

# Měření stratifikace teploty ve výškových halách

Bc. Petr Skopec

---

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky  
akademický rok: 2005/2006

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr SKOPEC**  
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**  
Téma práce: **Měření stratifikace teploty ve výškových halách**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu zadání.
2. Zpracujte literární rešerži o stavu řešení.
3. Navrhněte zařízení podle požadavků.
4. Sestavte prototyp.
5. Proveďte otestování prototypu.
6. Zpracujte vyhodnocení výsledků ověření.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**WEBSTER, J. G.** The measurement, instrumentation and sensor handbook. New York: CRC Press LLC; Springer-Verlag, 1999, s.1932. ISBN 3-540-64830-5

**HRUŠKA, F.:** Technické prostředky automatizace IV. Snímače, převodníky, regulátory, průmyslová výpočetní technika, ovládací jednotky. UTB vfe Zlíně, FT, září 2001, s.107. ISBN 80-7318-026-X.

**ĎAĎO, S.-KREIDL, M.:** Senzory a měřicí obvody. Praha: ČVUT, 1996.

**FRADEN, J.** Handbook of Modern Sensors. Physics, designs and Applications. New York: Springer Verlag, 1996, s.556. ISBN 1-56396-538-0

**HRUŠKA, F.:** Technické prostředky automatizace III. Senzory jejich principy a funkce. UTB ve Zlíně, FT, únor 2002, s.118. ISBN 80-7318-053-7.

Firemní literatura firmy Analog Devices

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. František Hruška, Ph.D.**  
Ústav elektrotechniky a měření


Datum zadání diplomové práce: **14. února 2006**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2006**

Ve Zlíně dne 14. února 2006

  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*pověřený děkan*



  
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Hlavním cílem této úlohy bylo vymyslet, navrhnout a zkonstruovat zařízení pro měření stratifikace teploty ve výškových halách. Zařízení otestovat a odhalit případné nedostatky.

Zařízení se skládá ze 16-ti senzorů teploty AD 592AN umístěných po metru na zavěšeném plochém kabelu, dále pak vstupně výstupní jednotky DataLab IO/USB a počítače vybaveného programem pro vizualizaci a archivaci naměřených hodnot.

Po kalibraci je možné výsledky interpretovat s přesností na jednotky stupňů Celsia.

Klíčová slova: teplota, měření, stratifikace, vrstvení

## **ABSTRACT**

Main purpose of this work is to put together apparatus for measuring of temperature of stratification in high halls. Test this apparatus and detect eventual imperfection

Apparatus consist of 16 sensors of temperature AD592 AN placed meter by meter on hansind cable and then input output unit DataLab IO/USB by computer equipt program for vizualization and archivation of measured values

After kalibration is possible interpret results with accurasy in units Celsia degrees.

Keywords:temperature, measure, stratifikation

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval Doc. Ing. Františku Hruškovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při realizaci mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Skočíkovi za to, že se se mnou podělil o jeho zkušenosti se senzorem AD 592. Také děkuji panu Petru Dvořákovi za pomoc při umístění měřícího zařízení v budově U51 a správě budov za povolení umístit toto zařízení na konzolu výtahu.

Souhlasím, že s výsledky má práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 23.5.2006

.....

podpis

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 TEPLOTNÍ GRADIENT A TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA</b> .....	<b>10</b>
<b>2 MĚŘENÍ TEPLoty</b> .....	<b>12</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	12
2.2 ROZDĚLENÍ TEPLOMĚRŮ .....	13
2.3 DYLATAČNÍ TEPLOMĚRY .....	16
2.4 TLAKOVÉ SNÍMAČE TEPLoty .....	17
2.5 ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty .....	18
2.5.1 Kovové odporové senzory teploty .....	18
2.5.2 Polovodičové odporové senzory teploty .....	22
2.5.3 Konstrukce odporových teploměrů .....	25
2.5.4 Měření elektrického odporu .....	26
2.6 TERMOČLÁNKOVÉ SENZORY TEPLoty .....	27
2.6.1 Senzory termoelektrické kovové .....	28
2.6.2 Senzory termoelektrické nekovové .....	30
2.7 POLOVODIČOVÉ MONOKRYSTALICKÉ SENZORY S PN PŘECHODY .....	30
2.7.1 Senzory diodové a tranzistorové .....	31
2.7.2 Integrované PN senzory teploty .....	33
<b>3 CONTROL WEB</b> .....	<b>35</b>
<b>4 DATALAB IO/USB</b> .....	<b>37</b>
4.1 MODUL ANALOGOVÝCH VSTUPŮ .....	38
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>41</b>
<b>5 POPIS VYBRANÝCH SENZORŮ PŘEDNÍCH SVĚTOVÝCH FIREM A VÝBĚR SENZORU</b> .....	<b>42</b>
5.1 MICROCHIP TC1047 .....	42
5.2 SGS-THOMSON MICROELECTRONIC LM 135 .....	43
5.3 DALLAS SEMICONDUCTOR DS 60 .....	44
5.4 ANALOG DEVICES AD 592 .....	45
5.5 VÝBĚR SENZORU .....	47
<b>6 OVĚŘENÍ FUNKCE SENZORU AD592AN</b> .....	<b>48</b>

6.1	ZAPOJENÍ SENZORU PRO OVĚŘOVÁNÍ.....	48
6.2	MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VÝSTUPU NA NAPÁJECÍM NAPĚTÍ.....	48
6.3	MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VÝSTUPU NA SÉRIOVĚ PŘIPOJENÉM REZISTORU .....	49
6.4	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SENZORU PRO MĚŘENÍ TEPLoty PEVNÉHO TĚLESA .....	50
6.5	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SENZORU PRO MĚŘENÍ TEPLoty VZDUCHU .....	53
<b>7</b>	<b>NÁVRH A KONTRUKCE PROTOTYPU ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ STRATIFIKACE TEPLoty .....</b>	<b>57</b>
7.1	POŽADAVKY NA PROTOTYP .....	57
7.2	NÁVRH A KONSTRUKCE PROTOTYPU.....	57
7.3	VIZUALIZAČNÍ A ARCHIVAČNÍ PROGRAM.....	60
<b>8</b>	<b>MĚŘENÍ STRATIFIKACE TEPLoty A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>62</b>
8.1	KALIBRACE .....	62
8.2	MĚŘENÍ STRATIFIKACE TEPLoty V BUDOVĚ U51 .....	64
<b>9</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>70</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>77</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>78</b>

## ÚVOD

Moje diplomová práce se zabývá měřením teploty a zvláště pak měřením teplotního gradientu. Rozdílné teploty v různých výškách nad podlahou jsou velkým problémem řady budov, kde se pohybují lidé. Rozdílná teplota v oblasti kotníků a hlavy vážným způsobem narušuje tepelnou pohodu člověka. Ne menším problémem však bývají velké rozdíly teplot ve vysokých výrobních halách, kde se často stává, že se teplý vzduch hromadí pod střechou a rozdíl mezi teplotou u podlahy a teplotou pod stropem se může pohybovat i kolem deseti °C. Při nekvalitně zaizolované střeše jí pak uniká velké množství tepla. Dále pak vyšší teplota u strobu není nijak využitá a v oblasti kde se pohybují lidé je teplota podstatně nižší. Nejdůležitější je pro nás aby teplotní gradient byl co nejnižší a teplota byla pokud možno v celé výšce objektu stejná. Tomu se můžeme přiblížit použitím vhodného způsobu vytápění.

Zařízení které jsem v rámci této práce zkonstruoval by mělo sloužit k určení teplotního gradientu a poskytnout potřebné informace o časovém průběhu teplot v různých výškách. Tyto informace by pak měly sloužit k rozhodování o tom zda je vytápěcí systém haly vhodný či nevhodný a jaká by byl případná návratnost investice. Ze stále se zvyšujícími náklady na energie je tato otázka čím dál tím důležitější.

Zařízení které jsem navrhl je schopno měřit vrstvení teploty ve výšce 16-ti metrů a to vždy po metru. Je složeno s kabelu se 16-ti senzory teploty AD 592AN dále z převodníku proudu na napětí a vstupně výstupní jednotky DataLab IO/USB připojené k počítači. Počítač je vybaven vizualizačním a archivačním programem temp1, který byl vytvořen v prostředí ControlWeb 5. Po kalibraci je možné měřit rozdíly teploty s přesností na jednotky stupňů Celsia. V této práci jsem prováděl kalibraci dodatečně v tabulkovém procesoru Excel a proto není zatím kalibrace součástí programu, je však možné o kalibraci dále program doplnit. Měřená data jsou uchovávána v databázových tabulkách v databázi typu MDF z níž je možné data přenést do některého z tabulkových procesorů a dále zpracovávat.



## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 TEPLOTNÍ GRADIENT A TEPELNÁ POHODA ČLOVĚKA

Mikroklimatické podmínky velmi ovlivňují činnost v pracovním procesu. Souvisejí přímo z problémem dodržení tepelné rovnováhy člověka, která je nutná pro umožnění předepsaného pracovního výkonu.

Množství tepla vznikající při látkových přeměnách v těle závisí na více vlivech. Nejvýznamnější z nich je fyzická námaha, kterou člověk vyvíjí při své činnosti. Čím je větší pracovní zátěž tím vydá větší množství tepla.

Stav při kterém je dosaženo rovnováhy a dochází k suchému ochlazování lidského těla bez pocení se označuje jako tepelná pohoda.

Jsou-li teploty vzduchu nebo okolních ploch nižší, než hodnoty potřebné k dosažení rovnováhy, dochází k pocitu chladu.

Tepelná rovnováha člověka se dosáhne při odpovídající výsledné teplotě  $t_g$ . Zachycuje jak vliv teploty vzduchu a rychlost proudění, tak i vliv sálání všech okolních ploch.

$$t_g = \frac{t_v + t_u}{2} [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

$t_g$  - teplota výsledná

$t_v$  – teplota vzduchu

$t_u$  – účinná teplota okolních ploch

Rovnice (1) platí za předpokladu že se jedná o klidný vzduch. V případě že dochází k proudění vzduchu je zapotřebí uvažovat vliv přestupních součinitelů.

Kromě teplot působí ještě obsah vodní páry ve vzduchu – relativní vlhkost. Není vhodná příliš vysoká vlhkost vzduchu – vzniká pocit dusna – a ani příliš nízká vlhkost – dochází k vysychání dýchacích cest. Rovněž nepříznivě se projevují velké rychlosti proudění vzduchu.

Dosažení vhodné výsledné teploty vyvolává zcela odlišné potřeby v zimním a letním období.

Člověk se při své činnosti pohybuje v zóně která zaujímá prostor cca do výše dvou metrů nad podlahou. Podlaha je součástí této zóny a má na tepelnou pohodu velmi nepříznivý účinek. Rostlý terén pod podlahou dosahuje konstantní teploty okolo  $+10^{\circ}\text{C}$ . Tato

teplota zeminy přímo ovlivňuje teplotu podlahy (+12 °C až +17°C). Vyšších teplot je dosaženo při lépe provedených izolacích. Chladná podlaha také ovlivňuje teplotu vzduchu v její blízkosti.

Teplý vzduch v prostoru je v neustálém pohybu. Na chladné podlaze se ochlazuje a jeho teplota stoupá s výškou. K největšímu stoupaní dochází právě v oblasti kde se pohybuje člověk. Neúměrné rozdíly do výše 1,5 m nad podlahou působí velice nepříznivě na dosažení tepelné pohody. Nohy a hlava člověka jsou pak v rozdílných mikroklimatických podmínkách. Nad 1,5 m nad podlahou se pak již teplota vzduchu mění méně. Změnu teploty po výšce objektu nezávázáme teplotní gradient.

Teplotní gradient a jeho velikost je předmětem mnoha diskuzí. Mnozí autoři se snaží stanovit jeho průměrnou hodnotu a tato se pak používá i při výpočtech tepelných ztrát.

Jak ukazují výsledky měření má na jeho vzestup vliv poloha místa ve sledovaném objektu, rozměry objektu resp. poměr výšky k ploše a v neposlední řadě také systém vytápění a větrání. Při navrhování strojírenských hal je práce s teplotním gradientem rozhodující činností. Správné pochopení jednotlivých vlivů umožňuje navrhnout taková zařízení, která zajistí v celé pracovní oblasti optimální podmínky.

Popisované teplotní gradienty se vztahují na teplotu vzduchu a mají přímý vliv na tepelnou ztrátu objektu resp. jeho energetickou náročnost.

Z hlediska energetické náročnosti vytápěného a větraného objektu je nezbytné aby teplotní gradient byl co nejmenší. proto, aby v místech nejvíce ochlazovaných ploch (střecha, světlíky, obvodový plášť) s největšími rozdíly teplot uvnitř a vně prostoru dosáhlo co nejnižší teploty vnitřního vzduchu.

## 2 MĚŘENÍ TEPLOTY

### 2.1 Základní pojmy

Teplota je jednou z nejdůležitějších stavových veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v přírodě. Jedná se o termodynamickou veličinu, která udává míru tepelného stavu tělesa. Teplo je forma energie, která má svůj původ v neuspořádaném pohybu elementárních částic.

K měření teploty lze využít různých fyzikálních principů, jako například teplotní roztažnosti látek, změny elektrického odporu vodičů a polovodičů, vzniku elektrického napětí apod. Aby ale bylo dosaženo stejných výsledků měření, bylo nutno sestavit jednotnou teplotní stupnici, která by nebyla závislá na zvoleném principu měření. Takovou stupnicí je Termodynamická teplotní stupnice. Jednotkou termodynamické teploty  $T$  je Kelvin (K). Z historického důvodu se stále používají také stupnice Celsiova a Fahrenheitova.

Termodynamická teplotní stupnice (Kelvinova) je dána následujícími dvěma body. Nulový bod této stupnice, tj. 0 K, se nazývá absolutní nulová teplota a odpovídá stavu, při němž by ustal termický pohyb elementárních částic. Druhým bodem Termodynamické stupnice je tzv. trojný bod vody, což je rovnovážný stav všech tří skupenství (led, voda, sytá vodní pára) stanovený hodnotou 273,16 K (0,01 °C) a tlakem  $p = 609,8$  Pa. Základní jednotkou termodynamické teploty je Kelvin označovaný symbolem (K) a definovaný jako 273,16. díl teplotního rozdílu mezi uvedenými dvěma teplotami, tj. teplotou trojného bodu a absolutní nuly.

Základní jednotkou Celsiovy stupnice teploty je stupeň Celsiův označovaný (°C) a definovaný jako 100. díl teplotního rozdílu mezi teplotou varu a tuhnutí vody při atmosférickém tlaku 101,32472 kPa. Velikost jednotek obou stupnic (°C,K) je shodná. Protože bod tání ledu má v absolutní stupnici hodnotu  $T = 273,15$  K a v celsiově stupnici  $t = 0$  °C je souvislost obou stupnic dána vztahem:

$$T = t + 273,15[K,^{\circ}C,^{\circ}C] \quad (2)$$

V anglosaských zemích se užívá navíc stupnice Fahrenheitova (°F), v níž teplotě 0°C odpovídá 32 °F a teplotě 100 °C odpovídá 212 °F.

Pro obtížnou realizaci termodynamické stupnice byla zavedena mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 (z anglického: The International Temperature Scale of 1990). ITS-90 je

definována od 0,65 K do teplot prakticky měřitelných v podmínkách Planckova radiačního zákona. Tato teplotní stupnice je tvořena tak, aby jednotlivé rozsahy měření těsně vyjadřovaly číselné hodnoty termodynamické teploty.

Jsou uváděny čtyři definiční rozsahy:

- rozsah 0,65 K až 5 K se definuje pomocí tlaku par  $^3\text{He}$  a  $^4\text{He}$
- rozsah 3K až 24,5561 K (trojný bod neonu) se definuje pomocí heliového plynového teploměru
- rozsah 13,8033 K (trojný bod rovnovážného stavu vodíku) až 961,78 K (bod tuhnutí stříbra) se definuje pomocí platinového odporového teploměru
- rozsah nad 961,78 K se definuje pomocí Planckova vyzařovacího zákona.

## 2.2 Rozdělení teploměrů

Podle oblasti použití lze teploměry rozdělit na dotykové a bezdotykové. Dotykové teploměry jsou při měření v přímém dotyku s měřeným prostředím. Bezdotykové teploměry využívají tepelného záření vyšetřovaného objektu.

Dotykové teploměry lze rozdělit podle fyzikálního principu na:

- a) dilatační – využívají teplotní roztažnosti tuhých látek kapalin a plynů
- b) parní – využívají teplotní závislosti tlaku syté páry teploměrové kapaliny
- c) odporové – využívají teplotní závislosti elektrického odporu vodičů a polovodičů
- d) termoelektrické – využívají teplotní závislosti termoelektrického napětí termočlánku
- e) speciální – využívají změn vybraných vlastností tuhých látek a kapalin s teplotou (např. měknutí, tavení, index lomu atd.)

Bezdotykové teploměry lze rozdělit podle měřícího principu na přímo měřící a zobrazovací. Do přímoměřících patří pyrometry a do zobrazovacích fototermometrie a termovize.

Pyrometry lze rozdělit podle různých hledisek, jako je spektrální oblast využitého záření, způsob měření, optický systém apod. Pro praxi je nejvhodnější rozdělení podle spektrální oblasti využitého záření a to na:

- a) spektrální – (jasové, monochromatické) využívají tepelného záření při jedné vlnové délce, zpravidla  $\lambda = 0,65\mu\text{m}$
- b) pásmové - využívají tepelného záření v úzkém pásmu vlnových délek, který je dán absorpčními vlastnostmi použitého detektoru záření
- c) spektrální rozložení – (barvové) využívají tepelného záření při dvou vlnových délkách, zpravidla při  $\lambda = 0,55\mu\text{m}$  a  $\lambda = 0,65\mu\text{m}$  (zelená a červená barva)
- d) celkové záření – (radiační) využívají tepelného záření ve velké oblasti vlnových délek (teoreticky v celém rozsahu) který je omezen pouze absorpční schopností použitého detektoru a propustností optiky pyrometru.

Termovize využívá ke snímání povrchových teplot objektů speciální kamery s detektorem tepelného záření pouze v infračervené oblasti. Rozložení teploty na měřeném povrchu je zobrazeno na speciálním monitoru s černobílou nebo barevnou obrazovkou.

Fototermometrie využívá klasického fotoaparátu s velkou světelností a fotomateriálem sensibilovaným na infračervené záření.

Teplotní rozsahy vybraných dotykových a bezdotykových teploměrů jsou uvedeny v tabulce 1. [7]

Tab.1: Měřicí rozsahy vybraných typů teploměrů

Dotykové teploměry	Měřicí rozsah (°C)
--------------------	--------------------

tyčové	-30 až 1000
bimetalické	-30 až 350
skleněné s organickou náplní	-200 až 100
skleněné s kovovou náplní	-30 až 630 (1000)
tlakové kapalinové	0 až 850
tlakové parní	-50 až 200
tlakové plynové	-260 až 800
odporové platinové	-270 až 850 (1000)
odporové niklové	0 až 180
odporové molybdenové	-200 až 200
silistory	-50 až 150
negastory (NTC)	-100 až 450
pozistory (PTC)	120 až 300
termoelektrické T (Cu-CuNi)	-200 až 400
termoelektrické J (Fe-CuNi)	-200 až 760
termoelektrické E (NiCr-CuNi)	-100 až 700 (900)
termoelektrické K (NiCr-NiAl)	-200 až 1000 (1300)
termoelektrické S (PtRh10-Pt)	0 až 1300 (1600)
termoelektrické R (PtRh13-Pt)	0 až 1300 (1600)
termoelektrické B (PtRh36-PtRh6)	300 až 1600 (1800)
termoelektrické A (WRe5-WRe20)	0 až 2500
termoelektrické N (nicrosil-nisil)	-270 až 1370
se světlovody	-11 až 200
s kapalnými krystaly	-20 až 250
iontové	200 až 720
krystalové	-80 až 250
barevné nátěry a tužky	40 až 1400
tavná tělíška a tablety	100 až 1650
keramické žároměry	600 až 2000
<b>Bezdotykové teploměry</b>	
pyrometry jasové	650 až 3500
pyrometry pásmové	300 až 2000
pyrometry barvové	700 až 2000
pyrometry radiační	50 až 2300
fototermometrie	-50 až 650
termovize	-50 až 1000 (1500)

### 2.3 Dylatační teploměry

Dilatační senzory využívají princip objemové roztažnosti plyných, kapalných a pevných látek. Charakteristickým parametrem u kapalin a plynů je objemová roztažnost, u pevných látek délková roztažnost. Platí vztahy:

$$V = V_0(1 + \alpha_v \Delta t) \quad (3)$$

$$l = l_0(1 + \alpha_l \Delta t) \quad (4)$$

kde je:  $V$  výsledný objem ( $\text{m}^3$ )  
 $V_0$  původní objem ( $\text{m}^3$ )  
 $l$  výsledná délka (m)  
 $l_0$  původní délka (m)  
 $\alpha_v$  koeficient objemové roztažnosti  
 $\alpha_l$  koeficient délkové roztažnosti  
 $\Delta t$  změna teploty ( $^{\circ}\text{C}$ )

Kapalinové dilatační senzory jsou používány pro místní měření teploty. Jsou vytvořeny kapilárou s náplní rtuti, nebo organické kapaliny a tělesem se stupnicí. Podle vnějšího tvaru jsou senzory tyčinkové, stonkové, kontaktové, senzory s měřením maxima a minima.

Plynové senzory jsou vytvořeny kapilárou o světlosti 0,5 mm a délce 20 až 60 m. Jsou použity v rozsahu teplot od  $-200$  až  $360$   $^{\circ}\text{C}$ . Jejich princip je popsán také stavovou rovnicí plynů. Používá se pro vnitřní náplň: dusík, helium, vzduch,  $\text{CO}_2$ , kyslík.

Kovové dilatační senzory používají tyč z kovového materiálu nebo dvojkovového pásku. Tyč je vyrobena z mosazi, ocele, zinku, hliníku, niklu nebo jejich slitin. Vnější část tvoří obal z invaru, skla nebo porcelánu. Rozsah měření v praxi je  $-30$  až  $1000$   $^{\circ}\text{C}$ . Nevýhodou je malá přesnost a velká časová konstanta. V automatizační technice jsou tyto senzory používány jako teploměry pro místní měření s mechanismem pro ručkové měřidlo a pro limitní spínání podle žádané teploty.

Dvojkovový (bimetalový) teploměr využívá teplotní roztažnosti dvou pevně mechanicky spojených kovových pásků s rozdílnou roztažností. Při zvýšení teploty se pásy



ohýbají na stranu pásku s menší roztažností. V praxi jsou pro bimetal používány kombinace kovů: invar-mosaz, invar-nikl, invar-ocel, ocel-feronikl. Průhyb dvojkovu ve tvaru vetknutého nosníku je dán vztahem:

$$y = \frac{\Delta \alpha l^2}{b} \Delta t \quad (5)$$

kde je:  $\Delta \alpha$  relativní součinitel roztažnosti pásků

$l$  délka pásků

$b$  tloušťka obou pásků

$\Delta t$  měřený teplotní rozdíl

Větší prohnutí se dosahuje změnou tvaru pásku. Např. se používá pásky ve tvaru písmene U nebo jako plochá nebo válcová spirála. V automatizační technice se používají dvojkovové teploměry s přímým ukazováním teploty pro místní měření nebo jako limitní spínače pro nespojitou regulaci (např. termostat u žehličky). Rozsah měření je od  $-40$  do  $500^\circ\text{C}$ . Nevýhodou je velká časová konstanta a malá přesnost.[5]

## 2.4 Tlakové snímače teploty

Tlakové snímače teploty pracují tak, že převádí objemovou roztažnost plyných, kapalných a pevných látek na změny tlaku v deformačním členu, který je přes mechanismus spojen se stupnicí. Velikost tlaku je poměrně vysoká. Používají se nejčastěji kapalino-  
vé a parní teploměry.

U kapalinových teplotních snímačů se používá jako náplň: rtuť, xylon, metylalkohol, petrolej ale jen v rozsahu do bodu varu kapaliny. Hydraulický systém tvoří kovová nádobka umístěná v měřeném místě, kapilára a deformační člen, nejčastěji Bordonova trubice. Často je používána u této soustavy korekce na vliv teploty okolí a na hydrostatický tlak. Rozsah použití je od  $-30^\circ\text{C}$  do  $600^\circ\text{C}$ . Snímače se používají pro místní měření s menší přesností a pro pomalé změny teploty.

Tlakový parní teploměr obsahuje v uzavřeném systému sytou páru metylchloridu, oxidu siřičitého, etyl éteru, etylalkoholu, toluenu, hexanu, benzenu, propanu, lihu nebo pro nízké teploty kyslíku, neonu, vodíku a hélia. V měrné nádobce se vyskytuje pára společně s kapalinou. Závislost výstupního tlaku na teplotě je nelineární a je určena vztahem:

$$\log p = A + \frac{B}{T} + CT \quad (6)$$

kde je:  $p$  tlak sytých par (Pa)

$T$  absolutní teplota (K)

$A, B, C$  konstanty

V praxi se používá parotlakový teploměr s náplní He jako primární etalon pro rozsah nízkých teplot.[2]

## 2.5 Odporové senzory teploty

Teplotní odporový senzor využívá fyzikální princip závislosti elektrického odporu kovů nebo polovodičů na teplotě. Vstupním podmětem je teplota prostředí, které je v přímém dotyku se senzorem. Senzor je tak součástí procesu přenosu tepla vedením, prouděním nebo sáláním z vnějšího prostředí do materiálu senzoru.

Materiálem senzoru je nejčastěji vybraný kov nebo polovodičový materiál. Pro správnou funkci musí tento materiál mít správné složení, především musí být fyzikálně a chemicky stálý.

### 2.5.1 Kovové odporové senzory teploty

Princip kovových odporových senzorů je teplotní závislost odporu kovového materiálu na jeho teplotě. Kov má v krystalové mřížce soubor kladných iontů a chaoticky se pohybující elektrony. Pro měrnou elektrickou vodivost kovů platí:

$$\delta = ne^2 \frac{\tau}{m} \quad (7)$$

kde je:  $n$  počet elektronů v jednotkovém objemu

$e$  elementární náboj

$\tau$  relaxační čas elektronů

$m$  hmotnost nosiče náboje

Teplotní součinitel čili citlivost odporových teplotních senzorů je vyjádřena jednotkou (1/K) podle vztahu:

$$\alpha_R = \frac{R_{t_x} - R_{t_0}}{(t_x - t_0)R_{t_0}} \quad (8)$$

kde je:  $R_{t_x}$  odpor při teplotě  $x$

$R_{t_0}$  odpor při teplotě  $0^\circ\text{C}$

Jako materiál slouží především čisté kovy. Požadavkem je konstantní teplotní součinitel v čase, nulová hystereze a dostatečně vysoký měrný odpor. Nejčastěji používaným kovovým materiálem je platina, nikl, měď, molybden, slitina stříbra a zlata, případně další kovy.

### Platinové odporové teploměry

Platina se používá u kovových odporových senzorů pro svoji vysokou chemickou stálost, vysokou teplotu tavení a možnost dosažení vysoké výrobní čistoty. Používá se vysoce čistá platina s obsahem nečistot do 0,07%. Nečistotami jsou zpravidla železo, iridium ap. Tato čistota zajišťuje změny základního odporu kolem  $5 \cdot 10^{-6}$ , což odpovídá změnám teploty pro Pt 100 asi 0,001K.

Platina vyhovuje pro měření teploty od  $-200$  do  $850^\circ\text{C}$ . Její měrný odpor při teplotě  $20^\circ\text{C}$  je  $0,098 \cdot 10^{-6} (\Omega/\text{m})$ . Změna odporu v závislosti na teplotě je podle standardu IEC dána funkcí:

$$R = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (9)$$

kde je:  $R_0$  odpor při  $0^\circ\text{C}$

$t$  teplota ( $^\circ\text{C}$ )

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,802 \cdot 10^{-7}$$

Používají se senzory s odporem při  $0^\circ\text{C}$   $R_0 = 100, 500, 1000 \Omega$ . Teplotní součinitel je  $0,00385 (1/\text{K})$  čili  $3850 (\text{ppm}/\text{K})$ . Poměr odporů  $W_{100} = R_{100}/R_0$  je  $1,385$ . Senzor je vyroben nejčastěji z platinového drátu o průměru  $0,045 \text{ mm}$ . Vinutí je bifilární, jednoduché nebo dvojité. Provedení je se 2 nebo 4 vývody, tvar nosné části je plochý, válcový z keramiky, skla, slídy nebo umělé hmoty. Proudové zatížení PT senzoru má hodnotu kolem  $1 \text{ mA}$ . Dlouhodobá stabilita závisí na čistotě kovu a má hodnotu  $0,05\%/1000\text{h}$ .

### Niklové odporové teploměry

Významným kovem pro odporové teploměry je nikl. Použitelný rozsah měření je od -60 do 150 °C, krátkodobě 180 °C. Při teplotách nad 300 °C nastávají strukturální nezvratné změny. Nikl je napadán kyselinami a čpavkem. Používá se proto že je levnější než platina.

Měrný odpor niklu při 20 °C je  $0,0605 \cdot 10^{-6}$  ( $\Omega/m$ ). Používají se senzory s  $R_0 = 100\Omega$  (teplotní součinitel je 0,618 (1/K)),  $R_0 = 891 \Omega$  (teplotní součinitel je 0,6371 (1/K)).  $R_0 = 1000\Omega$  (teplotní součinitel je 0,618 nebo 0,5 (1/K)). Poměr odporu  $R_{100}/R_0$  pro Ni 1000 je 1,618.

$$R = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)) \quad (10)$$

kde je:  $R_0$  odpor při 0°C

$t$  teplota (°C)

$$A = 5,49 \cdot 10^{-3}$$

$$B = 6,8 \cdot 10^{-7}$$

$$C = 9,24 \cdot 10^{-9} \text{ pro } t > 0^\circ\text{C} \text{ a } C = 0 \text{ pro } t < 0^\circ\text{C}$$

Dlouhodobá stabilita závisí na čistotě a má hodnotu 0,08%/1000h při 150 °C. Provedení senzorů je drátové ve tvaru válce s nosným materiálem z plastu pro uvedený rozsah teplot.

### Měděné odporové teploměry

Měď jako kov pro odporové teploměry je prakticky použitelná pro rozsah od -200 do 200°C. Změna odporu pro rozsah -50 až 200°C je funkce:

$$R = R_0(1 + At) \quad (11)$$

kde je:  $R_0$  odpor při 0°C

$t$  teplota (°C)

$$A = 4,26 \cdot 10^{-3}$$

Měrný odpor Cu při 20°C je  $0,0155 \cdot 10^{-6}$   $\Omega/m$ . Měď má malý měrný odpor a vysokou citlivost vůči kyslíku, který způsobuje oxidaci. Materiál lze ale použít pro přímé měření teploty např. ve vinutí elektrických motorů.

### Molybdenové odporové teploměry

Novým kovem pro odporové teploměry je molybden. Má dobrou linearitu a vhodný rozsah dilatace vůči podložkám z keramiky. Vyrábí se moderní technologií a pokrývá se barevným polymerem.

Použitelný rozsah měření je od  $-200$  do  $200$  °C. Měrný odpor při  $20$ °C je  $0,055 \cdot 10^{-6}$  Ω/m. Používají se senzory s odporem při  $0$  °C  $R_0 = 1000$  typ Mo (teplotní součinitel je  $0,3$  1/K) a typ MoP (teplotní součinitel  $0,385$  1/K). Poměr odporů  $R_{100}/R_0$  pro Mo  $1000$  je  $1,3$  a pro MoP je  $1,385$ .

Změna odporu pro rozsah  $-50$  až  $200$  °C je funkce:

$$R = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (12)$$

kde je:  $R_0$  odpor při  $0$ °C

$t$  teplota (°C)

pro Mo typy:

$$A = 2,9674 \cdot 10^{-3}$$

$$B = 3,26 \cdot 10^{-7}$$

pro MoP typy:

$$A = 3,78609 \cdot 10^{-3}$$

$$B = 6,391 \cdot 10^{-7}$$

### Ostatní kovové senzory teploty

Jako kov ve výjimečných provedeních se používá např. stříbro do  $200$ °C s měrným odporem  $0,0149 \cdot 10^{-6}$  Ω/m při  $20$ °C, zlato do  $400$ °C s měrným odporem  $0,0204 \cdot 10^{-6}$  Ω/m při  $20$  °C. Slitina zlato-stříbro je náhrada za platinu se stejnou závislostí změn odporu pro rozsah do  $120$ °C.

Zajímavé vlastnosti vykazují tzv. pevné elektrolyty jako je např. bromid a jodid kademnatý. Při změně teploty v určitém rozsahu vzniká skoková změna elektrického odporu. Např. bromid kademnatý při teplotě cca  $560$ °C mění skokově elektrický odpor z hodnoty jednotek ohmů na hodnotu  $200$  kΩ s hysterezí  $5$ °C. Jodid kademnatý mění skokově elek-

trický odpor z hodnoty jednotek ohmů na hodnotu 200 kΩ s hysterezí 10°C při teplotě cca 380°C. Použití těchto materiálů je vhodné u limitních snímačů teploty v aktuální oblasti.

### 2.5.2 Polovodičové odporové senzory teploty

U polovodičů je důležitá teplotní závislost koncentrace nosiče náboje. Pro polovodičový jev platí přibližně vztah:

$$n \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (13)$$

kde je: n počet elektronů v jednotkovém objemu

E šíře mezery mezi energetickými hladinami mřížky

k Boltzmannova konstanta

T absolutní teplota

Pro vodivost polovodičů platí podobně jako u kovů vztah:

$$\delta = ne^2 \frac{\tau}{m} \quad (14)$$

kde je: n počet elektronů v jednotkovém objemu

e elementární náboj

$\tau$  relaxační čas elektronů

m hmotnost nosiče náboje.

pro teplotní součinitel platí:

$$\alpha \approx \frac{\Delta E}{2kT} \cdot \frac{1}{T} \quad (15)$$

Odporové polovodičové senzory podle druhu použitého materiálu dělíme na:

- polykrystalické (termistory)
- monokrystalické (bez přechodu PN).

## Termistory

Termistor má podle druhu materiálu amorfni (beztvarou) a polykrystalickou (mnohokrystalickou) strukturu. Má záporný teplotní součinitel (NTC-negastor) nebo kladný teplotní součinitel (PTC-pozistor).

Negastory se vyrábí práškovou technologií (lisováním a slinováním za vysokých teplot) ze směsi oxidů kovů (např.  $\text{Fe}_2\text{O}_2+\text{TuO}_2$ ,  $\text{MnO}+\text{CoO}$ , případně  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{BaO}$ ). Aplikují se běžně v rozsahu teplot od  $-80$  do  $200^\circ\text{C}$ , speciálně pro rozsahy od  $4,2\text{K}$  až do  $1000^\circ\text{C}$ .

Negastory mají velkou negativní teplotní závislost elektrického odporu na teplotě. Teplotní součinitel je pětkrát až padesátkrát větší než u kovů. Závislost odporu na teplotě je velmi nelineární. Je dána přibližným vztahem:

$$R = A.e^{\frac{B}{T}} \quad (16)$$

kde je: A konstanta daná geometrickým tvarem a použitým materiálem

B teplotní konstanta (je udávána výrobcem pro konkrétní typ)

T absolutní teplota

Výrobci vyrábí termistory různých parametrů a tvarů. především se jedná o parametr  $R_{25}$ , tj. o hodnotu odporu při  $25^\circ\text{C}$ , který bývá od  $10\Omega$  po  $1\text{M}\Omega$ . Dále je to tepelná konstanta B, která dosahuje hodnot od 1000 do 5000. Podle velikosti a tvarů jsou termistory válcové, plošné, perličkové.

Pro zajištění časové stálosti termistorů, shodnosti charakteristik a jejich zaměnitelnosti se stále hledají nové materiály. Velmi známý je tenkovrstvý termistor SiC pro rozsahy od  $-100$  do  $450^\circ\text{C}$ . Je napařen na substrát  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s Pt vývody. Má základní hodnotu  $R_{25}=10000$  až  $1000000\Omega$ . Charakteristika je pozvolná a  $B=1600$  až  $3400\text{K}$ . Příkladem polykrystalického termistoru je miniaturní negastor o rozměrech  $460*60*0,5\ \mu\text{m}$ . Je vyroben z polykrystalického křemíku dopovaného borem. Rozsah použití je  $-170$  až  $450^\circ\text{C}$ .

Negativní vlastností negastorů je jejich nestabilita odporu, velká nejistota měření ( $\pm K$ ) a nelinearita. Výhodou je malý rozměr a vysoký teplotní součinitel.

Pozistor je polykrystalický termistor s kladným teplotním součinitelem odporu. Se stoupající teplotou od záporných teplot dochází nejprve k mírnému poklesu odporu. Při

určité teplotě, tzv. Curierově teplotě (podle druhu materiálu od 60 do 180°C a vysvětluje se chováním spinů) dochází k prudkému růstu odporu s tím, že po dosažení další tepelné hranice se odpor přestává měnit a opět začne klesat.

Pro oblast nárůstu platí:

$$R = R_r e^{At} \quad (17)$$

kde je  $A = 0,16$  (1/K)

$t$  teplota nad Curierovou teplotou

Pozistory jsou používány v praxi u limitních snímačů a u snímačů pro spojitě měření v určitém úzkém pásmu teplot. Vyrábí se z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. z titaničnanu barnatého ( $\text{BaTiO}_3$ ).

### Monokrystalické odporové senzory teploty

Monokrystalické odporové senzory bez PN přechodu se vyrábí z křemíku, germania, india a jejich slitin. Germaniové senzory jsou vhodné pro měření nízkých teplot od -190°C. Např. materiál z dentritního germania typu P má lineární charakteristiku v rozsahu teplot -60 až 100°C s velmi dobrou časovou stálostí při měrném odporu 1Ω.cm. Jeho teplotní součinitel změny odporu je od  $5 \cdot 10^{-3}$  až  $8 \cdot 10^{-3}$  (1/K).

Senzor vytvořený napařováním india má lineární závislost odporu na teplotě v rozsahu od -196 až 100°C. Jeho teplotní součinitel odporu je  $3,5 \cdot 10^{-3}$  až  $4,3 \cdot 10^{-3}$  (1/K).

Křemíkové polovodiče typu N jsou určeny pro rozsah -150 až 350°C. Měrný odpor při 25°C je podle dotační koncentrace 0,5 až 5, případně 10 i 20 Ω.cm. Senzor má lineární závislost. Střední teplotní součinitel je 0,01 (1/K).

Celkový odpor senzoru je dán dotační koncentrací a geometrií kontaktů a nezávisí na polaritě kontaktního napětí. Platí:

$$R = \frac{\rho}{\beta D} \quad (18)$$

kde je:  $\rho$  měrný odpor materiálu polovodiče

$\beta$  faktor geometrie struktury

$D$  průměr kontaktu senzoru s měřenou plochou



Teplotní závislost lze aproximovat vztahem

$$R = R_r + k(t - t_r)^2 \quad (19)$$

kde je:  $R_r$  základní odpor

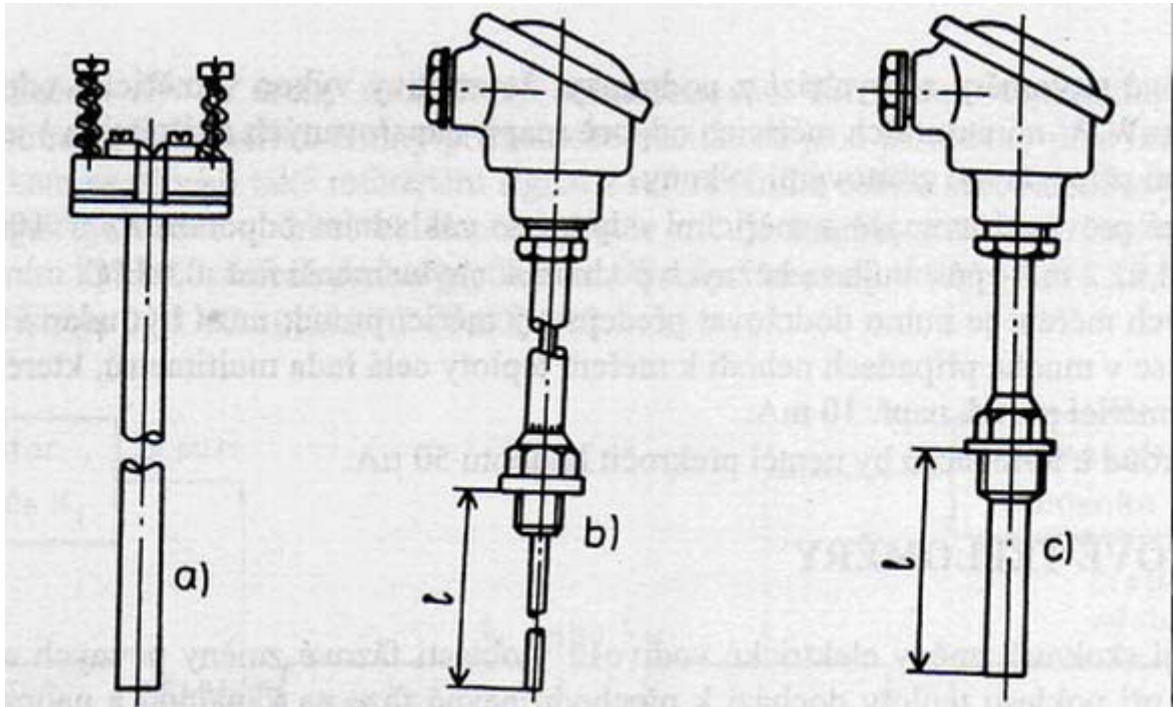
$t_r$  referenční teplota  $t_r = -241,52^\circ\text{C}$

$k = 2,7931 \cdot 10^{-2}$

### 2.5.3 Konstrukce odporových teploměrů

Odporový teploměr se skládá z odporového snímače teploty, spojovacího měděného vedení, napájecího zdroje a měřicího přístroje – ukazovacího nebo zapisovacího.

Odporový snímač teploty je konstrukční celek, který obsahuje měřicí vložku. V měřicí vložce je měřicí odpor spojený vnitřním vedením se svorkovnicí. Pro teploty do  $500^\circ\text{C}$  je vnitřní vedení kantalové, pro vyšší teploty je stříbrné. Měřicí vložka obr.1a) se umísťuje do ochranné armatury, se kterou tvoří snímač do jímky obr.b) popř. snímač jímkový obr.1c). Odporové snímače se vyrábí s ponorem 160, 250, 400 mm.



Obr.1: Snímače teploty: a) měřicí vložka, b) snímač do jímky, c) snímač jímkový

Plášťované odporové snímače teploty jsou ve formě dvou vodičů vzájemně izolovaných keramickým lisovaným práškem  $MgO$  nebo  $SiO_2$  ve stonkové trubici, kde je rovněž umístěn měřící odpor. Stonek lze libovolně tvarovat ohýbáním s minimálním poloměrem oblouku 25 mm. Teplotní rozsah  $-100$  až  $250^\circ C$ , vysoká stabilita, velká otřesuvzdornost, použití bez jímek do 4MPa.

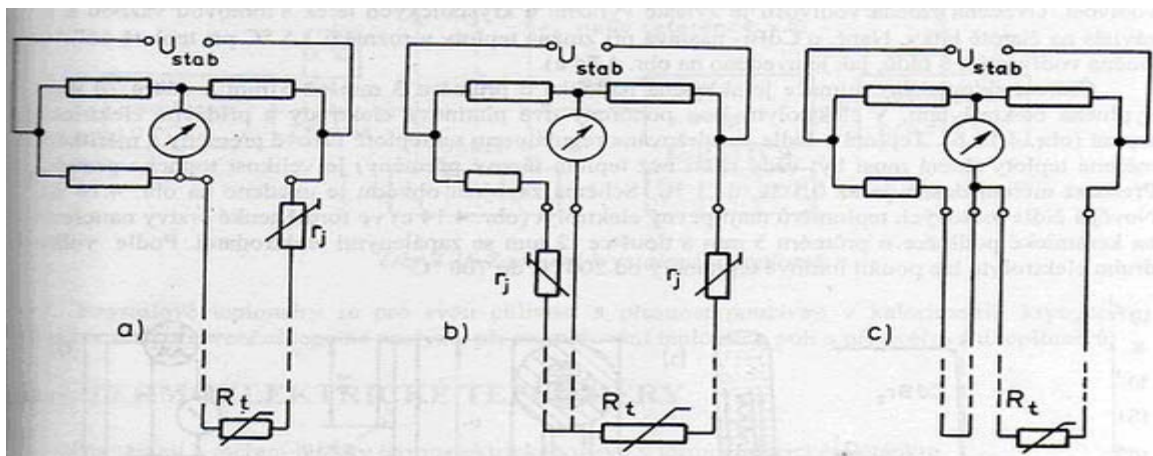
#### 2.5.4 Měření elektrického odporu

Uplatňují se zásadně dvě měřící metody můstkovou (výchylkovou i nulovou) a kompenzační

Výchylková můstková metoda je nejrozšířenější provozní metodou měření odporu. Můstek musí být napájen ze stabilizovaného zdroje.

Nulová můstková metoda je přesnější než výchylková, ale přístrojově složitější. V laboratorní praxi se používá ručně vyvažovaných můstků, pro provozní měření se používá automaticky vyvažovaných můstků. Vyvažovaný můstek nemusí být napájen stabilizovaným zdrojem.

Změnou teploty spojovacího vedení se mění i jeho odpor při zapojení podle obr.2a) a to zanáší do měření chyby. Proto je nutno tyto chyby eliminovat. Provádí se to dvěma způsoby zapojení. Třívodičovým zapojením podle obr.2b) se vliv změny odporu spojovacího vedení zanesou do dvou větví můstku a tím se eliminuje. Tohoto zapojení se používá při délce spojovacího vedení do 50 m. Pro delší spojovací vedení se používá tzv. spojovací smyčky obr.2c).



Obr.2: můstkové zapojení měřícího odporu: a)dvouvodičové, b)třívodičové, c)s volnou smyčkou

Kompenzační metoda vyžaduje čtyřvodičové zapojení měřících odporů. Proudové vodiče jsou zapojeny v napájecím obvodu, napěťové vodiče v měřícím obvodu. Měří se úbytek napětí  $U_t$  na měřícím odporu  $R_t$  a srovnává se s úbytkem napětí  $U_N$  na etalonovém odporu  $R_N$ . hledaný odpor měřícího odporu  $R_t$  se určí ze vstahu:

$$R_t = \frac{R_N U_t}{U_N} \quad (20)$$

Obvod je napájen stabilizovaným zdrojem proudu, úbytek napětí na měřícím odporu se měří komparátorem. Protože v okamžiku měření neprotéká měřícím obvodem proud neuplatňuje se vliv velikosti odporu spojovacího vedení, ani jeho změn vlivem teploty. Kompenzační měření odporu se používá pouze v laboratorní praxi.

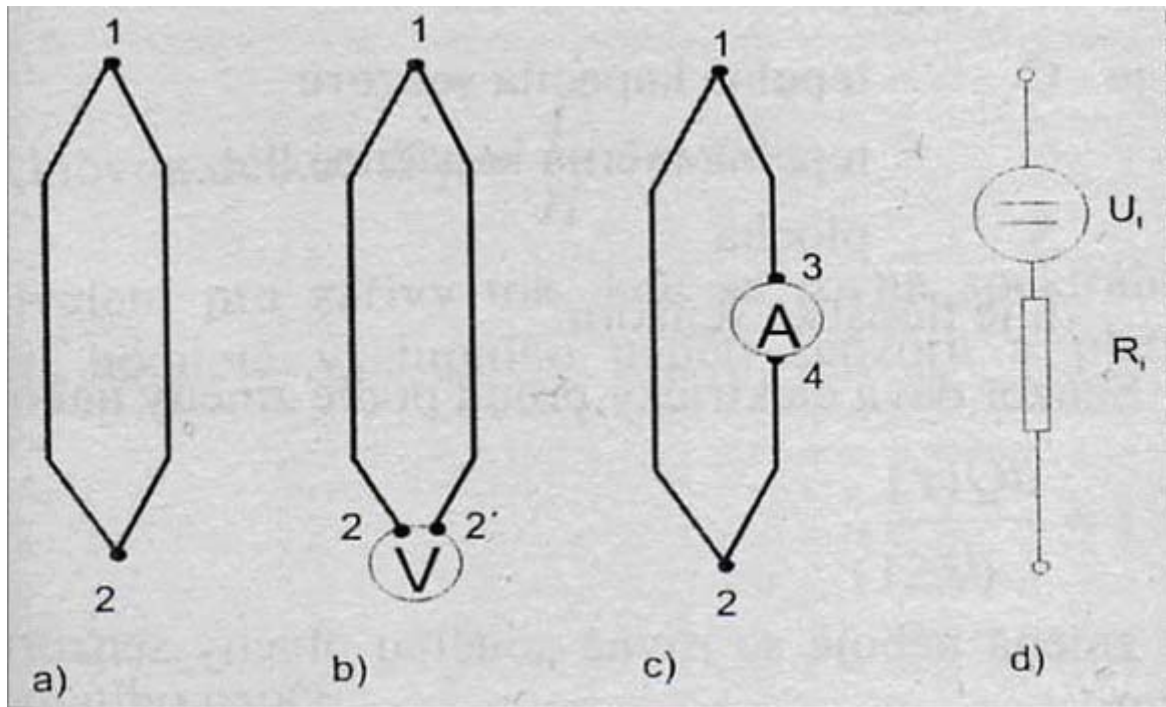
Při průchodu měřícího proudu měřícím odporem vzniká Jouleovo teplo a dochází k jeho ohřevu. Ohřátí měřícího odporu není zanedbatelné a pro přesná měření a často ani pro měření provozní a proto je nutno s touto okolností počítat. Pro běžné průmyslové teploměry se vychází z podmínky, že ztrátový výkon v měřícím odporu by neměl překročit 0,4mW. U miniaturních odporů je nutno počítat s ještě menšími přípustnými ztrátovými výkony. Pro běžné provozní snímače s měřícími odpory se základním odporem 100Ω platí, že měřící proud 1 až 2 mA způsobuje za běžných podmínek chybu měření menší než 0,05°C. Měřící proud u termistorů by neměl překročit hodnotu 50μA.

## 2.6 Termočláňkové senzory teploty

Vnější podnětem pro termoelektrické senzory je teplota. Fyzikální podstatou je Seebeckův jev, který uvedl v roce 1822 německý fyzik.

Z teorie pohybu volných elektronů u kovů je známo, že na styku dvou kovů vzniká rozdíl potenciálu. Základní uspořádání termočláňku je znázorněno na obr.3. Při zapojení v uzavřeném elektrickém obvodu dvou materiálů různých elektrických vodičů nebo polovodičů podle zapojení a) a c) protéká proud při rozdílných teplotách spojů 1 a 2. je-li v bodech 2-2'' zapojen voltmetr podle zapojení b) lze měřit termoelektrické napětí. Spoj 1 je měřící a spoj 2 je označován jako srovnávací nebo referenční.

Elektrické náhradní schéma termočláňku je uvedeno na obr.3d). Obsahuje zdroj stejnosměrného napětí  $U_t$  s malým vnitřním odporem  $R_t$  v řádu jednotek ohmů.



Obr.3: Schéma termočlánu

Na rozpojeném obvodu je elektromotorická síla daná Seebeckovým vztahem:

$$dU_{A,B} = S_{A,B} \cdot dT \quad (20)$$

kde je:  $S_{A,B} = S_A - S_B$

T teplota

### 2.6.1 Senzory termoelektrické kovové

Volba kovového materiálu pro termočlánek je provedena podle požadavků na citlivost, na linearitu závislosti napětí na teplotě, na odolnosti vůči korozi, mechanickým a chemickým vlivům a na odolnosti vůči teplotě ve velkém rozsahu. Dalším požadavkem je možnost provedení dokonalého kovového spoje. Je také velmi důležitá časová stálost materiálu především při vyšších teplotách.

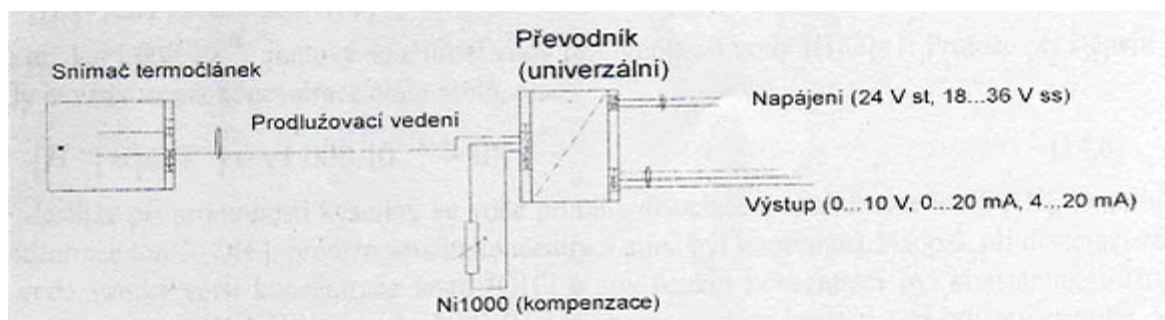
Podle závislosti napětí na teplotě, rozsahu teplot, odolnosti proti korozi a chemickým vlivům jsou termoelektrické páry normalizovány. Vybrané typy dvojic kovů pro v praxi používané senzory jsou uvedeny v tabulce.

Tab.2: Seznam používaných termočlánekových senzorů

IEC značení	Druh materiálu termočlátku	Měřicí rozsah teploty(°C)	Termoelektrický koeficient $a_i$ (mV/°C)
T	Cu - Konstantan	-200 až 400	0,0425
J	Fe - Konstantan	-200 až 800	0,0537
E	Chromel - Konstantan	0 až 1000	0,0632
K	Chromel - Alumel	0 až 1300	0,041
N	NiCrSi - NiSi	0 až 1200	cca 0,034
R	PtRh13 - Pt	0 až 1700	0,00645
S	PtRh10 - Pt	0 až 1700	0,00643
B	PtRh30 - PtRh6	0 až 1700	cca 0,008
C	WRe5 - WRe26	0 až 2320	cca 0,016

Vodič pro termočláanky může být drát o různém průměru nebo i pásový materiál. Spojení dvou kovů v měřicím spoji se provádí svařováním, letováním, nebo různými mechanickými technologiemi.

Senzor je propojen z dalšími obvody speciálním prodlužovacím vedením (nazývané také kompenzační). Toto místo tvoří srovnávací spoj z pohledu senzoru. Další propojení může být již jen Cu vodiči. Schéma zapojení je na obr.4.



Obr.4: Schéma zapojení termočlánekového senzoru na převodník

Hodnoty srovnávací teploty jsou udány v tabulkách s hodnotou 0°C, případně 20°C, 25°C nebo 50°C. Může být realizována umístěním srovnávacích konců do termostatu, nebo jako isothermické svorkovnice. V současné době se používá automatická kompenzace v analogových nebo číslicových obvodech. Je to například analogové můstkové zapojení kompenzační krabice, nebo vnitřní zapojení integrovaného převodníku.

Pro zvýšení termočlánekového napětí na výstupu ze senzoru se v praxi používá sériové zapojení více termočláneků, kdy jsou použity pro měření všechny měřicí spoje a jako referenční všechny srovnávací spoje. Výstup dává součet napětí jednotlivých termočláneků. Takové senzory se nazývají thermopile.

### 2.6.2 Senzory termoelektrické nekovové

Jako nekovový materiál pro termočlánky je vhodný uhlík v podobě grafitu, karbid křemíku a karbid bóru. Tyto materiály jsou určeny pro měření teploty v obloukových pecích nebo jaderných reaktorech. Jedna větev je zde tvořena uhlíkovou elektrodou nebo tyčí z karbidu bóru.

Uhlík v termočlánku ve dvojici s wolframem dosahuje citlivosti až  $15\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Termoelektrické senzory z karbidu křemíku a uhlíku dávají napětí až  $200\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Velkým problémem pro tyto termočlánky je měření vysoké teploty kolem  $1500^\circ\text{C}$  ve vzduchu, kdy vzniká oxidace uhlíku. Proto je použita ochranná atmosféra s inertním plynem.

## 2.7 Polovodičové monokrystalické senzory s PN přechody

Polovodiče jsou látky, které z pohledu elektrické vodivosti stojí mezi kovy a izolanty. Měrný odpor polovodičů je mezi  $10^{-3}$  až  $10^{10}$   $\Omega\cdot\text{cm}$  při  $20^\circ\text{C}$ . Tento měrný odpor je závislý na vnějších podmínkách, jako např. na působení elektromagnetického záření, radioaktivního záření, tlaku, teploty, nebo na koncentraci různých látek z okolí. Změna elektrické vodivosti je vysvětlena vznikem volných elektronů.

Polovodiče z přechody PN využívají pro vznik volných elektronů nečistoty, tj. přítomnost jiných atomů v krystalické mřížce. Je-li např. přidán do krystalické mřížky čistého germania, které má ve vnější vrstvě 4 elektrony atom pětimocného kovu (např. antimon) vzniká ve struktuře přebytek elektronu. Takový typ polovodiče se nazývá typ N a nečistota donor. Naopak je-li přidán třímocný prvek (např. indium), vzniká místo s chybějícím elektronem. Tento typ polovodiče se nazývá typ P a nečistota akceptor. Vodivost je dána existencí míst bez elektronů tj. děr.

Vytvořením dvou vrstev v krystalu polovodiče, pomocí různých příměsí, vzniká polovodičový přechod PN. Při difusních pochodech mezi nosiči vzniká na přechodu PN elektrické dvojvrstvá. Na rozhraní je maximum elektrického pole. Toto pole omezuje difúze majoritních nosičů a rozhraní dvojvrstvy je hradicí vrstvou.

Při zapojení elektrického napětí na přechod PN tak, že na vrstvu N přiložíme kladný pól, hradicí vrstva klade vysoký odpor, vzniká omezený průtok elektrického proudu a protéká jen tzv. zbytkový (závěrný) proud. Při přiložení záporného pólu na vrstvu N počíná klesat náboj na hradicí vrstvě, sníží se elektrický odpor hradicí vrstvy a přechodem pro-

téká difusní elektrický proud. Je to proud v propustném směru, který roste exponenciálně s rostoucím napětím. [5]

### 2.7.1 Senzory diodové a tranzistorové

Polovodičový PN přechod v diodě a bipolárním tranzistoru je silně závislý na teplotě. Když je PN přechod připojen ke zdroji konstantního proudu v propustném směru, napětí na něm je úměrné teplotě spoje. Vysoký stupeň linearit je velkou výhodou tohoto senzoru, což dovoluje jednoduchou metodu kalibrace používající pouze dva body k určení závislosti. Pro závislost difusního proudu na teplotě platí

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{qU_D}{2kT}\right) \quad (21)$$

kde je:  $I_0$  saturační proud, který je silnou funkcí teploty

Teplotně závislé napětí na PN přechodu je vyjádřen jako:

$$U_D = \frac{E_g}{q} - \frac{2kT}{q} (\ln K - \ln I_D) \quad (22)$$

kde je:  $E_g$  energetické pásmo pro křemík při 0K

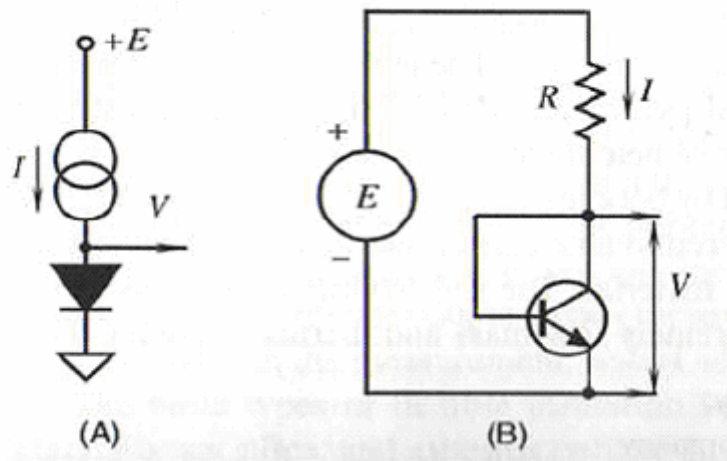
$q$  náboj elektronu

$K$  teplotně nezávislá konstanta

Z toho plyne, že když PN přechod je použit s generátorem konstantního proudu, napětí je lineárně závislé na teplotě a citlivost je dána:

$$b = \frac{dU_D}{dT} = \frac{2k}{q} (\ln K - \ln I_D) \quad (23)$$

Typická citlivost pro křemíkový PN přechod, při napájení  $10\mu\text{A}$  je přibližně  $-2,3\text{mV}/^\circ\text{C}$  a změní se na asi  $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$  při napájení  $1\text{mA}$ .



Obr.5: Zapojení polovodičových senzorů teploty  
s přechodem PN

Typický obvod pro transistor užitý jako teplotní čidlo je ukázán na obr.5b). Zdroj napětí  $E$  a stabilní odpor  $R$  jsou užity na místo zdroje proudu. Proud tranzistorem je definován:

$$I = \frac{E - U_D}{R} \quad (24)$$

Se vzrůstající teplotou napětí klesá s výsledným minimálním vzestupem proudu podle rovnice (23) to způsobí částečné snížení citlivosti, což se projeví jako nelinearita. Tato nelinearita je buď velmi malá nebo může být kompenzována při zpracování signálu.

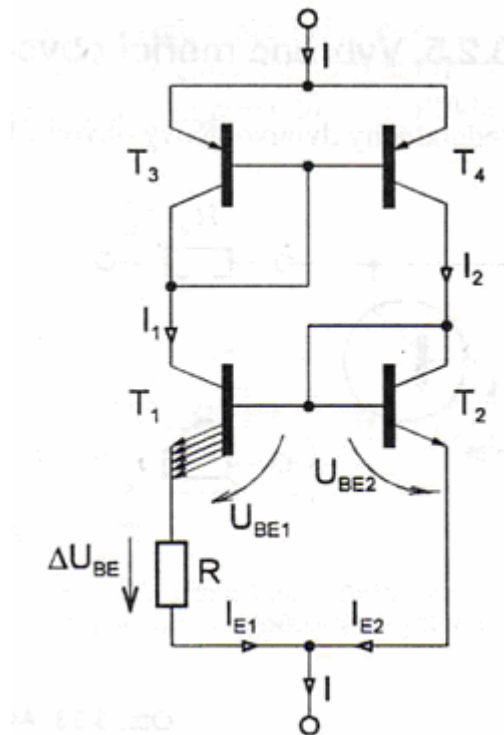
Toto činí tranzistorový senzor velmi zajímavým přístrojem pro mnoho použití vzhledem k jednoduchosti a nízké ceně. Ukazuje se že chyba je velmi malá a pro většinu praktických využití vyrovnání nelinearity není nutné.

Diodový senzor může být vytvořen na křemíkovém substrátu v mnoha monolitických obvodech, které vyžadují teplotní kompenzaci. Například může být difuzovaný do mikromembány křemíkového tlakového senzoru, nebo kompenzovat teplotní závislost Piezo elementu.[4]



### 2.7.2 Integrované PN senzory teploty

Princip vyráběných integrovaných senzorů, u nichž senzor a elektronický obvod tvoří jediný monolitický prvek, vychází ze zapojení na obr.:6.



Obr.6: Integrovaný PN sensor

Teplotně citlivé PN přechody tranzistorů jsou BE přechody tranzistorů  $T_1$  a  $T_2$ . Tyto tranzistory jsou napájeny dvěma shodnými proudy  $I_1$  a  $I_2$  z tzv. proudového zrcadla tvořeného tranzistory  $T_3$  a  $T_4$ . Proudové zrcadlo  $T_1$  a  $T_2$  má rozdílnou hustotu proudů emitorových přechodů. Tranzistor  $T_1$  je složen z  $r$  paralelně zapojených tranzistorů, z nichž každý má stejnou plochu  $S_e$  emitorového přechodu jako tranzistor  $T_2$ , tak, že výsledná plocha  $S_{E1} = r \cdot S_{E2}$ . Pro saturační proud tranzistoru platí  $I_S = f(S_E)$ , takže pro poměr proudů  $I_2/I_1$  platí:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{E2} e^{\frac{U_{BE2}}{U_T}}}{S_{E1} e^{\frac{U_{BE1}}{U_T}}} \quad (25)$$

Neboli pro poměr proudových hustot  $J_1$  a  $J_2$  za předpokladu  $T_1 = T_2$  platí

$$\frac{J_2}{J_1} = e^{\frac{U_{SE2} - U_{BE1}}{U_T}} = e^{\frac{\Delta U_{BE}}{U_T}} = r \quad (26)$$

a tedy:

$$\Delta U_{BE} = U_T \ln r = \frac{kT}{e} \ln r = KT \quad (27)$$

kde  $K = \frac{k}{e} \ln r$

Dle zapojení na obr.6 je zřejmé že proud  $I_{E1} = U_{BE} / R$  a ze vztahu (27) vyplývá, že je tento proud lineární funkcí teploty. Vzhledem k symetrickému zapojení zrcadel bude tato vlastnost platit i pro celkový proud  $I = 2I_E$ . Dalšího zvýšení citlivosti monolitického integrovaného senzoru se docílí, má-li proudové zrcadlo z tranzistorů  $T_3$  a  $T_4$  také rozdílné plochy emitorových přechodů.  $S_{E4}/S_{E5} = m$ . Pro proudy  $I_1$  a  $I_2$  pak platí

$$\frac{I_2}{I_1} = m = \frac{I_{E2}}{I_{E1}} \quad (28)$$

Výsledný proud je pak dán vztahem

$$I = mI_{E1} + I_{E1} = (m+1) \frac{k}{eR} T \ln r = (m+1)KT \quad (29)$$

### 3 CONTROL WEB

Program Control Web od firmy Moravské přístroje a.s patří k velice rozšířeným produktům určeným pro vývoj průmyslových SCADA/HMI aplikací. Jedná se o objektově orientovaný grafický generátor umožňující monitorování, řízení, bilancování a trendování technologického procesu. Vyznačuje se snadnou konfigurovatelnou objektově orientovanou grafikou s vlastním grafickým editorem. Control Web pracuje v prostředí operačních systémů implementujících aplikační programové rozhraní Win32 a podporuje řadu průmyslových standardů.

Control Web 5 koncepčně vychází z osvědčené architektury svých předchůdců Control Panel a Control Web. Nasazení těchto systémů od jaderných elektráren a celopodnikových informačních systémů, až po přímé řízení jednotlivých strojů dokazuje velmi široké možnosti těchto produktů. Control Web 5 stále zůstává daleko před veškerou konkurencí v oblasti konektivity a podpory internetových a intranetových technologií. Distribuovanost, dokonalá propojenost v počítačových sítích a vestavěný HTTP server je u tohoto systému i nadále naprostou samozřejmostí.

ControlWeb může pracovat stejně jako spousta jiných SCADA/HMI systémů používaných v průmyslu. K dispozici jsou všechny komponenty nutné k tvorbě vizualizačních aplikací - zobrazovací a ovládací prvky, alarmy a archivy, historické trendy apod. Navíc ale dodává skutečnou programovatelnost a otevřenou, komponentovou architekturu. Množina virtuálních přístrojů není pevně dána a zabudována v systému. Každý přístroj je dynamicky linkovaná knihovna detekovaná při startu systému. Není problém množinu virtuálních přístrojů libovolně rozšiřovat.

#### ***Control Web:***

- Umožňuje práci v reálném čase. Nespoléhá se na tzv. databázi tagů, která je aktualizována tzv. "maximální možnou rychlostí" (což v praxi může znamenat i intervaly několika desítek sekund mezi komunikacemi s automaty připojenými přes DDE). Každý vstupně/výstupní kanál je čten přesně v době, kdy jej nějaký virtuální přístroj (nebo skupina virtuálních přístrojů) požaduje. Real-time časování je přesně monitorováno a řízeno
- Umožňuje sekvenční řízení procesů. Virtuální přístroje nemusí být aktivovány "když systém usoudí", ale v přesně definovaném čase a v přesně definované sekvenci

- Umožňuje vizualizaci technologií prostřednictvím internetových standardů HTTP a HTML pomocí libovolného WWW klienta, ať již pracuje v prostředí MS Windows, Apple Macintosh nebo UNIX či Network Thin Client. Přitom se nejedná o pouhý plugin do nějakého existujícího HTTP serveru, např. Microsoft IIS běžícího pod Windows NT Serverem. Control Web obsahuje plnohodnotný HTTP server dynamicky tvořící stránky podle stavu technologie. Navíc dokáže prostřednictvím HTTP a HTML technologii i řídit
- snadnost používání může redukovat programování na několik pohybů myši. Průvodci budují kostru aplikace a navigují uživatele přes počáteční stádia návrhu aplikace. Integrované vývojové prostředí umožňuje kdykoliv přecházet mezi textovým módem a grafickým módem návrhu
- podporuje nejrozšířenější průmyslové standardy pro výměnu dat a spolupráci mezi aplikacemi - COM/OLE, ActiveX, ODBC, SQL

## 4 DATALAB IO/USB

Průmyslové vstupně/výstupní jednotky DataLab IO/USB jsou určeny pro spolupráci s nadřazeným počítačem, pro který zprostředkovávají měření (čtení) i nastavování (zápis) veličin. Jednotky DataLab IO/USB komunikují s počítačem po velmi rychlé standardní sériové sběrnici USB (Universal Serial Bus). USB se stal zcela všeobecně uznávaným standardem, který nahrazuje zastarávající sériové linky a jiná rozhraní.

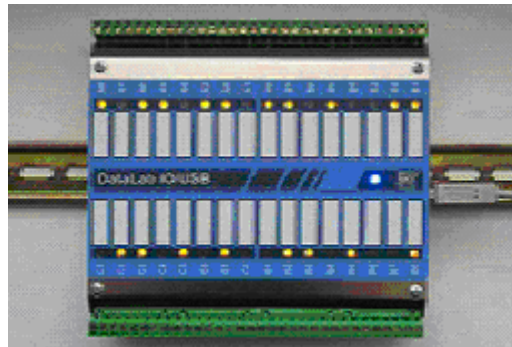
Rozhraní USB přináší uživatelům velké množství výhod:

- Především je to již zmiňovaná standardnost a univerzální rozšířenost.
- Vysoká přenosová rychlost 12Mb/s dovoluje přenést 0,8 až 1MB čistých dat za sekundu (čistými daty rozumíme užitečná data po odečtení režie rozhraní; celkový objem přenesených dat je vyšší o CRC kódy, potvrzování paketů apod.).
- Veškerá konfigurace je zcela automatická (Plug and Play), a to včetně instalace ovladačů. Skutečně stačí pouze spojit jednotku DataLab IO/USB s počítačem pomocí USB kabelu a o ostatní se postará operační systém spolu s ovladačem zařízení. Odpadá nastavování přenosové rychlosti, parity, počtu stop bitů atd. Automatické je také adresování zařízení—adresa je vždy přidělena automaticky při připojení zařízení k USB portu.
- USB kabel je opatřen rozdílnými zásuvkami pro připojení k počítači (konektor USB-A) a k USB zařízení (konektor USB-B). Tento standard zabraňuje chybnému propojení USB zařízení s počítačem na fyzické úrovni.

Návrh jednotek DataLab IO/USB je důsledně modulární. Každá jednotka má 4 (v případě DataLab IO/USB) nebo 1 (DataLab IO $\mu$ /USB) pozici, do kterých lze zasunout vstupně/výstupní moduly podle potřeb aplikace. Lze tak libovolně kombinovat moduly pro 8 logických vstupů s moduly obsahujícími 8 logických výstupů ať již s relé či výstupními tranzistory s otevřeným kolektorem. K dispozici jsou i moduly přesných 16bitových analogových vstupů a množina I/O modulů není uzavřena a další typy modulů přibývají.

Je také možné osadit jen část pozic, pokud jsou požadavky na počty vstupů/výstupů menší než je kapacita jedné jednotky. Samozřejmě také lze k jedinému počítači připojit více jednotek a tím počty vstupů/výstupů zvýšit. Pokud počet USB rozhraní v počítači nestačí (běžně bývá k dispozici 2 až 6 USB portů), je možné pomocí USB rozbočovače (USB Hub) počet portů zvýšit. Přenosová kapacita USB je hodně vyšší než je potřebné pro prů-

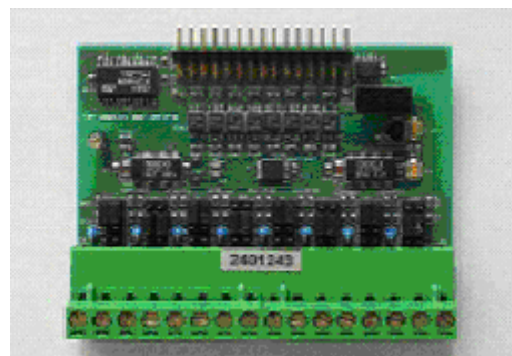
myslové aplikace a tak rozdělení kapacity jediného USB portu mezi více jednotek nepřináší podstatné snížení propustnosti.



Obr.7: DataLab IO/USB

#### 4.1 Modul analogových vstupů

- 8 analogových vstupů
- 16bitový delta-sigma převodník
- Bipolární diferenční vstupy
- Galvanicky oddělená signální část
- Vstupy 0 až  $\pm 20V$ , 0 až  $\pm 20mA$

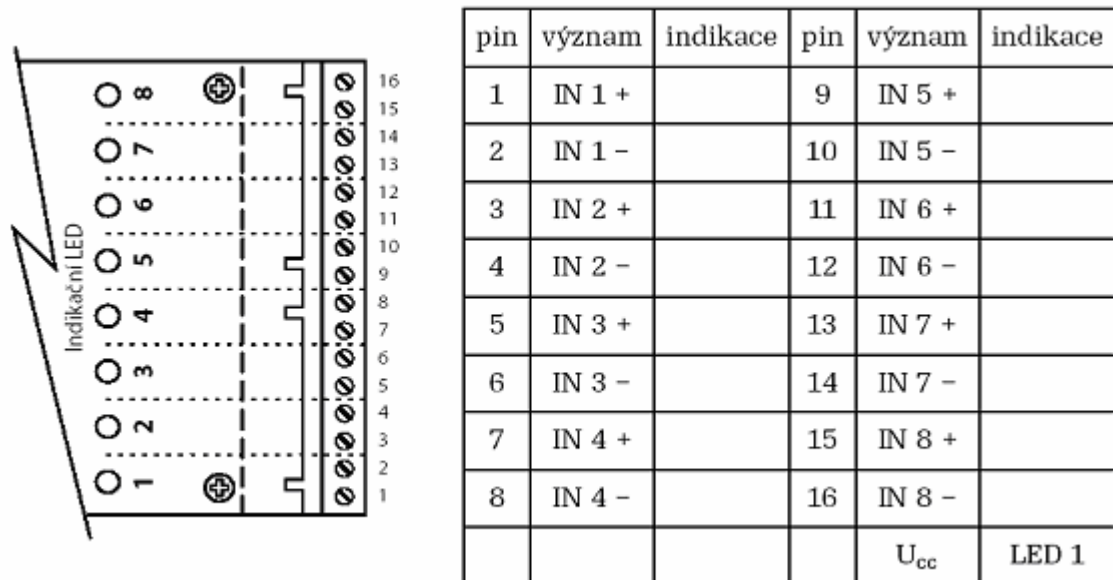


Obr.8: Modul analogových vstupů

Modul DL-A11 obsahuje osm diferenčních analogových vstupů. Pomocí propojek lze nastavit každý vstup zvlášť pro napěťový nebo proudový signál.

Indikační LED č.1 signalizuje přítomnost napájecího napětí modulu.

Mezní vzorkovací kmitočet 20 Hz je limitován rychlostí A/D převodu. Doba komunikace mezi jednotkou DataLab IO/USB a nadřazeným počítačem je asi 4ms a vzhledem k době převodu nemá podstatný vliv na rychlost získávání hodnot do počítače.



Obr.9: Označení a význam svorek

Vstupy mohou pracovat v jednom ze tří režimů, které se nastavují pomocí propojek pro každý vstup zvlášť.

**Režim napěťový BIAS** - Zapnutí BIAS. Zvýšený rozsah napěťových vstupů 4×.

**Režim napěťový** - BIAS vypnut, standardní rozsah napěťových vstupů.

**Režim proudový** - Zapojen bočník 120 Ω pro proudový signál 0-20 mA, tj. 0 až 2,4 V.

Tab.3: Měřicí rozsahy modulu analogových vstupů

BIAS	Mód	Max. napětí mezi vstupy	Plný rozsah
1	0	±20 V	40V
1	1	±10 V	20V
1	2	±5 V	10V
1	3	±2,5 V	5V
0	0	±5 V	10V
0	1	±2,5 V	5V
0	2	±1,25 V	2,5 V
0	3	±0,625 V	1,25 V

Hodnoty 0 a 1 ve sloupci „BIAS“ značí polohy BIAS propojek na desce plošných spojů modulu. Sloupec „Mód“ je číslo měřicího rozsahu definované v aplikaci.

Hodnoty „Max. napětí mezi vstupy“ a „Plný rozsah“ si zaslouží bližší vysvětlení:

- Ani jedna vstupní svorka není spojena se zemí a je tedy lhostejné, zda na vstupy přivedeme napětí -20V a 0V, -10V a +10V či 0V a +20V. Proto je udáván parametr maximální napětí mezi vstupy a nikoliv symetrický rozsah (např.  $\pm 10V$ ). Tato diference napětí při daném rozsahu způsobí čtení hodnoty převodníku  $32767 (2^{15}-1)$ .
- Vstupy jsou plně bipolární a pokud svorky přepólujeme, budeme vyčítat záporná čísla. Popříjedení 0Va-20Vtedy přečteme hodnotu -32 768. Ačkoliv tedy maximální napětí mezi svorkami je 20V, dvě polarity tohoto napětí vytvoří měřicí rozsah 40V.



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 POPIS VYBRANÝCH SENZORŮ PŘEDNÍCH SVĚTOVÝCH FIREM A VÝBĚR SENZORU

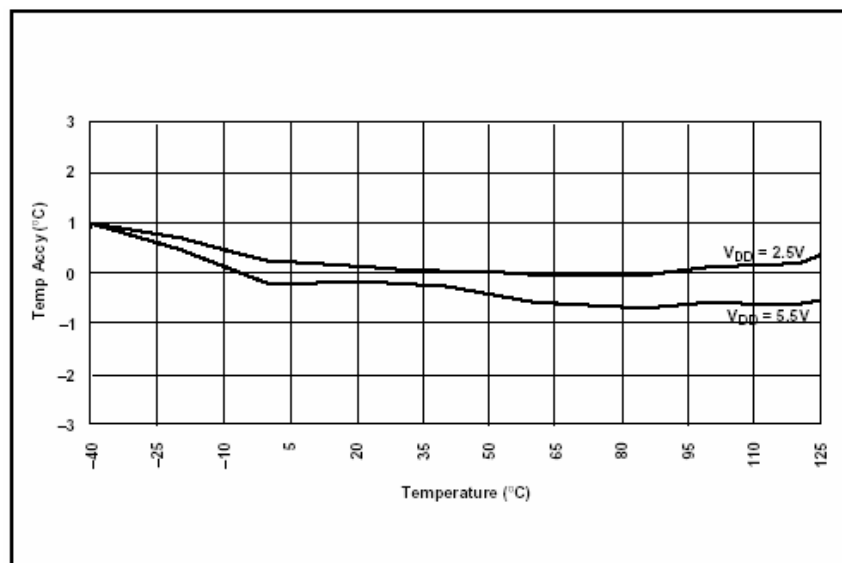
### 5.1 Microchip TC1047

TC 1047 je senzor teploty s lineární napěťovým výstupem. TC 1047 měří přesně v rozsahu od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $125^{\circ}\text{C}$ . Napájecí napětí TC 1047 může být v rozsahu 2,7 až 4,4V.

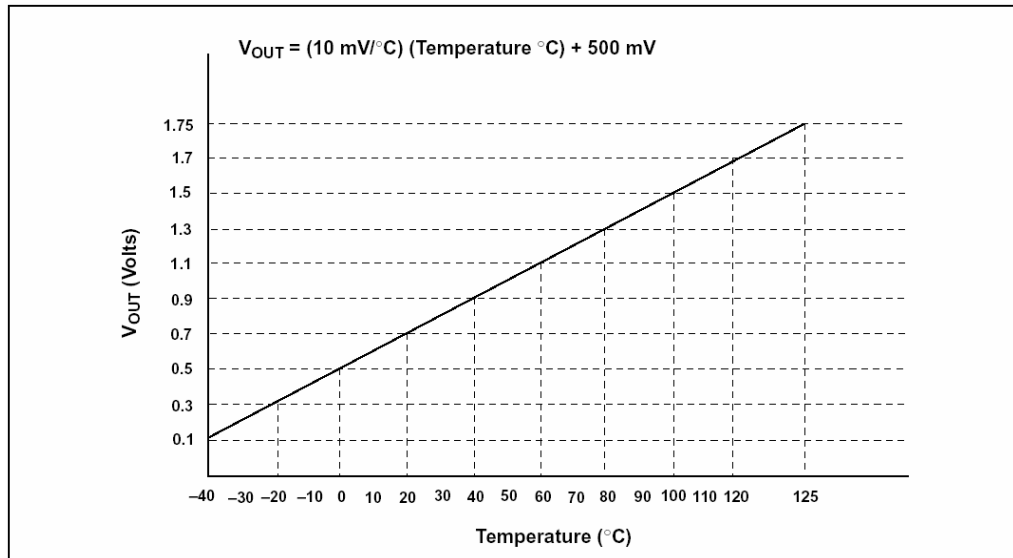
Výstupní napětí tohoto zařízení je obvykle 100mV při  $-40^{\circ}\text{C}$ , 500mV při  $0^{\circ}\text{C}$ , 750mV a 1,75V při  $125^{\circ}\text{C}$ . Citlivost  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  dovoluje určit odezvu senzoru na teplotu v celém rozsahu. Senzor TC 1047 je umístěn v 3 pinovém pouzdře SOT-23B, které je vhodné pro použití v prostorech kde není dostatek místa.

Tab.4: Elektrické charakteristiky senzoru

Parametry	Sym	Min	Typ	Max	Jednotky	Poznámky
Napájecí napětí	$V_{DD}$	2.7	—	4.4	V	TC1047
		2.5	—	5.5	V	TC1047A
Napájecí proud	$I_Q$	—	35	60	$\mu\text{A}$	
Citlivost výstupního napětí	$A_V$	—	10	—	$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$	
Teplotní nepřesnost	$\text{TMP}_{ACY}$	-2	$\pm 0.5$	+2	$^{\circ}\text{C}$	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$
		-3	$\pm 0.5$	+3	$^{\circ}\text{C}$	$T_A = +125^{\circ}\text{C}$
		—	1.0	—	$^{\circ}\text{C}$	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$
Výstupní napětí	$V_{OUT}$	—	100	—	mV	$T_A = -40^{\circ}\text{C}$
		730	750	770	mV	$T_A = 25^{\circ}\text{C}$
		1720	1750	1780	mV	$T_A = +125^{\circ}\text{C}$
Proud výstupu	$I_{OUT}$	100	—	—	$\mu\text{A}$	



Obr.10: Závislost absolutní chyby na teplotě



Obr.11: Výstupní charakteristika senzoru

## 5.2 SGS-Thomson Microelectronic LM 135

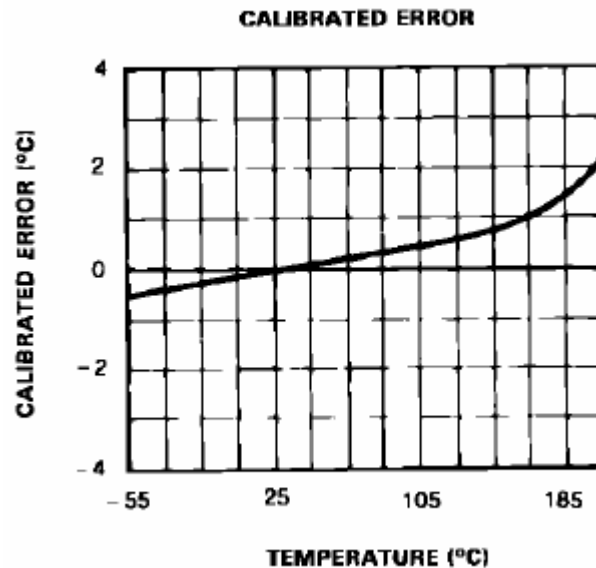
LM 135 je přesný teplotní senzor, který může být jednoduše kalibrovatelný. Pracuje jako Zenerova dioda a průrazné napětí je přímo úměrné teplotě v poměru 10mV/K. Dynamická impedance obvodu je nižší než 1 $\Omega$ . Pracuje při proudovém rozpětí 450 $\mu$ A až 5mA. Chyba kalibrovaného obvodu při 25 $^{\circ}$ C je méně než 1 $^{\circ}$ C na rozsahu 100 $^{\circ}$ C. Senzor LM 135 má lineární výstup. Senzor je použitelný pro teploty od -55 $^{\circ}$ C do 150 $^{\circ}$ C.

Tab 5: Přesnost senzoru

Parametr	Min	Typ	Max	Jednotky	Poznámky
Provozní výstupní napětí	2,95	2,98	3,01	V	T=25 $^{\circ}$ C, I <sub>R</sub> =1mA
Teplotní chyba bez kalibrace T=25 $^{\circ}$ C		1	3	$^{\circ}$ C	I <sub>R</sub> =1mA
Teplotní chyba bez kalibrace T <sub>min</sub> <T<T <sub>max</sub>		2	5	$^{\circ}$ C	I <sub>R</sub> =1mA
Teplotní chyba s kalibrací T <sub>min</sub> <T<T <sub>max</sub>		0,5	1,5	$^{\circ}$ C	kalibrace při 25 $^{\circ}$ C
Nelinearita		0,3	1	$^{\circ}$ C	I <sub>R</sub> =1mA

Tab 6: Elektrické parametry

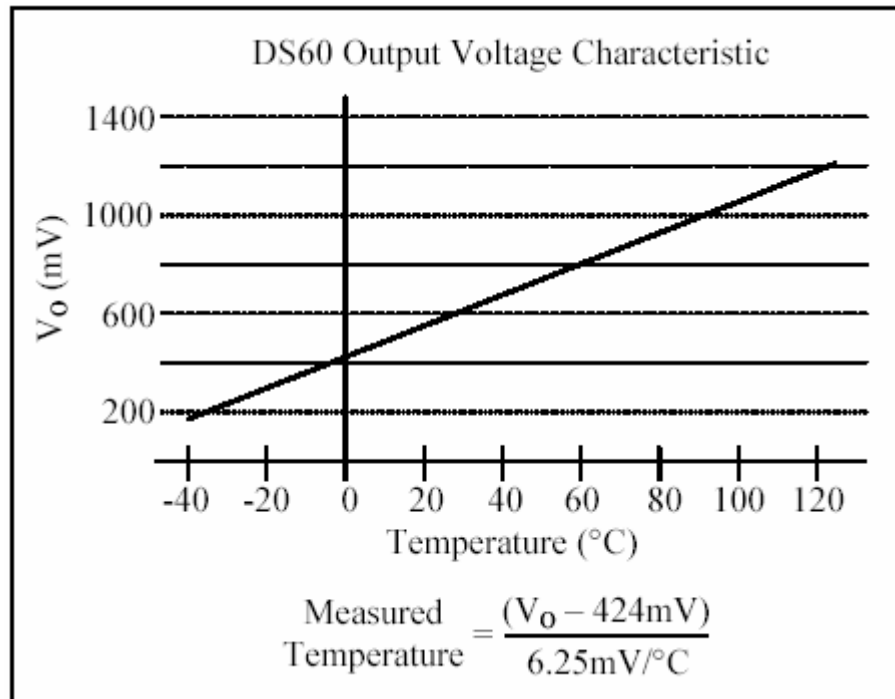
Parametr	Min	Typ	Max	Jednotky	Poznámky
Změna výstupního napětí při změně napájecího proudu v rozsahu 450 $\mu$ A až 5mA		2,5	10	mV	
Dynamická impedance		0,5		$\Omega$	$I_R=1mA$
Výstupní napěťový teplotní drift		10		mV/ $^{\circ}C$	
Časové konstanty:					
Klidný vzduch		80		s	
Vzduch 0,5m/s		10		s	
Míchaný olej		1		s	
Časová stability		0,2		$^{\circ}C/kh$	$T=125^{\circ}C$



Obr.12: Chyba kalibrace

### 5.3 Dallas semiconductor DS 60

Analogový teplotní senzor DS 60 měří svou teplotu a poskytuje uživateli výstupní napětí úměrné stupňům celsia. Výstupní napěťová charakteristika je z výroby nastavena na citlivost 6,25mV/ $^{\circ}C$  a offset na 424mV při 0 $^{\circ}C$ . Jeho pracovní teplotní rozsah je -40 $^{\circ}C$  až 125 $^{\circ}C$  a odpovídá napětí od 174mV do 1,205V. DS 60 má chybu měření 2 $^{\circ}C$  při rozsahu od 0 do 85 $^{\circ}C$  při plné šíři napájecího napětí 2,7V až 5,5V. Dále má chybu 3 $^{\circ}C$  pro celý rozsah teplot a taktěž pro celou šíři napájení. DS 60 svými malými rozměry, nízkou spotřebou a velkou škálou napájecích napětí je vhodné pro použití v bateriových přístrojích.



Obr.13: Výstupní charakteristika senzoru

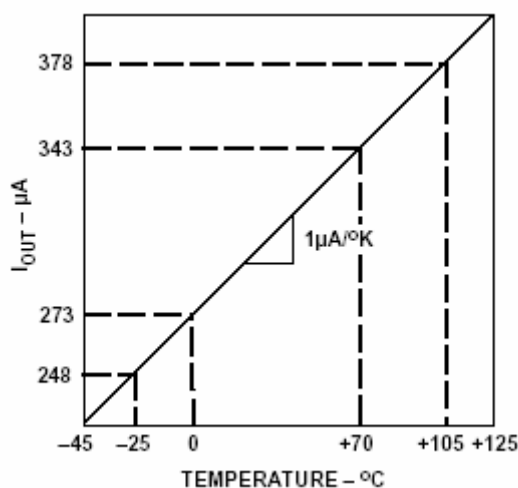
Tab 7: Technické parametry senzoru

PARAMETRY	SYMBOL	POZNÁMKY	MIN	TYP	MAX	JEDNOT.
Napájecí napětí	V <sub>DD</sub>		2.7		5.5	V
Napájecí proud	I <sub>DD</sub>			80	125	μA
Chyba měření	T <sub>ERR</sub>	0°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ 85°C			±2	°C
		-40°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ 125°C			±3	
V <sub>O</sub> DC Offset		T = 0°C		424		mV
Citlivost senzoru	ΔV/ΔT		6.0	6.25	6.5	mV/°C
Nelinearita					±0.8	°C
Výstupní impedance					800	Ω

## 5.4 Analog Devices AD 592

Oproti předchozím verzím, vylepšený design a laserem vrstvené odpory integrovaného obvodu, dovolují AD592 dosáhnout vysoké úrovně přesnosti a nízké nelinearity chyb dříve nedosažitelné v této cenové hladině. AD 592 využívá vlastností popsanych v kapitole 2.7.2 Výsledkem je zdroj proudu s výstupem, který je roven násobku převodního faktoru a teploty senzoru. Tovární nastavení převodního faktoru na 1 μA/K je upraveno vrstvenou úrovní tak, aby načítané teploty AD592 korespondovaly s aktuální teplotou. Během laserové úpravy má IO teplotu kolem 25°C a je napájen napětím o hodnotě 5V. Zařízení je pak baleno a automaticky teplotně testováno.

Pro AD592 jsou dány tři základní chybové limity, které umožňují vybrat správný stupeň přesnosti pro jakoukoliv aplikaci při jakékoliv úrovni přesnosti. Je to přesnost při 25°C, teplotní chyba od 0°C do 70°C a teplotní chyba od -25°C do 105°C. Tyto tři charakteristiky mají vztah k aktuální chybě, kterou uživatel zjistí, pokud proudový výstup AD592 byl přeměněn na napětí přesným odporem.



Obr.14: Závislost výstupního proudu  
na teplotě

Tab 8: Technické parametry senzoru AD 592

MODEL AD592	AN			BN			CN			Jednotka
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MA X	MIN	TYP	MA X	
<b>PŘESNOST</b>										
Chyba měření pro $t=25^{\circ}\text{C}$		1,5	2,5		0,7	1		0,3	0,5	$^{\circ}\text{C}$
$t = 0^{\circ}\text{C}$ až $70^{\circ}\text{C}$										
Chyba měření		1,8	3		0,8	1,5		0,4	0,8	$^{\circ}\text{C}$
Nelinearita		0,15	0,35		0,1	0,25		0,05	0,15	$^{\circ}\text{C}$
$t = -25^{\circ}\text{C}$ až $105^{\circ}\text{C}$										
Chyba měření		2	3,5		0,9	2		0,5	1	$^{\circ}\text{C}$
Nelinearita		0,25	0,5		0,2	0,4		0,1	0,35	$^{\circ}\text{C}$
<b>VÝSTUPNÍ CHARAKTERISTIKY</b>										
Teplotní koeficient		1			1			1		$\mu\text{A}^{\circ}\text{C}$
Opakovatelnost			0,1			0,1			0,1	
Časová stabilita			0,1			0,1			0,1	$^{\circ}\text{C}/\text{měsíc}$
<b>ABSOLUTNÍ ROZSAHY</b>										
Pracovní teplota	-25		105	-25		105	-25		105	$^{\circ}\text{C}$
Přípustná teplota	-45		125	-45		125	-45		125	$^{\circ}\text{C}$
Propustné napětí			44			44			44	V
Závěrné napětí			20			20			20	V
Pájecí teplota (max 10s)			300			300			300	$^{\circ}\text{C}$
Napájecí napětí	4		30	4		30	4		30	V

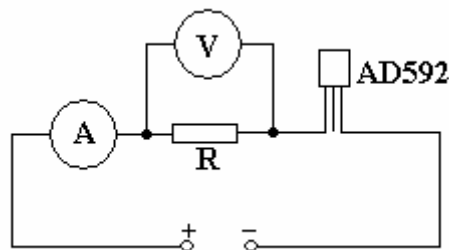
## 5.5 Výběr senzoru

Pro své měření jsem si vybral senzor AD 592 pro jeho malé rozměry, jednoduchou připojitelnost na plochý kabel, proudový výstup, který je vhodnější pro delší vedení signálu, ve verzi AN (kterou používám) pak přijatelná cena a v neposlední řadě to, že senzor již byl na fakultě aplikované informatiky používán a jsou sním již určité zkušenosti.

## 6 OVĚŘENÍ FUNKCE SENZORU AD592AN

### 6.1 Zapojení senzoru pro ověřování

Senzor AD 592 je zapojen do série s rezistorem R a ampérmetrem, který měří proudový výstup senzoru. Paralelně k rezistoru R je připojen voltmetr, který měří napětí na rezistoru, které je podle Ohmova zákona úměrné výstupnímu proudu a které bude v modelu použito jako výstupní signál. Toto zapojení je pak připojeno na zdroj ss. napětí.



Obr.15: Zapojení senzoru pro ověřování

Jako napájecí zdroj jsem použil pro napětí 5 a 12V zdroj Voltkraft s nastavitelným výstupním napětím 1,5-15V a výstupním proudem 1,5A. Pro napětí 24V pak zdroj Voltkraft se stabilním výstupem 24V. Jako voltmetr i ampérmetr jsou použity multimetry RE 830D, které měří s přesností na tři platné číslice. Ohřev senzoru je zajišťován pomocí plotýnky ovládané regulátorem, díky němuž je možno nastavit požadovanou teplotu. Plotýnka je vybavena senzorem teploty Pt 100 díky němuž je možno odečítat teplotu na plotýnce. Dále byly použity dva digitální teploměry pro porovnání teploty naměřené senzorem AD592 a teploty skutečné. Pro měření teploty povrchu plotýnky byl použit senzor Testo quicktemp 825-t4 a pro měření teploty vzduchu senzor Testo 625. Jejich parametry jsou uloženy v příloze.

### 6.2 Měření závislosti výstupu na napájecím napětí

Měření bylo prováděno podle zapojení v kapitole 6.1 Při napájecím napětí 5, 12 a 24V a rezistor pro převod proudu na napětí měl hodnotu  $997\Omega$ . Pro každou hodnotu napětí bylo provedeno 10 měření jejichž statistické vyhodnocení je v tabulce 9. Měření byla prováděna při pokojové teplotě a jako ověřovací byl použit digitální teploměr Testo quicktemp 825-t4.



Tab 9: Závislost výstupního proudu a parametrů z něho odvozených na napájecím napětí

Napájení 5V

	t(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	23,3	297	297	24	25
maximum	23,5	298	297	25	25
sm. odchylka	0,066	0,40	0,00	0,40	0,00
průměr	23,4	298	297	25	25

Napájení 12V

	t(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	23,2	298	297	25	25
maximum	23,5	298	297	25	25
sm. odchylka	0,078	0,00	0,00	0,00	0,00
průměr	23,4	298	297	25	25

Napájení 24V

	t(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	23,3	298	297	25	25
maximum	23,4	299	298	26	26
sm. odchylka	0,046	0,30	0,30	0,30	0,30
průměr	23,3	299	298	26	26

Z tabulky je zřejmé, že nějaké rozdíly mezi naměřenými teplotami jsou, ale jejich hodnota nepřekračuje povolenou chybu pro tento typ senzoru je tedy možné je zanedbat. Kompletní tabulka naměřených hodnot je součástí příloh

### 6.3 Měření závislosti výstupu na sériově připojeném rezistoru

Měření bylo prováděno podle zapojení v kapitole 6.1 Při napájecím napětí 24V a třech hodnotách odporu sériově zapojeného rezistoru. Pro každou hodnotu odporu bylo provedeno 10 měření jejichž statistické vyhodnocení je v tabulce 10. Měření byla prováděna při přiložení senzoru k plotýnce o teplotě 30°C jak si dále ukážeme senzor není vhodný pro měření teploty pevného tělesa proto i výsledky mezi teplotou senzoru a teplotou plotýnky si neodpovídají pro náš pokus to však není důležité je pouze třeba aby všechny tři měření proběhly za stejných podmínek a to bylo dodrženo. Teplota plotýnky byla měřena senzorem Pt100 ( $t_p$ ) zabudovaným v plotýnce a digitální teploměr Testo quicktemp 825-t4 ( $t_m$ ) přiloženým na jejím povrchu.

Tab 10: Závislost výstupního proudu a parametrů z něho odvozených na velikosti odporu R.

R = 997  $\Omega$

	tp(°C)	tm(°C)	I( $\mu$ A)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	31,8	30,2	302	301	29	29
maximum	31,8	30,5	302	302	29	30
sm. odchylka	0,00	0,08	0,00	0,30	0,00	0,30
průměr	31,8	30,3	302	301	29	29

R = 9659  $\Omega$

	tp(°C)	tm(°C)	I( $\mu$ A)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	31,8	29,9	302	2,91	29	28
maximum	31,8	30,3	303	2,92	30	29
sm. odchylka	0,00	0,13	0,40	0,0046	0,40	0,47
průměr	31,8	30,1	302	2,92	29	29

R = 683  $\Omega$

	tp(°C)	tm(°C)	I( $\mu$ A)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	31,8	30,1	303	207	30	30
maximum	31,8	30,3	303	207	30	30
sm. odchylka	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
průměr	31,8	30,2	303	207	30	30

Z tabulky vyplývá že rozdíly, které tam jsou odpovídají velikosti chyby měření a jde tedy říct, že závislost proudového výstupu na sériově připojeném odporu pro hodnoty odporů, které jsem použil je zanedbatelná. Kompletní tabulka naměřených hodnot je součástí příloh.

#### 6.4 Ověření funkčnosti senzoru pro měření teploty pevného tělesa

Měření bylo prováděno podle zapojení v kapitole 6.1 Při napájecím napětí 24V a sériově zapojeném rezistoru o odporu 997 $\Omega$ .. Měření byla prováděna při přiložení senzoru k plotýnce jejíž teplota byla nastavována za pomoci číslicového regulátoru v intervalu od 30°C do 70°C po 10°C. Teplota plotýnky byla měřena senzorem Pt100 ( $t_p$ ) zabudovaným v plotýnce a digitálním teploměrem Testo quicktemp 825-t4 ( $t_m$ ) přiloženým na jejím povrchu.

Tab 11: Ověření funkce pro měření teploty pevného tělesa

Žádaná teplota 30°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	31,8	30,2	302	301	29	29
maximum	31,8	30,5	302	302	29	30
sm. odchylka	0,00	0,08	0,00	0,30	0,00	0,30
průměr	31,8	30,3	302	301	29	29

Žádaná teplota 40°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	41,7	40,2	309	308	36	36
maximum	41,7	41,0	310	308	37	36
sm. odchylka	0,00	0,22	0,30	0,00	0,30	0,00
průměr	41,7	40,8	309	308	36	36

Žádaná teplota 50°C

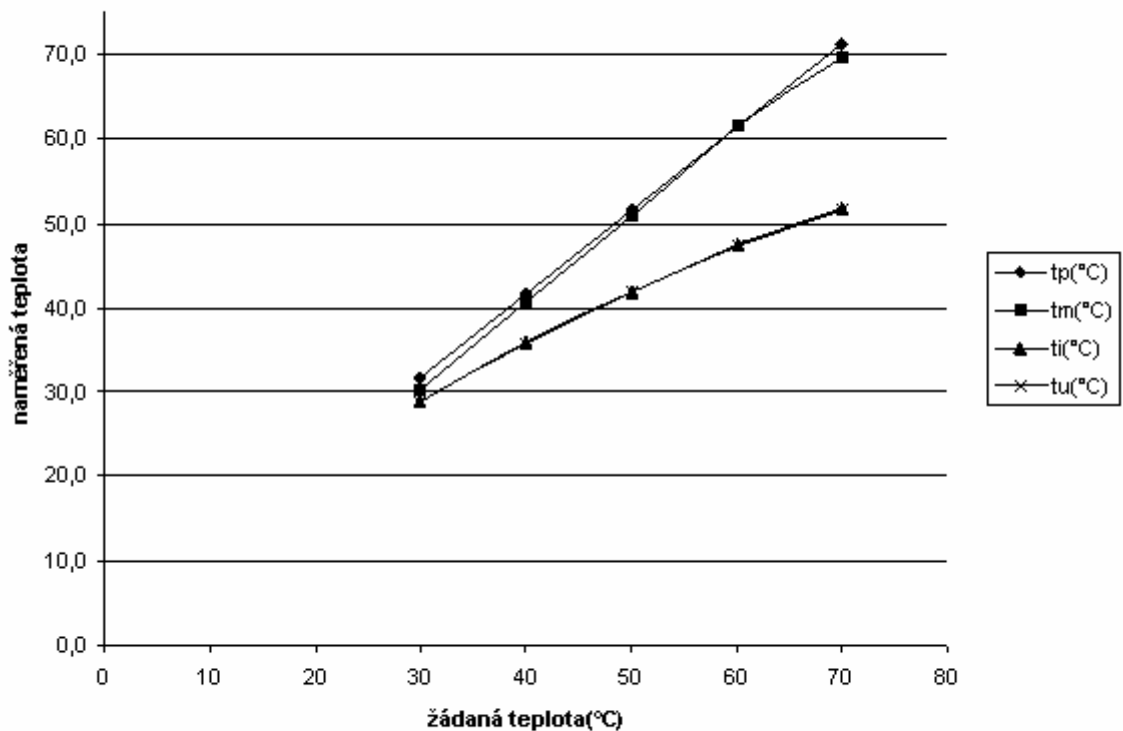
	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	51,5	50,2	313	312	40	40
maximum	51,6	51,4	316	315	43	43
sm. odchylka	0,03	0,38	0,83	0,83	0,83	0,83
průměr	51,6	50,8	315	314	42	42

Žádaná teplota 60°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	61,4	61,2	318	317	45	45
maximum	61,4	61,8	321	320	48	48
sm. odchylka	0,00	0,19	0,92	0,92	0,92	0,92
průměr	61,4	61,6	321	320	47	47

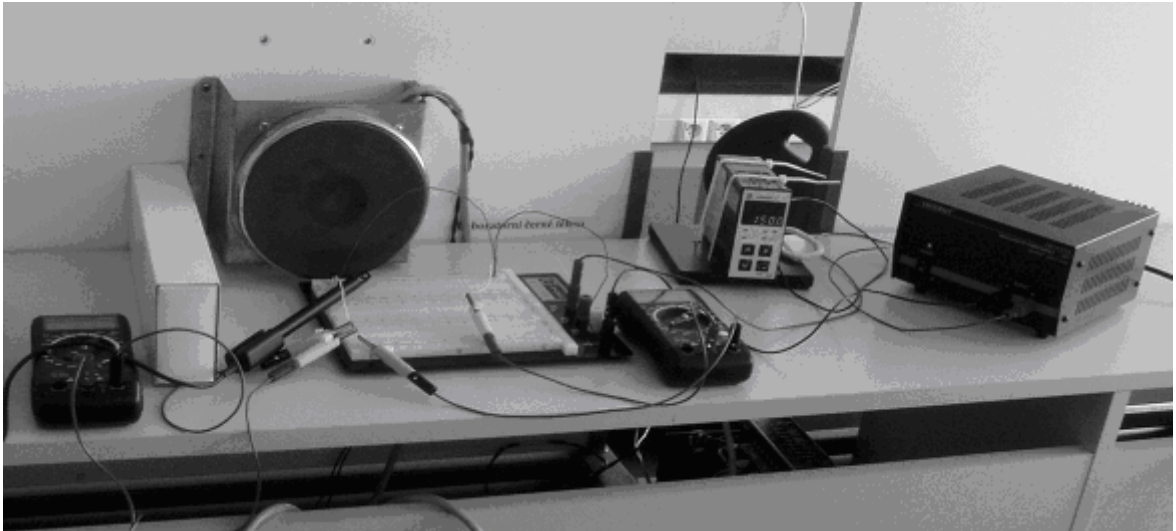
Žádaná teplota 70°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	71,2	68,1	324	323	51	51
maximum	71,3	70,9	326	325	53	53
sm. odchylka	0,05	0,82	0,70	0,78	0,70	0,78
průměr	71,3	69,6	325	324	52	52



Obr.16: Závislost teploty určené z proudového výstupu senzoru a teploty z ověřovacích teploměru na teplotě tělesa ke kterému jsou přiloženy

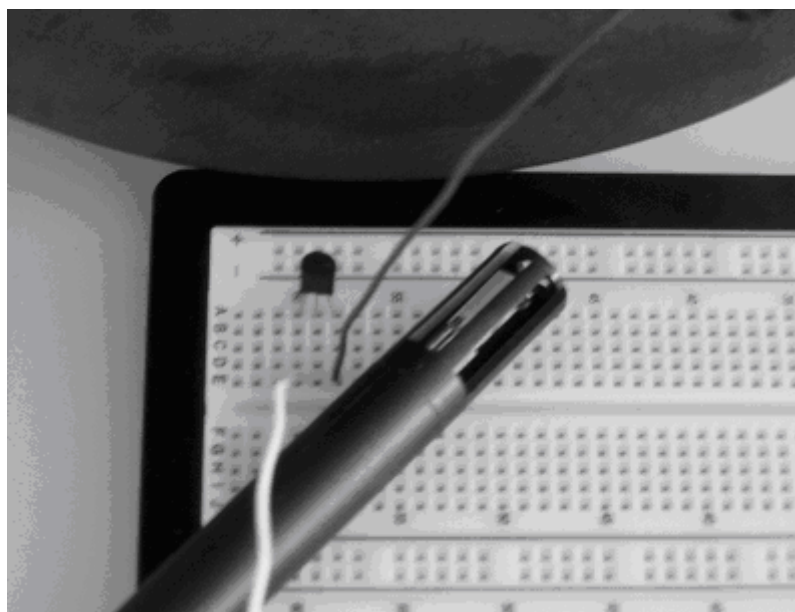
Z tabulky i grafu je patrné, že teplota naměřená senzorem Pt 100 uvnitř plotýnky i teplota měřená digitálním teploměrem Testo quicktemp 825-t4, určeným pro dotykové měření teploty tuhých těles, je rozdílná než teplota naměřená senzorem AD592 z toho je zřejmé, že senzor AD592 není možné použít pro měření teploty tuhých těles. Konstrukce senzoru odpovídá potřebám pro měření teploty vzduchu. Při provedeném experimentu senzor byl ochlazován okolním vzduchem a tak neměřil teplotu plotýnky ale teplotu vzduchu v její blízkosti na rozdíl od digitálního teploměru Testo quicktemp 825-t4. Výsledky měření tedy byly neprůkazné pro ověření funkčnosti senzoru.



Obr.17: Pracoviště pro ověření funkčnosti senzoru teploty.

## 6.5 Ověření funkčnosti senzoru pro měření teploty vzduchu

Měření bylo prováděno podle zapojení v kapitole 6.1 Při napájecím napětí 24V a sériově zapojeném rezistoru o odporu  $997\Omega$ . Měření byla prováděna při položení senzoru do malé vzdálenosti od plotýnky jejíž teplota byla nastavována za pomoci číslicového regulátoru v intervalu od  $40^{\circ}\text{C}$  do  $200^{\circ}\text{C}$  po  $20^{\circ}\text{C}$ . Dále jsem měřil teplotu okolí. Teplota plotýnky byla měřena senzorem Pt100 ( $t_p$ ) zabudovaným v plotýnce a teplota ve vzdálenosti senzoru digitálním teploměrem Testo 625. Digitální teploměr Testo 625 má podobné vlastnosti jako mnou zkoušený senzor.



Obr.18: Umístění senzoru a čidla teploměru u plotýnky

Tab 12: Ověření funkce pro měření teploty vzduchu

## Teplota okolí

		tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum		24,1	298	297	25	25
maximum		24,2	299	297	26	25
sm. odch.		0,05	0,30	0,00	0,30	0,00
průměr		24,2	299	297	26	25

## Žádaná teplota 40°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	45,0	26,1	300	298	27	26
maximum	45,2	26,2	300	299	27	27
sm. odch.	0,07	0,03	0,00	0,50	0,00	0,50
průměr	45,1	26,1	300	299	27	26

## Žádaná teplota 60°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	60,1	28,2	302	300	29	28
maximum	61,5	28,4	302	300	29	28
sm. odch.	0,47	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
průměr	60,4	28,3	302	300	29	28

## Žádaná teplota 80°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	80,0	31,2	305	303	32	31
maximum	80,2	31,7	306	304	33	32
sm. odch.	0,07	0,13	0,40	0,49	0,40	0,49
průměr	80,1	31,4	305	303	32	31

## Žádaná teplota 100°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	99,8	33,8	308	306	35	34
maximum	100,0	34,9	309	307	36	35
sm. odch.	0,04	0,40	0,30	0,49	0,30	0,49
průměr	99,9	34,4	308	306	35	34

## Žádaná teplota 120°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	120,0	37,5	311	309	38	37
maximum	120,1	37,9	312	310	39	38
sm. odch.	0,05	0,12	0,30	0,49	0,30	0,49
průměr	120,1	37,7	311	309	38	37

## Žádaná teplota 140°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	140,0	40,2	314	312	41	40
maximum	140,5	41,4	315	314	42	42
sm. odch.	0,14	0,35	0,46	0,54	0,46	0,54
průměr	140,2	40,7	315	313	42	41

## Žádaná teplota 160°C

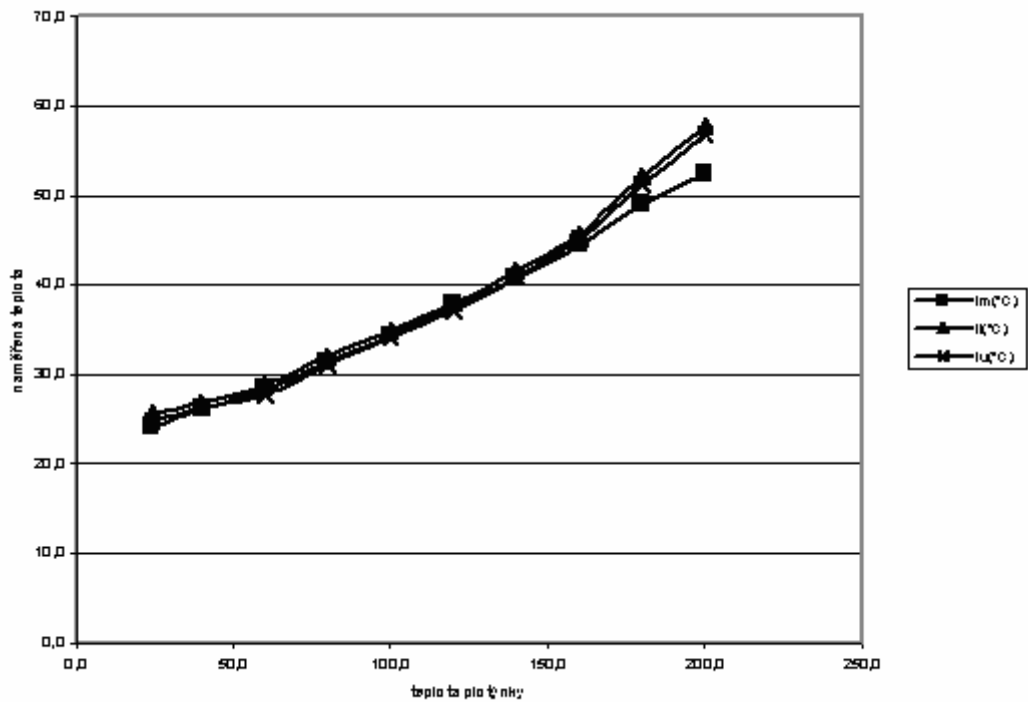
	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	159,9	43,9	318	317	45	45
maximum	160,3	45,4	320	318	47	46
sm. odch.	0,12	0,50	0,54	0,49	0,54	0,49
průměr	160,1	44,5	319	317	46	45

## Žádaná teplota 180°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	180,0	48,2	324	323	51	51
maximum	180,2	50,1	326	324	53	52
sm. odch.	0,06	0,63	0,64	0,49	0,64	0,49
průměr	180,0	49,0	325	323	52	51

## Žádaná teplota 200°C

	tp(°C)	tm(°C)	I(μA)	U(mV)	ti(°C)	tu(°C)
minimum	200,0	51,1	330	328	57	56
maximum	200,6	53,6	332	330	59	58
sm. odch.	0,21	0,86	0,77	0,77	0,77	0,78
průměr	200,2	52,4	331	329	58	57



Obr.19: Porovnání závislosti naměřené teploty senzoru AD592 a Testo 625 na teplotě plotýnky v jejich blízkosti.

Ověření funkčnosti senzoru AD 592 AN se podařilo a teplota tímto senzorem naměřená odpovídá přibližně teplotě naměřené digitálním teploměrem Testo 625 umístěným ve stejné vzdálenosti od plotýnky. Rozdíly mezi charakteristikami nejsou velké a lze je přičíst tomu, že oba senzory nebyly v naprosto totožném místě a teplota vzduchu kolem plotýnky velmi rychle se vzdáleností klesá. Kompletní výsledky měření jsou k dispozici v přílohách



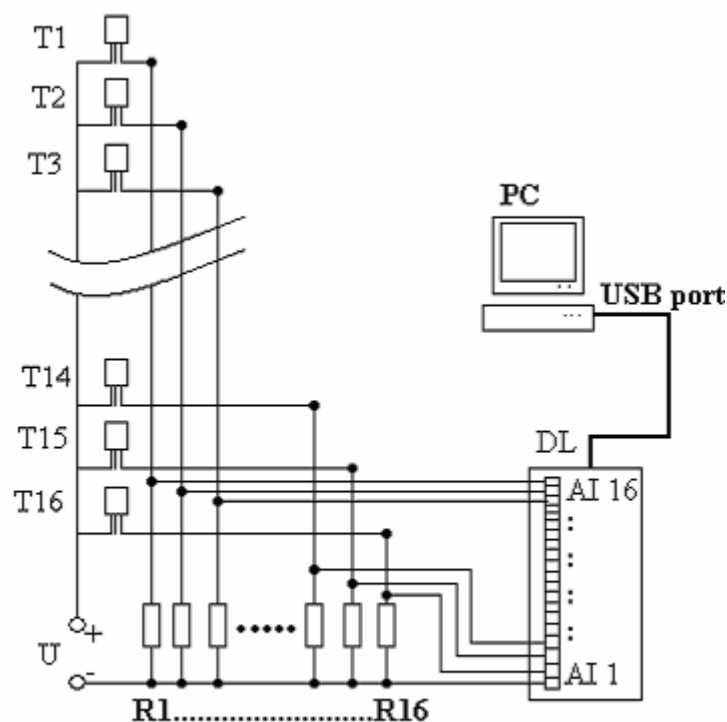
## 7 NÁVRH A KONTRUKCE PROTOTYPU ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ STRATIFIKACE TEPLoty

### 7.1 Požadavky na prototyp

Požadavky na prototyp zařízení pro měření stratifikace teploty byly tyto 16 senzorů teploty umístěných ve vzdálenosti po metru s možností zavěšení do volného prostoru. Od senzorů přívod k vyhodnocovacímu zařízení v dostatečné délce aby bylo možno vyhodnocovací a záznamové zařízení někam bezpečně umístit. Součástí vyhodnocovacího zařízení by měl být převodník na unifikovaný signál, Zařízení pro převod unifikovaného signálu do počítače a počítač z programem pro vizualizaci a archivaci naměřených dat. Zařízení bylo konstruováno pro vnitřní prostor budovy U 51 Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

### 7.2 Návrh a konstrukce prototypu

Zařízení je zapojeno podle schématu na obr.19.



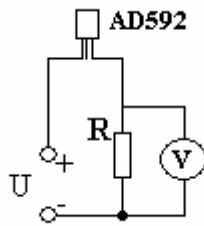
Obr.20: Schéma zapojení prototypu zařízení pro měření stratifikace teploty

Hlavní částí zařízení je nosný kabel se senzory teploty. Jedná se o dvacetizilový datový kabel o průřezu každého vodiče  $0,12\text{mm}^2$  a délce 24,5 metru, který je na hoře přichycen k upínacímu zařízení a od shora po metru jsou na něj připájeny senzory teploty AD 592AN s proudovým výstupem. Zapojení kabelu směrem od červeného vodiče je následující: červený vodič není zapojen, následující dva vodiče vedle něho jsou napájecí a je na ně připojena kladná svorka nepájecího zdroje. Následujících 16 vodičů je datových a jde po nich výstupní proudový signál ze sensorů, který je připojen přes vyhodnocovací odpory na zem. Zbylé vodiče nejsou zapojené.



Obr.21: Uchycení nosného kabelu se senzory

Zapojení senzoru je tímto způsobem. Jedná se o senzor se třemi nožičkami, ale pro naše použití se využívají pouze dvě krajní. Senzor je připojen mezi vodič napájecí a datový a v závislosti na teplotě mění proud, který jím a následně celým obvodem protéká a je na sériově připojeném rezistoru převáděn na elektrické napětí, které je snímáno a dále vyhodnocováno.



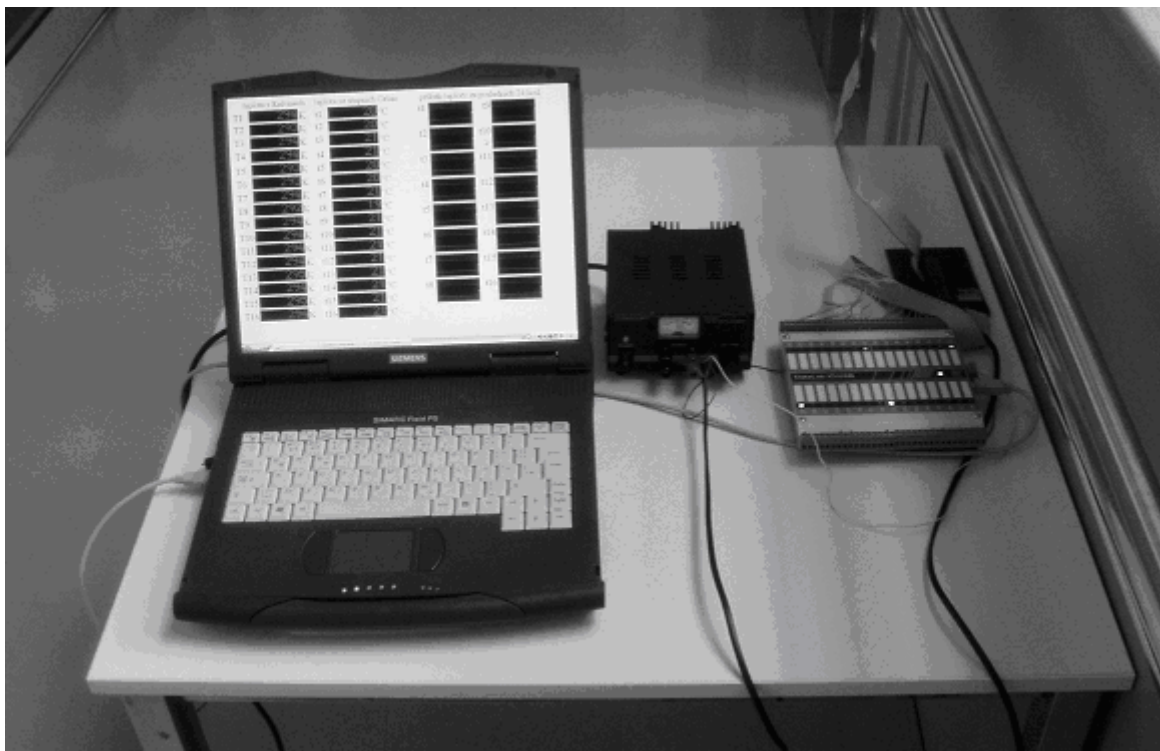
Obr.22: Zapojení jednoho senzoru v zařízení

Kabel je ukončen konektorem pro připojení k desce plošných spojů na níž je napájeno 16 rezistorů o odporu  $1\text{k}\Omega$  s přesností 1%, které převádí proud ze sensorů na unifikovaný napěťový signál v rozsahu 240 až 380 mV. Přesné hodnoty odporu jednotlivých rezistorů použité pro výpočty v programu jsou v tabulce 13. Výstup z tohoto převodníku proudu na napětí je připojen k průmyslové vstupně výstupní jednotce DataLab IO/USB určené ke spolupráci s nadřazeným počítačem pro který zprostředkovává měření napětí z převodníku.

Tab 13: Odporů rezistorů použitých v převodníku proudu na napětí

Rezistor	Odpor ( $\Omega$ )
R1	993
R2	994
R3	994
R4	992
R5	993
R6	994
R7	995
R8	993
R9	994
R10	993
R11	995
R12	994
R13	994
R14	993
R15	995
R16	993

DataLab IO/USB komunikuje s počítačem po velmi rychlé standardní sériové sběrnici USB. Zařízení DataLab IO/USB je modulární zařízení k němuž je možno připojit až 4 moduly digitálních nebo analogových vstupů či výstupů. Pro použití v tomto zapojení je třeba jednotku DataLab vybavit dvěma osmivstupovými jednotkami analogových vstupů. Měřená data jsou pak zobrazována a archivována na nadřazeném počítači pomocí vizualizačního programu.



Obr.23: Pracoviště obsluhy zařízení pro měření stratifikace teploty

### 7.3 Vizualizační a archivační program

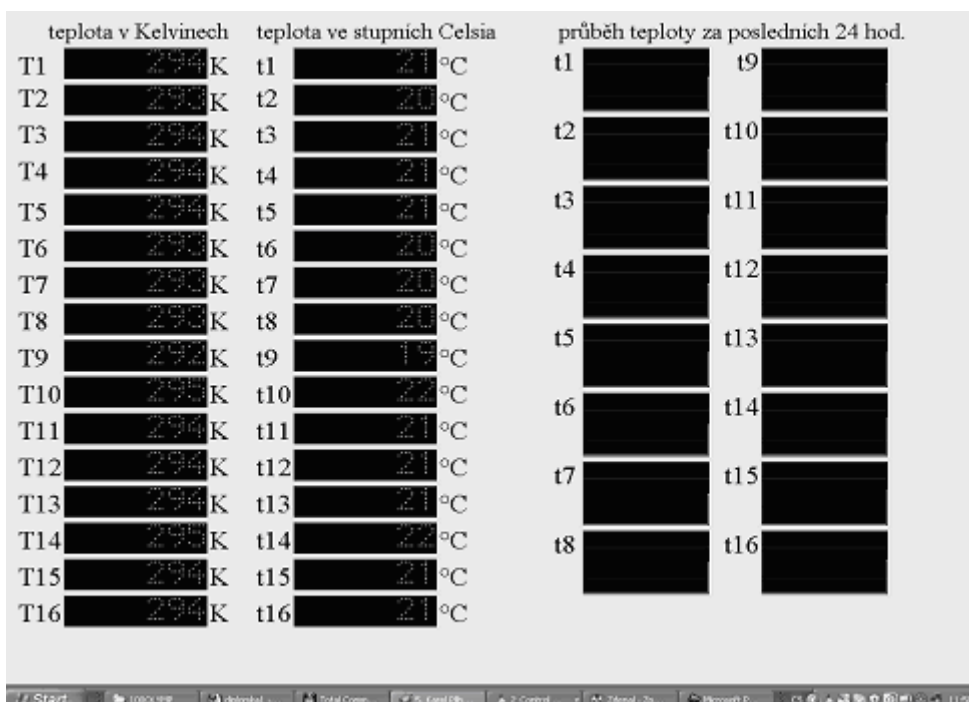
Naměřená data získaná z periferní jednotky DataLab IO/USB jsou v počítači za pomoci programu temp1 zpracována a je z nich vypočítána teplota jednotlivých senzorů, která je dále zobrazena na obrazovce počítače a archivována ve formě tabulky do souboru s příponou .mdb. Data z tabulky je pak možno překopírovat do jakéhokoli tabulkového procesoru (např. Excel) a tam je statisticky zpracovat.

Program temp1 je vytvořen ve vývojovém prostředí ControlWeb 5 o němž již bylo pojednáno v kapitole 3. Pro běh programu je bezpodmínečně nutné, aby byl na počítači ControlWeb 5 nainstalován a to minimálně v Runtime verzi. Dalším důležitým programo-

vým vybavením nutným pro funkci programu jsou ovladače vstupně výstupní jednotky DataLab IO/USB.

ControlWeb komunikuje z okolím prostřednictvím kanálů. Kanál se v programu jeví jako proměnná, která mění svou hodnotu podle vstupu. Softwarově v programu byl nastaven rozsah měření na hodnotu  $\pm 0,625V$ . Převod je realizován 16 –ti bitovým převodníkem pro kladnou i zápornou část spektra. Vstupní kanály tedy nabývají hodnot -32768 až 32767. Tomu odpovídá že jeden vzorkovací krok je  $19,04\mu V$ . Z hodnoty, kterou kanály nabývají se pak vypočítá teplota v Kelvinech i stupních Celsia, které jsou pak zobrazeny na obrazovce. Obnovovací frekvence zobrazení teploty je 1x za sekundu. V pravé části obrazovky se nachází grafy průběhu teploty ze posledních 24 hodin kde je možné kontrolovat jestli nebyly překročeny mezní hodnoty, které jsou nastaveny na 15 a 25°C a je možné je měnit v inspektoru přístroje. Do grafů jsou hodnoty zapisovány jedenkrát za minutu.

Archivace probíhá pro ControlWeb tradičním způsobem a to pomocí datových sekcí archiver. Data se ukládají do databázových tabulek v databázi. Databáze je typu MDB (jde o typ který využívá MS Access). Teplota je ukládána ve stupních Celsia s periodou jedné minuty. Data z databáze je možno bez problémů přepokopírovat do tabulkového procesoru, kde je možné s nimi dále pracovat.



Obr.24: Obrazovka programu temp1

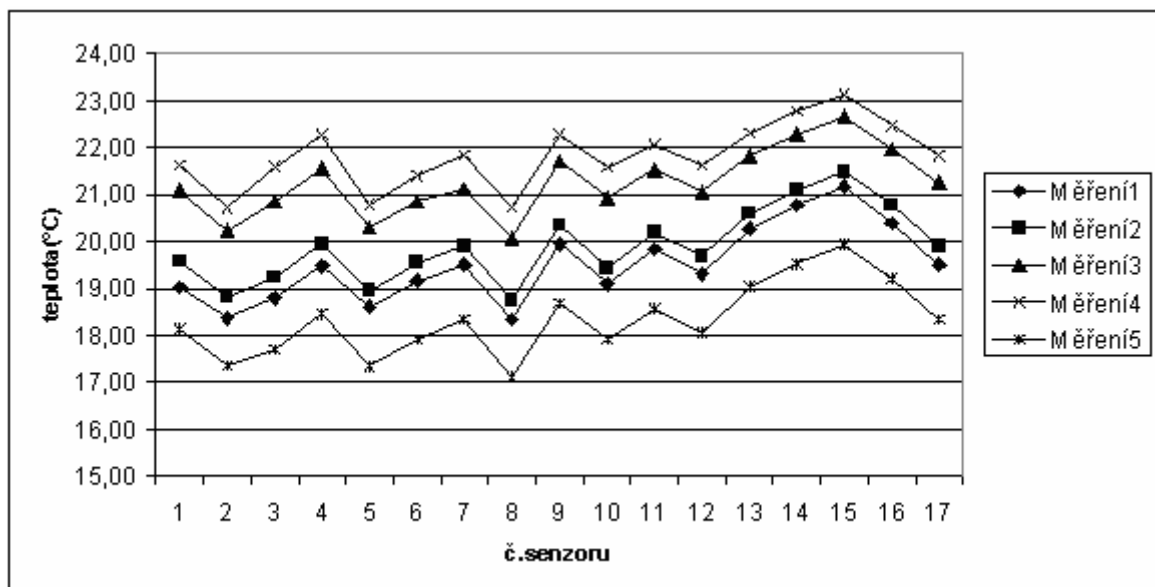
## 8 MĚŘENÍ STRATIFIKACE TEPLoty A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Zařízení je zkonstruováno tak, že má první senzor umístěn půl metru pod uchyacením a další senzory vždy po metru. Celkově je použito 16 senzorů AD 592AN s přesností  $\pm 1,8^\circ\text{C}$ . Krok A/D převodníku v DataLabu IO/USB je  $19,4\mu\text{V}$  což odpovídá  $0,0194^\circ\text{C}$ . Ukládaná data jsou proto uložena s přesností na jedno desetinné místo.

Měření probíhalo tak, že jsem měřil vždy po dobu jedné hodiny a data byla ukládána každou minutu z toho vyplývá, že pro každý senzor během jednoho měření jsem získal 60 hodnot, které jsem následně statisticky zpracoval.

### 8.1 Kalibrace

Jelikož jsem si při zkušebních měřeních všiml, že některé senzory vykazují trvalou odchylku od průměru rozhodl jsem se nakalibrovat podle průměrné hodnoty vypočítané při umístění všech senzorů do stejné teploty. Smotal jsem tedy kabel do jednoho místa a provedl na něm 5 hodinových měření. Průměrné hodnoty z každého měření jsou zobrazeny na obrázku 24.



Obr.25: Pět měření při kterých byly všechny senzory ve stejné teplotě

Ke každému měření jsem vypočítal průměrnou teplotu a převedl teploty ze všech senzorů i průměrnou na Kelviny. Pak jsem vydělil průměrnou teplotu pro každé měření teplotami naměřenými jednotlivými senzory a získal jsem koeficienty pro kalibraci. To

jsem udělal pro všech pět měření a získal pro každý senzor pět koeficientů z nichž jsem vypočítal průměr, který jsem používal ke kalibraci naměřených hodnot.

Tab 14: Statistické vyhodnocení kalibračního koeficientu a výpočet jeho průměrné hodnoty

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	1,000575	1,003361	1,000790	0,998430	1,003076	1,001164	0,999957	1,003726
maximum	1,001656	1,003919	1,002463	1,000073	1,003516	1,001468	1,000492	1,004174
sm. odch.	0,000406	0,000206	0,000636	0,000592	0,000154	0,000125	0,000207	0,000144
průměr	1,000929	1,003657	1,001802	0,999372	1,003291	1,001327	1,000080	1,003963

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	0,998450	1,000851	0,998859	1,000662	0,997394	0,995683	0,994338	0,996972
maximum	0,998781	1,001544	0,999172	1,000945	0,998367	0,996790	0,995582	0,997818
sm. odch.	0,000128	0,000250	0,000115	0,000110	0,000354	0,000410	0,000468	0,000346
průměr	0,998527	1,001264	0,999051	1,000726	0,997796	0,996184	0,994859	0,997279

Kalibraci provádím tak, že koeficientem vynásobím naměřenou hodnotu.

Určení přesnosti měření jsem provedl tak, že jsem z naměřených hodnot pro kalibraci určil jejich rozdíly od průměrů které jsem pak statisticky vyhodnotil.

Tab 15: Statistické vyhodnocení rozdílů měřených teplot od průměru

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	-0,4839	-1,1424	-0,7190	-0,0213	-1,0334	-0,4323	-0,1448	-1,2115
maximum	-0,1693	-0,9763	-0,2328	0,4638	-0,8973	-0,3402	0,0127	-1,0951
sm. odch.	0,1182	0,0612	0,1843	0,1749	0,0461	0,0370	0,0608	0,0377
průměr	-0,2720	-1,0687	-0,5268	0,1851	-0,9621	-0,3887	-0,0235	-1,1578

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	0,3556	-0,4518	0,2414	-0,2751	0,4825	0,9498	1,3090	0,6450
maximum	0,4580	-0,2509	0,3342	-0,1936	0,7646	1,2688	1,6664	0,8888
sm. odch.	0,0388	0,0720	0,0336	0,0314	0,1021	0,1172	0,1332	0,0993
průměr	0,4328	-0,3699	0,2785	-0,2127	0,6475	1,1232	1,5153	0,7999

Z tabulky je patrné že chyba je podstatně horší než 1°C což je nepřijatelné největší chyba měření je dokonce 1,66°C. Stejným způsobem jsem vyhodnotil data to kalibraci. Výsledek je v tabulce 16.

Tab 16: Statistické vyhodnocení rozdílů měřených teplot po kalibraci od průměru

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	-0,2125	-0,0764	-0,1929	-0,2052	-0,0661	-0,0414	-0,1213	-0,0611
maximum	0,1040	0,0860	0,2983	0,2782	0,0628	0,0477	0,0360	0,0696
sm. odch.	0,1187	0,0600	0,1866	0,1741	0,0450	0,0366	0,0608	0,0420
průměr	0,0002	-0,0001	0,0008	0,0007	0,0000	0,0000	-0,0001	0,0002

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	-0,0743	-0,0821	-0,0353	-0,0636	-0,1686	-0,1795	-0,2142	-0,1594
maximum	0,0228	0,1215	0,0563	0,0187	0,1179	0,1472	0,1532	0,0901
sm. odch.	0,0373	0,0733	0,0338	0,0320	0,1043	0,1208	0,1382	0,1020
průměr	0,0001	0,0003	0,0000	0,0001	-0,0003	-0,0004	-0,0005	-0,0004

Z tabulky je zřejmé, že přesnost interpretace je výsledků měření stratifikace může být po kalibraci v jednotkách °C. Jelikož jsem však pro kalibraci použil průměrné hodnoty teploty získané na tomto zařízení a ne hodnot z nezávislého přesného teploměru je tuto přesnost možno použít pouze pro určení rozdílu mezi teplotou jednotlivých teploměrů ne však pro určení absolutního číselného vyjádření teploty. Tam je přesnost nižší. Daná hlavně chybou senzorů. Pro určení přesnosti číselného vyjádření teploty by bylo třeba naměřená data porovnat s nezávislým přesným teploměrem.

## 8.2 Měření stratifikace teploty v budově U51

Měření jsem prováděl v průběhu dvou dnů a to 6.5.2006 a 8.5.2006. Bylo to ve dnech volna, kdy bylo měření jen minimálně ovlivňováno činností lidí v budově. Prováděl jsem tři hodinová měření denně a to vždy ráno v poledne a večer abych vystihl co nejvíce teplotních situací. Pro každý senzor a měření jsem tak získal 60 hodnot, které jsem statisticky vyhodnotil do tabulky 17.



Tab 17: Statistické vyhodnocení měření stratifikace teploty

6.5.2002 7:10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	19,5	19,9	20,3	21,0	19,7	19,8	20,2	18,7
maximum	21,1	20,9	21,1	21,7	20,5	20,6	21,0	19,7
sm. odch.	0,235	0,191	0,174	0,165	0,173	0,171	0,174	0,176
průměr	20,6	20,3	20,7	21,3	20,1	20,3	20,6	19,4

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	21,2	20,2	21,1	20,5	21,2	21,1	21,3	20,4
maximum	21,9	21,0	21,7	21,3	22,0	21,7	22,1	21,0
sm. odch.	0,127	0,128	0,115	0,139	0,153	0,122	0,143	0,150
průměr	21,5	20,7	21,3	20,8	21,5	21,4	21,6	20,7

6.5.2002 14:07	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	23,6	23,4	24,1	24,8	23,2	23,7	23,9	22,7
maximum	24,8	24,6	25,3	26,0	24,4	25,0	25,7	24,3
sm. odch.	0,224	0,222	0,280	0,261	0,257	0,270	0,506	0,474
průměr	24,2	24,1	24,8	25,5	23,9	24,4	24,7	23,5

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	24,9	24,4	24,9	24,0	25,1	25,1	25,3	24,1
maximum	26,8	26,2	27,2	26,3	26,0	25,9	26,4	25,5
sm. odch.	0,513	0,421	0,549	0,374	0,225	0,188	0,194	0,228
průměr	25,7	25,0	25,7	24,9	25,6	25,5	25,7	24,7

6.5.2002 20:25	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	21,1	20,9	21,2	21,9	20,8	20,8	21,3	20,1
maximum	22,1	21,8	22,3	22,7	21,5	22,0	22,1	21,1
sm. odch.	0,199	0,154	0,205	0,152	0,151	0,191	0,178	0,175
průměr	21,7	21,4	21,7	22,3	21,1	21,4	21,8	20,5

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	22,2	21,3	22,1	21,6	22,5	22,3	22,5	21,4
maximum	23,1	22,2	23,0	22,3	23,2	23,5	23,2	22,5
sm. odch.	0,170	0,159	0,143	0,141	0,154	0,168	0,145	0,197
průměr	22,6	21,8	22,5	21,9	22,7	22,7	22,8	21,9

8.5.2002 6:42	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	20,5	20,2	20,3	20,9	19,7	20,0	20,1	18,9
maximum	21,4	21,0	21,6	22,2	20,9	21,2	21,3	20,0
sm. odch.	0,191	0,160	0,259	0,259	0,206	0,207	0,230	0,191
průměr	20,9	20,6	20,9	21,5	20,4	20,6	20,9	19,6

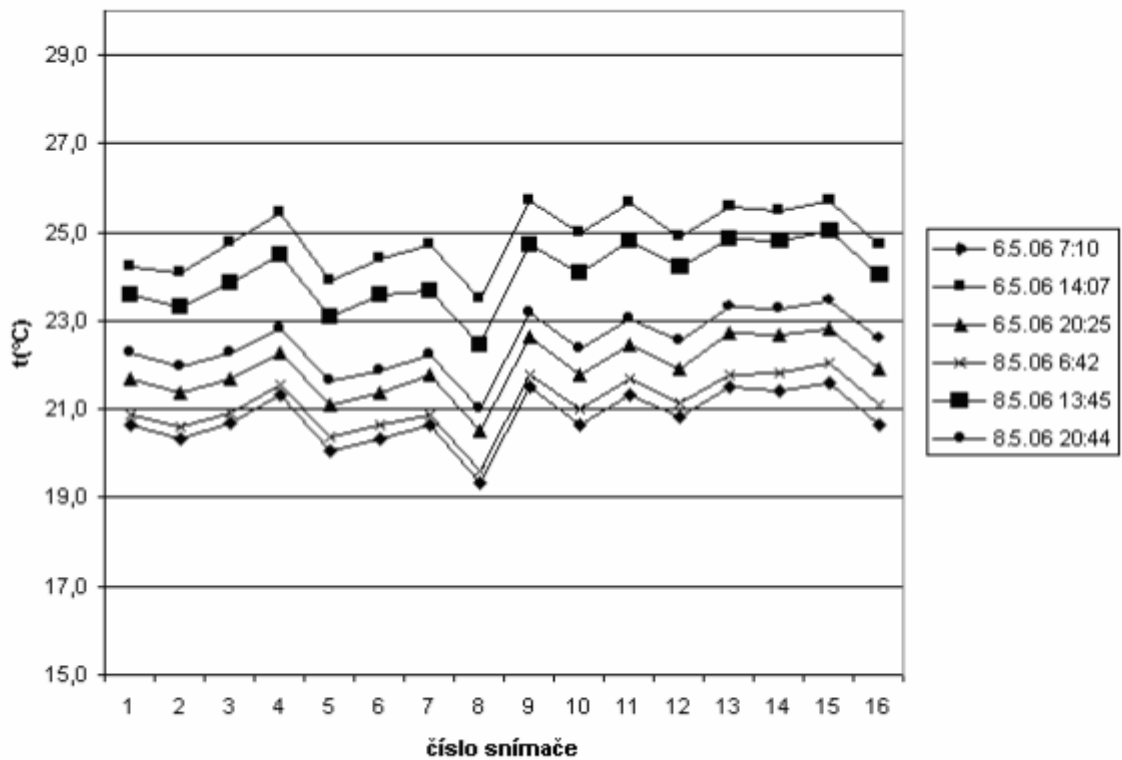
	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	21,1	20,6	21,3	20,8	21,0	21,5	21,7	20,7
maximum	22,2	21,3	22,1	21,5	22,1	22,1	22,5	21,7
sm. odch.	0,190	0,152	0,160	0,141	0,176	0,135	0,152	0,171
průměr	21,8	21,0	21,7	21,1	21,8	21,8	22,0	21,1

8.5.2002 13:45	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	22,8	23,0	23,4	24,2	22,4	23,2	23,2	21,9
maximum	24,2	23,8	24,4	24,9	23,5	23,9	24,0	22,8
sm. odch.	0,212	0,153	0,193	0,155	0,179	0,139	0,190	0,154
průměr	23,6	23,3	23,9	24,5	23,1	23,6	23,7	22,5

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	24,4	23,4	24,4	23,6	24,4	24,5	24,5	23,4
maximum	25,0	24,5	25,1	24,9	25,5	25,1	25,5	24,5
sm. odch.	0,129	0,175	0,137	0,181	0,222	0,121	0,186	0,180
průměr	24,7	24,1	24,8	24,2	24,8	24,8	25,0	24,0

8.5.2002 20:44	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
minimum	21,9	21,5	22,0	22,2	21,3	21,4	21,8	20,4
maximum	22,7	22,7	22,7	23,4	22,1	22,4	22,6	21,5
sm. odch.	0,197	0,199	0,161	0,223	0,184	0,209	0,172	0,215
průměr	22,3	21,9	22,3	22,8	21,6	21,9	22,3	21,0

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
minimum	22,9	22,1	22,8	22,2	23,0	22,9	23,1	22,2
maximum	23,4	22,7	23,7	23,5	23,8	23,8	24,1	23,1
sm. odch.	0,143	0,145	0,167	0,190	0,186	0,156	0,190	0,165
průměr	23,2	22,4	23,1	22,6	23,3	23,3	23,5	22,6



Obr.26: Hodnoty teploty získané při šesti měřeních bez kalibrace

Tab 18: Hodnoty teplot po kalibraci

6.5.2002 7:10	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
teplota (°C)	20,9	21,4	21,2	21,1	21,0	20,7	20,7	20,5

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
teplota (°C)	21,1	21,0	21,1	21,0	20,8	20,3	20,1	19,9

6.5.2002 14:07	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
teplota (°C)	24,5	25,2	25,3	25,3	24,9	24,8	24,8	24,7

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
teplota (°C)	25,3	25,4	25,4	25,1	24,9	24,4	24,2	23,9

6.5.2002 20:25	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
teplota (°C)	21,9	22,5	22,2	22,1	22,1	21,8	21,8	21,7

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
teplota (°C)	22,2	22,2	22,2	22,1	22,1	21,5	21,3	21,1

8.5.2002 6:42	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
teplota (°C)	21,2	21,7	21,5	21,4	21,3	21,0	20,9	20,8

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
teplota (°C)	21,4	21,4	21,4	21,4	21,1	20,7	20,5	20,3

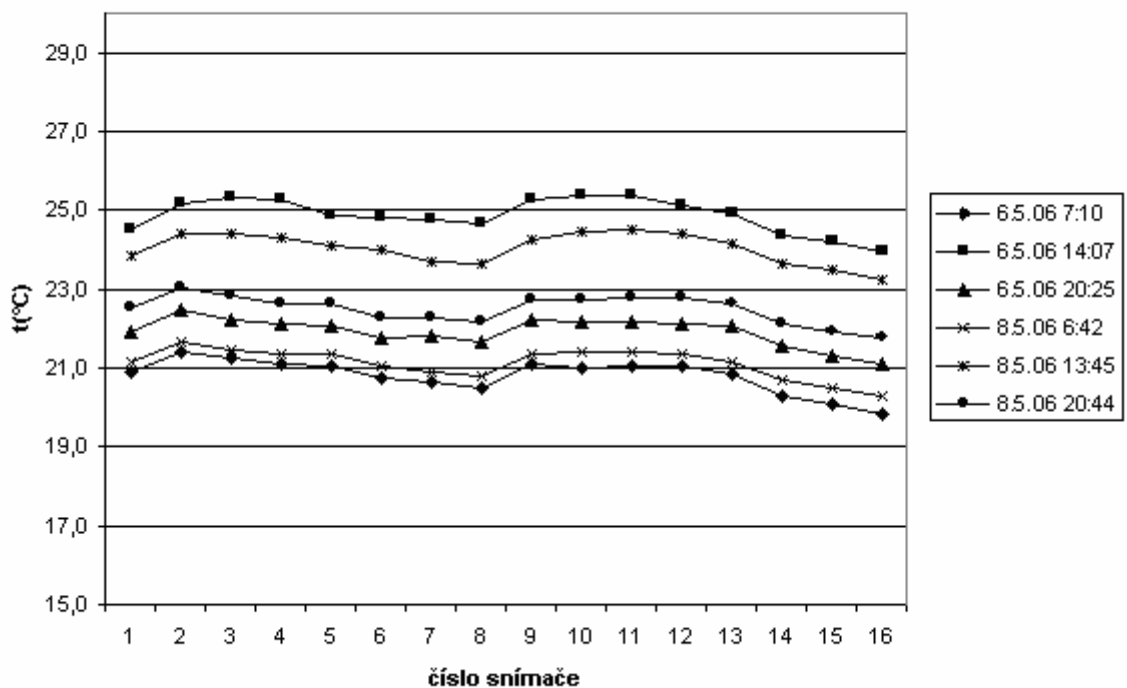
8.5.2002 13:45	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
teplota (°C)	23,9	24,4	24,4	24,3	24,1	24,0	23,7	23,6

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
teplota (°C)	24,3	24,5	24,5	24,4	24,2	23,7	23,5	23,2

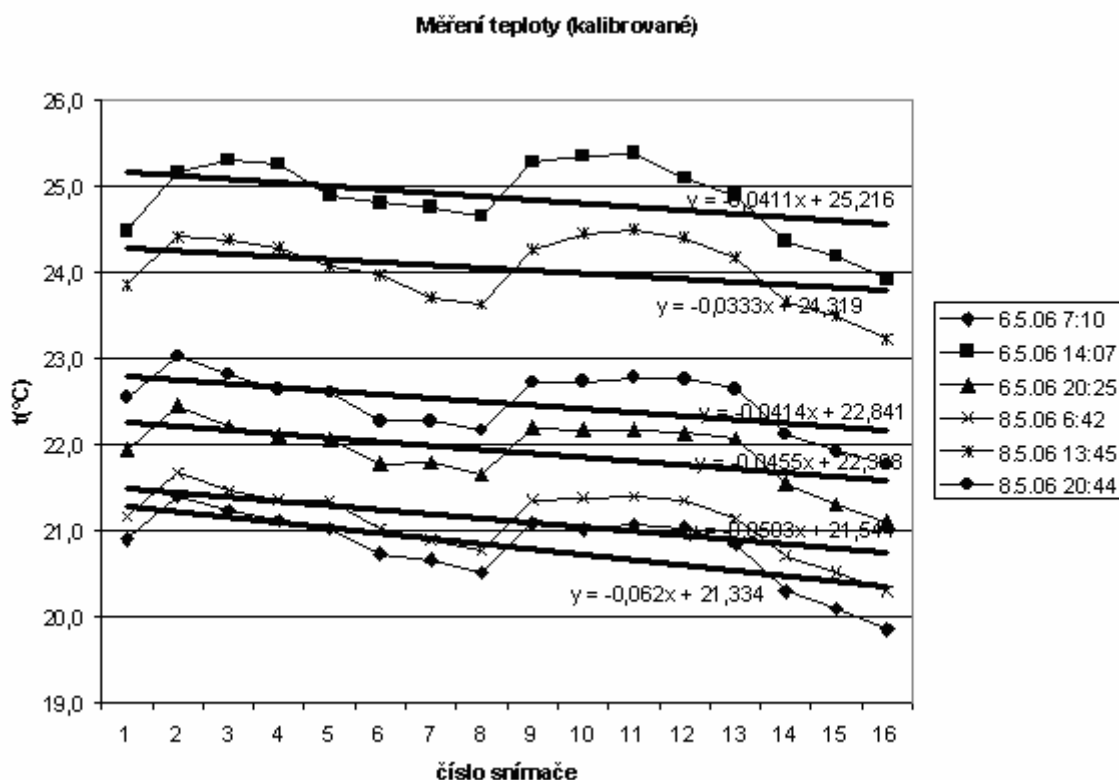
8.5.2002 20:44	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
teplota (°C)	22,6	23,0	22,8	22,6	22,6	22,3	22,3	22,2

	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
teplota (°C)	22,7	22,7	22,8	22,8	22,6	22,1	21,9	21,8

Měření teploty (kalibrované)



Obr.27: Hodnoty teploty získané při šesti měřeních kalibrované podle kapitoly 8.1



Obr.28: Hodnoty teploty získané při šesti měřeních kalibrované podle kapitoly 8.1 doplněné o regresní přímkou a rovnici regrese.

Na naměřených hodnotách teploty jsem provedl kalibraci a získané hodnoty jsem vložil do grafu obr.26 a 27. Proložil je regresní přímkou a nechal vypočítat rovnici regrese, která pro jednotlivá měření je:

Tab 19: Regresní rovnice pro jednotlivá měření

Čas měření	Regresní rovnice
6.5.2002 7:10	$y = -0,0414x + 22,841$
6.5.2002 14:07	$y = -0,0411x + 25,216$
6.5.2002 20:25	$y = -0,0455x + 22,308$
8.5.2002 6:42	$y = -0,0503x + 21,544$
8.5.2002 20:44	$y = -0,0333x + 24,319$
8.5.2002 13:45	$y = -0,062x + 21,334$

Z regresních rovnic vyplývá, že teplota stoupá s výškou v řádu setin °C/m což je řád kde jsou výsledky ovlivňovány chybou do takové míry, že je nemůžeme pokládat za průkazné a proto je třeba říct, že teplota se z výškou mění méně než je rozlišovací schopnost zařízení.

## 9 DISKUSE VÝSLEDKŮ

V průběhu měření na senzoru se mi podařilo zjistit, že výstupní proud ze senzoru AD592 závisí na napájecím napětí senzoru jen zanedbatelně. Výstupní proud je ovlivňován pouze minimálně také velikostí odporu sériově připojeného rezistoru a to pro hodnoty od stovek ohmů až po deset kiloohmů. Dále jsem se přesvědčil, že není možné používat tento senzor pro měření teploty pevného tělesa, zato pro měření teploty vzduchu je senzor vhodný.

Dále jsem zkonstruoval zařízení pro měření stratifikace teploty, které je schopno po kalibraci pracovat s přesností na jednotky stupňů Celsia.

Tímto zařízením jsem provedl měření v budově U51 Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Naměřená data jsem vyhodnotil a výsledky rozdílu teplot mezi senzory se pohybovaly pod rozlišovací hranicí měřícího zařízení. Z toho se dá tvrdit, že vrstvení teploty v době měření bylo v této budově zanedbatelné. Měření však bylo prováděno mimo topnou sezonu a tedy jeho výsledky byly spíše pro ověření funkčnosti přístroje než určení parametrů budovy. Pro toto určení by bylo třeba provést více měření a to v topnou sezonu.

## ZÁVĚR

Tato Diplomová práce pojednává o měření stratifikace teploty ve vysokých průmyslových halách. Jak už bylo dříve zmíněno nesprávné rozvrstvení teploty v hale vede k zhoršení tepelné pohody pracovníků a také k nárůstu nákladů na vytápění haly v zimních měsících.

Součástí této práce bylo zkonstruovat zařízení pro měření teploty v rozsahu 16\_t metrů a to vždy po metru. Jako senzor teploty jsem zvolil senzor AD592AN od firmy Analog Devices. Jedná se o senzor s proudovým výstupem s citlivostí  $1\mu\text{A/K}$  a přesností  $1,8^\circ\text{C}$ . Na tomto senzoru jsem provedl měření ověřující jeho funkčnost a parametry udávané výrobcem.

Konstrukce zařízení pro měření stratifikace se sestává z plochého 20-ti žilového kabelu, který slouží k upevnění a napájení senzorů a také pro přívod signálu od senzoru k převodníku proudu na napětí. Na kabelu je umístěno 16 senzorů vždy po jednom metru. Převodník proudu na napětí je realizován 16-ti rezistory a napěťový výstup je snímán průmyslovou vstupně výstupní jednotkou DataLab IO/USB, která je přes sériovou USB linku připojena na osobní počítač vybavený programem temp1, který slouží k vizualizaci a archivaci naměřených dat. Program temp1 byl vytvořen v prostředí ControlWeb5. Naměřená data se archivují do databázových tabulek v databázi typu MDF z níž je možno data převést do tabulkového procesoru a dále je zpracovat.

Zařízení měří rozdíly teplot mezi senzory po kalibraci s přesností na jednotky stupňů celsia. Kalibrace byla prováděna dodatečně při zpracování dat v tabulkovém procesoru proto není zatím součástí programu. Dále byla vztažena k průměrné hodnotě, kterou jsem naměřil na senzorech, když byly umístěny v místě se stejnou teplotou a ne k teplotě naměřené přesným teploměrem z toho vyplývá, že udávané přesnost se vztahuje na rozdíly teploty mezi jednotlivými senzory a ne na číselné vyjádření teploty v daném místě.

Tímto zařízením jsem provedl měření v budově U51 Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Z naměřených dat vyplývá že rozdíly teploty mezi jednotlivými senzory jsou nižší než přesnost měření tohoto měřícího zařízení proto se dá říct, že závislost teploty na výšce je zanedbatelná. Měření však bylo prováděno mimo topnou sezonu a tedy ho můžeme vnímat spíše jako test zařízení než jako určení parametrů budovy. Pro zjištění zda k vrstvení teploty v budově dochází by bylo třeba učinit více měření a to v období topné sezony.

Co se týče doporučení pro pokračování v této úloze doporučil bych nakalibrovat zařízení podle přesného teploměru aby bylo možné ne jenom rozdíly teploty měřit s přesností na jednotky stupňů Celsia ale se stejnou přesností měřit i absolutní hodnotu teploty. Dále bych doporučoval udělat se zařízením měření v období topné sezony a zjistit zda v tomto období ke změnám teploty z výškou dochází.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] WEBSTER,J.,G.:The measurement, instrumentation and sensor handbook. New York:CRC Press LLC; Springer-Varlag,1999, s.1932. ISBN 3-540-64830-5
- [2] HRUŠKA,F.: Technické prostředky automatizace IV. Snímače, převodníky, regulátory, průmyslová výpočetní technika, ovládací jednotky. UTB ve Zlíně, FT, září 2001, s.107. ISBN 80-7318-026-X.
- [3] ĎAĎO,S.-KREIDL,M.: Senzory a měřicí obvody. Praha: ČVUT, 1996
- [4] FRADEN,J.: Handbook of Modern Sensors. Physics, designs and applications. New York: Springer Varlag,1996, s 556. ISBN 1-56396-538-0
- [5] HRUŠKA,F.:Technické prostředky automatizace III. Senzory jejich principy a funkce. UTB ve Zlíně, FT, únor 2002, s.118. ISBN 80-7318-053-7.
- [6] PALLAS-ARENY, R.- WEBSTER,J.,G.:Sensors and signal conditioning. New York: John Wiley and Sons,2001, ISBN 0-471-33232-1.
- [7] JANČÍK,J. – VOLF,J.:Technická měření,ČVUT v Praze, Fakulta strojní,duben 2003, s 212. ISBN 80-01-02138-6
- [8] ŽÁK P. Bakalářská práce, UTB ve Zlíně Fakulta technologická 2004.
- [9] Firemní literatura firmy Moravské přístroje.
- [10] <http://www.tzb-info.cz>
- [11] <http://www.microchip.com>
- [12] <http://www.datasheetcatalog.com/sgsthomsonmicroelectronics>
- [13] <http://www.maxim-ic.com/>
- [14] <http://www.analog.com/>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

T	Teplota v Termodynamické teplotní stupnici (Kelvinově)
t	Teplota v Celsiově teplotní stupnici
C	Význam třetí zkratky.
I	Výstupní proud ze senzoru
U	Napětí na sériově připojeném rezistoru k senzoru
ti	Teplota vypočítaná z výstupního proudu ze senzoru měřeného A-metrem
tu	Teplota vypočítaná z napětí měřeném na sériově připojeném rezistoru
tp	Teplota měřená snímačem Pt100 zabudovaným v plotýnce
tm	Teplota měřená kontrolním teploměrem
T1-T16	Označení snímačů teploty sestupně od shora dolů
R1-R16	Označení sériově připojených rezistorů
AI1-AI16	Označení analogových vstupů DataLabu
DL	DataLab

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr.1: Snímače teploty: a)měřící vložka, b)snímač do jímky, c)snímač jímkový.....	25
Obr.2: můstkové zapojení měřícího odporu: a)dvouvodičové, b)třívodičové, c)s volnou smyčkou.....	26
Obr.3: Schéma termočlánku.....	28
Obr.4: Schéma zapojení termočlánekového senzoru na převodním.....	29
Obr.5: Zapojení polovodičových senzorů teploty s přechodem PN.....	32
Obr.6: Integrovaný PN senzor.....	33
Obr.7: DataLab IO/USB.....	38
Obr.8: Modul analogových vstupů.....	38
Obr.9: Označení a význam svorek.....	39
Obr.10: Závislost absolutní chyby na teplotě.....	42
Obr.11: Výstupní charakteristika senzoru.....	43
Obr.12: Chyba kalibrace.....	44
Obr.13: Výstupní charakteristika senzoru.....	45
Obr.14: Závislost výstupního proudu.....	46
Obr.15: Zapojení senzoru pro ověřování.....	48
Obr.16: Závislost teploty určené z proudového výstupu senzoru a teploty z ověřovacích teploměrů na teplotě tělesa ke kterému jsou přiloženy.....	52
Obr.17: Pracoviště pro ověření funkčnosti senzoru teploty.....	53
Obr.18: Umístění senzoru a čidla teploměru u plotýnky.....	53
Obr.19: Porovnání závislosti naměřené teploty senzoru AD592 a Testo 625 na teplotě plotýnky v jejich blízkosti.....	56
Obr.20: Schéma zapojení prototypu zařízení pro měření stratifikace teploty.....	57
Obr.21: Uchycení nosného kabelu se senzory.....	58
Obr.22: Zapojení jednoho senzoru v zařízení.....	59
Obr.23: Pracoviště obsluhy zařízení pro měření stratifikace teploty.....	60

---

Obr.24: Obrazovka programu temp1.....	61
Obr.25: Pět měření při kterých byly všechny senzory ve stejné teplotě.....	62
Obr.26: Hodnoty teploty získané při šesti měřeních bez kalibrace .....	67
Obr.27: Hodnoty teploty získané při šesti měřeních kalibrované podle kapitoly 8.1.....	68
Obr.28: Hodnoty teploty získané při šesti měřeních kalibrované podle kapitoly 8.1 doplněné o regresní přímkou a rovnici regrese.....	69

**SEZNAM TABULEK**

Tab.1: Měřicí rozsahy vybraných typů teploměrů.....	15
Tab.2: Seznam používaných termočláňkových senzorů.....	29
Tab.3: Měřicí rozsahy modulu analogových vstupů.....	39
Tab.4: Elektrické charakteristiky senzoru.....	42
Tab 5: Přesnost senzoru.....	43
Tab 6: Elektrické parametry.....	44
Tab 7: Technické parametry senzoru.....	45
Tab 8: Technické parametry senzoru AD 592.....	46
Tab 9: Závislost výstupního proudu a parametrů z něho odvozených na napájecím napětí.....	49
Tab 10: Závislost výstupního proudu a parametrů z něho odvozených na velikosti odporu R.....	50
Tab 11: Ověření funkce pro měření teploty pevného tělesa.....	51
Tab 12: Ověření funkce pro měření teploty vzduchu.....	54
Tab 13: Odpor rezistorů použitých v převodníku proudu na napětí.....	59
Tab 14: Statistické vyhodnocení kalibračního koeficientu a výpočet jeho průměrné hodnoty.....	63
Tab 15: Statistické vyhodnocení rozdílů měřených teplot od průměru .....	63
Tab 16: Statistické vyhodnocení rozdílů měřených teplot po kalibraci od průměru.....	64
Tab 17: Statistické vyhodnocení měření stratifikace teploty.....	65
Tab 18: Hodnoty teplot po kalibraci.....	67
Tab 19: Regresní rovnice pro jednotlivá měření.....	69

## SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: Dokumentace k senzoru teploty Microchip TC1047

PŘÍLOHA P II: Dokumentace k senzoru teploty SGS-Thomson-Microelectronic LM 135

PŘÍLOHA P III: Dokumentace k senzoru teploty Dallas semiconductor DS 60

PŘÍLOHA P IV: Dokumentace k senzoru teploty Analog Devices AD 592

PŘÍLOHA P V: Dokumentace k digitálnímu teploměru Testo quicktemp 825-t4

PŘÍLOHA P VI: Dokumentace k digitálnímu teploměru Testo 625

PŘÍLOHA P VII: Program temp1

PŘÍLOHA P VIII: Data naměřená při ověřování funkce senzoru AD 592 a jejich statistické zpracování

PŘÍLOHA P IX: Data naměřené pro kalibraci a ověření přesnosti měřícího zařízení a jejich statistické zpracování.

PŘÍLOHA P X: Data naměřené při měření stratifikace teploty v budově U51 a jejich statistické zpracování