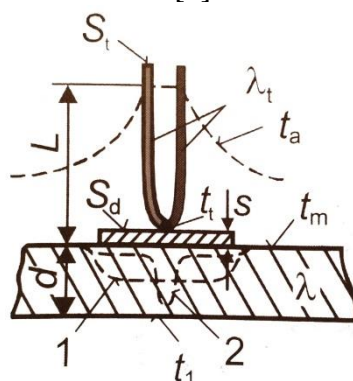
kde λ je součinitel tepelné vodivosti, S je plocha prostupu tepla, $T_2 - T_1$ je rozdíl teplot a L je vzdálenost ploch o teplotách T_1 a T_2 [19].

S kondukcí je spjatá nejistota způsobená vedením tepla teploměrem a jeho částmi. Při měření teplot v potrubích s proudící tekutinou bývá teploměr skryt v jímce. Jedna část je ponořena v proudící tekutině, druhá je vyvedena mimo potrubí, čímž vzniká potřebný teplotní gradient a dochází k odvádění tepla z měřeného místa. Při malé hloubce ponoru, kdy část senzoru je v místě ochlazeném přenosem tepla, dochází k navýšení nejistoty měření. Je tedy potřeba dodržovat správnou hloubku ponoru snímače [15].



Obr. 3.6 Přenos tepla vedením při měření teploty v potrubí [15]

Dalším problémem je měření povrchové teploty těles, které se zpravidla uskutečňuje termočlánky. Zde dochází v místě kontaktu k odvedení tepla vodiči termočlánku a dochází k narušení teplotního pole uvnitř tělesa [3].



Obr. 3.7 Měření povrchové teploty termočlánkem [3]

3.5.2 Přenos tepla konvekcí

Konvekce je přenos tepla prouděním látky. Může být přirozená, kdy dochází k přesunu látky v tekutinách v důsledku rozdílných hustot látky s různou teplotou, nebo nucená, kdy dochází k proudění vlivem například ventilátoru, kompresoru, čerpadla, aj. Vyjádřit se dá Newtonovým zákonem ochlazování

$$q_{conv} = \alpha S(T_S - T_\infty), \quad (3.13)$$

kde α je koeficient přestupu tepla, S je plocha, na které dochází k přestupu tepla, T_S je teplota povrchu a T_∞ je teplota proudící látky [19].

Konvekce je žádoucí při měření teplot tekutin, proto je dobré například při měření teploty nepohyblivé kapaliny s ní míchat, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení teplotního pole v měřené látce. Nežádoucí může být naopak při měření teplot (například povrchové teploty), kdy dochází k ochlazování nebo ohřívání senzoru proudící tekutinou a ke zkreslení výsledku. V takovém případě je dobré měřicí snímač izolovat od tohoto vnějšího vlivu.

3.5.3 Přenos tepla radiací

Radiací se rozumí přenos tepla ve formě vyzářené energie z povrchu tělesa přenášené do prostoru elektromagnetickým vlněním. Dopadne-li toto záření na jiný povrch, může dojít k jeho pohlcení, odražení, nebo prostupu. Aby došlo ke zvýšení vnitřní energie tělesa a jeho ohřevu, musí být záření pohlceno. Radiace (nebo také sálání) se dá popsat rovnicí

$$q_{rad} = \varepsilon S \sigma (T_S^4 - T_{SUR}^4), \quad (3.14)$$

kde ε je emisivita, S je ozářená plocha, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, T_S je teplota povrchu tělesa a T_{SUR} je radiační teplota okolního prostoru [19].

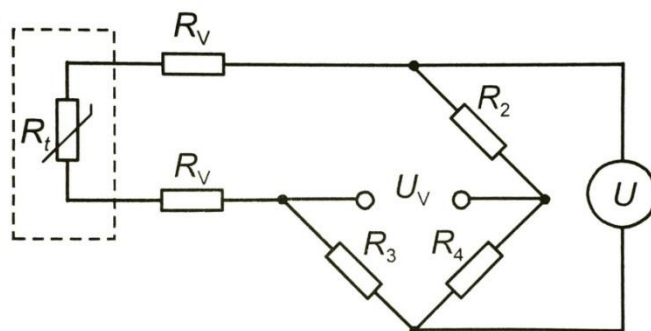
Zdrojem tepla v podobě záření je jakékoliv teplejší těleso, čím má těleso vyšší teplotu, tím více se projevuje radiace. Takovými zdroji jsou například slunce, žárovky, pece, aj. K redukci vlivu tepla přenášeného sáláním se teploměry zakrývají prvky s nízkou emisivitou (vysoká odrazivost záření).

4 MOŽNOSTI KOMPENZACE ZÁSADNÍCH NEGATIVNÍCH VLIVŮ

4.1 Vliv odporu vedení u odporových teploměrů [3]

4.1.1 Dvouvodičové zapojení

Klasickým obvodem pro vyhodnocení odporových snímačů teploty je Wheatstoneův můstek. Nejjednodušší zapojení je dvouvodičové, viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Dvouvodičové zapojení [3]

Materiál použitý pro vodiče je měď, proto pro malé teplotní rozmezí můžeme použít vztah pro odpor vodičů

$$R_{Cu} = R_{Cu0}(1 + \alpha_{Cu}t_v), \quad (4.1)$$

kde α_{Cu} je teplotní součinitel odporu mědi a t_v je teplota vedení. Pro výstupní napětí pak platí vztah

$$U_V = U \left[\frac{R_{tz} + \Delta R_t + 2(R_{Cu0} + \Delta R_{Cu})}{R_{tz} + \Delta R_t + 2(R_{Cu0} + R_{Cu}) + R_3} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right], \quad (4.2)$$

kde R_{tz} je hodnota odporu snímače pro počátek měřicího rozsahu.

Pro dosažení největší citlivosti je třeba vyváženého můstku, jehož dosáhneme splněním podmínek (4.3) a (4.4) při počáteční teplotě t_z .

$$R_3 = R_2 = R, \quad (4.3)$$

$$R_4 = R_{tz} + 2R_{Cu0}, \quad (4.4)$$

Dosažením těchto podmínek do vztahu (4.2) získáme výsledný vztah pro výstupní napětí

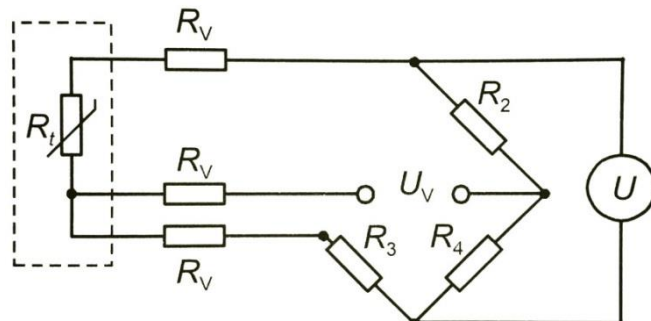
$$U_V = U \frac{\Delta R_t + 2\Delta R_{Cu}}{\Delta R_t + 2\Delta R_{Cu} + R + R_1 \left(\frac{\Delta R_t}{R} + \frac{R_1}{R} + 2 \right)}, \quad (4.5)$$

Do obvodu se také může zařadit justační odpor r_j , který se nastaví podle následné podmínky

$$R_{Cu} = R_{tz} + 2R_{Cu0} + r_j, \quad (4.6)$$

4.1.2 Třívodičové zapojení

Třívodičovým zapojením lze zmenšit velikost systematické odchylky, nelze ji však úplně odstranit. Do obvodu se přidá další větev, čímž dojde ke změnám odporu vedení i v druhé části můstku. Tím se částečně kompenzuje vliv vedení, podmínkou je ale vyvážený můstek. Nevyvážené můstky způsobují přidavnou nelinearitu.

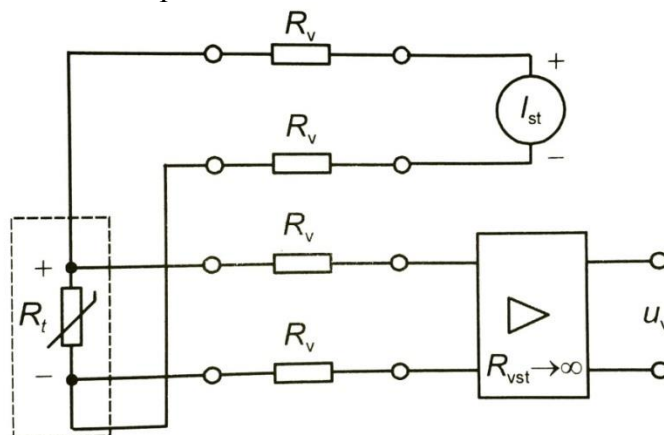


Obr. 4.2 Třívodičové zapojení [3]

Odpory R_v v krajních vodičích, mají-li stejnou velikost, se vyruší, Odpor vedení v prostředním vodiči nevnesou do výsledku velkou přidavnou nejistotu, protože touto větví prochází malý proud.

4.1.3 Čtyřvodičové zapojení

Je to nejpřesnější zapojení, které není závislé na hodnotách odporu vedení a to i při rozdílných hodnotách tohoto odporu.



Obr. 4.3 Čtyřvodičové zapojení [3]

Pro výstupní napětí zapojení podle Obr. 3.1 za předpokladu velkého výstupního odporu zesilovače platí vztah

$$U_V = I_{st}(R_t + \Delta R_t) \quad (4.7)$$

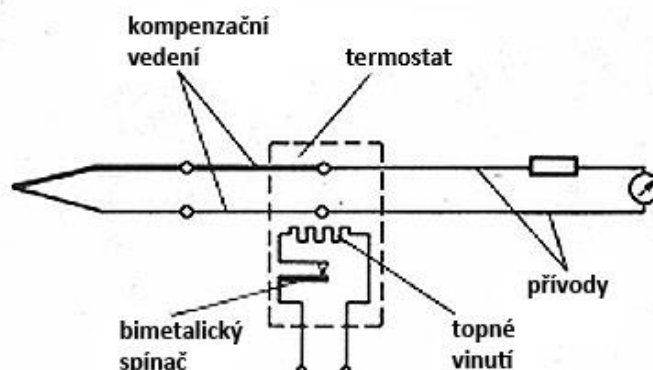
4.2 Kompenzace studených spojů termočlánků

Vliv studených spojů lze s jistou nejistotou vyloučit: [3]

- použitím termostatu pro udržení konstantní teploty spojů
- použitím kompenzačního zapojení
- číslicovou korekcí

4.2.1 Kompenzace s termostatem

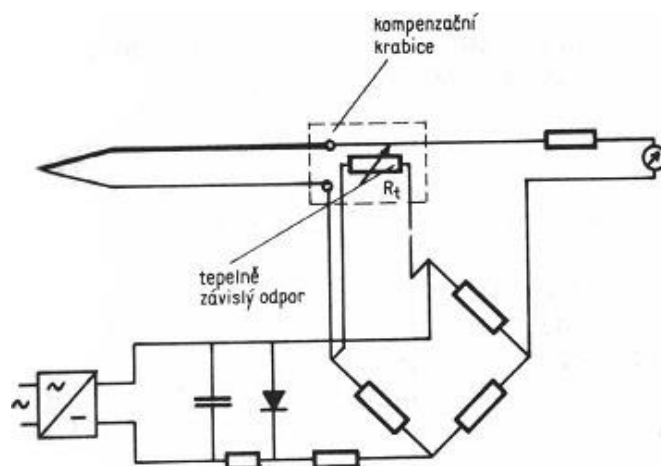
Na Obr. 4.4 je termostat srovnávacích konců, který má uvnitř odporové vyhřívací vinutí a bimetalický kontakt sloužící k regulaci teploty na konstantní hodnotě [20].



Obr. 4.4 Schéma zapojení termočlánku s termostatem [20]

4.2.2 Kompenzační zapojení

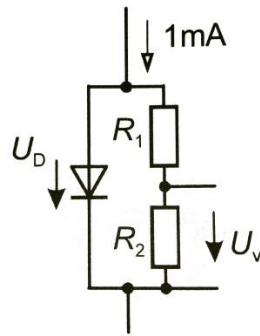
Nejstarším typem kompenzačního zapojení je kompenzační krabice (Obr. 4.5). Srovnávací konce jsou vyvedeny do litinové skříně, ve které je umístěn teplotně závislý rezistor zapojený do můstku. Zvýšenou teplotou srovnávacího spoje dojde ke snížení elektromotorického napětí, ale zároveň dojde ke zvýšení odporu R_t a na diagonále se zvýší napětí, které koriguje vzniklou odchylku [20].



Obr. 4.5 Schéma zapojení s kompenzační krabicí [20]

Pro kompenzaci změn teploty srovnávacích spojů lze také využít teplotní závislosti charakteristiky PN přechodu. Umístíme-li tranzistorovou diodu v blízkosti srovnávacího spoje, bude na diodě v propustném směru napětí $U_D = f(t_S)$. Potřebná citlivost kompenzačního napětí dU_V/dt_S se získá odporovým děličem (viz Obr. 4.6). Pro napětí pak musí být splněna podmínka

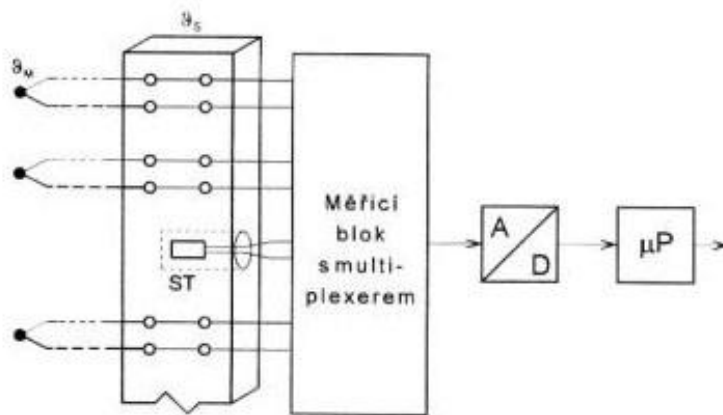
$$\frac{dU_V}{dt} = \frac{dU_V}{dt} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \left(\frac{dU_t}{dt} \right)_{t_S} \quad (4.8)$$



Obr. 4.6 Diodový kompenzační obvod [3]

4.2.3 Číslicová korekce

U číslicových měřicích systémů se často využívá tzv. izotermická svorkovnice. Její teplota je hlídána odporovým teploměrem. Po každém měření hodnot termočlánků se provede korekce číslicově v měřicím systému [3].



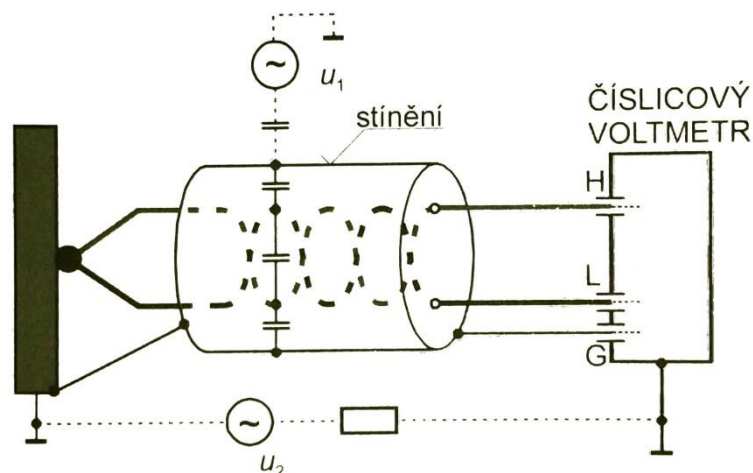
Obr. 4.7 Izotermická svorkovnice [21]

4.3 Potlačení vlivu šumu při měření termočlánky [3]

Při potlačení vlivu šumu je důležité vědět, co je možným zdrojem šumu. Je-li zdrojem rušení magnetické pole, způsobené např. elektrickým vedením střídavého proudu, elektromotory, aj., postačí zkroucení spojovacího vedení termočlánku. K odstranění vlivu magnetického pole lze také využít filtraci, popř. integrační A/D převodník.

K potlačení vlivu elektrického a elektrostatického pole se používá stínění připojené na referenční potenciál. Plovoucí stínění má jen omezený vliv. Referenčním potenciálem může být skutečná zem, měřicí zem vytvořená nulou, kostrou přístroje nebo elektronicky vytvořeným potenciálem.

Pokud k měření využíváme termočlánky s otevřeným koncem, může dojít ke vzniku rozdílných potenciálů mezi koncem termočlánku spojeným se zemí a měřicím přístrojem. V takovém případě je nutné jako referenční potenciál zvolit skutečnou zem, nebo použít termočlánek v izolovaném provedení.

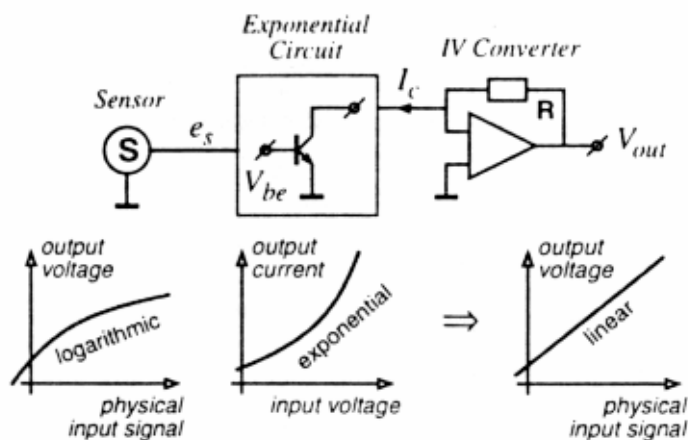


Obr. 4.8 Potlačení rušivých vlivů prostředí [3]

4.4 Základní metody linearizace [22]

4.4.1 Analogová linearizace

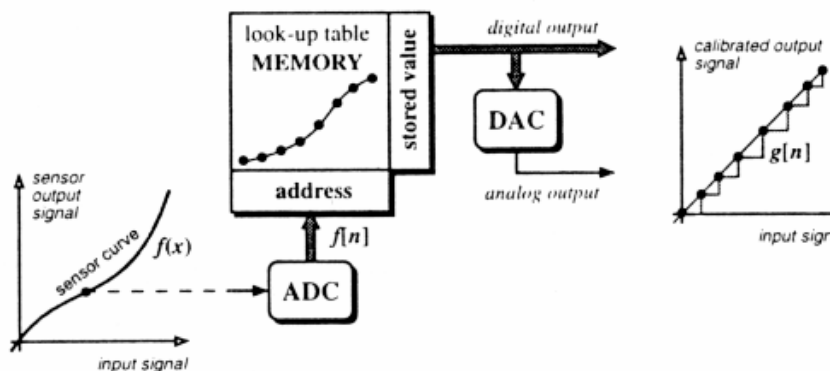
Jedná se o jednu z nejstarších metod linearizace, která je vhodná pouze k odstranění systematických chyb. Princip je následující: nelineární výstup snímače se dopraví na vstup jednotky s přesně inverzní charakteristikou. Nevýhodou této metody je problematická dlouhodobá stabilita korekčního obvodu a jeho teplotní závislost, výhodou jsou dobře dynamické parametry.



Obr. 4.9 Princip analogové linearizace [22]

4.4.2 Linearizace založená na korekční tabulce

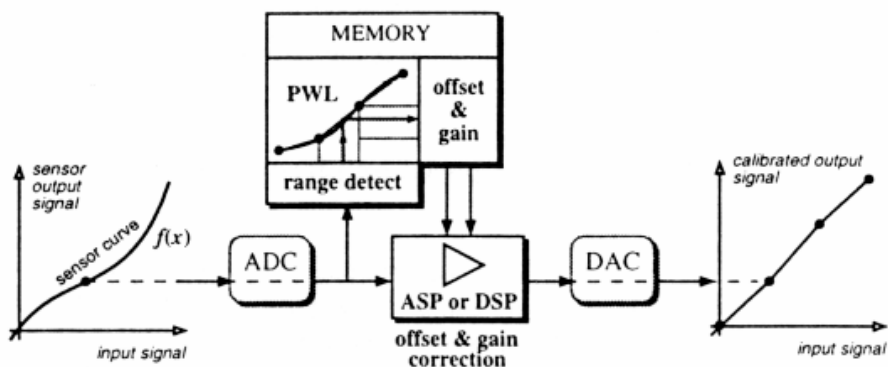
V tomto případě je v paměti mikroprocesoru uložena celá inverzní charakteristika snímače. Digitální výstup převodníku představuje přímo adresu paměťového místa s korigovanou digitální hodnotou. Tato metoda má velké nároky na paměť a objevují se zde problémy při tvorbě samotné korekční tabulky. Výhodou je vysoká rychlost, jednoduchá implementace a možnost realizace současně s kalibrací snímače.



Obr. 4.10 Linearizace pomocí korekční tabulky [22]

4.4.3 Linearizace založená na úsekové lineární interpolaci a interpolaci polynomem nebo splinem

V této metodě je charakteristika snímače rozdělena na jednotlivé úseky, kde krajní body odpovídají kalibrovaným bodům. Jednotlivé úseky jsou pak interpolovány přímkou, popř. jsou kalibrované body proloženy po částech polynomem nebo splinem a určené koeficienty jsou uloženy v paměti. Pro každou měřenou hodnotu je pak vypočítán příslušný výstup. Nevýhodou této metody je její omezená přesnost, navíc pro velmi nelineární průběhy je potřeba velký počet úseků a derivace výstupního signálu obsahuje nespojitosti. Většinu těchto nevýhod odstraňuje interpolace polynomem, ovšem za cenu vyšších výpočetních nároků.



Obr. 4.11 Linearizace pomocí lineární interpolace [22]

4.4.4 Linearizace založená na aproximaci křivky

Tento princip je digitální obdobou analogové linearizace, vhodný pro potlačení systematických chyb. Jeho výhodou je malý počet potřebných kalibračních bodů přenosové charakteristiky, nízké paměťové nároky na uchování koeficientů a jeden výpočetní vztah pro celý rozsah. Nevýhodou této metody jsou vysoké nároky na výpočetní výkon

4.4.5 Linearizace založená na minimalizaci chyb

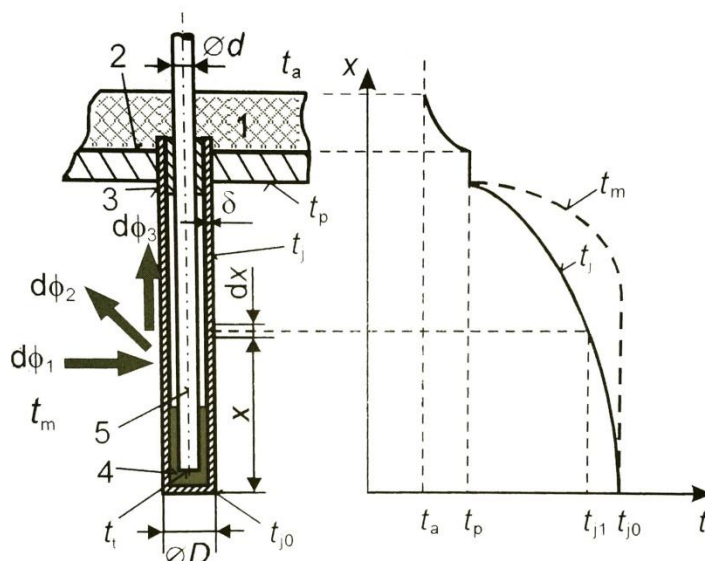
K využití této metody je potřeba mít představu o tvaru přenosové charakteristiky a zároveň mít k dispozici i dostatečný počet kalibračních bodů. K výpočtu se využívá metoda nejmenších čtverců a je minimalizována chybová funkce.

4.5 Zásady správného zabudování dotykových snímačů teploty

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.5, zabudování čidla do měřeného prostředí je jedním z hlavních zdrojů standardní nejistoty typu B, zároveň je ale obtížné její číselné vyjádření. Je proto nezbytné věnovat této problematice zvýšenou pozornost při instalaci dotykových teploměrů.

4.5.1 Měření teploty tekutin [3]

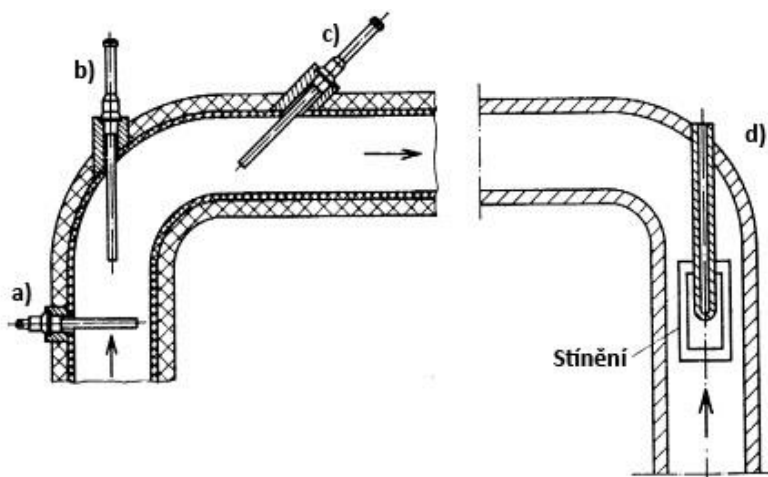
Snímač se zpravidla umísťuje do ochranné jímky, která jej chrání především před mechanickými a korozními vlivy. Na Obr. 4.12 je zobrazeno rozložení teplot jímky včetně naznačení přenosu tepla prouděním ($d\Phi_1$), sáláním ($d\Phi_2$) a vedením ($d\Phi_3$).



Obr. 4.12 Rozložení teplot jímky, stěny potrubí a snímače (1 – tepelná izolace, 2 – stěna, 3 – jímka, 4 – tepelně vodivá výplň, 5 – snímač) [3]

Pro co nejpřesnější měření je třeba zajistit co nejmenší rozdíl mezi teplotami t_m (teplota měřeného prostředí) a t_j (teplota povrchu jímky). Toho se dosáhne splněním několika podmínek:

- zaizolováním vnější části potrubí v místě měření a pokud možno co nejmenší vyčnívající částí jímky z důvodu minimalizace teplotního gradientu
- volbou minimálního průměru jímky
- dostatečným ponorem
- zajištěním maximálního součinitele přestupu tepla α ze snímaného prostředí do jímky vhodným umístěním proudící kapaliny v potrubí (viz Obr. 4.13 a, b, c), popř. mícháním neproudící kapaliny
- zajištěním co největšího prostupu tepla mezi snímačem a jímkou (toho lze dosáhnout například olejem nebo kovovým práškem, viz Obr. 4.12)
- u plynů a par je třeba dosáhnout malého sálání tepla do stěny (viz Obr. 4.13 d)



Obr. 4.13 Možnosti umístění snímače v potrubí: a) zabudování v potrubí o velkém průměru, b), c) běžné umístění snímače směřující proti proudu, d) Stínění sálání snímače do stěn potrubí [24]

4.5.2 Měření teploty tuhých těles

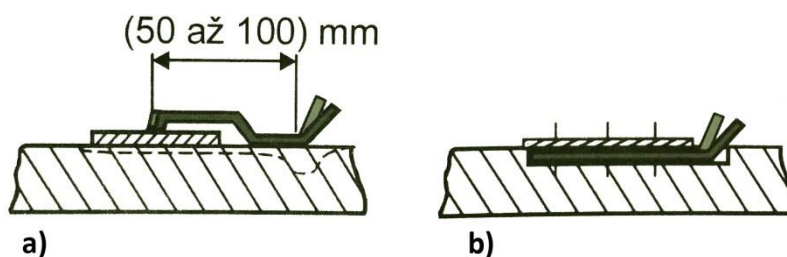
Chceme-li měřit teplotu uvnitř tuhého tělesa, je třeba vyvrtat do tělesa otvor pro zasunutí snímače, což vede ke zhoršení mechanických vlastností tělesa. Ideálním řešením je počítat s umístěním čidla již při návrhu konstrukce. Je potřeba zajistit dobrý přestup tepla z měřeného tělesa do snímače a minimální odvod tepla snímačem z měřeného místa. Pokud pro měření teploty použijeme termočlánky, je lepší zvolit izolované provedení.

4.5.3 Měření povrchové teploty tuhých těles [3]

K měření povrchové teploty jsou ideální termočlánky o malém průřezu a malém součiniteli tepelné vodivosti. Jejich zabudování je třeba vyřešit tak, aby došlo k minimálnímu narušení teplotního pole uvnitř tělesa a nedošlo ke zkreslení měřené teploty.

Měřicí spoj je možné připájet na tenkou destičku o velké hodnotě tepelné vodivosti (Obr. 4.14 a). Destičku je potřeba správně připevnit k měřenému povrchu tak, aby mezi ní a povrchem tělesa nezůstala vzduchová mezera, která by zvyšovala nejistotu měření.

Ke snížení teplotního spádu je dobré vodiče vést určitou vzdálenost podél měřeného tělesa, aby si udržovaly teplotu blízkou teplotě povrchu a neodváděly teplo z měřeného místa. Druhým možným řešením je umístit termočlánek do drážky a zakrytovat ho destičkou z materiálu měřeného tělesa (Obr. 4.14 b).



Obr. 4.14 Možnosti upevnění termočlánku k měřenému povrchu: a) Připájení k destičce, b) uspořádání s krycí destičkou [3]

4.5.4 Měření prostorové teploty v místnostech a budovách [23]

Ideální umístění čidla pokojové teploty je ve výši asi 1,5 m v oblasti pobytu osob, min. vzdálenost od další nejbližší zdi je 50 cm. Čidlo by nemělo být vystaveno slunečnímu záření (přenos tepla sáláním). Umístěno by mělo být na vnitřní zdi, neumísťujeme ho do výklenků a nik, kde by mohlo být bráněno cirkulaci vzduchu. Pokud zdi prochází komín, snímač zde také nemontujeme. V případě masivních stěn (z oceli, kamene, betonu) sousedících s venkovním prostředím je dobré použít termoizolační podložku, aby nedocházelo k měření teploty stěny, ale vzduchu v místnosti.

Ke správnému měření je potřebné proudění vzduchu v místnosti. Pozor se musí dát, zda nebyly nechtěně zakryty otvory pro cirkulaci vzduchu skrz pouzdro čidla. Pokud je to možné, tak nechat instalaci čidla až po ukončení dokončovacích prací (např. natěračských prací).

Velký pozor je třeba dávat na rozmístění spotřebičů v okolí snímače. Umístěním čidla v blízkosti ledničky, sporáku nebo lampičky může dojít ke zkreslení měřené teploty i v řádech několika stupňů.

5 UKÁZKA ŘEŠENÍ NA ZVOLENÉM PŘÍKLADU [25]

Jako demonstrativní příklad určení standardní nejistoty typu B bylo zvoleno měření teploty proudící kapaliny o teplotě 50 °C v potrubí platinovým odporovým teploměrem. Měřicí řetězec se skládá ze snímače, prodlužovacího vedení převodníku měřicího signálu. Do potrubí je vložena jímka, chránící vlastní snímač. Produkty byly vybrány z katalogu společnosti SENSIT s.r.o., zabývající se výrobou snímačů neelektrických veličin.

K měření byl zvolen kabelový snímač se závitem s označením TR 080A pro rozsah -30 °C až 180 °C s platinovým čidlem Pt100. Zvolená třída přesnosti Pt100 je B, tudíž můžeme nejistotu vyčíslit podle vztahu

$$u_{B1} = (0,3 + 0,005 \cdot t) = (0,3 + 0,005 \cdot 50) = 0,55 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Velikost nejistoty způsobená časovou stabilitou je 0,03 % rozsahu po 1000 hod. provozu při teplotě 400 °C. Jelikož naše čidlo je nové a pracuje za podstatně nižších teplot, můžeme tuto nejistotu zanedbat.

Pro měření je použit doporučený proud o velikosti 1 mA. V katalogu je uvedena maximální chyba měření čidla Pt100 způsobená samoohřevem při tomto proudu 0,05 °C. Nejistota se tedy vyčíslí vztahem

$$u_{B2} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,029 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Pro určení nejistoty způsobené izolačním odporem využijeme doporučení normy (viz Tab. 3.2). Využijeme údaj minimálního požadovaného izolačního odporu pro teplotu 25 °C, ke kterému je uvedena velikost nejistoty 0,0003 °C. Pak tedy

$$u_{B3} = 0,0003 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Zapojení snímače je zvoleno čtyřvodičové, nejistotu způsobenou přidavným odporem vodičů můžeme zanedbat.

Doba odezvy snímače udávaná výrobcem je $\tau_{0,5} < 5\text{s}$ v proudící vodě o rychlosti proudu $0,4 \text{ ms}^{-1}$, jelikož je ale snímač uložen v jímce o průměru 8mm, bude tato hodnota o něco vyšší. My v našem měření ovšem uvažujeme ustálené proudění, tudíž nejistotu spojenou s dobou odezvy můžeme také zanedbat.

Pro zjištění nejistoty způsobené zabudováním teploměru by bylo potřebné provést experimentální měření, které by určilo nejistotu měření v závislosti na hloubce ponoru a odvodu tepla. Proto raději řekneme, že teploměr byl správně zabudován s dostatečnou hloubkou ponoru a tuto nejistotu také zanedbáme.

Do měřicího řetězce je ještě zabudován převodník STID-Pt určený k převodu signálu odporových snímačů teploty na unifikovaný výstupní signál 4 až 20 mA, nastavený na rozsah teplot 0 až 100 °C. Udávaná chyba měření je menší než 0,6%, potom je tedy velikost této nejistoty určená následujícím výpočtem

$$u_{B4} = \frac{0,006 \cdot 100}{\sqrt{3}} = 0,346 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Nyní je možné určit standardní nejistotu typu B pro náš případ ze vztahu (2.9)

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^4 u_{Bi}^2} = \sqrt{0,55^2 + 0,029^2 + 0,0003^2 + 0,346^2} = 0,65 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

K určení celkové nejistoty měření by poté bylo potřeba určit standardní nejistotu typu A statistickým zpracováním výsledků měření. K tomuto účelu byla z archivu převzata hodnota nejistoty typu A $u_A = 0,08 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnota byla určena laboratorními testy teploměrů podobného typu a od stejného výrobce (SENSIT s.r.o. z Rožnova pod Radhoštěm) jako je námi zvolený snímač TR 080A. Pro náš příklad se s touto hodnotou snadno uspokojíme. Standardní kombinovaná nejistota se pak určí podle vztahu

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,65^2 + 0,08^2} = 0,655 \text{ }^\circ\text{C}$$

pokrývající interval hodnot s pravděpodobností 68,27 %. Proto tento interval rozšíříme a získáme rozšířenou nejistotu pokrývající interval hodnot s pravděpodobností 95 %.

$$U = 2 \cdot u_c = 2 \cdot 0,655 = 1,31 \text{ }^\circ\text{C}$$

Výsledek poté zapíšeme ve tvaru

$$t = 50,0 \pm 1,3 \text{ }^\circ\text{C},$$

kde hodnota $50,0 \text{ }^\circ\text{C}$ byla určena jako aritmetický průměr naměřených hodnot při výpočtu standardní nejistoty typu A.

Pro zpřesnění měření (zúžení intervalu nejistoty) by se dalo učinit několik opatření. Jako první možnost se nabízí použití snímače s vyšší třídou přesnosti, např. A. Z příkladu lze vyzdvihnout, že nejistota daná normou je podstatnou částí výsledné nejistoty. Další možností zpřesnění výsledku by bylo zkalibrovat buď jenom samotný snímač, nebo rovnou celý měřicí řetězec naráz a následně provést korekci výsledků v jednotlivých bodech pracovního rozsahu. Zde nesmíme ovšem opomenout nejistotu samotné kalibrace.

V příkladu bylo také uvažováno použití jímkou. Jelikož bylo proudění ustálené, nebylo třeba řešit nejistotu spojenou s dobou odezvy snímače. V dynamicky se měnícím prostředí už by ale bylo potřeba tuto problematiku určitým způsobem zahrnout do výsledku. Jímka v měřicím řetězci navíc tuto nejistotu navyšuje, protože se snižuje tepelný tok mezi snímačem a měřeným prostředím a tudíž narůstá doba odezvy. Ke kompenzaci tohoto vlivu je možné použít tepelně vodivý materiál v prostoru mezi jímkou a senzorem (např. olej nebo kovový prášek).

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala tématem nejistot a jejich zdrojů při měření teploty a možností jejich kompenzace, a to se zaměřením na teploměry elektrické mající dominantní postavení v oblasti regulace a automatizace. Měření teploty podle statistik představuje výrazný podíl všech měření každodenní technické praxe, takže je zpravidla středem naší pozornosti. S dosahovanou přesností výsledku měření teploty souvisí často mnoho dalších procesních veličin a celkové výsledky naší činnosti či použité technologie. Práce se pokusila analyzovat veškeré možné zdroje nejistot při měření teploty a jejich vliv na výsledek měření.

Úvodní kapitola se zabývala teoretickým rozбором teploty jakožto fyzikální veličiny. Byla zde popsána její fyzikální podstata a definice teplotních stupnic, včetně rozboru stupnice ITS 90. Dále byly stručně vyjmenovány metody měření teploty a podrobněji rozzebrány teploměry odporové a termoelektrické.

Dále bylo popsáno vyjadřování chyb a nejistot měření. Přesnost můžeme vyjádřit jako rozdíl mezi hodnotou pravou a naměřenou pomocí chyb měření, nebo jako interval, ve kterém se nachází s danou pravděpodobností pravá hodnota. Byly zde uvedeny i základní vztahy pro její určení.

Ve třetí části je pojednáváno o jednotlivých zdrojích nejistot při měření teploměry. Zde je třeba poznamenat, že nejvýznamnějšími zdroji bývají nejistoty dané třídou přesnosti snímače, zabudováním snímače a časovou odezvou v dynamicky proměnném prostředí. V následující části byly popsány některé vybrané metody kompenzace daných zdrojů nejistot, včetně některých zásad při zabudování teploměrů, což bývá významný zdroj, který je navíc těžko kvantitativně popsatelný.

V závěrečné části byl předveden demonstrativní příklad určení celkové nejistoty měření s využitím dostupných informací z normy a katalogu výrobce elektrických snímačů SENSIT s.r.o. Měřicím platinovým odporovým senzorem umístěným v jímce byla snímána teplota ustáleného proudu tekutiny v potrubí.

Téma nejistot měření a jejich zdrojů je téměř poměrně komplikovaná záležitost vyžadující jistou znalost a zkušenost při jejich určování. Je třeba vědět, které zdroje se v daném měřicím procesu uplatňují a které naopak můžeme zanedbat, popřípadě jak se jim vyvarovat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ A LITERATURY

- [1] CHUDÝ, V., PALENČÁR, R., Kureková, E., Halaj, M. *Meranie technických veličín*. 1. vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [2] SLÁDEK, Z., Vdoleček, F. *Technická měření*. 1. vydání Brno : Nakladatelství VUT, 1992. 220 s. ISBN 80-214-0414-0.
- [3] KREIDL, M.; *Měření teploty – Senzory a měřicí obvody*. 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] *Guidelines for Realizing the ITS-90* [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné z: www.omega.com/temperature/Z/pdf/z158-185.pdf
- [5] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. *Fyzika*. 1. vydání Brno : VUTIUM, 2000. 1254 s. ISBN 80-214-1869-9
- [6] MAREŠ, L. Teplota a její měření. In: *TZB info* [online] 2006 [cit. 27-5-2014] Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [7] VŠCHT Praha. Ústav počítačové a řídicí techniky. *Měření teploty*. [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [8] *Teploměry termoelektrické*. [online] [cit. 27-5-2014]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmr/v/0322e-Termoclanky.htm>
- [9] VDOLEČEK, F., PALENČÁR, R., HALAJ, M. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *Automa* [online]. 2001, č. 7 [cit. 27-5-2014]. Dostupné na WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33626
- [10] VDOLEČEK, F., PALENČÁR, R., HALAJ, M. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa* [online]. 2001, č. 10 [cit. 27-5-2014]. Dostupné na WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33705
- [11] VDOLEČEK, F., PALENČÁR, R., HALAJ, M. Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. *Automa* [online]. 2001, č. 12 [cit. 27-5-2014]. Dostupné na WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33755
- [12] Černý, M. Zdroje nejistot a chyb při měření teploty v provozech. *Automa* [online]. 2003, č. 1 [cit. 27-5-2014]. Dostupné na WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/zdroje-nejistot-a-chyb-pri-mereni-teploty-v-provozech-28685.html>
- [13] ČSN EN 60751 Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové snímače teploty. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 32 s.
- [14] VOJTÍŠEK, J., SVRCHOKRYLOVÁ, J. Stabilita etalonů při kalibracích měřidel teploty. *Automa* [online]. 2005, č. 11 [cit. 27-5-2014]. Dostupné na WWW: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30760 stability etalonu
- [15] Burns Engineering. *RTD accuracy II: Error realization* [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na WWW: <http://www.burnsengineering.com/rtdology/>
- [16] ČSN EN 60584-3 Termoelektrické články - Část 3: Prodlužovací a kompenzační vedení - Systém tolerancí a značení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008. 12 s.

- [17] ORTEGA, A. Effects of electrical noise on thermocouple measurements. *Electronics cooling* [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na WWW: <http://www.electronics-cooling.com/2002/08/effects-of-electrical-noise-on-thermocouple-measurements/> (
- [18] TRUMP, B. *Analog linearization of resistance temperature detectors*. [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na WWW: <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?literatureNumber=slyt442&fileType=pdf>
- [19] CESSAC K. J. *Reducing thermowell conduction errors in gas pipeline temperature measurement* [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na WWW: www.pgiint.com
- [20] *Měření teplot* [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mtttd.htm>
- [21] HAVLÍČEK, T. *Snímače teploty*. [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na: <http://skriptum.wz.cz/autom/teplota.htm>
- [22] BENEŠ P. *Inteligentní snímače*. [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na: www.roznovskastredni.cz/dwnl/pel2009/09/benes.pdf
- [23] VIDIM, J. *Měření prostorové teploty a instalace čidel*. [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na: http://domat-int.com/wp-content/uploads/2010_07_IDB_Mereni_prostorove_teploty.pdf.
- [24] FSI VUT Brno. Odbor termomechaniky a techniky prostředí. *Měření teploty*. [online] [cit. 27-5-2014] Dostupné na: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/KA04-12.htm>
- [25] *Snímače teploty, proudění a vlhkosti: Katalog produktů 2014-2015*. katalog firmy SENSIT, Rožnov pod Radhoštěm 2014