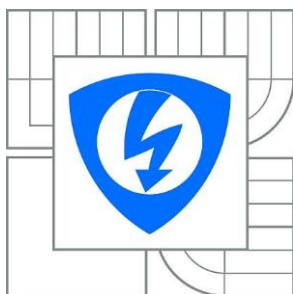


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

KOMPARACE PŘESNOSTI RŮZNÝCH TEPLOTNÍCH ČIDEL

COMPARISON OF DIFFERENT TEMPERATURE SENSORS ACCURACY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

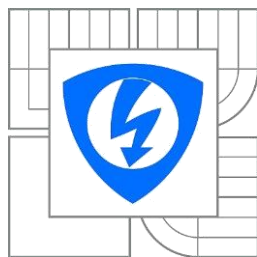
RADEK SZOTKOWSKI

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních
technologií**

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Radek Szotkowski
Ročník: 3

ID: 146105
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Komparace přesnosti různých teplotních čidel

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte fyzikální podstaty principů a jevů používajících se ke stanovení teploty objektů. Zpracujte přehled požadavků kladených na jednotlivé odporové teplotní senzory a termočlánky podle příslušných norem, charakterizujte jejich vlastnosti, možnosti provedení a vhodnost použití v různých prostředích. Seznamte se s metodickými způsoby a postupy vyjadřování nejistot měření.

Sestavte laboratorní pracoviště umožňující dlouhodobé sledování teploty v oblasti běžně používaných kladných i záporných hodnot teplot. Realizujte měření teploty v několika teplotních bodech s využitím různých teploměrů a teplotních senzorů, včetně etalonového teploměru, a vyhodnoťte realizovaná měření z pohledu přesnosti a nejistoty měření. Na základě použitých metodických postupů a dosažených výsledků měření vytvořte zadání laboratorní úlohy využitelné v předmětech orientovaných na diagnostické metody v elektrotechnice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 4.6.2015

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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

Bakalářská práce se zabývá přesným měřením teploty za využití různých snímačů teploty a různých teploměrů. Jsou prostudovány odporové senzory teploty, termoelektrické články a nejistoty měření. V praktické části jsou matematicky i graficky vyjádřeny výsledky při měření ve třech teplotních bodech. Důraz je v práci kladen na přesnosti jednotlivých snímačů teplot. Práce taktéž obsahuje laboratorní úlohu vytvořenou pro předměty zabývající se diagnostikou.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kovové odporové senzory teploty, polovodičové odporové senzory teploty, termoelektrické články, nejistoty měření

ABSTRACT

The Bachelor thesis deals with precise temperature measurement using various temperature sensors thermometers. Resistive temperature sensors, thermocouples and measurement uncertainty are studied. In practical part are mathematically and graphically presented results of measuring in three temperature points. Emphasis is placed on the accuracy of individual temperature sensors. The thesis also includes a laboratory task created for subject matters dealing with diagnosis.

KEY WORDS

Metal resistive temperature sensors, semiconductor resistive temperature sensors, thermoelectric couples, measurement uncertainty

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SZOTKOWSKI, R. *Komparace přesnosti různých teplotních čidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2015. 44 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „**Komparace přesnoti různých teplotních čidel**“ 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 bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 4. 6. 2015

.....
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 mé bakalářské práce

V Brně dne 4. 6. 2015

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Úvod	1
1 Odporové senzory teploty	2
2 Kovové odporové senzory teploty.....	2
2.1 Odporové platinové snímače teploty	3
2.2 Odporové niklové snímače teploty	5
2.3 Odporové měděné snímače teploty.....	6
2.4 Konstrukce odporových kovových snímačů teploty.....	6
3 Polovodičové odporové senzory teploty	7
3.1 Termistory	8
3.2 Negistory (NTC termistory)	9
3.3 Pozistory (PTC termistory).....	9
3.4 Monokrystalické senzory.....	10
4 Termoelektrické články	10
4.1 Seebeckův jev	10
4.2 Typy termoelektrických článků.....	11
4.2.1 Konstrukce a použití termočlánků.....	13
5 Nejistoty měření	13
5.1 Standardní nejistota typu A.....	14
5.2 Standardní nejistota typu B.....	14
5.3 Kombinovaná standardní nejistota	15
5.4 Rozšířená standardní nejistota U	15
6 Praktická část.....	16
6.1 Měřicí pracoviště.....	16
6.1.1 Etalonový teploměr MILLIK	16
6.1.2 Teplotní lázeň	18
6.1.3 Agilent 34972A	19
6.1.4 GMH 3710.....	21
6.2 Postup měření	22
6.3 Seznam měřených čidel při použití daných přístrojů	23
6.4 Naměřené hodnoty	23
6.4.1 Naměřené hodnoty při 20°C.....	23
6.4.2 Naměřené hodnoty při 50°C.....	26
6.4.3 Naměřené hodnoty při 70°C.....	28
6.5. Vypočtené hodnoty	29

6.5.1 Pro $\vartheta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	29
6.6. Tabulky vypočtených hodnot	32
6.7 Grafy závislosti tolerance čidel při měřených teplotách	33
6.8 Vyhodnocení výsledků	35
7 Laboratorní úloha	36
8 Závěr	37
9 Seznam použité literatury	38
Zkratky, symboly, přílohy	41
Seznam příloh	42
A Technické údaje MILLIK[22]	42
B Technické údaje Agilent 34972A[29]	43
C Technické údaje GMH 3710[28]	44

Seznam obrázků

Obrázek 1: Teplotní závislost odporových kovových snímačů teploty[1].....	3
Obrázek 2: Závislost odporu čidla Pt 100 na teplotě	4
Obrázek 3: Dovolené tolerance průmyslových Pt měřících odporů[1].....	5
Obrázek 4: Závislost tolerance niklových odporových senzorů na teplotě dle ČSN EN 60751(DIN 43760)[10]	6
Obrázek 5: Vinuté čidlo[4].....	7
Obrázek 6: Vrstvové čidlo[4].....	7
Obrázek 7: Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory[19].....	8
Obrázek 8: Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory[19].....	8
Obrázek 9: Teplotní závislost odporu pozistoru na teplotě[20]	10
Obrázek 10: Seebeckův jev[21]	11
Obrázek 11: Princip termoelektrického jevu[26]	11
Obrázek 12: Charakteristiky vybraných termoelektrických článků[1]	12
Obrázek 13: Vnitřní provedení termočlánku[27]	13
Obrázek 14: Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení[24]	14
Obrázek 15: rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti[24].....	15
Obrázek 16: Přístroj MILLIK - přední panel[22].....	16
Obrázek 17: Přístroj MILLIK - zadní panel[22]	17
Obrázek 18: Základní menu programu Cal Notepad[22]	17
Obrázek 19: Log okno programu Cal Notepad[22]	18
Obrázek 20: Závěsný termostat HUBER CC-E Pilot ONE[23].....	19
Obrázek 21: Modul Agilent 34902A multiplexer	19
Obrázek 22: Část kódu programu Agilent VEE	20
Obrázek 23: Základní menu programu Agilent VEE.....	21
Obrázek 24: Teploměr Greisinger GMH 3710	21
Obrázek 25: Měřicí pracoviště (Agilent 34972A a MILLIK).....	22
Obrázek 26: Měřicí pracoviště (teplotní lázeň s čidly)	22
Obrázek 27: Závislost tolerančních tříd platinových čidel na referenční teplotě (20 °C, 50 °C, 70 °C): a)MILLIKem b)GMH 3710.....	33
Obrázek 28: Závislost tolerančních tříd termočlánků na referenční teplotě (20 °C, 50 °C, 70 °C): a)typ K měřenýMILLIKem b)typ J měřený Agilentem 34972A	34
Obrázek 29: Závislost tolerančních tříd niklových čidel na referenční teplotě (20 °C, 50 °C, 70 °C) měřených Agilentem 34972A: a)Ni1000/6180 b)Ni1000/6180/A	35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Nejpoužívanější materiály pro kovové snímače teploty podle normy ČSN EN 60751	3
Tabulka 2: Toleranční třídy platinových čidel teploty podle normy ČSN EN 60751.....	4
Tabulka 3: Toleranční třídy niklových čidel teploty	5
Tabulka 4: Typy termoelektrických článků[25]	12
Tabulka 5: Třídy přesnosti pro termočlánekové snímače teploty[26]	13
Tabulka 6: Seznam čidel	23
Tabulka 7: Tabulka naměřených hodnot pro termočlánek typu J	23
Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180	23
Tabulka 9: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180/A	24
Tabulka 10: Tabulka naměřených hodnot pro PT100/3850 MILLIKem.....	24
Tabulka 11: Tabulka naměřených hodnot pro Termočlánek typu K MILLIKem	24
Tabulka 12: Tabulka naměřených hodnot PT100/3850 GMH 3710.....	25
Tabulka 13: Tabulka naměřených hodnot PT100/3850A Agilentem 34972A	25
Tabulka 14: Tabulka naměřených hodnot PT100/3850 Agilentem 34972A	25
Tabulka 15: Tabulka naměřených hodnot pro termočlánek J	26
Tabulka 16: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180	26
Tabulka 17: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180/A	26
Tabulka 18: Tabulka naměřených hodnot pro PT100/3850 MILLIKem	27
Tabulka 19: Tabulka naměřených hodnot pro Termočlánek typu K MILLIKem.....	27
Tabulka 20: Tabulka naměřených hodnot PT100 GMH 3710	27
Tabulka 21: Tabulka naměřených hodnot pro termočlánek J	28
Tabulka 22: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180	28
Tabulka 23: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180/A	28
Tabulka 24: Tabulka naměřených hodnot pro PT100/3850 MILLIKem	29
Tabulka 25: Tabulka naměřených hodnot pro Termočlánek typu K MILLIKem.....	29
Tabulka 26: Tabulka naměřených hodnot PT100 GMH 3710	29
Tabulka 27: Tabulky vypočtených hodnot.....	32

Úvod

Teplota patří mezi stavové veličiny, určující stav termodynamické rovnováhy. Určuje tedy stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán nezávisí na čase. Měření teploty patří mezi nepřímé měření, jelikož se dá měřit pouze pomocí jiných fyzikálních veličin.[1]

Teplota je jednou z nejdůležitějších termodynamických vlastností, které určují stav hmoty a objevuje se v mnoha fyzikálních zákonech. Neexistuje mnoho vlastností látek, které nejsou teplotně závislé. Po čase, váze a délce je teplota nejčastěji měřenou veličinou.[3]

V současné době se klade čím dál větší důraz na kvalitu technologie čidel za menší náklady. S kvalitnější technologií souvisí i přesnost jednotlivých produktů. Je tedy nutné zabývat se a porozumět principům čidel k pochopení celé problematiky. Cílem této práce je vyhodnotit měření různých čidel teploty s jinou třídou přesnosti pomocí třech teploměrů (MILLIK, Agilent 34972A a GMH3710). Pro praktickou část byly pro měření zvoleny kladné teploty 20 °C, 50 °C, 70 °C.

1 Odporové senzory teploty

Odporové senzory teploty využívají teplotní závislosti elektrického odporu. Používají se senzory kovové nebo polovodičové. Kovy a polovodiče se liší principem vedení elektrického proudu. U kovů vedení elektrického proudu zajišťují volně se pohybující valenčními elektrony a elektrický odpor s teplotou roste, u polovodičů elektrický odpor s teplotou klesá. Odporové senzory převádějí teplotu měřeného objektu na změnu elektrického odporu.[4] U odporových senzorů teploty se používá materiál s velkým a stálým teplotním součinitelem odporu.[5]

2 Kovové odporové senzory teploty

Principem odporových kovových čidel teploty je teplotní závislost odporu kovu. Kov představuje soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a tzv. elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů. Nejčastěji se používá platina (Pt), měď (Cu), nikl (Ni), molybden (Mo), stříbro (Ag) a zlato (Au) a slitiny stříbro-zlato a platina-iridium, ačkoliv pro měření teploty by bylo možno použít téměř jakýkoliv kov.[6] Materiály kovových odporových senzorů se vyznačují malou změnou teplotního součinitele odporu s časem, malou hysterezí a kovy nesmí reagovat s izolačním nebo ochranným materiálem teploměru.[5] Z důvodu relativně velké změny odporu s teplotou se nejčastěji používá platina a nikl.

Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu α (K^{-1}), pro který lze napsat rovnici

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial \vartheta} = \frac{\partial(\ln R)}{\partial \vartheta} = -\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial \vartheta} = \frac{\partial(\ln m)}{\partial \vartheta} - \frac{\partial(\ln \tau)}{\partial \vartheta} - \frac{\partial(\ln n)}{\partial \vartheta}, \quad (2.1)$$

kde σ je konduktivita, n počet elektronů v jednotkovém objemu, τ relaxační čas elektronů, m efektivní hmotnost nosiče náboje.

S určitou nejistotou můžeme pro rozsah teplot od $0^{\circ}C$ do $100^{\circ}C$ použít lineární vztah

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha \vartheta), \quad (2.2)$$

kde R_0 je odpor čidla při teplotě $0^{\circ}C$. Lze tak stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu α .

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0}, \quad (2.3)$$

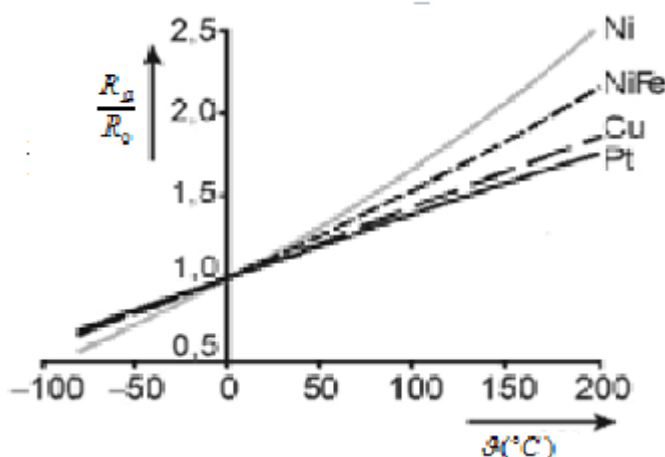
kde R_{100} je odpor čidla při teplotě $100^{\circ}C$.

Dalším základním parametrem odporových snímačů teploty je poměr čidla R_{100} při teplotě 100°C a R_0 při teplotě 0°C . Tento poměr se označuje písmenem W dle vztahu[1]

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}, \quad (2.4)$$

Tabulka 1: Nejpoužívanější materiály pro kovové snímače teploty podle normy ČSN EN 60751

Materiál	TKR $\alpha \cdot 10^2 \text{ (K}^{-1}\text{)}$	teplotní rozsah ($^{\circ}\text{C}$)	poměr odporů W_{100}
Platina	0,385 až 0,391	-20 až 850	1,3850
Nikl	0,617 až 0,675	-60 až +200	1,6180
Měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,4260



Obrázek 1: Teplotní závislost odporových kovových snímačů teploty[1]

2.1 Odporové platinové snímače teploty

Platinové odporové snímače PT100 se vyrábějí z platinového drátu. Platinový drátek může být zataven do keramiky nebo skla anebo namotán na tenké slídové podložce. Označení snímače PT100 znamená hodnotu odporu 100 Ohmů při teplotě 0°C , označení PT1000 hodnotu odporu 1000 Ohmů při teplotě 0°C . [8] Platina se vyznačuje chemickou stálostí, vysokou teplotu tání, časovou stálostí a možností dosažení vysoké čistoty. [1]

Čistota platiny se posuzuje dle redukovaného odporu W_{100} dle [1]

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385. \quad (2.4)$$

V EU se používá platina s $W_{100} = 1,385$. Podle U.S.Industrial Standard se používá čistší platina s $W_{100} = 1,391$, tím pádem se mírně liší i koeficienty rovnice.[30]

Platinové odporové snímače lze vyrobit ve dvou tří nebo čtyřvodičovém zapojení, kdy nejvýhodnější je čtyřvodičové zapojení, kde vliv vedení je téměř dokonale kompenzován. Jako obvody pro vyhodnocení signálu z těchto snímačů se může použít můstkové zapojení nebo přístrojový zesilovač.[9]

Nejpřesnější senzory (např. pro meteorologické účely) nutně musí mít vysokou čistotu platiny (až 99,999 %). Platinové čidla se dělí do dvou tolerančních tříd pro průmyslové (provozní) použití. Třída A pro rozsah teploty od -200°C do 650°C a třída B pro rozsah teploty od -200°C do 850°C. Vyrábějí se však i vysokoteplotní snímače až do teploty 1100°C. [1]

Teplotní závislost měřícího odporu (čidla) je pro rozsah teploty od -200°C do 0°C dána vztahem[1]

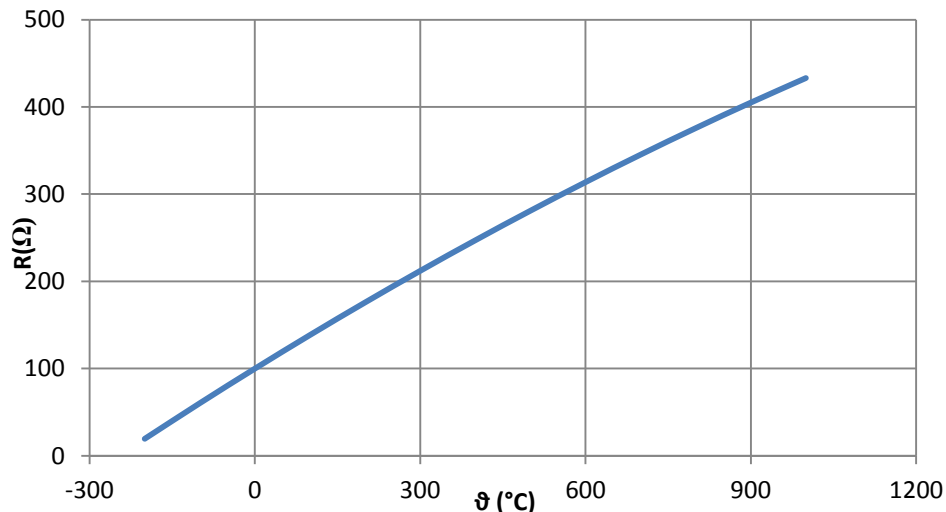
$$R_{\vartheta} = R_0[1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 - 100]] \quad (2.6)$$

a pro rozsah teploty od 0 do 850°C vztahem

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

kde pro PT100 s koeficientem $\alpha \cdot 10^2 = 0,385 \text{ (K}^{-1}\text{)}$

$R_0 = 100 \text{ } \Omega$, $A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$, $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$ pro $t < 0^\circ\text{C}$, $C = 0$ pro $\vartheta > 0^\circ\text{C}$.



Obrázek 2: Závislost odporu čidla Pt 100 na teplotě

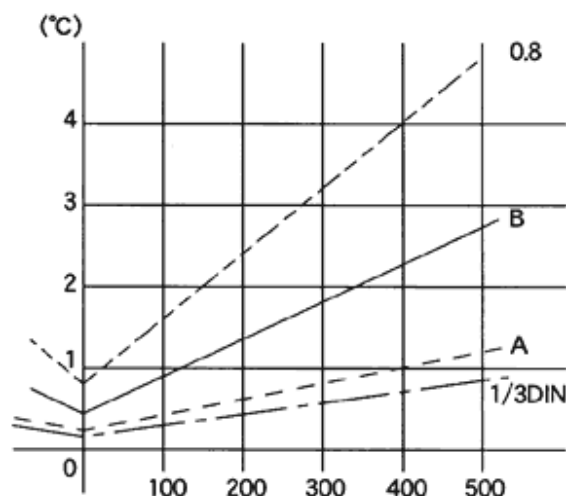
Tabulka 2: Toleranční třídy platinových čidel teploty podle normy ČSN EN 60751

Třída	Rozsah teplot (°C)	Tolerance (°C)
A	-50 až +650	$\pm(0,15 + 0,002 \vartheta)$
B	-200 až +850	$\pm(0,3 + 0,005 \vartheta)$

Pozn. $|\vartheta|$ je absolutní hodnota teploty bez ohledu na znaménko

Dále je používáno přesnější kritérium označované DIN 1/3 B, pro které platí

$$\Delta \vartheta = \pm (0,100 + 0,0017 \cdot |\vartheta|) \text{ (}^\circ\text{C)} \text{ pro } \vartheta \text{ od } -50 \text{ až } +250^\circ\text{C}$$



Obrázek 3: Dovolené tolerance průmyslových Pt měřicích odporů[1]

2.2 Odporové niklové snímače teploty

Niklové senzory se nejčastěji vyrábějí tenkovrstvou technologií. Jejich výhodou je vysoká citlivost, rychlá časová odezva tj. malá časová konstanta a malé rozměry. Nevýhodou v porovnání s platinovými senzory je značná nelinearita, mají omezenější teplotní rozsah (používají se pro teploty -60°C až 180°C , protože při teplotách mezi 300°C až 400°C podléhají strukturním změnám, které se projeví nevratnou změnou elektrického odporu čidla), odolnost vůči působení prostředí a menší dlouhodobou stálost. Používají se čidla například s $W_{100} = 1,6170$, ale pravděpodobně neužívanější jsou čidla s $W_{100} = 1,6180$ a $R_0 = 100 \Omega$ dle normy ČSN EN 60751.[10] Stejně jako platinová čidla se vyrábějí se základní hodnotou odporu $R = 100 \Omega$ a vyrábějí se i snímače se základní hodnotou odporu 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Teplotní závislost odporu niklového čidla lze opět vyjádřit polynomem

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^4 + D\vartheta^6), \quad (2.7)$$

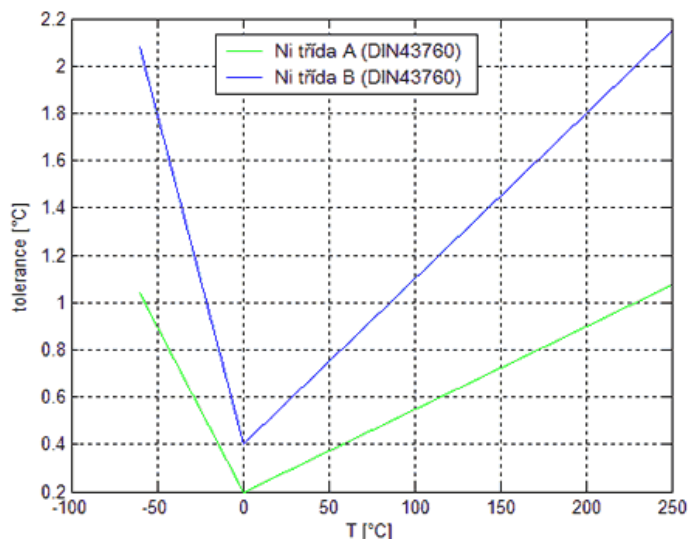
Kde pro Ni s koeficientem $\alpha \cdot 10^2 = 0,618 \text{ (} 10^{-3} \text{ K}^{-1})$

$$A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}, B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}, C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-4}, D = 2,0 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-6},$$

Niklové senzory teploty se podle ČSN EN60751 dělí do dvou tříd přesnosti (tolerančních tříd).[1]

Tabulka 3: Toleranční třídy niklových čidel teploty

Třída přesnosti	Rozsah teplot	Tolerance ($^\circ\text{C}$)
Třída A	-60°C až 0°C	$\Delta \vartheta = \pm (0,2 + 0,014 \cdot \vartheta)$
	0°C až 180°C	$\Delta \vartheta = \pm (0,2 + 0,0035 \cdot \vartheta)$
Třída B	-60°C až 0°C	$\Delta \vartheta = \pm (0,4 + 0,028 \cdot \vartheta)$
	0°C až 180°C	$\Delta \vartheta = \pm (0,4 + 0,007 \cdot \vartheta)$



Obrázek 4: Závislost tolerance niklových odporových senzorů na teplotě dle ČSN EN 60751(DIN 43760)[10]

2.3 Odporové měděné snímače teploty

Měď se používá v teplotním rozsahu $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro závislost odporu měděného čidla na teplotě lze v rozsahu teplot od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ použít lineární vztah (3.2), kde $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$. Pro rozsahy vyšší nebo nižší lze pak tuto závislost vyjádřit vztahy

$$\text{Pro } \vartheta \text{ od } -200\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ do } -50\text{ }^{\circ}\text{C}: R_{\vartheta} = A_1 R_0 [1 + A_2 (\vartheta + 200) + A_3 (\vartheta + 200)^2], \quad (2.8)$$

$$\text{Pro } \vartheta \text{ od } -50\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ do } +150\text{ }^{\circ}\text{C}: R_{\vartheta} = R_0 (1 + A_4), \quad (2.9)$$

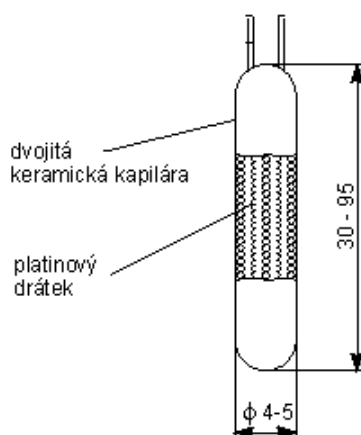
$$\text{Pro } \vartheta \text{ od } +150\text{ }^{\circ}\text{C} \text{ do } +260\text{ }^{\circ}\text{C}: R_{\vartheta} = A_5 R_0 [1 + A_6 (\vartheta - 150) + A_7 (\vartheta - 150)^2]. \quad (2.10)$$

Měděné snímače se běžně nevyrábějí, zejména kvůli nízké rezistivitě, která je 6x menší než u platiny a také kvůli malé oxidaci.[1]

2.4 Konstrukce odporových kovových snímačů teploty

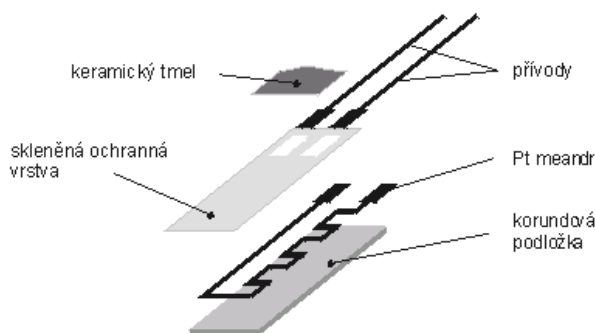
Základní konstrukční část odporového snímače teploty tvoří čidlo, neboli měřicí odpor odporového snímače teploty. Měřicí odpor se vyrábí třemi technologiemi. Drátkovou technologií, tenkovrstvou technologií a tlustovrstvou technologií.[1]

Drátkové čidlo může být navinuto na povrchu válcových keramických tělísek, kde je zafixováno a chráněno vrstvičkou keramického smaltu. Měřicí odpor bývá i uložen v kapilárách válcových keramických tělísek, která zajišťují jeho fixaci a ochranu. Další možností jsou skleněné odpory, u kterých je měřicí odpor navinut na válcovém tělísku z tvrdého skla a z důvodu upevnění a ochrany je pokryt vrstvičkou měkčího skla. Nejčastěji se vinutá čidla vyrábějí s hodnotou odporu R_0 rovnou $100\text{ }\Omega$, $500\text{ }\Omega$ nebo $1000\text{ }\Omega$. [4]



Obrázek 5: Vinuté čidlo[4]

U vrstevných čidel je místo drátkového odporového vinutí použita odporová vrstva kovu. Obvykle se nanáší na korundovou destičku buďto tlustovrstvou technologií nebo tenkovrstvou. V případě starší tlustovrstvé technologie je kovová (nejčastěji platinová) vrstva nanášena ve formě pasty na korundovou destičku sítotiskem, potom je nanesená vrstva tepelně stabilizována. Hodnota základního odporu se nastavuje pomocí laseru. V případě novější tenkovrstvé technologie je kovová vrstva (opět nejčastěji Pt) nanášena napařováním nebo napařováním ve vakuu na korundovou destičku. Vrstvová čidla se vyrábí ve velkém sortimentu hodnot základních odporů R_0 . [4]



Obrázek 6: Vrstvové čidlo[4]

Vrstvová čidla mají naproti vinutých rychlejší odezvu a také jsou levnější. Vinutá čidla jsou zase stálejší v čase a odolnější vůči otřesům a vibracím. [4]

3 Polovodičové odporové senzory teploty

Polovodičové odporové senzory využívají stejně jako kovové odporové senzory teplotní závislost odporu. Princip vodivosti polovodičů je odlišný, a proto jsou jiné i vlastnosti

těchto senzorů. Při teplotě absolutní nuly jsou všechny elektrony pevně vázány ke svým jádřům a materiál nemůže vést proud. Elektronům je třeba dodat určitou energii k tomu, aby „přeskočily“ přes tzv. zakázaný pás do pásu vodivostního a mohly se účastnit vedení proudu. Touto energií může být např. energie elektromagnetického pole nebo energie tepelná. S rostoucí teplotou roste koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor materiálu se snižuje. U klasických polovodičových součástek se tento jev snažíme potlačit, u termistorů se ho naopak snažíme vhodnou technologií a složením zvýraznit.[11]

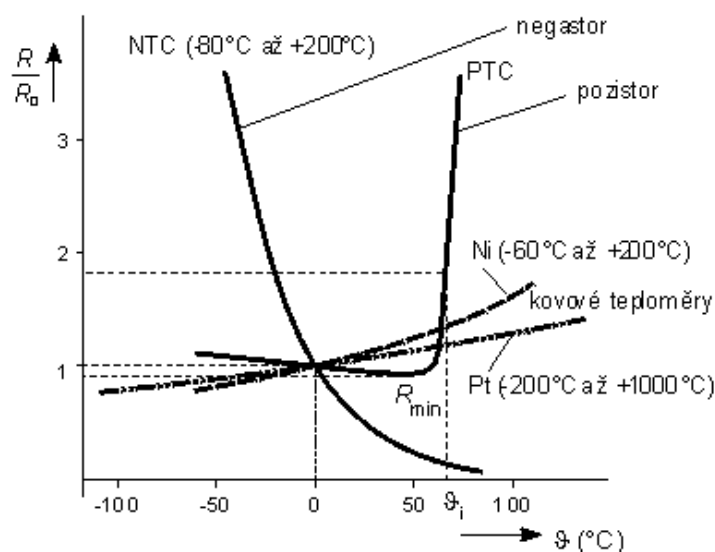
Polovodičové odporové senzory teploty můžeme rozdělit na polykrystalické (termistory- negastory, pozistory) a monokrystalické odporové senzory.

3.1 Termistory

Termistor (z anglického Thermally sensitive resistor) je teplotně závislý odpor vyrobený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Termistory je možno vyrobit v různých tvarech (např. ve tvaru destičky, disku, kapky, válečku aj.)

Mezi výhody termistoru patří velká teplotní citlivost, malé rozměry, jednoduchý převod odporu na elektrické napětí nebo proud a možnost přímého měření odporu termistoru na větší vzdálenost. Nevýhodou je nelineární charakteristika.

Termistory se dělí podle struktury amorfni a polykrystalické. Termistor může mít v závislosti na materiálu buď velký záporný teplotní součinitel odporu, tzv. negastor neboli NTC thermistor (Negative Temperature Coefficient) nebo velký kladný teplotní součinitel odporu, tzv. pozistor nebo-li PTC thermistor (Positive Temperature Coefficient) .[1]



Obrázek 7: Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory[19]

Pro některá použití jsou zajímavé velmi malé rozměry tzv. perličkových termistorů, jejichž malá tepelná kapacita zkracuje časovou konstantu senzoru na jednotky sekund, a zvětšuje tak rychlost odezvy senzoru na změnu teploty. Často se používají např. pro monitorování povolené teploty vinutí elektrických strojů. Široké uplatnění mají termistory

v měřicích a řídicích obvodech automobilů např. pro měření teploty provozních kapalin (olej, voda) nebo v klimatizačních a topných systémech.[12]

3.2 Negastory (NTC termistory)

K výrobě negastorů se využívá práškové technologie z kysličníků kovů jako je kysličník chromu, kobaltu, mědi, železa, manganu, niklu a titanu např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{MnO} + \text{CoO}$. Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Teplotní rozsahy negastorů jsou od běžných $-50\text{ }^\circ\text{C}$ do $+150\text{ }^\circ\text{C}$ až do extrémních rozsahů v oblasti nízkých teplot od $+4,2\text{ }^\circ\text{C}$ do vysokých teplot do $1000\text{ }^\circ\text{C}$. [1]

Závislost odporu negastoru na teplotě je exponenciální, se záporným teplotním součinitelem odporu.

$$R_g = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (3.1)$$

kde A je konstanta závislá na geometrickém tvaru a materiálu termistoru, B je teplotní konstanta daná materiálem termistoru, T je termodynamická teplota.

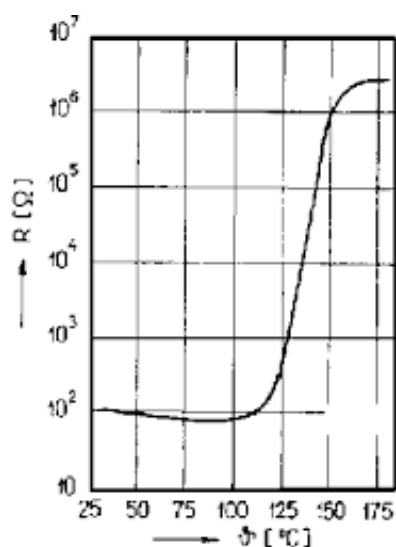
Úpravou rovnice se konstanty A zbavíme a získáme rovnici

$$R_1 = R_2 e^{B\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} \quad (3.2)$$

Zejména v širším rozsahu teplot způsobuje exponenciální závislost značnou nelinearitu. Tuto nelinearitu je třeba kompenzovat pomocí sériového nebo paralelního řazení negastorů a odporových sítí nebo s využitím speciálních linearizačních obvodů.[13]

3.3 Pozistory (PTC termistory)

Pozistory jsou termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Vyrábějí se z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. z titaničitanu barnatého (BaTiO_3). Odpor pozistoru nejdříve mírně klesá se stoupající teplotou. Od tzv. Curieovy teploty dochází u pozistoru ke strmému nárůstu rezistivity materiálu. Po nárůstu o několik řádů pak hodnota odporu opět mírně klesá. Kromě standardní technologie se dále vyrábějí pozistory dopované křemíkem, jejichž pracovní část charakteristiky je přibližně lineární. Využití pozistorů je v elektrických obvodech ve funkci tepelné ochrany, omezovače proudu, teplotní regulace aj.[1]



Obrázek 9: Teplotní závislost odporu pozistoru na teplotě[20]

3.4 Monokrystalické senzory

Monokrystalické senzory se vyrábějí z křemíku, germania nebo india. Mezi nejpoužívanější materiály v praxi patří křemík Si. Při výrobě Si senzoru je použit nevlastní polovodič typu N, tedy polovodič s dominantní elektronovou vodivostí.

Křemíkové Si senzory běžně mohou měřit teploty kolem -50 °C až 150 °C (existují ale i varianty pro vyšší teploty např. KTY84 do 300 °C). Podobně jako u PTC termistorů mají Si senzory kladný teplotní součinitel odporu. Rezistivita se zvyšuje s rostoucí teplotou díky snižování pohyblivosti nosičů náboje vlivem rozptylu nosičů na mřížce polovodiče. Závislost teploty na odporu můžeme aproximovat vztahem:

$$R_{\vartheta} = R_{25}(1 + \alpha\Delta\vartheta + \beta\Delta\vartheta^2), \quad (3.3)$$

kde $\Delta\vartheta = \vartheta - 25\text{ °C}$, $\alpha = 7,88 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ a $\beta = 1,937 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-2}$

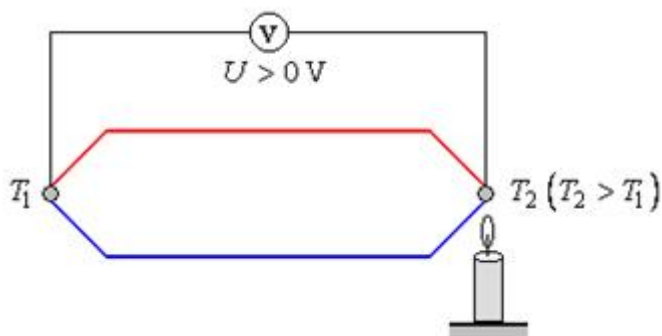
Si senzory vykazují nízkou nelinearitu, dlouhodobou stabilitu, nízkou pořizovací cenu a téměř konstantní teplotní součinitel odporu v celém rozsahu.[14]

4 Termoelektrické články

4.1 Seebeckův jev

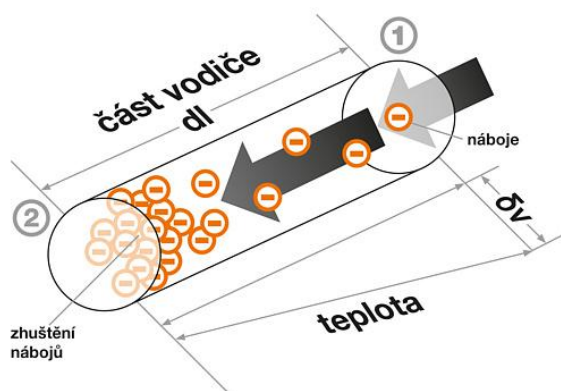
Termoelektrické články využívají principu Seebeckova jevu. Seebeckův jev je přeměna teplotních rozdílů přímo na elektrické napětí. Tento jev byl poprvé náhodně objeven v roce 1821 německým fyzikem Thomasem Johannem Seebeckem, který zjistil, že existuje elektrické napětí mezi dvěma konci kovové tyčky, pokud mezi těmito konci existuje teplotní

rozdíl.[15] Termoelektrický článek je vždy složen ze dvou vodičů nebo polovodičů. Elektrický proud v uzavřeném obvodu tvořeném ze dvou materiálově různých vodičů nebo polovodičů protéká, pokud mají oba spoje T_1 a T_2 rozdílnou teplotu.



Obrázek 10: Seebeckův jev[21]

Podle nejnovějších poznatků se tento jev zakládá na specifických vlastnostech elektricky vodivých materiálů. Dojde-li ke změně teploty vodiče (nárůst nebo pokles teploty), tak uvnitř vodiče dojde k posunu elektronové hustoty (difuze). Tato změna se označuje jako tzv. teplotní gradient. Se zvyšující se kinetickou energií dojde na teplém konci vodiče k úbytku elektronů a na studeném konci k přírůstku elektronů. Každá část vodiče se tak stane zdrojem napětí.[26]



Obrázek 11: Princip termoelektrického jevu[26]

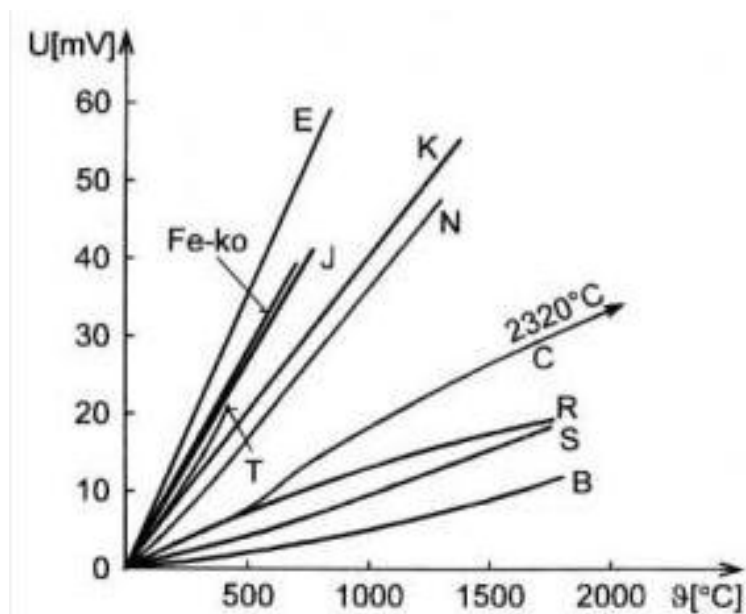
4.2 Typy termoelektrických článků

Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termoelektrických článků jsou ve světě normalizovány. Byly vybrány materiály zajišťující přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah, odolnost proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření, dlouhodobou stabilitu charakteristiky $E = f(\Delta t)$. Označení jednotlivých termoelektrických článků se provádí velkými písmeny.[1] Mezi

nejpoužívanější patří termočlánek typu K a termočlánek typu J. Měřicí rozsahy se můžou lišit podle výrobce.

Tabulka 4: Typy termoelektrických článků[25]

Označení termočlánku	Původní označení	Měřicí rozsah [°C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600
B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700



Obrázek 12: Charakteristiky vybraných termoelektrických článků[1]

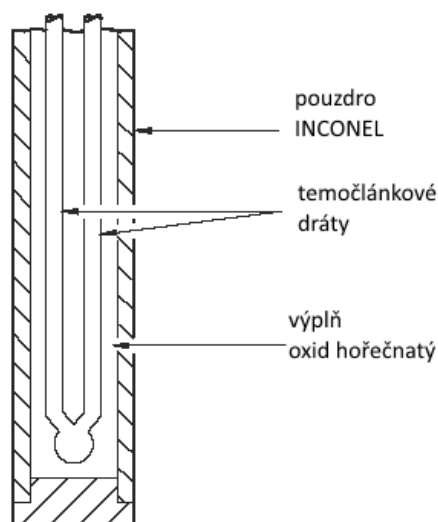
Tabulka 5: Třídy přesnosti pro termočláňkové snímače teploty[26]

Typ	Rozsah	Třída 1	Rozsah	Třída 2
K	-40...1000 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 0,004^* \mathcal{J} $	-40...1200 °C	$\pm 2,5\text{ °C tj. } 0,0075^* \mathcal{J} $
J	-40...750 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 0,004^* \mathcal{J} $	-40...750 °C	$\pm 2,5\text{ °C tj. } 0,0075^* \mathcal{J} $
S/R	0...1600 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 1,0+0,003^* \mathcal{J} $	0...1600 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 0,0025^* \mathcal{J} $
B	...	...	600...1700 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 0,0025^* \mathcal{J} $
N	-40...1000 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 0,004^* \mathcal{J} $	-40...1200 °C	$\pm 2,5\text{ °C tj. } 0,0075^* \mathcal{J} $
T	-40...350 °C	$\pm 0,5\text{ °C tj. } 0,004^* \mathcal{J} $	-40...350 °C	$\pm 1,0\text{ °C tj. } 0,0075^* \mathcal{J} $
E	-40...800 °C	$\pm 1,5\text{ °C tj. } 0,004^* \mathcal{J} $	-40...900 °C	$\pm 2,5\text{ °C tj. } 0,0075^* \mathcal{J} $

Pozn. Třída 1 a 2 se používá pro teploty vyšší než -40°C[26]

4.2.1 Konstrukce a použití termočláňků

Vodiče termočláňků jsou uloženy v pevném kovovém pouzdře. Měrný spoj se většinou nachází ve spodní části opláštění. Kolem kabelů termočláňku je oxid hořečnatý, který tlumí otřesy, které by mohly poškodit jemná vlákna a zároveň usnadňuje přenos tepla mezi měrným spojem a médiem v prostředí kolem termočláňku.[27]



Obrázek 13: Vnitřní provedení termočláňku[27]

Mezi výhody patří lineární charakteristiky, velký teplotní rozsah, malé rozměry sond (< 1mm). Používají se pro měření velkých změn a absolutních hodnot teploty, například jako sondy ponorné, dotykové, vpichové, prostorové, šterbinové apod.[27]

5 Nejistoty měření

Nejistota měření charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze zdůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se týká jak výsledku měření, tak i měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na

kterých nejistota výsledku měření závisí. Základním předpokladem pro určování nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může udávaná hodnota odchylovat od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost, v jakém intervalu daném nejistotou se může nacházet skutečná hodnota.[16]

5.1 Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A - u_A , je způsobena náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovuje se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Tato nejistota se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšuje. Přitom se předpokládá existence náhodných chyb s normálním rozdělením.[16]

Základní výsledek měření (odhad hodnoty měřené veličiny) představuje aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

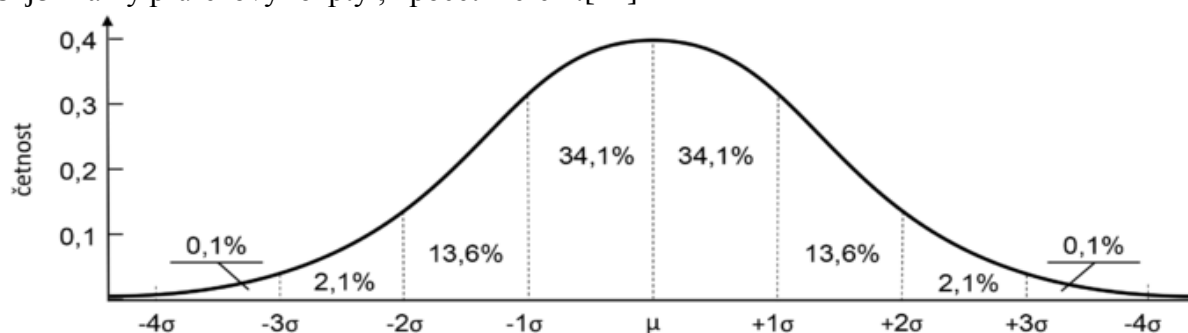
Standardní nejistota typu A tohoto výsledku se rovná směrodatné odchylce aritmetického průměru s_x tedy

$$u_A(x) = s_x = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2)$$

Vztah lze k výpočtu nejistoty použít pouze v případě, byl-li vykonán dostatečný počet měření ($n \geq 10$). Při malém počtu měření ($n < 10$), je-li k dispozici tzv. průřezový rozptyl, který charakterizuje rozptýlení řízeného měřicího procesu, se standardní nejistota typu A určí podle vztahu[17]

$$u_A(x) = \frac{s_{pr}}{\sqrt{n}} \quad \text{kde} \quad (5.3)$$

s^2 je známý průřezový rozptyl, n počet měření.[17]



Obrázek 14: Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení[24]

5.2 Standardní nejistota typu B

Standardní nejistota typu B - u_B se odhaduje pomocí úsudku na základě dostupných informací a zkušeností. Nejčastěji se používají údaje výrobce měřicí techniky (technické parametry použitého zařízení, např. třída přesnosti elektromechanického měřicího přístroje nebo dvojice konstant charakterizujících chybu číslicového měřicího přístroje, například teploměru), zkušenosti z předcházejících měření, zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů

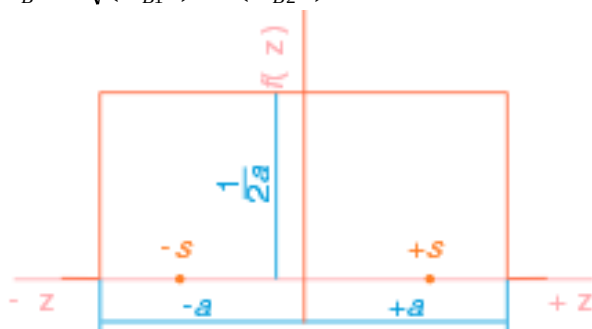
a techniky a poznatky o nich, údaje získané při kalibraci a z certifikátů, nejistoty referenčních údajů v příručkách.[18]

Standardní nejistota $u_B(z_j)$ se vypočítá pro každý uvažovaný zdroj nejistot podle vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{z_{j\max}}{\kappa}, \quad (5.4)$$

kde κ je hodnota příslušná ke zvolené aproximaci rozdělení pravděpodobnosti. Nejčastěji se volí rovnoměrné rozdělení kde $\kappa = \sqrt{3}$. Výsledná nejistota se pak určí z dílčích nejistot jako

$$\Delta_B x = \sqrt{(\Delta_{B1} x)^2 + (\Delta_{B2} x)^2 + \dots} \quad (5.5)$$



Obrázek 15: rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti[24]

5.3 Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota je dána součtem nejistot A a B. Pokud hodnotíme výsledek měření touto nejistotou, není třeba rozlišovat nejistoty A a B. Tato nejistota udává interval, ve kterém se s vysokou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny[16]. Určuje se podle vztahu

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (5.6)$$

5.4 Rozšířená standardní nejistota U

Zavádí se v případě, pokud je třeba zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření. Získá se tak, že se kombinovaná standardní nejistota u_C vynásobí součinitelem $k_u = 2$.

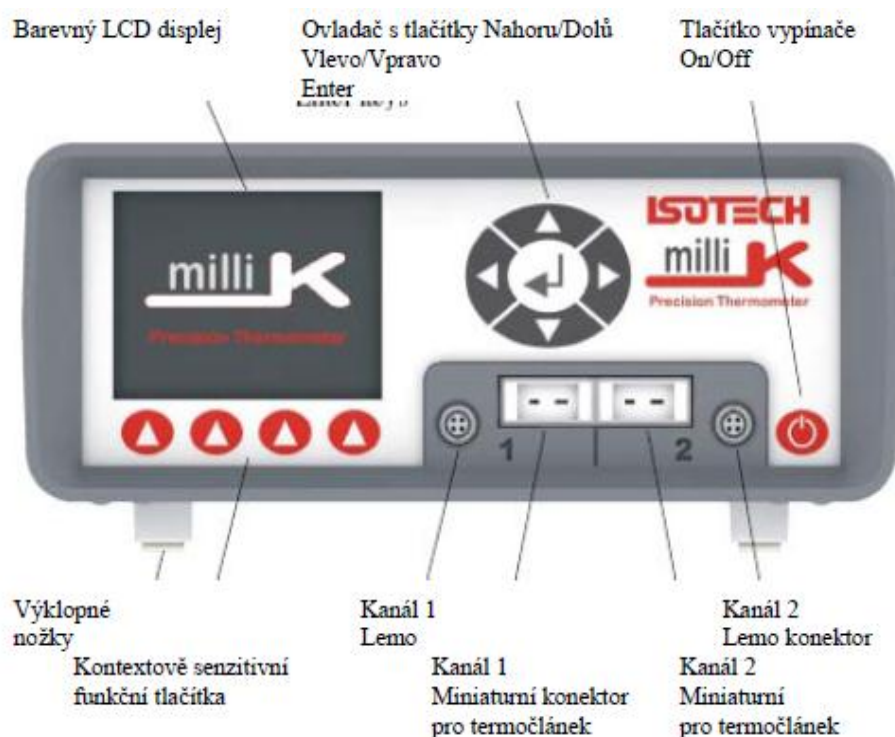
Při zjišťování jednotlivých standardních nejistot se postupuje podle toho, zda se jedná o měření přímé nebo nepřímé jedné či více veličin. Hodnoty hodnoty koeficientů a nejistot se zaokrouhlují na tři platné číslice. Udávaná výsledná nejistota se zaokrouhluje na dvě platné číslice.[16]

6 Praktická část

6.1 Měřicí pracoviště

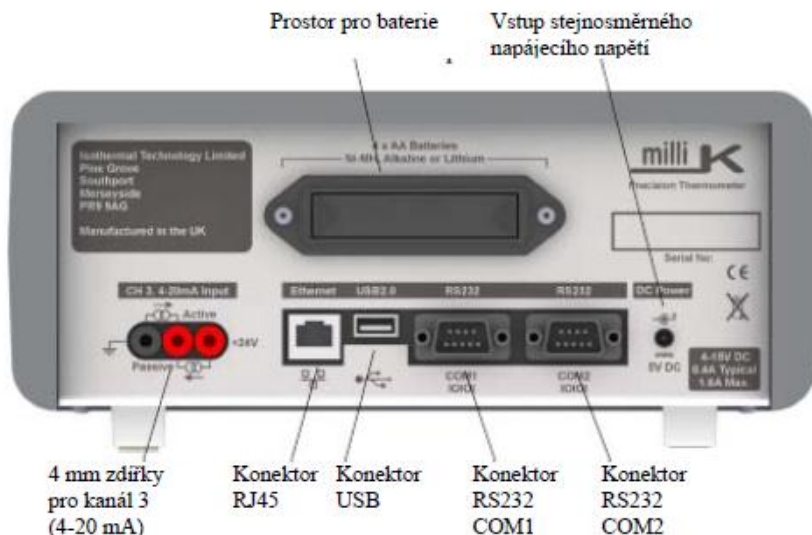
Měření probíhalo ve stíněné komoře na Technické 10 VUT v Brně. Teplota byla naměřena pomocí etalonového teploměru MILLIK od firmy ISOTECH, přístrojem Agilent 34972A a teploměrem GREISINGER GMH 3710.

6.1.1 Etalonový teploměr MILLIK



Obrázek 16: Přístroj MILLIK - přední panel[22]

MILLIK je určen pro velice přesné měření teploty, měří s přesností $0,005^{\circ}\text{C}$, po době jednoho roku měří s přesností $0,007^{\circ}\text{C}$ pro odporové měřiče teploty, pro termistory $0,015^{\circ}\text{C}$ a termočlánky podle zvoleného typu, kompletní technická data jsou k dispozici v manuálu přístroje, který přikládám v příloze. Výhodou je podpora velkého množství teploměrů, lze měřit např. průmyslové 100Ω PRT (platinový odporový teploměr) nebo etalonové 25Ω , přístroj disponuje i podporou termistorů, termočlánků a vysílačů 4-20mA. Dosažené výsledky je možno ukládat buďto do interní paměti přístroje nebo pomocí flash disku.

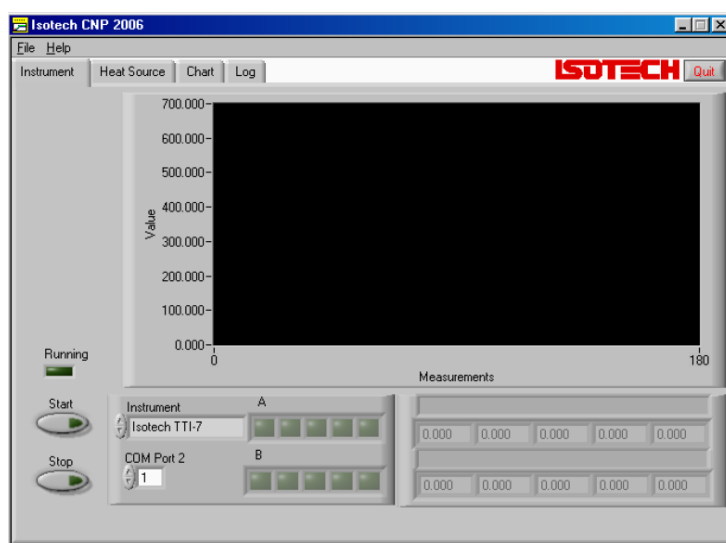


Obrázek 17: Přístroj MILLIK - zadní panel[22]

Přístroj lze propojit s počítačem přes síťový port s konektorem RJ45 na zadním panelu přístroje, k síti LAN lze připojit pomocí standardního (nepřekříženého) síťového kabelu. K funkčnímu propojení bylo třeba nastavit IP adresu pro MILLIK, která se získala na základě MAC adresy zařízení z fakultního DHCP serveru. IP adresa se poté ručně vepsala do přístroje (IP adresa 147.229.156.47). Tato adresa se napíše do přístroje pod oknem *instrument* -> *instrument settings* a do pole *address type* vepíšeme výše uvedenou adresu.

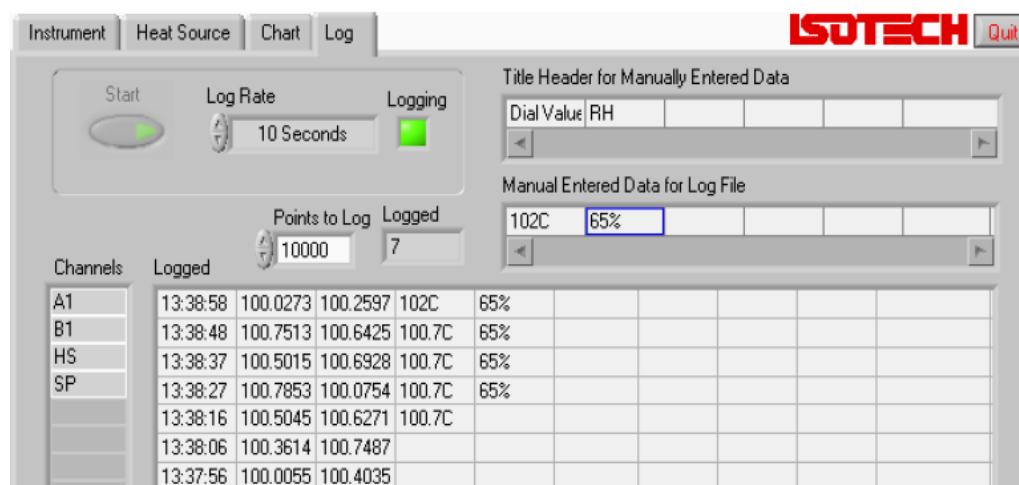
Pokud chceme ovládat přístroj pomocí počítače je třeba stáhnout freewareovou aplikaci Microsoft "CE6 cerhost.ext", kterou je volně ke stažení na internetu. Po nainstalování přes menu *file* -> *connect* připojíme přístroj a MILLIK můžeme jednoduše ovládat pomocí myši nebo klávesových zkratk.

Zapisování dosažených výsledků je možné buď s využitím interní paměti v MILLIKu, s využitím USB, jímž konektorem je MILLIK vybaven, anebo přes program Cal Notepad, jehož freeware verze je ke stažení.



Obrázek 18: Základní menu programu Cal Notepad[22]

K funkčnosti programu je třeba počítač s MILLIKem propojit pomocí propojovacího kabelu RS232 (9-ti pinový křížový) vybrat do pole *instrument* z nabídky MILLIK (v našem případě). COM Port 2 ponechat nastavený na 1 a podle počtu využitých channelů přístroje MILLIK označit zelené čtverce pod nápisem A (tudíž, pokud měříme např. jen termočlánek označíme jeden čtverec, pokud zároveň měříme termočlánek a odporový senzor označíme 2 čtverce). V okně chart se nám tvoří graf na základě naměřené teploty a okno log slouží pro zapisování, kde si můžeme nastavit po jak dlouhé době se bude zaznamenávat teplota (log rate) a kolik měření má proběhnout (points to log), po stisknutí tlačítka start se začne vytvářet soubor který je možno otevřít v microsoft excelu.



Obrázek 19: Log okno programu Cal Notepad[22]

6.1.2 Teplotní lázeň

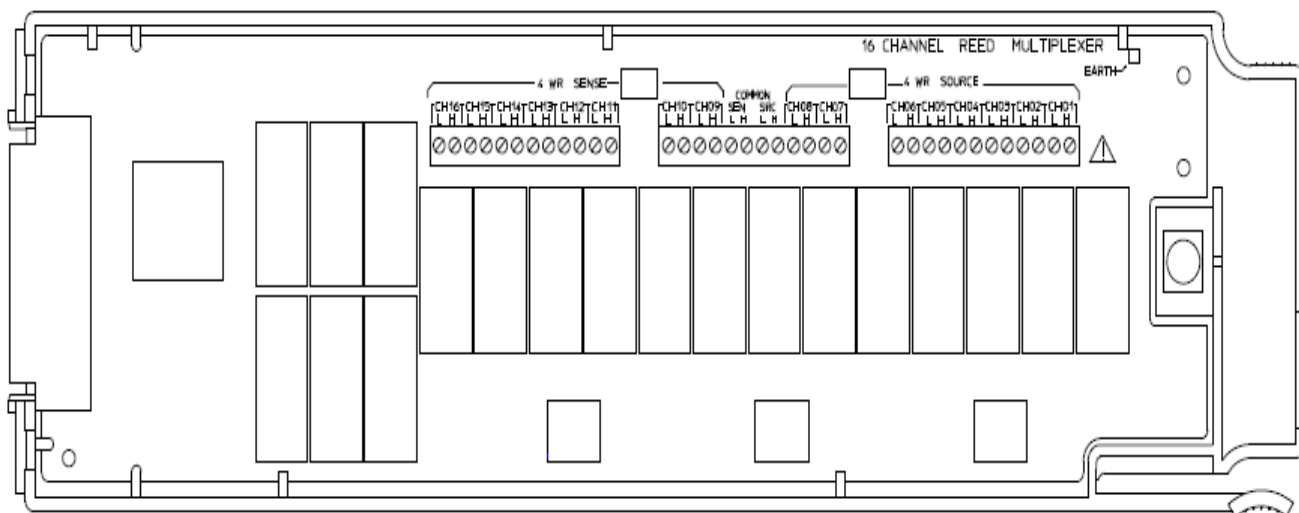
Bakalářská práce je zaměřena na měření teploty kapaliny. K tomu využíváme láznový termostat s nerezovou vanou s řídicí jednotkou Huber CC pilot one, který má funkci jak ohřívat médium v lázni, tak má i funkci chlazení. Termostat je vybaven dotykovým displejem, sacím i tlačným integrovaným čerpadlem, které slouží k cirkulaci kapaliny v externích okruzích. Měří s přesností 0,01 °C. Teplotní rozsah termostatu při využití vodního chlazení je od 0 do 100 °C. Je zde i možnost připojení chladicí spirály pro externí chlazení, potom je teplotní rozsah od -30 °C do 100 °C. Pro co možná nejpřesnější měření došlo výrobě krytu z teflonu s vyvrtanými otvory pro jednotlivá čidla, abychom co nejvíc potlačili vnější vlivy na měření.



Obrázek 20: Závěsný termostat HUBER CC-E Pilot ONE[23]

6.1.3 Agilent 34972A

Přístrojem Agilent 34972A se měřila teplota čidel pomocí vloženého modulu do přístroje s označením 34902A, umožňující připojit různá odporová a polovodičová teplotní čidla a termočláanky s volným zakončením, popřípadě se standardizovaným konektorem. Tento modul je 16-ti kanálový, tudíž je možno měřit až 16 dvou vodičových čidel. Modul podporuje i čidla čtyřvodičová. Používá se pro automatizované testovací aplikace s vysokým přechodovým výkonem i pro vysokorychlostní zápis dat a pro pozorovací úlohy.

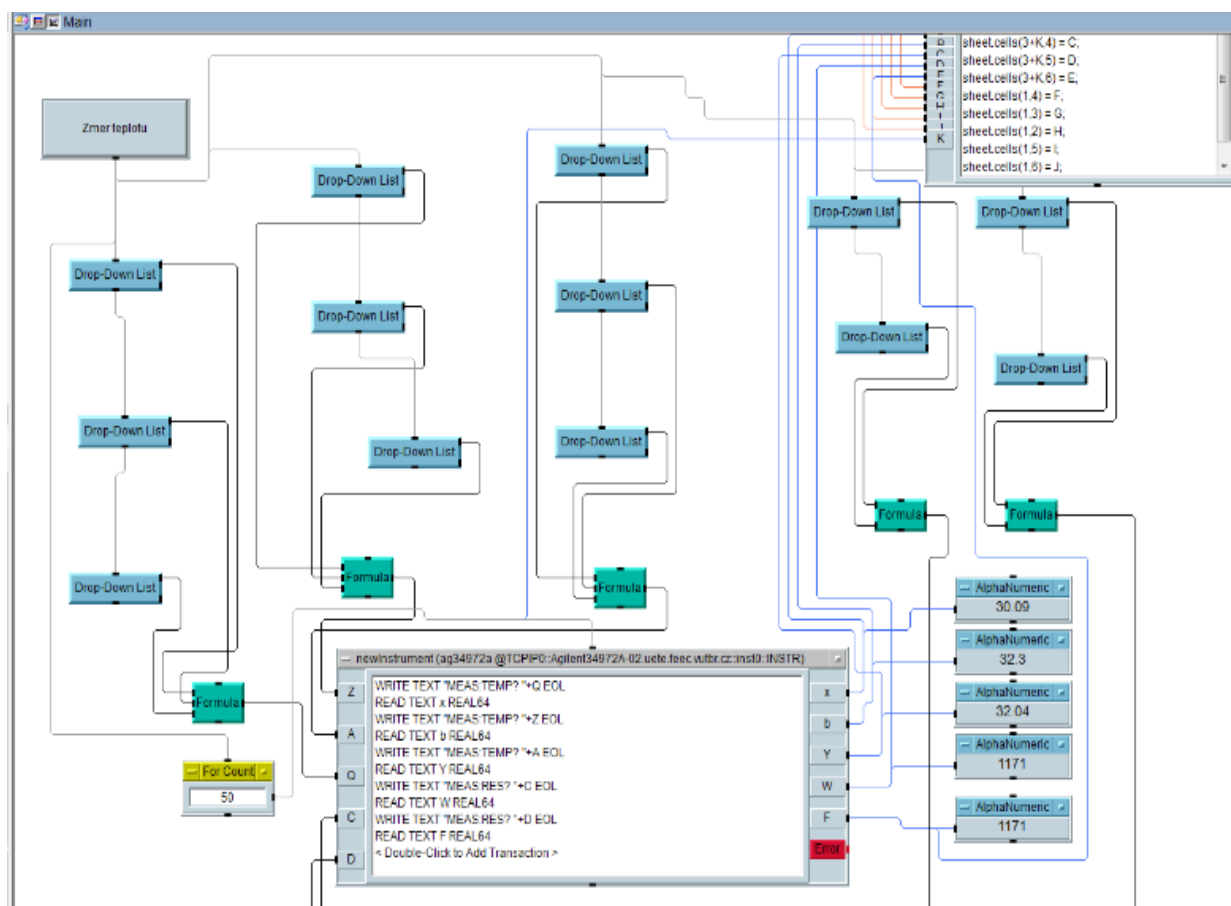


Obrázek 21: Modul Agilent 34902A multiplexer

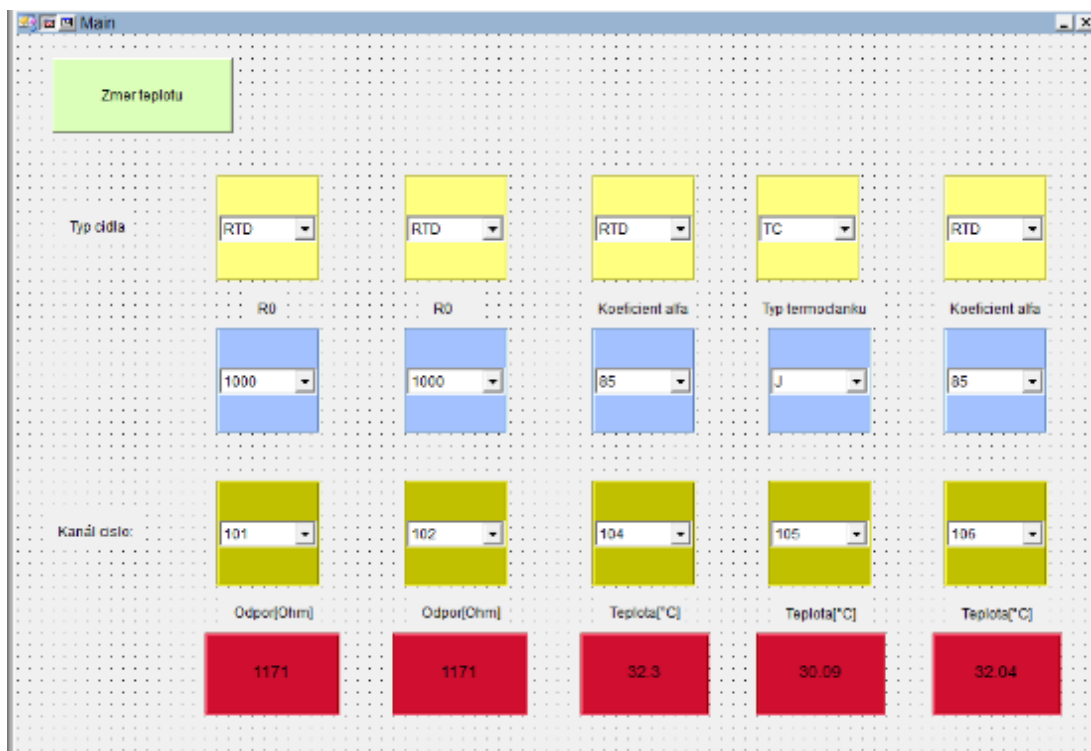
Technické parametry měřícího přístroje Agilent 34972A přikládám v příloze. Agilent 34972A lze stejně jako MILLIK připojit k síti LAN a propojit tak s počítačem.

Pomocí ovladačího prostředí Agilent VEE od Agilent Technologies byl vytvořen program pro pohodlnější, rychlejší a přesnější měření. Program umožňuje měřit jednotlivá teplotní čidla najednou, přičemž naměřené hodnoty se po stisknutí startovacího tlačítka “Zmer teplotu” automaticky ukládají do Microsoft Excelu. Vytvořený program měří 5 čidel (2 odporová platinová, 2 odporová niklová a 1 termočlánek typu J), avšak do programu se můžou vepsat další čidla podle potřeby (pro modul 34902A tedy až 16). Platinová čidla i termočlánek jsou nastaveny na měření teploty, zatímco Niklová čidla na měření odporu, jelikož Agilent 34972 nedisponuje nastavením koeficientu α pro tyto odporová čidla, nýbrž pouze nastavením odporu. Tento odpor je třeba převést podle rovnice (2.7), anebo podle tabulkových hodnot. Nastavení počtu zapsaných hodnot do Microsoft Excelu lze měnit v poli s názvem For count (aktuální nastavení 50 hodnot, což je dostatečný počet pro velmi přesné měření).

Program v Agilent VEE pracuje jednoduše, kdy jednotlivé parametry čidel (odpor R_0 , koeficient α , typ termočlánku, číslo kanálu v modulu na kterém je namontováno čidlo) jsou napsány v drop-down listu jejichž výstupy směřují do vstupu pole “formula”, kde se napíšou tyto parametry na základě formulace příkazu v manuálu přístroje Agilent. Je třeba brát zřetel na veškeré čárky, uvozovky, jelikož Agilent VEE je citlivý na syntaxi. Z “formuly” pak přejdou tyto údaje do hlavního pole (pro měření teploty se uvádí příkaz MEAS TEMP?, pro odpor MEAS RES?). Tyto příkazy se napíšou do “write text” a přičte se k nim výstup z “formule” např. písmeno Q. (Celý příkaz poté vypadá takto: WRITE TEXT “MEAS TEMP?” + Q EOL). EOL slouží pouze k ukončení řádku. Příkaz je nutno ještě přečíst, je třeba nadefinovat výstup z hlavního pole např. x. (Celý příkaz poté vypadá takto: READ TEXT x REAL64). Vytvořený program je součástí kompaktního disku.



Obrázek 22: Část kódu programu Agilent VEE



Obrázek 23: Základní menu programu Agilent VEE

6.1.4 GMH 3710

Dalším měřicím přístrojem byl univerzální teploměr GMH 3710 od firmy GREISINGER. Jedná se o přesný teploměr pro čtyřvodičové snímače PT100. Využívá se pro náročná měření v laboratořích i průmyslu. Díky ochrannému pouzdru jsou ideálními měřicími zařízeními do obtížných podmínek. Lze ho použít pro referenční a kontrolní měření v kapalinách, měkkých plastických médiích, vzduchu a plynech. Měří s přesností $\pm 0,03$ °C při rozlišení $0,01^\circ$ v rozsahu $-199,99$ až $+199,99$ °C; $\pm 0,1$ °C při rozlišení $0,1^\circ$ v měřicím rozsahu od -200 až $+850^\circ\text{C}$. Lze k němu však připojit pouze PT100 (dvou- i čtyřvodičovou).



Obrázek 24: Teploměr Greisinger GMH 3710



Obrázek 26: Měřící pracoviště (teplotní lázeň s čidly)



Obrázek 25: Měřící pracoviště (Agilent 34972A a MILLIK)

6.2 Postup měření

Prvním krokem byla instalace snímačů teploty do kanálů modulu Agilent 34902A. Měřící přístroj Agilent 34972A stačí pouze zapnout, není třeba nastavovat parametry čidel, to všechno se provede v programu Agilent VEE. Poté se do MILLIKu připojil čtyřvodičový snímač PT100/3850 od firmy Isotech do kanálu 1 a do druhého kanálu termočlánek typu K. Do GMH 3710 se připojila PT100 a všechny čidla se ponořila do teplotní lázně přes vyvrtané otvory v teflonovém krytu. Měření probíhalo při třech různých teplotách (20 °C, 50 °C a 70 °C), po nastavení teploty teplotní lázně se voda začala ohřívat na požadovanou teplotu. Pro přesnost měření se počkalo cca 5 minut až se teplota ustálí a mohlo se začít s měřením. Výsledky z Agilent 34972A jsou uloženy v microsoft excelu, výsledky z MILLIKu se ukládaly na flashku, jelikož laboratoř není vybavena pro připojení třetího UTP kabelu, na výsledek to však nemá žádný vliv. U GMH 3710 se provedlo deset měření, při zapnutí/vypnutí tlačítka start/stop. Všechny naměřené hodnoty jsou uloženy na CD.

6.3 Seznam měřených čidel při použití daných přístrojů

Tabulka 6: Seznam čidel .

čidlo	měřicí přístroj
PT100/3850	MILLIK
Termočlánek typu K	MILLIK
Termočlánek typu J	Agilent 34972A
PT100/3850	Agilent 34972A
PT100/3850/A	Agilent 34972A
Ni1000/6180	Agilent 34972A
Ni1000/6180/A	Agilent 34972A
PT100/3850	GMH3710

Poz: Ni1000/6180 měří podle toleranční třídy B, Ni1000/6180/A podle toleranční třídy A, totéž platí pro platinové snimače

6.4 Naměřené hodnoty

6.4.1 Naměřené hodnoty při 20°C

Tabulka 7: Tabulka naměřených hodnot pro termočlánek typu J

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	20,093	11	20,157	21	20,129	31	20,137	41	20,137
2	20,137	12	20,159	22	20,135	32	20,171	42	20,148
3	20,163	13	20,140	23	20,140	33	20,161	43	20,133
4	20,150	14	20,095	24	20,161	34	20,159	44	20,159
5	20,148	15	20,131	25	20,157	35	20,157	45	20,142
6	20,135	16	20,133	26	20,167	36	20,150	46	20,120
7	20,144	17	20,159	27	20,169	37	20,140	47	20,146
8	20,142	18	20,148	28	20,161	38	20,140	48	20,163
9	20,144	19	20,140	29	20,167	39	20,144	49	20,142
10	20,135	20	20,112	30	20,163	40	20,129	50	20,159

Tabulka 8: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	19,967	11	19,987	21	19,985	31	19,993	41	20,000
2	19,970	12	19,988	22	19,985	32	19,994	42	20,000
3	19,972	13	19,988	23	19,985	33	19,995	43	20,001
4	19,975	14	19,986	24	19,985	34	19,996	44	20,002
5	19,977	15	19,984	25	19,986	35	19,997	45	20,001
6	19,979	16	19,984	26	19,987	36	19,998	46	19,999
7	19,981	17	19,983	27	19,988	37	19,998	47	19,999
8	19,983	18	19,985	28	19,990	38	19,999	48	19,997
9	19,984	19	19,986	29	19,990	39	19,999	49	19,996
10	19,985	20	19,985	30	19,992	40	19,994	50	19,997

Tabulka 9: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180/A

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	20,118	11	20,121	21	20,120	31	20,121	41	20,128
2	20,119	12	20,121	22	20,119	32	20,121	42	20,128
3	20,119	13	20,121	23	20,119	33	20,122	43	20,128
4	20,119	14	20,120	24	20,119	34	20,123	44	20,125
5	20,120	15	20,120	25	20,119	35	20,123	45	20,122
6	20,120	16	20,120	26	20,119	36	20,124	46	20,121
7	20,119	17	20,120	27	20,119	37	20,125	47	20,121
8	20,119	18	20,120	28	20,120	38	20,126	48	20,120
9	20,119	19	20,120	29	20,120	39	20,127	49	20,120
10	20,120	20	20,120	30	20,121	40	20,128	50	20,121

Tabulka 10: Tabulka naměřených hodnot pro PT100/3850 MILLIKem

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	19,924	11	19,926	21	19,941	31	19,947	41	19,933
2	19,924	12	19,926	22	19,938	32	19,949	42	19,932
3	19,925	13	19,926	23	19,937	33	19,949	43	19,934
4	19,927	14	19,928	24	19,936	34	19,949	44	19,935
5	19,928	15	19,93	25	19,938	35	19,948	45	19,934
6	19,925	16	19,933	26	19,941	36	19,946	46	19,932
7	19,922	17	19,937	27	19,944	37	19,943	47	19,928
8	19,923	18	19,940	28	19,944	38	19,94	48	19,924
9	19,923	19	19,943	29	19,945	39	19,937	49	19,922
10	19,925	20	19,943	30	19,946	40	19,935	50	19,923

Tabulka 11: Tabulka naměřených hodnot pro Termočlánek typu K MILLIKem

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	19,944	11	19,947	21	19,927	31	19,943	41	19,946
2	19,923	12	19,955	22	19,915	32	19,916	42	19,912
3	19,939	13	19,964	23	19,942	33	19,932	43	19,907
4	19,926	14	19,938	24	19,916	34	19,937	44	19,929
5	19,968	15	19,915	25	19,912	35	19,961	45	19,920
6	19,928	16	19,954	26	19,925	36	19,946	46	19,905
7	19,914	17	19,961	27	19,946	37	19,932	47	19,926
8	19,925	18	19,938	28	19,944	38	19,939	48	19,944
9	19,952	19	19,944	29	19,945	39	19,918	49	19,911
10	19,928	20	19,944	30	19,958	40	19,935	50	19,896

Tabulka 12: Tabulka naměřených hodnot PT100/3850 GMH 3710

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	19,92	2	19,92	3	19,93	4	19,91	5	19,92
6	19,93	7	19,94	8	19,92	9	19,95	10	19,96

Tabulka 13: Tabulka naměřených hodnot PT100/3850A Agilentem 34972A

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	22,219	11	22,22	21	22,219	31	22,220	41	22,223
2	22,219	12	22,219	22	22,217	32	22,219	42	22,221
3	22,221	13	22,218	23	22,219	33	22,218	43	22,221
4	22,222	14	22,22	24	22,219	34	22,219	44	22,221
5	22,220	15	22,217	25	22,216	35	22,219	45	22,220
6	22,222	16	22,218	26	22,219	36	22,222	46	22,220
7	22,222	17	22,220	27	22,218	37	22,222	47	22,219
8	22,222	18	22,219	28	22,216	38	22,219	48	22,218
9	22,222	19	22,219	29	22,216	39	22,217	49	22,219
10	22,219	20	22,22	30	22,217	40	22,221	50	22,219

Tabulka 14: Tabulka naměřených hodnot PT100/3850 Agilentem 34972A

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	22,945	11	22,915	21	22,910	31	22,905	41	22,896
2	22,942	12	22,915	22	22,908	32	22,904	42	22,896
3	22,926	13	22,914	23	22,904	33	22,904	43	22,898
4	22,921	14	22,912	24	22,908	34	22,903	44	22,896
5	22,922	15	22,916	25	22,909	35	22,902	45	22,897
6	22,919	16	22,912	26	22,906	36	22,901	46	22,893
7	22,92	17	22,914	27	22,904	37	22,899	47	22,895
8	22,92	18	22,914	28	22,903	38	22,901	48	22,895
9	22,917	19	22,912	29	22,902	39	22,900	49	22,895
10	22,913	20	22,909	30	22,902	40	22,899	50	22,893

6.4.2 Naměřené hodnoty při 50°C

Tabulka 15: Tabulka naměřených hodnot pro termočlánek J

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	49,768	11	49,820	21	49,748	31	49,773	41	49,812
2	49,822	12	49,779	22	49,744	32	49,796	42	49,795
3	49,793	13	49,733	23	49,804	33	49,767	43	49,818
4	49,758	14	49,777	24	49,742	34	49,773	44	49,806
5	49,791	15	49,756	25	49,808	35	49,787	45	49,799
6	49,81	16	49,787	26	49,791	36	49,802	46	49,781
7	49,778	17	49,758	27	49,785	37	49,744	47	49,746
8	49,801	18	49,785	28	49,804	38	49,791	48	49,793
9	49,829	19	49,812	29	49,763	39	49,765	49	49,781
10	49,777	20	49,746	30	49,777	40	49,812	50	49,787

Tabulka 16: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	49,905	11	49,932	21	49,931	31	49,941	41	49,931
2	49,910	12	49,931	22	49,930	32	49,943	42	49,933
3	49,912	13	49,939	23	49,926	33	49,943	43	49,934
4	49,890	14	49,935	24	49,929	34	49,939	44	49,937
5	49,915	15	49,937	25	49,928	35	49,932	45	49,940
6	49,920	16	49,939	26	49,928	36	49,935	46	49,939
7	49,929	17	49,941	27	49,928	37	49,931	47	49,938
8	49,929	18	49,937	28	49,931	38	49,932	48	49,936
9	49,925	19	49,934	29	49,932	39	49,942	49	49,932
10	49,935	20	49,932	30	49,938	40	49,940	50	49,929

Tabulka 17: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180/A

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	49,964	11	49,979	21	49,996	31	49,988	41	49,984
2	49,963	12	49,978	22	50,002	32	49,990	42	49,986
3	49,970	13	49,978	23	50,001	33	49,977	43	49,988
4	49,971	14	49,974	24	49,998	34	49,967	44	49,987
5	49,973	15	49,973	25	49,996	35	49,981	45	49,982
6	49,969	16	49,980	26	49,989	36	49,989	46	49,981
7	49,968	17	49,983	27	49,992	37	49,981	47	49,987
8	49,975	18	49,986	28	49,994	38	49,981	48	49,991
9	49,973	19	49,989	29	49,989	39	49,982	49	49,992
10	49,976	20	49,990	30	49,991	40	49,979	50	49,989

Tabulka 18: Tabulka naměřených hodnot pro PT100/3850 MILLIKem

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	49,850	11	49,861	21	49,866	31	49,875	41	49,883
2	49,850	12	49,868	22	49,872	32	49,882	42	49,884
3	49,844	13	49,870	23	49,875	33	49,880	43	49,880
4	49,845	14	49,873	24	49,880	34	49,877	44	49,879
5	49,853	15	49,873	25	49,881	35	49,881	45	49,880
6	49,858	16	49,870	26	49,884	36	49,887	46	49,882
7	49,857	17	49,869	27	49,883	37	49,892	47	49,883
8	49,955	18	49,870	28	49,884	38	49,891	48	49,888
9	49,856	19	49,869	29	49,880	39	49,887	49	49,891
10	49,857	20	49,865	30	49,874	40	49,881	50	49,892

Tabulka 19: Tabulka naměřených hodnot pro Termočlánek typu K MILLIKem

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	49,931	11	49,903	21	49,895	31	49,951	41	49,920
2	49,874	12	49,927	22	49,948	32	49,918	42	49,956
3	49,912	13	49,914	23	49,859	33	49,936	43	49,946
4	49,890	14	49,911	24	49,911	34	49,926	44	49,934
5	49,915	15	49,934	25	49,908	35	49,920	45	49,885
6	49,889	16	49,893	26	49,920	36	49,953	46	49,928
7	49,935	17	49,928	27	49,913	37	49,925	47	49,939
8	49,929	18	49,967	28	49,940	38	49,932	48	49,901
9	49,925	19	49,937	29	49,902	39	49,944	49	49,919
10	49,934	20	49,855	30	49,955	40	49,912	50	49,905

Tabulka 20: Tabulka naměřených hodnot PT100 GMH 3710

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	49,86	2	49,85	3	49,87	4	49,87	5	49,90
6	49,90	7	49,93	8	49,87	9	49,89	10	49,90

6.4.3 Naměřené hodnoty při 70°C

Tabulka 21: Tabulka naměřených hodnot pro termočlánek J

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	69,749	11	69,757	21	69,747	31	69,737	41	69,725
2	69,714	12	69,729	22	69,747	32	69,718	42	69,766
3	69,710	13	69,720	23	69,749	33	69,712	43	69,754
4	69,722	14	69,737	24	69,729	34	69,737	44	69,766
5	69,753	15	69,745	25	69,741	35	69,735	45	69,758
6	69,733	16	69,747	26	69,759	36	69,716	46	69,754
7	69,751	17	69,749	27	69,741	37	69,739	47	69,742
8	69,761	18	69,716	28	69,724	38	69,734	48	69,773
9	69,714	19	69,745	29	69,735	39	69,758	49	69,763
10	69,751	20	69,720	30	69,694	40	69,740	50	69,776

Tabulka 22: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	69,912	11	69,928	21	69,939	31	69,941	41	69,933
2	69,909	12	69,929	22	69,938	32	69,945	42	69,936
3	69,915	13	69,923	23	69,941	33	69,948	43	69,934
4	69,916	14	69,926	24	69,942	34	69,948	44	69,929
5	69,917	15	69,926	25	69,936	35	69,947	45	69,926
6	69,92	16	69,93	26	69,931	36	69,943	46	69,927
7	69,925	17	69,931	27	69,931	37	69,942	47	69,928
8	69,921	18	69,933	28	69,934	38	69,941	48	69,929
9	69,923	19	69,931	29	69,939	39	69,94	49	69,929
10	69,922	20	69,932	30	69,94	40	69,939	50	69,93

Tabulka 23: Tabulka naměřených hodnot pro niklový odporový senzor Ni/6180/A

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	69,992	11	70,001	21	70,009	31	70,025	41	70,034
2	69,996	12	69,994	22	70,013	32	70,024	42	70,034
3	69,999	13	69,992	23	70,017	33	70,019	43	70,035
4	69,999	14	69,991	24	70,014	34	70,027	44	70,032
5	69,998	15	69,996	25	70,014	35	70,029	45	70,032
6	69,996	16	69,998	26	70,011	36	70,031	46	70,034
7	69,995	17	69,999	27	70,019	37	70,032	47	70,038
8	70	18	70,002	28	70,02	38	70,032	48	70,039
9	70,002	19	70,002	29	70,021	39	70,03	49	70,039
10	70,003	20	70,003	30	70,022	40	70,031	50	70,037

Tabulka 24: Tabulka naměřených hodnot pro PT100/3850 MILLIKem

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	69,860	11	69,871	21	69,881	31	69,891	41	69,876
2	69,864	12	69,869	22	69,882	32	69,890	42	69,881
3	69,864	13	69,867	23	69,885	33	69,894	43	69,888
4	69,862	14	69,869	24	69,889	34	69,898	44	69,890
5	69,864	15	69,866	25	69,890	35	69,897	45	69,887
6	69,869	16	69,868	26	69,894	36	69,894	46	69,885
7	69,868	17	69,869	27	69,899	37	69,920	47	69,875
8	69,872	18	69,876	28	69,897	38	69,888	48	69,877
9	69,873	19	69,880	29	69,893	39	69,883	49	69,881
10	69,873	20	69,881	30	69,891	40	69,878	50	69,882

Tabulka 25: Tabulka naměřených hodnot pro Termočlánek typu K MILLIKem

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	69,847	11	69,837	21	69,841	31	69,864	41	69,857
2	69,851	12	69,850	22	69,838	32	69,852	42	69,836
3	69,845	13	69,821	23	69,833	33	69,833	43	69,861
4	69,798	14	69,800	24	69,856	34	69,844	44	69,835
5	69,830	15	69,842	25	69,800	35	69,853	45	69,897
6	69,844	16	69,825	26	69,842	36	69,848	46	69,888
7	69,803	17	69,834	27	69,826	37	69,847	47	69,820
8	69,850	18	69,850	28	69,846	38	69,838	48	69,822
9	69,845	19	69,824	29	69,840	39	69,866	49	69,824
10	69,808	20	69,856	30	69,836	40	69,822	50	69,868

Tabulka 26: Tabulka naměřených hodnot PT100 GMH 3710

č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]	č.m.	θ [°C]
1	69,91	2	69,90	3	69,90	4	69,91	5	69,93
6	69,95	7	69,97	8	69,98	9	69,97	10	69,98

6.5. Vypočtené hodnoty

6.5.1 Pro θ = 20 °C

Pro termočlánek typu J (měřený Agilentem 34972A)

Aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^n x_i = 20,145 \text{ °C}$

Nejistota typu A

$$u_A(\vartheta) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{50(50-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - 20,145)^2} = 0,002 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nejistota typu B

Nejistota přístroje Agilent (pro termočlánek J je udávaná tolerance $\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$)

$$u_B(z_{j1}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Stabilita termostatu ($0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$)

$$u_B(z_{j2}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,006 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tolerance termočláneku typu J: $\pm 0,004 \cdot 9 \text{ } ^\circ\text{C}$ (pro třídu 1) = $\pm 0,08 \text{ } ^\circ\text{C}$,

pak nejistota $u_B(z_{j3}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,08}{\sqrt{3}} = 0,046 \text{ } ^\circ\text{C}$

Nejistota typu B pro termočlánek typu J: $\Delta_B \vartheta = \sqrt{(u_B z_{j1})^2 + (u_B z_{j2})^2 + (u_B z_{j3})^2} = 0,579 \text{ } ^\circ\text{C}$

Kombinovaná standardní nejistota: $u_c(\vartheta) = \sqrt{u_A^2(\vartheta) + u_B^2(\vartheta)} = \sqrt{0,002^2 + 0,577^2} = 0,579 \text{ } ^\circ\text{C}$

Rozšířená nejistota: $U(\vartheta) = k \cdot u_c(\vartheta) = 2 \cdot 0,579 = 1,158 \text{ } ^\circ\text{C}$

Výsledek měření:

$$\vartheta = (\bar{x} \pm u_c) = (20,15 \pm 1,16) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pro PT100/3850 (měřený MILLIKem)

Aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^n x_i = 19,935 \text{ } ^\circ\text{C}$

Nejistota typu A

$$u_A(\vartheta) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{50(50-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - 19,935)^2} = 0,001 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nejistota typu B

Nejistota přístroje MILLIK (pro PT100 je udávaná nejistota $0,005 \text{ } ^\circ\text{C}$)

$$u_B(z_{j1}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 0,003 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Stabilita termostatu ($0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$)

$$u_B(z_{j2}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,006 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tolerance platinového odporového snímače: $\pm(0,3 + 0,005|\vartheta|) = \pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$$\text{pak nejistota } u_B(z_{j3}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,231\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Nejistota typu B pro PT100: } \Delta_B \vartheta = \sqrt{(u_B z_{j1})^2 + (u_B z_{j2})^2 + (u_B z_{j3})^2} = 0,231\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Kombinovaná standardní nejistota: } u_c(\vartheta) = \sqrt{u_A^2(\vartheta) + u_B^2(\vartheta)} = \sqrt{0,001^2 + 0,231^2} = 0,231\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Rozšířená nejistota: } U(\vartheta) = k \cdot u_c(\vartheta) = 2 \cdot 0,231 = 0,462\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Výsledek měření:

$$\vartheta = (\bar{x} \pm u_c) = (19,94 \pm 0,46)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Pro Ni1000/6180/A (měřený Agilentem 34972A)

$$\text{Aritmetický průměr: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^n x_i = 20,1213\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nejistota typu A

$$u_A(\vartheta) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{50(50-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - 20,145)^2} = 0,0007\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nejistota typu B

Nejistota přístroje Agilent (pro odporová čidla je udávaná nejistota $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$$u_B(z_{j1}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,06}{\sqrt{3}} = 0,0346\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Stabilita termostatu (0,01 }^{\circ}\text{C)} \quad u_B(z_{j2}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,006\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tolerance niklového odporového snímače třídy A: $\pm(0,2 \pm 0,0035|\vartheta|) = \pm 0,270\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$$\text{pak nejistota } u_B(z_{j3}) = \frac{z_{j\max}}{\kappa} = \frac{0,09}{\sqrt{3}} = 0,156\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Nejistota typu B pro Ni1000/6180: } \Delta_B \vartheta = \sqrt{(u_B z_{j1})^2 + (u_B z_{j2})^2 + (u_B z_{j3})^2} = 0,160\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Kombinovaná standardní nejistota: } u_c(\vartheta) = \sqrt{u_A^2(\vartheta) + u_B^2(\vartheta)} = \sqrt{0,0007^2 + 0,2793^2} = 0,160\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Rozšířená nejistota: } U(\vartheta) = k \cdot u_c(\vartheta) = 2 \cdot 0,160 = 0,320\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Výsledek měření:

$$\vartheta = (\bar{x} \pm u_c) = (20,12 \pm 0,32)\text{ }^{\circ}\text{C}$$

6.6. Tabulky vypočtených hodnot

Tabulka 27: Tabulky vypočtených hodnot

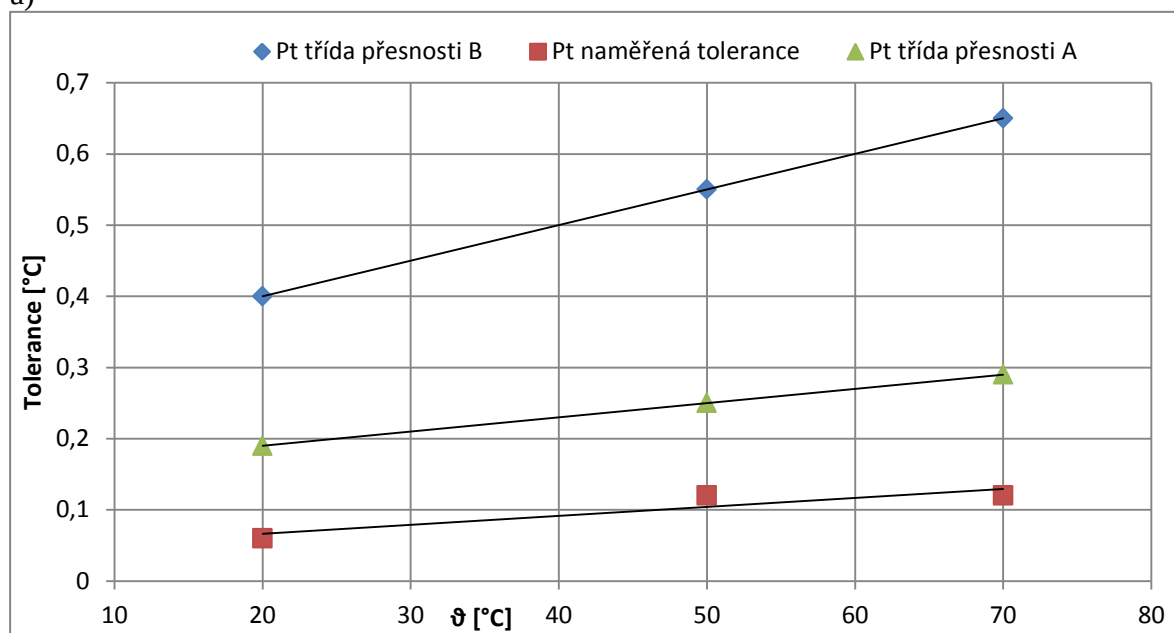
Pro $\vartheta = 20^{\circ}\text{C}$		Nejistota typu A ($^{\circ}\text{C}$)	Nejistota typu B ($^{\circ}\text{C}$)	Výsledek měření ($^{\circ}\text{C}$)
MILLIK	PT100/3850	0,001	0,231	19,94+-0,46
	Termočlánek typu K	0,002	0,074	19,93+-0,15
Agilent 34972A	Termočlánek typu J	0,002	0,579	20,15+-1,16
	PT100/3850	0,0002	0,234	22,22+-0,47
	PT100/3850/A	0,002	0,12	22,91+-0,23
	Ni1000/6180	0,001	0,314	19,99+-0,63
	Ni1000/6180A	0,0007	0,16	20,12+-0,32
GMH 3710	PT100/3850	0,005	0,232	19,93+-0,46

Pro $\vartheta = 50^{\circ}\text{C}$		Nejistota typu A ($^{\circ}\text{C}$)	Nejistota typu B ($^{\circ}\text{C}$)	Výsledek měření ($^{\circ}\text{C}$)
MILLIK	PT100/3850	0,002	0,318	49,88+-0,64
	Termočlánek typu K	0,003	0,122	49,92+-0,25
Agilent 34972A	Termočlánek typu J	0,003	0,589	49,78+-1,18
	Ni1000/6180	0,001	0,434	50,06+-0,87
	Ni1000/6180A	0,001	0,219	49,98+-0,44
GMH 3710	PT100/3850	0,008	0,318	49,88+-0,64

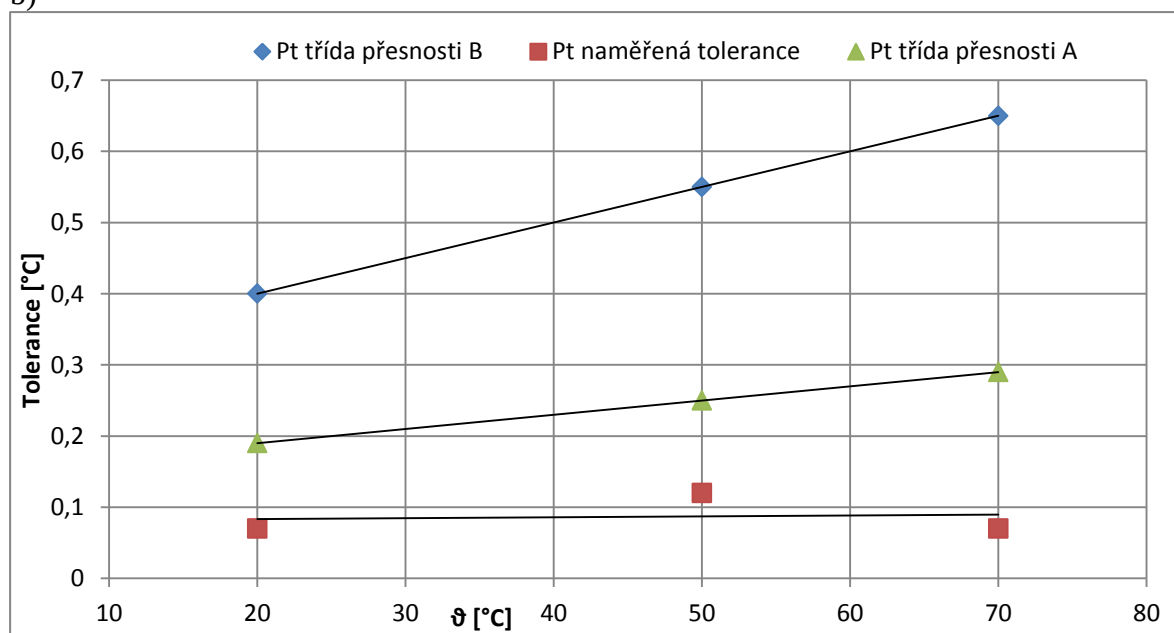
Pro $\vartheta = 70^{\circ}\text{C}$		Nejistota typu A ($^{\circ}\text{C}$)	Nejistota typu B ($^{\circ}\text{C}$)	Výsledek měření ($^{\circ}\text{C}$)
MILLIK	PT100/3850	0,002	0,375	69,88+-0,75
	Termočlánek typu K	0,003	0,172	69,84+-0,344
Agilent 34972A	Termočlánek typu J	0,003	0,599	69,74+-1,20
	Ni1000/6180	0,001	0,515	69,93+-1,03
	Ni1000/6180A	0,002	0,265	70,02+-0,53
GMH 3710	PT100/3850	0,014	0,376	69,93+-0,75

6.7 Grafy závislosti tolerance čidel při měřených teplotách

a)

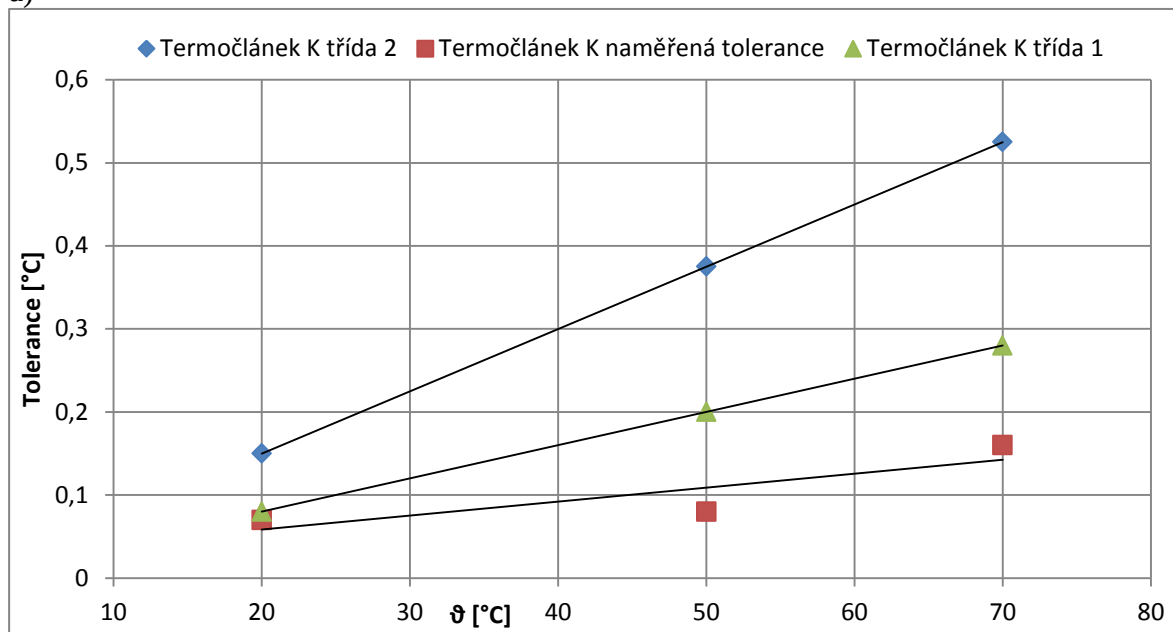


b)

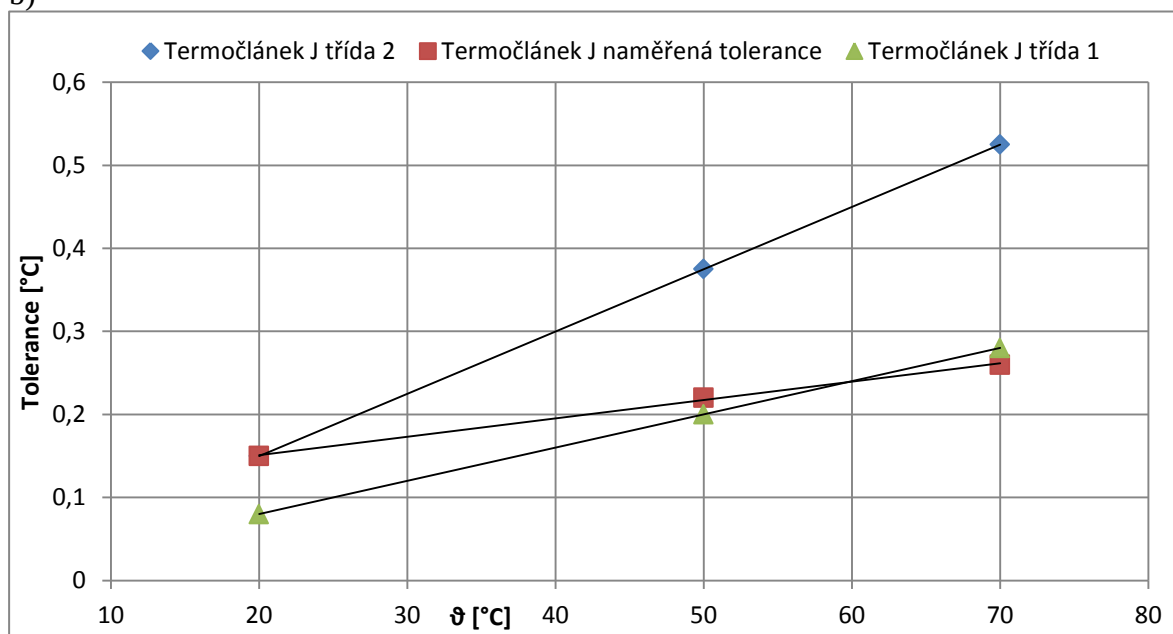


Obrázek 27: Závislost tolerančních tříd platinových čidel na referenční teplotě (20 °C, 50 °C, 70 °C): a)MILLIKem b)GMH 3710

a)

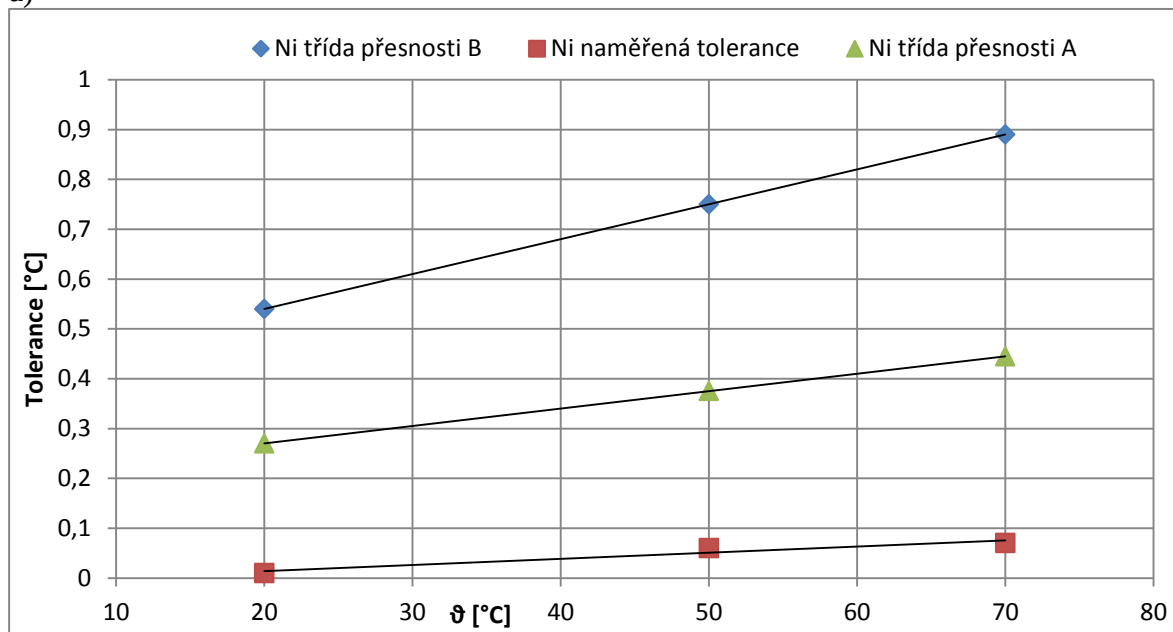


b)

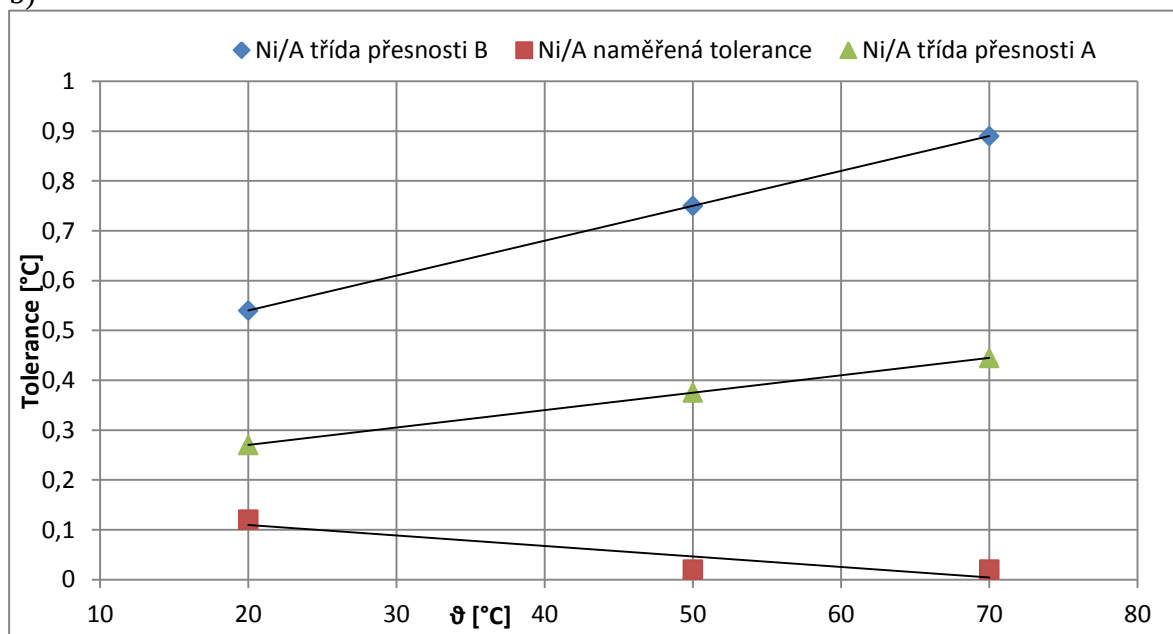


Obrázek 28: Závislost tolerančních tříd termočláneků na referenční teplotě (20 °C, 50 °C, 70 °C): a) typ K měřený MILLIKem b) typ J měřený Agilentem 34972A

a)



b)



Obrázek 29: Závislost tolerančních tříd niklových čidel na referenční teplotě (20 °C, 50 °C, 70 °C) měřených Agilentem 34972A: a)Ni1000/6180 b)Ni1000/6180/A

6.8 Vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty jsou zpracovány v tabulkách pro teploty 20 °C, 50 °C a 70 °C. Pro minimalizaci nejistoty typu A bylo naměřeno 50 hodnot v rámci jedné teploty u přístrojů MILLIK a Agilent 34972A, u GMH 3710 to bylo 10 hodnot, jelikož teploměr nedisponuje připojením k síti LAN, čili zde se jednalo o ruční měření teploty.

Z výsledků lze vyčíst, že směrodatná odchylka se pohybuje v řádech tisícín, někdy i desetitisícín, čili to poukazuje na vysoké přesnosti a stabilitu jak čidel tak i měřících přístrojů. Se stoupající teplotou se nejistota nijak zvlášť neměnila u žádného z měřených čidel.

U výsledků nejistot typu B se zohledňovala tolerance čidla dle teploměru, tolerance teplotní lázně a tolerance v rámci tříd přesností daných normou DIN 60751, to se projevuje zvýšenou nejistotou při vyšších teplotách. Relativně velkou nejistotu lze sledovat u termočlánu typu J, jelikož Agilent udává toleranci pro termočlánek $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, se zvyšující teplotou se však tato hodnota příliš nemění v závislosti tolerance termočlánu. Nejnížší nejistotu lze pozorovat u termočlánu typu K měřeného MILLIKem, jelikož tento teploměr udává přesnost měření $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Technické údaje měřících přístrojů jsou uvedeny v příloze i na kompaktním disku.

Pro všechny nejistoty byla vypočítána i rozšířená standardní nejistota. Hodnoty pro PT100/3850 a PT100/3850A měřených Agilentem, byly vyhodnoceny pouze pro teplotu $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je třeba je brát s rezervou, protože při nastavení teploty kapaliny v lázni měřily nesprávné hodnoty. Chyba se mohla vyskytnout ve výrobě čidel, v nastavení parametrů v přístroji se chyba nenašla. Hodnoty platinových čidel měřených MILLIKem a GMH 3710 byly takřka stejné, čili k měření teploty kapaliny postačí GMH 3710, prokázal, že měří s vysokou přesností.

7 Laboratorní úloha

Název úlohy: Měření teploty

Zadání úlohy:

- a) Vytvořte teoretický rozbor k problematice měření teploty
 - definujte pojem teplota
 - popište jednotlivá čidla využívající se pro měření teploty (odporová, termočlánu a termistory)
 - seznámte se s nejistotami měření
- b) Proměřte teplotu kapaliny s využitím
 - platinového odporového čidla
 - niklového odporového čidla
 - termočlánu typu K, J
- c) Porovnejte výsledky jednotlivých čidel (určete nejistotu měření)
- d) Popište, případně určete, možné chyby a nepřesnosti měření

8 Závěr

V průběhu vypracování práce jsem se seznámil s problematikou odporových čidel používaných k měření teploty (kovových i polovodičových). Nejvhodnější k přesnému měření jsou kovové odporové senzory zejména pak platinový, který je možno použít ve velkém rozsahu hodnot. Niklový disponuje vysokou přesností, avšak nelze ho použít pro měření vysokých teplot nad 180 °C, pro použití běžných hodnot teplot však vystačí.

Součástí bakalářské práce bylo sestavit měřicí pracoviště pro dlouhodobé sledování teploty v oblasti běžně používaných hodnot. Práce se zdařila a je možné monitorovat teploty od 0 °C do 100 °C v teplotní lázni. Pro sledování záporných hodnot by závěsný termostat musel být vybaven chladicí spirálou. Přístroj MILLIK se podařilo propojit s PC a je zde možnost ovládání teploměru po nainstalování softwarů, které jsou součástí obsahu CD práce. V ovládacím prostředí Agilent VEE byl vytvořen program, který po stisknutí startovacího tlačítka měří teploty či odpory všech čidel, která jsou v přístroji namontována.

Měření proběhlo ve třech teplotních bodech s využitím různých teploměrů a snímačů teploty. Nejistoty jsou vyjádřeny matematicky, kdy nejistota typu A by se mohla zanedbat, jelikož při měření 50 hodnot jedné teploty se pohybovala v řádech tisícín. Podle grafů závislosti tolerančních tříd dle uvedených čidel na referenční teplotě (za referenční byla pokládána teplota kapaliny, jež byla nastavena v teplotní lázni) lze vyčíst, že všechna čidla s výjimkou termočlánu typu J, který překročil toleranční třídu 1 při 20 a 50 °C se s rezervou vlezly do tolerance třídy A, resp. třídy 1 pro termočlánek. Pro měření kapalin v běžném teplotním rozsahu v oboru kladných hodnot lze použít jakýkoliv z výše uvedených čidel s vysokou přesností, avšak pokud chceme co možná nejvyšší kvalitu čidla musíme sáhnout po platinovém či niklovém snímači teploty.

Zadání obsahovalo i vytvoření laboratorní úlohy. V úloze s názvem měření teploty se studenti seznámí s jednotlivými teplotními čidly, nejistotami měření a zápisu a vyhodnocení výsledku měření. Tato úloha může být využita v předmětu diagnostika a zkušebnictví.

9 Seznam použité literatury

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [2] KŘENOVSKÝ, R. Měření teploty prostředky moderní automatizace. In: *Mendelova univerzita v brně* [online]. Brno, 2009 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: http://mnet.mendelu.cz/mendelnet08agro/files/articles/tech_krenovsky.pdf
- [3] GABRHELOVÁ, L., M. HUDECZEK a J. BRYCHCY. Souvislost mezi teplotou a vibracemi v diagnostice rotačních strojů. In: *Technická univerzita v Košiciach* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/25-2013/pdf/043-046.pdf>
- [4] STŘÍTESKÁ, R. *Moderní metody měření teploty*. Brno, 2010. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Masarykova univerzita v Brně.
- [5] ADÁMEK, M. Odporové senzory teploty. *Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně* [online]. 2002 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_3_2_4.htm
- [6] HANÁK, V. *Systém měření teploty s výstupem Ethernet*. Brno, 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14857. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [7] VOJÁČEK, A. Teorie zpracování signálu platinových teplotních senzorů. In: *Automatizace.HW.cz* [online]. Praha, 2014 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/zpracovani-signalu-platinovych-senzoru>
- [8] DEMKO, V. Snímače teploty. In: [online]. Košice, 2014 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.meratex.cz/merici-pristroje/snimace-teploty>
- [9] KAŠPAR. Odporový snímač teploty, měřicí systém a bezkontaktní teploměr. In: *České vysoké učení technické v Praze - Fakulta elektrotechnická* [online]. Praha, 8.1.2013 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/cviceni/1_1_odporovy%20senzor%20teploty.pdf
- [10] JEŽKOVÁ, A. a ROBENEK, J. Měření teploty - kovové odporové senzory teploty. In: ROBENEK, J. *Hw.cz* [online]. Praha, 20.5.2004 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [11] JEŽKOVÁ, A. a ROBENEK, J. Měření teploty - kovové odporové senzory teploty. In: ROBENEK, J. *Hw.cz* [online]. Praha, 20.5.2004 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>

- [12] KOVÁŘ, J, Z PROKOPOVÁ a L ŠMEJKAL. PLC-HARDWARE-LYT. In: *Střední průmyslová škola Zlín* [online]. 8.10.2010 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: http://www.spszl.cz/soubory/plc/plc_hardware_lyt.pdf
- [13] FLEK, T. *Elektronický termostat*. Brno, 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17274. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Lattenberg Ivo.
- [14] BABÍK, Z. *Výukový modul pro předmět mikropočítače: jednoduchá tepelná soustava*. Zlín, 2007. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/3268/bab%C3%ADk_2007_bp.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [15] ŽIVOTA, M. SmartFan – ventilátor na krbová kamna. In: *SmartFan – ventilátor na krbová kamna* [online]. 2013 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://www.ventilatornakamna.cz/jak-funguje/>
- [16] SCHOVÁNEK, P a V HAVRÁNEK. Nejistoty měření. In: *České vysoké učení technické v Praze - fakulta strojní* [online]. Praha, 24.10.2005 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [17] BLANARČÍK, P. *Způsobilost procesů měření*. Brno, 2006. Dostupné z: http://uai.fme.vutbr.cz/szz/2006/DP_Blanarcik.pdf. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [18] ČERNÝ, M. Zápis číselných hodnot a nejistoty měření. In: *Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství* [online]. Brno, 27.1.2012 [cit. 2014-12-15]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/vyuka/chyby.pdf>
- [19] JEŽKOVÁ, A. a ROBENEK, J. Měření teploty v průmyslu. In: ROBENEK, J. *Hw.cz* [online]. Praha, 27.8.2004 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-v-prumyslu.html>
- [20] ŠTĚTINA, J, M JAROŠ a P RAMÍK. Odporové snímače. In: *Vysoké učení technické v Brně- Fakulta strojního inženýrství* [online]. Brno, 2003 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-01.htm>
- [21] REICHL, J. Seebeckův jev. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2014 [cit. 2014-12-17].
- [22] ISOTECH. MILLIK- *Návod k použití/příručka*. 2013, 82 s. Dostupné z: <http://www.isotech.co.uk>
- [23] REICHSTÄDTER, L. Termostat závěsný HUBER CC-E Pilot ONE Basic. In: *Merci.cz- 20 let uspesne spoluprace* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.merci.cz/zbozi/z1398000000101/>

- [24] VDOLEČEK, F a M HALAJ. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *FCC public časopisy a knihy navazující na tradici české odborné literatury* [online]. 2001, č. 10 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf>
- [25] VOJÁČEK, A. Přehled principů el. Měření teploty – 1. In: ROBENEK, J. *Hw.cz* [online]. Praha, 24.6.2014 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [26] GÜNTHER, Paul. Konstrukce a funkce termočlánků. In: *Günther GmbH* [online]. 2013 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/805a74a9-7235-cdf2-2323-717e02f019e4?Edition=cz>
- [27] FILIP, Petr. *TERMOČLÁNKY: KONSTRUKCE, VYUŽITÍ A ÚČINNOST* [online]. In: . 2014 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>
- [28] RENC, Anita. Pt100 - High-Precision Thermometer. In: *GMH-Greisinger* [online]. [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.greisinger.de/files/upload/en/produkte/kat/5.pdf>
- [29] MANUALSLIB.COM,. *34970A/34972A Data Acquisition / Switch Unit User's Guide* [online]. 2009 [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.keysight.com/en/pd-1756491-pn-34972A/lxi-data-acquisition-data-logger-switch-unit?&cc=CZ&lc=eng>
- [30] KONEČNÝ, Jiří. *LABORATORNÍ TEPLOMĚR S ČIDLEM PT100*. Brno, 2011. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=41729. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně (VUT). Vedoucí práce Doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

Zkratky, symboly, přílohy

°C	stupeň Celsia
α	teplotní součinitel odporu
A	konstanta závislá na geometrickém tvaru a materiálu termistoru
Au	zlato
Ag	stříbro
B	teplotní konstanta daná materiálem termistoru
Cu	měď
ČSN	česká technická norma
e	elementární náboj
E	napětí u termočlánku
K	Kelvin
m	efektivní hmotnost nosiče náboje
Mo	molybden
n	počet elektronů v jednotkovém objemu
Ni	nikl
NTC	negastor
Pt	platina
PTC	pozistor
σ	konduktivita
τ	relaxační čas elektronů
R	odpor
T	termodynamická teplota
TKR	teplotní koeficient odporu
W	poměr elektrického odporu
u_a	standardní nejistota typu A
u_b	standardní nejistota typu B
u_c	kombinovaná standardní nejistota
u	rozšířená standardní nejistota

Seznam příloh

A Technické údaje MILLIK[22]

Vstupy	Kanal 1 a 2 Kanal 3 (zadní panel)	Odp. teploměr SPRT/PRT, termistor, termočlánek Proudová smyčka 4-20 mA (případně s 24V zdrojem)
Rozsahy	SPRT: PRT: Termistor: Termočlánek: 4-20 mA:	0-115 Ω 0-460 Ω 0-500kΩ ±115 mV 0-30 mA
Jednotky		°C, °F, K, Ω, mV, mA
Přesnost	SPRT/PRT Termistory Termočláanky 4-20 mA	Počáteční 5 ppm 50 ppm 2 μV (při 50 mV) ±0,01% Po dobu 1 roku 7 ppm 150 ppm 4 μ (při 50 mV) ±0,02%
Přesnost teploty	SPRT/PRT při 0 °C v celém rozsahu Termistory: Termočláanky: Typ B: Typ E: Typ J: Typ K: Typ L: Typ N: Typ R: Typ S: Typ T: Au-Pt:	Počáteční 3 mK 5 mK 50 ppm ±0,23 °C ±0,03 °C ±0,04 °C ±0,05 °C ±0,04 °C ±0,06 °C ±0,17 °C ±0,19 °C ±0,05 °C ±0,12 °C Po dobu 1 roku 4 mK 7 mK 150 ppm ±0,46 °C ±0,06 °C ±0,07 °C ±0,10 °C ±0,07 °C ±0,12 °C ±0,34 °C ±0,38 °C ±0,09 °C ±0,23 °C
Rozlišení	Odpor PRT: Termistory: Napětí: Proud: Teplota:	0,00001 Ω 0,001 Ω 0,00001 mV 0,001 mA 0,0001 °C
Teplotní konverze	PRT: Termočláanky: Termistory:	IEC60751 (2008). Callendar-van Dusen, ITS90 IEC584-1 1995 (B,E,J,K,N,R,S,T), L, Au-Pt Steinhart-Hart, polynomická
Proudový senzor	SPRT/PRT: Termistory:	1 mA a 1,428 mA ±0,4% (reverzující) 2 μA (reverzující)
Zahřívací proud	SPRT/PRT	1 mA a 1,428 mA
Délka kabelu		30 m (<10 Ω na žílu a < 10 nF mezi žilami)
Vstupní konektory	SPRT/PRT: Termočláanky: 4-20 mA	Lemo EPG.1B.306.HLN 6-pin s pozlacenými kontakty Miniaturní termočláanková zásuvka (ASTM E 1684-05) 4-mm zdířky
Interface		10/100 Mbit Ethernet (RJ45 konektor) USB (2.0) host 2 x RS232 (9-ti pinová zásuvky typu D, 9600 Bd)
Displej		89 mm/ 3,5" QVGA (320 x 240) colour TFT LCD s osvětlením long-life LED
Provozní prostředí	Provozní: Full Specification:	0-40 °C, vlhkost vzduchu 0-95% 15-30 °C, vlhkost vzduchu 10-90%
Napájení		90-264 V~ (RMS), 47-63 Hz (univerzální), 6W maximálně
Rozměry		255 x 255 x 114 mm (šířka x hloubka x výška)
Hmotnost		2,25 kg

B Technické údaje Agilent 34972A[29]

34970A/34972A accuracy specifications $\pm$ (% of reading + % of range)^[1]

Includes measurement error, switching error, and transducer conversion error

Range ^[3]		Frequency, etc.	24 hour ^[2] 23 °C $\pm$ 1 °C	90 Day 23 °C $\pm$ 5 °C	1 Year 23 °C $\pm$ 5 °C	Temperature coefficient 0 °C–18 °C, 28 °C–55 °C
DC voltage						
	100.0000 mV		0.0030 + 0.0035	0.0040 + 0.0040	0.0050 + 0.0040	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	300.000 V		0.0020 + 0.0020	0.0035 + 0.0030	0.0045 + 0.0030	0.0005 + 0.0003
True RMS AC voltage^[4]						
All ranges from 100.0000 mV to 100.0000 V	3 Hz–5 Hz		1.00 + 0.03	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.004
	5 Hz–10 Hz		0.35 + 0.03	0.35 + 0.04	0.35 + 0.04	0.035 + 0.004
	10 Hz–20 kHz		0.04 + 0.03	0.05 + 0.04	0.06 + 0.04	0.005 + 0.004
	20 kHz–50 kHz		0.10 + 0.05	0.11 + 0.05	0.12 + 0.05	0.011 + 0.005
	50 kHz–100 kHz		0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
	100 kHz–300 kHz ^[5]		4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
300.0000 V	3 Hz–5 Hz		1.00 + 0.05	1.00 + 0.08	1.00 + 0.08	0.100 + 0.008
	5 Hz–10 Hz		0.35 + 0.05	0.35 + 0.08	0.35 + 0.08	0.035 + 0.008
	10 Hz–20 kHz		0.04 + 0.05	0.05 + 0.08	0.06 + 0.08	0.005 + 0.008
	20 kHz–50 kHz		0.10 + 0.10	0.11 + 0.12	0.12 + 0.12	0.011 + 0.012
	50 kHz–100 kHz		0.55 + 0.20	0.60 + 0.20	0.60 + 0.20	0.060 + 0.020
	100 kHz–300 kHz ^[5]		4.00 + 1.25	4.00 + 1.25	4.00 + 1.25	0.20 + 0.05
Resistance^[6]						
	100.0000 Ω	1 mA current source	0.0030 + 0.0035	0.008 + 0.004	0.010 + 0.004	0.0006 + 0.0005
	1.000000 k Ω	1 mA	0.0020 + 0.0006	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	10.00000 k Ω	100 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	100.0000 k Ω	10 μ A	0.0020 + 0.0005	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0006 + 0.0001
	1.000000 M Ω	5.0 μ A	0.002 + 0.001	0.008 + 0.001	0.010 + 0.001	0.0010 + 0.0002
	10.00000 M Ω	500 nA	0.015 + 0.001	0.020 + 0.001	0.040 + 0.001	0.0030 + 0.0004
	100.0000 M Ω	500 nA 10 M Ω	0.300 + 0.010	0.800 + 0.010	0.800 + 0.010	0.1500 + 0.0002
Frequency and period^[7]						
100 mV to 300 V	3 Hz–5 Hz		0.10	0.10	0.10	0.005
	5 Hz–10 Hz		0.05	0.05	0.05	0.005
	10 Hz–40 Hz		0.03	0.03	0.03	0.001
	40 Hz–300 kHz		0.006	0.01	0.01	0.001
DC current (34901A only)						
	10.00000 mA	<0.1 V burden	0.005 + 0.010	0.030 + 0.020	0.050 + 0.020	0.002 + 0.0020
	100.0000 mA	<0.6 V	0.010 + 0.004	0.030 + 0.005	0.050 + 0.005	0.002 + 0.0005
	1.000000 A	<2 V	0.050 + 0.006	0.080 + 0.010	0.100 + 0.010	0.005 + 0.0010
True RMS AC current (34901A only)						
10.00000 mA and ^[4] 1.000000 A	3 Hz–5 Hz		1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.006
	5 Hz–10 Hz		0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.30 + 0.04	0.035 + 0.006
	10 Hz–5 kHz		0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.10 + 0.04	0.015 + 0.006
100.0000 mA ^[8]	3 Hz–5 Hz		1.00 + 0.5	1.00 + 0.5	1.00 + 0.5	0.100 + 0.06
	5 Hz–10 Hz		0.30 + 0.5	0.30 + 0.5	0.30 + 0.5	0.035 + 0.06
	10 Hz–5 kHz		0.10 + 0.5	0.10 + 0.5	0.10 + 0.5	0.015 + 0.06
Temperature						
Thermocouple^[10]	Type	1-year accuracy ^[9]	Extended range 1-year accuracy ^[9]		Temp coefficient/°C	
	B	1100 °C to 1820 °C	1.2 °C	400 °C to 1100 °C	1.8 °C	
	E	–150 °C to 1000 °C	1.0 °C	–200 °C to –150 °C	1.5 °C	
	J	–150 °C to 1200 °C	1.0 °C	–210 °C to –150 °C	1.2 °C	
	K	–100 °C to 1200 °C	1.0 °C	–200 °C to –100 °C	1.5 °C	0.03 °C
	N	–100 °C to 1300 °C	1.0 °C	–200 °C to –100 °C	1.5 °C	
	R	300 °C to 1760 °C	1.2 °C	–50 °C to 300 °C	1.8 °C	
	S	400 °C to 1760 °C	1.2 °C	–50 °C to 400 °C	1.8 °C	
	T	–100 °C to 400 °C	1.0 °C	–200 °C to –100 °C	1.5 °C	
RTD	R _i from 49 Ω to 2.1 k Ω	–200 °C to 600 °C	0.06 °C			0.003 °C
Thermistor	2.2 k, 5 k, 10 k	–80 °C to 150 °C	0.08 °C			0.002 °C

C Technické údaje GMH 3710[28]

8 Specification

Supported probes	Pt100 4-wire (2-wire possible)			
Sensor Curve	according to EN60751			
Probe connection	4pole Mini-DIN socket			
Resolution	0.01°C respectively 0.1°C, 0.01°F respectively 0.1°F			
Measuring Ranges	0.01°C -199.99... +199.99°C	0.1°C -200.0... +850.0°C	0.01°F -199.99... +199.99°F	0.1°F -328.0... +1562.0°F
Precision	Device without probe ±1Digit (at nominal temperature)			
	Range 0.01°C/F ±0.03°C / 0.06°F	Range 0.1°C/F ±0.1°C / ±0.2°F		
Measuring	4-wire measuring with automatic compensation of thermovoltage errors, measuring current ca. 0.3mA			
Temperature drift	<=0,002K per 1K			
Nominal temperature	25°C			
Ambient	Temperature -25 ... +50°C (-13 .. 122°F) rel. humidity 0 ... 95%r.F. (not condensing)			
Storage temperature	-25 ... +50°C (-13 ... 122°F)			
Housing	Dimensions: 142 x 71 x 28 mm (L x W x D) impact-resistant ABS plastic housing, membrane keyboard, transparent panel. Front side IP65, integrated pop-up clip for table top or suspended use.			
Weight	approx. 155 g			
Output:	3.5mm audio plug, stereo			
Selectable as serial interface:	via optically isolated interface adapter USB3100, GRS3100 or GRS3105 (p.r.t. accessories) directly connectable to USB3100- or RS232-interfaces.			
or analogue output:	0..1V, freely scaleable (resolution 13bit, accuracy 0.05% at nominal temperature, cap. load <1nF)			
Power Supply	9V-Battery, type IEC 6F22 (included) as well as additional d.c. connector (diameter of internal pin 1.9 mm) for external 10.5-12V direct voltage supply. (suitable power supply: GNG10/3000)			
Power Consumption	output off	ca. 0.90mA		
	output serial interface:	ca. 1.15mA		
	analogue output:	ca. 1.25mA		
Display	Two 4 ½ digits LCD's (12.4mm high and 7 mm high) for temperature, min./ max values, hold function, etc. as well as additional pointing arrows.			
Pushbuttons	6 membrane keys for on/off switch, menu operation, min. and max. value memory, hold-function etc.			
Min-/Max-Value Memory	Both the max. and the min. value will be memorised.			
Hold Function	Press button to store current value.			
Automatic-Off-Function	Device will be automatically switched off if no key is pressed/no interface communication takes place for the time of the power-off delay. The power-off delay can be set to values between 1 and 120 min.; it can be completely deactivated.			
EMC:	The device corresponds to the essential protection ratings established in the Regulations of the Council for the Approximation of Legislation for the member countries regarding electromagnetic compatibility (2004/108/EG) EN61326 +A1 +A2 (Appendix B, class B), additional error: < 1% FS.			