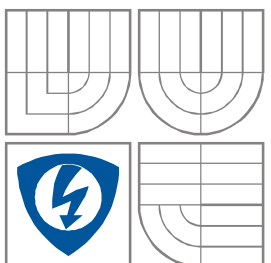


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

NEJISTOTY MĚŘENÍ TEPLoty

UNCERTAINTIES OF MEASUREMENTS OF TEMPERATURE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Vladimír Staněk

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin Frk, Ph.D.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Vladimír Staněk
Ročník: 3

ID: 115276
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Nejistoty měření teploty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Pojednejte o principech a metodách sledování teploty jako základní fyzikální veličiny. Teoreticky zpracujte způsoby vyjadřování nejistoty měření a příslušné metodické postupy aplikujte na proces měření teploty.

U různých teplotních senzorů a teploměrů realizujte, s využitím stabilizovaného kapalinového termostatu, experiment, při němž proměřte několik teplotních bodů v oblasti záporných i kladných teplot. Soubory naměřených hodnot matematicky interpretujte z pohledu nejistoty měření pro jednotlivé teplotní senzory, resp. teploměry. V libovolném programovacím prostředí vytvořte softwarovou aplikaci pro automatické vyjadřování nejistot.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Termín zadání: 6. 2. 2012

Termín odevzdání: 31. 5. 2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

V předkládané práci jsou popsány jednotlivé metody měření teploty a nejistot těchto měření. V práci jsou přehledně zpracované principy jednotlivých čidel teploty. Podle těchto jednotlivých senzorů je následně práce rozdělena do kapitol, jako jsou kovové odporové, polovodičové odporové, monolitické PN, termoelektrické, dilatační, speciální, indikační a bezdotykové senzory teploty. V další kapitole je také popsán výpočet nejistot přímých měření a praktický příklad je uveden v části s měřením teplot, ve kterých tyto nejistoty počítám.

Abstract:

This work deals with various methods of temperature measurement and uncertainties of the measurements. The work is well-arranged the principles of temperature sensors. Under each of these sensors is this work subsequently divided into chapters, such as metal resistance, resistance semiconductor, monolithic PN, thermoelectric, expansion, special, and proximity sensors indicating temperatures. The next chapter also describes the calculation of the direct measurement uncertainties and practical example is shown in the measurement of temperatures in which the counting uncertainty.

Klíčová slova:

Metody měření teploty, teplota, nejistota, principy čidel, přímá měření.

Keywords:

Methods of temperature measurement, temperature, uncertainty, principles of sensors, direct measurements.

Bibliografická citace díla

STANĚK, V. *Nejistoty měření teploty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Frk, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma **Nejistoty měření teploty** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 28. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování práce.

V Brně dne 28. května 2012

.....
podpis autora

Obsah

Seznam použitých symbolů	- 7 -
Úvod	- 10 -
1 Teplota	- 11 -
2 Kovové odporové senzory	- 12 -
2.1 Platinové snímače teploty	- 12 -
2.2 Niklové snímače teploty	- 13 -
2.3 Měděné snímače teploty	- 14 -
2.4 Konstrukce kovových odporových senzorů	- 14 -
3 Polovodičové odporové senzory	- 16 -
3.1 Termistory	- 16 -
3.2 Negistory (NTC termistory)	- 16 -
3.3 Pozistory (PTC termistory)	- 16 -
3.4 Monokrystalické senzory	- 17 -
3.4.1 Senzory Si	- 17 -
3.4.2 SiC senzory	- 18 -
4 Monolitické PN senzory	- 19 -
4.1 Diodové PN senzory	- 19 -
4.2 Tranzistorové PN senzory	- 19 -
4.3 Integrované PN senzory	- 19 -
5 Termoelektrické články	- 21 -
5.1 Seebeckův jev	- 21 -
5.2 Typy termočlánků	- 21 -
5.3 Názvosloví termočlánků	- 22 -
5.4 Konstrukce termočlánků	- 22 -
5.4.1 Drátové termočlánky	- 22 -
5.4.2 Plášťové termočlánky	- 23 -
5.4.3 Speciální termočlánky	- 23 -
6 Dilatační teploměry	- 24 -
7 Speciální dotykové senzory teploty	- 26 -
8 Indikátory teploty	- 28 -
8.1 Keramické žároměrky	- 28 -
8.2 Tavné indikátory teploty	- 28 -
8.3 Barevné indikátory teploty	- 28 -

9	Měření dotykovými teploměry	- 30 -
9.1	Měření teploty v tekutinách.....	- 30 -
9.2	Měření teploty tuhých těles	- 30 -
9.3	Měření povrchové teploty tuhých těles	- 30 -
10	Bezdotykové měření teploty.....	- 31 -
10.1	Základní veličiny bezdotykového měření.....	- 31 -
10.2	Černé těleso	- 32 -
10.3	Senzory pro bezdotykové měření teplot.....	- 32 -
10.4	Senzory tepelného záření.....	- 32 -
10.5	Pyrometry	- 33 -
10.6	Snímání teplotních polí	- 33 -
10.7	Termovize.....	- 33 -
11	Nejistoty přímých měření.....	- 35 -
11.1	Stanovení standardních nejistot při přímém měření	- 35 -
11.1.1	Výpočet standardní nejistoty typu A	- 35 -
11.1.2	Výpočet standardní nejistoty typu B	- 35 -
11.1.3	Standardní kombinovaná nejistota	- 37 -
11.1.4	Rozšířená nejistota.....	- 37 -
12	Praktická část.....	- 38 -
12.1	Programovací prostředí.....	- 38 -
12.2	Program pro zaznamenávání teplot a statistické zhodnocení	- 38 -
12.3	Zpracování naměřených dat.....	- 41 -
	Závěr.....	- 47 -
	Seznam použité literatury	- 48 -

Seznam použitých symbolů

A, B, C	[-]	konstanty pro danou teploměrnou kapalinu
C	[-]	Curieova konstanta
E	[W.m ⁻²]	intenzita ozáření
e	[C]	elementární náboj
I_C	[A]	proud kolektorem
I_D	[A]	saturační proud PN přechodu diody v propustném směru
I_S	[A]	saturační proud PN přechodu diody v závěrném směru
k	[J.K ⁻¹]	Boltzmannova konstanta
k	[-]	hodnota rozložení pravděpodobnosti
k_p	[-]	koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného normálního rozdělení
k_r	[-]	koeficient rozšíření
L	[m]	délka
L	[W.sr ⁻¹]	zářivost
L	[W.sr ⁻¹ .m ⁻²]	zář
L_λ	[W.sr ⁻¹ .m ⁻³]	spektrální hustota záře
M	[W.m ⁻²]	intenzita vyzařování
m	[-]	rekombinační koeficient polovodiče
M_λ	[W.m ⁻³]	spektrální hustota intenzity vyzařování
n	[-]	koeficient teplotní závislosti pohyblivosti minoritních nosičů
n	[-]	počet měření
p, p_p, T_p	[Pa, Pa, K]	tlak, počáteční tlak, počáteční teplota
p_s	[MPa]	tlak nasycené páry
R	[Ω]	odpor
R_{min}	[Ω]	odpor při minimální teplotě PTC termistoru
R_p	[Ω]	odpor při teplotě t_p
R_S	[Ω]	odpor při spínací teplotě
R_T	[Ω]	odpor při dané teplotě

R_{ϑ}	[Ω]	odpor při teplotě
R_0	[Ω]	odpor při teplotě 0 °C
R_{25}	[Ω]	odpor při teplotě 25°C
R_{100}	[Ω]	odpor čidla při teplotě 100 °C
s_{pr}	[-]	průřezový rozptyl
s_x	[-]	směrodatná odchylka
$s_{\bar{x}}$	[-]	směrodatný aritmetický průměr
T	[K]	termodynamická teplota
T_c	[K]	Curieova teplota materiálu čidla
t_P	[°C]	Od této teploty se začíná zmenšovat strmost charakteristiky pozistoru
t_S	[°C]	spínací teplota
U	[mV]	napětí termočlánku
U	[°C]	rozšířená nejistota
U_{BE}	[V]	napětí přechodu báze-emitor
U_D	[V]	napětí na PN přechodu diody v propustném směru
U_{g0}	[mV]	napětí zakázaného pásu polovodiče extrapolovaného pro teplotu 0K
U_T	[J.C ⁻¹]	teplotní napětí
$u_A(x)$	[°C]	standardní nejistota typu A
$u_B(x)$	[°C]	standardní nejistota typu B
$u_C(x)$	[°C]	standardní kombinovaná nejistota
V	[m ³]	objem
V_0	[m ³]	objem při teplotě 0°C
W_{100}	[-]	poměr odporů čidla při teplotě 100 °C a 0 °C
$\bar{x}$	[°C]	střední hodnota
z_{jmax}	[°C]	hodnota změny od nominální hodnoty
α	[K ⁻¹]	teplotní součinitel odporu
α	[K ⁻¹]	součinitel délkové roztažnosti
β	[K ⁻¹]	součinitel teplotní objemové roztažnosti
ΔL	[m]	změna délky

$\Delta\alpha$	[K ⁻¹]	rozdíl délkové roztažnosti kovů
$\Delta\vartheta$	[°C]	odchylka teploty
$\Delta\vartheta$	[°C]	změna teploty
ε	[-]	emisivita
κ	[-]	magnetická susceptibilita
ϑ	[°C]	teplota
μ_r	[-]	poměrná permeabilita
Φ	[W]	zářivý tok

Úvod

Teplota představuje jednu z nejdůležitějších termodynamických veličin určující stav hmoty. Znalost teploty je potřebná ve všech oblastech lidské činnosti. Teploměr se dá využít jak v lékařství, což bylo jedno z prvních využití, tak i v dalších oblastech jako např. spolehlivost v energetice, v letectví, automobilové dopravě, železniční dopravě, v produkci elektrospotřebičů a mnoho dalších.

Pro správné měření je potřeba, aby každý přístroj měl udanou přesnost měření pro předepsaný rozsah neboť přesnost je základem správného měření teploty.

1 Teplota

Teplotou se nazývá stavová veličina, která určuje termodynamickou rovnováhu. Termodynamickou rovnováhou se rozumí stav, kdy v izolované soustavě těles neprobíhají makroskopické změny. Všechny fyzikální veličiny popisující tento stav jsou nezávislé na čase. Další fyzikální veličinou je teplo. Tuto veličinu nelze zaměňovat s teplotou. Teplem je nazývána forma energie, která souvisí s pohybem částic dané soustavy těles. Oproti teplotě nezávisí teplo na přítomném stavu soustavy, a tudíž není stavovou veličinou. Pokud je třeba teplotu měřit, musí se využít metoda nepřímého měření, jelikož teplota patří mezi jednu z mála veličin, které nelze měřit přímo.

2 Kovové odporové senzory

Podstata kovových odporových senzorů je založena na teplotní změně jejich odporu. Kov je soubor kladných iontů v mřížkových bodech krystalové mřížky a elektronového plynu s chaoticky se pohybujícími elektrony.

Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu α . V rozsahu teplot 0 °C až 100 °C lze využít vztah

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha\vartheta), \quad (2.1)$$

ve kterém R_0 je odpor při teplotě 0 °C. Z toho můžeme stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \quad (2.2)$$

kde R_{100} je odpor při teplotě čidla 100 °C.

Dalším parametrem je poměr odporů čidla při teplotě 100 °C a 0 °C. Značí se W a vypočítá ze vztahu

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}. \quad (2.3)$$

Tyto lineární vztahy už nemůžeme využít pro větší rozsahy teplot. Materiály používané pro kovové odporové senzory jsou uvedeny v **Tab 2.1**, ve které jsou uvedeny také jejich vlastnosti. Pro nízké teploty (od 0,5 K) se používají slitiny Rh-Fe, Pt-Co.[1]

Tab 2.1 Materiály, které se používají u kovových čidel [1]

Materiál	$\alpha \cdot 10^2 (\text{K}^{-1})$	Teplotní rozsah (°C)	Poměr odporů W_{100}
Platina	0,385 – 0,391	-20 až 850	1,3850
Nikl	0,617 – 0,675	-70 až +150 (+200)	1,6180
Ni-Fe	0,518 – 0,527	-100 až +200	1,4620
Měď	0,426 – 0,433	-50 až +150	1,4260

2.1 Platinové snímače teploty

Platinové snímače teploty se vyrábějí metodou, kdy je nanesena tenká vrstva vysoce čisté platiny naprašováním ve vakuu. Odpor čidla se nastavuje pomocí laseru. Aktivní plocha čidel se chrání proti mechanickému a chemickému poškození pomocí pasivační vrstvy. K meandru se přivařují vývody čidel. [8]

Platina je chemicky netečná, má časovou stálost, vysokou teplotu tání. Pro provozní snímače musí být poměr elektrického odporu $W_{100} = 1,385$. Pro metrologii musí být čistota 99,999 %. Platinové měřicí odpory pro provozní užití dělíme na toleranční třídu A pro teploty -200 °C až +650 °C a třídu B pro teploty -200 °C až +850 °C. Dále jsou vysokoteplotní snímače pro teploty až 1100 °C. [1]

Pro platinová čidla s teplotním koeficientem $\alpha = 3,851 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ je teplotní závislost při teplotách -200 °C až 0 °C dána vztahem

$$R_{\vartheta} = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)] \quad (2.4)$$

a při teplotách 0 °C až 850 °C

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2), \quad (2.5)$$

kde $R_0 = 100 \text{ } \Omega$, $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$ pro $\vartheta < 0 \text{ °C}$, $C = 0$ pro $\vartheta > 0 \text{ °C}$. [8]

Pro platinová čidla s teplotním koeficientem $\alpha = 3,911 \cdot 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$ je teplotní závislost při teplotách -200 °C až 0 °C dána vztahem

$$R_{\vartheta} = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)] \quad (2.6)$$

a při teplotách 0 °C až 400 °C

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2), \quad (2.7)$$

kde $R_0 = 100 \, \Omega$, $A = 3,9692 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -5,829 \cdot 10^{-7} \, ^\circ\text{C}^{-2}$, $C = -4,3303 \cdot 10^{-12} \, ^\circ\text{C}^{-4}$ pro $\vartheta < 0 \, ^\circ\text{C}$, $C = 0$ pro $\vartheta > 0 \, ^\circ\text{C}$. [8]

Pro odchylky platinových senzorů platí podmínky: [8]

$$\text{třída přesnosti DIN 1/10 B: } \Delta\vartheta = (0,03 + 0,0005 \cdot |\vartheta|), \quad (2.8)$$

$$\text{třída přesnosti DIN 1/3 B (AA): } \Delta\vartheta = \pm(0,100 + 0,0017 \cdot |\vartheta|), \quad (2.9)$$

$$\text{třída přesnosti A: } \Delta\vartheta = \pm(0,150 + 0,002 \cdot |\vartheta|), \quad (2.10)$$

$$\text{třída přesnosti B: } \Delta\vartheta = \pm(0,300 + 0,005 \cdot |\vartheta|), \quad (2.11)$$

$$\text{třída přesnosti C: } \Delta\vartheta = \pm(0,600 + 0,010 \cdot |\vartheta|). \quad (2.12)$$

Mimo odpor $R_0 = 100 \, \Omega$ se dále vyrábí senzory s odporem o hodnotě 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω . [1]

2.2 Niklové snímače teploty

Niklové snímače teploty se vyrábějí vakuovým naprašováním na keramický substrát. Tím se vytvoří tenká vrstva vysoce čistého niklu. Odpor se stejně jako u platinových čidel nastaví pomocí laseru a nanese se ochranná pasivační vrstva na aktivní plochu čidla. Vývody čidla jsou přivařeny k odporovému meandru. [8]

Mezi jeho hlavní výhody patří velká citlivost, rychlá časová odezva, malé rozměry. Mezi nevýhody patří velká nelinearita oproti platinovým, omezený teplotní rozsah, horší dlouhodobá stabilita. Vyrábějí se snímače se základní hodnotou odporu 100, 200, 500, 891, 1000, 2000, 2226 Ω . [1], [8]

Vyjádření teplotní závislosti odporu čidla Ni 891 je následující

$$R_{\vartheta} = 891,05945(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3), \quad (2.13)$$

kde $A = 5,64742 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$, $B = 6,69504 \cdot 10^{-6} \, ^\circ\text{C}^{-2}$, $C = 5,68816 \cdot 10^{-9} \, ^\circ\text{C}^{-3}$. [8]

Pro odchylky čidla Ni 891 platí podmínky: [8]

$$\text{třída přesnosti A: } \Delta\vartheta = \pm(0,2 + 0,014 \cdot |\vartheta|) \text{ pro } -50 \, ^\circ\text{C} \leq \vartheta < 0 \, ^\circ\text{C}, \quad (2.14)$$

$$\text{třída přesnosti A: } \Delta\vartheta = \pm(0,2 + 0,0035 \cdot \vartheta) \text{ pro } 0 \, ^\circ\text{C} \geq \vartheta \leq 200 \, ^\circ\text{C}, \quad (2.15)$$

$$\text{třída přesnosti B: } \Delta\vartheta = \pm(0,4 + 0,028 \cdot |\vartheta|) \text{ pro } -50 \, ^\circ\text{C} \leq \vartheta < 0 \, ^\circ\text{C}, \quad (2.16)$$

$$\text{třída přesnosti B: } \Delta\vartheta = \pm(0,4 + 0,0070 \cdot \vartheta) \text{ pro } 0 \, ^\circ\text{C} \geq \vartheta \leq 200 \, ^\circ\text{C}. \quad (2.17)$$

Vyjádření teplotní závislosti odporu čidla Ni 1000 s teplotním koeficientem $\alpha = 5,000 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$ je následující

$$R_{\vartheta} = 1000(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3), \quad (2.18)$$

kde $A = 4,427 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$, $B = 5,172 \cdot 10^{-6} \, ^\circ\text{C}^{-2}$, $C = 5,585 \cdot 10^{-9} \, ^\circ\text{C}^{-3}$. [8]

Vyjádření teplotní závislosti odporu čidla Ni 1000 s teplotním koeficientem $\alpha = 6,18 \cdot 10^{-3} \, ^\circ\text{C}^{-1}$ je následující

$$R_{\vartheta} = 1000(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 + D\vartheta^6), \quad (2.19)$$

kde $A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $B = 6,650 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$, $C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$, $D = -2,00 \cdot 10^{-17} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-6}$. [8]

Pro odchylky čidla Ni 1000 platí podmínky: [8]

$$\text{třída přesnosti A: } \Delta\vartheta = \pm(0,2 + 0,014 \cdot |\vartheta|) \text{ pro } -60 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.20)$$

$$\text{třída přesnosti A: } \Delta\vartheta = \pm(0,2 + 0,0035 \cdot \vartheta) \text{ pro } 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq \vartheta \leq 250 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.21)$$

$$\text{třída přesnosti B: } \Delta\vartheta = \pm(0,4 + 0,028 \cdot |\vartheta|) \text{ pro } -60 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.22)$$

$$\text{třída přesnosti B: } \Delta\vartheta = \pm(0,4 + 0,0070 \cdot \vartheta) \text{ pro } 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq \vartheta \leq 250 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (2.23)$$

Vyjádření teplotní závislosti odporu čidla Ni 2226 je následující

$$R_{\vartheta} = 2226(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 + D\vartheta^4), \quad (2.24)$$

kde $A = 4,476 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $B = 3,6496 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$, $C = 2,906 \cdot 10^{-9} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-3}$, $D = 3,140 \cdot 10^{-12} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$. [8]

Odchylky čidla Ni 2226 jsou vyjádřeny pouze ve třídě přesnosti B: [8]

$$\Delta\vartheta = \pm(0,7 + 0,063 \cdot |\vartheta|) \text{ pro } -30 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq \vartheta \leq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.25)$$

$$\Delta\vartheta = \pm 0,7 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ pro } 0 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta < 50 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.26)$$

$$\Delta\vartheta = \pm(0,7 + 0,038[\vartheta - 50]) \text{ pro } 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq \vartheta \leq 100 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (2.27)$$

2.3 Měděné snímače teploty

Používají se pro teplotní rozsah $(-200 \text{ až } +200) \text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní závislosti lze vyjádřit vztahem (2.1) pro rozsah teplot $(-50 \text{ až } +150) \text{ }^{\circ}\text{C}$, kde $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, nebo [1]

$$R_{\vartheta} = A_1 R_0 [1 + A_2(\vartheta + 200) + A_3(\vartheta + 200)^2] \text{ pro teploty } -200 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ až } -50 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$R_{\vartheta} = R_0 (1 + A_4 \vartheta) \text{ pro teploty } -50 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ až } +150 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.28)$$

$$R_{\vartheta} = A_5 R_0 [1 + A_6(\vartheta - 150) + A_7(\vartheta - 150)^2] \text{ pro teploty } +150 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ až } +260 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Tyto čidla se z důvodu malé rezistivity běžně nevyrábí. Další nevýhodou je snadná oxidace. [1]

2.4 Konstrukce kovových odporových senzorů

Základní částí senzoru teploty je čidlo, které se podle ČSN 25 8005 nazývá měřicí odpor. Vyrábí se metodou drátkovou, tenkovrstvou a tlustovrstvou.

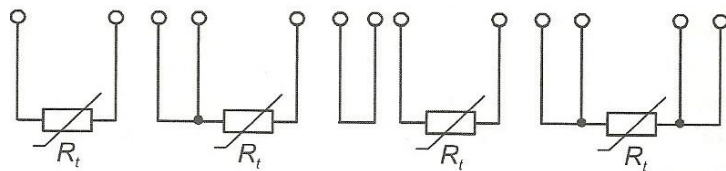
Drátkový je složen ze stočeného platinového drátku, který je uložen ve válcových kapilárách keramických tělísek, ve kterých je zafixován nebo se navíje na vnější povrch keramického případně skleněného tělíska a zataví do skla. Mezi výhody konstrukce s vnějším vinutím patří odolnost proti působení vibrací, otřesů... Nevýhodami jsou metrologické vlastnosti, které jsou horší než u konstrukce s uložením v kapilárách. [1]

U vrstvé technologie se čidlo skládá z odporové vrstvy nanesené na substrátu z korundové keramiky. Vrstva se nanáší tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií. U tlustovrstvé se nanáší např. platina na substrát metodou sítotisku. Tenkovrstvou technologií se nanáší vrstva napařováním, nebo napařováním. U čidel s napařovanou vrstvou se odpor nastavuje nízkovýkonovým laserem. [1]

Pro metrologii mají minimální nejistotu hodnoty odporu senzory s volně uloženými platinovými cívkami ve vzduchu nebo v heliu s kyslíkem. [1]

U senzorů pro průmyslové využití se vývody dělí (Obr. 2.1) podle uspořádání na:

- dvou vodičové,
- tří vodičové,
- čtyř vodičové,
- s pomocnou smyčkou. [1]



Obr. 2.1 Uspořádání vývodů měřicích odporů [1]

3 Polovodičové odporové senzory

Polovodičové odporové senzory využívají teplotní závislost odporu. Teplotní součinitel odporu α je záporný. Tyto senzory se dají rozdělit na termistory a monokrystalické odporové senzory. Termistory dále můžeme rozdělit na negistory a pozistory.[1]

3.1 Termistory

Již z názvu (thermally sensitive resistor) je patrné, že se jedná o odpor závislý na teplotě. Termistor se skládá z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Mezi výhody termistorů lze zařadit velkou teplotní citlivost, malé rozměry, jednoduchý převod odporu na elektrické napětí nebo proud, možnost přímého měření odporu termistoru na větší vzdálenosti. Mezi nevýhody patří nelineární charakteristika.[1]

3.2 Negistory (NTC termistory)

Jedná se o termistor s velkým záporným teplotním součinitelem odporu. NTC termistory se vyrábějí práškovou metodou z oxidu chromu, kobaltu, mědi, železa, manganu, niklu a titanu např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$. Termistory se vyrábějí jak pro běžné teploty od -50°C do $+150^\circ\text{C}$, tak i pro vysoké teploty do 1000°C . [1][3]

Teplotní závislost odporu negistoru je nelineární a lze ji vyjádřit vztahem [1]

$$R_T = A \cdot e^{\frac{B}{T}}. \quad (3.1)$$

Po zlogaritmování se získá přibližně lineární vztah

$$\ln R_T = A + \frac{B}{T}, \quad (3.2)$$

kde A je konstanta závislá na geometrickém tvaru a materiálu negistoru, B je teplotní konstanta závislá na materiálu negistoru, T je termodynamická teplota.[1]

Teplotní konstantu B lze získat z katalogu nebo experimentálně z hodnot odporů termistoru při dvou různých teplotách a podle vztahu [1]

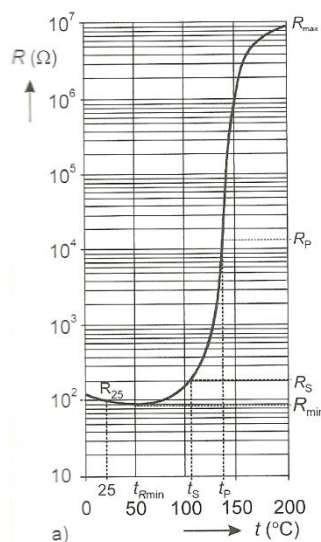
$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.3)$$

Ze vztahu je vidět, že konstanta B není konstantou, protože je teplotně závislá. Odpor termistoru R_0 se vyrábí v rozmezí $1\ \Omega$ až $1\ \text{M}\Omega$ pro B od $1500\ \text{K}$ do $7000\ \text{K}$. Podle doporučení DIN provádíme měření při teplotách $T_1 = 291,15\ \text{K}$ a $T_2 = 358,15\ \text{K}$. Při těchto teplotách vypočítaná konstanta B umožňuje použitím vztahu (3.3) měřit v rozmezí T od 0°C do 100°C s nelinearitou $\pm 1\ \text{K}$. [1][3]

Nejistota měření teploty vlastního termistoru je určena nejistotou hodnoty odporu termistoru. Nejistota je určena výrobním rozptylem struktury a geometrie materiálu a nestabilitou hodnoty konstanty B a odporu R_{25} při teplotě 25°C . Současné termistory mají stabilitu parametrů $\pm 0,02^\circ\text{C}$ a tolerance je $\pm 1^\circ\text{C}$. [1]

3.3 Pozistory (PTC termistory)

Pozistory mají kladný teplotní součinitel odporu. PTC termistory se vyrábějí z polykrystalické keramiky např. titaničitan barnatý (BaTiO_3). Jak je vidět z Obr. 3.1, tak hodnota odporu nejprve mírně klesá a až dosáhne Curieovy teploty, dochází k prudkému nárůstu odporu materiálu. Po vzrůstu o několik řádů dochází k opětovnému klesání odporu. [1][3]



Obr. 3.1 Teplotní závislost odporu na teplotě pro PTC termistor [1]

Mezi základní parametry patří spínací teplota t_s , které odpovídá hodnota odporu R_s , která je dvakrát větší než odpor R_{min} . Spínací teplotu můžeme měnit volbou materiálu v rozmezí od 60 °C do 180 °C. Teplotní součinitel pro strmou část charakteristiky určíme ze vztahu [1], [3]

$$\alpha = \frac{\ln R_P - \ln R_S}{t_P - t_S} \quad (3.4)$$

3.4 Monokrystalické senzory

Můžeme je zhotovit z křemíku, germania, india a jejich slitin, v praxi se ale setkáváme pouze s křemíkovými senzory. [1]

3.4.1 Senzory Si

V praxi se vyrábí pro měření teplot v rozmezí -50 °C až +150 °C. Pro výrobu je použit polovodič typu N, tzn., že má dominantní elektronovou vodivost. Teplotní závislost rezistivity je v rozsahu teplot dle dotační koncentrace příměsí určena teplotní závislostí pohyblivosti nosičů. Se zvyšující se teplotou dochází z důvodu rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče ke snižování pohyblivosti nosičů a tím dochází k nárůstu rezistivity polovodiče. Si senzory mají kladný teplotní součinitel odporu.

Závislost odporu Si senzoru na teplotě lze aproximovat vztahem

$$R_T = R_{25}(1 + \alpha \Delta T + \beta \Delta T^2), \quad (3.5)$$

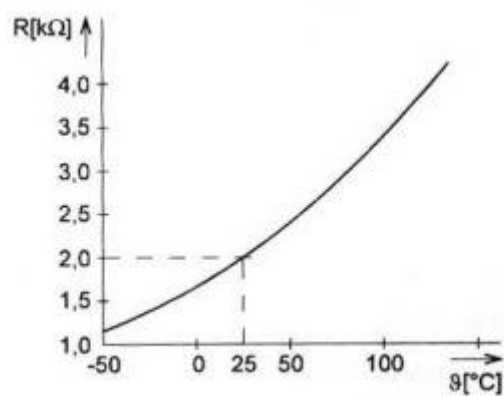
kde $\Delta T = T - 25$ °C. [1]

Typickými hodnotami koeficientů ze vztahu (3.5) jsou

$$\alpha = 7,88 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$\beta = 1,937 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}.$$

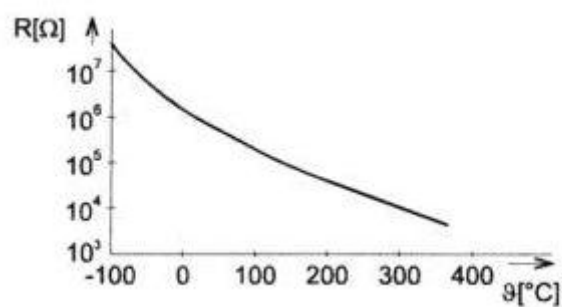
Vztah pro jmenovitou hodnotu R_{25} podle (3.5) lze vyjádřit grafem na Obr. 3.2. Nelineární závislost můžeme linearizovat sériovým nebo paralelním zapojením rezistoru. Časová konstanta Si senzoru je okolo 30 s. V klidné kapalině je konstanta 5 s, v proudící 3 s. [1], [3]



Obr. 3.2 Charakteristika Si čidla [1]

3.4.2 SiC senzory

Využívá se pro rozsahy teplot -100 $^{\circ}C$ až 450 $^{\circ}C$. Výroba se provádí tenkovrstvou technologií vysokofrekvenčním napařováním na substrát Al_2O_3 . Závislost odporu na teplotě je znázorněna na Obr. 3.3 . [1]



Obr. 3.3 Charakteristika SiC čidla [1]

4 Monolitické PN senzory

Princip je založen na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Tyto senzory mají teplotní rozsah od -55 °C do +150 °C a nejistotu měření 0,6 % až 2 %.[1]

4.1 Diodové PN senzory

Teplotní závislost diodového PN senzoru je způsobena teplotně závislými veličinami m , U_T , I_s z rovnice [1]

$$I_D = I_s \left(e^{\frac{U_D}{mU_T}} - 1 \right). \quad (4.1)$$

Z této rovnice vyplývá vztah

$$U_D = mU_T \ln \left(\frac{I_D}{I_s} + 1 \right). \quad (4.2)$$

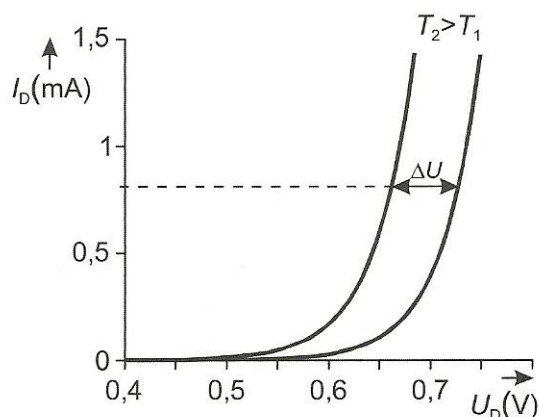
Hlavní složkou rovnice (4.1) je exponenciální závislost $I_s=f(T)$ podle vztahu [1]

$$I_s = AT^n e^{-\frac{U_{go}}{U_T}}. \quad (4.3)$$

Proto klesá napětí U_D s rostoucí teplotou. Teplotní závislost napětí PN přechodu je uvedena na Obr. 4.1 .

Z poměru $I_D/I_s \gg 1$ vyplývá, že rovnici (4.2) můžeme přepsat na

$$U_D = mU_T \ln \frac{I_D}{I_s} \quad (4.4)$$



Obr. 4.1 Teplotní závislost Charakteristiky přechodu PN diody [1]

4.2 Tranzistorové PN senzory

Princip tranzistorových PN senzorů je obdobný jako u diodových senzorů. To znamená, že využívá teplotní závislosti napětí přechodu báze-emitor v propustném směru. Z rovnice (4.4) platí vztah pro přechod báze-emitor vztah[1]

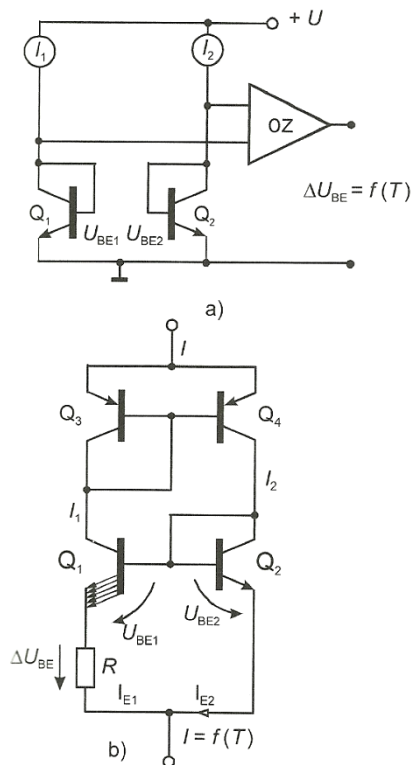
$$U_{BE} = U_T \ln \frac{I_C}{I_s} \quad (4.5)$$

4.3 Integrované PN senzory

Senzor teploty spolu s elektronickým obvodem tvoří u monolitických PN senzorů jeden monolitický prvek. Tyto senzory jsou tvořeny většinou dvojicí bipolárních tranzistorů napájených zdroji proudu (Obr. 4.2). Výhodou je potlačení vlivu závislosti proudu I_s a chyby

způsobené oteplováním polovodiče ztrátovým výkonem. Dále se používá také CMOS technologie. [1]

Lepším řešením je zapojení na Obr. 4.2 b. Přechody BE tranzistorů Q_1 a Q_2 jsou napájeny shodným proudem I_1 a I_2 pocházející z proudového zrcadla tvořeného tranzistory Q_3 a Q_4 . Tranzistor Q_1 je tvořen r ($r < 20$) paralelně zapojenými tranzistory, kde každý z nich má plochu emitorového přechodu S_E stejnou jako tranzistor Q_2 . [1]

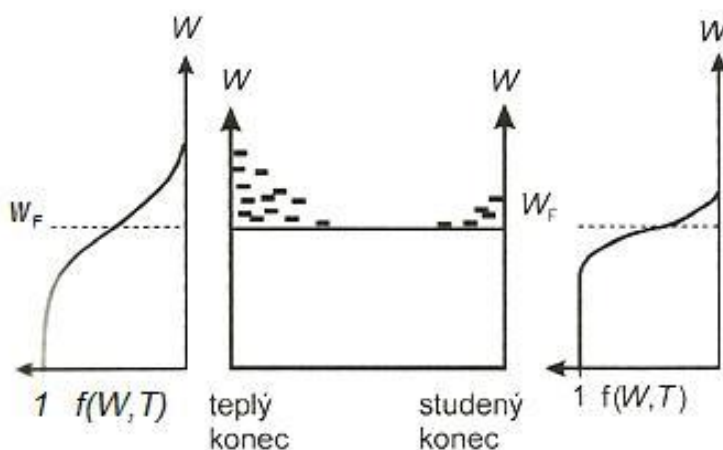


Obr. 4.2 Uspořádání integrovaného senzoru teploty (a – různé proudy, b – stejné proudy a různé hustoty proudů) [1]

5 Termoelektrické články

5.1 Seebeckův jev

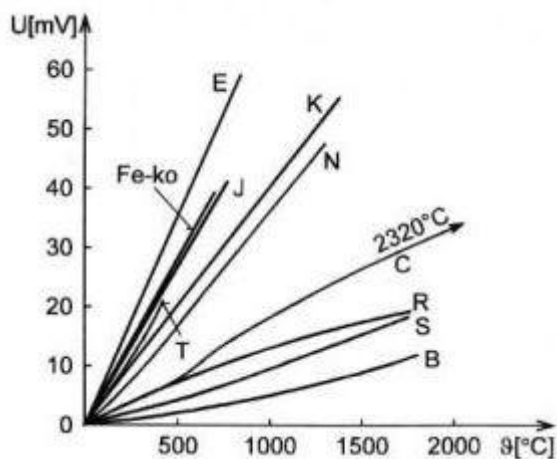
Jedná se o jev, na kterém je založeno fungování termočlánků. Jev je založen na přeměně tepelné energie na energii elektrickou. Principem jevu je, že nosiče náboje mají větší energii v teplejší části vodiče. Z tohoto důvodu difundují ve větším množství do míst vodiče, které jsou chladnější, než opačně. Vzniká jednostranná převaha kladných nebo záporných nábojů. Rozložení nosičů je zobrazeno na Obr. 5.1 . [1]



Obr. 5.1 Seebeckův jev pro jeden materiál [1]

5.2 Typy termočlánků

Materiály používané na výrobu jednotlivých párů termočlánků mají přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření, dlouhodobou stabilitu charakteristiky $U = f(\Delta t)$. Termočlánky se označují velkými písmeny a jejich charakteristiky jsou na Obr. 5.2 .[1]



Obr. 5.2 Charakteristiky vybraných termoelektrických článků [1]

Termočlánek typu K (NiCr-NiAl) se používá pro oxidační a inertní atmosféru. Je necitlivý pro neutronový tok a nevhodný do vakua. Termočlánek typu T (Cu-CuNi) má využití při nízkých teplotách, v redukční, oxidační atmosféře, ve vakuu lze použít do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Typ J (Fe-CuNi) se využívá pro oxidační, redukční, inertní atmosféru a také ve vakuu. Termočlánek typu N (NiCrSi-NiSiMg) má stabilní charakteristiku do teploty $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je využitelný pro cyklické změny teploty, pro jadernou energetiku. Pro měření ve vakuu a středně oxidační atmosféře je vhodný termočlánek typu E (NiCr-CuNi). Má také nejvyšší hodnotu termoelektrického

koeficientu. Pro vysoké teploty až 1780 °C se využívá termočlánek typu R (PtRh 13-Pt). Je odolný proti oxidaci, korozi. Termočlánek typu S (PtRh 10-Pt) má stejné využití jako typ R. Typ B (PtRh30-PtRh6) je využitelný pro teploty do 100 °C. Vlastnosti má podobné s typem R a S. Termočlánek typu G (W-WRh) má využití pro extrémně vysoké teploty. Je chemicky stabilní, použitelný v oxidačních, inertních atmosférách a také ve vakuu a ve vodíku. Obdobné vlastnosti jako typ G má termočlánek typu C (WRh5-WRh26). [1]

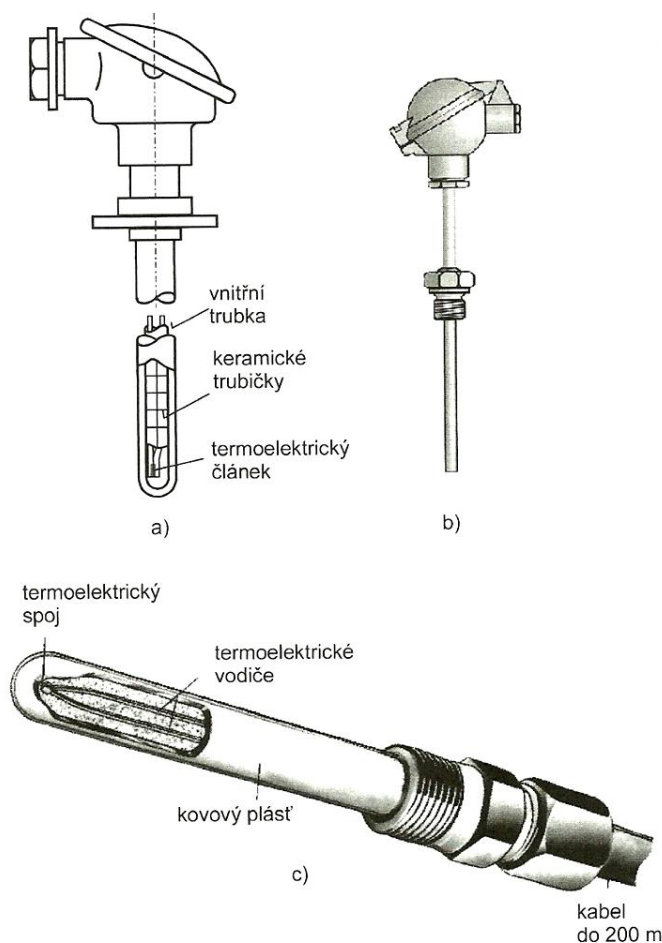
5.3 Názvosloví termočlánků

Teplotou svorek spojovacího vedení rozumíme srovnávací teplotu. Vztažnou teplotou je teplota pro stanovení základních hodnot termoelektrického napětí. Vedení, u kterých jsou použity stejné kovy, jako u termočlánku jsou prodlužovací vedení a naopak vedení, která jsou vyrobena z jiných kovů, než u termočlánku jsou kompenzační vedení. Materiály pro kompenzační vedení musí splňovat pro teploty do 200 °C podmínku, že termoelektrický koeficient musí být stejný jako u termočlánku.[1]

5.4 Konstrukce termočlánků

5.4.1 Drátové termočlánky

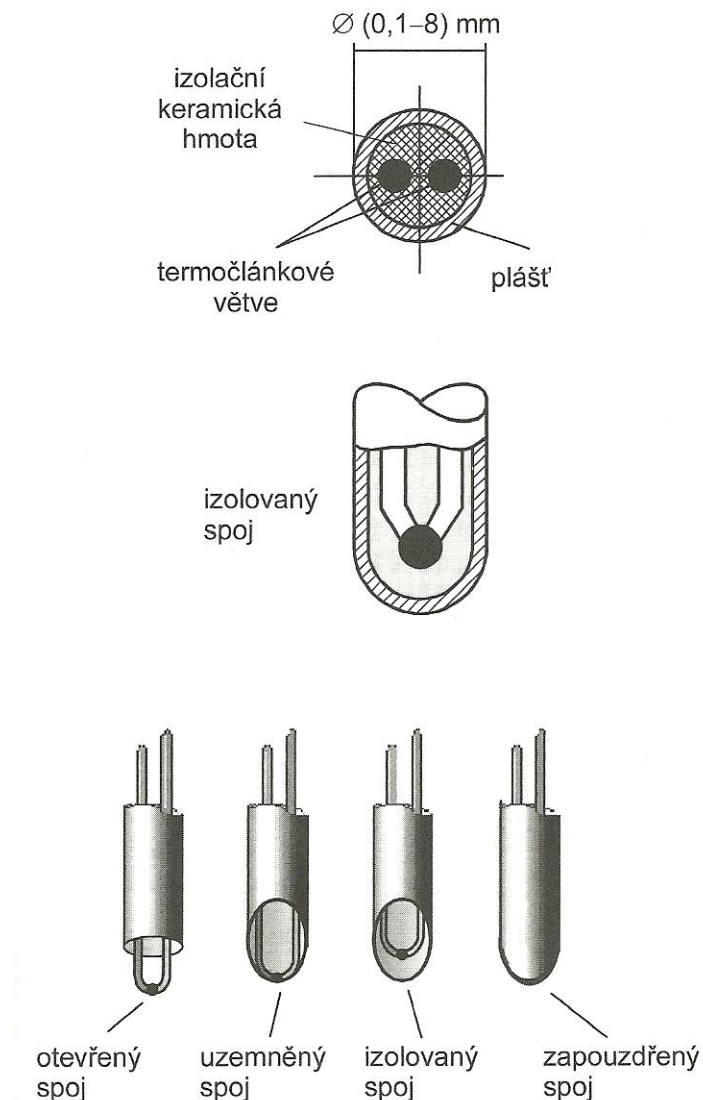
Tyto termočlánky jsou tvořeny dvěma kovovými větvemi, umístěnými v izolačních trubičkách. Jednotlivé vodiče mají průměr mezi 0,5 mm a 3,5 mm. Izolace se používají plastové, izolace opletem skleněnými vlákny, smalty, keramické trubičky a další. Druhy konstrukčních uspořádání jsou uvedeny na Obr. 5.3 . [1], [8]



Obr. 5.3 Termoelektrický snímač teploty (a – tyčový, b – do jímky, c – plášťový kabel) [1]

5.4.2 Plášťové termočlánky

Skládají se z termoelektrických vodičů vložených do kovového pláště trubkového tvaru. Vodiče se izolují práškovou minerální izolací z MgO případně Al_2O_3 . Průměry plášťů jsou 0,1 mm až 8 mm. Plášť je z korozivzdorných ocelí, chromniklových slitin, ze slitin PtRh10. Provedení plášťových termočlánků je uvedeno na Obr. 5.4 . [1]



Obr. 5.4 Plášťové termoelektrické články [1]

Izolovaný chrání termoelektrický spoj proti okolním vlivům, má nejdelší dobu odezvy. Nejrychlejší odezvu má otevřené provedení. Toto provedení se ale nedá použít pro agresivní a vlhké prostředí. [1]

5.4.3 Speciální termočlánky

Mezi tyto termočlánky můžeme zařadit snímače do prostředí s nebezpečím výbuchu, snímače s dvouvodičovým převodníkem teploty a kompenzací na vztažnou teplotu a snímače využívané pro měření teploty taveniny pro kontinuální případně jednorázové měření.[1]

6 Dilatační teploměry

Princip je založen na teplotní roztažnosti pevných látek, kapalin a plynů. Můžeme je rozdělit na

- tyčové,
- bimetalické,
- bimateriálové,
- skleněné,
- kapalinové tlakové,
- parní tlakové,
- plynové tlakové. [1]

Tyčové teploměry

Princip je založen na rozdílné teplotní roztažnosti dvou materiálů (nejčastěji kovů), které jsou spojeny v jednom místě. Čidlo je tvořeno kovovou trubicí délky L s velkým teplotním součinitelem délkové roztažnosti, do které je vložena tyč s malým teplotním součinitelem délkové roztažnosti. Rozdíl prodloužení délky ΔL při změně teploty $\Delta \vartheta$ je vyjádřen vztahem [1]

$$\Delta L = L(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta \vartheta. \quad (6.1)$$

Využití těchto teploměrů je v termostatech. Výhodný je velký teplotní rozsah až do 1000 °C a krátká časová odezva. Na druhou stranu je nevýhodou velká nejistota měření z rozsahu ± 2 %. [1]

Bimetalické teploměry

Princip je založen na rozdílné teplotní roztažnosti dvou rozdílných kovových pásků. Tyto pásky jsou podélně svařeny. Změnou teploty dochází vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k deformaci pásku. Důležité při výběru kovů k výrobě je, aby měly co největší rozdíl délkové roztažnosti $\Delta \alpha$. To umožní velkou citlivost teploměru. Dále je při výrobě také nutné přihlídnout k požadovanému provoznímu rozsahu teplot, tepelné a elektrické vodivosti a měrné tepelné kapacitě materiálů. Využití je v rozsahu teplot -100 °C až 500 °C. Používají se ve dvoupolohových regulátorech teploty, v bimetalických pojistkách, a také jako snímač v teploměrech. Časová odezva je oproti tyčovým teploměrům větší. Nejistota měření je mezi ± 1 % a ± 5 %. [1]

Bimateriálová čidla

Vyrábějí se na stejném principu jako bimetalická čidla, s tím rozdílem, že se místo dvou kovů používá kov (hliník) a polovodiče (Si, n-Si, p-Si, Si₃N₄). [1]

Skleněné teploměry

Je založen na principu teplotní objemové roztažnosti kapaliny ve skle. Pro teplotní závislost objemu kapaliny na teplotě se používá vztahu

$$V = V_0(1 + \beta t), \quad (6.2)$$

kde β je součinitel teplotní objemové roztažnosti. [1]

Skleněné teploměry jsou tvořeny baňkou, ve které je kapalina, dále měřicí kapilárou, obalovou trubicí a destičkou se stupnicí. Teplotní rozsah skleněných teploměrů je -190 °C až 600 °C. Nejistota měření je $\pm 0,1$ °C a rozlišitelnost může být až 0,001 °C. Jako kapaliny se nejčastěji používá rtuť, která může být ve vakuové kapiláře, případně pro vyšší teploty v kapiláře s dusíkem. Dalšími kapalinami jsou toluol, pentan, etanol. Všechny jsou používány ve vakuových kapilárách. [1]

Nejistota měření je způsobena vyčnívajícím sloupcem kapaliny, chybou paralaxe při čtení na stupnici, tlakem na tlakoměrnou nádobu. Při použití rtuti je nejistota větší než u organických kapalin. [1]

Kapalinové tlakové teploměry

Systém je obdobný jako u skleněných teploměrů, s tím rozdílem, že je kapalina umístěna v celém systému a měření objemové roztažnosti se převádí na měření tlaku. Teploměr se skládá z baňky, kapiláry a deformačního tlakoměru. Při změně objemu kapaliny dochází k pružné deformaci kovových částí. Tím se zvýší tlak, který je úměrný teplotě. Jako náplň se používá rtuť (pro teploty -30 °C až +500 °C), dále se používá xylen (-40 °C až 400 °C), metylalkohol (-45 °C až +150 °C) a další organické kapaliny. Nejistota měření z rozsahů těchto teploměrů je do ±1 %. [1]

Parní tlakové teploměry

Tyto teploměry jsou zčásti naplněny kapalinou a zčásti její sytou párou. Pro parní teploměry se využívá teplotní závislosti tlaku p_s nasycené páry vhodných kapalin. Vztah pro tuto závislost je

$$\log p_s = A + \frac{B}{T} + CT, \quad (6.3)$$

kde A , B a C jsou konstanty pro danou tlakoměrnou kapalinu. [1]

Konstrukce je obdobná jako u kapalinových tlakových teploměrů. Rozdíl je v tom, že stupnice je nelineární. Používají se pro teploty -40 °C až +230 °C.

Mezi výhody patří větší citlivost oproti kapalinovým tlakovým teploměrům, menší teploměrová nádoba, délka spojovací kapiláry do 50 m, menší teplotní časová konstanta. Mezi nevýhody bych zařadil nelineární stupnici. Nejistota měření z rozsahu je ±1 %. Pro účely ITS-90 je možné měřit s nejistotou ±0,0001 K. [1]

Plynové tlakové teploměry

Systém pro měření teploty je zaplněn plynem, kterým je často dusík případně helium. Tento plyn je pod tlakem až do $2,5 \cdot 10^6$ Pa. Systém je stejný jako u jiných tlakových teploměrů. Při konstantním objemu teploměrového systému platí následující vztah

$$p = \frac{p_p}{T_p} T = kT, \quad (6.4)$$

kde p_p a T_p jsou počáteční hodnoty při plnění systému. [1]

Pro korekci na teplotu okolního prostředí se vkládá bimetalový akční člen do pákového mechanismu mezi Bourdonovou trubicí a ručičkou přístroje. Mezi výhody patří netoxičita kapaliny. Proto jsou vhodné pro použití v potravinářství, výrobě léčiv, v chemickém průmyslu. Jsou použitelné pro teploty -250 až 800 °C. Nejistota měření z rozsahu je ±1 %. [1]

7 Speciální dotykové senzory teploty

Akustické teploměry

Princip je založen na teplotní závislosti rychlosti šíření zvuku v plynu nebo pevné látce. Rychlost šíření zvuku můžeme vyhodnocovat následujícími metodami:

- Rezonanční se zpětnovazebním oscilátorem – využívá teplotně závislé rychlosti šíření zvuku v plynném prostředí,
- Pulsní – využívá teplotně závislé rychlosti šíření zvuku v pevném prostředí. Vyhodnocuje dobu průchodu akustického pulsu tyčí od vysílajícího akustického měniče k přijímacímu.

Využívají se pro nízké i vysoké teploty. Akustický teploměr je složen z měřicí tyče (hliník, ocel, safír, ruthenium, molybden...) průměru 0,03 mm – 3 mm a délky 1,3 cm – 3 m. Do tyče se magnetostrikčním měničem vysílá ultrazvukový impuls, který se odrazí od diskontinuity a poté od konce tyčky. Tyto impulsy se snímají a zpracuje se časový rozdíl. Využití pro měření teplot 750 °C až 3000 °C a nejistota měření je ± 20 °C. [1]

Šumové teploměry

Teplotně závislý volný pohyb elektronů ve vodivostním pásu způsobuje, že je na vývodech rezistorů měřitelné elektrické napětí (tepelný šum). Energie tepelného šumu odpovídá specifikaci bílého šumu.

Mezi výhody patří nezávislost na prostředí (ionizační záření, vysoce agresivní atmosféra, tok neutronů, vysoké teploty větší než 1000 °C). Tyto vlivy můžeme vyloučit např. přesným změřením odporu. Mezi nevýhody patří malé výstupní elektrické napětí. Teploměry lze použít pro teploty od 3 K do 1100 K. A nejistoty měření jsou $\pm(0,3 - 100)$ mK. [1]

Magnetické teploměry

Pracují na principu závislosti magnetické susceptibility paramagnetických solí. Pro magnetickou susceptibilitu platí Curie-Weissův zákon

$$\kappa = \mu_r - 1 = \frac{C}{T - T_C}, \quad (7.1)$$

kde

μ_r – poměrná permeabilita,

C – Curieova konstanta,

T – teplota čidla,

T_C – Curieova teplota materiálu čidla. [1]

Permeabilitu můžeme vyhodnotit změřením indukčnosti vzduchové cívky bez čidla a poté s čidlem.

Tyto teploměry můžeme využít pro teploty od 10 mK až do 20 K až 80 K. [1]

Optické vláknové senzory teploty

Využívají vlivu teploty na vlastnosti optických vláken. Naměřená teplota moduluje optický signál a ten je poté vyslán do optického vlákna a dále pak detekován diodou PN, PIN případně lavinovou. [1]

Tyto teploměry se skládají z vlákna, které je z válcového jádra s indexem lomu n_j a z obalu s indexem lomu n_p . Dojde-li na rozhraní k úplnému odrazu, projde paprsek jádrem. Vyrábí se velké množství optických senzorů. Prvním z nich je optický vláknový senzor pracující na principu teplotních změn fluorescence. Jsou to optické senzory s modulací vlnové délky, jejichž fosforová vrstva je excitována ultrafialovým zářením. Deexcitací dochází k fluorescenci čidla. Zpětný paprsek je rozdělen interferenčním filtrem na červenou a zelenou složku. Využívají se pro teploty v rozsahu -50 °C až +250 °C a nejistota měření je $\pm 0,1$ %. [1]

Dalším typem optických senzorů teploty je typ s Fabryho-Perotovým rezonátorem. Jsou to transmisní, lokální a nevlastní senzory s modulací vlnové délky. Čidlo teploty využívá teplotní deformaci rezonátoru. Ze širokospektrálního zdroje se přivádí světlo do rezonátoru. Světlo, které vystupuje, je přiváděno do spektrometru, který se skládá z hranolu a systému CCD detektorů. Signál z těchto detektorů se přivádí do mikroprocesoru. Využívají se pro rozsah 0 °C až +100 °C. Nejistota měření je $\pm 0,1$ °C. [1]

Dalším optickým senzorem teploty je senzor pracující na principu distribuovaného Ramanova optického vláknového senzoru teploty. Je to refraktometrický a vlastní typ optického senzoru teploty. Tento systém se zakládá na stimulovaném Ramanově rozptylu. Ten vzniká šířením optických impulzů vláknem. Využívají se pro teploty -190 °C až 460 °C. [1]

8 Indikátory teploty

Základní funkcí indikátorů je přibližné stanovení teploty těles. Teplota se stanoví na základě znalosti teploty, při které dochází ke změně vzhledu indikátoru (tvar, barva). Indikátory teploty můžeme dělit na vratné a nevratné a dále pak na indikátory s jedním případně více barevnými zvraty. [1]

8.1 Keramické žároměrky

Jedná se o deformační indikátor teploty, který je nevratný. Tyto indikátory se vyrábějí z kysličníků SiO_2 , Al_2O_3 . Dále se přidávají další kysličníky (MgO , K_2O , Na_2O ...). Používají se pro teploty 600 °C až 2000 °C s odstupňováním 10 °C až 50 °C (pro tvar trojbokého jehlanu). Změna tvaru se projevuje ohnutím jehlanu. Nejistota měření je ± 50 °C. Vyrábějí se také ve tvaru kroužků. Ty se používají pro teploty 960 °C až 1440 °C. Změna tvaru se projevuje změnou průměru kroužku. Dalším tvarem může být tyčinka se čtvercovou základnou. Využití pro teploty 590 °C až 1525 °C. Využití je v keramickém průmyslu. [1]

8.2 Tavné indikátory teploty

- Teploměřové tablety – jedná se o nevratné indikátory vyráběné slisováním keramického prášku. Při dosažení dané teploty se tableta roztaví. Využití pro teploty 40 °C až 1650 °C.
- Teploměřové kapaliny – jedná se o nevratné indikátory. Jedná se o rozpuštěný keramický prášek v těkavé kapalině. Na měřený předmět se nanáší štětcem. Při dosažení dané teploty se nanosená kapalina rozteče. Použití pro teploty 40 °C až 1371 °C.
- Teploměřové tužky – jedná se o nevratné indikátory. Opět se jedná o keramický prášek. Ten je spojený pojídlem. Nanosená hmota se po dosažení dané teploty roztaví a ztmavne. Použití pro teploty 40 °C až 1371 °C.
- Teploměřové nálepky – jedná se o nevratné indikátory. Jde o nálepku, která má na spodní straně adhesivní vrstvu. Tato vrstva je osazena bílými indikačními kruhy na černém (oranžovém) pozadí. Místo kruhového podkladu může být také podklad obdélníkový. Dosažená teplota se projeví změnou barvy v kruhu na černou. Použití pro teploty 38 °C až 316 °C.

Všechny zmíněné indikátory mají nejistotu měření ± 1 °C. [1]

8.3 Barevné indikátory teploty

- Teploměřové barvy a tužky – jedná se o akrylové laky, stmelené prášky, které obsahují teplotně citlivé anorganické pigmenty. Dosažením dané teploty dojde k chemické reakci. Tato reakce zapříčiní změnu spektrální odrazivosti světla dopadajícího na povrch. Následně dochází ke změně barvy povrchu. Jedná se o nevratné teploměrové barvy. Použití pro teploty 40 °C až 1350 °C s odstupňováním 10 °C až 200 °C. Nejistota měření je ± 5 °C pro nízké teploty ± 1 % pro vysoké teploty.
- Teploměřové nálepky – jedná se o barevné indikaci a jsou vratné, protože barvy obsahují rtuť. Použití při teplotách ne větších než 170 °C. Nejistota měření je ± 1 °C až ± 3 °C pro teploty 70 °C až 150 °C.
- Indikátory teploty s kapalnými krystaly – kapalný krystal je organická látka, která má teplotní závislost molekulární struktury. Jedná se o kapalinu, která při zvyšování teploty udržuje molekulární orientaci do určité teploty (molekuly se volně pohybují, ale udržují směrovost). V určitém teplotním rozsahu dochází ke změně spektrálního indexu lomu a tím ke změně odrazivosti dopadajícího bílého světla. Dopadne-li tedy bílé světlo obsahující všechny barvy a dojde k odrazu pouze jedné, znamená to, že ostatní byly absorbovány a na indikátoru se zobrazí pouze ta odražená. Nejčastěji se používají krystaly cholesterické. Základní povrch pod nanesenou vrstvou barvy musí být černá a nesmí se lesknout. Jmenovité teploty těchto indikátorů jsou 0 °C až 60 °C, kde širší pásma

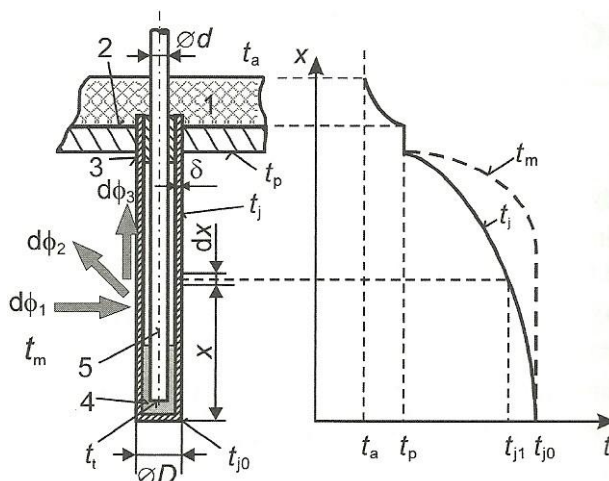
je od 1 °C. Nejistota měření je $\pm 0,2$ °C až 1/3 šíře pásma. Můžeme také dosáhnout nejistoty až $\pm 0,05$ °C.

- Luminiscenční indikátory – při dosažení kritické teploty dojde ke změně luminiscence. Změna se projeví pod ultrafialovým zářením. Některé luminofory lze použít bez UV záření. [1]

9 Měření dotykovými teploměry

9.1 Měření teploty v tekutinách

Umístění snímače musí být v ochranné trubici případně v jímce.



Obr. 9.1 Rozložení teplot jímky, stěny objektu, snímače (1 – tepelná izolace, 2 – stěna, 3 – jímka, 4 – tepelně vodivá výplň, 5 – snímač) [1]

Zásady pro měření v tekutinách

- Je potřeba kvalitně odizolovat vnější povrch v místech, ve kterých měříme. Je třeba také omezit vyčnívání jímky.
- Je potřeba omezit rozměry D , d , d .
- Je potřeba zvolit dostatečný ponor do proudící kapaliny
- Maximální součinitel přestupu tepla α z měřeného prostředí do prostředí jímky. Toho se docílí správným umístěním do proudící kapaliny.
- Součinitel prostupu tepla mezi jímkou a snímačem musí být co největší.
- U plynů a par je potřeba snímač odstínit proti sálání tepla do stěny. [1]

9.2 Měření teploty tuhých těles

Při tomto měření je třeba do tělesa vyvrtat otvor. Pro měření je potřeba zajistit velký přestup tepla z tělesa do snímače a naopak malý přestup tepla do okolí. Pro tato měření se hodí plášťové termoelektrické články s izolovaným spojem. [1]

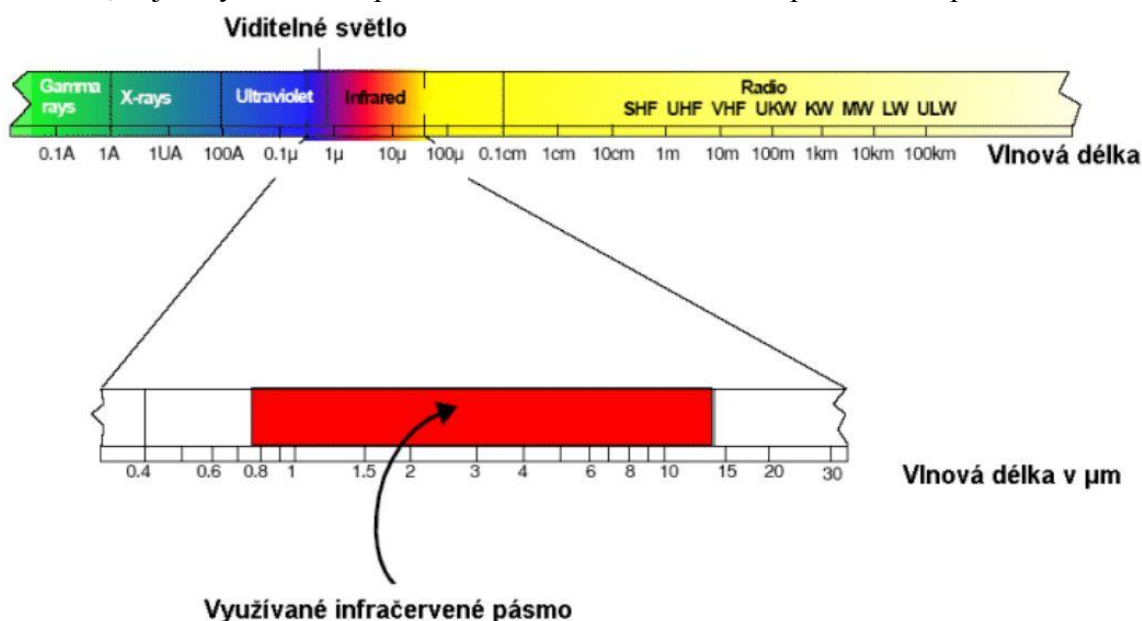
9.3 Měření povrchové teploty tuhých těles

Dotykem tělesa dochází k narušení sdílení tepla a tím k narušení teplotního pole v tělese. Teplota se pak liší od teploty, která by byla bez dotyku snímače. Teplotní spád nad tělesem způsobí vznik teplotního rozdílu v místě dotyku snímače. Zmíněné nejistoty se sčítají. Pro měření povrchové teploty jsou vhodné termoelektrické články. [1]

10 Bezdotykové měření teploty

Bezdotykově se měří pomocí vysílaného elektromagnetického záření, které je přijímané detektorem záření vlnové délky 0,4 μm až 25 μm . V tomto rozsahu je oblast viditelného spektra (0,4 μm až 0,78 μm), blízkého IR spektra (0,78 μm až 1 μm), krátkovlnného IR spektra (2 μm až 3 μm), středovlnného IR spektra (3 μm až 5 μm) a dlouhovlnného IR spektra (5 μm až 25 μm). Tyto rozsahy jsou pro měření teplot $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+10000\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]

Výhodami tohoto měření je velmi malý vliv měřicí techniky, můžeme měřit teplotu rotujících případně pohybujících se předmětů, můžeme měřit z bezpečné vzdálenosti, měření rychlých změn teploty... Mezi nevýhody patří nejistoty vyplývající z neznámé emisivity povrchu tělesa, nejistoty z neznámé hodnoty prostupnosti prostředí mezi čidlem a měřeným předmětem, nejistoty z korekce parazitního odraženého záření z prostředí na předmět. [1]



Obr. 10.1 Elektromagnetické spektrum s rozsahem od 0,7 do 14 μm užívané pro měřicí účely[7]

10.1 Základní veličiny bezdotykového měření

Zářivý tok – značka zářivého toku je Φ , jednotkou je W a jedná se o výkon přenášený zářením

Intenzita vyzařování – značka je M, jednotka $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Jedná se o podíl zářivého toku z elementu povrchu a plochy tohoto povrchu.

Spektrální hustota intenzity vyzařování – značkou je M_λ a jednotkou je $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$. Jde o podíl intenzity vyzařování a intervalu vyzařování.

Zářivost – značka je L a jednotka je $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$. Jedná se o podíl zářivého toku ze zdroje do elementárního prostorového úhlu a elementárního prostorového úhlu.

Zář – značkou je L, jednotkou je $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a jedná se o podíl zářivosti předmětu povrchu a plochy kolmého průmětu tohoto předmětu do roviny, která je kolmá na daný směr.

Spektrální hustota záře – značka je L_λ , jednotka $\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$. Jde o podíl záře a intervalu této záře.

Intenzita ozáření – značkou je E, jednotkou je $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Jedná se o podíl zářivého toku, který dopadá na předmět a plochy tohoto předmětu.

Mezi další veličiny patří pohltivost, propustnost, odraznost, emisivita, spektrální emisivita a směrová emisivita. [1]

10.2 Černé těleso

Toto těleso dokonale pohlcuje záření, které na něj dopadá v jakémkoli úhlu, a spektrální záři. Při každé vlnové délce vyzařuje maximální energii. Zář černého tělesa je ve všech směrech konstantní. Emisivita ε černého tělesa je 1. Pro kalibraci se používají černé zářiče, které mají emisivitu 1 až 0,99. Většinou je realizován dutinovým zářičem s reflexním, difuzním případně difuzně reflexním povrchem. Všechny bezdotykové teploměry se kalibrují pomocí černého zářiče. [1]

10.3 Senzory pro bezdotykové měření teplot

Mezi základní parametry senzorů záření patří

- Integrální citlivost K – ta je určena podílem napětí U na výstupu detektoru a zářivého toku Φ , který dopadá na citlivou plochu detektoru.
- Spektrální citlivost K_λ – určuje závislost citlivosti K na vlnové délce λ .
- Relativní spektrální citlivost S_λ
- NEP (Noise Equivalent Power) – určuje zářivý tok, při němž hodnota výstupního napětí U je rovna efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí.
- Detektivita D – jedná se o převrácenou hodnotu NEP.
- Normovaná detektivita D^* - nezávisí na citlivé ploše detektoru. [1]

10.4 Senzory tepelného záření

Tepelné detektory IR záření

Při absorpci fotonů dochází k oteplování citlivé části senzoru. Energie, která byla pohlcena, se vyhodnotí nepřímo prostřednictvím detektorů teploty. Detektory dělíme na termoelektrické, bolometrické, pyroelektrické.

Termoelektrické detektory – jedná se o sériově řazené články. Články jsou vytvořeny jako kovové pásy s tloušťkou 0,03 mm nebo pásy vytvořené pomocí tenkých vrstev. [1]

Bolometrické detektory – teploty detekují teplotně závislým odporovým materiálem. Mezi používané technologie patří tenkovrstvá technologie. Tyto senzory mohou být uspořádány jako řádkové nebo plošné. [1]

Pyroelektrické detektory – zakládají se na pyroelektrickém jevu (změnou teploty dochází ke změně spontánní polarizace. Tento jev se vyskytuje u pyroelektrik s trvalou polarizací nebo u feroelektrik, u kterých dojde k orientaci domén silným elektrickým polem. Dále se u pyroelektrických materiálů projevuje parazitní piezoelektrický jev. Ten způsobuje např. při otřesu nejistotu měření. Proto se vyrábějí senzory kompenzované druhým senzorem, který je opačně pólován. [1]

Kvantové detektory IR záření

Princip těchto detektorů je založen na jevu, ke kterému dochází při interakci dopadajících fotonů ke generaci páru elektron – díra. K uvolnění elektronu a jeho přechodu na vyšší energetickou hladinu dochází při splnění podmínky, kdy teplota je vyšší než absolutní nula a pokud je energie dopadajících fotonů větší nebo rovna šířce zakázaného pásu polovodiče. [1]

Pokud mluvíme o kvantových detektorech IR záření, tak se jedná o polovodičové detektory. Podle druhu tohoto polovodiče se dělí na intrinsické a extrinsické. Intrinsický je z vlastního polovodiče a využívá změny pohyblivosti nosičů nábojů při dopadu fotonů na polovodičovou vrstvu. Extrinsický se zakládá na PN struktuře, která je z nevlastních polovodičů. Hustota nosičů náboje je určena koncentrací příměsí. [1]

10.5 Pyrometry

Úhrnné pyrometry - tyto přístroje měří teplotu na základě Stefan-Boltzmannova zákona. To znamená, že vyhodnocuje tepelné záření v celém spektru vlnových délek. Tomuto spektru vyhovují pouze detektory tepelné. Na čočku je zářivý tok zaostřen pomocí soustavy čoček, které mají široké spektrum propustnosti. Protože spektrální odrazivost detektoru není ideální, tak v technické realizaci dochází ke spektrálnímu omezení. Pokud toto omezení zanedbáme, můžeme při nulové odrazivosti použít Stefan-Boltzmannův zákon. Pokud nastavíme emisivitu na pyrometru na $\varepsilon = 1$, pak při měření povrchové teploty s emisivitou $\varepsilon < 1$ nebude naměřená teplota odpovídat teplotě, při které byla zář černého tělesa stejná jako zář reálného tělesa. To znamená, že naměřená teplota bude pokaždé menší než teplota skutečná. [1]

Monochromatické pyrometry - jedná se o spektrálně selektivní pyrometr. Pracuje na principu závislosti spektrálního vyzařování tělesa při určité vlnové délce na teplotě. Při nekonečně úzké šířce vlnového pásma je využíván Planckův nebo Wienův zákon. Vždy měříme v úzkém vlnovém pásmu, neboť nelze vyrobit zcela monochromatický pyrometr. [1]

Pásmové pyrometry - jedná se o spektrálně selektivní pyrometry, které měří zář na povrchu tělesa v určitém rozsahu vlnových délek. Šířka pásma je mezi 10 nm a jednotkami mikrometrů. Pásmo je určeno spektrální citlivostí kvantového detektoru, spektrální propustností optiky a propustností optických filtrů, spektrální odrazivostí zrcadel. [1]

Poměrové pyrometry - tyto měřicí zařízení vyhodnocují povrchovou teplotu podle poměru dvou zářů při dvou vlnových délkách. Pyrometr je kalibrován při teplotě černého tělesa, při které je poměr zářů dvou vlnových délek shodný s poměry zářů reálných těles. [1]

Pyrometry s automatickou korekcí emisivity - pyrometry, které umožňují měření teploty bez znalosti emisivity objektu, pracují na principu měření chromatickým pyrometrem. Měření se střídá mezi měřením střídavé záře z měřeného předmětu a záře změřeného předmětu, který byl ozářen laserem s definovanou září. [1]

10.6 Snímání teplotních polí

Tyto systémy můžeme rozdělit na systémy bez rozkladu a s rozkladem obrazu. U vakuových fotodiod, které pracují na základě přímé konverze zářivého toku na obraze, u kterých se tepelný obraz vytvoří optikou na fotokatodě. Pokud ozáříme fotokatodu, tak dojde k fotoemisi elektronů. Tok elektronů je zesílen a elektrickým polem usměrněn na luminiscenční stínítko. Na stínítku se poté vytvoří viditelný obraz. Pro zesílení obrazu se používá mikrokanálová destička MCP (Microchanell Plate). Zesílení se provádí velkým počtem paralelně umístěných fotonásobičů vytvořených v jednotlivých mikrokanálech. Tyto kanálky jsou připojeny ke zdroji vysokého napětí. V kanálcích se emitují elektrony a na vnitřní odporové vrstvě dojde k odrazu a k sekundární emisi. Urychlené elektrony dopadnou na stínítko multianody a na CCD čip je přiveden viditelný obraz. [1]

10.7 Termovize

Systém termovize s opticko-mechanickým rozkladem obrazu je realizován snímáním jednotlivých bodů řízenou optickou osou. Zorné pole termovize se postupně zaměřuje na všechny body objektu. Druhým systémem jsou termovizní kamery s chlazeným a nechlazeným maticovým mikrobolometrickým a kvantovým detektorem. Chlazení je

realizováno Stirlingovým chladičem nebo termoelektrickým chladičem. Signál se zpracovává na čipu multiplexorem a 14bitovým A/D převodníkem. U termovize se používají krátkovlnné (2 μm až 5 μm) a dlouhovlnné (7 μm až 13 μm). [1]

11 Nejistoty přímých měření

Nejistota měření vymezuje oblast, ve které lze s určitou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty veličiny, kterou měříme. Nejistota měření odráží všechny nedokonalosti měření. Jeden z příkladů určení nejistoty je určení z opakovaného měření. U této metody celkovou nejistotu tvoří nejistota typu A a nejistota typu B. Nejistota B je do měření vnášena jinými cestami (např. systematické vlivy). V dalším popisu nejistot se budu zaměřovat na stanovení nejistoty z opakovaných měření. [4]

11.1 Stanovení standardních nejistot při přímém měření

11.1.1 Výpočet standardní nejistoty typu A

Jedná se o statistické zpracování hodnot získaných opakovaným měřením. Počet hodnot musí být minimálně deset. Měření musí být navzájem nezávislá, uskutečněná za stejných podmínek, stejnou osobou. Při splnění těchto podmínek lze vypočítat základní výsledek měření, kterým je aritmetický průměr [4]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11.1)$$

Standardní nejistotu typu A, která se značí $u_A(x)$, se vypočítá pomocí směrodatného aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$ tedy [4]

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (11.2)$$

Tento vztah se dá použít pouze v případě, že máme pro výpočet počet hodnot větší nebo roven deseti. Při počtu hodnot menších než deset a také pokud máme k dispozici průřezový rozptyl, pak můžeme nejistotu typu A vypočítat ze vztahu

$$u_A(x) = \frac{s_{pr}}{\sqrt{n}}, \quad (11.3)$$

kde s_{pr} je známý průřezový rozptyl, n je počet měření. [4]

11.1.2 Výpočet standardní nejistoty typu B

Nejistota typu B se váže na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. K určení zdrojů nejistot slouží předchozí měření s výsledky, zkušenosti a znalosti chování měřeného předmětu, informace k měřicím podmínkám, údaje certifikátů, kalibračních listů a nejistoty referenčních údajů převzaté z různých pramenů. Při určování nejistot se postupuje následujícím postupem. Nejprve se vytipují jednotlivé zdroje nejistot. Poté se určí standardní nejistoty jednotlivých zdrojů pomocí certifikátů, technických dokumentací atd. Následuje posouzení korelace mezi zdroji. Dalším krokem je určení vztahu mezi veličinou X a zdroji. A posledním krokem je použití zákona šíření nejistot pro vypočítání nejistoty $u_B(x)$. [4]

Neznáme-li standardní nejistotu zdroje, můžou nastat následující situace

1. Známé U a k_r

Pokud je v dokumentaci uvedena rozšířená nejistota U a koeficient rozšíření k_r , můžeme stanovit standardní nejistotu vztahem

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_r} \quad (11.4)$$

2. Známe rozpětí normálního rozložení

Známe-li délku intervalu $2U$, ve kterém se může nacházet většina naměřených hodnot a bylo-li při určování intervalu uvažováno normované normální rozdělení, můžeme nejistotu B určit ze vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_p}, \quad (11.5)$$

kde k_p je koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného rozdělení pro pravděpodobnost P.

3. Známe hranice vlivu zdroje

Nemůžeme-li odhadnout jen hranice, kde se hodnoty měřené veličiny nachází působením zdroje, postupujeme následujícím způsobem:

- Odhadneme hodnotu změny $\pm z_{j\max}$ od nominální hodnoty, jejíž překročení je málo pravděpodobné
- Posoudíme rozdělení pravděpodobnosti
- Standardní nejistotu B vypočítáme z vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{z_{j\max}}{k}, \quad (11.6)$$

kde k je hodnota ke zvolenému rozložení pravděpodobnosti podle Obr. 11.1 .

Rozdělení	$z_{\max}$	k	Rozdělení	$z_{\max}$	k
normální (Gaussovo) 	a	3	rovnoměrné - pravoúhlé 	a	$\sqrt{3}$ 1,73
trojúhelníkové (Simpsonovo) 	a	2	bimodální (trojúhelníkové) 	a	$\sqrt{6}$ 2,45
lichoběžníkové 	a	2,32 při $b=a/3$	bimodální (Diracovo) 	a	1
	a	2,19 při $b=a/2$			
	a	2,04 při $b=2a/3$			

Obr. 11.1 Rozdělení pravděpodobnosti a koeficienty k [4]

Normální rozdělení se použije v případě, kdy se častěji mohou vyskytovat malé odchylky od jmenovité hodnoty. S rostoucí velikostí odchylek jejich pravděpodobnost klesá.

Rovnoměrné rozdělení použijeme v případě, ve kterém je pravděpodobnost výskytu odchylky v celém intervalu stejná. Využívá se nejčastěji.

Trojúhelníkové rozdělení použijeme k modelování situace v případech podobných normálnímu rozdělení.

Bimodální rozdělení se používá k aproximaci průběhu nejistot.

4. Použití číslicového měřicího přístroje

Zdrojem nejistoty u měření číslicovými přístroji je rozlišitelnost poslední platné číslice. I v případě neměnnosti při opakovaném měření neznamena, že měříme s nulovou nejistotou. Při odhadu nejistoty se použije rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti v intervalu, který je vymezen rozlišovací schopností přístroje. Platí

$$u_B(z_j) = \frac{\delta(z_j)}{2\sqrt{3}} = 0,29\delta(z_j) \quad (11.7)$$

5. Použití analogového přístroje se stupnicí

Schopnost odečíst hodnotu z analogového přístroje je dána hodnotou dílku stupnice. Potom nejistotu způsobenou čtením hodnoty vypočítáme podle vzorce (11.7). Při návrhu analogové stupnice se předpokládá, že střední stupnice má dílek dlouhý asi 1 mm. Přesnost čtení pouhým okem je $\pm 0,5$ dílku u laiků a $\pm 0,3$ až $\pm 0,25$ dílku u zručné obsluhy. Jemné stupnice mívají dílek dlouhý 0,5 mm.

6. Přítomnost hystereze

Při výpočtu nejistoty způsobené hysterezí se postupuje podobným způsobem jako při použití analogových přístrojů. [4]

11.1.3 Standardní kombinovaná nejistota

Pro vyjádření nejistoty A i B jedním číslem potřebujeme kombinovanou nejistotu u_c . Tu určíme pomocí vztahu [4]

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (11.8)$$

11.1.4 Rozšířená nejistota

Výsledek ve tvaru $y \pm u_c$ určuje skutečnou hodnotu s pravděpodobností 60 %. Tato pravděpodobnost nestačí, a proto se zavádí rozšířená nejistota U. Ta se vypočítá $U = k_r \cdot u_c$, kde k_r je koeficient rozšíření. Hodnota k_r závisí na rozdělení pravděpodobnosti. Často se používá 95 % pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty. U normálního rozložení odpovídá pro 95 % pravděpodobnost hodnota $k_r = 2$. Tato hodnota se v praxi používá nejčastěji. [4]

12 Praktická část

12.1 Programovací prostředí

Na začátku bylo potřeba vybrat programovací jazyk pro vytvoření programu. Byl vybrán Visual Basic, který je součástí programu MS Excel.

12.2 Program pro zaznamenávání teplot a statistické zhodnocení

Vytvořený program obsahuje jednotlivé prvky pro zadávání parametrů pro konkrétní měření. Hlavní formulář je zobrazen na Obr. 12.1 .

Obr. 12.1 Hlavní formulář programu

Před spuštěním měření pomocí tlačítka „Měření“ je potřeba vyplnit všechny položky hlavního formuláře. Položka „Zadej počet opakování“ slouží pro určení, kolikrát proběhne měření jedné teploty. Do položky „Zadej rozhraní COM“ se zadává číslo rozhraní, pomocí kterého je připojen teploměr k počítači. V položce „Nastavení prodlevy při měření v sekundách“ se zadává hodnota intervalu mezi opakovaným zaznamenáváním teploty. Pomocí položky „Typ teploměru“ se z rozbalovacího seznamu (viz Obr. 12.2) vybírá teploměr, který je připojen k počítači pomocí rozhraní COM zadaného v položce „Zadej rozhraní COM“. Ze seznamu položky „Nastavení typu rozdělení“ (viz Obr. 12.3) se vybírá typ rozdělení (viz Obr. 11.1) pro výpočet nejistoty typu B. V položce „Typ čidla“ (viz Obr. 12.4) se vybírá ze seznamu čidlo připojené k teploměru zadanému v položce „Typ teploměru“. Poslední položkou pro zadávání je „Koeficient rozšíření“. Ze seznamu (viz Obr. 12.5) se vybírá koeficient pro výpočet rozšířené nejistoty U.

Typ teploměru

GMH 3710	▼
GMH 3710	
GMH 3210	
GMH 3250	

Obr. 12.2 Seznam pro výběr typu teploměru

Nastavení typu rozdělení

normální (Gaussovo)	▼
normální (Gaussovo)	
rovnoměrné - pravouhlé	
trojúhelníkové (Simpsonovo)	
bimodální (trojúhelníkové)	
bimodální (Diracovo)	

Obr. 12.3 Seznam pro výběr typu rozdělení

Typ čidla

1/10 DIN	▼
1/10 DIN	
1/3 DIN	
typ K	
typ J	
typ N	
typ S	
typ T	

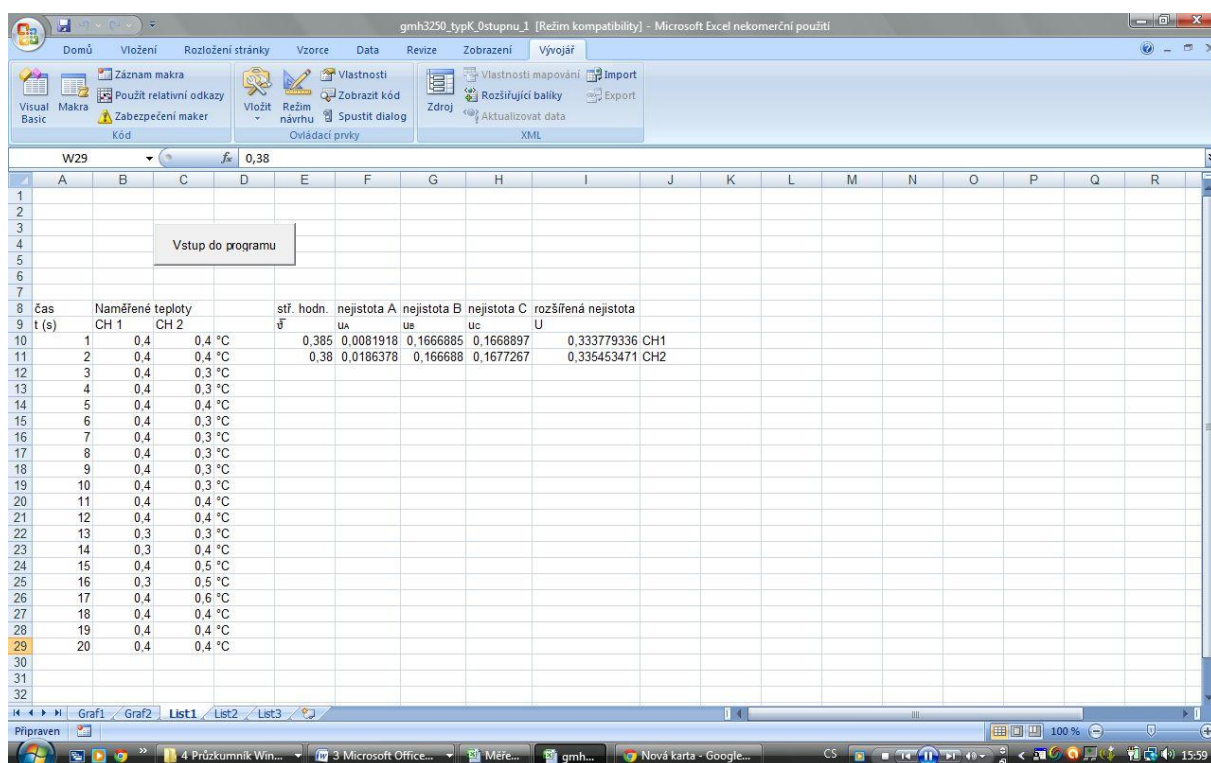
Obr. 12.4 Seznam pro výběr typu čidla

Koeficient rozšířené nejistoty

2	(95% pro normální rozdělení)	▼
2	(95% pro normální rozdělení)	
3	(99% pro normální rozdělení)	
1,73	(rovnoměrné rozdělení)	
2,45	(trojúhelníkové Simpsonovo rozdělení)	
1,41	(bimodální trojúhelníkové rozdělení)	
1	(bimodální Diracovo rozdělení)	

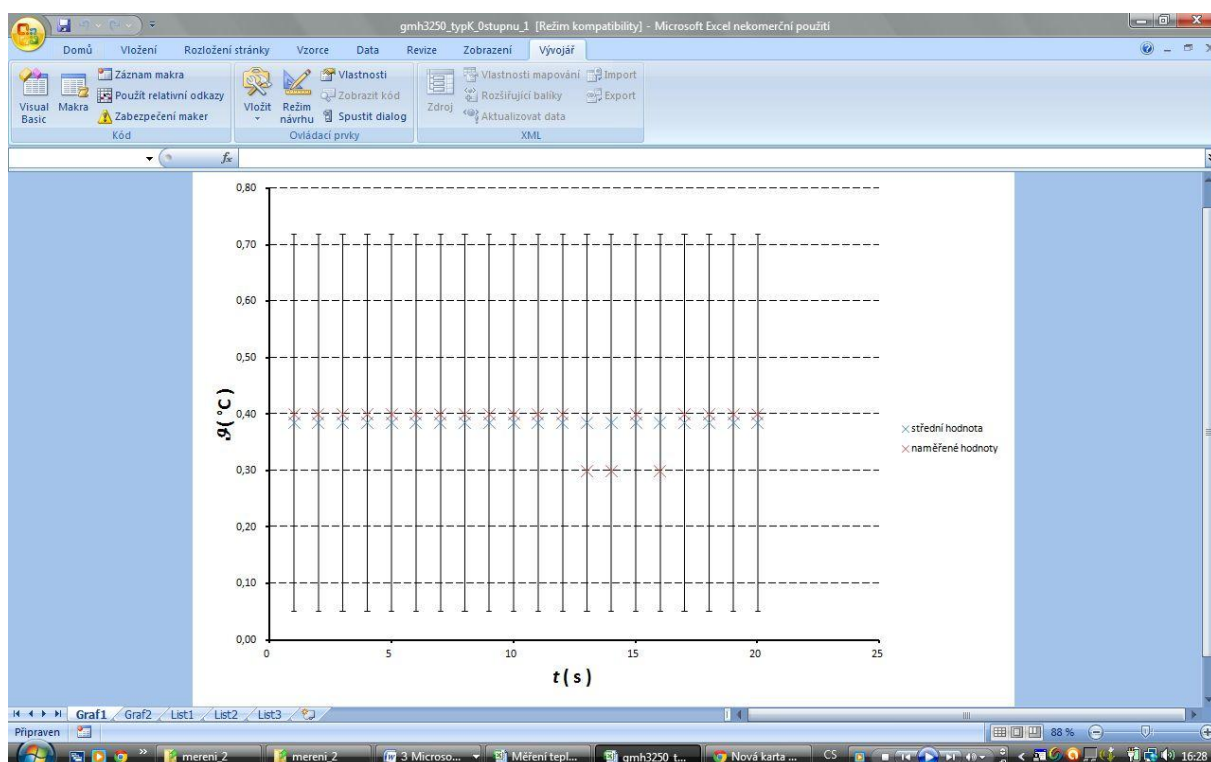
Obr. 12.5 Seznam pro výběr koeficientu rozšířené nejistoty

Pro spuštění měření slouží tlačítko „Měření“. Po spuštění měření dojde k záznamu naměřených hodnoty do MS Excel. Příklad záznamu je na Obr. 12.6 . Z těchto hodnot se automaticky vypočítá střední hodnota, nejistota typu A, B, C a rozšířená nejistota U.



Obr. 12.6 Příklad záznamu hodnot v MS Excel

Poslední tlačítka „Vytvořit graf CH1“ a „Vytvořit graf CH2“ slouží pro vytvoření grafu z naměřených hodnot prvního případně druhého kanálu teploměru. Příklad takto vytvořeného grafu je na Obr. 12.7 .



Obr. 12.7 Příklad vykreslení grafu v MS Excel

12.3 Zpracování naměřených dat

Úkolem praktické části bylo změřit teploty v rozsahu od -30°C až 200°C po 10°C a pro každou teplotu zaznamenat 20 hodnot. Pro měření byly použity 2 teploměry: GMH 3710 a GMH 3250. K nim byly připojeny čidla Pt 100 o dvou přesnostech a dvě varianty termočlánu typu K.

Teploty v rozmezí -30°C až 20°C byly měřeny v nemrznoucí kapalině a v rozmezí 20°C až 200°C v oleji. Stabilita teploty byla zajištěna termostatem. Jednotlivé čidla byly připevněny v malých vzdálenostech od sebe, aby byla zajištěna stejná teplota pro všechny čidla.

Opakovaným měřením byly získány hodnoty uvedené v příloženém CD. Z těchto hodnot byly automaticky pomocí vytvořeného programu vypočítány jednotlivé nejistoty měření. V následujících rovnicích je uveden příklad těchto výpočtu pro platinové čidlo Pt 100 DIN 1/10 a teplotu 100°C .

Střední hodnotu jsem vypočítal ze vztahu (11.1)

$$\bar{\vartheta} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} \vartheta_i = 99,9275^{\circ}\text{C}.$$

Standardní nejistotu typu A jsem vypočítal ze vztahu (11.2)

$$u_A(\vartheta) = \sqrt{\frac{1}{20(20-1)} \sum_{i=1}^{20} (\vartheta_i - \bar{\vartheta})^2} = 0,0009934^{\circ}\text{C}.$$

Na standardní nejistotě typu B se podílí chyba měřidla, ve které je zahrnuta také chyba čidla. Pro tuto chybu se předpokládá rovnoměrné rozložení (výskyt jakékoli hodnoty v intervalu omezeného chybou je stejně pravděpodobný). Podle vztahu (11.6) jsem dostal

$$u_B(\vartheta) = \frac{z_{jmax}}{k} = \frac{0,07996375}{3} = 0,0266546^{\circ}\text{C},$$

kde $z_{jmax} = 0,03 + (0,0005 \cdot \bar{\vartheta}) = 0,03 + (0,0005 \cdot 99,9275) = 0,07996375$ a jedná se o chybu čidla danou výrobcem.

Protože se na standardní nejistotě podílí pouze tato chyba, bude výsledná standardní nejistota typu B také $0,0266546^{\circ}\text{C}$.

Kombinovanou standardní nejistotu získám ze vztahu (11.8)

$$u_C(\vartheta) = \sqrt{u_A^2(\vartheta) + u_B^2(\vartheta)} = 0,0266731^{\circ}\text{C}.$$

Výslednou nejistotu je třeba ještě zaokrouhlit na $u_C(\vartheta)=0,03^{\circ}\text{C}$ tzn., že výsledek bude

$$\vartheta = (99,93 \pm 0,03)^{\circ}\text{C}.$$

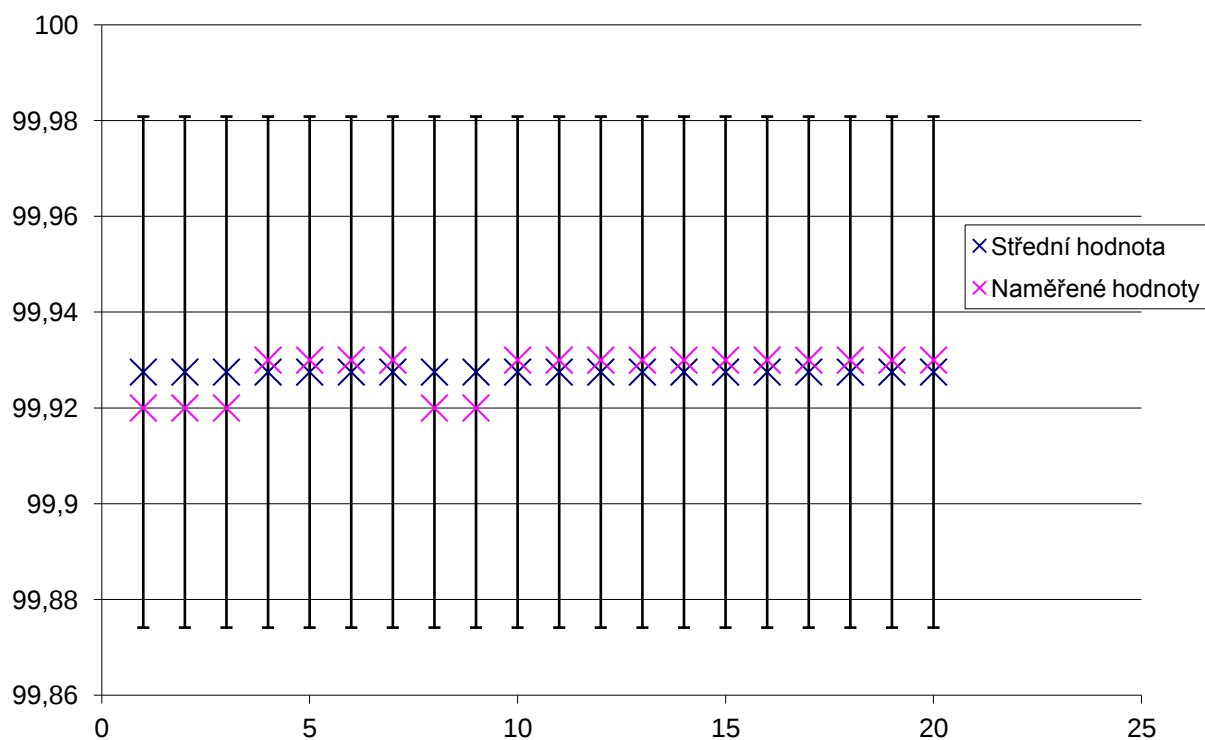
Při tomto použití definuje standardní nejistota interval, ve kterém se nachází 66 až 68% všech naměřených hodnot. Pro zvýšení pravděpodobnosti je třeba výslednou kombinovanou nejistotu vynásobit koeficientem. Pro pravděpodobnost 95% je tento koeficient $k_r=2$. V takovém případě bude nejistota

$$U(\vartheta) = u_C \cdot k_r = 0,0266731 \cdot 2 = 0,053346177 \cong 0,05^{\circ}\text{C}.$$

Po této úpravě je výsledek získaný opakovaným měřením teploty

$$\vartheta = (99,93 \pm 0,05)^{\circ}\text{C}.$$

Odchyly naměřených hodnot od střední hodnoty pro platinové čidlo DIN 1/10 a teplotu 100°C jsou uvedeny v následujícím grafu.



Obr. 12.8 Naměřené hodnoty pro platinové čidlo DIN 1/10 a teploty 100°C

Výsledky výpočtů nejistot pro ostatní typy čidel jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 12.1 Vypočítané hodnoty nejistot teploměru GMH 3710 s čidlem Pt 100 DIN 1/10

	teplota na termostatu	stř. hodn.	nejistota A	nejistota B	nejistota C	rozšířená nejistota
		$\bar{\vartheta}$	u_A	u_B	u_C	U
GMH3710 DIN 1/10 nemrznoucí kapalina	-30	-25,946	0,0022331	0,0056758	0,0060993	0,012198521
	-20	-18,089	0,0115	0,0069853	0,0134552	0,026910497
	-10	-8,597	0,0167348	0,0085672	0,0188002	0,037600477
	0	0,7565	0,0015	0,0101261	0,0102366	0,020473159
	10	10,822	0,0035244	0,0118037	0,0123186	0,024637175
	20	20,268	0,0053114	0,013378	0,0143938	0,028787595
GMH3710 DIN 1/10 olej	20	21,121	0,0425373	0,0135202	0,0446342	0,089268493
	30	31,097	0,0261081	0,0151828	0,0302018	0,060403643
	40	39,895	0,0298373	0,0166492	0,0341681	0,068336166
	50	49,9275	0,0322969	0,0183213	0,0371317	0,074263324
	60	60,114	0,0070859	0,020019	0,0212361	0,04247215
	70	69,962	0,002	0,0216603	0,0217525	0,043504944
	80	79,925	0,0071635	0,0233208	0,0243963	0,048792502
	90	89,956	0,008059	0,0249927	0,0262599	0,052519739
	100	99,9275	0,0009934	0,0266546	0,0266731	0,053346177
	110	110,087	0,0019568	0,0283478	0,0284152	0,05683041
	120	119,998	0,002772	0,0299997	0,0301275	0,060254932
	130	130,021	0,0008811	0,0316701	0,0316823	0,063364675
	140	140,049	0,0014327	0,0333415	0,0333723	0,066744535
	150	149,965	0,0016975	0,0349941	0,0350352	0,070070463
	160	159,979	0,0008192	0,0366631	0,0366722	0,073344468
	170	169,957	0,0010513	0,0383262	0,0383406	0,076681166
	180	179,89	0,0029447	0,0399816	0,0400899	0,08017975
	190	189,967	0,0010942	0,0416611	0,0416755	0,083350902
	200	199,921	0,0016975	0,0433201	0,0433533	0,086706659

Tab. 12.2 Vypočítané hodnoty nejistot teploměru GMH 3710 s čidlem Pt 100 DIN 1/3

	teplota na termostatu	stř. hodn.	nejistota A	nejistota B	nejistota C	rozšířená nejistota
		$\bar{\vartheta}$	u_A	u_B	u_C	U
GMH3710 DIN 1/3 nemrznoucí kapalina	-30	-27,671	0,0020391	0,017653	0,0177705	0,035540953
	-20	-19,103	0,0042364	0,022508	0,0229035	0,045807027
	-10	-9,24	0,0045883	0,028097	0,0284695	0,056939012
	0	0,462	0,0061387	0,033595	0,0341514	0,068302773
	10	10,3895	0,0197947	0,039221	0,0439328	0,08786566
	20	20,081	0,0078439	0,044713	0,0453954	0,090790747
GM3710 DIN 1/3 olej	20	20,907	0,0175484	0,045181	0,0484689	0,096937856
	30	30,9955	0,0299691	0,050897	0,0590652	0,118130354
	40	39,7795	0,0156856	0,055875	0,058035	0,116069991
	50	49,8135	0,0223286	0,061561	0,0654853	0,130970538
	60	59,8485	0,0016662	0,067247	0,0672681	0,134536245
	70	70,026	0,024153	0,073015	0,0769059	0,153811829
	80	79,8425	0,0126048	0,078577	0,079582	0,159163966
	90	89,837	0,0168132	0,084241	0,0859024	0,171804827
	100	99,8095	0,0011413	0,089892	0,0898993	0,17979859
	110	109,97	0,001026	0,09565	0,0956552	0,191310338
	120	119,826	0,0023396	0,101235	0,1012618	0,202523529
	130	129,897	0,0012773	0,106942	0,1069493	0,213898523
	140	139,821	0,0069925	0,112565	0,1127822	0,225564416
	150	149,724	0,0046679	0,118177	0,1182691	0,236538175
	160	159,778	0,0021613	0,123874	0,1238928	0,247785539
	170	169,671	0,0060219	0,12948	0,1296202	0,259240383
	180	179,655	0,0032827	0,135138	0,1351774	0,270354832
	190	189,691	0,0025624	0,140825	0,1408479	0,281695853
	200	199,595	0,0066283	0,146437	0,1465868	0,293173635

Tab. 12.3 Vypočítané hodnoty nejistot teploměru GMH 3250 s prvním termočláňkovým čidlem typu K

	teplota na termostatu	stř. hodn.	nejistota A	nejistota B	nejistota C	rozšířená nejistota
		$\bar{t}$	u_A	u_B	u_C	U
GMH3250 typ K 1 nemrznoucí kapalina	-30	-29,195	0,005	0,163731	0,1638068	0,327613654
	-20	-19,58	0,0137649	0,164692	0,1652662	0,330532471
	-10	-9,4	4,08E-16	0,16571	0,16571	0,33142
	0	0,385	0,0081918	0,166689	0,1668897	0,333779336
	10	10,33	0,0179179	0,167683	0,1686376	0,337275206
	20	20,3	8,15E-16	0,16868	0,16868	0,33736
GMH3250 typ K 1 olej	20	21,205	0,0393867	0,168771	0,1733055	0,346611007
	30	31,355	0,0400493	0,169786	0,174445	0,348890031
	40	40,02	0,0212751	0,170652	0,1719731	0,343946139
	50	49,99	0,0228266	0,171649	0,1731601	0,346320267
	60	60,2	4,89E-15	0,17267	0,17267	0,34534
	70	70,36	0,0265568	0,173686	0,1757046	0,351409105
	80	80,28	0,0137649	0,174678	0,1752195	0,350439024
	90	90,175	0,0203586	0,175668	0,1768433	0,353686552
	100	100,2	6,52E-15	0,17667	0,17667	0,35334
	110	110,2	3,26E-15	0,17767	0,17767	0,35534
	120	120,28	0,0091766	0,178678	0,1789135	0,357826987
	130	130,395	0,005	0,17969	0,1797591	0,359518102
	140	140,2	0	0,18067	0,18067	0,36134
	150	150,075	0,009934	0,181658	0,1819289	0,363857838
	160	159,91	0,01	0,182641	0,1829146	0,365829112
	170	169,765	0,0109424	0,183627	0,1839522	0,367904489
	180	179,6	1,30E-14	0,18461	0,18461	0,36922
	190	189,51	0,01	0,185601	0,1858702	0,3717404
	200	199,275	0,009934	0,186578	0,1868418	0,373683544

Tab. 12.4 Vypočítané hodnoty nejistot teploměru GMH 3250 s druhým termočláňkovým čidlem typu K

	teplota na termostatu	stř. hodn.	nejistota A	nejistota B	nejistota C	rozšířená nejistota
		$\bar{y}$	u_A	u_B	u_C	U
GMH3250 typ K 2 nemrznoucí kapalina	-30	-26,115	0,0371873	0,164039	0,1682008	0,33640169
	-20	-19,545	0,0114133	0,164696	0,1650905	0,330180986
	-10	-9,3	0,0162221	0,16572	0,1665121	0,333024181
	0	0,38	0,0186378	0,166688	0,1677267	0,335453471
	10	10,485	0,0488149	0,167699	0,1746588	0,349317515
	20	20,35	0,0114708	0,168685	0,1690746	0,338149128
GMH3250 typ K 2 olej	20	21,29	0,0239517	0,168779	0,17047	0,340940083
	30	31,325	0,0315186	0,169783	0,1726833	0,345366578
	40	40,18	0,0091766	0,170668	0,1709145	0,341829061
	50	50,32	0,028654	0,171682	0,1740568	0,348113555
	60	60,4	0	0,17269	0,17269	0,34538
	70	70,785	0,0243602	0,173729	0,1754281	0,350856169
	80	80,715	0,0081918	0,174722	0,1749134	0,349826859
	90	90,765	0,0166623	0,175727	0,1765147	0,353029372
	100	100,84	0,011239	0,176734	0,177091	0,354182001
	110	111,1	9,78E-15	0,17776	0,17776	0,35552
	120	121,26	0,011239	0,178776	0,1791289	0,358257862
	130	131,35	0,0114708	0,179785	0,1801506	0,360301125
	140	141,29	0,0068825	0,180779	0,18091	0,361819929
	150	151,285	0,0081918	0,181779	0,181963	0,363925972
	160	161,335	0,0109424	0,182784	0,1831107	0,366221489
	170	171,225	0,009934	0,183773	0,1840408	0,368081599
	180	181,2	1,30E-14	0,18477	0,18477	0,36954
	190	191,16	0,011239	0,185766	0,1861057	0,372211351
	200	201,105	0,0184605	0,186761	0,1876707	0,375341305

Závěr

V práci jsou popsány jednotlivé metody měření teplot a výpočet jejich nejistot. Součástí práce je také programové prostředí pro záznam teplot a výpočet nejistot, které umožňuje komunikaci USB kabelem s teploměry Greissinger. Program umožňuje zadání jednotlivých parametrů potřebných pro výpočet nejistot typu A, B, C. Následně je možné vytvoření grafu z naměřených hodnot.

Z naměřených hodnot je vidět, že nejmenší rozšířenou nejistotu měl teploměr s čidlem Pt 100 DIN 1/10. Hodnoty rozšířené nejistoty se pohybovaly v rozmezí 0,01 °C až 0,09 °C. Následoval teploměr s čidlem Pt 100 DIN 1/3, u kterého se rozšířená nejistota pohybovala v rozmezí 0,04 °C až 0,29 °C v závislosti na nastavené teplotě na termostatu. Nejméně přesné byly termočlánky typu K. První měl nejistotu 0,33 °C až 0,37 °C a druhý 0,34 °C až 0,38 °C. Při měření kladných teplot v oleji docházelo při teplotách od 20 °C do 70 °C k většímu rozptylu teploty nastavené na termostatu. Při vyšších teplotách byl olej více tekutý a tak docházelo k lepšímu stabilizování teploty oleje a nastavená teplota byla stabilnější. Při měření záporných teplot v nemrznoucí kapalině byl rozptyl nastavené teploty velmi malý. U záporných hodnot okolo -20 °C až -30 °C docházelo ke stabilní odchylce, všech naměřených hodnot pro danou teplotu, od nastavené teploty termostatu. Může to být způsobené čidlem, u kterého daná přesnost neplatí pro záporné teploty. K této chybě docházelo u platinových čidel a u jednoho termočlánku. U druhého termočlánku byla dána přesnost až do -50°C. U tohoto termočlánku docházelo jen k malým odchylkám od nastavené teploty, která je dána kolísáním nastavené teploty a také tím, že neznáme přesnost teploměru v termostatu.

Seznam použité literatury

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty : senzory a měřicí obvody*. 1. vydání. Praha : BEN, 2005. 230s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] ŠPRINGL, Vít. *Hw.cz* [online]. 20. Květen 2004 - 0:00 [cit. 2010-12-14]. Měření teploty - kovové odporové senzory teploty. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1095-Mereni-teploty---kovove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- [3] ŠPRINGL, Vít. *Hw.cz* [online]. 19. Srpen 2004 - 0:00 [cit. 2010-12-14]. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1141-Mereni-teploty---polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>>.
- [4] PALENČÁR, Rudolf; VDOLEČEK, František; HALAJ, Martin. Nejistoty v měření II : nejistoty přímých měření. *AUTOMA : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2001, č. 10, [cit. 2010-12-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf>>.
- [5] ČSN EN 50446. *Sestavy přímých termočlánků s kovovou nebo keramickou ochrannou trubicí a příslušenstvím*. Praha : Český normalizační institut, 2007. 20 s.
- [6] ČSN EN 60751. *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové snímače teploty*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 32 s.
- [7] Bezkontaktní měření teplot a oteplení. In: *Ústav elektroenergetiky VUT Brno* [online]. [cit. 2012-05-26]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Diagnostika/Files/01_Bezkontaktni_mereni_teplo_a_otepleni.pdf
- [8] SENSIT S.R.O. *Odporové snímače teploty: Příručka pro konstruktéry, projektanty a realizátory měřicí a regulační techniky*. 7. vydání. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 2011. Dostupné z: http://www.sensit.cz/ke-stazeni/soubory/Prirucka_CZ_A5_2011_12.pdf