

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Převodník pro měření teploty s výstupem na proudovou  
smyčku 4-20mA**

Originál (kopie) zadání BP/DP

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh realizaci a popis převodníku pro měření teploty v akustické laboratoři. Práce také zahrnuje popis nejčastěji používaných odporových čidel teploty. Součástí je i porovnání realizovaného převodníku s komerčně prodávaným kalibrovaným přístrojem. Práce zahrnuje naměření převodní charakteristiky převodníku vztažené ke kalibrovanému etalonu.

## **Klíčová slova**

termistor, teplotní stupnice, odporové senzory teploty, polovodičové senzory teploty, etalon, operační zesilovač, proudová smyčka

## **Abstract**

The presented bachelor thesis is focused on the design of the transducer for measuring the temperature in acoustic laboratory. The thesis includes description on resistance based temperature sensors. Another part of the thesis is comparison of the transducer with commercial calibrated device. The thesis also includes measurement of transducer conversion characteristics related to the calibrated standard.

## **Key words**

thermistor, temperature scale, resistance temperature sensors, semiconductor temperature sensors, reference standard, operational amplifier, current loop

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 13.6.2019

Petr Netolický

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Švarnému, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>1 TEPLOTNÍ STUPNICE</b> .....	<b>12</b>
1.1 FAHRENHEITOVA TEPLOTNÍ STUPNICE.....	12
1.2 CELSIOVA TEPLOTNÍ STUPNICE.....	12
1.3 TERMODYNAMICKÁ TEPLOTNÍ STUPNICE.....	13
1.4 STUPNICE ITS – 90.....	14
<b>2 ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty</b> .....	<b>15</b>
2.1 KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY.....	17
2.1.1 Platina.....	19
2.1.2 Nikl.....	20
2.1.3 Měď.....	21
2.2 POLOVODIČOVÉ SENZORY TEPLoty.....	21
2.2.1 Termistory NTC.....	22
2.2.2 Termistory PTC.....	23
2.2.3 Monokrystalické senzory teploty.....	25
<b>3 NÁVRH ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU</b> .....	<b>25</b>
3.1 PROUDOVÁ SMYČKA.....	25
3.2 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	27
3.3 TERMISTOR NTC.....	27
3.3.1 Linearizace pomocí předřadného rezistoru.....	28
3.3.2 Samo-ohřev termistoru.....	29
3.3.3 Výpočet zbývajících rezistorů v můstku.....	30
3.3.4 Zatížení referenčního výstupu.....	31
3.4 VOLBA OPERAČNÍHO ZESILOVAČE.....	31
3.4.1 Návrh zesílení OZ.....	31
3.5 OBVOD XTR 116.....	33
3.5.1 Externí tranzistor.....	36
3.5.2 Zenerova dioda a diodový můstek.....	36
3.5.3 Feritové kuličky a kondenzátor.....	36
<b>4 NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE</b> .....	<b>37</b>
4.1 VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE.....	37
4.2 NÁVRHOVÝ SOFTWARE.....	37
4.3 CHLAZENÍ TRANZISTORU.....	38
4.4 VOLBA TOLERANCE REZISTORŮ.....	38
<b>5 MĚŘENÍ PARAMETRŮ PŘEVODNÍKU</b> .....	<b>39</b>
5.1 NAPÁJENÍ PROUDOVÉ SMYČKY.....	39
5.2 LIMITNÍ PROUDY PROUDOVÉ SMYČKY.....	39
5.3 NAMĚŘENÉ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY.....	40

<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>43</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>44</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>46</b>



## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh převodníku z teploty na proudovou smyčku 4-20mA. Důvodem vzniku převodníku je jeho případné použití pro měření teploty v akustické laboratoři. Kde se předpokládá úzký rozsah měřených teplot.

V první části jsou popsány nejznámější teplotní stupnice a zdůrazněna důležitá úloha platinových teplotních čidel jako referenčních etalonů. V druhé části jsou popsány jednotlivé druhy odporových čidel a jejich základní vlastnosti parametry, případně použití. Následuje návrh vlastního převodníku pro zvolený teplotní rozsah cca  $25 \pm 10$  °C, popis jeho realizace a měření jeho parametrů. Dosažené výsledky jsou shrnuty v závěru této práce.

## Seznam symbolů a zkratk

### Seznam symbolů

P	.....	Tlak plynu [Pa]
V	.....	Objem plynu [ $m^3$ ]
T	.....	Absolutní teplota [K]
$T_c$	.....	Teplota v [ $^{\circ}C$ ]
n	.....	Počet molů plynu
$R_m$	.....	Molární plynová konstanta $R_m = 8,314472 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
$\alpha$	.....	Teplotní součinitel el. Odporu [ $K^{-1}$ ]
$\Delta R$	.....	Rozdíl hodnot el. odporu při daném rozdílu teplot [ $\Omega$ ]
$\Delta T$	.....	Rozdíl teplot [K]
$R_0$	.....	Počáteční el. odpor [ $\Omega$ ]
Q	.....	Joulovo teplo [J]
A	.....	Konstanta [ $^{\circ}C^{-1}$ ]
B	.....	Konstanta [ $^{\circ}C^{-2}$ ]
C	.....	Konstanta [ $^{\circ}C^{-4}$ ]
$T_0$	.....	Teplota [K] při počátečním odporu $R_0$
B	.....	Konstanta teplotního čidla v katalogu výrobce
R	.....	Odpor [ $\Omega$ ]
$R_{ref}$	.....	Referenční hodnota odporu [ $\Omega$ ]
$R_{\theta J-A}$	.....	Tepelný odpor z polovodičového přechodu do vzduchu [ $^{\circ}C/W$ ]
T1	.....	Odpor termistoru [ $\Omega$ ]
$R_{T1 15^{\circ}C}$	.....	Odpor termistoru při 15 $^{\circ}C$ [ $\Omega$ ]
$R_{T1 35^{\circ}C}$	.....	Odpor termistoru při 35 $^{\circ}C$ [ $\Omega$ ]
ppm	.....	„parts per milion“ dílů na jeden milion
G	.....	Zesílení
$\delta_{th}$	.....	Faktor rozptylu výkonu [ $\frac{mW}{K}$ ]

**Seznam zkratek**

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	.....	Oxid hlinitý
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	.....	Oxid železitý
TiO <sub>2</sub>	.....	Oxid titaničitý
CuO	.....	Oxid měďnatý
MnO	.....	Oxid manganatý
Pt100	.....	Platinové čidlo s odporem 100 Ω při teplotě 0 °C
Pt500	.....	Platinové čidlo s odporem 500 Ω při teplotě 0 °C
Pt1000	.....	Platinové čidlo s odporem 1000 Ω při teplotě 0 °C
Ni891	.....	Niklové čidlo s odporem 891 Ω při teplotě 0 °C
NTC	.....	Teplotní čidlo (termistor) se záporným součinitelem odporu
PTC	.....	Teplotní čidlo (termistor) s kladným součinitelem odporu
OZ	.....	Operační zesilovač

# 1 Teplotní stupnice

Během historie se objevilo několik teplotních stupnic. Každá tato stupnice má určité pevné body a stanovený rozsah. Tyto body odpovídají obvykle určitému fyzikálnímu stavu dané látky při dané teplotě. Tímto stavem může být například var vody, tlak par hélia, trojný bod apod. Každá tato stupnice vznikla vzhledem k momentální potřebě měření teploty daných látek, teploty těla apod. Z tohoto důvodu byly i za referenční body zvoleny látky, kde se jejich stav nacházel v potřebném rozsahu měření. Je třeba si uvědomit, že tyto stupnice jsou vždy přesnější blízko těchto referenčních bodů. Čím více se ale od nich vzdalujeme, tím větší je chyba měření. Toto jde samozřejmě eliminovat použitím většího počtu referenčních bodů.

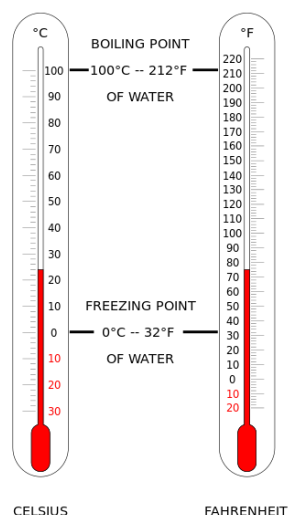
Pro srovnání uvedme několik nejznámějších stupnic.

## 1.1 Fahrenheitova teplotní stupnice

Fahrenheitova byla zavedena se třemi referenční body, kde teplota 0 °F bodu tuhnutí roztoku solí, skládajícího se ze stejných dílů vody, ledu a salmiaku. Teplota 32 °F odpovídá bodu tuhnutí vody a 212 °F odpovídá, teplotě varu vody. Používá se od roku 1724. V dnešní době se používají pouze dva referenční body související se stavem vody podobně jako u Celsiovy stupnice.

## 1.2 Celsiova teplotní stupnice

Celsiova teplotní stupnice je teplotní stupnice, která má také dva referenční body. Teplota 0 °C je definována jako teplota rovnovážného stavu chemicky čisté vody a jejího ledu při tlaku  $1,013\,25 \cdot 10^5$  Pa. Teplota 100 °C je definována jako teplota chemicky čisté vody a její páry při tlaku  $1,013\,25 \cdot 10^5$  Pa. Stupnice je pak mezi těmito dvěma hodnotami rozdělena na sto rovnoměrných dílků [1]. Používá se od roku 1736.



Obrázek 1 Porovnání teplotních stupnic °C a °F [2]

### 1.3 Termodynamická teplotní stupnice

Termodynamická teplotní stupnice je zavedena pomocí stavové rovnice ideálního plynu (1-1).

$$p \cdot V = n \cdot R_m \cdot T \quad (1.3-1)$$

Termodynamická stupnice má dva referenční body a to 0 K. Jedna se o absolutní nulu a teplotu 273,16 K odpovídající trojnému bodu vody (stav kde jsou v rovnováze všechny tři fáze vody). Používá se od roku 1848.

Velikost dílku termodynamické stupnice a Celsiovy stupnice je totožná můžeme tedy uvést vztah pro přepočít.

$$t(^{\circ}C) = T(K) - 273,15 \quad (1.3-2)$$

Pro přepočít na mezi Celsiovou a Fahrenheitovou stupnicí můžeme uvést následující vztah.

$$\vartheta(^{\circ}F) = \frac{9}{5} t(^{\circ}C) + 32 \quad (1.3-3)$$

## 1.4 Stupnice ITS – 90

Vzhledem ke vzrůstající potřebě přesnějšího měření teploty na stále větším rozsahu, začaly během 20. století vznikat mezinárodní stupnice. Dnes se používá verze ITS – 90.

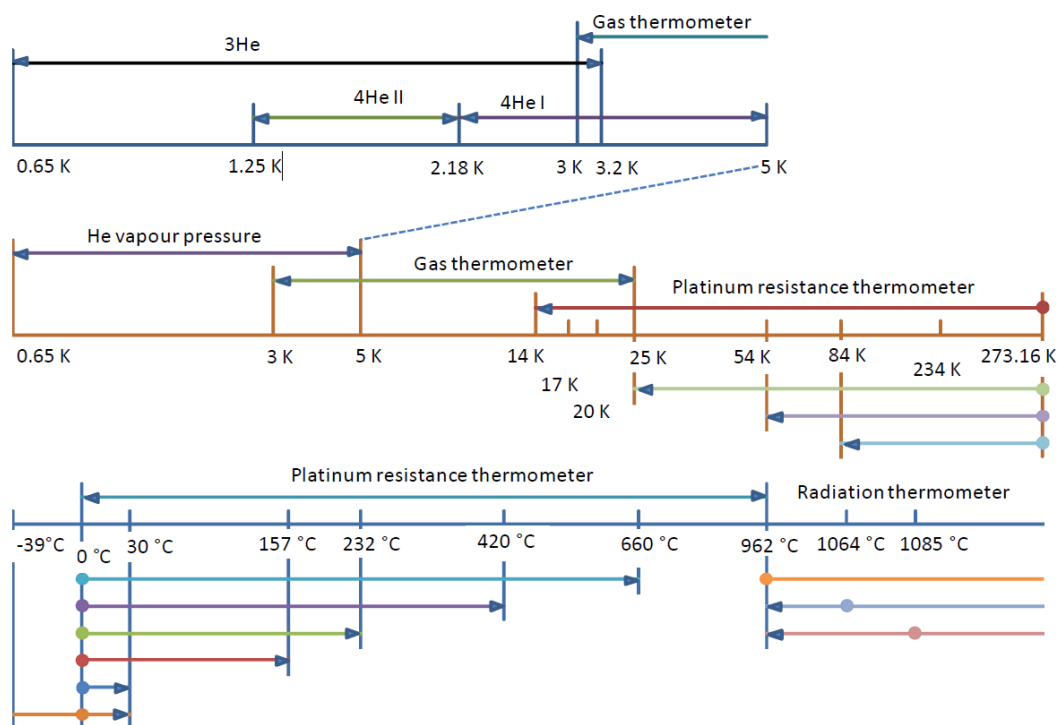
Tato stupnice obsahuje sedmnáct referenčních bodů, pro definování těchto bodů se používají rovnovážné fyzikální stavy mezi fázemi různých chemických prvků a vody. Je nutné mít látky o vysoké chemické čistotě.

Stupnice zároveň definuje teplotu ve stupních Celsia jako:

$$T_c[^\circ\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15 \quad (1.4-1)$$

ITS-90 využívá termodynamickou teplotní stupnici. Používají se čtyři základní rozsahy.

- V rozsahu 0,65 – 5 K se využívá tlaku par helia-3 a helia-4
- V rozsahu 13,8033 – 273,16 K jsou body definovány pomocí trojného bodu vodíku, neonu, kyslíku, argonu, rtuti a vody
- V rozsahu 302,9146 – 1357,77 K se k definování referenčních hodnot používá bod tání galia a dále tuhnutí india, cínu, zinku, hliníku, stříbra, zlata a mědi
- Pro vyšší hodnoty je teplota definována pomocí pevných bodů na základě Planckova vyzařovacího zákona



Obrázek 2 Schéma rozsahů a pod-rozsahů a hlavně interpolačních zařízení použitých v ITS-90 (teploty jsou uvedeny zaokrouhleně). [3]

V obrázku 2 jsou také uvedené jednotlivé kalibrační přístroje, které jsou použité k interpolaci mezi jednotlivými referenčními body teploty. Pro rozsah 14 - 1234,93 K se používá odporový platinový teploměr kalibrovaný v zobrazených bodech. Z toho je zřejmé, že platinový teploměr (jakožto odporové teplotní čidlo) je velmi přesný k měření teplot v daném rozsahu.

## 2 Odporové senzory teploty

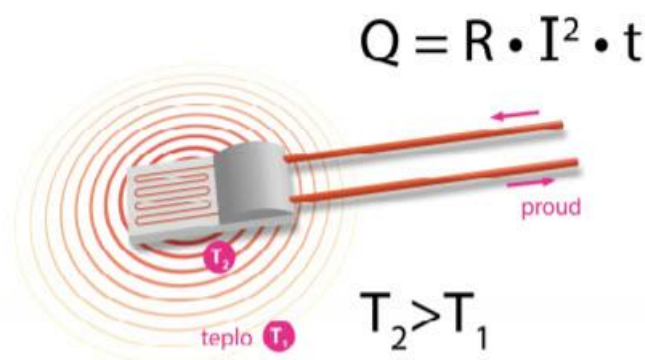
U odporových senzorů teploty se měří elektrický odpor senzoru v závislosti na teplotě. Pokud se vyhneme popisu senzorů pro různé speciální např. vysokoteplotní či kryogenní aplikace jako Cernox [4], Rox 0.01 K- 40 K, CLTS. Pak je můžeme v zásadě rozlišit na kovové senzory a polovodičové senzory (monokrytalické či polykrystalické).

Hlavním požadavkem na použitý materiál senzoru je velký teplotní součinitel odporu a dlouhodobá stálost. V menší míře i linearita (dá se kompenzovat) a pro některé aplikace jeho

cena. Dále pak také samotné provedení senzoru podle výrobce, kde je důležitá odolnost proti vibracím a odolnost vůči okolním podmínkám.

U kovových čidel je změna odporu přímo úměrná. U polovodičových je tomu jinak, závislost může být hyperbolická (NTC), případně pro např. PTC je možno závislost upravit vhodným chemickým složením a vytvořit tak až tři inflexní body s odstupňovanou závislostí teploty a několika skoky.

Jedním ze základních problémů při měření teploty pomocí odporových senzorů je samoohřev způsobený měřicím proudem, kdy na čidle vzniká výkon  $P = I^2 \cdot R$ . Proto se obvykle uvádí maximální hodnota měřicího proudu tak, aby jím způsobená chyba byla maximálně ¼ tolerance čidla. Chyba způsobená samoohřevem se dá snížit vhodnou konstrukcí čidla, případně použitím pulsního měření, kde měřicí proud je aplikován pouze nezbytně nutnou dobu. Mezi jednotlivými odečty teploty je tak čas, aby se vzniklé Joulovo teplo ( $Q = R \cdot I \cdot t^2$ ) rozptýlilo do okolí.



Obrázek 3 Znárodnění samoohřevu teplotního čidla [5]

Při nízkém odporu teplotního čidla (hlavně PT100 apod.) je potřeba uvažovat odpor přívodního kabelu. Jeho odpor může dosahovat jednotek i desítek ohmů a může tedy významně ovlivnit vlastní měřenou hodnotu. Toto se kompenzuje pomocí tří či lépe čtyřvodičového zapojení teplotního čidla. Měřicí převodník pak kompenzuje odpor přívodních kabelů.

V případně použitých čidel s nelineární charakteristikou je potřeba charakteristiku linearizovat a to buď pomocí vhodného např. můstkového zapojení teplotního čidla (a



napájení napětím). Případně pro potřeby přesnějšího měření pomocí číslicového zpracování naměřených hodnot odporu a jejich převedení na teplotu.

Každý typ teplotního senzoru má své pozitivní i negativní vlastnosti a je vždy úkolem konstruktéra zařízení zvolit vhodný typ senzoru.

## 2.1 Kovové odporové senzory

Používají se nejčastěji tři základní kovy a případně jejich slitiny (Tabulka 1).

Materiál	Obvyklý teplotní rozsah	Výhody použití	Základní odpor	Teplotní součinitel odporu(může lišit, záleží na výrobci)
Platina	-260 až 850 °C	Nejlepší stabilita, nejlepší linearita	100, 500, 1000 Ω při 0 °C	0,00385 K <sup>-1</sup>
Nikl	-100 až 260 °C	Vysoká citlivost	100, 1000, 10000 Ω při 0 °C	0,00672 K <sup>-1</sup>
Měď	-200 až 260 °C	nízká cena, součást přístroje(například vinutí apod.)	Např. 120 Ω při 0 °C	0,0043 K <sup>-1</sup>

Tabulka 1 Srovnání jednotlivých kovů nejčastěji používaných pro senzory teploty

Teplotní součinitel elektrického odporu se vypočte pomocí vzorce (2.1-1).

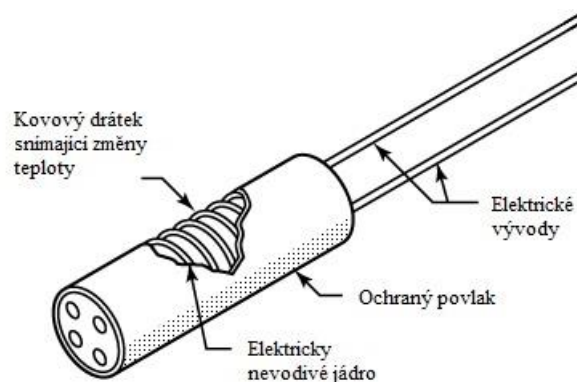
$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta T} \quad (2.1-1)$$

Samotný odpor při dané teplotě pak lze v malém rozsahu teplot (0-100 °C) určit pomocí vzorce (2.1-2). Například u Pt100 tak vznikne chyba max. 0,37 °C [6]. Pro větší rozsahy teplot už tento vztah není přesný a je potřeba použít upravený vztah, který se liší podle výrobce a typu kovu.

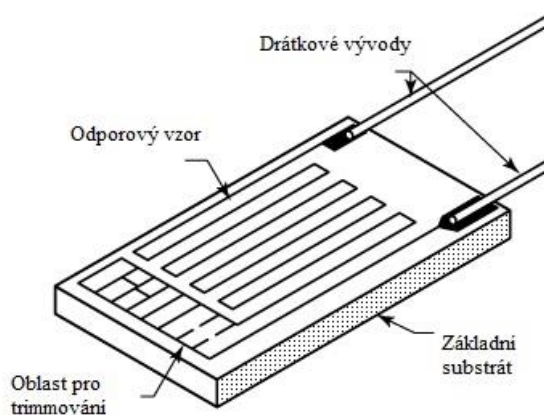
$$R_v = R_0(1 + \alpha \cdot T) \quad (2.1-2)$$

Výsledné provedení čidla bývá realizováno třemi způsoby. A to buď navinutým drátkem (Obrázek 4) nebo pomocí tenkovrstvé či tlustovrstvé technologie na  $Al_2O_3$  substrátě. Velkou výhodou tenkovrstvé technologie (Obrázek 5) je dosažení velkých hodnot odporů na malé ploše a tedy i rychlé odezvy čidla na změnu teploty.

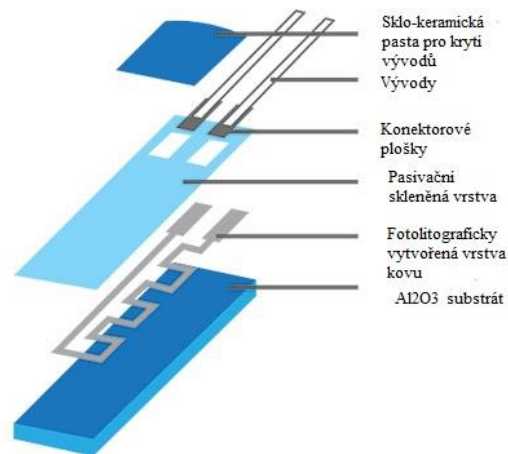
V obou případech musí být zajištěna podobná teplotní délková roztažnost jednotlivých vrstev materiálů.



Obrázek 4 Kovový sensor teploty v provedení navinutým drátkem [7]



Obrázek 5 Teplotní čidlo v provedení tenkovrstvou technologií [7]



Obrázek 6 Jednotlivé vrstvy čidla vyrobeného tenkovrstvou technologií [8]

### 2.1.1 Platina

Dnes je nejčastěji používaný kov k měření teploty platina, vzhledem ke svým vlastnostem. K jeho rozšíření dopomohla výroba čidel pomocí tenkých vrstev na  $Al_2O_3$  podkladu.

Nejčastěji jsou používány čidla typu Pt100, Pt500 a Pt1000. Popisek čidla udává hodnotu odporu při 0 °C.

Jejich hlavní výhodou je při použití tenkovrstvé technologie výroby malá doba odezvy, výborná dlouhodobá teplotní stálost, malé ovlivnění samoohřevem, snadná výměna při poškození čidla (vyrábí se čidla se stejnými parametry), malé rozměry, odolnost k vibracím a teplotním šokům a vysoká spolehlivost.

Teplotní závislost je vyjádřena pro rozsah záporných teplot následujícím vztahem:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T_c + B \cdot T_c^2 + C \cdot (T_c - 100) \cdot T_c^3) \quad (2.1-3)$$

Pro kladné teploty se pak využívá následující vztah:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T_c + B \cdot T_c^2) \quad (2.1-4)$$

Jednotlivé konstanty A, B a C jsou k nalezení katalogu výrobce (Příloha 1).

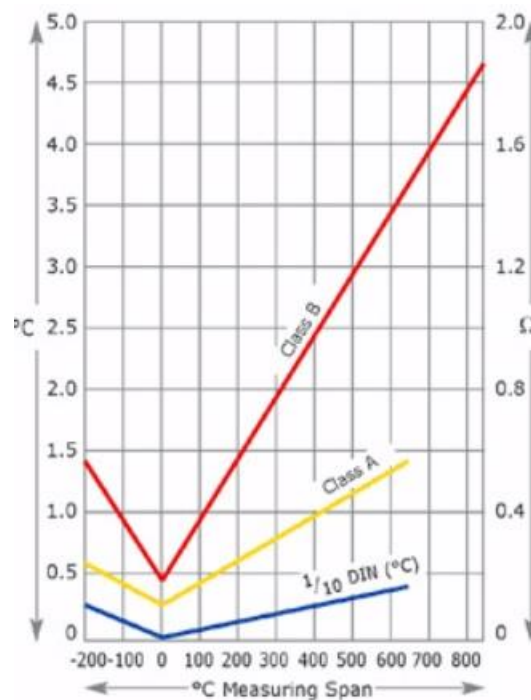
Tolerance a třídy přesnosti platinových čidel jsou popsány v DIN/IEC 60751(ČSN 60751). Uvedeme příklad několika používaných tříd pro Pt100:

*Třída C* =  $\pm(0,6 + 0,01 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C}$  či  $100,00 \pm 0,24 \text{ } \Omega$  při  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  (−50 až  $600 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

*Třída B* =  $\pm(0,3 + 0,005 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C}$  či  $100,00 \pm 0,12 \text{ } \Omega$  při  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  (−50 až  $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

*Třída A* =  $\pm(0,15 + 0,002 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C}$  či  $100,00 \pm 0,06 \text{ } \Omega$  při  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  (−30 až  $350 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

*Třída AA* =  $\pm(0,1 + 0,0017 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C}$  či  $100,00 \pm 0,04 \text{ } \Omega$  při  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$  (0 až  $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



Obrázek 7 Grafické zobrazení tříd přesnosti čidla Pt100 a možných odchylek [9]

### 2.1.2 Nikl

Jeho hlavní nevýhodou je malý teplotní rozsah, kdy při teplotě nad cca  $300 \text{ } ^\circ\text{C}$  je jeho charakteristika značně nelineární.

Teplotní závislost Ni891 [5] je vyjádřena pomocí vzorce:

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot T_c + B \cdot T_c^2 + C \cdot T_c^3) \quad (2.1-5)$$

Vzhledem k vyšší nelinearitě niklu mohou mít různá čidla i od stejného výrobce různé řády polynomu. Uvedený vzorec je příklad, pro konkrétní hodnoty daného senzoru je potřeba vždy hledat v katalogu výrobce.

Tolerance a třídy přesnosti niklových čidel jsou popsány v DIN/IEC 60751(ČSN 60751). Uvedeme příklad dvou používaných tříd pro Ni1000:

$$\text{Třída B} = \pm(0.4 + 0,028 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (-60 až 0 } ^\circ\text{C)}$$

$$\text{Třída B} = \pm(0.4 + 0,007 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (0 až 250 } ^\circ\text{C)}$$

$$\text{Třída A} = \pm(0.2 + 0,014 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (-60 až 0 } ^\circ\text{C)}$$

$$\text{Třída A} = \pm(0.2 + 0,0035 \cdot T_c) \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (0 až 250 } ^\circ\text{C)}$$

### 2.1.3 Měď

Nevýhodou je snadná oxidace mědi při zvýšené teplotě (přes cca 150 °C), proto se měď obvykle používá pro přímé měření teploty vinutí v motorech, generátorech apod., případně pro měření nízkých teplot. Další nevýhodou je asi 6x nižší rezistivita oproti platině a z toho plynoucí malá citlivost.

## 2.2 Polovodičové senzory teploty

U polovodičových senzorů teploty se využívá toho, že dodáním určité energie dojde k přechodu elektronů do vodivostního pásu. Tato energie může být tepelná a s rostoucí teplotou bude tedy koncentrace nosičů náboje růst a elektrický odpor materiálu se snižovat (ne však u PTC). Tento jev se snažíme u teplotních senzorů na rozdíl od polovodičových součástek podpořit.

Polovodičové senzory teploty můžeme rozlišit podle charakteristické odezvy odporu na změnu teploty.

### 2.2.1 Termistory NTC

Jedná se o polykrystalické součástky vyrobené pomocí technologie spékání oxidů ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}$  atd.). Základem bývá opět korundová keramika případně sklo. Obvyklý teplotní rozsah je  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  až  $150\text{ }^\circ\text{C}$ , ale je možno zakoupit termistory pro nízké teploty nebo naopak velmi vysoké teploty.

Velkou výhodou je široké rozmezí základního odporu od jednotek  $\Omega$  po jednotky  $\text{M}\Omega$ . To umožňuje vysokou citlivost čidla pro malé teplotní změny a zároveň snižuje vliv odporu přívodů. Na druhou stranu je nevýhodou značná nelinearita tohoto typu čidla teploty.



Obrázek 8 Perličkový NTC senzor

Jejich závislost odporu na teplotě lze vyjádřit pomocí rovnice (2.2-1).

$$R = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (2.2-1)$$

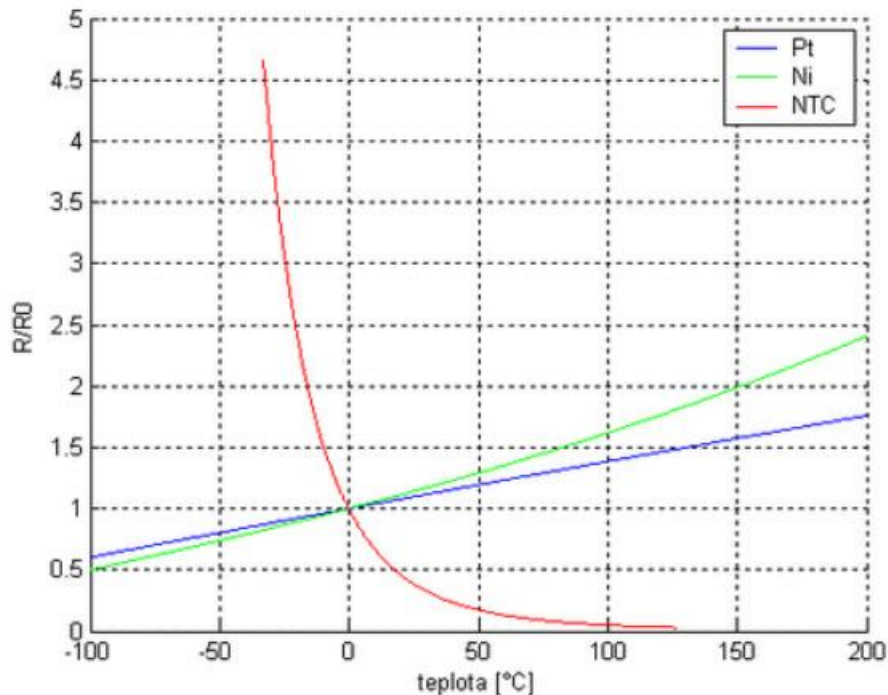
Konstantu B je možno získat z katalogu výrobce [5], případně ji změřit pro alespoň dvě různé teploty pomocí vztahu (2.2-2).

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (2.2-2)$$

Kde dosadíme teplotu a při ní naměřený odpor. Obvykle se volí teploty dvě 25 °C a 85 °C, ale vždy záleží na požadovaném teplotním rozsahu.

V případně potřeby vyšší přesnosti je možno použít upravené rovnice obsahující vyšší řády polynomu. Pro rozsah -100°C až 300°C postačí polynom třetího stupně. Obvykle se používá Steinhart-Hartova rovnice (2.2-3). Konstanty A, B, C jsou k nalezení v katalogu použitého čidla.

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot (\ln(R))^3 \quad (2.2-3)$$



Obrázek 9 Zobrazení teplotní závislosti kovových senzorů a polovodičového senzoru NTC

[10]

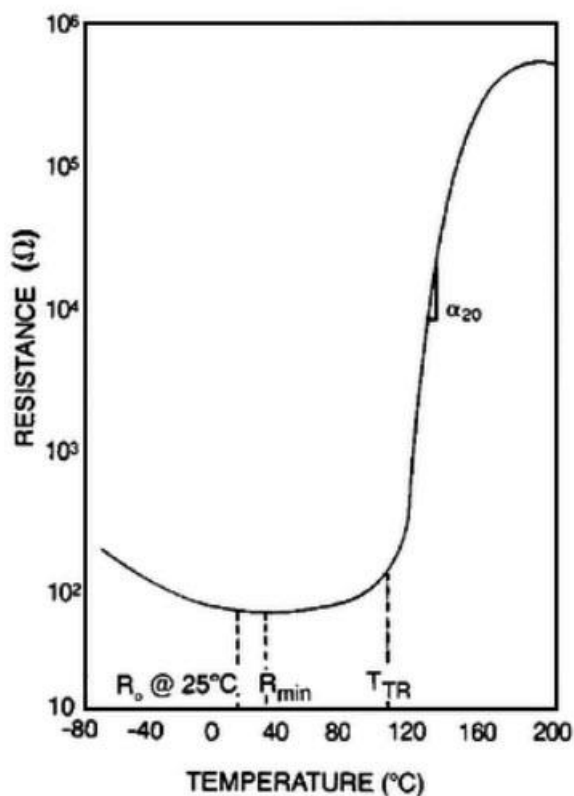
### 2.2.2 Termistory PTC

PTC termistory mají na rozdíl od NTC kladný teplotní koeficient. Odpor v závislosti na teplotě má nelineární závislost, nejprve mírně klesá a po dosažení určité teploty strmě

stoupá (Obrázek 10). Teplota zlomu  $T_{TR}$  souvisí s Curieovou teplotou. Za touto teplotou roste odpor PTC o několik řádů během malé teplotní změny.

Těchto vlastností se využívá například jako vratné pojistky, kde samoohřevem při průchodu proudu dojde k nárůstu odporu. Další možností využití je rozběhu motoru, kde je termistor zapojen do pomocného startovacího vynutí. Využívá se také jako dvoustavový senzor pro měření hladiny, kdy při ponoření do vody dojde k prudkému ochlazení apod. Jako teplotní čidlo se příliš nepoužívá.

Materiál pro výrobu senzoru se volí podle požadovaných vlastností. Obvykle se jedná o polykrystalické keramiky.



Obrázek 10 Charakteristika PTC senzoru [10]



### 2.2.3 Monokrystalické senzory teploty

Pro výrobu monokrystalických senzorů teploty se využívá nevlastního polovodiče typu N. S rostoucí teplotou dochází, vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce, k nárůstu rezistivity materiálu. Monokrystalické senzory mají tedy podobnou charakteristiku jako je tomu u kovů. V minulosti se využívali vzhledem k nižší ceně, která je ale dnes vzhledem k tenkovrstvé výrobě kovových čidel podobná.

Základní teplotní rozsah je podobný čidlům NTC tedy  $-55\text{ °C}$  až  $150\text{ °C}$ , k dostání jsou čidla pro vyšší teploty (maximálně okolo  $300\text{ °C}$ ). Teplotní součinitel odporu a linearita se nachází mezi kovovými senzory a NTC.

Teplotní závislost odporu na teplotě lze aproximovat pomocí vztahu (2.2-4).

$$R_T = R_{ref} \cdot [1 + a \cdot (T - T_{ref}) + b \cdot (T - T_{ref})^2] \quad (2.2-4)$$

Kde  $T_{ref}$  bývá obvykle  $25\text{ °C}$ . Konstanty je možno nalézt opět v katalogu výrobce [5].

## 3 Návrh zapojení převodníku

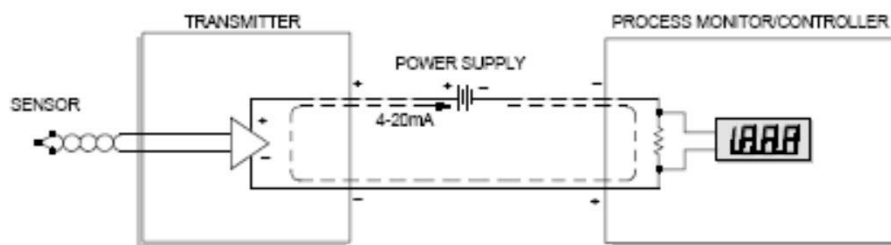
Cílem této práce je navrhnout a realizovat převodník pro měření teploty s NTC termistorem a výstupem na proudovou smyčku  $4 - 20\text{ mA}$ . Celé zapojení je určené pro měření teploty v akustické laboratoři v rozsahu teplot cca  $15\text{ °C} - 35\text{ °C}$  (teplota v místnosti).

Samotný převodník bude připojen ke sběrnému systému, kde bude dále možné upravit naměřené hodnoty. Z tohoto důvodu není nutné použít číslicové zpracování, bude navržen pomocí analogových komponent. Předpoklad je dosažení maximální odchylky měření  $0,1\text{ °C}$  na rozsahu  $25 \pm 10\text{ °C}$ .

### 3.1 Proudová smyčka

Proudová smyčka se využívá obvykle v průmyslové praxi. Její použití oproti napětíovému i digitálnímu výstupu má několik výhod.

- Napětíovou smyčkou lze napájet vysílač a v případě malé spotřeby i samotný přijímač. To umožňuje používat pro propojení pouze dvojlinku.
- Signál začíná na 4 mA, což umožňuje detekovat případné přerušení přívodního kabelu či chybu zařízení. Navíc je u mnoha zařízení podporována samo-monitorující funkce, kdy proud nižší než 3,8 mA nebo naopak vyšší než 20,5 mA je detekován jako chyba.
- Přesnost měření neklesá s délkou přívodního kabelu, na kterém nás nezajímá úbytek napětí.
- Jelikož se jedná o nízko-impedanční vedení, má vysokou imunitu proti rušení. Bývá obvykle řešeno pomocí kroucené dvojlinky.
- Je možno zařízení propojit dlouhými přívody. Je pouze potřeba napájet linku napětím vyšším než je jeho úbytek při 20 mA (a požadované napětí na přijímači plus vysílači) a zároveň vstupní obvody musí zvládnout použitou hodnotu napájecího napětí v době, kdy neteče žádný proud.
- Proud je možno lehce převést na napětí pomocí odporu zapojeného v sérii s linkou.
- Existuje velká spousta převodníků na proudovou smyčku - například I/P (proud na tlak) převodníky, což umožňuje přímou konverzi pneumatiky na 4-20mA standard.

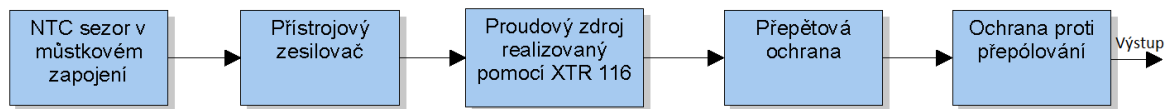


Obrázek 11 Struktura proudové smyčky použité v návrhu [11]

Převodník musí obsahovat obvod zajišťující vysílání, tedy proudový zdroj. Ten lze realizovat jako U/I převodník, kde vstup bude zajištěn pomocí vhodně zesíleného napětí ze senzoru. Dále je potřeba, aby obsahoval zdroj referenčního napětí a v případě dvou vodičového zapojení, je potřeba zajistit napájení ostatních komponent přímo z proudové smyčky.

Vzhledem k zjednodušení samotného zapojení a zároveň zvýšení přesnosti byl zvolen obvod XTR 116 [12], který už většinu potřebných komponent obsahuje. Navíc je vše umístěné na jednom polovodiči a je tedy možno dosáhnout velmi dobré přesnosti a teplotní stálosti.

### 3.2 Blokové schéma



Obrázek 12 Blokové schéma převodníku

Převodník se skládá ze senzoru NTC, který je zapojen v můstku tak, aby jeho výstup zesílený přístrojovým zesilovačem umožňoval plný proudový výstup ve zvoleném rozsahu teplot. Základem převodníku je obvod XTR 116, doplněným o přepětovou ochranu a ochranu proti přepólování. Ve schématu není zakreslen směr napájení, kdy obvod XTR 116 je napájen z proudové smyčky a poskytuje napájecí napětí pro zesilovač a referenční napětí pro napájení můstku. Jednotlivé části převodníku a výpočty budou uvedeny v následujících kapitolách.

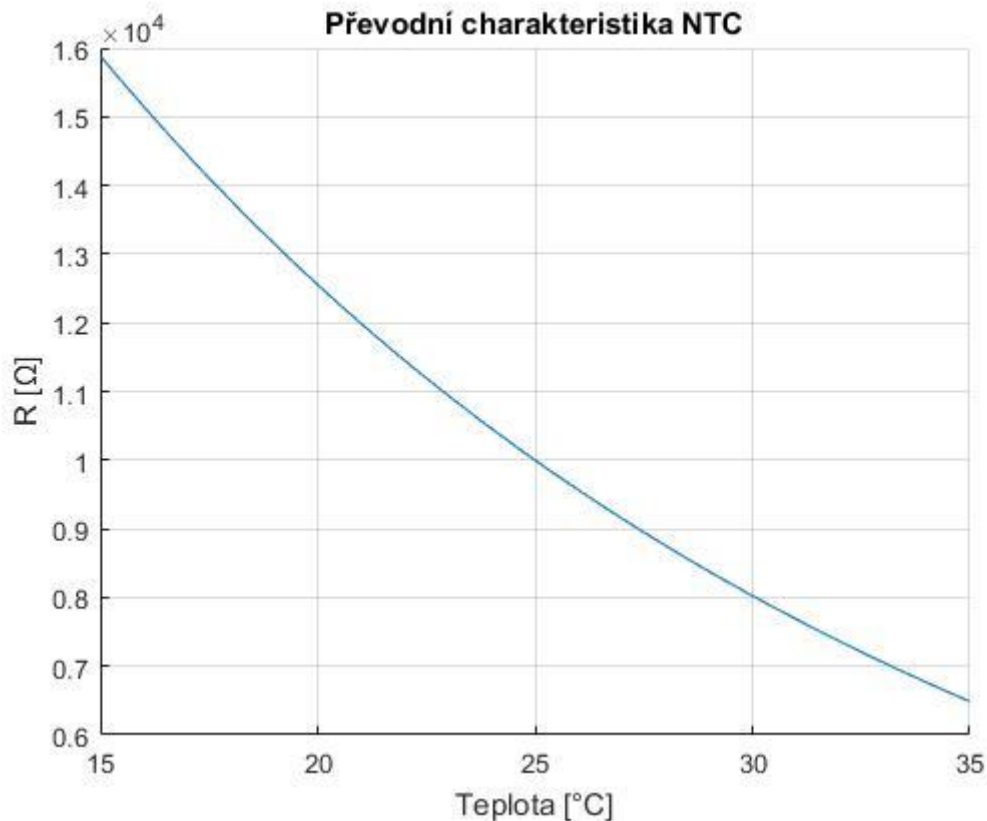
### 3.3 Termistor NTC

Při výběru termistoru je třeba vzít úvahu, že jeho charakteristika je značně nelineární a tedy jeho volba bude mít velký vliv na výslednou charakteristiku. Proto byl zvolen termistor s parametrem  $B_{25/100} = 3988$  a tolerancí  $\pm 0,3\%$  [13].

Konstantu B je také možno změřit a vypočítat pomocí dvou různých teplot a hodnot odporu. Pomocí vztahu (3.3-1).

$$B = \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (3.3-1)$$

Na obrázku (Obrázek 13) je vidět převodní charakteristika čidla NTC pro zvolený rozsah. Je zřejmé, že i na takto úzkém rozsahu je značně nelineární.



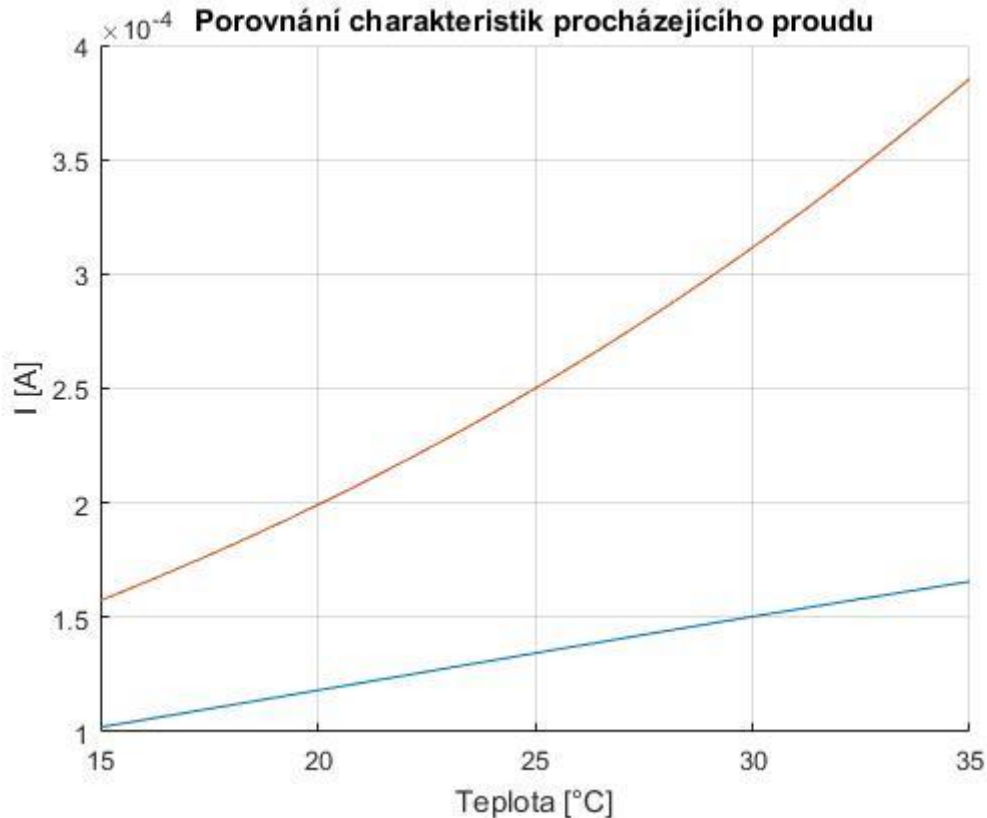
Obrázek 13 Převodní charakteristika čidla NTC na zvoleném rozsahu

### 3.3.1 Linearizace pomocí předřadného rezistoru

Často užívanou metodou je použití rezistoru zapojeného v sérii s NTC senzorem. Tento rezistor se volí tak, aby se inflexní bod charakteristiky proudu procházející rezistorem nacházel ideálně uprostřed zvoleného rozsahu měření. Po odvození inflexního bodu pomocí druhé derivace procházejícího proudu, kterou položíme rovnou nule, dostaneme vzorec (3.3-2). Jeho odvození lze nalézt například [14].

$$R_s = R_T \cdot \frac{B - 2 \cdot T_i}{B + 2 \cdot T_i} \quad (3.3-2)$$

Nevýhodou použití takového rezistoru je částečné snížení citlivosti, na druhou stranu nám značně poklesne chyba způsobená nelinearitou termistoru.



Obrázek 14 Graf porovnání proudu procházejícího NTC čidlem bez (červeně) a s předřadným rezistorem (modře)

Pro námi zvolený NTC termistor vypočteme ideální předřadný rezistor podle vzorce (3.3-2).

$$\begin{aligned}
 R_s &= R_8 + R_9 = R_0 \cdot \frac{B - 2 \cdot T_i}{B + 2 \cdot T_i} = \\
 &= 10\,000 \cdot \frac{3\,988 - 2 \cdot (25 + 273,15)}{3\,988 + 2 \cdot (25 + 273,15)} = 7\,398,5 \, \Omega
 \end{aligned}
 \tag{3.3-3}$$

### 3.3.2 Samoohřev termistoru

V katalogu termistoru [13] je uveden faktor pro rozptyl výkonu do okolního vzduchu. Jeho hodnota je  $\delta_{th} = 3,2 \text{ mW/K}$ . Výkon na termistoru je nejvyšší v případně horní části rozsahu (roste s teplotou) a může dosahovat až hodnot kolem  $0,5 \text{ mW}$ , to odpovídá oteplení až o hodnotu kolem  $0,15 \text{ }^\circ\text{C}$ . To je způsobeno tím, že perlička termistoru je velmi malá a tedy i plocha pro rozptyl tepla. Jelikož ale nepožadujeme rychlou odezvu čidla (měříme pomalu se měnící teplotu místnosti), je možné vhodnou konstrukcí zvětšit plochu pro rozptyl

a tak řádově snížit možné oteplení čidla. Toto lze provést například zalitím čidla do kovové trubičky apod.

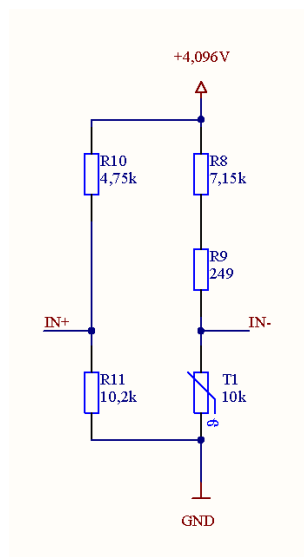
### 3.3.3 Výpočet zbývajících rezistorů v můstku

Signál z můstku bude dále zesílený operačním zesilovačem, vzhledem k tomu, že žádáme výslednou převodní charakteristiku převodníku takovou, aby 15 °C odpovídal proud 4 mA (nula na výstupu zesilovače a v našem případě i můstku). Vypočteme poměr děličů napětí, poměr děliče ve větvi s rezistory  $R_8$ ,  $R_9$  a termistoru  $T1$  při 15 °C se musí rovnat i poměr děliče složený z odporů  $R_{10}$  a  $R_{11}$ . Nejprve vypočteme odpor termistoru při 15 °C za pomoci vzorce (2.1-1).

$$\begin{aligned} R_{T1\ 15^\circ C} &= R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = 10\ 000 \cdot e^{3\ 988\left(\frac{1}{(15+273,15)} - \frac{1}{(25+273,15)}\right)} \\ &= 15\ 907\ \Omega \end{aligned} \quad (3.3-4)$$

Nyní už můžeme vypočítat požadovaný poměr děliče realizovaný z odporů  $R_{10}$  a  $R_{11}$ . Samotné rezistory budeme dále volit podle hodnot dostupné řady.

$$\frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} = \frac{R_{T1\ 15^\circ C}}{R_{T1\ 15^\circ C} + (R_8 + R_9)} = 0,6825 \quad (3.3-5)$$



Obrázek 15 Zapojení čidla NTC v navrženém převodníku

### 3.3.4 Zatížení referenčního výstupu

Svorku s referenčním napětím obvodu XTR116 je možné zatížit proudem až 2,5mA [12]. Při takto vysokém zatížení nastává nežádoucí pokles napětí. Dle údajů z katalogu je přesnost napěťové reference závislá na:

- Teplotě  $\pm 20$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$
- Zdrojovému napětí  $\pm 1$  ppm/V
- Výstupnímu proudu  $\pm 100$  ppm/mA

V našem případě budeme napěťovou referenci zatěžovat proudem cca 500  $\mu\text{A}$  což odpovídá chybě cca 50ppm a tedy poklesu napětí kolem 0,2mV.

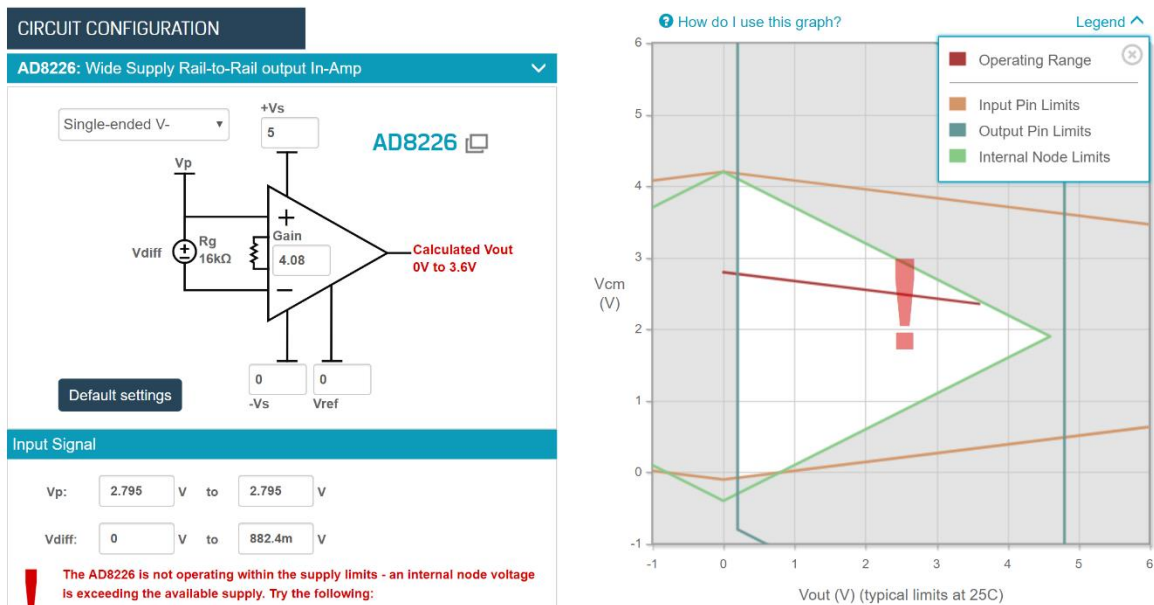
### 3.4 Volba operačního zesilovače

Signál z můstku je třeba následně upravit tak, aby napěťové úrovně odpovídaly požadovaným výstupním proudům z obvodu XTR116 a také aby další obvody nezatěžovaly můstek a nezpůsobovaly tak aditivní chybu. Využijeme výhod přístrojového operačního zesilovače.

Zásadním požadavkem je nutnost použití nesymetrického napájecího napětí. Vzhledem k jeho nízké hodnotě 5 V je vhodné, aby byl použitý operační zesilovač typu rail-to-rail. Další požadavky jsou dostatečný CMRR, malá vstupní napěťová nesymetrie a malé vstupní proudy. Na tomto základě byl zvolen obvod AD8226, který má velmi malou spotřebu, kde se typická hodnota proudu ze zdroje pohybuje kolem 350  $\mu\text{A}$ .

#### 3.4.1 Návrh zesílení OZ

Pro návrh výstupního napětí (resp. zesílení) je využit nástroj dostupný od výrobce, který umožní navrhnout napěťové úrovně tak, aby byly stále v lineární oblasti OZ.



Obrázek 16 Návrh zesilovače pomocí interaktivního formuláře od společnosti AD [15]

Z grafu je patrné, že není možné získat za daných podmínek nulové napětí z výstupu OZ, minimální výstupní napětí bylo při daném souhlasném napětí experimentálně změřeno a pohybuje se na úrovni 20-30 mV. Minimální napětí na výstupu způsobí malé zkreslení na začátku převodní charakteristiky celého převodníku. Výstup byl umístěn také blízko maximálního limitu a je tedy možné očekávat menší zkreslení poblíž maximálního výstupu proudu z převodníku. V případě požadavku nezkresleného napětí v celém rozsahu by bylo možné přivést napětí na referenční vstup a posunout tak nulu. Dále je možné také snížit zesílení, tak aby bylo maximální napětí na výstupu vzdáleno dále od limitních hodnot. Tím částečně klesne přesnost měření.

Požadované zesílení vypočteme podle následujícího vzorce (3.4-1). Za níže uvedených předpokladů:

- 0 V při 15 °C
- 3,6 V při 35 °C

$$OA_{out} = G \cdot \left( \frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} - \frac{R_{T1}}{R_{T1} + (R_8 + R_9)} \right) \cdot U_r \quad (3.4-1)$$

Pro 0V je už výpočet provedený v kapitole 3.3.3. Pro 3,6V je vypočtená hodnota zesílení po úpravě vzorce(3.4-1) následující.



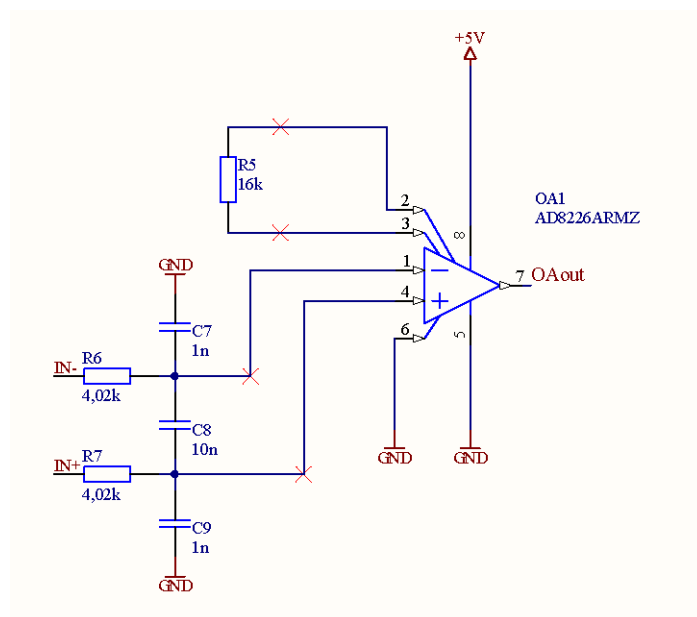
$$G = \frac{OA_{out}}{\left(\frac{R_{11}}{R_{11} + R_{10}} - \frac{R_{T1\ 35^\circ C}}{R_{T1\ 35^\circ C} + (R_8 + R_9)}\right) \cdot U_r} =$$

$$= \frac{3,6}{(0,6825 - 0,4668) \cdot 4,096} = 4,0745 \quad (3.4-2)$$

Hodnota zesílení OZ se pak nastavuje pomocí rezistoru  $R_5$  využitím následujícího vztahu.

$$R_G = \frac{49400}{G - 1} = \frac{49400}{4,0745 - 1} = 16\ 067\ \Omega \quad (3.4-3)$$

Přístrojový zesilovač je dále doplněn vstupním RFI filtrem používáme katalogové hodnoty součástek a tedy i zlomové frekvencí filtrů podle katalogu [16]. Dále je důležité dodržet stejný poměr hodnot součástek, tak aby si poměry  $R_6 \times C_7$  a  $R_7 \times C_9$  odpovídaly a proto jsou voleny součástky o malé toleranci.

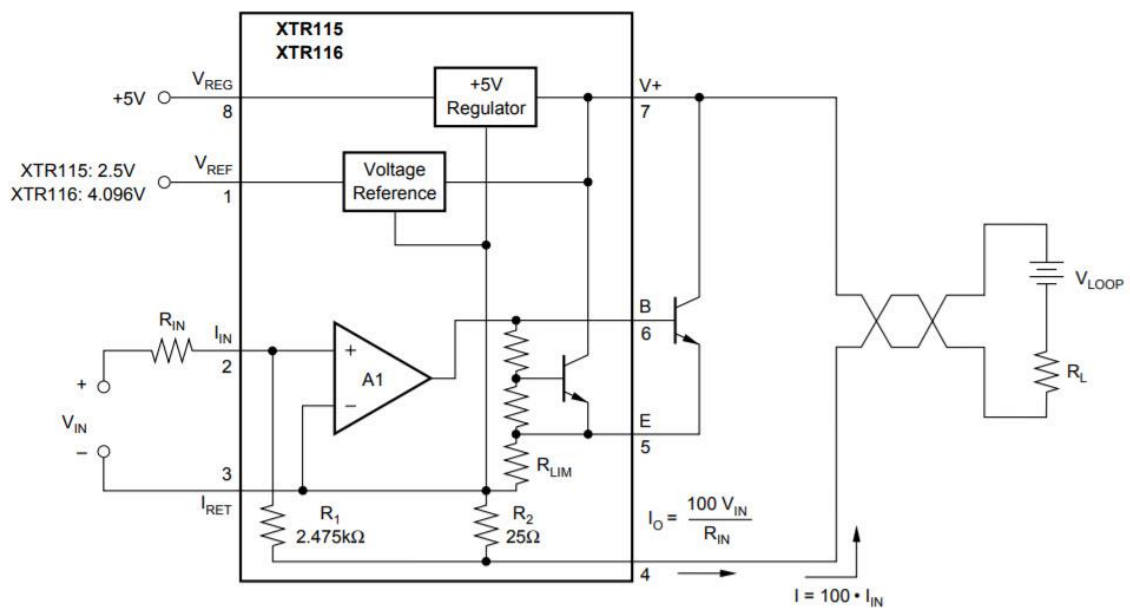


Obrázek 17 Zapojení přístrojového operačního zesilovače

### 3.5 Obvod XTR 116

Jedná se o obvod kombinující proudový zdroj, napětovou referenci (4,096 V pro XTR116) a navíc 5 V zdroj pro další obvody, který lze zatížit proudem až 3,7 mA (vlastní spotřeba obvodu je cca 0,2 mA – to v případě, že smyčkou protékají 4 mA). Referenční výstup je možno zatížit proudem až 2,5 mA, se vzrůstajícím proudem však klesá přesnost

napěťové reference. Velkou výhodou je vysoká přesnost obvodu, kde u referenčního napětí dosahuje typických hodnot okolo 0,05 % [12]. Chyba nelinearity je v tisícinách procenta a chyba zesílení je okolo 0,05 %. Obvod je možno použít v teplotním rozsahu od -40 °C do 85 °C.



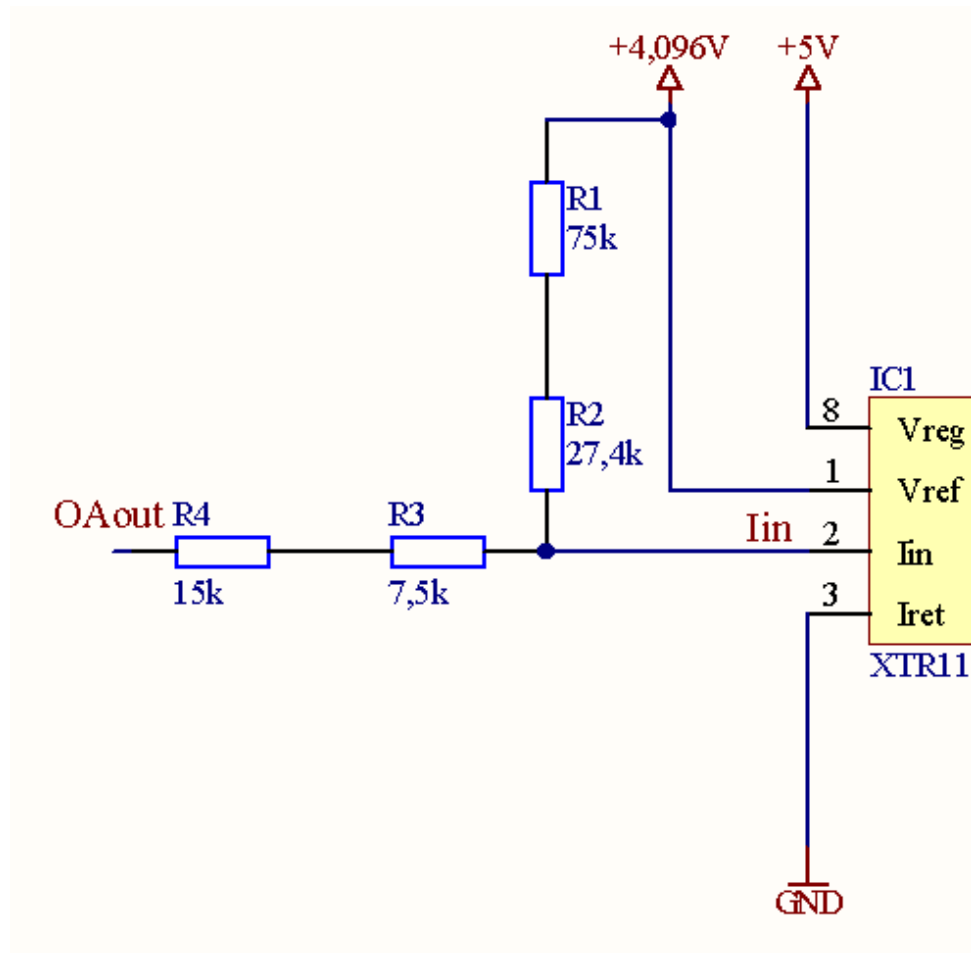
Obrázek 18 Vnitřní zapojení obvodu XTR116 [12]

Výstupní proud obvodu lze určit podle následujícího vzorce. Stačí tedy vhodně zvolit vstupní napětí  $U_{IN}$  a vstupní odpor  $R_{IN}$ .

$$I_{OUT} = \frac{100 \cdot U_{IN}}{R_{IN}} \quad (3.5-1)$$

Jelikož požadujeme proudovou smyčku od 4 mA, je dále potřeba vytvořit proudový offset tak, že zapojíme vhodný rezistor mezi svorky  $U_{ref}$  ( $V_{ref}$ ) a  $I_{IN}$ . Jeho hodnota je vypočtena následujícím způsobem pomocí Ohmova zákona. Je třeba zohlednit, že obvod XTR 116 násobí vstupní proud 100x .

$$R_{1+2} = \frac{U_{ref}}{40\mu A} = \frac{4,096}{4 \cdot 10^{-5}} = 102\,400 \, \Omega \quad (3.5-2)$$

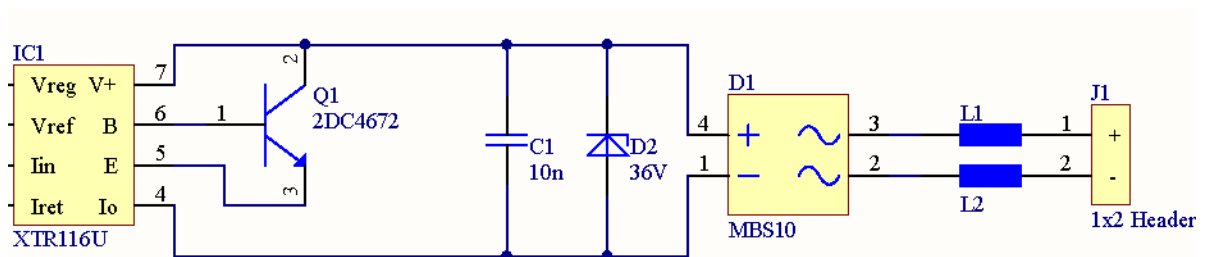


Obrázek 19 Vstupní část obvodu XTR 116

Hodnoty odporů  $R_3$  a  $R_4$  vypočteme pomocí upraveného vzorce (3.5-1).

$$R_{IN} = \frac{100 \cdot U_{IN}}{I_{OUT}} = \frac{100 \cdot 3,6}{0,016} = 22\,500 \, \Omega \quad (3.5-3)$$

Zbylá část obvodu je dále doplněna o externí tranzistor a ochranné obvody, které budou popsány v následujících kapitolách.



Obrázek 20 Zapojení výstupní částí obvodu XTR 116

### 3.5.1 Externí tranzistor

Požadavkem na externí tranzistor je pouze jeho dimenzování na dostatečný proud a napětí. Byl zvolen typ 2DC4672 [17], který má maximální napětí  $U_{C-E} = 50 \text{ V}$  a maximální proud  $I_C = 3 \text{ A}$ . To vše v pouzdře SOT89 pro povrchovou montáž.

### 3.5.2 Zenerova dioda a diodový můstek

Napětí Zenerovy diody bylo zvoleno 36 V [18]. Zenerův proud je pouze okolo 10 mA a dioda je tak určena pouze k pokrytí krátce trvajících napěťových špiček. Závěrný proud je na úrovni 50 nA.

Diodový můstek má hodnotu průrazného napětí 1000V, maximální proud 1A, závěrný proud je na úrovni 5  $\mu\text{A}$ . Závěrný proud se projeví chybou řádově méně než tisícinou  $^{\circ}\text{C}$ .

### 3.5.3 Feritové kuličky a kondenzátor

Zapojení dále obsahuje feritové kuličky na vstupu do převodníku a kondenzátor, obojí současně utlumí případné rušení přicházející po přívodech. Ferity i kondenzátor jsou navrženy s ohledem na maximální hodnoty napětí a proud tekoucí obvodem obvodu.

## 4 Návrh plošného spoje

### 4.1 Výroba plošného spoje

Výroba plošného spoje byla zadána firmě PragoBoard s.r.o. v rámci služby POOL servis. V rámci POOL servisu je několik omezení, které je třeba dodržet, popsány jsou na stránkách firmy [19]. Pro potřeby našeho návrhu jsou tyto parametry více než dostačující.



Obrázek 21 2-vrstvý plošný spoj, tloušťka 1,5 mm, finální tloušťka Cu fólie 35 μm [19]

Vzhledem k tomu, že minimální účtovaná částka je za 1 dm<sup>2</sup> plošného spoje, byl vytvořen panel s vrstvou pro frézu a vyrobeno tak více kusů za stejnou cenu. (Příloha 10)

### 4.2 Návrhový software

Pro návrh plošného spoje byl použit program Altium Designer. K dispozici je školní licence a výrobce nabízí i 15 – denní verzi bez jakýchkoliv limitací.

Integrované obvody a pasivní prvky byly voleny v provedení pro povrchovou montáž.

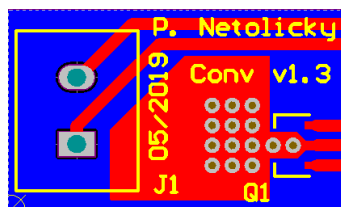
V rámci návrhu jsou použity následující nastavení:

- Minimální izolační vzdálenost 0,3 mm (12 mil), předpokládané napětí se pohybuje do 35 V
- Šířka vodivé cesty byla volena 0,6 mm (24 mil) a pro součástky s malým pouzdrem 0,3 mm (12 mil). Vzhledem k maximálnímu procházejícímu proudu obvodem cca 25 mA bude docházet k minimálnímu oteplení (dle výpočtu cca 0,01 °C) [20]
- Velikost prokovů byla zvolena 0,6/1,2 mm (24/48 mil). Velikost prokovů je důležitá hlavně v místě kolektoru použitého tranzistoru, kde se jich využívá k vedení tepla na spodní stranu plošného spoje

Při rozmístění součástek byl kladen důraz na umístění tranzistoru, jako zdroje tepla, co nejdále od termistoru. Dále byly součástky s větší výškou, vzhledem k malým rozměrům plošného spoje, umístěny co nejvíce do středu osy plošného spoje. Blokovací kondenzátory byly umístěny co nejbližší napájecím vývodům součástek.

### 4.3 Chlazení tranzistoru

Při návrhu chlazení tranzistoru byly využity obě strany plošného spoje a prokovy jako vodič tepla. Při použití maximálního napájecího napětí smyčky 35 V a maximálního naměřeného proudu 0,25 mA vychází ztrátový výkon na tranzistoru 0,875 W. Na plošném spoji je umístěn dostatek prokovů a jejich tepelný odpor lze zanedbat. Celková plocha mědi převodníku určená k ochlazení tranzistoru je cca 1600mm<sup>2</sup>. Dle dokumentu [21] lze předpokládat při dané ploše (s tím, že v našem návrhu je plocha díky prokovům lépe rozmístěna) tepelný odpor  $R_{\theta J-A} < 100 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ . Maximální teplota přechodu je pro použitý tranzistor 150 °C, chlazení je tedy dimenzované s dostatečnou výkonovou rezervou.



Obrázek 22 Detail chladičící plochy tranzistoru

### 4.4 Volba tolerance rezistorů

Součástky byly objednány od firmy Distrelec. Velikost součástek pro povrchovou montáž byla zvolena podle dostupnosti a s ohledem na plánovanou velikost plošného spoje - rozměr 0805. Byl proveden výpočet, ovlivnění výstupu převodníku v případě použití 1 % tolerance rezistorů, jednalo o setiny °C. Rezistory o toleranci 1 % jsou od této firmy dostupné obvykle v minimálním množství 100 kusů (hlavně pro zvolenou velikost). Z těchto obou důvodů byla zvolena tolerance 0,1 % pro všechny rezistory (rezistory byly levnější, než v případě nákupu většího množství kusů při větší toleranci).

Největší chybu na výstupu může dle výpočtu způsobit tolerance B parametru termistoru (až okolo 0,15 °C v případě 0,3 % tolerance). Reálně lze však očekávat menší odchylku a tedy lepší výsledek.

## 5 Měření parametrů převodníku

### 5.1 Napájení proudové smyčky

V návrhu je použito zapojení proudové smyčky podle obrázku (Obrázek 11). Z toho plyne několik omezení pro maximální napětí, minimální napětí a odpor přívodů. Maximální napětí je dáno použitou přepět'ovou ochranou. Minimální napětí bylo experimentálně změřeno. Bylo potvrzeno, že nejvyšší napětí je potřeba při maximálním proudu procházejícím smyčkou. Napětí na zdroji bylo při maximálním proudu procházejícím smyčkou snižováno až do hodnoty, kdy došlo k poklesu procházejícího proudu.

Odpor přívodů je omezen maximálním napětím smyčky, při kterém musí stále procházet požadovaný proud. Použitím Ohmova zákona, maximální hodnoty napětí ponížené o minimální napětí (tak aby na převodníku zůstalo napětí, při kterém není zkreslen výstup) a maximálním proudu dostaneme maximální možný odpor přívodů. Při tom zanedbáváme úbytek napětí na přijímači proudové smyčky.

Minimální napájecí napětí proudové smyčky	9 V
Maximální napájecí napětí proudové smyčky	35 V
Maximální odpor přívodů při 35 V napájení	1300 Ω

Tabulka 2 Limitní parametry pro připojení převodníku do proudové smyčky

### 5.2 Limitní proudy proudové smyčky

Vzhledem k tomu, že obvod XTR 116 je schopen dodávat proud od 0 až do cca 32 mA (do 25 mA s deklarovanou linearitou dle katalogu součástky) a napětí na vstupu může

dosahovat i jiných než hodnot pro které byl převodník navržen, byl změřen maximální a minimální proud, který může protékat smyčkou.

Minimální proud je dán rezistory R1 a R2, jenž zajišťují 4 mA výstup. K tomuto proudu je třeba navíc přičíst minimální výstup z OZ. Maximální proud ovlivní hlavně maximální výstupní napětí OZ při napájení 5 V.

Minimální naměřený proud procházející smyčkou (dosaženo při 0°C)	4,03 mA
Maximální naměřený proud procházející smyčkou (dosaženo při 50°C)	24,77 mA

Tabulka 3 Naměřené limitní proudy procházející proudovou smyčkou

### 5.3 Naměřené převodní charakteristiky

Pro změření převodní charakteristiky převodníku byl sestaven přípravek (Obrázek 23). NTC senzor převodníku je ponořen do vody spolu s referenčním etalonem. Voda je ohřívána pomocí oběhového termostatu, kde dle výrobce dosahuje uniformita teploty v lázni  $\pm 0,03$  °C pro obdobnou velikost nádoby. V našem případě můžeme očekávat lepší hodnotu, jelikož jsou čidla umístěna blízko sebe.

Vzhledem k tomu, že součástí termostatu není chlazení, bylo pro dosažení teplot nižších než pokojová, použito gelových chladících pytlů umístěných do náplně za současného dohřívání termostatem.





Obrázek 23 Měřicí přípravek pro stanovení odchylky od etalonu

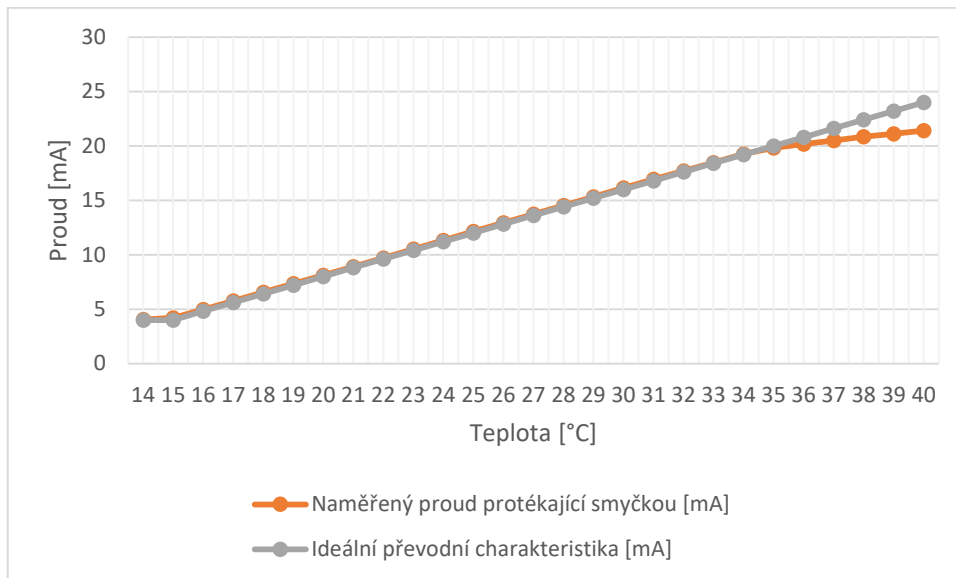
Seznam použitých měřících zařízení:

- Zdroj Diametral EP-603
- Multimetr Fluke 87V
- Termostat Julabo ED
- Měřící ústředna Ahlborn s teplotním čidlem Pt 100 (označení B046), kalibrační list v příloze (Příloha 12 a Příloha 13)

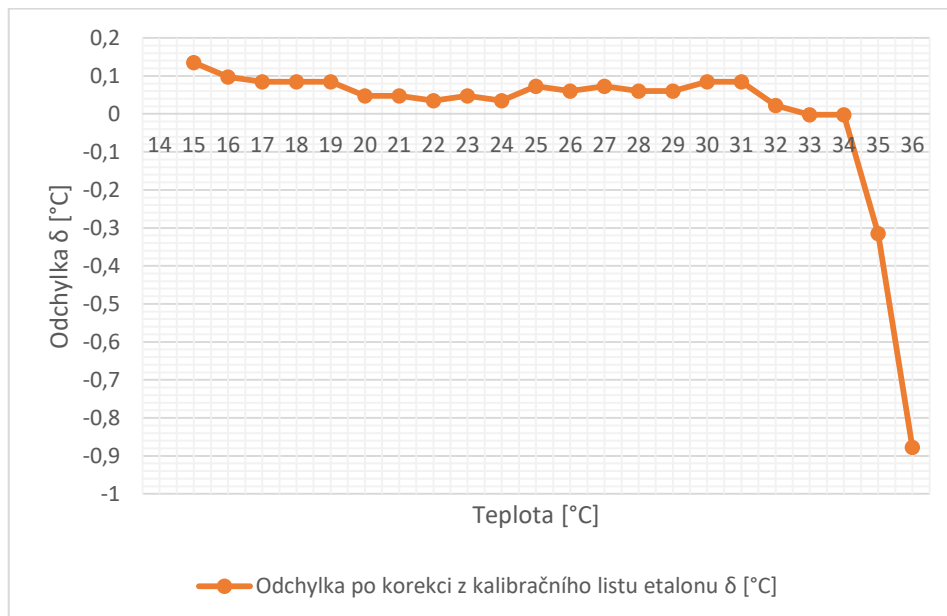
Teplotní čidlo Pt100 je od firmy Sensit (Rožnov pod Radhoštěm), jeho parametry jsou uvedeny v příloze (Příloha 1).

Na grafu (Obrázek 24) můžeme vidět naměřenou převodní charakteristiku. Pro detailnější zobrazení byla vypočtena odchylka od ideální převodní charakteristiky. Naměřené hodnoty jsou v tabulce (Příloha 11). Od naměřené odchylky byl odečten offset senzoru z kalibračního listu (čidlo je kalibrováno v 37 °C) a v úvahu byl také vzat SOP (standartní operační postup) laboratoře, kde se pravidelně interně provádí porovnání čidel mezi sebou. Od naměřených

hodnot v celém rozsahu tak byla odečtena hodnota  $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}$  a výsledné odchylky od ideální charakteristiky vyneseny do grafu (Obrázek 25).



Obrázek 24 Naměřená převodní charakteristika



Obrázek 25 Naměřená odchylka od ideální převodní charakteristiky

## 6 Závěr

V rámci bakalářské práce byl navržen a realizován převodník z teploty na proudovou smyčku. Realizace splnila očekávání, podařilo se dosáhnout odchylky od ideální převodní charakteristiky menší než  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  v rozsahu teplot  $16 - 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hlavním důvodem změřené odchylky je tolerance a použití parametru B termistoru pro návrh převodníku.

Z návrhu také vyplývá, že lze realizovat výrobu více kusů čidla bez nutnosti justáže jednotlivých kusů v případě, že vyhovuje daná maximální odchylka.

Malých odchylek bylo dosaženo hlavně volbou součástek s vysokou přesností. Z grafu naměřených odchylek je dále vidět určitý klesající trend, navíc jsou všechny hodnoty na jedné strany od nuly. V případě úpravy zesílení tranzistoru pomocí změny rezistoru  $R_5$  a posunutí nuly pomocí rezistorů  $R_{10}$  a  $R_{11}$  by bylo možné vlastnosti převodníku ještě vylepšit.

Jednotlivé nestability součástek nebyly uvažovány, dle jednotlivých katalogů součástek je nestabilita obvykle řádově více závislá na teplotě, než na ostatních parametrech. Vzhledem k použití převodníku v prostředí malých změn teplot se teplotní nestabilita součástek výrazně neprojeví na výstupu. Také zatížení zdroje referenčního napětí obvodu XTR 116 je natolik malé, že se neprojeví výrazně na výstupu převodníku.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] „Celsiova teplotní stupnice,“ 13 5 2018. [Online]. Available: [https://www.wikiskripta.eu/w/Celsiova\\_teplotn%C3%AD\\_stupnice](https://www.wikiskripta.eu/w/Celsiova_teplotn%C3%AD_stupnice). [Přístup získán 20 09 2019].
- [2] „Fahrenheit,“ 2018. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Fahrenheit>. [Přístup získán 20 09 2018].
- [3] „Bureau International des Poids et Measures,“ 2018. [Online]. Available: [https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90\\_1\\_Introduction\\_2018.pdf](https://www.bipm.org/utis/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_1_Introduction_2018.pdf). [Přístup získán 20 09 2018].
- [4] S. Scott Courts, PhD, „Cernox™ Resistance,“ 2017. [Online]. Available: <https://www.lakeshore.com/Documents/CernoxForHighEnergy.pdf>. [Přístup získán 21 09 2018].
- [5] S. Sensit, „Příručka Sensit pro konstruktéry, projektanty a realizátory měřící a reg. techniky,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.sensit.cz/soubory-stazeni-slozka/1404042057/>. [Přístup získán 22 09 2018].
- [6] V. H. V. P. P. Ripka, „4a. Měření odporu,“ [Online]. Available: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/63117/mod\\_resource/content/3/04\\_odporove\\_update\\_.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/63117/mod_resource/content/3/04_odporove_update_.pdf). [Přístup získán 20 09 2018].
- [7] „Platinum RTD probe construction,“ RdF, [Online]. Available: [http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-r/pa-r\\_01.shtml](http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-r/pa-r_01.shtml). [Přístup získán 21 09 2018].
- [8] „Platinum Temperature Sensors Enable Precision Heating in Appliance Design,“ [Online]. Available: <https://www.appliancedesign.com/articles/94239-platinum-temperature-sensors-enable-precision-heating-in-appliance-design>. [Přístup získán 21 09 2018].
- [9] „Thermocouples,“ [Online]. Available: <http://www.sensorland.com/HowPage017.html>. [Přístup získán 21 09 2018].
- [10] V. Špringl, „Měření teploty polovodičové senzory teploty,“ 19 Srpen 2004. [Online]. Available: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>. [Přístup získán 20 05 2019].
- [11] A. Vojáček, „Proudová smyčka 4-20mA - obecný popis,“ HW.CZ, 4 červen 2014. [Online]. Available: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>. [Přístup získán 17 05 2019].
- [12] T. Instruments, „4-20mA CURRENT LOOP TRANSMITTERS,“ November 2003. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/xtr116.pdf>. [Přístup získán 19 05 2019].
- [13] EPCOS, „Datasheet - NTC thermistors for temperature measurement,“ [Online]. Available: [https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/\\_t/ds/b57861s\\_eng\\_tds.pdf](https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/_t/ds/b57861s_eng_tds.pdf). [Přístup získán 20 5 2019].
- [14] C. Prof. Ing. Pavel Ripka a P. Antonín Platil, *Senzory a převodníky - Laboratorní cvičení, Česká technika - nakladatelství ČVUT*, 2006.
- [15] A. Devices, „Instrumentation Amplifier Diamond Plot Tool,“ [Online]. Available: <https://www.analog.com/designtools/en/diamond>. [Přístup získán 22 05 2019].
- [16] A. Devices, „Datasheet - Wide Supply Range, Rail-to-Rail Output instrumentation Amplifier AD8226,“ [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8226.pdf>. [Přístup získán 20 05 2019].
- [17] D. Incorporated, „Datasheet 50V NPN Surface mount transistor SOT89,“ [Online]. Available: [https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/\\_t/ds/2DC4672\\_eng\\_tds.pdf](https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/_t/ds/2DC4672_eng_tds.pdf). [Přístup získán 20 05 2019].
- [18] D. semiconductors, „PDZ-B series Voltage regulator diodes,“ [Online]. Available: [https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/\\_t/ds/pdz-b\\_series\\_eng\\_tds.pdf](https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/_t/ds/pdz-b_series_eng_tds.pdf). [Přístup získán 20 05 2019].
- [19] P. s.r.o., „POOL servis - princip výroby,“ [Online]. Available: [https://www.pragoboard.cz/pool\\_servis](https://www.pragoboard.cz/pool_servis). [Přístup získán 25 05 2019].
- [20] V. Záhlava, „Návrh a konstrukce DPS,“ v *Principy a pravidla praktického návrhu*, BEN, 2010.
- [21] L. New Japan Radion Co., „Thermal Resistance,“ [Online]. Available: <https://www.njr.com/semicon/package/thermal.html>. [Přístup získán 25 5 2019].
- [22] „Datasheet - 4-20mA CURRENT LOOP TRANSMITTERS,“ 2003. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/xtr116.pdf>. [Přístup získán 25 2 2019].

- [23] T. Semiconductor, „MBS2 - MBS10,“ [Online]. Available:  
[https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/\\_t/ds/mbs2-10\\_eng\\_tds.pdf](https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/_t/ds/mbs2-10_eng_tds.pdf). [Přístup získán 20 05 2019].

## Seznam příloh

PŘÍLOHA 1 PŘÍKLAD KATALOGU VÝROBCE PRO ČIDLO TEPLoty Pt100 [5] .....	47
PŘÍLOHA 2 PŘÍKLAD KATALOGU VÝROBCE PRO ČIDLO Ni891 [5] .....	48
PŘÍLOHA 3 PŘÍKLAD KATALOGU VÝROBCE PRO ČIDLO NTC 1k0 [5] .....	49
PŘÍLOHA 4 STRÁNKA Z KATALOGU VÝROBCE PRO ČIDLO KTY [5].....	50
PŘÍLOHA 5 SCHÉMA ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU .....	51
PŘÍLOHA 6 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE TOP 2:1 .....	52
PŘÍLOHA 7 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE BOTTOM 2:1.....	52
PŘÍLOHA 8 OSAZOVACÍ SCHÉMA TOP 2:1 .....	52
PŘÍLOHA 9 SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK.....	53
PŘÍLOHA 10 PANELIZOVANÝ TIŠTĚNÝ SPOJ PŘEVODNÍKU .....	54
PŘÍLOHA 11 NAMĚŘENÁ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA A VYPOČTENÉ ODCHYLKY .....	55
PŘÍLOHA 12 KALIBRAČNÍ LIST ÚSTŘEDNY A Pt100 STRANA 1 .....	56
PŘÍLOHA 13 KALIBRAČNÍ LIST ÚSTŘEDNY A Pt100 STRANA 2.....	57



### Čidla teploty Pt 100, $\alpha = 3,851 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

#### Základní technické parametry

Čidlo	Tenkovrstvý platinový odpor
Maximální rozsah pracovních teplot	-200° až 800°C <sup>1)</sup>
Odpor při 0°C	100 Ω
Dlouhodobá stabilita odporu	0,03% po 1000 hod. při t = 400°C
Doporučený / max. stejnosměrný měřicí proud	Třída A: 0,5 mA / 1,2 mA <sup>2)</sup> Třída B: 0,8 mA / 2 mA <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Skutečný rozsah pracovních teplot snímače je dán konstrukcí a technologií výroby snímače teploty.

<sup>2)</sup> Platí pro teplotní rozsah -50 až +400 °C

Teplotní závislost odporu čidla je vyjádřena rovnicemi:

$$R = 100 (1 + At + Bt^2 + C (t-100) t^3) \quad \text{v rozsahu teplot } -200^\circ \text{ až } 0^\circ\text{C}$$

$$R = 100 (1 + At + Bt^2) \quad \text{v rozsahu teplot } 0^\circ \text{ až } 850^\circ\text{C}$$

kde:  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$      $B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$      $C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$

#### Závislost hodnoty odporu na teplotě je v Ohmech [Ω]:

°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-200	18,52									
-190	22,83	22,40	21,97	21,54	21,11	20,68	20,25	19,82	19,38	18,95
-180	27,10	26,67	26,24	25,82	25,39	24,97	24,54	24,11	23,68	23,25
-170	31,34	30,91	30,49	30,07	29,64	29,22	28,80	28,37	27,95	27,52
-160	35,54	35,12	34,70	34,28	33,86	33,44	33,02	32,60	32,18	31,76
-150	39,72	39,31	38,89	38,47	38,05	37,64	37,22	36,80	36,38	35,96
-140	43,88	43,46	43,05	42,63	42,22	41,80	41,39	40,97	40,56	40,14
-130	48,00	47,59	47,18	46,77	46,36	45,94	45,53	45,12	44,70	44,29
-120	52,11	51,70	51,29	50,88	50,47	50,06	49,65	49,24	48,83	48,42
-110	56,19	55,79	55,38	54,97	54,56	54,15	53,75	53,34	52,93	52,52
-100	60,26	59,85	59,44	59,04	58,63	58,23	57,82	57,41	57,01	56,60
-90	64,30	63,90	63,49	63,09	62,68	62,28	61,88	61,47	61,07	60,66
-80	68,33	67,92	67,52	67,12	66,72	66,31	65,91	65,51	65,11	64,70
-70	72,33	71,93	71,53	71,13	70,73	70,33	69,93	69,53	69,13	68,73
-60	76,33	75,93	75,53	75,13	74,73	74,33	73,93	73,53	73,13	72,73
-50	80,31	79,91	79,51	79,11	78,72	78,32	77,92	77,52	77,12	76,73
-40	84,27	83,87	83,48	83,08	82,69	82,29	81,89	81,50	81,10	80,70
-30	88,22	87,83	87,43	87,04	86,64	86,25	85,85	85,46	85,06	84,67
-20	92,16	91,77	91,37	90,98	90,59	90,19	89,80	89,40	89,01	88,62
-10	96,09	95,69	95,30	94,91	94,52	94,12	93,73	93,34	92,95	92,55
0	100,00	99,61	99,22	98,83	98,44	98,04	97,65	97,26	96,87	96,48

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,40	140,78	141,16	141,54	141,91



### Čidla teploty Ni 891

#### Základní technické parametry

Snímací prvek	Tenkovrstvý niklový odpor
Rozsah pracovních teplot	-50 až 200 °C *
Odpor při 0 °C	891,1 Ω
Dlouhodobá stabilita odporu	0,1%; po 1000 hod při teplotě 150 °C
Doporučený / maximální ss měřicí proud	0,3 mA / 1 mA

\* Skutečný rozsah pracovních teplot snímače je dán konstrukcí a technologii

Teplotní závislost odporu čidla v rozsahu teplot -50 až 200 °C je vyjádřena rovnicí

$$R = 891,05945(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$$

kde: A = 5,64742. 10<sup>-3</sup> °C<sup>-1</sup>  
 B = 6,69504. 10<sup>-6</sup> °C<sup>-2</sup>  
 C = 5,68816. 10<sup>-9</sup> °C<sup>-3</sup>

#### Závislost hodnoty odporu na teplotě je v Ohmech [Ω]:

°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-50	653,7									
-40	699,0	694,4	689,9	685,3	680,8	676,2	671,7	667,2	662,7	658,2
-30	745,3	740,6	736,0	731,3	726,7	722,0	717,4	712,8	708,2	703,6
-20	792,8	788,0	783,2	778,4	773,7	768,9	764,2	759,4	754,7	750,0
-10	841,3	836,4	831,5	826,6	821,8	816,9	812,1	807,2	802,4	797,6
0	891,1	886,0	881,0	876,0	871,0	866,0	861,1	856,1	851,2	846,2

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	891,1	896,1	901,1	906,2	911,3	916,4	921,5	926,6	931,7	936,8
10	942,0	947,1	952,3	957,5	962,7	967,9	973,1	978,4	983,6	988,9
20	994,1	999,4	1004,7	1010,0	1015,3	1020,7	1026,0	1031,4	1036,7	1042,1
30	1047,5	1052,9	1058,4	1063,8	1069,2	1074,7	1080,2	1085,7	1091,2	1096,7
40	1102,2	1107,8	1113,3	1118,9	1124,5	1130,1	1135,7	1141,3	1146,9	1152,6
50	1158,2	1163,9	1169,6	1175,3	1181,0	1186,7	1192,5	1198,2	1204,0	1209,8
60	1215,6	1221,4	1227,2	1233,0	1238,9	1244,7	1250,6	1256,5	1262,4	1268,3
70	1274,3	1280,2	1286,2	1292,2	1298,2	1304,2	1310,2	1316,2	1322,3	1328,3
80	1334,4	1340,5	1346,6	1352,7	1358,9	1365,0	1371,2	1377,4	1383,5	1389,8
90	1396,0	1402,2	1408,5	1414,7	1421,0	1427,3	1433,6	1439,9	1446,3	1452,6
100	1459,0	1465,4	1471,8	1478,2	1484,6	1491,1	1497,5	1504,0	1510,5	1517,0
110	1523,5	1530,1	1536,6	1543,2	1549,8	1556,4	1563,0	1569,6	1576,3	1582,9
120	1589,6	1596,3	1603,0	1609,7	1616,4	1623,2	1630,0	1636,7	1643,6	1650,4
130	1657,2	1664,0	1670,9	1677,8	1684,7	1691,6	1698,5	1705,5	1712,4	1719,4
140	1726,4	1733,4	1740,4	1747,5	1754,5	1761,6	1768,7	1775,8	1782,9	1790,1
150	1797,2	1804,4	1811,6	1818,8	1826,0	1833,2	1840,5	1847,8	1855,1	1862,4
160	1869,7	1877,0	1884,4	1891,8	1899,1	1906,6	1914,0	1921,4	1928,9	1936,3
170	1943,8	1951,3	1958,9	1966,4	1974,0	1981,6	1989,1	1996,8	2004,4	2012,0
180	2019,7	2027,4	2035,1	2042,8	2050,5	2058,3	2066,0	2073,8	2081,6	2089,5
190	2097,3	2105,2	2113,0	2120,9	2128,8	2136,8	2144,7	2152,7	2160,7	2168,7
200	2176,7									





### Čidlo teploty NTC 1k0; $B_{25/85} = 3528$

#### Základní technické parametry

Snímací prvek	Perličkový termistor NTC
Rozsah pracovních teplot	-40 až 125 °C *
Odpor při 25 °C	1 kΩ
Koeficient $\beta_{25/85}$	3528 ± 0,5%
Koeficient $\beta_{25/100}$	3584 ± 0,5%
Dlouhodobá stabilita odporu	≤ 3%; po 1000 hod při teplotě 85 °C **
Doporučený / maximální ss příkon	0,5 mW / 2mW
Tolerance snímačů	±5% ***

\* Skutečný rozsah pracovních teplot snímače je dán konstrukcí prvku a technologií výroby.

\*\* Tyto parametry závisí na konkrétním typu a provedení termistoru.

\*\*\* Tolerance elektrického odporu termistoru při teplotě 25 °C je vyměřována výrobcem do skupin ±2%, ±3% nebo ±5%.

#### Závislost hodnoty odporu v Ω na teplotě

°C	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
-40	23342									
-30	13018	13882	14745	15609	16472	17336	18537	19738	20940	22141
-20	7569	8031	8492	8954	9415	9877	10505	11133	11762	12390
-10	4569	4826	5083	5341	5598	5855	6198	6541	6883	7226
0	2854	3002	3151	3299	3448	3596	3791	3985	4180	4374

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2854	2740	2625	2511	2396	2282	2193	2104	2016	1927
10	1838	1769	1699	1630	1560	1491	1436	1381	1327	1272
20	1217	1174	1130	1087	1043	1000	965	931	896	861
30	826,6	798,7	770,9	743,0	715,2	687,3	664,8	642,2	619,7	597,1
40	574,6	556,2	537,8	519,5	501,1	482,7	467,6	452,6	437,5	422,5
50	407,4	395,0	382,5	370,1	357,6	345,2	334,9	324,6	314,3	304,0
60	293,7	285,1	276,5	268,0	259,4	250,8	243,6	236,4	229,3	222,1
70	214,9	208,9	202,8	196,8	190,7	184,7	179,6	174,5	169,5	164,4
80	159,3	155,0	150,7	146,3	142,0	137,7	134,0	130,4	126,7	123,1
90	119,4	116,3	113,2	110,1	107,0	103,8	101,1	98,5	95,8	93,1
100	90,45	88,16	85,87	83,58	81,29	79,00	77,03	75,06	73,09	71,12
110	69,15	67,45	65,75	64,06	62,36	60,66	59,19	57,72	56,26	54,79
120	53,32	52,05	50,78	49,50	48,23	46,96	45,85	44,85	43,84	42,84
130	41,43	40,47	39,51	38,55	37,59	36,63	35,79	34,95	34,11	33,27
140	32,43	31,70	30,97	30,23	29,50	28,77	28,13	27,49	26,84	26,20
150	25,56									

Poznámka: hodnoty odporu uvedené tučně jsou převzaty z tabulky výrobce perličkového termistoru, ostatní hodnoty jsou vypočteny lineární interpolací s tím, že chyba způsobená výpočtem je o řád nižší, než výrobcem uváděná tolerance.



### Čidla teploty KTY 81/xyz

#### Základní technické parametry

Čidlo	Křemíkový polovodičový odpor
Rozsah pracovních teplot	-55 °C až 150 °C *
Odpor při 25 °C (typický)	KTY81/110: 1000 Ω KTY81/121: 990 Ω KTY81/122: 1010 Ω KTY81/210: 2000 Ω KTY81/220: 2000 Ω
Dlouhodobá stabilita odporu R <sub>25</sub>	KTY81/1xx: typický 1,6Ω po 10000 hod. při t = 150 °C KTY81/2xx: typický 3,2Ω po 10000 hod. při t = 150 °C
Doporučený stejnosměrný měřicí proud	0,6mA až 1mA
Teplotní koeficient při 25 °C (typický)	0,79 % / °C

\*Skutečný rozsah pracovních teplot snímače je dán konstrukcí a technologií.

Teplotní závislost odporu čidla je v rozsahu teplot - 55 °C až 130°C vyjádřena rovnicí:

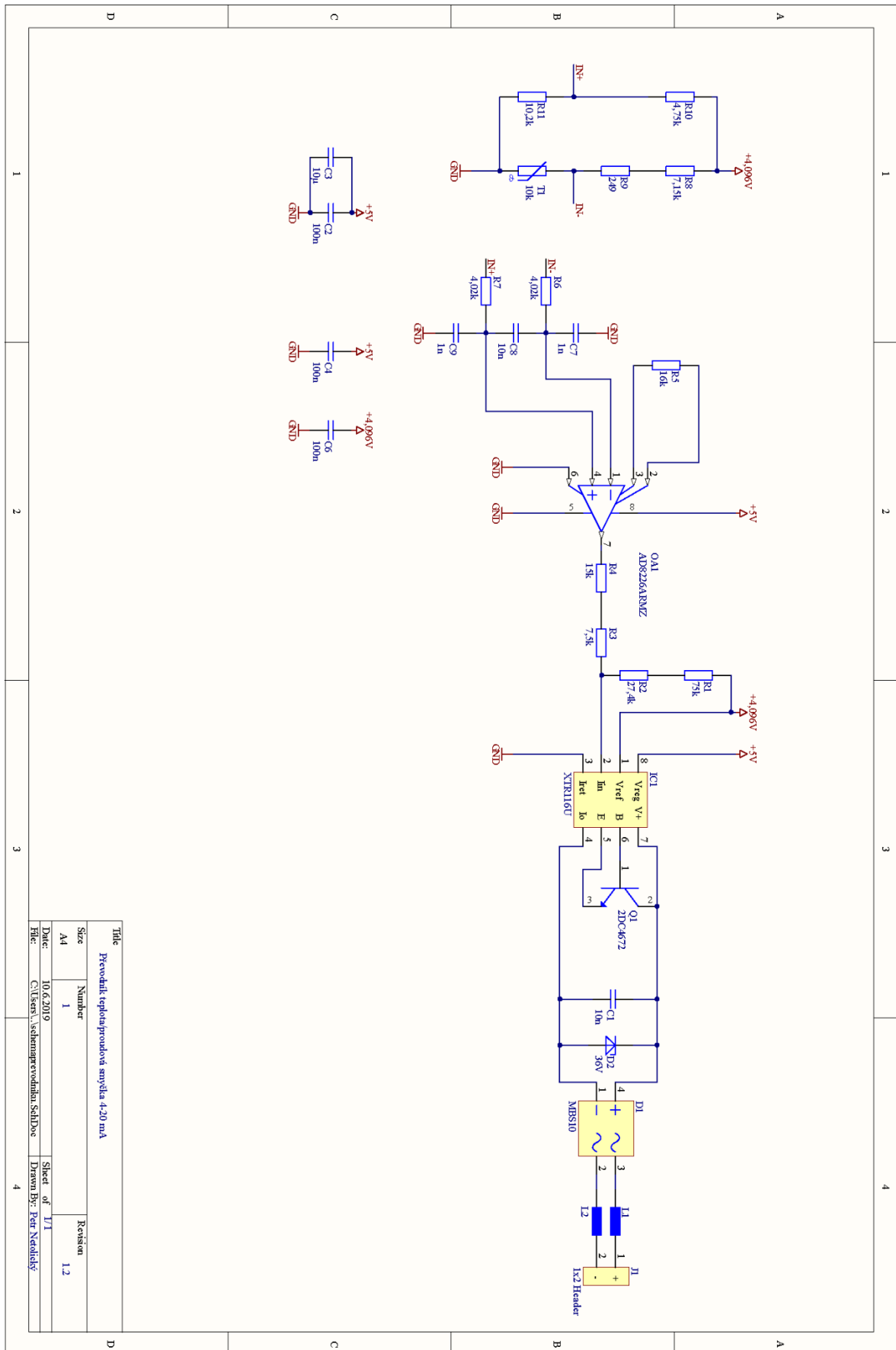
$$R_{KTY} = R_{25}(1 + aT + bT^2)$$

kde: T = t - 25 °C (rozdíl mezi měřenou teplotou a referenční teplotou 25 °C)

$$a = 7,871 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \quad b = 1,861 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

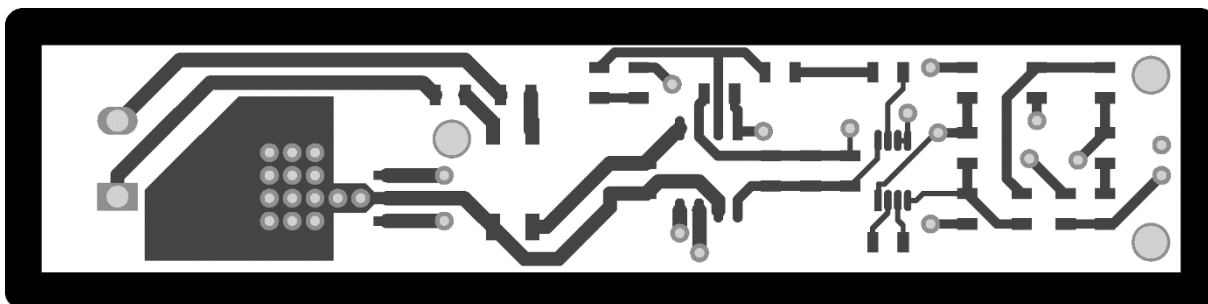
#### Závislost hodnoty odporu a tolerančního pole na teplotě:

teplota [°C]	KTY81/110			KTY81/121				KTY81/122				
	Odpor [Ω]		ΔT	Odpor [Ω]		ΔT		Odpor [Ω]		ΔT		
	min.	typ.	max.	[°C]	min.	typ.	max.	[°C]	min.	typ.	max.	[°C]
-55	475	490	505	±3,02	471	485	500	±3,02	480	495	510	±3,02
-50	500	515	530	±2,92	495	510	524	±2,92	505	520	535	±2,92
-40	552	567	582	±2,74	547	562	576	±2,74	558	573	588	±2,74
-30	609	624	638	±2,55	603	617	632	±2,55	615	630	645	±2,55
-20	669	684	698	±2,35	662	677	691	±2,35	676	690	705	±2,35
-10	733	747	761	±2,14	726	740	754	±2,14	741	755	769	±2,14
0	802	815	828	±1,91	794	807	820	±1,91	810	823	836	±1,91
10	874	886	898	±1,67	865	877	889	±1,67	883	895	907	±1,67
20	950	961	972	±1,41	941	951	962	±1,41	960	971	982	±1,41
25	990	1000	1010	±1,27	980	990	1000	±1,27	1000	1010	1020	±1,27
30	1029	1040	1051	±1,39	1018	1029	1041	±1,39	1039	1050	1062	±1,39
40	1108	1122	1136	±1,64	1097	1111	1125	±1,64	1120	1134	1148	±1,64
50	1192	1209	1225	±1,91	1180	1196	1213	±1,91	1204	1221	1238	±1,91
60	1278	1299	1319	±2,19	1266	1286	1305	±2,19	1291	1312	1332	±2,19
70	1369	1392	1416	±2,49	1355	1378	1402	±2,49	1382	1406	1430	±2,49
80	1462	1490	1518	±2,80	1447	1475	1502	±2,80	1477	1505	1533	±2,80
90	1559	1591	1623	±3,12	1543	1575	1607	±3,12	1574	1607	1639	±3,12
100	1659	1696	1733	±3,46	1642	1679	1716	±3,46	1676	1713	1750	±3,46
110	1762	1805	1847	±3,83	1745	1786	1828	±3,83	1780	1823	1865	±3,83
120	1967	1915	1963	±4,33	1849	1896	1943	±4,33	1886	1934	1982	±4,33
125	1919	1970	2020	±4,66	1900	1950	2000	±4,66	1938	1989	2041	±4,66
130	1970	2023	2077	±5,07	1950	2003	2056	±5,07	1989	2044	2098	±5,07
140	2065	2124	2184	±6,28	2044	2103	2162	±6,28	2085	2146	2206	±6,28
150	2145	2211	2277	±8,55	2124	2189	2254	±8,55	2167	2233	2299	±8,55

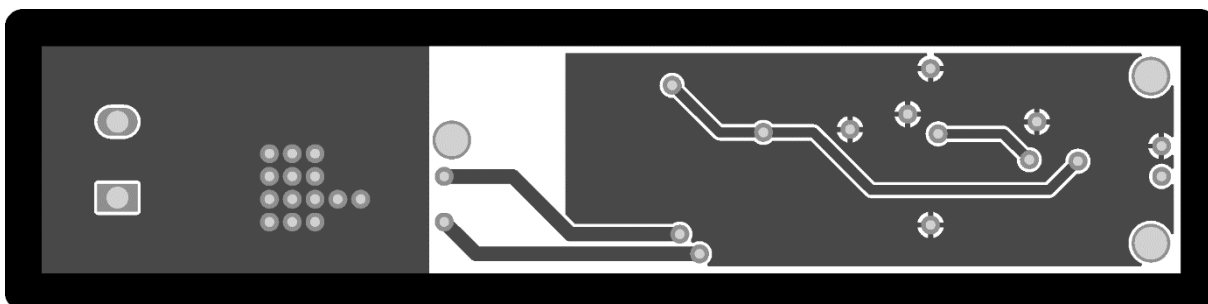


Title		Převodník teploty proudová smyčka 4-20 mA	
Size	Number	Revision	
A4	1	1.2	
Date:	10.6.2019	Sheet of	1/1
File:	C:\Users\petr\Documents\SchDoc	Drawn By:	Petr Netolický
		4	

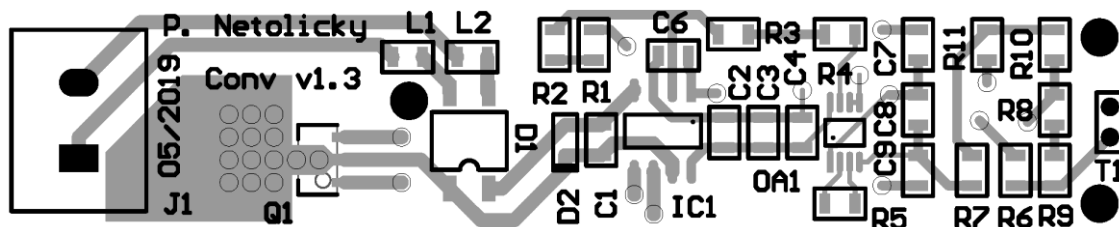
Příloha 5 Schéma zapojení převodníku



Příloha 6 Deska plošného spoje TOP 2:1



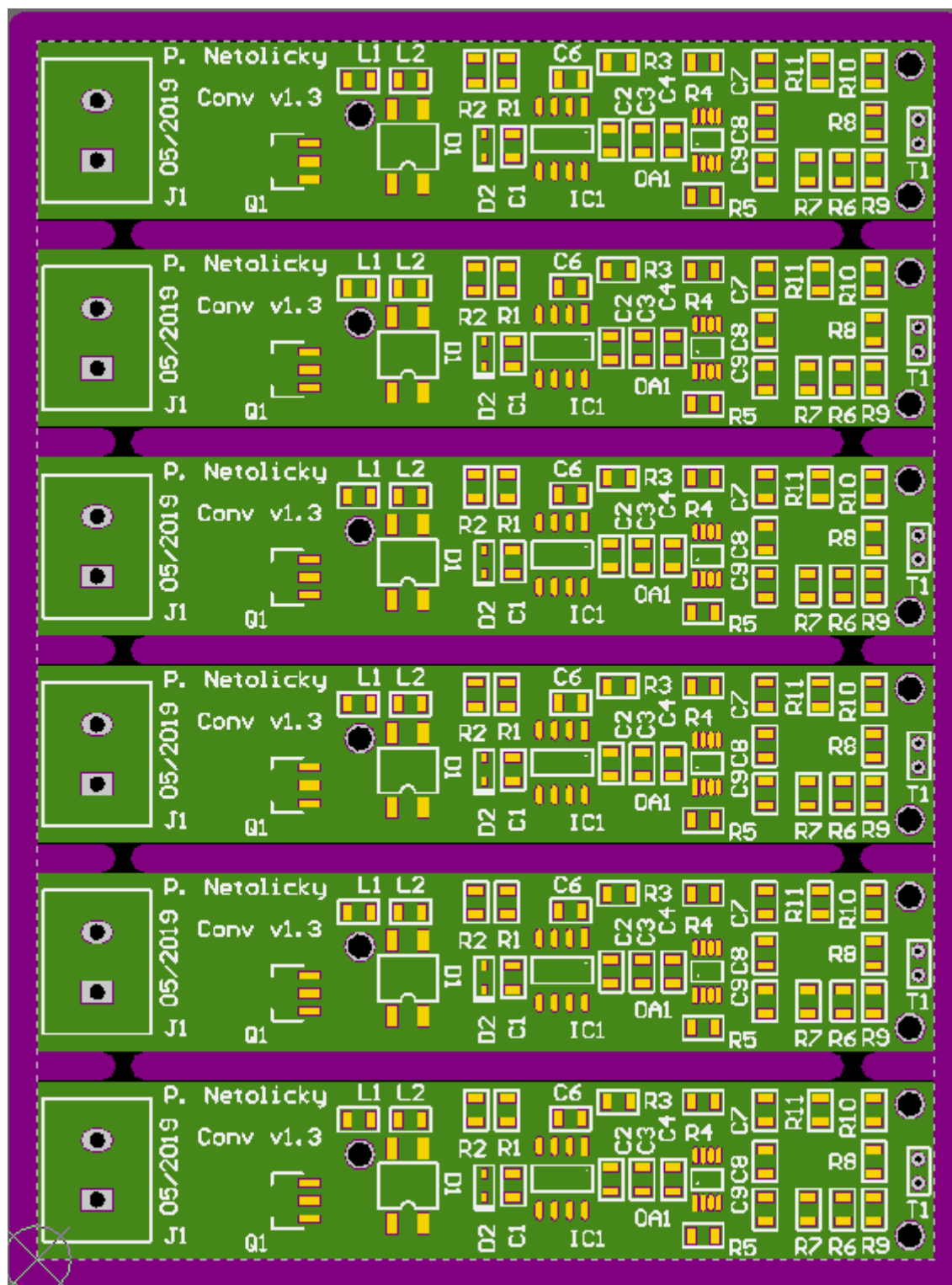
Příloha 7 Deska plošného spoje BOTTOM 2:1



Příloha 8 Osazovací schéma TOP 2:1

Hodnota	Popis	Součástka	Pouzdro	Počet
10n	Keramický kapacitor 500V 5%	C1, C8	R0805	2
100n	Keramický kapacitor 50V 5%	C2, C4, C6	R0805	3
10 $\mu$	Keramický kapacitor 16V 20%	C3	R0805	1
1n	Keramický kapacitor 1KV 5%	C7, C9	R0805	2
MBS10	Diodový můstek, 1 kV, 500 mA	D1	SMD DIP	1
36V	Zenerova dioda 36V	D2	SOD 323	1
XTR116U	XTR116U vysílač proudové smyčky	IC1	SO-8	1
1x2 Header	1x02 5mm	J1		1
742792097	Feritový korálek 0.3OHM, 1A	L1, L2	R0805	2
AD8226ARM Z	Přístrojový operační zesilovač rail-to-rail	OA1	MSOP8	1
2DC4672	Tranzistor NPN 50V 3A	Q1	SOT89	1
75k	Rezistor 75K Ohm 0.1% 0.125W(1/8W) $\pm$ 10ppm/C	R1	R0805	1
27,4k	Rezistor 27.4K OHM 0.1% 1/8W	R2	R0805	1
7,5k	Rezistor 7.5K OHM 0.1% 1/8W	R3	R0805	1
15k	Rezistor 15K OHM 0.1% 1/8W	R4	R0805	1
16k	Rezistor 16K OHM 0.1% 1/8W	R5	R0805	1
4,02k	Rezistor 4.02K OHM 0.1% 1/8W	R6, R7	R0805	2
7,15k	Rezistor 7.15K OHM 0.1% 1/8W	R8	R0805	1
249	Rezistor 249 OHM 0.1% 1/8W	R9	R0805	1
4,75k	Rezistor 4.75K OHM 0.1% 1/8W	R10	R0805	1
10,2k	Rezistor 10.2K OHM 0.1% 1/8W	R11	R0805	1
10k	Termistor NTC 10K Ohm	T1		1

## Příloha 9 Seznam použitých součástek



Příloha 10 Panelizovaný tištěný spoj převodníku

Teplota na etalonu [°C]	Naměřený proud protékající smyčkou [mA]	Ideální převodní charakteristika [mA]	Odchylka $\delta$ [mA]	Odchylka $\delta$ [°C]	Odchylka po korekci z kalibračního listu etalonu $\delta$ [°C]
14	4,06	4	0,06	0,075	-0,015
15	4,18	4	0,18	0,225	0,135
16	4,95	4,8	0,15	0,1875	0,0975
17	5,74	5,6	0,14	0,175	0,085
18	6,54	6,4	0,14	0,175	0,085
19	7,34	7,2	0,14	0,175	0,085
20	8,11	8	0,11	0,1375	0,0475
21	8,91	8,8	0,11	0,1375	0,0475
22	9,7	9,6	0,1	0,125	0,035
23	10,51	10,4	0,11	0,1375	0,0475
24	11,3	11,2	0,1	0,125	0,035
25	12,13	12	0,13	0,1625	0,0725
26	12,92	12,8	0,12	0,15	0,06
27	13,73	13,6	0,13	0,1625	0,0725
28	14,52	14,4	0,12	0,15	0,06
29	15,32	15,2	0,12	0,15	0,06
30	16,14	16	0,14	0,175	0,085
31	16,94	16,8	0,14	0,175	0,085
32	17,69	17,6	0,09	0,1125	0,0225
33	18,47	18,4	0,07	0,0875	-0,0025
34	19,27	19,2	0,07	0,0875	-0,0025
35	19,82	20	-0,18	-0,225	-0,315
36	20,17	20,8	-0,63	-0,7875	-0,8775
37	20,5	21,6	-1,1	-1,375	-1,465
38	20,84	22,4	-1,56	-1,95	-2,04
39	21,1	23,2	-2,1	-2,625	-2,715
40	21,4	24	-2,6	-3,25	-3,34

Příloha 11 Naměřená převodní charakteristika a vypočtené odchylky



**Český metrologický institut**

Okružní 31, 638 00 Brno  
tel. +420 545 555 111  
www.cmi.cz



**Kalibrační laboratoř č. 2202 akreditovaná Českým institutem pro akreditaci, o.p.s. podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005**

**Pracoviště:** Oblastní inspektorát Brno, Okružní 31, 638 00 Brno  
Oddělení teploty a vlhkosti, tel. +420 545 555 314, fax. +420 545 555 183

## KALIBRAČNÍ LIST

**6036-KL-E0170-19**

**Datum vystavení:** 8. března 2019

List 1 ze 2 listů

**Zákazník:**

**Uživatel:** -

**Měřidlo:** Digitální elektronický teploměr

**Výrobce:** Ahlborn

**Typ:** Almemo 2890-9

**Výrobní číslo:** H10050133

**Evid. číslo:** B045

**Popis:** rozlišovací schopnost 0,01 °C,  
vstup M0, v.č. 3406/0912, e.č. B046  
vstup M1, v.č. 3407/0912, e.č. B047  
vstup M2, v.č. 2259/0317, e.č. B048  
vstup M3, v.č. 2258/0317, e.č. B049  
vstup M4, v.č. 3410/0912, e.č. B050  
vstup M5, v.č. 3411/0912, e.č. B051  
vstup M6, v.č. 3412/0912, e.č. B052  
vstup M7, v.č. 3413/0912, e.č. B053

Výsledky kalibrace byly získány za podmínek a s použitím postupů uvedených v tomto kalibračním listě a vztahují se pouze k době a místu provedení kalibrace.

**Datum kalibrace:** 7. března 2019

**Kalibraci provedl(a):**

Petr Mihula



**Vedoucí oddělení:**

Ing. Jirí Bílek

*Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.*

Příloha 12 Kalibrační list ústředny a Pt100 strana 1



## KALIBRAČNÍ LIST

6036-KL-E0170-19

List 2 ze 2 listů

**Použité etalony:** odporový snímač teploty Ametek Pt100, v.č. 534122-02, kalibrační list 6036-KL-O0028-18  
 odporový snímač teploty ASP Pt100, v.č. 66875, kalibrační list 6036-KL-O0079-17  
 odporový snímač teploty Fluke Pt100, v.č. 876213, kalibr. list 6036-KL-O0077-18  
 odporový most ASL F500, v.č. 004786/01, kalibrační list 6011-KL-L0011-17

**Kalibrační postupy:** 133-MP-C004

**Podmínky prostředí:** teplota:  $(23 \pm 3) ^\circ\text{C}$

**Podmínky kalibrace:** měřidlo bylo kalibrováno dle interních kalibračních postupů při ponoru 250 mm na etalonálním zařízení ČMI OI Brno. Během kalibrace bylo měřidlo napájeno z adaptéru.

**Výsledky kalibrace:**

Údaj etalonu $t_{90}$ $^\circ\text{C}$	Údaj měřidla $t_m$ $^\circ\text{C}$									Nejistota $U$ $^\circ\text{C}$
	B046	B047	B048	B049	B050	B051	* B052	B052	B053	
-20,00	-20,00	-20,02	-19,97	-19,99	-20,00	-20,00	-20,06	-20,06	-20,06	0,06
0,00	0,03	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02	0,03	-0,01	-0,02	0,05
37,00	37,09	37,08	37,13	37,13	37,11	37,08	37,18	37,08	37,04	0,06
121,00	121,01	120,98	121,04	121,04	121,05	120,98	121,19	120,97	120,94	0,07
Konstanty:										
Faktor	0,9991	0,9986	0,9993	0,9992	0,9995	0,9989	1,0021	1,0005	0,9990	
Zakl.hodnota	0,08	0,12	-0,07	0,09	0,01	-0,01	0,00	0,03	0,02	

\* Hodnoty a konstanty před seřazením

Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA-4/02. Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu  $k$ , který odpovídá pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %, což pro normální rozdělení odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 2$ .

Konec kalibračního listu.

Český metrologický institut  
 Oblastní inspektorát Brno  
 Okružní 31  
 638 00 Brno  
 -4-

Tento dokument nesmí být bez písemného souhlasu provádějící laboratoře rozmnožován jinak než v celkovém počtu listů.