

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

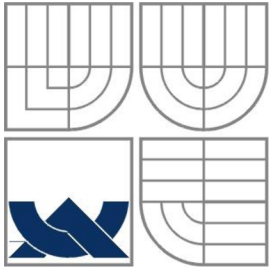
## PŘESNÝ DIFERENČNÍ TEPLOMĚR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

IVAN SIEKLIK

BRNO, 2015



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**PŘESNÝ DIFERENČNÍ TEPLOMĚR**  
HIGH PRECISION DIFFERENTIAL THERMOMETER

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

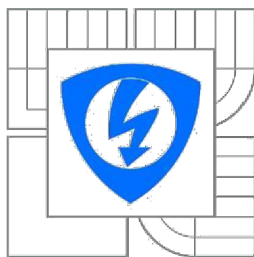
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**IVAN SIEKLIK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. PETER BARCÍK**

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
Elektronika a sdělovací technika

**Student:** Ivan Sieklik

**ID:** 154869

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

**NÁZEV TÉMATU:**

## Přesný diferenční teploměr

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

BB2E: Seznamte se se základními vlastnostmi atmosférického přenosového prostředí a dostupnými metodami určení strukturního parametru indexu lomu v atmosféře. Navrhněte přesný diferenční teploměr pro měření strukturního parametru indexu lomu v laboratorních podmínkách. Přesnost změřené teploty bude nejméně 0,1 °C. Zařízení bude možné připojit k PC, kde bude možné sledovat změnu hodnoty strukturního parametru indexu lomu v čase. Provedte rozbor dostupných snímačů teploty, navrhněte blokové schéma a desku plošných spojů.

BBCE: Osadte desku plošných spojů a ověřte činnost navrženého zařízení pomocí experimentálního měření.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ANDREWS, L., PHILLIPS, R., HOPEN, C. Laser Beam Scintillation with Applications. Washington: Spie Press, 2001.

[2] KREIDL, M., Měření teploty - senzory a měřicí obvody. Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2005.

**Termín zadání:** 22.9.2014

**Termín odevzdání:** 18.12.2014

**Vedoucí práce:** Ing. Peter Barčík

**Konzultanti semestrální práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
Předseda oborové rady

## **ABSTRAKT**

Práca sa zaoberá princípom a realizáciou merania štruktúrneho parametru indexu lomu, pomocou diferenciálneho teplomera. V tejto práci sú uvedené základné vlastnosti atmosférického prenosového prostredia a ich vplyv na šíriacu sa optickú vlnu. Ďalej sú predstavené a opísané základné typy senzorov určené na meranie teploty. Hlavným cieľom práce je navrhnúť diferenciálny teplomer s možnosťou merania štruktúrneho parametru indexu lomu.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Atmosféra, teplota, meranie, atmosférické turbulencie, vlna, index lomu.

## **ABSTRACT**

This work describes the principles of measurements of refractive index structure parameter. This parameter represent intensity of atmospheric turbulence which is measured by a differential temperature meter. Basic properties of atmospheric transmission environment are specified and their influence on optical wave is discussed. Furthermore, this thesis also describes fundamental types of sensors dedicated to temperature measurements. The aim of this work was to create a differential temperature meter which is able to measure the refractive-index structural parameter.

## **KEYWORDS**

Atmosphere, temperature, measurement, atmospheric turbulence, optical wave, refractive index.

SIEKLIK, I. *Přesný diferenční teploměr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 41 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Peter Barcík

# PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Přesný diferenční teploměr“ som vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Petra Barčíka a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich zákona č. 121/2000 Zb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Zb.

V Brne dňa .....

.....

(podpis autora)

# POĎAKOVANIE

Na tomto mieste by som chcel poďakovať vedúcemu práce, Ing. Petrovi Barčíkovi za metodické a odborné vedenie a ďalšie cenné podnety pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

# OBSAH

Úvod.....	1
1 Atmosféra a jej vlastnosti .....	2
1.1 Problematika optických turbulencií .....	3
1.1.1 Základné parametre prenosového prostredia .....	4
1.1.2 Kolmogorova teória turbulencií .....	4
2 Metodika merania optických turbulencií .....	8
2.1 Princíp určenia parametru $C_n^2$ .....	8
2.2 Teplota ako fyzikálna veličina .....	9
2.3 Atmosférický tlak .....	9
3 Teplotné snímače.....	10
3.1 Kovové odporové senzory.....	10
3.1.1 Platinové senzory .....	11
3.1.2 Niklové senzory .....	12
3.1.3 Medené senzory teploty .....	13
3.1.4 Polovodičové odporové senzory .....	13
3.2 Termistory .....	14
3.2.1 Negastory .....	14
3.2.2 Pozistory .....	15
3.2.3 Monokryštalické Si senzory.....	16
3.3 Monolitické PN senzory .....	17
3.3.1 Diódové snímače teploty .....	17
3.3.2 Tranzistorové snímače teploty .....	18
3.4 Termoelektrické senzory .....	19
4 Realizácia diferenciálneho teplomera.....	21
4.1 Výber vhodných snímačov.....	21
4.1.1 Termoelektrický snímač .....	21
4.1.2 Platinový snímač.....	22
4.1.3 Snímač atmosférického tlaku.....	23
4.2 Hardvérová obsluha zariadení .....	24
4.2.1 Zdroj napájacieho napätia .....	25
4.2.2 Mikroprocesor ATmega328P .....	25
4.2.3 Analógovo-digitálny prevodník .....	26
4.2.4 USB-UART komunikácia.....	28
4.3 Softvérový návrh zariadenia .....	30
4.3.1 Nastavenie prevodníka AD7719.....	31
4.3.2 Výpočet štruktúrneho parametru indexu lomu .....	33
4.3.3 Sériová komunikácia.....	34
4.4 Návrh ( <i>layout</i> ) zariadenia.....	35
4.4.1 Návrh DPS .....	35
4.4.2 Mechanická konštrukcia .....	36
5 Meranie štruktúrneho parametru indexu lomu .....	37
5.1 Meranie turbulentného prostredia .....	37
5.2 Meranie atmosférických turbulencií .....	38
Záver .....	41

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. č. 1 Interakcie vln [2].....	2
Obr. č. 2 Rozdelenie atmosféry (prevzaté z [1]).....	3
Obr. č. 3 Závislosť prenosu vlny na vlnovej dĺžke (prevzaté z [1]) .....	4
Obr. č. 4 Proces turbulencií ( prevzaté z [1]).....	6
Obr. č. 5 Závislosť parametru $C_n^2$ a $l_0$ na čase počas dňa (prevzaté z [1]) .....	7
Obr. č. 6 Závislosť parametru $C_n^2$ na diferencii teplôt .....	8
Obr. č. 7 Zmeny barometrického tlaku v priebehu dňa (prevzaté z [17]).....	9
Obr. č. 8 Blokové schéma umiestnenia senzoru .....	10
Obr. č. 9 Závislosť odporu senzora Pt100 na teplote (prevzaté z [4]).....	11
Obr. č. 10 Tolerancie Pt snímačov podľa normy IEC 751 (prevzaté z [4]).....	12
Obr. č. 11 Tolerancia niklového snímača podľa DIN 43760 (prevzaté z [4]) .....	13
Obr. č. 12 Rozdelenie polovodičových odporových senzorov .....	14
Obr. č. 13 Charakteristika PTC a NTC termistoru (prevzaté z [4]).....	14
Obr. č. 14 Charakteristika PTC termistoru v logaritmickej miere (prevzaté z [4]) .....	15
Obr. č. 15 Charakteristika senzoru KTY10-6 (prevzaté z [3]) .....	17
Obr. č. 16 Závislosť prúdu pretekajúcim diódou na napätí pre teploty $T_1$ a $T_2$ [3] .....	18
Obr. č. 17 Závislosť napätia na dióde na teplote, pre diódou 1N4147 [5].....	18
Obr. č. 18 Zapojenie tranzistorovej diódy .....	18
Obr. č. 19 Závislosť napätia prechodu Báza-Emitor na teplote (prevzaté z [3]) .....	18
Obr. č. 20 Grafické porovnanie termoelektrických snímačov (prevzaté z [4]) .....	19
Obr. č. 21 Neizolovaný termoelektrický článok (prevzaté z [15]) .....	22
Obr. č. 22 Časová odozva snímačov PT1000 s rôznymi veľkosťami puzdier.....	22
Obr. č. 23 Platinový senzor PT1000 .....	23
Obr. č. 24 Snímač tlaku BMP180 (prevzaté z [9]) .....	24
Obr. č. 25 Schéma zapojenia zdroja napätia .....	25
Obr. č. 26 Bloková schéma prevodníku AD7719 (prevzaté z [12]) .....	26
Obr. č. 27 Schéma zapojenia prevodníka AD7719.....	27
Obr. č. 28 FTDI modul [16].....	28
Obr. č. 29 Schéma zapojenia FTDI zariadenia (prevzaté z [16]) .....	29
Obr. č. 30 Bloková schéma obslužného programu .....	30
Obr. č. 31 Obsah komunikačného registru, prevzaté z [12] .....	31
Obr. č. 32 Formát zobrazovaných dát na displeji .....	34
Obr. č. 33 Návrh DPS .....	36
Obr. č. 34 Topológia meracieho pracoviska turbulentného prostredia.....	37
Obr. č. 35 Meranie intenzívnych optických turbulencií .....	38
Obr. č. 36 Topológia meracieho pracoviska pre meranie atmosférických turbulencií ...	39
Obr. č. 37 Meranie štruktúrneho parametru indexu lomu počas dňa.....	40



# ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Porovnanie vlastností termoelektrických snímačov (prevzaté z [4]) .....	20
Tabuľka 2 Vlastnosti snímača BMP180 [9] .....	23
Tabuľka 3 Parametre ATmega328P [11].....	26
Tabuľka 4 Parametre prevodníka AD7719 [12] .....	28
Tabuľka 5 Prehľadná tabuľka registrov (prevzaté z [12]) .....	31
Tabuľka 6 Parametre atmosférického prostredia v čase merania [17].....	39

# ÚVOD

Práca sa zaoberá možnosťami merania intenzity optických turbulencií pomocou atmosférického tlaku a rozdielu dvoch teplôt v konštantnej vzdialenosti. Zariadenie určené na toto meranie je v práci označované ako diferenciálny teplomer. Hlavnou požiadavkou je možnosť sledovať zmenu teplôt v dvoch bodoch spolu so zmenou atmosférického tlaku. Presnosť merania atmosférických turbulencií je závislá najmä na presnosti určenia teploty, preto sa značná časť práce venuje práve teplotným senzorum.

Atmosférické prostredie má nezanedbateľný vplyv na prenos a vlastnosti vlny, z čoho vyplýva, že je nutné popísať prenosové prostredie a jeho parametre ovplyvňujúce postupujúcu vlnu. Dominantný vplyv na vlnenie majú fluktuácie indexu lomu vzduchu, taktiež nazývané ako atmosférické turbulencie. Intenzitu atmosférických turbulencií je možné popísať štruktúrnym parametrom indexu lomu.

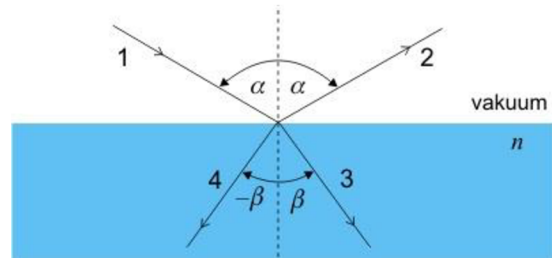
V prvej kapitole práce sú uvedené základné vlastnosti prenosového prostredia a ich interakcie so šíriacou sa optickou vlnou. Ďalej sú uvedené princípy vzniku atmosférických turbulencií a rôzne prístupy vedúce k ich popisu a spôsobu merania. V nasledujúcej kapitole je popísaný fyzikálny princíp teploty a jej merania. V tretej kapitole sú popísané základné typy teplotných snímačov, ich vlastnosti a použiteľnosť v aplikácii diferenciálneho teplomera. V štvrtej kapitole sú popísané zvolené snímače tlaku a teploty spolu s chronologickým popisom praktickej realizácie. V kapitole č. 5 sú uvedené výsledky merania optických turbulencií.

Cieľom autora je praktický návrh a realizácia presného diferenciálneho teplomera s možnosťou sledovania zmeny štruktúrneho parametru indexu lomu v čase, pomocou mikrokontroléra a počítača.

# 1 Atmosféra a jej vlastnosti

Zemskú atmosféru si je možné predstaviť ako veľkorozmernú vrstvu obklopujúcu zemský povrch, tvorenú niekoľkými vrstvami. Každá z vrstiev má iné zloženie a tým pádom aj iný vplyv na elektromagnetické vlnenie. Atmosférické prostredie interaguje s elektromagnetickou vlnou troma procesmi:

- A.) Absorpcia vlny – spôsobená fotónmi, ktoré interagujú s plynmi resp. časticami a menia svoju energiu v teplo.
- B.) Odraz vlny – časť energie vlny dopadajúcej (1) sa odrazí v podobe odrazenej vlny (2).
- C.) Lom vlny – vzniká pri dopade vlny (1) na prostredie s iným parametrom indexu lomu  $n$ , ktorý udáva pomer vlnovej dĺžky vo vákuu a vlnovej dĺžky v danom prostredí. Lomená vlna (3) platí pre  $n > 0$ , pre  $n < 0$  platí vlna (4).



Obr. č. 1 Interakcie vln [2]

Z indexu lomu vyplýva, že pri prechode vlny do iného prostredia dochádza aj k zmene vlnovej dĺžky  $\lambda$ . Zmena vlnovej dĺžky má vplyv aj na rýchlosť šírenia vlny, ktorá je závislá len na dielektrických a magnetických vlastnostiach prostredia a je daná vzťahom, kde permeabilita vákua  $\mu_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  a permitivita vákua  $\epsilon_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  [2].

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (1.1)$$

Troposférické prostredie je vyplnené prevažne vzduchom, ktorý s meniacou sa teplotou mení svoje parametre. Preto je nutné zistiť a definovať parametre, či javy v atmosférickom prostredí.

Vrstvy atmosféry:

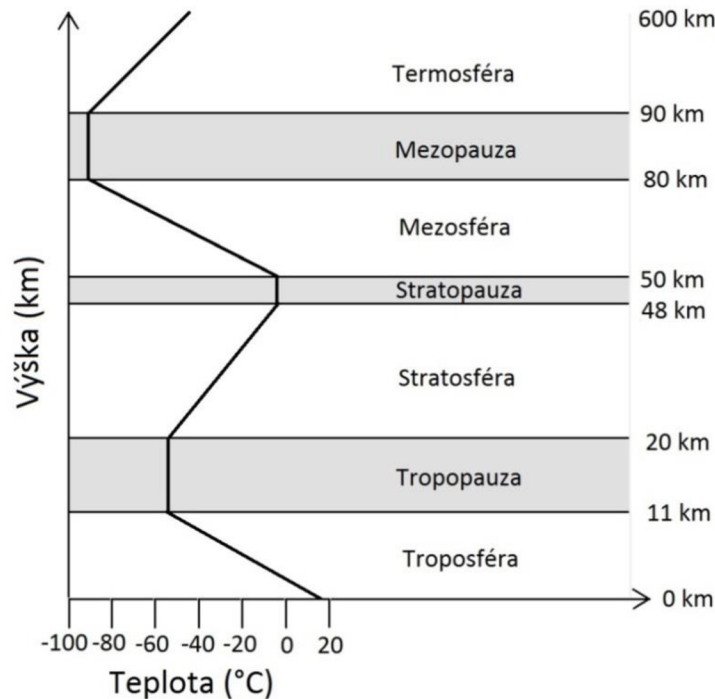
Troposféra – tvorí ju 75 % hmoty atmosféry, maximálna teplota je v blízkej vzdialenosti od zemského povrchu no však jej hodnota klesá so vzdialenosťou až do  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tropopauza, Stratopauza, Mezopauza – izotermická vrstva s konštantnou teplotou.

Stratosféra – je vyplnená ozónom, ktorý absorbuje ultrafialové žiarenie premieňané na teplo.

Mezosféra – najchladnejšia časť atmosféry, so zvyšujúcou výškou klesá teplota až na  $-90 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Termosféra – najvyššia vrstva siahajúca až do 600 km skladajúca sa z ionosféry a exosféry [2].



Obr. č. 2 Rozdelenie atmosféry (prevzaté z [1])

## 1.1 Problematika optických turbulencií

V kapitole 1.1 a v podkapitolách sa vychádza prevažne z teoretických poznatkov Andrewsa v jeho publikácii *Field Guide to Atmospheric Optics* [1].

Štruktúra atmosféry je ovplyvnená atmosférickými vplyvmi ako napríklad vietor, dážď, sneh, hmla, znečistenie ovzdušia. Všetky tieto vplyvy majú dopad na absorpciu vlny, disperziu a na fluktuáciu indexu lomu (atmosférickú turbulenciu) v atmosfére. Absorpcia a disperzia majú hlavný podiel pri útlme vlny. Atmosférické turbulencie vedú k zmenám intenzity žiarenia, rozostrovaniu optického lúča a k strate koherencie. Tieto procesy majú najpodstatnejší vplyv na bezdrôtový prenos. Vodná para,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$  a ozón sú hlavné absorbéry. Ozón  $\text{O}_2$  a  $\text{O}_3$  tlmia vlny, ktorých vlnová dĺžka je menšia ako  $0,2 \mu\text{m}$ , ale nezanedbateľný útlm má aj viditeľné svetlo o vlnovej dĺžke  $0,4$  až  $0,7 \mu\text{m}$ .

Podľa teoretického pohľadu na veľkosť častíc je možné problematiku disperzie rozdeliť na častice s menšími rozmermi a s porovnateľnými rozmermi s vlnovou dĺžkou žiarenia.

Rayleighova teória disperzie je založená tým, že molekuly vzduchu a hmly sú menšie ako vlnová dĺžka žiarenia. Pre molekuly vzduchu je disperzia zanedbateľná pre vlnové dĺžky väčšie ako  $3 \mu\text{m}$ .

Mieova teória je aplikovaná na vlnové dĺžky s porovnateľnými rozmermi častíc. Disperzia rapídne oslabuje svoj klesajúci trend so stúpajúcou vlnovou dĺžkou [1].

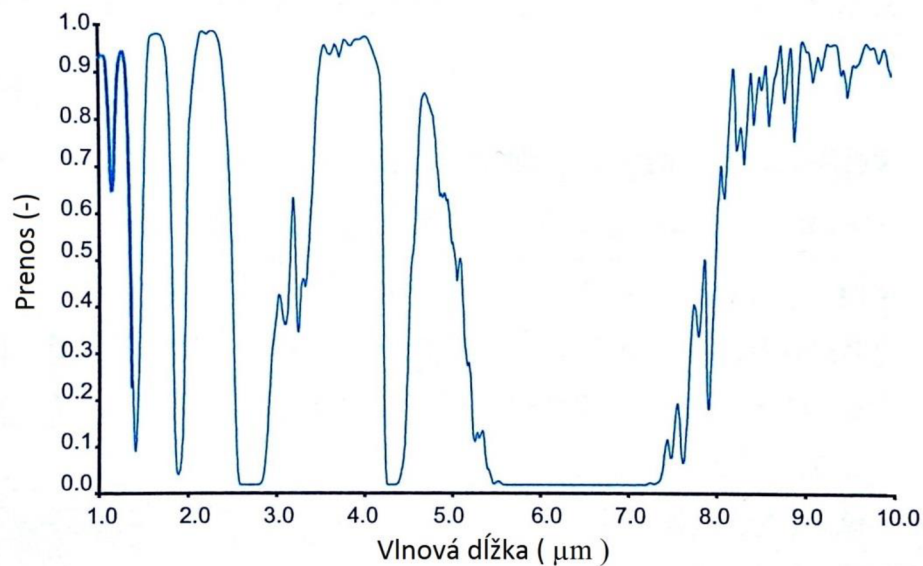
### 1.1.1 Základné parametre prenosového prostredia

Prenos optického žiarenia, ktoré sa šíri prostredím o rozmere  $L$  je definovaný pomocou Beerovho zákona nasledovne

$$A = \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L], \quad (1.2)$$

kde  $\alpha(\lambda) = A_\alpha + S_\alpha$  je extinkčný koeficient kde  $A_\alpha$  je absorpčný koeficient a  $S_\alpha$  je koeficient disperzie.

Extinkcia je definovaná ako útlm žiarenia, ktoré prechádza cez atmosféru. Na obrázku č. 3 je uvedená závislosť prenosu, resp. útlmu na vlnovej dĺžke pre horizontálny smer šírenia vlny o dráhe 1km vo výške 3 m nad zemským povrchom. Nezvyčajný prenos je v pásme 5 až 7  $\mu\text{m}$ , kde sa utlmí viac ako 90 % energie šíriacej sa vlny, z čoho prakticky vyplýva, že dané prostredie v danom rozsahu je na šírenie vlny nepoužiteľné. Pod atmosférickým prostredím, z pohľadu prenosu vlny, si je možno predstaviť akýsi súhrn pásmových priepustí a zádrží [1].



Obr. č. 3 Závislosť prenosu vlny na vlnovej dĺžke (prevzaté z [1])

Parameter optickej hĺbky je definovaná ako súčin extinkčného koeficientu a rozmeru prostredia, ktorým sa šíri vlna  $\alpha(\lambda) \cdot M$  nachádzajúci sa v rovnici 1.2.

Viditeľnosť je maximálna vzdialenosť, ktorú dokáže prejsť vlna tak, aby jej úroveň neklesla pod hodnotu 0,02 [1].

### 1.1.2 Kolmogorova teória turbulencií

Podľa klasických štúdií turbulencií bolo zistené, že rýchlosť vetra v spojení s turbulenciou atmosféry náhodne kolíše okolo jeho strednej hodnoty. To znamená, že rýchlosť vetra nadobúda vlastnosti náhodného stochastického poľa. Výsledkom je, že

rýchlosť vetra v každom bode v priestore a v čase v rámci rýchlostného prúdu môže byť definovaná náhodnou premenou. Štatistická homogenita náhodnej zmeny rýchlosti vetra naznačuje, že stredná hodnota rýchlosti je konštantná. Súvislosť medzi náhodnými fluktuáciami medzi dvoma bodmi sú nezávislé na voľbe pozorovacieho bodu a závisia len na vektore ich oddelenia. Navyše, ak sú fluktuácie štatisticky izotropné (majú v každom smere rovnaké vlastnosti), potom súvislosť medzi dvoma bodmi závisí len od veľkosti vektorového oddelenia medzi pozorovacími bodmi [1].

Klasické turbulencie sú spojené s náhodnými rýchlostnými fluktuáciami viskózne tekutiny ako napríklad atmosféra. Atmosféra má dve základné odlišné podstaty pohybu a to laminárny tok a turbulentný tok. V laminárnom prúdení atmosféry sa neuskutočňuje zmiešavanie. Pre turbulentný prúd je charakteristické dynamické zmiešavanie, ktoré nadobúda náhodné menšie podprúdy, víry, ktoré sú v anglickej literatúre nazývané *turbulent eddies* (turbulentné víry) [1].

Parametrom, ktorý popisuje veľkosť alebo intenzitu turbulencie je Reynoldsové číslo

$$Re = \frac{Vl}{a}, \quad (1.3)$$

kde  $V$  je rýchlosť prúdu tekutiny v m/s,  $l$  je veľkostný rozmer prúdu v metroch a  $a$  je kinematická viskozita v  $m^2/s$ .

Zmena laminárneho prúdu na turbulentný nastáva v bode kritického Reynoldsového čísla. V blízkosti zemského povrchu je to približne  $10^5$  (-), čo už je považované za vysoko turbulentné prostredie [1].

Podľa Andrews [1] Kolmogorova teória turbulencií vychádza zo sady hypotéz a to, že malorozmerné štruktúry sú štatisticky homogénne, izotropné a nezávislé na veľkorozmerných štruktúrach. Zdrojom energie pri veľkorozmerných štruktúrach je rovnako horizontálne prúdenie ako aj konvekcia. V prípade dostatočnej rýchlosti vetra dôjde k prekročeniu kritického Reynoldsového čísla na základe čoho vznikajú veľké nestabilné vzduchové masy.

Kaskádový model turbulencií popisuje problematiku nestabilných mäs, ktoré sa pod vplyvom zotrvačných síl rozbijú a rozdelia na menšie víry, ktoré utvoria súvislú radu vírov. Dôjde k prenosu energie z veľkorozmerných ( $L_0$  – vonkajší rozmer) na mikrorozmerné ( $l_0$ - vnútorný rozmer) turbulencie.

Inerciálny interval (*Inertial range*) je definovaný ako skupina vírov o rozmeroch menších ako  $L_0$  a väčších ako  $l_0$ .

Rozptylový interval (*Dissipation range*) – rozmery turbulencií, ktoré sú menšie ako rozmer  $l_0$ . Energia takýchto turbulencií sa rozptýli a vyžiari v podobe tepla.

Fluktuácia rýchlosti vetra je popísaná rýchlostnou štruktúrnou funkciou

$$D_{RR}(R) = \langle (V_1 - V_2)^2 \rangle = \begin{cases} C_V^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_V^2 l_0^{-4/3} R^2, & R \ll l_0 \end{cases}, [1] \quad (1.4)$$

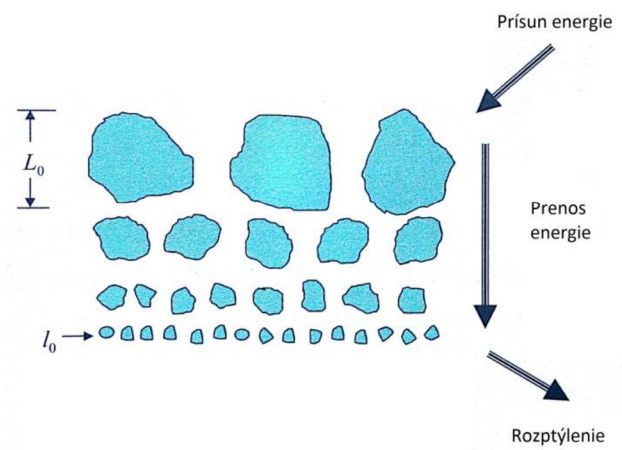
kde  $V_1$  a  $V_2$  sú rýchlosti v dvoch bodoch,  $\mathbf{R}$  je vzdialenosť dvoch bodov a  $C_V^2$  je rýchlostná štruktúrna konštanta tiež nazývaná štruktúrnym parametrom. V súlade s priemerným energetickým rozptylom  $\epsilon$  ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ) je štruktúrnym parameter daný vzťahom

$$C_V^2 = 2 \epsilon^{2/3} \quad (1.5)$$

Iba turbulencie, ktoré majú menší rozmer ako  $l_0$  sú považované za štatisticky homogénne a izotropné. V momente, keď sa turbulentné víry zmenšujú, relatívne množstvo rozptýlenej energie (vďaka viskóznym silám) sa zväčšuje, až po kým sa vyžiarená energia nezhoduje s dodanou kinetickou energiou z pôvodného prúdenia. V tomto prípade veľkosť víru definuje vnútorný rozmer turbulencie  $l_0$ , typicky v rozmedzí od 1 do 10 mm v blízkosti zemského povrchu [1].

Vnútorný rozmer  $l_0$  - súvisí aj s energetickým rozptylom a taktiež s viskozitou v podľa vzťahu  $l_0 = (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ . Silná turbulencia má menší vnútorný rozmer. Slabá turbulencia má naopak väčší vnútorný rozmer.

Vonkajší rozmer  $L_0$  - úmerný s hodnotou  $\epsilon^{1/2}$ , vzrastá a klesá priamoúmerne so silou turbulencie. Hodnota  $L_0$  vyjadruje vzdialenosť, pri ktorej sa výrazne zmení rýchlosť prúdenia [1].



Obr. č. 4 Proces turbulencií (prevzaté z [1])

Myšlienka rýchlostných fluktuácií bola aplikovaná aj na skalárne veličiny ako je teplota. Štruktúrna teplotná funkcia je definovaná ako

$$D_T(R) = \langle (T_1 - T_2)^2 \rangle = \begin{cases} C_T^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_T^2 l_0^{-4/3} R^2, & R \ll l_0 \end{cases} \quad (1.6)$$

kde  $T_1, T_2$  je teplota v bode 1 a 2,  $\mathbf{R}$  je vzdialenosť medzi bodmi 1 a 2 a  $C_T^2$  je štruktúrna teplotná konštanta taktiež známa pod názvom štruktúry teplotný parameter. Vnútorný rozmer je definovaný ako  $l_0 = 5,8(D^3/\epsilon)^{1/4}$ , kde je  $D$  súčiniteľ teplotnej vodivosti vo vzduchu v  $\text{m}^2/\text{s}$ .

Fluktuácie indexu lomu v atmosfére, ktoré sú spôsobené vplyvom teplotných fluktuácií, majú v rámci inerciálneho intervalu homogénny a izotropný charakter. Pre index lomu v bode  $R$  platí

$$n(R) = 1 + 79 \cdot 10^{-6} [P(R)/T(R)], \quad (1.7)$$

kde  $P(R)$  je atmosférický tlak v bode  $R$ ,  $T(R)$  je teplota v bode  $R$ . Index lomu je závislý aj na relatívnej vlhkosti prostredia. Vzťah 1.7 však vplyv vlhkosti na index lomu neuvažuje. Jedná sa zjednodušené vyjadrenie indexu lomu  $n$ .

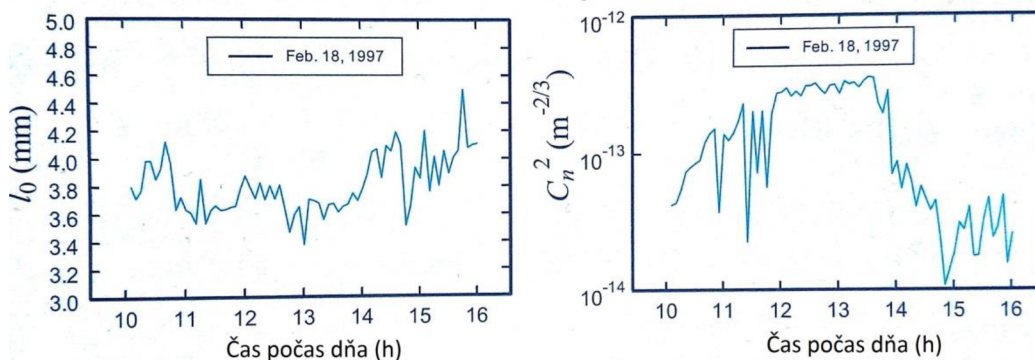
Štruktúrna funkcia indexu lomu, ktorá korešponduje s indexom lomu v bodoch  $R_1$  a  $R_2$ , kde hodnota  $\langle \rangle$  je priemerná hodnota súboru a je daná funkciou

$$D_n(R) = \langle [n(R_1) - n(R_2)]^2 \rangle = \begin{cases} C_n^2 R^{2/3}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_n^2 l_0^{-4/3} R^2, & R \ll l_0 \end{cases}, \quad (1.8)$$

kde  $C_n^2$  je štruktúrny parameter indexu lomu ( $\text{m}^{-2/3}$ ), ktorý popisuje silu turbulencie. Vnútorný rozmer  $l_0$  je definovaný ako  $l_0 = 7,4(\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ , kde  $\nu$  je kinematická viskozita v  $\text{m}^2/\text{s}$  a  $\epsilon$  je množstvo energie. Štruktúrny parameter indexu lomu  $C_n^2$  je možno zistiť aj zo štruktúrneho teplotného parametru  $C_T^2$  s využitím vzťahu

$$C_n^2 = (79 \cdot 10^{-6} [P/T])^2 C_T^2. \quad (1.9)$$

Štruktúrny parameter nadobúda jednotku  $\text{m}^{-2/3}$  a je veličinou popisujúcou intenzitu turbulencií. Veličina nadobúda hodnôt blízkyh nule. Ako slabé turbulencie sú považované hodnoty rádovo  $10^{-17} \text{m}^{-2/3}$  a ako silné rádovo  $10^{-13} \text{m}^{-2/3}$  a viac [1].



Obr. č. 5 Závislosť parametru  $C_n^2$  a  $l_0$  na čase počas dňa (prevzaté z [1])

Štruktúrny parameter indexu lomu nadobúda stúpajúci trend spolu so zvyšujúcou sa teplotou počas dňa (10 až 14 hodina). Klesajúci trend naopak pri ochladení vzduchu (14 až 16 hodina).



## 2 Metodika merania optických turbulencií

Kapitola v sebe zahŕňa praktické princípy a postupy pri meraní či určovaní optických turbulencií, pomocou štruktúrneho parametru indexu lomu  $C_n^2$ . Ďalej kladie nároky na výber vhodných snímačov a taktiež na samotný návrh. V podkapitole č. 2.2 je taktiež uvedená fyzikálna podstata teploty.

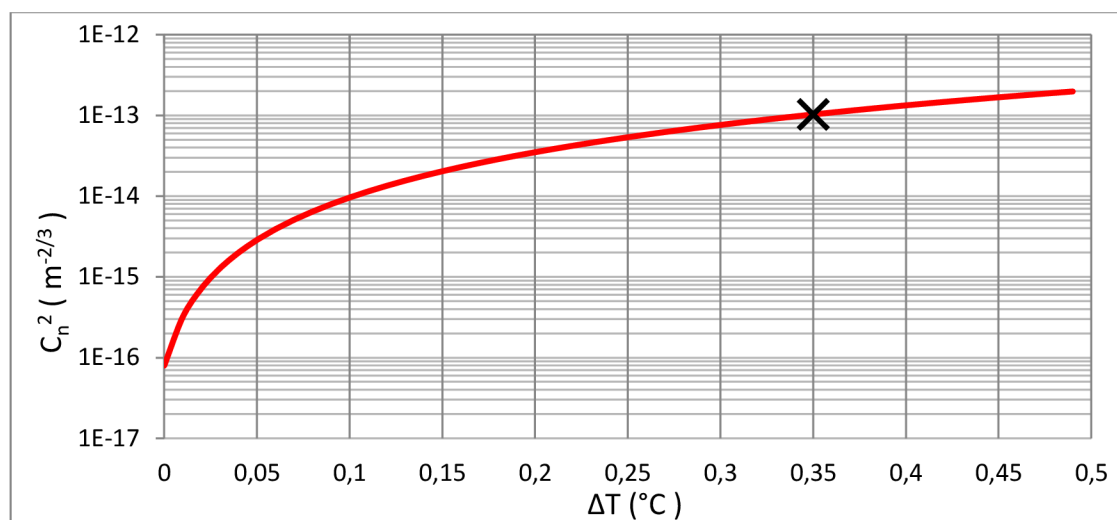
### 2.1 Princíp určenia parametru $C_n^2$

Mierou intenzity optických turbulencií je štruktúrny parameter  $C_n^2$ , ktorého matematicko-fyzikálne vlastnosti sú popísané v teoretickom rozbere, nachádzajúcom sa v kapitole č. 1.

Pri určovaní štruktúrneho parametru indexu lomu  $C_n^2$  sú kľúčovými meranými parametrami teplota a tlak. Zmena relatívnej vlhkosti vzduchu je považovaná za nulovú. K zisteniu hodnoty parametru  $C_n^2$  vedú dva odlišné prístupy. Jeden vychádza z teplotnej štruktúrnej funkcie  $C_T^2$  popísaného vzťahom 1.6 a druhý je založený na zistení indexu lomu v dvoch bodoch, navzájom vzdialených o konštantnú dĺžku  $R$ . K správne výsledku vedú oba prístupy a je možné využiť ktorýkoľvek z nich. Zvolenej aplikácii viac vyhovuje druhý prístup a to najmä kvôli názornosti a priamemu zisteniu indexu lomov s využitím rovnice 1.7. Využitie tohto prístupu vyžaduje predpoklad že vzdialenosť  $R$  patrí do intervalu  $l_0 \ll R \ll L_0$ . Následne je možné vypočítať štruktúrny parameter indexu lomu pomocou rovnice

$$C_n^2 = \frac{\langle [n(R_1) - n(R_2)]^2 \rangle}{R^3}. \quad (2.1)$$

Z rovnice 1.7 je zrejmé, že index lomu v danom bode je závislý na zistenom tlaku  $P$  a teplote  $T$ . Veľkosť atmosférického tlaku v oboch bodoch je možné považovať za zhodnú ( $\Delta P=0$ ). Veľkosť fluktuácie teploty je v porovnaní s fluktuáciou atmosférického tlaku podstatne vyššia, z čoho vyplýva, že  $C_n^2$  je najmä závislý od teploty, čo znázorňuje aj graf uvedený na obr. č.6.



Obr. č. 6 Závislosť parametru  $C_n^2$  na diferencii teplôt

(Graf vyjadruje závislosť pre konštantný tlak 970,325 hPa, základnú teplotu 25 °C a pre vzdialenosť bodov  $R = 1$  m ).

Z grafu je zrejmé že už pri diferencii  $\Delta T = 0,35$  °C je atmosférické prostredie považované za silne turbulentné. Presnosť určenia parametru  $C_n^2$  je podstatne závislá na presnosti merania teploty. Z daných faktov vyplýva, že pre smerodajné sledovanie a meranie optických turbulencií treba skonštruovať zariadenie, ktoré bude schopné dynamicky reagovať na zmeny teploty rádovo v desatinách až stotinách stupňov Celzia. Zariadenie teda musí obsahovať presné teplotné senzory s rýchlou odozvou a vysokou citlivosťou.

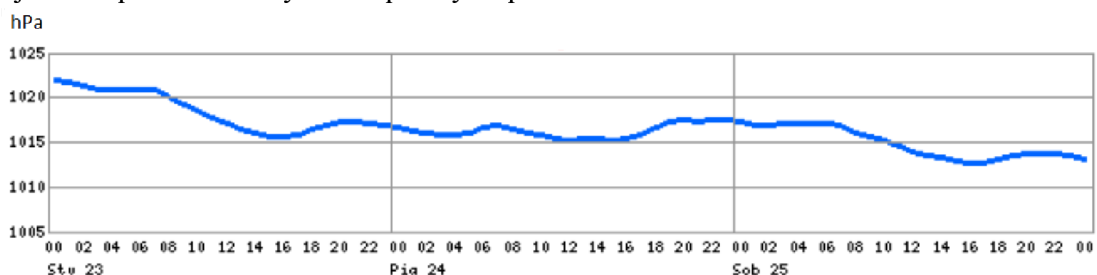
K uskutočneniu relevantného merania je potrebné pochopiť fyzikálnu podstatu teploty, vykonať rozbor teplotných snímačov, zistiť ich vlastnosti, parametre a princíp funkčnosti. Samotný rozbor je uvedený v nasledujúcej kapitole č.3.

## 2.2 Teplota ako fyzikálna veličina

Pri samotnom meraní teploty je nutné brať do úvahy, že teplota je jedna z veličín, ktorú nie je možné merať priamo. Teplota je definovaná ako stavová veličina určujúca stav termodynamической rovnováhy t.j. stav, kedy v izolovanej sústave telies od okolitého prostredia neprebiehajú žiadne makroskopické zmeny a všetky fyzikálne veličiny, ktorými je stav sústavy popísaný, nezávisia na čase. Stav termodynamической rovnováhy býva charakterizovaný termodynamickou teplotou, ktorá musí byť rovnaká pre všetky časti izolovanej sústavy [4]. Meranie teploty sa teda uskutočňuje nepriamym meraním. Celziova stupnica je odvodená od Kelvinovej termodynamической stupnice posunutím o teplotu 273,15 K.

## 2.3 Atmosférický tlak

Atmosférický tlak, často nazývaný aj ako barometrický, je spôsobený tiažou vzduchového stĺpca vyvolaného gravitačným pôsobením zeme. Veľkosť atmosférického tlaku v danom mieste nie je konštantná, ale kolíše v priebehu dňa. Jeho veľkosť závisí najmä od poveternostných a teplotných podmienok. Závislosť barometrického tlaku na

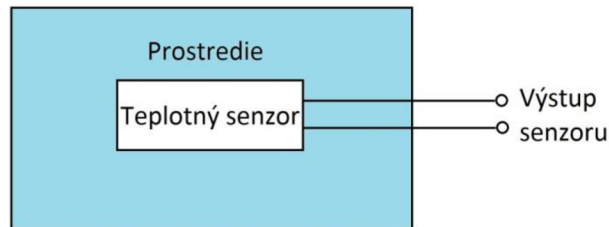


Obr. č. 7 Zmeny barometrického tlaku v priebehu dňa (prevzaté z [17])

čase bola meraná v apríli 2015 v meste Martin v nadmorskej výške 400 m. n. m. Minimálne hodnoty počas dňa sa vyskytujú v čase 14 – 16 hodiny. Maximálne hodnoty medzi 1. až 2. hodinou dňa.

### 3 Teplotné snímače

Snímač teploty sa považuje za vstupný blok meracieho reťazca, ktorý je v priamom styku s meraným prostredím, pričom meranú teplotu mení na inú fyzikálnu veličinu detegovanú na výstupe senzora. Teplotný senzor musí byť konštruovaný na daný typ prostredia a musí byť odolný voči vplyvom okolitého prostredia.



Obr. č. 8 Blokové schéma umiestnenia senzoru

Senzory je možno rozdeliť na aktívne, ktoré sa správajú ako zdroje elektrickej energie a na pasívne, pri ktorých je nutné elektrické napätie, prúd transformovať na teplotu alebo inú merateľnú veličinu.

Základné statické parametre senzorov [4]:

- Statickú charakteristiku popisuje funkčná závislosť  $Y=f(X)$  medzi meranou teplotou  $X$  a transformovanou veličinou  $Y$  v časovo ustálenom stave. Závislosť je často popísateľná polynómom  $n$ -tého rádu. Praktický popis vystihuje rovnica  $Y = K \cdot X$ , kde  $K$  je citlivosťou senzoru.
- Prah citlivosti senzoru je daný takou hodnotou meranej veličiny, pri ktorej je na výstupe senzoru stredná kvadratická odchýlka šumu senzoru.
- Dynamický rozsah senzoru teploty je daný intervalom merateľných a prípustných hodnôt teploty ohraničený prahom citlivosti a maximálnou prípustnou hodnotou teploty.
- Rozlíšiteľnosť je pomer dôveryhodnej meranej teploty a prahu citlivosti.
- Rýchlosť odozvy (časová konštanta) – popisuje rýchlosť/dynamiku senzoru, za aký čas je schopný reagovať na určitú zmenu teploty.

V kapitole 3.1 až 3.4 sa vychádza prevažne z teoretických poznatkov Kreidla v jeho publikácii *Měření teploty: Senozry a měřící obvody* [4].

#### 3.1 Kovové odporové senzory

Senzory tohto typu pracujú na základe teplotnej závislosti odporu kovu na teplote. Kov si je možno predstaviť ako štruktúru, skladajúcu sa zo súboru jontov umiestnených v mriežkových bodoch kryštálovej mriežky a tzv. elektrónového plynu zloženého z elektrónov chaoticky sa pohybujúcich v materiály. Na meranie teploty sú vhodné najmä kvôli vysokej presnosti, odolnosti voči vysokej teplote a veľkému rozsahu merateľných teplôt. Pre nízky rozsah teplôt  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  možno použiť aproximačný vzťah

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (3.1)$$

kde  $R_0$  je odpor senzora pri  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Stredná hodnota teplotného súčiniteľa odporu je daná ako

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0}, \quad (3.2)$$

kde  $R_{100}$  je odpor senzora pri  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Pre väčší rozsah teploty je aproximačný vzťah (3.1) nepoužiteľný. Redukovaný odpor  $W_{100}$  slúži ako parameter pre popis kvality daného odporového senzora daný vzťahom

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}. \quad (3.3)$$

### 3.1.1 Platinové senzory

Snímače sú vyrábané tenkovrstvovou alebo hrubovrstvovou technológiou. Vyznačujú sa chemickou odolnosťou, časovou stálosťou  $0,05\text{ } \%/1000\text{ h}$ . Pre aplikáciu presných teplotných snímačov sú požiadavky na čistotu platiny veľmi vysoké až  $99,9999\text{ } \%$ . Pre popis čistoty platiny sa využíva parameter redukovaného odporu  $W_{100}$ , ktorý je daný pomerom odporov senzora pri  $100\text{ }^\circ\text{C}$  a  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Teplotná závislosť na odpore pre rozsah  $-200\text{ }^\circ\text{C}$  až  $0\text{ }^\circ\text{C}$  určuje vzťah (3.4) a pre rozsah  $0\text{ }^\circ\text{C}$  až  $850\text{ }^\circ\text{C}$  vzťah (3.5).

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)], \quad (3.4)$$

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2], \quad (3.5)$$

kde

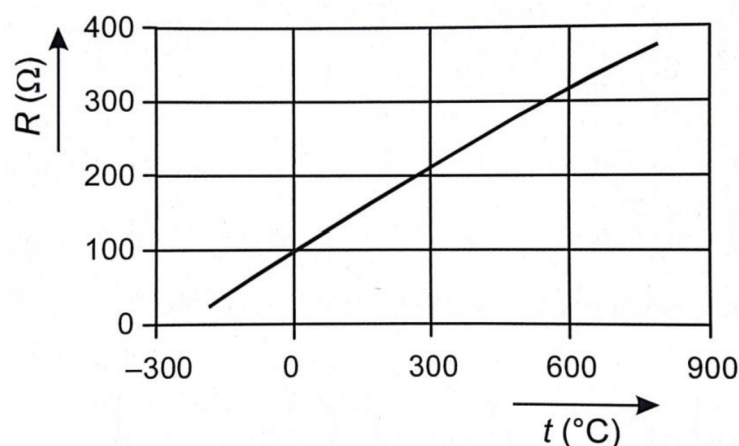
$$R_0 = 100\ \Omega \text{ (pre Pt 100),}$$

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1},$$

$$B = -5,80195 \cdot 10^{-7}\ \text{K}^{-2},$$

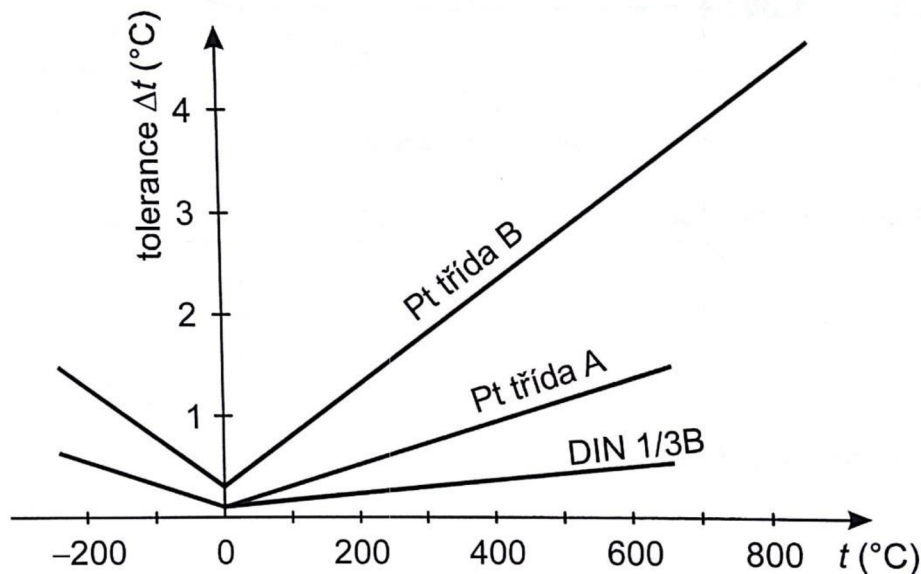
$$C = -4,27350 \cdot 10^{-12}\ \text{K}^{-4} \text{ pre } t < 0\text{ }^\circ\text{C},$$

$$C = 0 \text{ pre } t > 0\text{ }^\circ\text{C}.$$



Obr. č. 9 Závislosť odporu senzora Pt100 na teplote (prevzaté z [4])

Závislosť teploty na odpore vykazuje takmer lineárny charakter, čo je jednou z výhod platinových snímačov. Podľa normy IEC 751 (International Electrotechnical Commission) sa platinové senzory ( $W_{100} = 1,385$ ) vyrábajú v troch triedach presnosti podľa normy IEC - Trieda A, B a DIN 1/3B. Najvyššiu presnosť dosahuje senzor vyrobený s toleranciou DIN 1/3B, ktorá má však vyššiu cenu. Porovnanie jednotlivých tried presností je zrejmé z grafu. Trieda A a DIN 1/3B je definovaná pre teplotný rozsah od  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Trieda B až do  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obr. č. 10 Tolerancie Pt snímačov podľa normy IEC 751 (prevzaté z [4])

### 3.1.2 Niklové senzory

Odporové niklové snímače teploty sa vyrábajú tenkovrstvovou technológiou. Hlavnou výhodou týchto snímačov je veľká citlivosť, rýchla odozva (malá časová konštanta) a malé rozmery. Nevýhodou je nižší teplotný rozsah od  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , väčšia nelinearita, nižšia dlhodobá stabilita a dobrá odolnosť voči vplyvom prostredia. Teplotná závislosť odporu je daná vzťahom

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6]. \quad (3.6)$$

kde  $A, B, C, D$  sú konštanty

$$R_0 = \text{Odpor snímača pri } 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

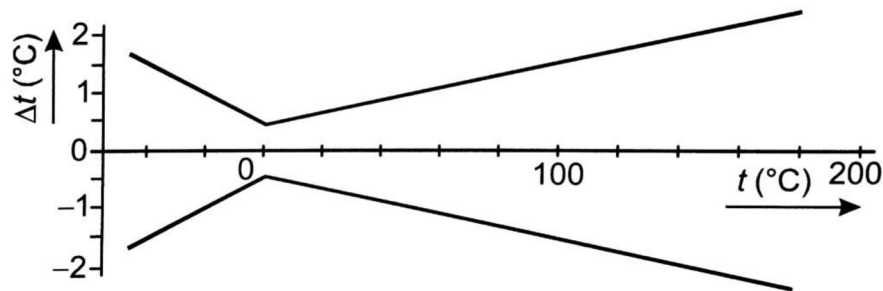
$$A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$$

$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-4}$$

$$D = 2,0 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-6}$$

Tolerancia niklového senzoru podľa normy DIN 43760 je značne závislá od teploty ako je zrejmé z Obr. č. 7. Pri limitných pracovných teplotách dosahuje niklový teplotný senzor nepresnosť až 2 °C.



Obr. č. 11 Tolerancia niklového snímača podľa DIN 43760 (prevzaté z [4])

### 3.1.3 Medené senzory teploty

Tento druh snímačov je možné využiť v teplotnom rozsahu od -200 °C do 200 °C. Pre teplotný rozsah -50 °C do +150 °C je možné použiť lineárny vzťah (viď kovové). Hlavnou nevýhodou mede je nízka rezistivita mede ( $0,0169 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ ) a náchylnosť k oxidácii. Výhodou je možnosť použiť snímač napríklad pri meraní teploty vinutia. V praxi sa medené snímače používajú zriedkavo. Závislosť odporu na teplote je možné rozdeliť do troch intervalov teplôt. Pre jednotlivé intervaly sú teplotné závislosti na odpore dané nasledujúcimi vzťahmi

$$R_t = A_1 R_0 [1 + A_2 (t + 200) + A_3 (t + 200)^2] \quad t \in \langle -200 \text{ °C}; -50 \text{ °C} \rangle, \quad (3.7)$$

$$R_t = R_0 (1 + A_4 t) \quad t \in \langle -50 \text{ °C}; +150 \text{ °C} \rangle, \quad (3.8)$$

$$R_t = A_1 R_0 [1 + A_6 (t - 150) + A_7 (t - 150)^2] \quad t \in \langle +150 \text{ °C}; +260 \text{ °C} \rangle. \quad (3.9)$$

### 3.1.4 Polovodičové odporové senzory

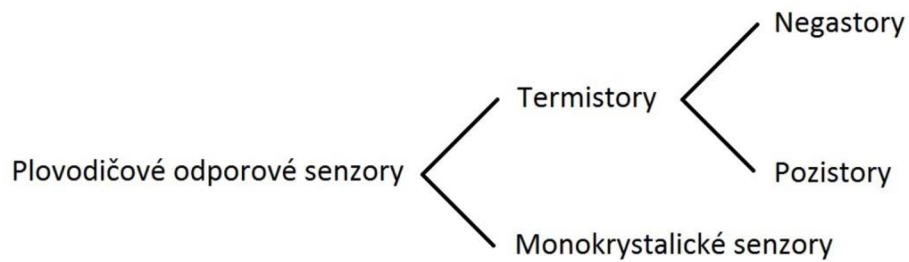
Teplotné senzory využívajú teplotnú závislosť odporu polovodiča na teplote. Polovodiče majú charakteristickú závislosť koncentrácie voľných nosičov náboja  $n$  na teplote podľa vzťahu

$$n = e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (3.10)$$

kde  $\Delta E$  je šírka medzery medzi energetickými hladinami a  $k$  je Boltzmanova konštanta. Teplotný súčiniteľ odporu polovodičov je záporný, čo znamená že, odpor polovodiča klesá so stúpajúcou teplotou, čo je zrejmé aj z rovnice

$$\alpha \approx -\frac{\Delta E}{2kT} \frac{1}{T}. \quad (3.11)$$

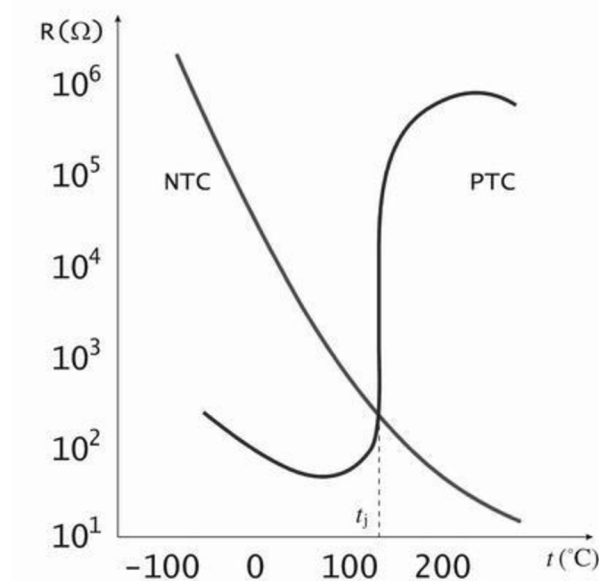
Polovodičové odporové senzory možno rozdeliť do skupín nasledovne:



Obr. č. 12 Rozdelenie polovodičových odporových senzorov

## 3.2 Termistory

Termistor (Thermally Sensitive Resistor) je teplotne závislý odpor vyrobený z polovodičových feroelektrických materiálov. Výroba pomocou keramickej technológie umožňuje vyhotovenia v rôznych tvaroch disku, doštičky, kvapky, valca a pod. Hlavné výhody termistorov sú malé rozmery, jednoduchý prevod odporu na elektrický prúd alebo napätie a možnosť priameho merania odporu na väčšiu vzdialenosť. Nevýhodou je značná nelinearita teplotnej charakteristiky.



Obr. č. 13 Charakteristika PTC a NTC termistoru (prevzaté z [4])

### 3.2.1 Negastory

Negastory sú vyrábané práškovou technológiou z kysličníkov kovov ako je kysličník chrómu, kobaltu, železa, mangánu, niklu, titanu. Použitelnosť bežných senzorov je v rozmedzí -50 °C až 150 °C. Pri zanedbaní ohrevu negastoru pretekajúcim prúdom je závislosť odporu senzoru daná

$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}} \quad (3.12)$$

Po úprave dostávame vzťah pre nameranú teplotu

$$T = \frac{B}{\ln(R_T) - A}, \quad (3.13)$$

kde  $A$  je konštanta závislá len na geometrickom tvare a použitom materiály,  $B$  je teplotná konštanta daná materiálom,  $T$  termodynamická teplota ( $K^{-1}$ ). Teplotný súčiniteľ je záporný a je daný vzťahom

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \cdot 100. \quad (3.14)$$

Pre teplotnú konštantu  $B$  platí

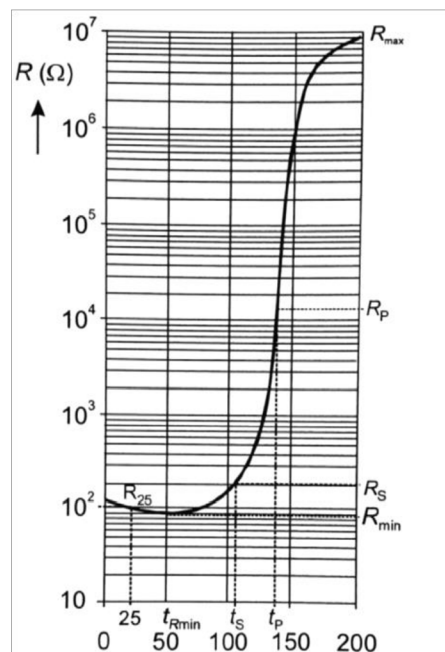
$$B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}, \quad (3.15)$$

kde  $T_1$  je teplota, pri ktorej je zistená hodnota odporu  $R_1$ ,  $T_2$  je referenčná hodnota teploty  $T_r=298,15$  K resp.  $25$  °C.

### 3.2.2 Pozistory

Pozistory sú vyrábané z feroelektrickej keramiky, napríklad z titaničitanu bornatého. Pri nízkych teplotách najprv odpor mierne klesá, teplotný súčiniteľ odporu je približne  $1\% \cdot K^{-1}$ . Následne od Curierovej teploty dochádza k prudkému nárastu rezistivity. Základným parametrom je spínacia teplota  $t_s$ , ktorá je daná teplotou pri odpore senzora  $R_s = 2R_{min}$ . Spínaciu teplotu je možné korigovať chemickým zložením v rozmedzí od  $60$  °C do  $180$  °C. Teplotný súčiniteľ  $\alpha$  v strmej časti charakteristiky je možné určiť podľa nasledujúceho vzťahu

$$\alpha = \frac{\ln R_p - \ln R_p}{t_p - t_s}. \quad (3.16)$$



Obr. č. 14 Charakteristika PTC termistoru v logaritmickej miere (prevzaté z [4])



### 3.2.3 Monokryštalické Si senzory

Si senzor je použiteľný v rozsahu teplôt od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na výrobu sa využívajú materiály ako kremík, germánium, indium vrátane ich zliatin. Kremíkové senzory majú kladný teplotný súčiniteľ odporu. Princípom Si senzorov je nevlastná vodivosť typu N, s dominantnou elektrónovou vodivosťou, pre ktorú platia nasledovné vzťahy

$$n \cdot p = n_i^2, \quad (3.17)$$

$$\sigma = e(\mu_n \cdot n + \mu_o \cdot p), \quad (3.18)$$

kde

$e$  je elementárny náboj  $1,602 \cdot 10^{-19}\text{ C}$ ,

$\sigma$  je konduktivita,

$n_i$  je vlastná koncentrácia nosičov náboja,

$n, p$  je koncentrácia nábojov a dier,

$\mu_n, \mu_p$  je pohyblivosť elektrónov a dier.

Teplotná závislosť rezistivity je daná teplotnou závislosťou pohyblivosti nosičov náboja. Závisí však aj na dotlačnej koncentrácii prímеси (platí iba v danom rozsahu teplôt). Pri zvyšovaní teploty senzoru dochádza k rozptýleniu nosičov náboja na mriežke polovodiča a tým k zníženiu ich pohyblivosti respektíve k zvýšeniu rezistivity. Pre rozsah do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  je vhodná koncentrácia  $n > 3 \cdot 10^{14}\text{ cm}^{-3}$  a vhodná rezistivita  $\rho < 20\text{ }\Omega\text{ cm}$ . Odpor senzoru je daný hodnotou podľa vzťahu

$$R_t = R_{25}(1 + \alpha\Delta t + \beta\Delta t^2), \quad (3.19)$$

kde

$\alpha, \beta$  sú konštanty pre  $t < -30\text{ }^{\circ}\text{C}; 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$R_{25}$  je odpor senzora pri  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

$\Delta t = t - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

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

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

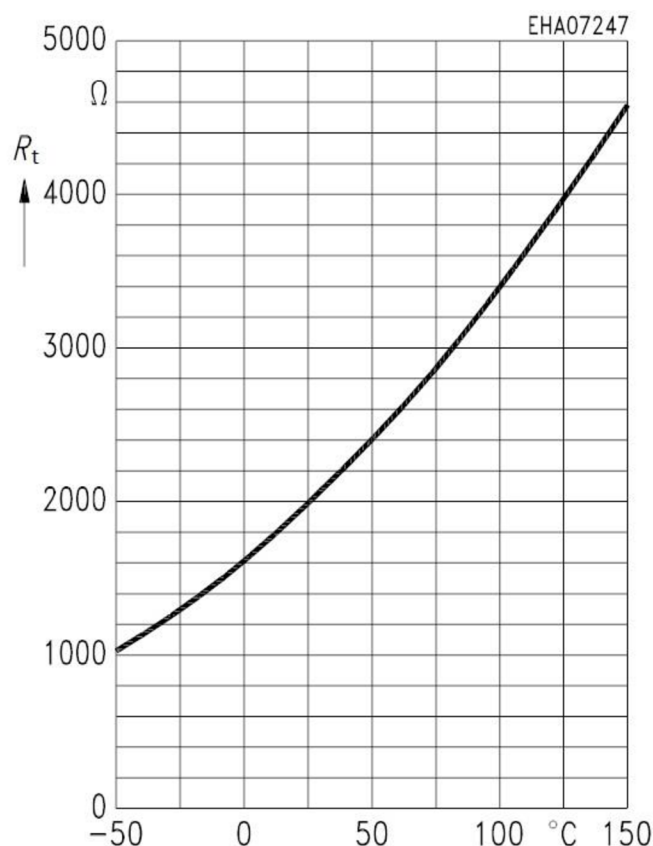
Jednou z hlavných nevýhod kremíkového senzoru je veľká časová odozva (časová konštanta), rádovo desiatky sekúnd v plynnom prostredí. Pre zistenie nameranej teploty je vhodný vzťah

$$T(^{\circ}\text{C}) = \left( 25 + \frac{\sqrt{\alpha^2 - 4 \cdot \beta + 4 \cdot \beta \cdot k_T} - \alpha}{2 \cdot \beta} \right), \quad (3.20)$$

kde konštanta  $k_T$  je daná pomerom hodnoty odporu senzora v teplote  $T$  a odporu senzora pri teplote  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$$k_T = \frac{R_T}{R_{25}} \quad (3.21)$$

Jedným z kremíkových monokryštalických senzorov je aj snímač KTY10-6. Závislosť odporu senzoru na teplote je zobrazená na obr. č. 12. Charakteristika vykazuje pomerne veľkú citlivosť zmeny odporu a malú mieru nelinearity.



Obr. č. 15 Charakteristika senzoru KTY10-6 (prevzaté z [3])

### 3.3 Monolitické PN senzory

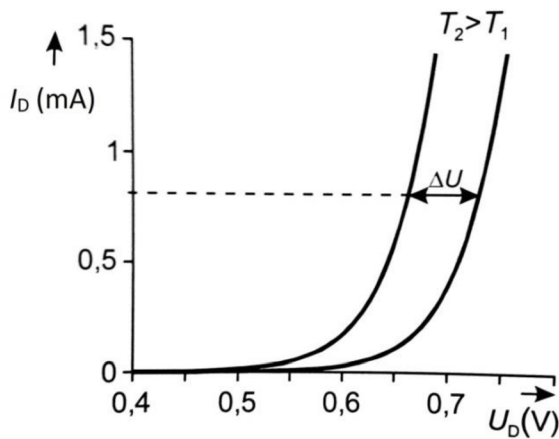
Monolitické integrované obvody sú založené na teplotnej závislosti napätia PN prechodu v priepustnom smere. Disponujú pomerne nízkym teplotným rozsahom od -55°C do 150°C s neistotou merania 0,6 % až 2,2 %. Monolitické senzory je možno rozdeliť na diódové a tranzistorové.

#### 3.3.1 Diódové snímače teploty

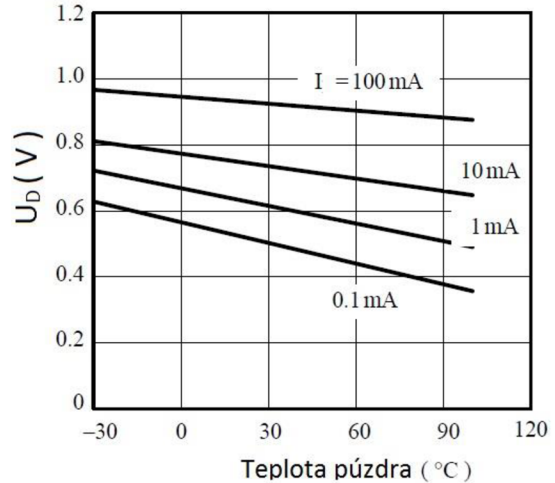
Na výrobu diódových teplotných senzorov sa používa zväčša kremík alebo gálium-arzenit. Napätie na PN prechode v priepustnom smere je teplotne závislé podľa nasledujúceho vzťahu

$$U_d = mU_T \ln \frac{I_D}{I_s}, \quad (3.22)$$

kde veličiny  $m$ ,  $I_s$  sú veličiny závislé na teplote a kde je  $m \in (1 \leq m \leq 2)$  rekombinačný koeficient polovodiča,  $U_T = kT \cdot e^{-1}$  je teplotné napätie v  $J \cdot C^{-1}$ ,  $I_D$  je saturačný prúd pretekajúci diódou v priepustnom smere a  $I_s$  je saturačný prúd pretekajúci diódou v závernom smere.



Obr. č. 16 Závislosť prúdu pretekajúcim diódou na napätí pre teploty  $T_1$  a  $T_2$  [3]



Obr. č. 17 Závislosť napätia na dióde na teplote, pre diódou 1N4147 [5]

Výhodou diódových snímačov je hlavne jednoduchosť a nízka nákupná cena. Zjavnou nevýhodou je pomerne malá citlivosť na zmenu teploty.

### 3.3.2 Tranzistorové snímače teploty

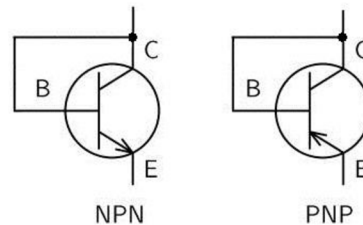
Jedná sa o obdobu diódového snímača, pričom sa využíva zapojenie tzv. tranzistorovej diódy zobrazenej na obr. č.16. Základom tohto snímača je teplotná závislosť napätia prechodu báza-emitor. Napätie  $U_{BE}$  je možné popísať vzťahom

$$U_{BE} = T \left( \frac{k}{e} \ln I_C - \frac{k}{e} \ln I_S \right) \quad (3.23)$$

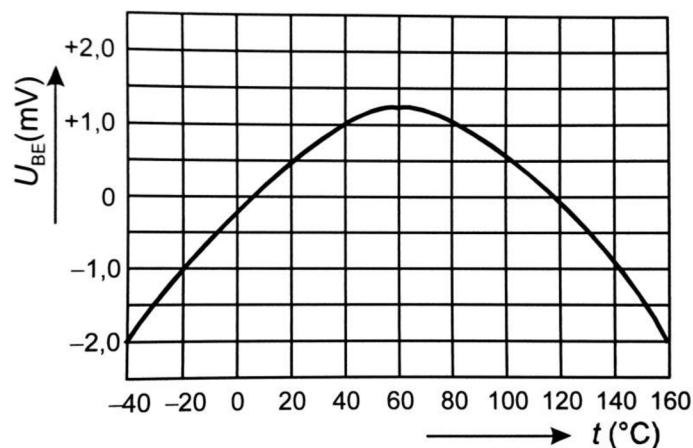
kde

- $k$  je boltzmanova konštanta,
- $e$  je elementárny náboj elektrónu,
- $I_C$  je kolektorový prúd,
- $I_S$  je saturačný rúd prechodu báza emitor.

Nevýhodou tranzistorového snímača je závislosť napätia aj na saturačnom prúde báza-emitor.



Obr. č. 18 Zapojenie tranzistorovej diódy



Obr. č. 19 Závislosť napätia prechodu Báza-Emitor na teplote (prevzaté z [3])

### 3.4 Termoelektrické senzory

Senzory tohto typu využívajú k svojej funkcii termoelektrické články, ktoré fungujú ako aktívne senzory teploty (zdroje jednosmerného napätia). Princípom senzoru je Seebeckov jav - premena tepelnej energie na elektrickú. Jedná sa o spojenie dvoch materiálov na oboch koncoch, pričom jeden koniec má vyššiu teplotu ako druhý. Takéto usporiadanie má za následok, že nosiče náboja z teplejšieho konca putujú do chladnejšieho, pričom medzi miestami vzniká rozdiel potenciálov (miesta s rozdielnou koncentráciou nosičov náboja). Zvolením vhodných párov materiálov sa docielilo prijateľných parametrov. Medzi hlavné výhody daných senzorov tohto typu patrí hlavne nízka nelinearita charakteristiky, odolnosť proti korózii, dlhodobá stabilita senzoru a malá časová konštanta. Presnosť sa pohybuje v okolí 0,5 až 1 °C.

Typy termoelektrických snímačov a ich vlastností:

K – určený pre oxidačnú a internú atmosféru, nepoužiteľný pre meranie vo vákuu

T – najvhodnejší pre nízke teploty do 700 °C v oxidačnej, redukčnej a vákúovej atmosfére

J – využiteľný v oxidačnej, redukčnej i inertnej atmosfére a vo vákuu

N – výhodný najmä kvôli stabilnej charakteristike. Určený pre cyklické merania aj v jadrovej technike

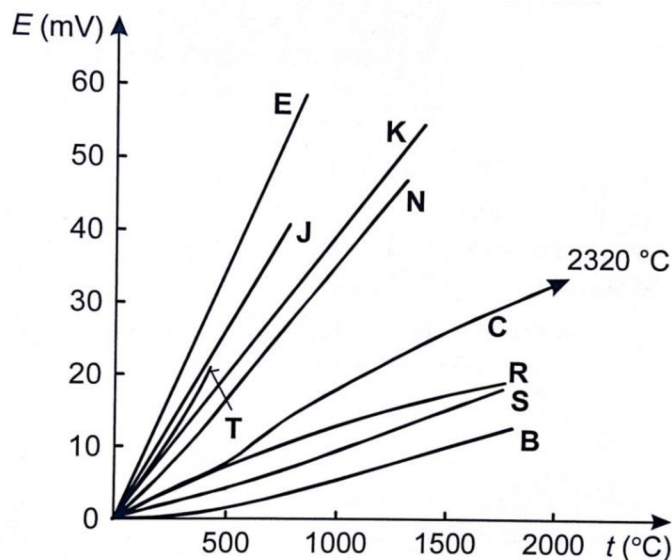
E – využiteľný vo vákuu a v stredne oxidačnej atmosfére. Má vysoký termoelektrický koeficient

R – používa sa na meranie vysokých teplôt až do 1780 °C, odolný voči oxidácii a korózii

S – od typu R sa líši iba jeho chemických zložením

B – použiteľný až od teploty 100 °C. Nízka citlivosť do 300 °C. Nad 1200 °C stabilnejší ako typy R a S

G – je vhodný hlavne pre veľmi vysoké teploty, chemicky stabilný, použiteľný v oxidačnej aj inertnej atmosfére, obdobné vlastnosti má aj typ C



Obr. č. 20 Grafické porovnanie termoelektrických snímačov (prevzaté z [4])

Kód	Zloženie	Dlhodobá (°C) Približné hodnoty	Krátkodobá (°C) Približné hodnoty	$\alpha$ ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) Pri 100 °C	A ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) Pri 500 °C	A ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) Pri 1000 °C
J	NiCr(+) NiAl(-)	0 až +1100	-180 až +1350	42	43	39
K	Cu(+) CuMn(-)	-185 až +300	-50 až +400	46	-	-
T	Fe(+) CuNi(-)	+20 až +700	-180 až +750	54	56	59
N	NiCrSu(+) NiSiMg(-)	0 až +1100	-270 až +1300	30	38	39
E	NiCr(+) CuNi(-)	0 až +800	-40 až +900	68	81	-
R	PtRh13(+) Pt (-)	0 až +1600	-50 až +1700	8	10	13
S	PtRh10(+) Pt (-)	0 až 1550	-50 až +1750	8	9	11
B	PtRh30(+) PtRh6(-)	+100 až 1000	+100 až +1820	1	5	9
G	W(+) WRh(-)	+20 až +2320	0 až +2600	5	16	21
C	WRh5 (+) WRh26(-)	+50 až 1820	+20 až +2300	15	18	18

Tabuľka 1 Porovnanie vlastností termoelektrických snímačov (prevzaté z [4])

## 4 Realizácia diferenciálneho teplomera

V tejto kapitole sú uvedené praktické a teoretické poznatky týkajúce sa samotného návrhu zariadenia. Podkapitoly tejto časti bakalárskej práce sú usporiadané v takom chronologickom poradí ako bol uskutočňovaný aj samotný návrh. Kapitola popisuje postup výberu vhodných snímačov, hardware-ovú aj software-ovú obsluhu, layout DPS aj mechanickej konštrukcie a taktiež popis vyhodnocovania i zobrazovania dát.

### 4.1 Výber vhodných snímačov

Vychádzajúc z poznatkov uvedených v kapitole č. 2 je možno považovať nároky na snímač atmosférického tlaku za podstatne nižšie ako na snímače teploty. Nárokom dostatočne vyhovuje snímač BMP180 od firmy BOSCH, ktorého vlastnosti a parametre sú uvedené v kapitole 4.1.3. Teplotný snímač použiteľný v realizácii presného diferenciálneho teplomera musí spĺňať tieto základné požiadavky:

- Dostačujúci rozsah teplôt
- Vysoká presnosť
- Malá časová konštanta, rýchla odozva
- Vysoká citlivosť
- Nízka nelinearita statickej charakteristiky
- Malé rozmery (z dôvodu minimálneho ovplyvňovania prúdiaceho toku vzduchu)

Pre dané požiadavky sú najviac vyhovujúce dva typy snímačov s porovnateľnými parametrami: termoelektrický a kovový odporový snímač.

V nasledujúcej podkapitole sú detailne porovnané vlastnosti oboch alternatív s ohľadom na danú aplikáciu, dostupnosť a cenu.

#### 4.1.1 Termoelektrický snímač

Termoelektrické snímače sú často používanou alternatívou, najmä v regulačných systémoch. Ako už bolo uvedené v predchádzajúcej kapitole, existuje viacero typov termočlánkov určených pre rôzne pracovné prostredia. Pri realizácii diferenciálneho teplomera je pracovné prostredie atmosféra, čo nekladie vysoké nároky na odolnosť. Vhodným termoelektrickým snímačom je termočlánok s označením výrobcu COCO-005. Jedná sa o spojenie mede a konštantánu s priemerom vodiča 0,125 mm (0,005 palca). Termočlánok spadá do typu T. Tento typ článku má pomerne vysokú citlivosť 54  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  (Tabuľka č. 1). Pracovný rozsah teplôt sa pohybuje v rozmedzí od -180  $^\circ\text{C}$  až 750  $^\circ\text{C}$ . Časová odozva je závislá od priemeru kovového vodiča tvoriaceho termoelektrický pár. Hlavnou výhodou tohto typu snímača je práve jeho hodnota časovej konštanty, ktorá dosahuje veľmi nízkych hodnôt. Z uvedeného vyplýva, že snímač je schopný reagovať na dynamické zmeny teploty okolia. Pre snímač typu COCO-005 o priemere 0,125 mm hodnota časovej konštanty činí iba 100 ms.



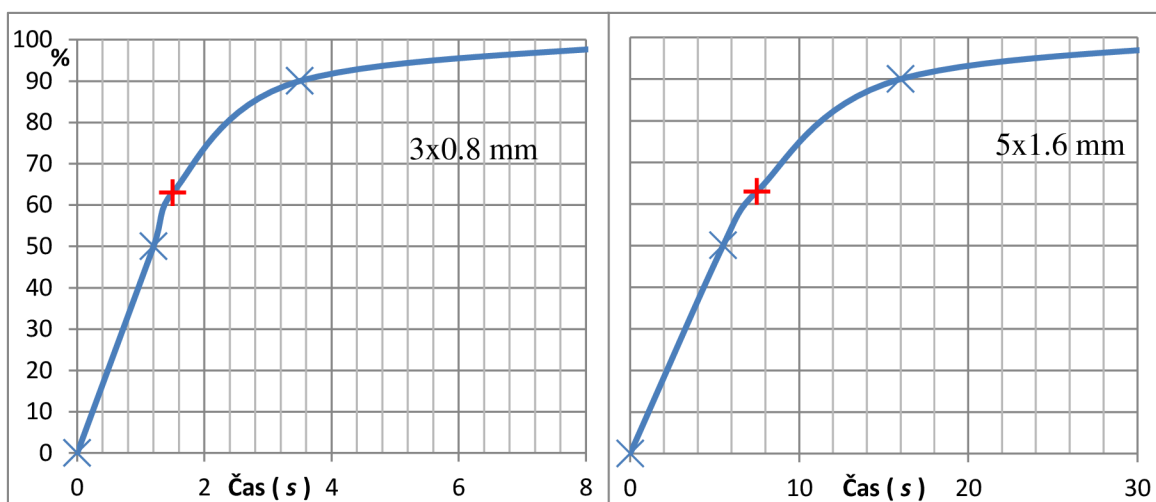
Obr. č. 21 Neizolovaný termoelektrický článok (prevzaté z [15])

Hlavnou nevýhodou snímača je nízka presnosť. Zvolený typ COCO-005 je najpresnejší z dostupných termočlánkov, ale dosahuje presnosť iba  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pre aplikáciu presného diferenčného teplomera je daná presnosť nedostačujúca čoho dôkazom je aj závislosť parametru  $C_n^2$  na diferencii teplôt zobrazená na obr. č.6 [15].

Z dôvodu nedostačujúcej presnosti je tento typ teplotného snímača považovaný za nedostačujúci a tým pádom nevhodným pre využitie v danej aplikácii.

#### 4.1.2 Platinový snímač

Teplotný senzor spadá do kategórie kovových odporových senzorov. Základom teplotného senzoru je platina nanášaná hrubo vrstvou technológiou na keramický substrát. Platina sa vyznačuje chemickou odolnosťou, časovou stálosťou iba  $0,03\%$ , zmenou odporu pri funkčnosti 1000 hodín, vysokou teplotou tavenia  $1768,25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a odolnosťou voči korózii. Teplotný koeficient nadobúda hodnotu  $3850\text{ ppm}\cdot\text{K}^{-1}$ . Disponuje nízkou nelinearitou závislosti odporu na teplote (obr. č. 5) a pomerne rýchlejšie odozve na meranú teplotu turbulentného prostredia. Rozsah merateľných teplôt je v rozmedzí od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Často používaný typ platinových snímačov je PT1000. Označenie udáva hodnotu odporu senzoru  $1000\ \Omega$  pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Výhodou je aj vysoký odpor snímača čo zaručuje malý merací prúd a teda aj nízky parazitný výkon a následný ohrev. Výhodnou stránkou tohto typu snímača je pomerne nízka časová odozva/konštanta a tým pádom aj schopnosť snímača reagovať na relatívne rýchle zmeny teploty meraného priestoru. Časová konštanta je závislá od rozmerov daného snímača. Na grafe nižšie je možné vidieť časovú odozvu dvoch zhodných typov PT1000 s rôznymi konštrukčnými rozmermi.

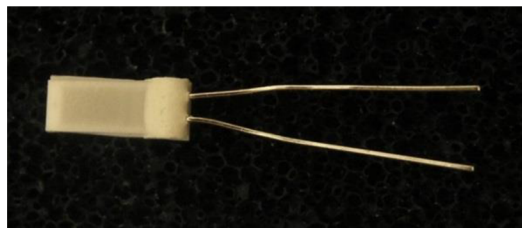


Obr. č. 22 Časová odozva snímačov PT1000 s rôznymi veľkosťami puzdier

Z grafu je zrejme, že snímač s väčšími rozmermi má väčšiu časovú konštantu. V uvedenom prípade až 5 násobne. Zariadenie musí pre správnu funkciu obsahovať snímač s nízkou časovou konštantou. Vzhľadom na vysoké požiadavky presnosti je možné zvoliť triedu DIN 1/3B. Výrobca túto triedu označuje vlastným označením triedou Y. Porovnanie jednotlivých tried presnosti platinových snímačov je zobrazené na obr. č.6. Nevýhodou zvoleného snímača je nižšia mechanická odolnosť a nutnosť malých rozmerov, čo kladie väčšie nároky na opatrnosť pri manipulácii. Presnosť je závislá na aktuálnej teplote senzoru a je daná vzťahom podľa [8]

$$\Delta T = 0,1 + 0,0017 |T| \quad (4.1)$$

Meranú teplotu je možné vypočítať na základe vzťahu (3.5) s konštantami mierne odlišnými podľa katalógového listu [8]  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}$   $B = -5,755 \cdot 10^{-7}$ , z ktorého však pre vypočítanú teplotu  $T$  existujú dva korene kvadratickej rovnice, pričom práve iba jedna z nich má reálny význam.



Obr. č. 23 Platinový senzor PT1000

Požadovaným vlastnostiam najviac vyhovujú platinové snímače. Adekvátnym snímačom z tejto kategórie je typ PT1000. Pre dosiahnutie čo najpresnejších výsledkov je nutné zvoliť typ s najvyššou triedou presnosti a s najmenšími rozmermi pre dosiahnutie nízkej časovej konštanty. Zvolený typ disponuje presnosťou  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , rozmerom  $1,6 \times 1,2 \text{ mm}$  a hodnotu časovej konštanty iba  $1,2 \text{ s}$ .

#### 4.1.3 Snímač atmosférického tlaku

Jedným z meraných parametrov je aj hodnota atmosférického tlaku. Nároky na presnosť senzora tlaku sú podstatne nižšie ako u merania teploty. Merač tlaku spadá do kategórie hybridných integrovaných obvodov. Výstupom senzoru nie je spojitá analógová veličina, ale digitálny signál spracovateľný mikroprocesorom. Základné parametre senzoru tlaku sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

Tabuľka 2 Vlastnosti snímača BMP180 [9]

Vlastnosť	Hodnota
Rozsah merateľného tlaku	300 až 1100 hPa
Použitelnosť v nadmorskej výške	-500 až +9000 m.n.m.
Pracovná teplota	-40 až $80 \text{ }^\circ\text{C}$
Rozsah napájacích napätí	1,8 až $3,6 \text{ V}$
Spotreba	$5 \text{ }\mu\text{A}$ pri jednej vzorke
Presnosť	Šetrný mód $0,06 \text{ hPa}$ ( $0,5 \text{ m}$ )
	Štandardný mód $0,02 \text{ hPa}$ ( $0,17 \text{ m}$ )



Snímač tlaku funguje na piezo-rezistívnom princípe. Senzor je konštruovaný tak, aby komunikoval s mikroprocesorom pomocou zbernice I2C. Snímač obsahuje aj teplotný senzor s presnosťou 0,5 °C, ktorý sa v aplikácii nevyužíva. Hlavnou výhodou tohto snímača sú malé rozmery, jednoduchá montáž, jednoduchá komunikácia, nízka spotreba či náklady a možnosť zapojenia viacerých zariadení na jednu zbernicu. Výhodou je aj možnosť napájať senzor 5 V, vďaka už integrovanému stabilizátoru napätia. Zvolený snímač tlaku spĺňa všetky požadované aspekty k použitiu v aplikácii diferenčného teplomera.



a) pohľad zhora

b) pohľad zo spodku

c) vnútro snímača

Obr. č. 24 Snímač tlaku BMP180 (prevzaté z [9])

Snímač tlaku k svojej funkcii využíva implementovanie knižnice „SFE\_BMP180.h“, ktorá je využitá aj v príslušnom programe. Bližší popis softvérovej obsluhy je uvedený v kapitole č. 4.3.

## 4.2 Hardvérová obsluha zariadení

V nasledujúcej podkapitole sú objasnené a vysvetlené jednotlivé časti zariadenia a princípy ich fungovania.

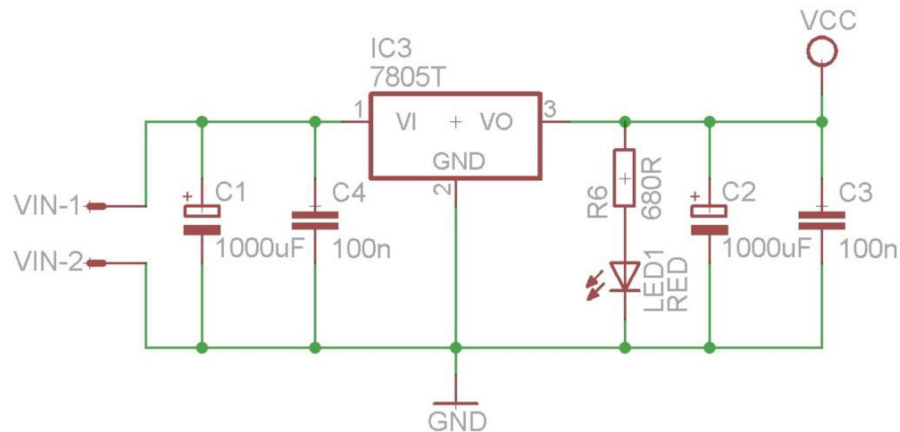
Presný diferenčný teplomer je zložený z niekoľkých základných častí:

- Zdroj stabilného napájacieho napätia LM7805
- Mikroprocesor ATmega328p
- Analógovo-digitálny prevodník AD7719
- Snímač tlaku BMP180 a snímače teploty PT1000
- LCD znakový displej 16x2
- Zariadenie na sériovú komunikáciu UART pomocou USB

Zariadenie určuje intenzitu optických turbulencií na základe dvoch meraných parametrov: diferenčná teplota a tlak. Odporový platinový snímač funguje na princípe zmeny odporu v závislosti na teplote. Meranie odporu snímača je realizované pomocou konštantného zdroja prúdu a následného snímania vzniknutého úbytku napätia. Presnosť merania teploty je závislá od presnosti určenia úbytku napätia na snímači.

### 4.2.1 Zdroj napájacieho napätia

Pre správnu funkciu musí zariadenie obsahovať zdroj stabilného napájacieho napätia. Zdrojom vstupného napätia  $V_{IN}$  je transformátorový zdroj v podobe externého adaptéra s výstupnou hodnotou jednosmerného napätia 9 V a maximálnym odoberaným prúdom 400 mA. V zariadení bol využitý jednoduchý stabilizovaný zdroj LM7805T, ktorý stabilizuje výstupné napájacie napätie  $V_{CC}$  na hodnotu 5 V.



Obr. č. 25 Schéma zapojenia zdroja napätia

Kondenzátory C1 a C2 plnia funkciu filtrácie napätia. Kondenzátory C3 a C4 slúžia na odfiltrovanie vysokofrekvenčného rušenia a taktiež chráni LM7805 pre rozkmitaním. Rezistor R6 má len ochrannú funkciu diódy, ktorá slúži na indikáciu prítomnosti napájacieho napätia na výstupe zdroja. Zdroj slúži k napájaniu jednotlivých častí zariadenia a taktiež zaručuje stabilné podmienky pre funkciu.

### 4.2.2 Mikroprocesor ATmega328P

Úlohou mikroprocesora je komunikovať s prevodníkom, analyzovať prijaté dáta, vykonať matematické a logické operácie, odoslať výsledky pomocou sériovej komunikácie a zobrazovať aktuálne dáta na znakovom displeji.

ATmega328p od firmy Atmel je dostačujúca alternatíva, ktorá spĺňa všetky predpoklady a predispozície na správnu a efektívnu funkciu zariadenia. Taktovaciu frekvenciu zabezpečuje kryštál s frekvenciou 16 MHz. Výhodou tohto mikroprocesoru nie je len pomerná jednoduchosť programovania a odlaďovania softvéru ale aj výborná dostupnosť študijných materiálov. Mikroprocesor má už integrovaný 10 bitový A/D prevodník, ale pre využitie diferenciálneho teplomera je nedostačujúci práve kvôli počtu kvantovacích hladín. Počet kvantovacích hladín je možné zistiť podľa jednoduchého vzťahu  $2^n$ , kde  $n$  je počet bytov. Zabudovaný prevodník teda disponuje počtom 1024 kvantovacích hladín. K relevantnej funkcií zariadenia je nutné použiť presnejší prevodník, ktorý je popísaný v podkapitole 4.3.2. ATmega328 disponuje 23 vstupne/výstupnými pinmi, z čoho je ich aktívne využívaných 18. Parametre mikroprocesora sú prehľadne zhrnuté v tabuľke nižšie.

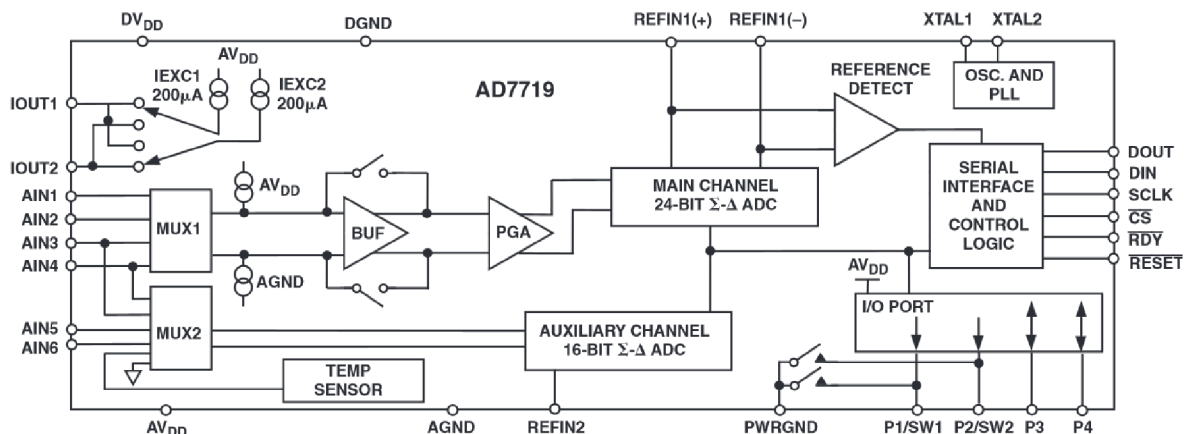
Tabuľka 3 Parametre ATmega328P [11]

Vlastnosť	Hodnota
Napájacie napätie	1,8 - 5.5 V
Počet bitov	8
Flash pamäť	32 Kbyty
SRAM pamäť	2 Kbyty
EEPROM	1 KB
Max. pracovná frekvencia	20 MHz
Počet vstupno/výstupných pinov	26
Prevodník A/D	10 bit

Softvérová obsluha mikroprocesora je detailne popísaná v kapitole č. 4.3.

### 4.2.3 Analógovo-digitálny prevodník

Pre presné meranie je nutné použiť presný prevodník spojitaj analógovej veličiny na digitálnu podobu. Vhodný A/D prevodník určený na meranie teploty pomocou RTD (*Resistat Temperature Sensor*) je AD7719 od firmy Analog Devices.

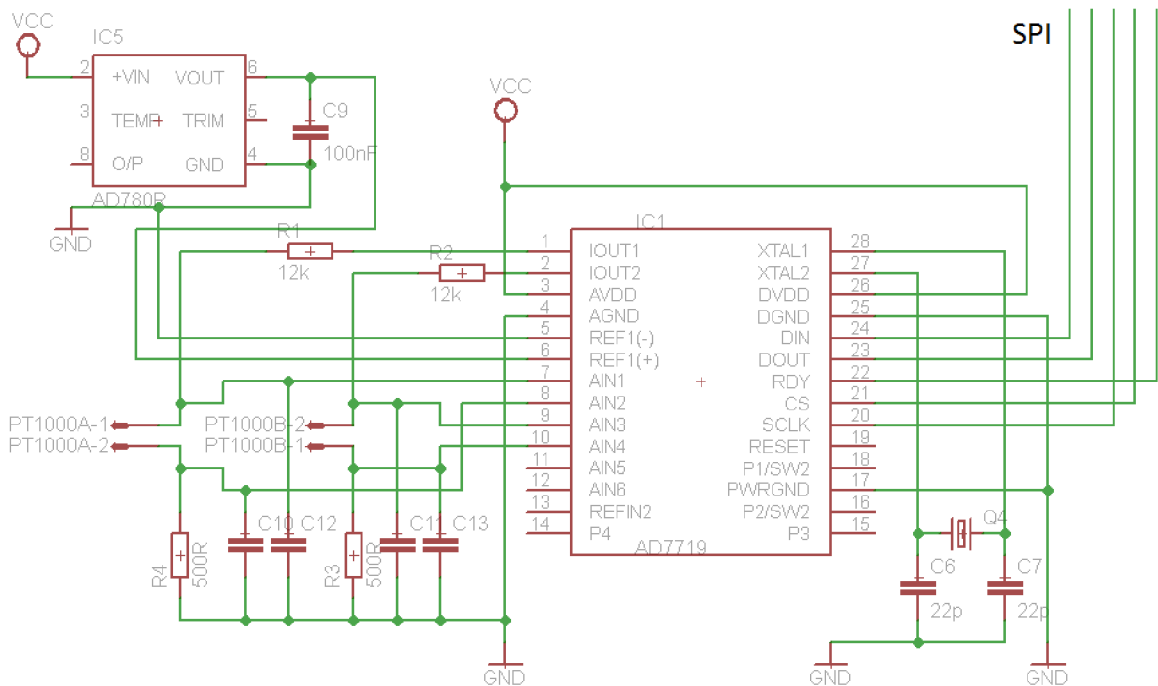


Obr. č. 26 Bloková schéma prevodníku AD7719 (prevzaté z [12])

Prevodník disponuje dvoma prevodníkmi: MAIN (24bitový) a AUXILIARY (16bitový). Taktiež disponuje šiestimi analógovými vstupmi, ktoré sú prepínateľné na hlavný kanál MAINADC alebo na kanál AUXILIARY. Samotné prepínanie je uskutočňované pomocou zápisu do registrov prevodníka. Podrobné informácie o registroch sú uvedené v kapitole č. 4.3. Vstupy REF1(-) a REF1(+) umožňujú pripojiť do prevodníka zdroj referenčného napätia pre kanál MAINADC. Pin REFIN2 zabezpečuje vstup referenčného napätia pre kanál AUXILIARY. Piny XTAL1 a XTAL2 sú určené na pripojenie oscilátora s frekvenciou 32 kHz. Obvod obsahuje aj vnútorný teplomer, slúžiaci na znižovanie nepresnosti v prípade použitia obvodu v meniacich sa teplotných podmienkach. Komunikácia s prevodníkom prebieha pomocou zbernice SPI. Komunikačné piny DOUT a DIN slúžia na odosielanie a prímanie dát do a z mikroprocesora. Pin SCK slúži ako synchronizácia komunikácie pomocou hodinového signálu. V prípade použitia viacerých zariadení na zbernici SPI je možné aktivovať prevodník logickou úrovňou 0 (0 V) na pine CS. Podobne je možné vyvolať reštart pomocou pinu RESET. Bližší popis nastavení a komunikácie je uvedený

v kapitole č. 4.3. Výstupy IEXC1 a IEXC2 sú navzájom prepínateľné prúdové zdroje. Napájanie obsahuje oddelené analógové a digitálne napájacie vstupy. Realizácia nevyžaduje oddelenie digitálnej časti od analógovej, preto sú piny navzájom galvanicky prepojené. Popis využitia zapojenia s oddelenými napájaniami je popísaný v katalógovom liste [12].

Maximálna povolená hodnota pretekajúceho prúdu výrobcom cez snímač PT1000 je 1mA. Prevodník od výrobcu obsahuje dva integrované nastaviteľné zdroje konštantného prúdu IEXC1 a IEXC2 s hodnotou 200  $\mu$ A. Nízka hodnota pretekajúceho prúdu snímačom zaručí malý parazitný ohrev snímača. Pre teplotu 0  $^{\circ}$ C na snímači PT1000 stratový výkon odpovedá hodnote 40  $\mu$ W. V prípade použitia snímača PT100 by stratový výkon činil iba 4  $\mu$ W, ale vzniknutý meraný úbytok by dosahoval hodnoty 10x menšej ako v prípade snímača PT1000. Parazitný stratový výkon 40  $\mu$ W je ešte možné považovať za zanedbateľný a neskršujúci výsledky merania teploty. Presnosť prúdových zdrojov podľa katalógového listu dosahuje hodnoty iba  $\pm$ 10 %. Z tohto dôvodu prúd generovaný prevodníkom nemožno považovať za presný a je nutné zistiť jeho skutočnú hodnotu presným  $\mu$ A-metrom. Vysoko impedančné analógové vstupy zabezpečujú, že prúd tečúci do prevodníka (AIN1 až AIN4) je zanedbateľne nízky.



Obr. č. 27 Schéma zapojenia prevodníka AD7719

Presnosť samotného prevodníka je závislá od presnosti a stability pripojeného referenčného napätia medzi piny REF1(-) a REF1(+). Relatívne presné referenčné napätie 2,5 V je zabezpečené obvodom AD780 zapojeného podľa katalógového listu [12]. Použitá referencia dosahuje presnosť  $\pm$ 5 mV. Kondenzátor C<sub>9</sub> slúži ako ochrana proti vysokofrekvenčnému rušeniu.

Teplotné snímače PT1000A a PT1000B sú pripojené na hlavný kanál prevodníku MAIN pomocou prepínania vstupov AIN<sub>1</sub>, AIN<sub>2</sub> a AIN<sub>3</sub>, AIN<sub>4</sub>. Podľa odporúčaní výrobcu by záporný pól analógového vstupu nemal byť na rovnakom potenciály ako GND. Doporučený napäťový zdvih je daný vzťahom AGND + 100 mV.

Z jednoduchej aplikácie ohmovho zákona je možné vypočítať hodnoty rezistorov  $R_3$  a  $R_4$  a to nasledovne:

$$R_{3,4} = \frac{U}{I_{EXC}} = \frac{100 \text{ mV}}{200 \text{ } \mu\text{A}} = 500 \text{ } \Omega. \quad (4.2)$$

Keďže napájacie napätie je limitované 5 V, tak ani prúdové zdroje nemôžu dodávať prúd do nekonečne veľkej záťaže. Preto je nutné voliť odpory  $R_1$  a  $R_2$  v takých medziach, aby na záťaži prúdového zdroja nevznikol väčší úbytok napätia ako 3 V ( $U_c < 3 \text{ V}$ ). Voľba odporu  $12 \text{ k}\Omega$  túto požiadavku splňuje na základe rovnice

$$U_c = U_{R1} + U_{R4} = (R_1 + R_2) \cdot I_{EXC} = 13 \text{ k}\Omega \cdot 200 \text{ } \mu\text{A} = 2,7 \text{ V}. \quad (4.3)$$

Kondenzátory  $C_6$  a  $C_7$  majú za úlohu odstrániť prípadné vyššie harmonické zložky. Funkcia kondenzátorov  $C_{10}$  až  $C_{13}$  je zabrániť prípadným výkyvom spôsobených rušením na vstupoch prevodníka. Voliť ich hodnotu je vhodné voliť podľa charakteru rušenia. Pre všeobecné použitie je vhodná hodnota 10 až 100 nF.

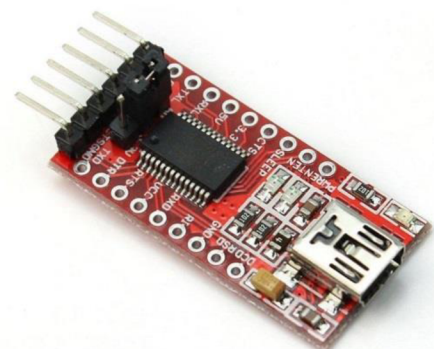
Základné parametre prevodníka AD7719 sú zhrnuté v tabuľke nižšie.

Tabuľka 4 Parametre prevodníka AD7719 [12]

Vlastnosť	Hodnota
Typ	Sigma-Delta
Napájacie napätie	3 V alebo 5 V
Počet bitov	24/16 bit
Počet prevodníkov	2
Počet analógových vstupov	6
Spotreba	1,5 mA
Čas potrebný k zapnutí	300 ms

#### 4.2.4 USB-UART komunikácia

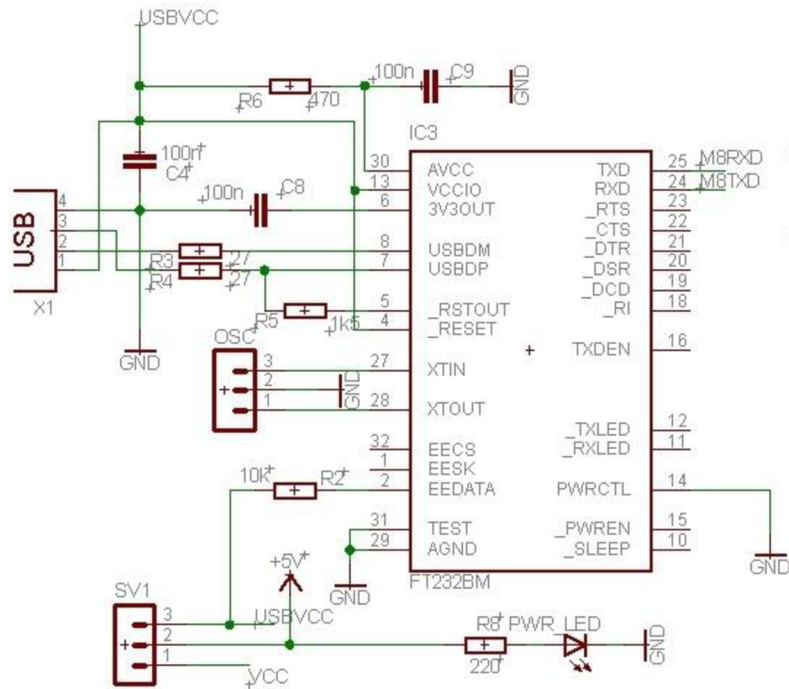
Namerané a vyhodnotené dáta je potrebné odoslať do PC k ďalšiemu spracovaniu. K tomu je možné využiť sériovú komunikáciu implementovanú do mikroprocesoru ATmega328p. Sériová komunikácia funguje na princípe UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) obsahujúca dva základné vodiče TX (*Transmit*) a RX (*Receive*). Kvôli univerzálnosti je vhodné dáta odosielať v takom formáte, aby pripojený diferenciálny teplomer bol jednoducho rozpoznávaný väčšinou zaradení. Zbernica USB (*Universal Serial Bus*) je najvhodnejšou variantou. Čip FT232RL splňuje zadané požiadavky a je priamo kompatibilný s mikroprocesorom ATmega328p. Zariadenie umožňuje komunikáciu v oboch smeroch. Navyššia možná prenosová rýchlosť je



Obr. č. 28 FTDI modul [16]

Čip FT232RL splňuje zadané požiadavky a je priamo kompatibilný s mikroprocesorom ATmega328p. Zariadenie umožňuje komunikáciu v oboch smeroch. Navyššia možná prenosová rýchlosť je

115200 baud/s. Zariadenie je kompatibilné s dvoma režimami napájacieho napätia, 5 a 3 V, ktoré je možné si zvoliť pomocou prepójky SV1.



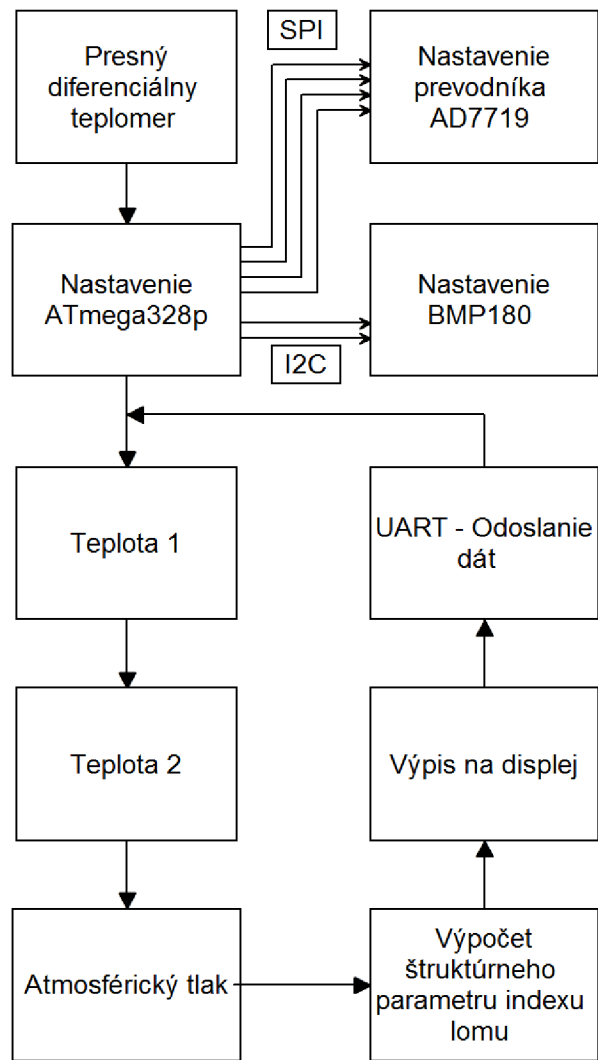
Obr. č. 29 Schéma zapojenia FTDI zariadenia (prevzaté z [16])

Obvod je možné zakúpiť už ako skonštruovaný samostatný modul. Po pripojení zariadenia do PC s operačným systémom Windows XP SP3 a vyšším, je ovládač automaticky nainštalovaný a zariadenie je pripravené na komunikáciu. Formát a princíp komunikácie je bližšie popísaný v podkapitole č. 4.3.

### 4.3 Softvérový návrh zariadenia

Podstatnou súčasťou návrhu je aj programová obsluha jednotlivých častí zariadenia. V tejto podkapitole je popísaný samotný softvérový návrh presného diferenciálneho teplomera spolu s algoritmickým postupom určovania štruktúrneho parametru indexu lomu. Meranie je automatizované s pomocou mikrokontroléra, ktorý je naprogramovaný v programovacom jazyku C, pod platformou arduino. K napaľovaniu programu do pamäte mikroprocesora je použitý modul s názvom USBasp s integrovaným mikroprocesorom ATmega8 pripojiteľným pomocou zbernice SPI. Samotnú algoritmizáciu je možné rozdeliť do základných blokov uvedených na obr. č. 30. Jednotlivé bloky predstavujú samostatné funkcie programu. Meranie teplôt, tlaku, výpočet hodnôt, výpis aj odosielanie dát beží v nekonečnej slučke. Nastavenie a inicializácia zariadení sa vykoná iba jedenkrát pri štarte programu. V realizácii sa pre komunikáciu využívajú zbernice SPI, I2C a UART.

K zobrazovaniu okamžitých hodnôt slúži LCD displej. Nastavenia samotných zariadení sú popísané v nasledujúcich podkapitolách. Taktovacia frekvencia mikroprocesora je nastavená pomocou externého oscilátora na hodnotu 16.0Mhz. V prípade využitia sériovej komunikácie je napájacie napätie zabezpečené pomocou USB konektoru.



Obr. č. 30 Bloková schéma obslužného programu

### 4.3.1 Nastavenie prevodníka AD7719

Pre správnu funkciu zariadenia je nutné prevodník AD7719 nastaviť do správneho pracovného režimu vyhovujúceho danej aplikácii. Nastavovanie aj komunikácia prebieha pomocou zbernice SPI. K samotnej komunikácii sa využíva

CR7	CR6	CR5	CR4	CR3	CR2	CR1	CR0
WEN (0)	R/W (0)	0 (0)	0 (0)	A3 (0)	A2 (0)	A1 (0)	A0 (0)

Obr. č. 31 Obsah komunikačného registru (prevzaté z [12])

implementovaná knižnica „SPI.h“. K inicializácii komunikácie je nutné nastaviť určité pravidlá komunikácie pomocou nasledovných príkazov.

```
SPI.begin();
SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
SPI.setDataMode(SPI_MODE0);
```

K sprístupneniu prevodníka je nutné nastaviť logickú 0 na pin CS, ktorý je pripojený k portu B a na pine č .2 mikroprocesoru. To je možné dosiahnuť použitím jednoduchého príkazu DDRB (*Data Direction Register*) a PORTB (*Port B Data Register*).

```
DDRB = 0b11111111; PORTB = 0b00000100;
```

Príkaz DDRB nastaví celý port B ako výstupný a PORTB nastaví logickú úroveň na pin č.2. K ukončeniu komunikácie je možné nastaviť na pin CS logickú úroveň 1. K vysielaniu dát pomocou SPI je možné využiť príkaz `SPI.transfer()`, ktorý vyšle zadané 8bitové číslo na zbernicu SPI. Všetka komunikácia s prevodníkom prebieha pomocou komunikačného registru (ďalej len KR). Obsah komunikačného registru je uvedený na obr. č. 30. Bit WEN musí byť v log. 0, aby bolo možné zapisovať

Tabuľka 5 Prehľadná tabuľka registrov (prevzaté z [12])

A3	A2	A1	A0	Register
0	0	0	0	Communications Register during a Write Operation
0	0	0	0	Status Register during a Read Operation
0	0	0	1	Mode Register
0	0	1	0	Main ADC Control Register (AD0CON)
0	0	1	1	Aux ADC Control Register (AD1CON)
0	1	0	0	Filter Register
0	1	0	1	Main ADC Data Register
0	1	1	0	Aux ADC Data Register
0	1	1	1	I/O Control Register
1	0	0	0	Main ADC Offset Calibration Register
1	0	0	1	Aux ADC Offset Calibration Register
1	0	1	0	Main ADC Gain Calibration Register
1	0	1	1	Aux ADC Gain Calibration Register
1	1	0	0	Test 1 Register
1	1	0	1	Test 2 Register
1	1	1	0	Undefined
1	1	1	1	ID Register



do KR. Bit R/W obsahuje informáciu, či nasledujúca operácia bude čítanie (log. 1) alebo zápis (log. 0) z daného registru. CR5 a CR4 musia byť v log. 0 pre správnu operáciu prevodníka. Na základe kombinácie bitov CR0 až CR3 v KR sa určujú registre, s ktorými bude komunikácia nadviazaná, podľa tabuľky 5. Základné nastavenie registrov prevodníka je uvedené nižšie.

```
SPI.transfer(0b00000111); // nasledujúca operácia bude zápis do I/O reg.  
DATA16=0b0000001100000000; // hodnota nastavenia  
    data = highByte(DATA16);  
SPI.transfer(data);  
    data = lowByte(DATA16);  
SPI.transfer(data);  
SPI.transfer(0b00000100); // nasledujúca operácia bude zápis do Filter reg.  
SPI.transfer(0b00001101); // hodnota nastavenia  
SPI.transfer(0b00000001); // nasledujúca operácia bude zápis do MODE reg.  
SPI.transfer(0b00000011); // hodnota nastavenia  
SPI.transfer(0b00000010); // nasledujúca operácia bude zápis do ADC reg.  
SPI.transfer(0b11011100); // hodnota nastavenia  
SPI.transfer(0b00000011); // nasledujúca operácia bude zápis do AUX reg.  
SPI.transfer(0b00000000); // hodnota nastavenia
```

Pomocou nastavení je možné napríklad ovládať prúdové zdroje, nastaviť presnosť prevodníka, ovládať multiplexované vstupy, nastaviť rozsah vstupných napätí alebo vykonať kalibráciu. Presný popis daných registrov a ich funkcie je uvedený v katalógovom liste.

Funkcia `getADCvalue()` využitá v programe diferenciálneho teplomera vracia priamo hodnotu v dátovom type `float`. K samotnému načítaniu hodnoty z prevodníka slúži `MAIN ADC DATA` register, v ktorom je vždy uložená najaktuálnejšia hodnota prevodu v tvare 16bitového registra. Hodnota prevodu je uložená v premennej `ADCvalue`.

```
SPI.transfer(0b01000101); // nasledujúca operácia bude čítanie z DATA reg.  
data=SPI.transfer(0); // prvých 8bitov z 16 bitového reg.  
data1=SPI.transfer(0); // posledných 8bitov z 16 bitového reg.  
ADCvalue= data << 8; // bitový posun o 8 pozícií  
ADCvalue= ADCvalue | data1; // bitová logická operácia OR
```

K hlavnému prevodníku `MAIN` sú pripájané snímače teploty striedavo. Čas potrebný na prepnutie vstupov hlavného prevodníka nie je nulový. K uskutočneniu bezpečného a bezchybného prevodu a získania správnych hodnôt je potrebné uskutočniť skenovanie logickej hodnoty na pine `RDY`. Log. úroveň 0 prítomná na tomto pine indikuje stav korektne dokončeného A/D prevodu. Z uvedeného vyplýva, že odozva zariadenia presného diferenčného teplomera nebude závislá iba od rýchlosti odozvy teplotných

snímačov ale aj od rýchlosti prepínania vstupov, resp. od jednotlivých časov potrebných na prevod. Časová konštanta teplotných snímačov je však niekoľko násobne väčšia ako čas merania zmeny teploty, preto oneskorenie spôsobené prevodom je možné považovať za zanedbateľné.

#### 4.3.2 Výpočet štruktúrneho parametru indexu lomu

Výpočet všetkých parametrov prebieha v rámci programu za pomoci mikroprocesoru. Po načítaní hodnôt z prevodníku je nutné tieto zmerané hodnoty prepočítať na napätie pomocou vzťahu

$$U = ADCvalue * \frac{Range}{2^n - 1}, \quad (4.4)$$

kde premenná *Range* je daná zvoleným rozsahom vstupných napätí prevodníka. Premenná *n* vyjadruje počet bitov použitého prevodníka. Presnosť prevodníka s rozlíšením 16bitov dostatočne vyhovuje meraniu. Čoho dôkazom 65536 kvantovacích hladín, čo zodpovedá schopnosti prevodníka pri zvolenom rozsahu +320 mV reagovať na zmenu napätia o veľkosti 4,88 μV.

Po zistení napätia je možné vypočítať odpor snímača vďaka znalosti veľkosti pretekajúceho prúdu generovaného prúdovými zdrojmi prevodníku a pomocou jednoduchej aplikácie ohmového zákona. Odpor snímača je daný rovnicou

$$R_n = \frac{U_n}{IEXC_n}, \quad (4.5)$$

kde *n* reprezentuje konkrétny teplotný snímač a jemu príslušný prúdový zdroj.

Zo znalosti odporu snímača je pomocou rovnice 3.5, ktorá vyjadruje závislosť odporu snímača na teplote, možné odvodiť snímanú teplotu. Teplota je daná podľa nasledovného vzťahu

$$T_n = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_n}{1000}\right)}}{2B}, \quad (4.6)$$

kde *A, B* sú konštanty platinového odporového snímača uvedené v kapitole 3.1. Hodnotu atmosférického tlaku je možné jednoducho zistiť pomocou funkcie `P=getPressure()`; za predpokladu implementovania knižnice „BMP180.h“. Aktuálna hodnota je uložená v premennej *P* v jednotkách hPa. Zo získaných parametrov je možné vypočítať hodnotu indexu lomu v danom bode podľa rovnice 1.7. Na základe do teraz získaných hodnôt je možné určiť samotnú hodnotu štruktúrneho parametru indexu lomu na základe vzťahu 2.1.

Rýchlosť snímania dát je závislá od rýchlosti spracovania príkazov mikroprocesorom. Optimalizáciou je možné docieľiť vyhodnocovanie a zobrazovanie dát s rýchlosťou 10-krát za sekundu. V prípade použitia rýchlejšieho systému by bolo

možné súbor nameraných hodnôt priemerovať. Samotná doba odozvy nie je závislá však len od rýchlosti mikroprocesora, ale aj od časovej konštanty použitých snímačov a od doby trvania prevodu A/D prevodníka.

### 4.3.3 Sériová komunikácia

Namerané a vypočítané dáta je možné poslať do PC pomocou sériovej komunikácie a pomocou modulu FTDI232 popísaného v podkapitole 4.2.4. V programovej časti sa k sériovej komunikácii používa príkaz `Serial.println()`. Do PC sú zasielané 4 hodnoty: teplota 1, teplota 2, atmosférický tlak a  $C_n^2$ . Dáta sú ďalej vyhodnocované programom Matlab 2014b, ktorý obsahuje potrebné príkazy k inicializácii komunikácie. Prostredníctvom vykreslenia grafov je možné sledovať aktuálne hodnoty, tlaku, štruktúrneho parametru indexu lomu a ich závislosti na čase. Namerané dáta v programe Matlab sú uložené v podobe jednorozmerných polí, čo umožňuje prípadnú jednoduchú manipuláciu s dátami. Príklad využitia inicializácie komunikácie a využitia príkazov pre získanie teploty T1 zo sériového portu č. 6 v prostredí Matlab je uvedený nižšie.

```
comPort = 'COM6'; %komunikačný port
communication= serial(comPort); %funkcia na vytvorenie
objektu "communication"

set(comunication, 'DataBits', 8); %nastavenie parametrov
set(comunication, 'StopBits', 1);
set(comunication, 'BaudRate', 115200);
set(comunication, 'Parity', 'none');

fopen(comunication); %otvorenie komunikácie
T1=fscanf(comunication, '%g'); %načítanie hodnôt zo
sériového portu do T1
```

Pri komunikácii sa predpokladá zadefinovanie rovnakých parametrov sériového prenosu na strane mikroprocesora. Prenosová rýchlosť je nastavená na najvyššiu dostupnú hodnotu 115200 baudov za sekundu.

Zariadenie je schopné funkčnosti aj bez nutnosti externého počítača vďaka použitému znakovému LCD displeju. Na displeji je možno sledovať aktuálne hodnoty meraných dát. Displej je jednoducho programovateľný s využitím knižnice „LiquidCrystal.h“. Dáta na displeji sú zobrazované s presnosťou na dve desatinné miesta vo formáte uvedenom na obrázku č. 32.

Teplota1	Atmos. tlak
Teplota2	$C_n^2$

Obr. č. 32 Formát zobrazovaných dát na displeji

## 4.4 Návrh (*layout*) zariadenia

Kapitola zahŕňa pravidlá mechanického a elektrického návrhu zariadenia spolu s odôvodnením ich využitia v danej aplikácii.

Účelom správneho a efektívneho *layout-u* (návrhu) je navrhnuť hardvérovú časť zariadenia tak, aby nedochádzalo k narušeniu jeho činnosti alebo nedochádzalo k znehodnocovaniu a skresľovaniu spracovávaných výsledkov. Presný diferenčný teplomer k svojej funkcii vyžaduje zohľadnenie aspektov návrhu za účelom dosiahnutia najvyššej možnej presnosti merania veličín. Kľúčom k správneému návrhu nie je len dodržanie návrhových pravidiel pri dizajne DPS, ale aj pri návrhu mechanickej alebo elektrickej konštrukcie. Niektoré z využitých návrhových pravidiel sú uvedené v katalógových listoch [11] a [12].

### 4.4.1 Návrh DPS

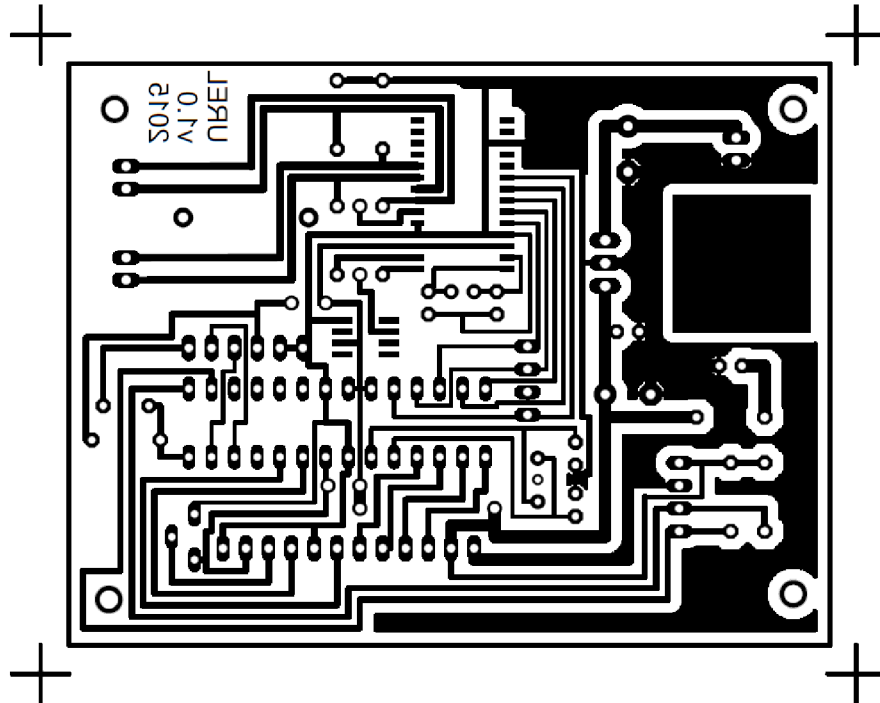
K návrhu dosky plošných spojov bol využívaný program EAGLE 6.4.0. Z dôvodu jednoduchosti a konštrukčných obmedzení je návrh realizovaný len ako jednovrstvový. V prípade možnosti výroby dvojvrstvovej DPS by vrstva TOP slúžila ako elektromagnetické tienenie. DPS je možné rozdeliť na tri základné časti: napájacia časť, mikrokontrolér a analógovo-digitálny prevodník AD7719.

Spolu so vstupným napätím  $V_{IN}$  môžu do aplikácie prenikať rôzne elektromagnetické rušenia, ktoré by mohli viesť k nepresným výsledkom. Preto je nutné aby napájacie vodiče bol navzájom skrútené a na každom konci bol zapojený odrušovací kondenzátor. Odrušovací kondenzátor musí byť zapojený aj na výstupe stabilizátora. Kvôli minimalizácii rušenia zo zdroja je okolo napájacej vetvy pomocou funkcie polygon „rozliata“ vodivá cesta s nulovým potenciálom. Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  slúžia k vyhladeniu napájacieho napätia a k kompenzácií výkyvov napätia.

Mikroprocesor ATmega328p v prevedení P-DIP 28 je pomerne odolný voči vysokofrekvenčnému rušeniu preto je nutné sa skôr zamerať na možné generované rušenie týmto mikroprocesorom. Najväčším zdrojom rušenia je práve zdroj taktovacej frekvencie mikroprocesoru – oscilátor. Jeho umiestnenie na DPS musí byť v čo najväčšej vzdialenosti od citlivých častí zariadenia. Ďalšími možnými zdrojmi rušenia sú vodiče obsluhujúce komunikáciu. Vodiče obsluhujúce LCD displej a snímač atmosférického tlaku sú z tohto dôvodu vedené s čo najväčším odstupom od analógových častí zariadenia.

Najcitlivejšou časťou zariadenia na elektromagnetické rušenie je práve analógovo-digitálny prevodník AD7719 v prevedení SOIC-28. Rušenie v tejto časti môže spôsobiť kolísanie vstupných hodnôt na analógových vstupoch alebo kolísanie referenčného napätia. V najhoršom prípade môže nedodržanie doporučených návrhových pravidiel viesť k nestabilite celého prevodníka. Piny AGND a DGND prevodníka sú prepojené už v rámci substrátu. Ich opätovné spojenie mimo bezprostrednej blízkosti môže viesť k vytvoreniu zemniacích slučiek resp.

ku generovaniu rušenia. Ich spojenie je preto realizované priamym spojením susedných pinov. Výstupy PWRGND a AGND sú prepojené. Podľa návrhových pravidiel musia byť pripojené do miesta s nulovým potenciálom. Požiadavka je splnená voľbou čo najmenšej dĺžky pripojenia pinov k potenciálu GND. K minimalizácii rušenia nie je



Obr. č. 33 Návrh DPS

doporučené viesť komunikačné vodiče pod integrovaným obvodom, ale tento priestor využiť na odrušenie pomocou GND. Napájacie vodiče by mali byť dostatočne široké k poskytnutiu nízko odporovej cesty za účelom zredukovania prípadných napätových špičiek. Dostatočná vodivosť je zabezpečená osadením relatívne hrubých prepajok a pocínovaním napájacej cesty. Analógové vstupy musia byť ošetrené pomocou odrušovacích kondenzátorov. Pre najväčšiu účinnosť odrušenia by mali byť umiestnené čo najbližšie k analógovým vstupom prevodníka. Keďže negatívne analógové vstupy prevodníka disponujú napätovým zdvihom o 100 mV je nutné odrušiť oba vstupy s odrušovacím kondenzátorom o hodnote 10 až 100 nF, prepojujúcim daný vstup s nulovým potenciálom. Kondenzátory nie sú na ilustrovanom návrhu zobrazené. V zariadení sú však podľa doporučení pripojené priamo na vstupné piny.

#### 4.4.2 Mechanická konštrukcia

Konštrukcia zariadenia môže ovplyvňovať správnu funkciu diferenciálneho teplomera. Pri návrhu boli rešpektované základné návrhové pravidlá za účelom zníženia nepresností merania. Teplotné snímače sú pripojiteľné pomocou konektorov „cinch“, ktoré sú pozlátené, za účelom minimalizácie prechodového odporu. Zadný panel ďalej obsahuje konektor vstupného napätia  $V_{IN}$ , vypínač a výstup sériovej komunikácie v podobe USB konektoru typu B. Všetky analógové káblové rozvody sú realizované pomocou tienených káblov v čo najväčšej vzdialenosti od digitálnych častí zariadenia.

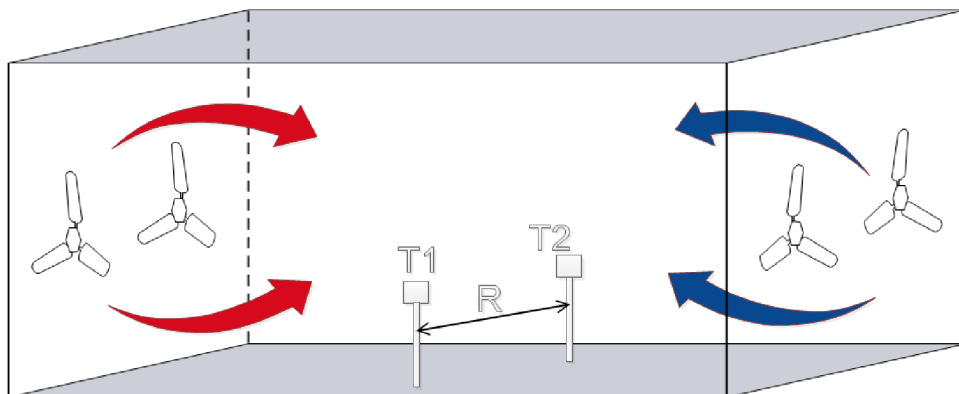
## 5 Meranie štruktúrneho parametru indexu lomu

V tejto kapitole bakalárskej práce sú uvedené výsledky a komentáre praktického merania uskutočneného pomocou presného diferenciálneho teplomera. Kapitola sa skladá z dvoch častí, z laboratórneho merania umelo vytvorených optických turbulencií a z merania štruktúrneho parametru indexu lomu v atmosfére.

Pred uskutočnením akéhokoľvek merania je nutné vykonať kalibráciu platinových teplotných snímačov. Jednou z možností je kalibrácia na teplotu 0 °C. Teplotné snímače sú vystavené teplote ľadovej triešti ponorenej do destilovanej vody. Po ustálení sústavy je možno nameranú teplotu považovať za referenčnú. Teplotné snímače nie sú konštruované na kvapalné prostredie, preto je nutné zabezpečiť oddelenie kvapaliny od snímača.

### 5.1 Meranie turbulentného prostredia

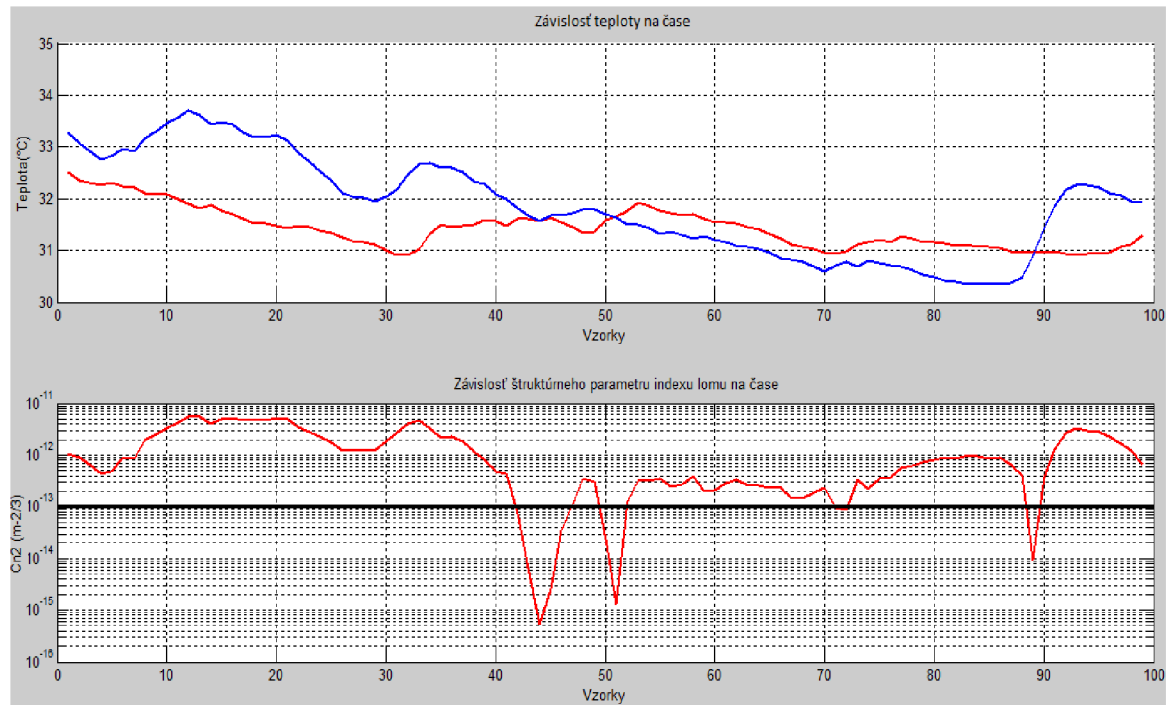
Intenzívne optické turbulencie je možno generovať pomocou jednoduchého usporiadania meracieho pracoviska. Meracia komora kvádrového tvaru s rozmermi 0,6x0,45x0,45m s otvorenými bočnými stenami obsahuje zdroje chladného a teplého vzduchu. Ako zdroj teplého vzduchu bola využitá ohrevná špirála s ventilátorom. Zdrojom chladnejšieho prúdu je vzduch okolitého prostredia, podporovaný núteným obehom v podobe ventilátorov. Teplotné snímače  $T_1$  a  $T_2$  sú umiestnené v strede komory (v mieste najintenzívnejšieho zmiešavania vzduchu) v konštantnej vzdialenosti od seba  $R=0,25$  m.



Obr. č. 34 Topológia meracieho pracoviska turbulentného prostredia

Fluktuácie diferencie meranej teploty sú zobrazené na grafe obr. č. 35. V závislosti štruktúrneho parametru indexu lomu na čase je možné pozorovať značnú závislosť na diferencii teplôt  $T_1$  a  $T_2$ , čo vyplýva aj z grafu uvedeného v kapitole 2 na obr. č. 6. V čase najväčšej diferencie dosahovala intenzita turbulencií hodnotu rádovo  $10^{-12}$  až  $10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$ , čo je možné považovať za veľmi silné optické turbulencie. V čase, kedy diferencia teplôt nadobúda hodnotu blízku nule je možné pozorovať prepad charakteristiky resp. nízku intenzitu optických turbulencií. Rýchlosť vzorkovania

prevodníku nadobúda hodnotu 10x za sekundu z čoho vyplýva, že uvedený graf zodpovedá časovému úseku približne 10 s. Hodnota atmosférického tlaku okolia v čase merania nadobúdala hodnotu 976,6 hPa. Fluktuácia hodnoty relatívnej vlhkosti bola počas merania považovaná za nulovú.



Obr. č. 35 Meranie intenzívnych optických turbulencií

## 5.2 Meranie atmosférických turbulencií

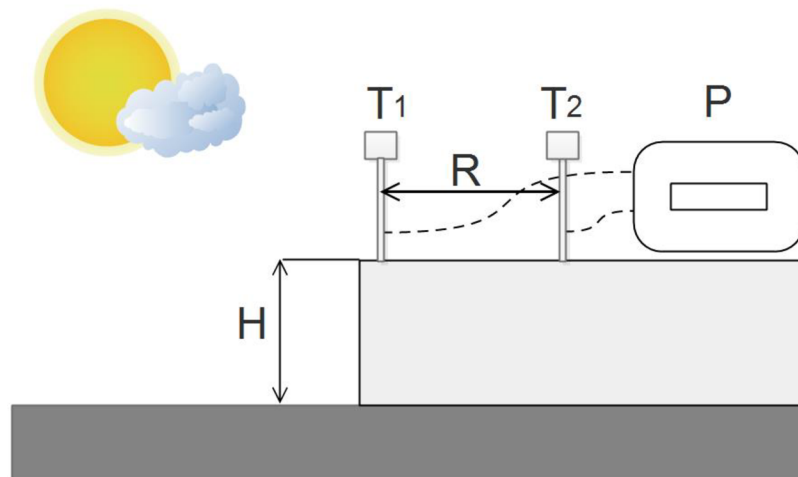
Teoretický popis atmosférických optických turbulencií je uvedený v kapitole 1. Fluktuácie parametrov atmosféry majú za následok kolísanie indexu lomu v rôznych častiach priestoru. Výsledok takýchto procesov vedie k nezanedbateľným zmenám optických vlastností prenosového prostredia. Štruktúrny parameter index lomu mení svoju veľkosť počas dňa na základe určitej periodicity. Podľa teoretických poznatkov Andrewsa v jeho publikácii *Field Guide to Atmospheric Optics* [1] štruktúrny parameter nadobúda maximum v popoludňajších hodinách (maximálna intenzita slnečného žiarenia). Minimum naopak nadobúda v raňajších a večerných hodinách. Fluktuácie v krátkych časových intervaloch môžu byť spôsobené aj lokálnou oblačnosťou na základe zmien slnečného žiarenia. Hodnoty štruktúrneho parametru indexu lomu sa v priebehu dní periodicky opakujú, s závislosťou na aktuálnom stave oblačnosti, vlhkosti a teploty prostredia. Aktuálny stav počasia má nezanedbateľný vplyv na meranie optických turbulencií a je ho nutné pri meraní atmosférického prostredia brať do úvahy.

Grafická závislosť štruktúrneho parametru indexu lomu počas dňa bola meraná v nadmorskej výške 310 m. n. m. a vo výške 10 m nad zemským povrchom. Parametre atmosférického prostredia počas merania sú prehľadne zhrnuté v tabuľke 6.

Tabuľka 6 Parametre atmosférického prostredia v čase merania [17]

Parameter	Hodnota
Vlhkosť	68 %
Smer vetra	Severovýchod
Rýchlosť vetra	8 m/s (medzi 8. až 20. hodinou 24.5.2015) 2 m/s (mimo 8. až 20. hodiny 24.5.2015)
Oblačnosť	45 %
Zrážky	0 mm

Usporiadanie meracieho systému je zobrazené na obrázku nižšie, kde  $T_1$  a  $T_2$  sú merané teploty vzdialené o  $R=1\text{m}$ ,  $P$  znázorňuje meranie atmosférického tlaku a  $H$  je výška nad zemským povrchom.

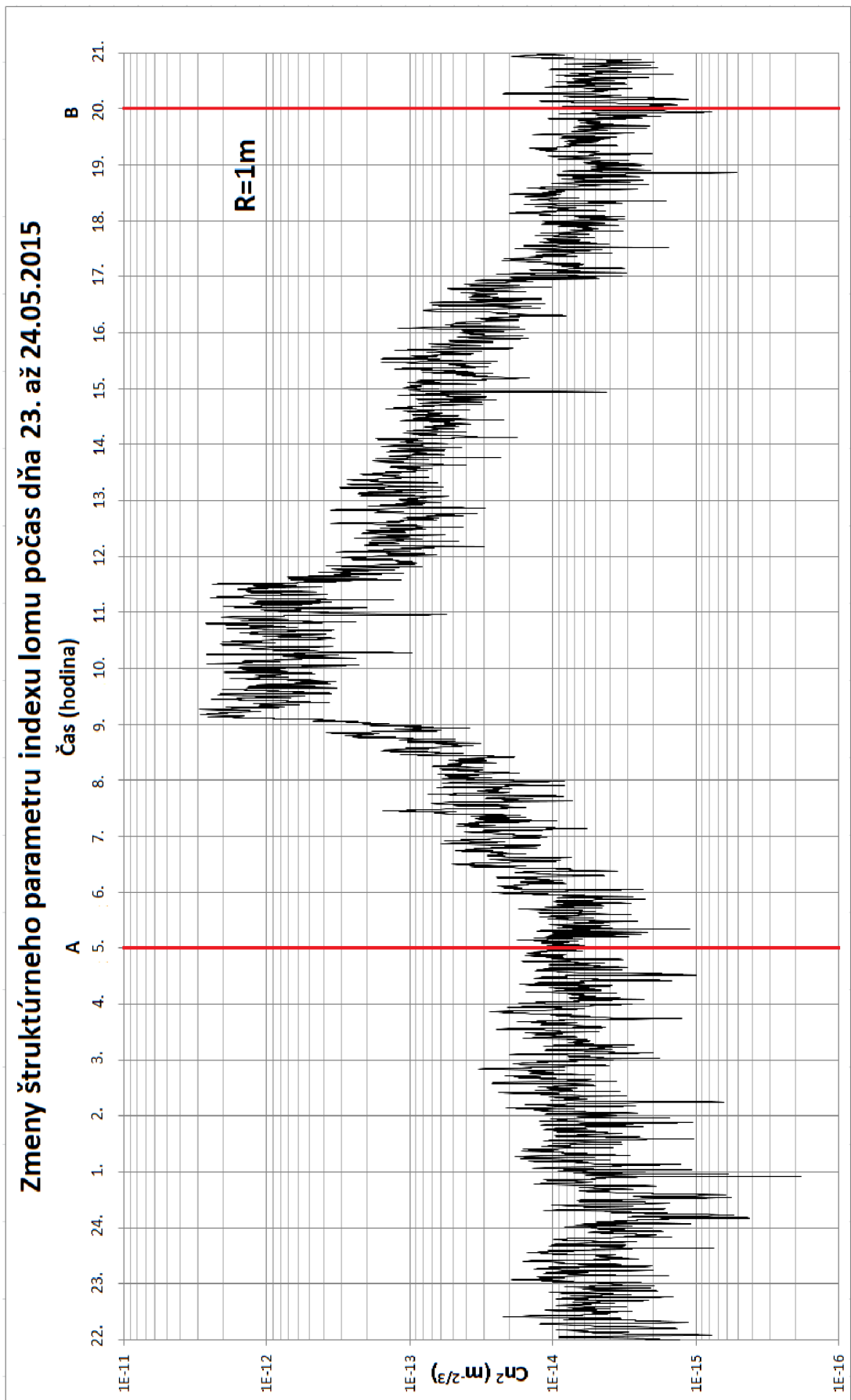


Obr. č. 36 Topológia meracieho pracoviska pre meranie atmosférických turbulencií

Priamka A a B v obrázku č. 37 znázorňuje čas východu a západu slnka. Po východe slnka dochádza k značnému ohrevu vzduchu na základe čoho vznikajú turbulentné výry (optické turbulencie), ktoré nadobúdajú maximálnu hodnotu  $C_n^2$  približne  $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$  v čase 9:30 až 11:30. Minimálnu hodnotu približne  $C_n^2=10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  nadobúda atmosféra po západe slnka, medzi 20. až 5. hodinou. Namerané hodnoty korešpondujú s teoretickými poznatkami uvedenými v kapitole 1.

Meracie zariadenie presného diferenciálneho teplomera je schopné zaznamenávať výsledky  $C_n^2$  väčšie ako  $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$  z čoho vyplýva, že presnosť a rozlíšiteľnosť zariadenia sú dostačujúce na meranie optických turbulencií v atmosfére.





Obr. č. 37 Meranie štruktúrneho parametru indexu lomu počas dňa

# ZÁVER

V prvej kapitole bakalárskej práce sú popísané vlastnosti zemskej atmosféry a jej vplyvy na optickú vlnu spolu s teoretickým základom optických turbulencií. Nasledujúca kapitola popisuje teoretický princíp merania a posudzovania štruktúrneho parametru indexu lomu. V nasledujúcej časti sú uvedené základné typy teplotných snímačov a ich princíp činnosti. V 4. kapitole sú zhrnuté praktické a teoretické poznatky v takom chronologickom poradí, v akom aj autor tejto bakalárskej práce postupoval pri realizácii zariadenia. V poslednej kapitole sú uvedené výsledky merania turbulentných prostredí spolu s posúdením dosiahnutých parametrov presného diferenciálneho teplomera.

V rámci vypracovania bakalárskej práce bolo skonštruované zariadenie presného diferenciálneho teplomera s presnosťou merania  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zvolený platínový snímač kladie vysoké nároky na prevodník spojitej veličiny na diskretnú. Zariadenie obsahuje 24bitový analógovo-digitálny prevodník, znakový displej a modul schopný komunikácie s PC. Na základe spracovania údajov v PC, v programe *Matlab*, je možné sledovať zmeny jednotlivých parametrov v závislosti na čase. Spracované dáta je možné sledovať s obnovovacou frekvenciou  $5\text{ Hz}$ . Prístroj je možné využiť aj na meranie dlhých časových úsekov vďaka ukladaniu nameraných dát na diskovú jednotku v PC. Mikroprocesor je naprogramovaný v jazyku C s využitím knižníc a platformy *Arduino*. Rozlíšiteľnosť merania teploty po vykonaní kalibrácie na teplotu trojného bodu vody dosahuje  $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vďaka využitiu kvalitných a málo rozmerných platínových snímačov je možné sledovať dynamické zmeny optických turbulencií. Časová konštanta použitých snímačov dosahuje hodnoty  $1,2\text{ s}$ . Zariadenie s aktuálnou konfiguráciou je schopné merať štruktúrny parameter indexu lomu v rozsahu hodnôt väčších ako  $10^{-16}\text{ m}^{-2/3}$ . Hodnoty menšie ako táto hranica nie je možné považovať za relevantné z dôvodu prítomnosti šumu, s normálnym rozdelením pravdepodobnosti výskytu rušivého napätia v analógovej časti zariadenia.

V prípade využitia kvalitnejšieho prevodníka s vyššou rozlíšiteľnosťou a s využitím vysoko akostných filtrov na odstránenie šumu na analógových vstupoch prevodníka je možné dosiahnuť hodnoty rozlíšiteľnosti  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Schopnosť rozlíšiteľnosti zariadenia by zodpovedala štruktúrnemu parametru indexu lomu o hodnote považovanej za hranicu slabých optických turbulencií ( $10^{-17}\text{ m}^{-2/3}$ ).

# POUŽITÁ LITERÚRA

- [1] ANDREWS, Larry C. *Field Guide to Atmospheric Optics*. Florida: University of Central Florida, 2004. ISBN 0-819-53/8-8.
- [2] ČERVENKA, Milan. Elektromagnetické vlny. *Aldebaran bulletin* [online]. AGA, 2004 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_49\\_vln.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_49_vln.html)
- [3] INFINEON TECHNOLOGIES. *Datasheet: KTY-10-16* [online]. 1999. vyd. [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://www.pollin.de/shop/downloads/D180003B.PDF>
- [4] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: Senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005. ISBN 8073001454.
- [5] VISHAY. *Datasheet: 1N4148* [online]. 2001 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: [http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/198441-da-01-en-DIODEN\\_TEMPERATURFUEHLER\\_FS\\_100D.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/198441-da-01-en-DIODEN_TEMPERATURFUEHLER_FS_100D.pdf)
- [6] REDAKCE HW SERVERU. *Měření teploty - kovové odporové senzory teploty* [online]. 2004 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [7] REICHL, J. *Encyklopedie fyziky: Termoelektrické články* [online]. 2009 [cit. 2014-11-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky>
- [8] IST-AG. *DATASHEET: PT1000* [online]. 2012 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/30616.pdf>
- [9] BOSH. *DATASHEET: BMP180* [online]. 2013 [cit. 2014-12-08]. Dostupné z: <http://ae-bst.resource.bosch.com/media/products/dokumente/bmp180/BST-BMP180-DS000-09.pdf>
- [10] *Arduino* [online]. 2014 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/>
- [11] ATMEL. *ATmega328* [online]. 2014 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet.pdf)
- [12] DATASHEET. ANALOG DEVICES. *AD7719* [online]. 2012 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD7719.pdf>
- [13] HERNIGHAN, Brian a Dennis RITCHIE. *Programovací jazyk C*. Banská Bystrica: ALFA, 1989. ISBN 80-05-00154-1
- [14] AD780. ANALOG DEVICES. *DATASHEET* [online]. 2012 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/AD780.pdf>

- [15] Omegaeng: Úvod do termočlánků. [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- [16] FTDI Chip: FT232R USB UART IC. FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LIMITED. *USB-UART* [online]. 2010 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [17] Slovenský hydrometeorologický ústav: model ALADIN. 2015. *Meteogram-Martin* [online]. [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.shmu.sk>
- [18] CADSOFT INC. 2014. *CS EAGLE: Manual version 7* [online]. [cit. 2015-02-19]. Dostupné z: [http://www.cadsoftusa.com/fileadmin/journalist/Documents/manual\\_7.1\\_en.pdf](http://www.cadsoftusa.com/fileadmin/journalist/Documents/manual_7.1_en.pdf)
- [19] MATHWORKS. 2015. *MATLAB: R2015a* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: [https://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](https://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf) [Documents/manual\\_7.1\\_en.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)
- [20] GAMO, Hideya a Arun K. MAJUMDAR. 1978. Atmospheric turbulence for optical transmission experiment: characterization by thermal method. *APPLIED OPTICS*. (23): 8.

## POUŽITÉ ZNAKY, SYMBOLY A SKRATKY

$\varepsilon_0$	permitivita vákua
$\varepsilon_r$	relatívna permitivita
$\mu_0$	permrabilita vákua
$\mu_r$	relatívna permeabilita
$v$	rýchlosť šírenia vlny
$A$	prenos
$\alpha(\lambda)$	extinkčný koeficient
$A_\alpha$	absorpčný koeficient
$S_\alpha$	koeficient disperzie
$M$	rozmer prostredia
$R_e$	Reynoldsovo číslo
$V$	rýchlosť prúdu tekutiny
$l$	rozmer prúdu tekutiny
$a$	kinematická viskozita
$V_1, V_2$	rýchlosť v bodoch
$C_V^2$	rýchlostná štruktúrna konštanta
$\epsilon$	priemerný energetický rozptyl
$D_T(R)$	štruktúrna teplotná funkcia
$T, t$	teplota
$C_T^2$	štruktúrna teplotná konštanta
$l_0$	vnútorný rozmer
$R$	vzdialenosť dvoch bodov
$P$	atmosférický tlak
$L_0$	vonkajší rozmer
$n$	index lomu
$D_n$	štruktúrna funkcia indexu lomu
$C_n^2$	štruktúrny parameter indexu lomu
$R_t$	odpor snímača pri teplote T
$R_0$	odpor senzora pri 0°C
$R_{100}$	odpor senzora pri 100°C
$W_{100}$	redukovaný odpor
$\alpha$	teplotný súčiniteľ odporu
$A, B, C, D$	konštanty
$\Delta E$	šírka medzery medzi energetickými hladinami
$k$	Boltzmanova konštanta
$n$	koncentrácia voľných nosičov náboja
$e$	elementárny náboj $1,602 \cdot 10^{-19}$
$\sigma$	konduktivita
$n_i$	vlastná koncentrácia nosičov náboja
$\mu_n, \mu_p$	pohyblivosť elektrónov a dier
$U_d$	napätie na dióde

$I_d$	prúd prechádzajúci diódou
$I_s$	saturačný prúd
$U_{BE}$	napätie na prechode báza-emitor
$\Delta T$	rozdiel teplôt
MCU	mikroprocesor
OZ	operačný zosilňovač
Pt	platina
IEC	medzinárodná elektrotechnická komisia
DPS	doska plošných spojov
USB	universal serial bus
RTD	resistat temperature sensor
UART	universal asynchronous receiver/transmitter
KR	komunikačný register
GND	nulový potenciál, zem

## OBSAH PRILOŽENÉHO DVD

- A) Bakalárska práca vo formáte pdf.
- B) Kód v jazyku C (*Arduino*).
- C) Kód v jazyku *Matlab* (R2014b).
- D) Predloha DPS vo formáte pdf a brd (*Eagle 6.4.0*).

# PRÍLOHA A - SCHÉMA ZAPOJENIA

46

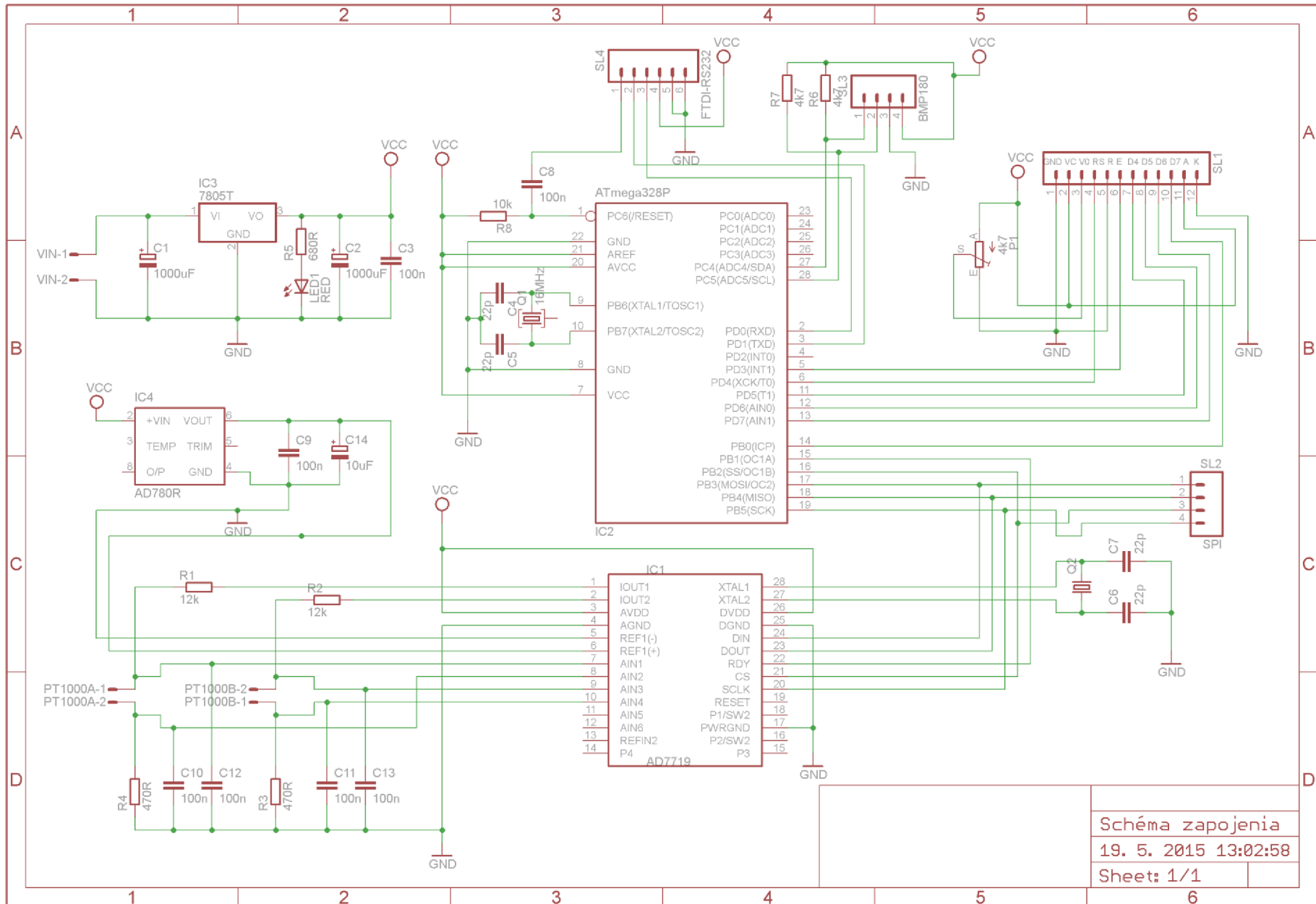


Schéma zapojenia  
 19. 5. 2015 13:02:58  
 Sheet: 1/1

## PRÍLOHA B - ZOZNAM POUŽITÝCH SÚČIASTOK

R1,R2	12 k $\Omega$
R3,R4	470 $\Omega$
R5	680 $\Omega$
R6,R7	4,7 k $\Omega$
R8	10 k $\Omega$
P1	4,7 k $\Omega$
C1,C2	1000 $\mu$ F/16V
C3,C8,C9,C10,C11,C12,C13	100 nF
C4,C5,C6,C7	22 pF
Q1	Oscilátor 16 MHz
Q2	Oscilátor 32 kHz
LED1	Zelená LED
IC1	AD7719 (SSOP-28)
IC2	ATmega328P(DIP-28)
IC3	LM7805T(TO-220)
IC4	AD780R
SL1	Konektor LCD 16x2
SL2	Konektor SPI
SL3	Konektor BMP180
SL4	Konektor FTDI-RS232
V <sub>IN</sub>	Vstupné napätie
V <sub>CC</sub>	Napájacie napätie
GND	ZEM, nulový potenciál



# PRÍLOHA C – Zhotovené zariadenie

Pohľad spredu



Pohľad zozadu

