



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ TEPLIT

TEMPERATURE SENSORS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Mudrák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Michal Mudrák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Snímače pro měření teplot

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Současný stav poznání v oblasti teplotních senzorů a jejich porovnání, co do přesnosti, vhodnosti použití a dynamické odezvy. Navržení metodiky kalibrace teplotních senzorů.

### **Cíle bakalářské práce:**

Zpracujte rešerši současného stavu poznání v oblasti teplotních senzorů s rozdělením podle metody převodu teploty na elektrickou veličinu. Rozbor možnosti různých snímačů podle aplikací, přesnosti měření a dynamické odezvy. Popis začlenění senzorů do měřicího systému. Vypracování metodiky kalibrace teplotních senzorů a jejich praktické provedení pro některé typy snímačů. Nové trendy v oblasti měření teplot.

### **Seznam doporučené literatury:**

KREIDL, M. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.

MICHALSKI, L., ECKERSDORF, L., KUCHARSKI, J., MCGHEEJ. Temperature measurement. 2nd ed. New York: J. Wiley, 2001. ISBN 04-718-6779-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

.....  
prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

.....  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou v oblasti dotykových teplotních čidel. Začátek práce je věnován definicím základních pojmů, které úzce souvisí s daným tématem. Následuje rozdělení, popis principů a provedení dotykových senzorů s elektrickým výstupem. Jsou zde zmíněny i vhodnosti použití a srovnání jednotlivých senzorů. Dále je popsán princip kalibrace odporových a termoelektrických snímačů. V této části jsou také shrnuty nejčastější zdroje chyb kalibrace a nejistoty měření. V poslední části práce je praktická ukázka lineární kalibrace vybraných dotykových snímačů teploty.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Měření teploty, teplota, teplotní senzor, čidlo, kalibrace

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with problem in the field of temperature sensors. The beginning of the work is devoted to the definitions of the basic terms which are closely related to this topic. It is followed by distribution, description of the principle and realization of touch sensors with an electrical output. Marginally are discussed suitability of use and comparison of individual sensors. Next, the principle of calibration of resistance and thermoelectric sensors is described. The most common sources of calibration errors and measurement offsets are also summarized. At last, there is a practical example of linear calibration of chosen temperature sensors.

## KEYWORDS

Temperature measurement, temperature, temperature sensor, sensor, calibration

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MUDRÁK, Michal. *Snimače pro měření teplot* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117268>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Josef Štětina.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma „Snímače pro měření teplot“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Josefem Štětinou, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 23. května 2019

.....

Michal Mudrák

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji prof. Ing. Josefovi Štětinovi, Ph.D., vedoucímu bakalářské práce, za odborné vedení, poskytnutou pomoc a cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.



## OBSAH

Úvod .....	10
1 Definice základních pojmů .....	11
2 Snímače pro dotykové měření .....	13
2.1 Kovové odporové senzory teplot .....	13
2.2 Polovodičové odporové senzory teploty .....	17
2.3 Monolitické PN senzory teploty .....	19
2.4 Termoelektrické snímače .....	21
3 Srovnání senzorů teploty .....	24
3.1 Použití dotykových senzorů .....	24
3.2 Použití u spalovacích motorů .....	24
3.3 Vlastnosti dotykových senzorů teploty .....	25
4 Kalibrace .....	27
4.1 kalibrace odporových snímačů .....	27
4.2 Kalibrace termoelektrických snímačů .....	27
4.3 Nejistoty měření .....	27
4.4 Zdroje chyb a nejistot .....	29
5 praktická část .....	30
5.1 Popis potřebných vybavení .....	30
5.2 Lineární kalibrace .....	33
5.3 Vyhodnocení .....	36
Závěr .....	37
Použité informační zdroje .....	39
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	41
Seznam příloh .....	42

## ÚVOD

Teplota patří mezi základní veličiny a jednotky SI soustavy. Jedná se o jednu z nejčastěji měřených veličin, která charakterizuje tepelný stav. Můžeme ji chápat jako vlastnost okolí a předmětů. Existuje jen málo vlastností, které nejsou teplotně závislé. Znalost teploty je velmi důležitá, hraje významnou roli ve zdravotnictví, průmyslu, metalurgii a v mnoha dalších oborech. Před mnoha staletími však byly teploměry pro lidi naprosto neznámé, z toho důvodu si nedokázali teplotu žádným způsobem změřit. Určovali teplotu jen díky schopnosti vnímat pocity tepla a chladu, případně na základě barvy rozžhavených předmětů. Díky potřebě určit teplotu okolí, či teplotu kovu při výrobě nástroje, docházelo k ustavičnému vývoji různých způsobů měření teploty.

Historicky prvním teploměrem, byl roku 1592 tzv. vzduchový termoskop. Tento teploměr je založen na principu teplotní roztažnosti vzduchu, byl však velmi nepřesný. Vynalezl ho Galilea Galilei. V roce 1631 vynalezl Jean Rey první kapalinový teploměr. Ten však nefungoval správně, protože jako teploměrná látka byla použita voda. Daniel G. Fahrenheit přichází v roce 1724 s již moderním kapalinovým teploměrem. Jako měrná látka byla použita rtuť. Od té doby vývoj teploměrů neustále pokračuje.

V současnosti existuje velká řada teploměrů, proto jsme schopni změřit teplotu prakticky čehokoliv. U teplotních snímačů se odvozuje teplota z citlivosti na změnu fyzikální veličiny. Z toho vyplývá, že teplotu nelze měřit přímo, jedná se tedy o měření nepřímé. Máme spoustu typů teplotních snímačů dle funkčního principu. Mezi nejrozšířenější patří snímače teploty s elektrickým výstupem (např. odporové) a také snímače s neelektrickým výstupem (např. dilatační). V dnešní době se setkáváme s měřením teplot a teplotními čidly v každodenním životě prakticky neustále. Ať už během jízdy v autě, nebo během výběru zboží z pultového mrazáku, vždy jsou přítomny teplotní snímače, i když si to pravděpodobně mnohokrát neuvědomujeme.

# 1 DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ

## Teplota

Teplota je stavová veličina charakterizující termodynamický stav jakékoliv makroskopické soustavy. Je důsledkem průměrné rychlosti neuspořádaného pohybu částic. Všechny fyzikální veličiny, které popisují stav soustavy, jsou nezávislé na čase. Jedná se o energii, která připadá na jednu částici tělesa. Teplota je veličina, kterou nelze měřit přímo. Tuto veličinu můžeme měřit jen pomocí jiných fyzikálních veličin [7].

## Teplo

Teplo je fyzikální veličina, která popisuje změnu termodynamického stavu systému. Souvisí s pohybem soustavy těles, přechází z jednoho tělesa na druhé při tepelné výměně.

## Teplotní rozdíl

Jedná se o rozdíl dvou teplot s různou hodnotou. Rozdíly hodnot termodynamické teploty a odpovídajících hodnot Celsiovy teploty si jsou vždy rovny. Jednotky, v nichž se vyjadřují, Kelvin (K) a Celsiův stupeň (°C) jsou totožné. Pro rozdíly teplot poté platí vztahy:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (1)$$

kde  $\Delta T$  jsou rozdíly dvou hodnot teploty.

## Teplotní stupnice

Teplotní stupnice je posloupnost číselných hodnot teploty přiřazených různým stavům zvolené soustavy, tělesa, popř. látky. Součástí každé teplotní stupnice jsou její základní neboli pevné body. Teplotu lze vyjadřovat různými způsoby.

### Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90

- byla vytvořena v roce 1927, tato stupnice byla postupně upravována
- její poslední znění je z roku 1990 proto nese označení ITS-90
- je definována 17 -ti pevnými body při rovnovážných stavech vybraných látek (trojné body, body tání, tlaky syté páry)

### Fahrenheitova (teplotní) stupnice

- Fahrenheitova teplota se dosud běžně používá zejména v USA a ve Velké Británii
- jedná se o teplotu vyjádřenou v jednotce Fahrenheitův stupeň, značka °F jejíž číselná hodnota vyjádřená jako

$$F = \frac{9 * C}{5} + 32 \quad (2)$$

kde C je teplota ve stupních Celsia a F je teplota ve stupních Fahrenheita.

### Celsiova (teplotní) stupnice

- Celsiova teplota, značka  $t$  je definována jako rozdíl termodynamické teploty  $T$  a teploty  $T_0 = 273,15 \text{ K}$
- jednotka Celsiovy teploty se nazývá Celsiův stupeň, značka  $^{\circ}\text{C}$ , což je mezinárodně stanovený zvláštní název pro jednotku Kelvin při vyjadřování hodnot Celsiovy teplot

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (3)$$

### Kelvinova (termodynamická) stupnice

- termodynamická teplota, značka  $T$ , jedna ze základních veličin Mezinárodní soustavy jednotek a je definována na základě vztahu

$$T = \frac{Q}{Q_z} T_z, \quad (4)$$

kde  $Q$  je teplo, které přijme látka během jednoho cyklu, v níž tento vratný děj probíhá, od soustavy (tepelné lázně) s konstantní teplotou  $T$  a  $Q_z$  je teplo, které během jednoho cyklu tato látka odevzdá další soustavě (lázni) s konstantní teplotou  $T_z$ .

- tento vztah je platný pro vratný Carnotův cyklus
- základní jednotka termodynamické teploty se nazývá Kelvin, značka  $\text{K}$  a je definována fixací číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty  $1,380\,649 \times 10^{-23}$

### Teplotní čidlo

Teplotní čidla jsou základní součástí jakéhokoliv diagnostického zařízení, které se používá ke snímání teploty. Jejich princip spočívá na přeměně teploty, jako fyzikálního stavu měřeného média, na elektrickou nebo mechanickou veličinu, která se poté zpracovává a vyhodnocuje příslušným měřicím zařízením.

Teplota může být sledována pomocí různých snímačů. U těchto snímačů se odvozuje z citlivosti na změnu fyzikální veličiny. Existuje šest základních typů teplotních snímačů. Konkrétně se jedná o odporové, termočlánky, termistory, infračervené teploměry, bimetalové teploměry, snímače s roztažitelnými kapalinami a snímače se změnou stavu [14].

## 2 SNÍMAČE PRO DOTYKOVÉ MĚŘENÍ

Snímač obecně znamená označení pro technické zařízení. Toto zařízení má za úkol zkoumat a snímat různé fyzikální veličiny, technické stavy nebo vlastnosti látek.

V našem případě se budeme zabývat snímači teploty pro dotykové měření teploty. Jedná se o technické čidlo, které má zabudovaný teploměr, s jehož pomocí snímá teplotu v důležitých bodech, které nás zajímají. V obvyklých případech se používá jako bezpečnostní prvek, který má za úkol kontrolovat a zabezpečit systém proti přehřátí.

### 2.1 KOVOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLOT

Kovové odporové senzory teploty pracují na principu závislosti elektrického odporu kovu na teplotě. Atomy krystalové mřížky kovu s klesající teplotou snižují amplitudu svých kmitů a kladou tak menší odpor průchodu elektronů [1]. Jejich vysoká přesnost a stabilita měření jsou důvodem pro jejich častou aplikaci ve všech odvětvích průmyslu.

Vlastnosti těchto senzorů je možné popsat níže uvedenými parametry:

Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu  $\alpha$

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial R}{\partial T} \quad [K^{-1}] \quad (5)$$

kde  $R$  [ $\Omega$ ] je elektrický odpor a  $T$  [K] je termodynamická teplota.

Pro malý rozsah teplot 0 °C až 100 °C můžeme použít s určitou nejistotou lineární vztah  $R_t$

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad [\Omega] \quad (6)$$

kde  $R_0$  je odpor čidla při 0 °C.

Můžeme tak stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu  $\alpha$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \cdot R_0} \quad [K^{-1}] \quad (7)$$

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

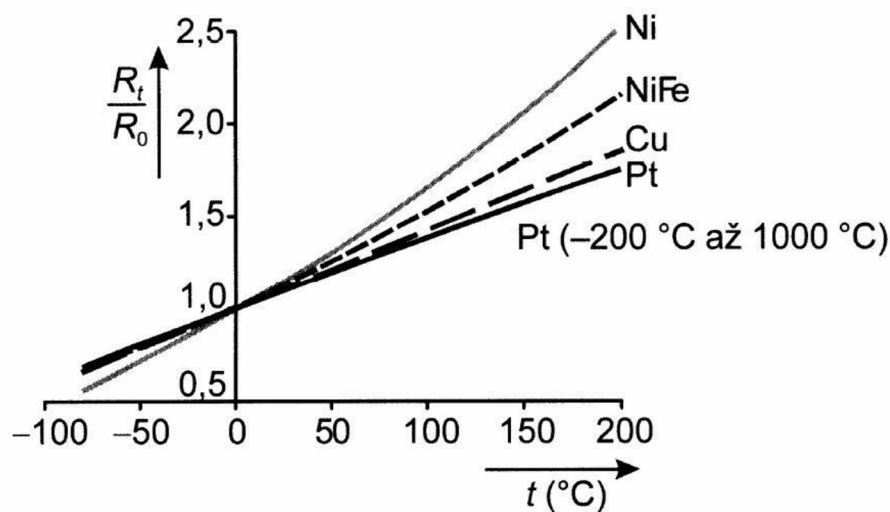
Mezi další základní parametry odporových snímačů patří poměr odporů  $W_{100}$ .

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad [-] \quad (8)$$

Pro větší rozsah teplot, již nelze použít lineární vztahy. Níže uvedená tabulka udává v praxi používané materiály vhodné pro odporové kovové senzory a jejich vlastnosti. Závislost těchto materiálů je pak uvedena na obrázku 1.

Tabulka 1 Materiály používané pro kovové snímače teploty [1]

materiál	$\alpha \cdot 10^2$ [K <sup>-1</sup> ]	teplotní rozsah [°C]	poměr odporů W
platina	0,385 až 0,391	-20 až 850	1,385
nikl	0,617	-70 až + 150	1,618
měď	0,426 až 0,433	-50 až + 150	1,426



Obrázek 1 Teplotní závislost odporových kovových snímačů [1]

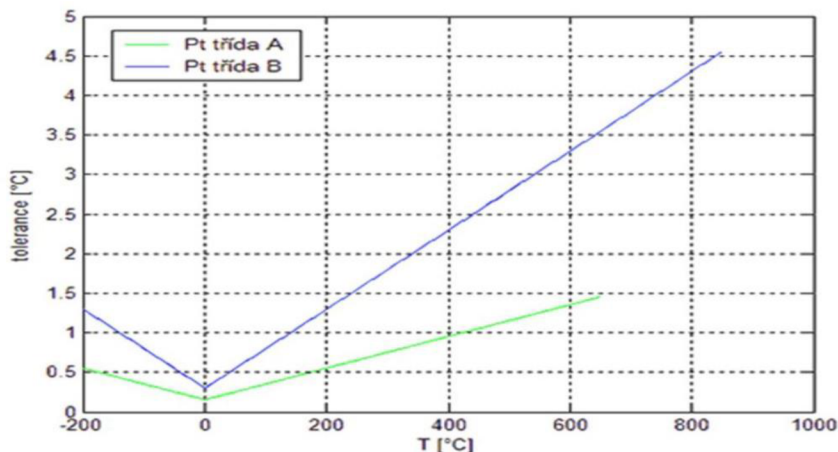
### 2.1.1 PLATINOVÉ

Díky jejím vynikajícím vlastnostem jako je chemická netečnost, časová stálost, vysoká čistota (čistota 99,999 %), ale také vysoká teplota tavení (1768,3 °C), lze zařadit odporové platinové snímače teploty mezi nejčastěji používané materiály pro výrobu odporových kovových snímačů teploty [1].

Běžná hodnota odporu platinových senzorů je 100 Ω při 0 °C, ale vyrábí se také s hodnotou 50 Ω, 200 Ω, 500 Ω, 1000 Ω, 2000 Ω. Za zmínku taktéž stojí, že se vyrábějí také vysokoteplotní snímače až do teploty 1100 °C.

Platinové snímače lze rozdělit do dvou tolerančních tříd, jak můžeme vidět na obrázku 2, dle doporučení IEC – 751 (International Electrotechnical Commission) [3]:

- třída A má rozsah teploty od -200 °C do 650 °C
- třída B má rozsah teploty od -200 °C do 850 °C.



Obrázek 2 Tolerance Pt standartních měřicích odporů dle IEC [2]

### 2.1.2 NIKLOVÉ

Tyto snímače se v drtivé většině případů vyrábějí tenkovrstvou technologií. Mezi výhody niklových snímačů patří jejich rychlá odezva, jejich velká citlivost a malé rozměry. Avšak ve srovnání s platinovými snímači trpí poměrně velkou nelinearitou, mají omezený teplotní rozsah, čehož si můžeme všimnout v tabulce 1 a mají horší dlouhodobou stálost. Niklové snímače se vyrábějí kromě základní hodnoty odporu  $R_{100} = 100 \Omega$  také s hodnotou  $200 \Omega$ ,  $500 \Omega$ ,  $1000 \Omega$ ,  $2000 \Omega$  obdobně jako platinové [3].

### 2.1.3 MĚDĚNÉ

Měděné senzory se příliš nepoužívají kvůli jejich malé rezistivitě a snadné oxidaci. Existují ve formě vinutých čidel s hodnotou odporu  $50 \Omega$ ,  $100 \Omega$ . Díky jejich vlastnostem je lze použít pro přímé měření teploty měděného vinutí elektromotoru [2].

### 2.1.4 KONSTRUKCE ODPOROVÝCH KOVOVÝCH SNÍMAČŮ TEPLoty

#### Čidla vrstvá

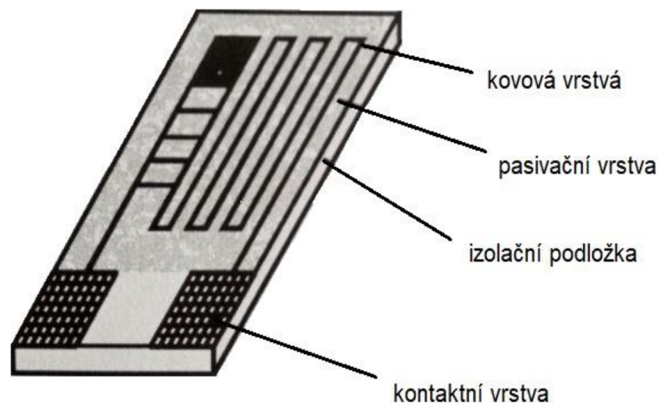
Na vrstevném čidle je nanesená odporová vrstva z Pt, Ni, která nahrazuje vinutí. Konkrétně je nanesena na nosné destičce (substrátu) z korundové keramiky. Ve srovnání s čidly vinutými mají vzhledem k použité technologii poměrně nízkou cenu a vysokou otěruvzdornost. Pro nanesení této vrstvy se používají dvě technologie – tlustovrstvá a tenkovrstvá.

#### Tlustovrstvá technologie

Tlustovrstvá technologie spočívá v nanášení platinové vrstvy ve formě pasty na substrát sítotiskem. Poté dochází k tepelné stabilizaci. Laserem se nastaví požadovaná hodnota základního odporu ( $R_0$ ) a po rozřezání se na jednotlivá čidla připevní vývody.

### Tenkvrstvá technologie

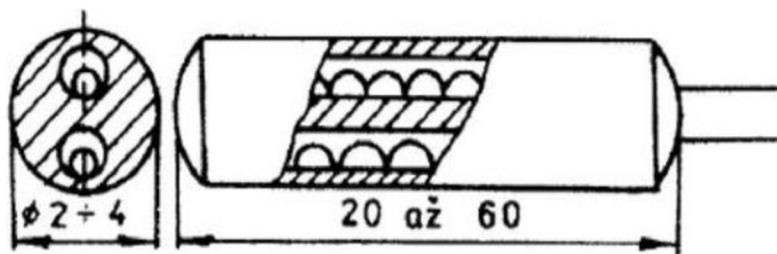
Tenkvrstvá technologie je novější a vyrábí se také pro SMT (surface mount technology). Platinová vrstva se nanáší napařováním ve vakuu nebo napařováním na substrát.



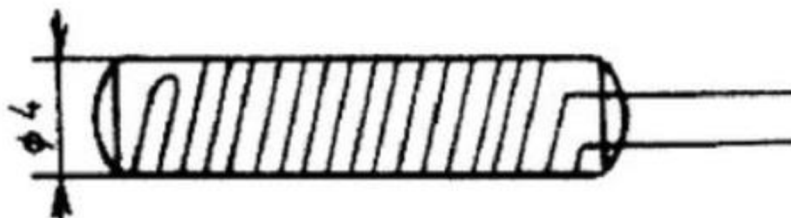
Obrázek 3 Tenkvrstvý platinový nebo niklový měřící [2]

### Čidla vinutá – drátková technologie

Vinuté čidlo tvoří spirálově stočený odporový drátek  $\varnothing 0,007$  mm až  $0,05$  mm. Vinutí je buďto navinuto na povrchu keramických tělísek a přeskleno keramickým smeltem, případně skelnou pájkou, nebo je uloženo v kapilárách válcových keramických nosných tělísek. Čidla se vyrábí s odporem  $R_0 = 100 \Omega$  a  $500 \Omega$ .



Obrázek 4 Čidlo v keramické dvojkapiláře [8]



Obrázek 5 Čidlo na skleněném válečku [8]



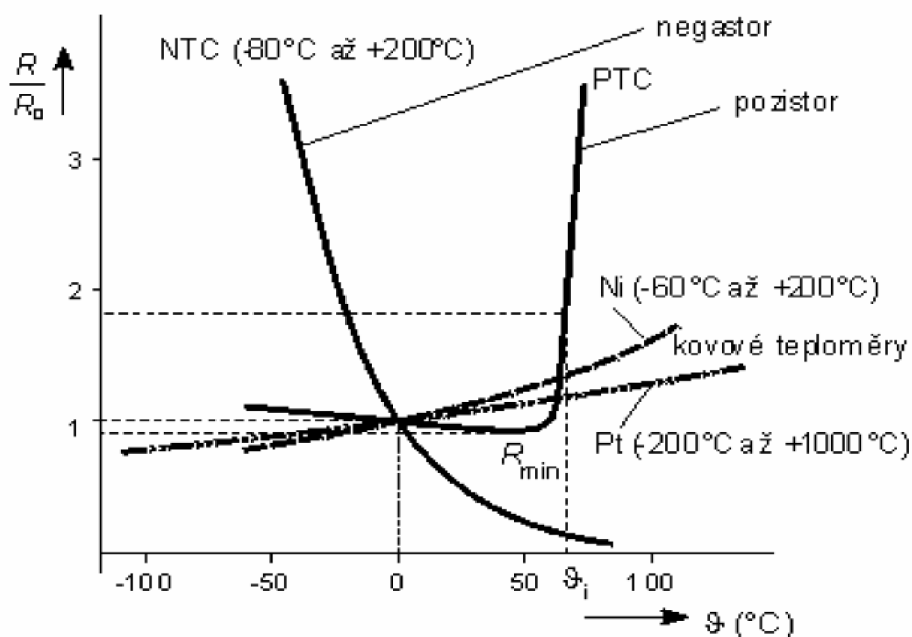
## 2.2 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ SENZORY TEPLoty

Obdobně jako kovové odporové senzory využívají polovodičové odporové senzory závislost odporu na teplotě. Avšak změna odporu je u těchto senzorů způsobena změnou koncentrace nosičů náboje, která je závislá na teplotě. Můžeme je rozdělit na termistory a monokrystalické Si snímače.

### 2.2.1 TERMISTORY

„Termistor je teplotně závislý odpor zhotovený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů.“ [1]

Mezi výhody termistorů patří malé rozměry a malá hmotnost, velká teplotní citlivost a široké rozmezí hodnot odporu ( $0,1 \Omega$  až několik  $M \Omega$ ). Jejich nevýhodou je nelineární charakteristika, avšak v praxi můžeme docílit linearitu pomocí připojení rezistoru do sériového nebo paralelního obvodu. V porovnání s platinovými senzory jsou méně stabilní, což můžeme vidět na níže uvedeném obrázku 6.



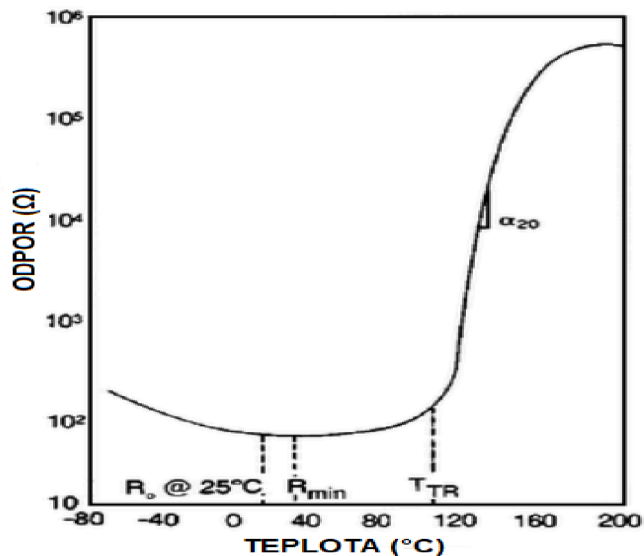
Obrázek 6 Porovnání teplotních závislostí termistorů NTC a PTC s kovovými odporovými senzory ( $R_0$  je odpor při  $0^{\circ}\text{C}$ ) [5]

Termistory se dělí v závislosti na materiálu [4]:

- NTC termistory (Negative Temperature Coefficient) neboli negastory
- PTC termistory (Positive Temperature Coefficient) neboli pozistory

### 2.2.1.1 POZISTORY

Na rozdíl od NTC termistorů u PTC termistorů s rostoucí teplotou se snižuje koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor roste. V níže uvedené závislosti je vyznačeno několik důležitých údajů.



Obrázek 7 Závislost odporu PC termistorů na teplotě [4]

$R_{min}$  – minimální odpor termistoru  $R_0$  při teplotě 25 °C

$T_{TR}$  – teplota přechodu, od tohoto bodu rezistivita materiálu prudce roste

Vyrábějí se z polykrytalické feroelektrické keramiky, např. z titaničitanu barnatého ( $BaTiO_3$ ). Základním parametrem pozistorů je spínací teplota  $t_s$ . Spínací teplotu je možné díky chemickému složení materiálu volit od 60 °C do 180 °C [4].

Použití PTC termistorů plyne z tvaru jejich charakteristiky. Většina aplikací využívá toho, že se termistor průchodem proudu ohřívá sám, ale lze jej i použít jako dvoustavové senzory např. signalizace překročení mezní teploty, dvoupolohová regulace.



Obrázek 8 PTC termistor [10]

### 2.2.1.2 NEGASTORY

Negastory fungují na principu, kdy při rostoucí teplotě dochází ke zvýšení koncentrace nosičů náboje a elektrický odpor klesá. NTC termistory se vyrábějí práškovou technologií spékáním oxidů ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ , apod.). Vylisované senzory se zpevňují slinováním za vysokých teplot, obvykle bývají ve tvaru perličky.

Negastory se vyrábí pro běžné teplotní rozsahy  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  až  $150\text{ }^\circ\text{C}$ , ale i pro speciální termistory pro nízké od teplot  $+4,2\text{ }^\circ\text{C}$  až do vysokých teplot do  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  [4].



Obrázek 9 NTC termistor [9]

### 2.2.2 MONOKRYSTALICKÉ SI SENZORY

Rezistivita narůstá s teplotou. Nárůst rezistivity je způsoben zmenšováním pohyblivosti nosičů náboje vlivem narůstající teploty obdobně jako u kovů, avšak princip vodivosti je odlišný. Pro výrobu těchto senzorů se používá nevlastního polovodiče typu N [1]. Tyto typy vodičů mají dominantní elektronovou vodivost. Křemíkové senzory se obvykle používají pro rozsah teplot  $-50$  až  $150\text{ }^\circ\text{C}$ . Na rozdíl od termistorů mají lepší linearitu a teplotní součinitel je kladný [4].

## 2.3 MONOLITICKÉ PN SENZORY TEPLoty

*„Integrované monolitické senzory teploty jsou nejčastěji založeny na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Tyto senzory mají teplotní rozsah od  $-55\text{ }^\circ\text{C}$  do  $+150\text{ }^\circ\text{C}$ . a nejistotu měření z rozsahu  $0,6\text{ }%$  až  $2\text{ }%$ .“ [1]*

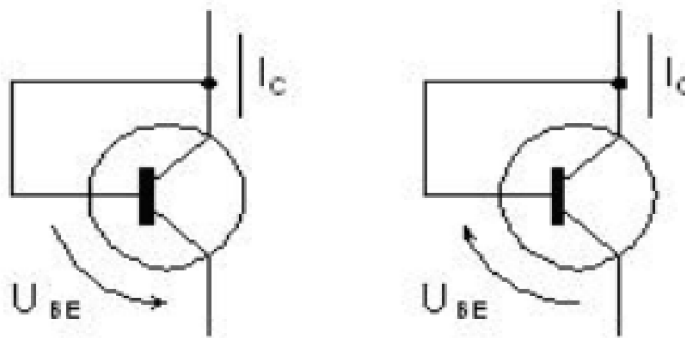
Monolitické PN senzory se vyrábí z křemíku nebo galiumarsenid ( $\text{GaAs}$ ). Tyto materiály mají velmi malou vodivost při nízké teplotě. Je to způsobeno tím, že všechny volné elektrony jsou vázány jako valenční elektrony v krystalové mřížce. Pokud zvýšíme teplotu, dojde ke zvýšení energie. elektrony překonají bariéru valenční oblasti a přechází do vodivé oblasti.

### 2.3.1 TRANZISTOROVÉ PN SENZORY

Tranzistorové PN senzory jsou založeny na obdobném principu jako PN-diody. Jedná se o elektronické součástky obvykle s třemi elektrodami. Tyto elektrody jsou schopny v závislosti na jejich určitém zapojení zesilovat proud nebo napětí, případně obojí zároveň. Díky tomu můžeme tranzistor považovat za aktivní součástku na rozdíl od diody. Tranzistory lze rozlišit podle toho, které nosiče náboje se zúčastňují na vedení proudu tranzistorem.

Rozlišujeme tranzistory [12]:

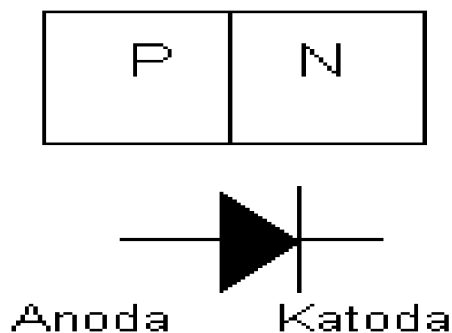
- unipolární (FET – Field Effect Tranzistor)
- bipolární (BJT – Bipolar Junction Tranzistor)
- kombinované (IGBT – Insulated Gate Bipolar Tranzistor)



Obrázek 11 Tranzistorová PN dioda [5]

### 2.3.2 DIODOVÉ PN SENZORY

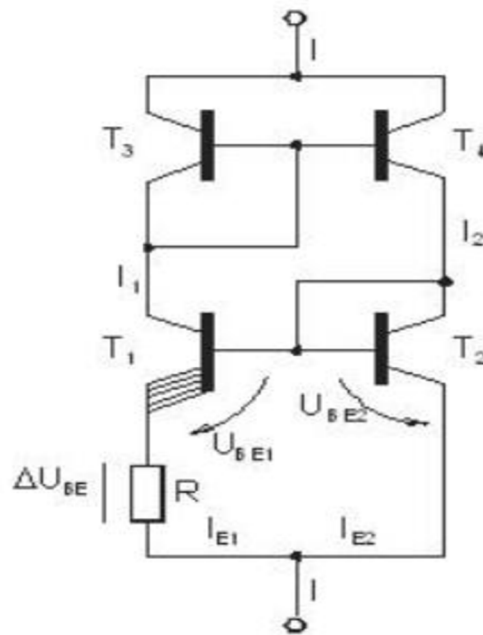
Jedná se o elektronické součástky se dvěma elektrodami. Tyto elektrody obvykle pro jednu polaritu přiloženého napětí brání průtoku elektrického proudu a pro opačnou polaritu propouští elektrický proud. Pro dosažení ventilového účinku se využívá energetická bariéra na styku dvou oblastí odlišných vlastností (u pevných látek). Přiloženým napětím opačné polarity můžeme zvýšit energetickou bariéru a napětím vhodné polarity naopak snížit. Nejčastěji využívanou bariérou je v současné době PN přechod a přechod kov-polovodič [11].



Obrázek 10 PN dioda [13]

### 2.3.3 INTEGROVANÉ PN SENZORY

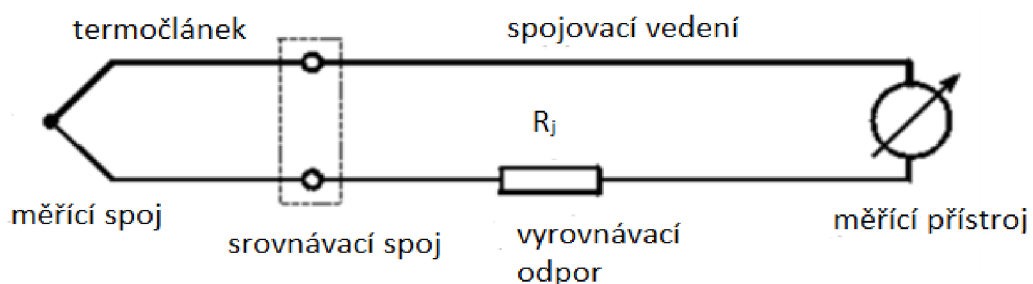
U integrovaných PN senzorů teploty je jediný monolitický prvek tvořen vlastním senzorem teploty a elektronickým obvodem. Obvykle jsou založeny na dvojici bipolárních tranzistorů. Ty jsou většinou napájeny ze zdrojů proudů dle obrázku. Mezi výhody tohoto diferenčního uspořádání patří potlačení chyby způsobené oteplením polovodiče ztrátovým výkonem a vlivu teplotní závislosti proudu [1].



Obrázek 12 Integrovaný PN snímač [5]

## 2.4 TERMOELEKTRICKÉ SNÍMAČE

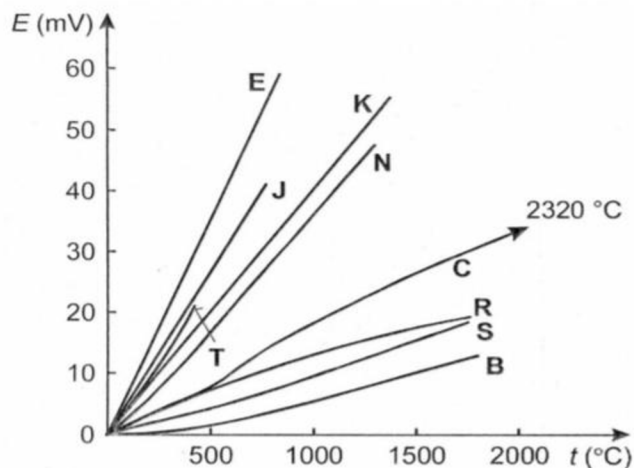
Termoelektrické články pracují na principu Seebeckova jevu, tzn. na základě převodu tepelné energie na elektrickou. Tento jev vzniká tím, že v chladnější části vodiče mají nositelé náboje menší energii. Proto difundují v menším množství do teplejších míst než nositelé z teplejších míst do chladnějších. Termoelektrický snímač slouží pro kontaktní měření teploty. Skládá se ze dvou kovových vodičů, každý vodič je vyroben z jiného materiálu. Na jednom konci jsou tyto vodiče spojeny a vytváří měřící spojení. Tyto vodiče jsou zabaleny a odizolovány pouzdrem. Na druhém konci jsou spojeny s vodičem, který je z dobře vodivého a ohebného [16].



Obrázek 13 Schéma termoelektrického snímače [17]

### 2.4.1 TYPY TERMoeLEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ

Pro výrobu termoelektrických článků se používají páry termoelektrických materiálů. Z hlediska měření je velmi důležité, aby generované termoelektrické napětí bylo co největší. Zároveň je důležité, aby oba kovy byly co nejodolnější proti korozi, chemickým vlivům a dalším okolním vlivům, tak aby se jejich vlastnosti měnily co nejméně v průběhu času. Těmto požadavkům vyhovuje jen několik dvojic materiálů.



Obrázek 14 Charakteristika vybraných termoelektrických článků [1]

Tabulka 2 Typy termočlánků dle IEC 584-1 (ČSN EN 60584-1) [15]

Označení termočlánku	Složení	Teplotní rozsah
K	NiCr-NiAl	0 až +1100
T	Cu-CuNi	-185 až + 300
J	Fe-CuNi	+20 až +700
N	NiCrSi-NiSiMg	0 až +1100
E	NiCr-CuNi	0 až +800
R	PtRh13-Pt	0 až +1600
S	PtRh10-Pt	0 až +1550
B	PtRh30-PtRh6	+100 až +1000

Obvykle se používají typy K a J, skládají se z drahých kovů (S a B) a z obecných kovů. Díky tomu je pokryt teplotní rozsah zhruba -200 °C až +1700 °C. Další možností je použití speciálních termočlánků, např. termočlánky na bázi rhenia a wolframu. Díky nim lze rozsah rozšířit až do cca +2300 °C.

## 2.4.2 KONSTRUKCE TERMoeLEKTRICKÝCH SNÍMAČŮ TEPLoty

### Plášťové termoelektrické články

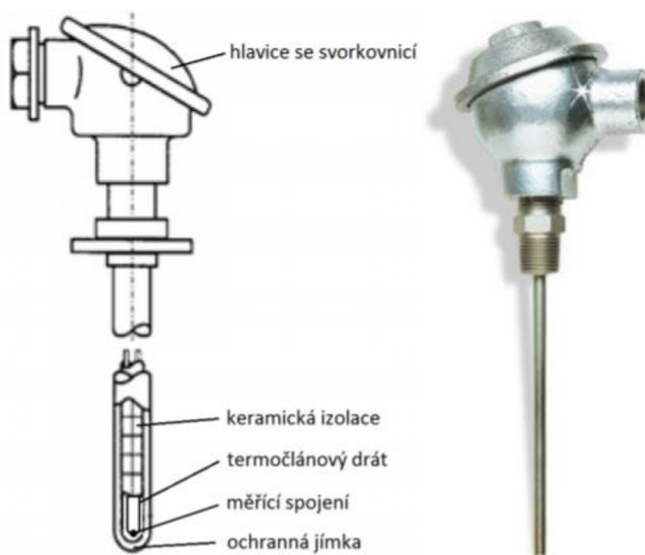
Plášťové termoelektrické články mají větve uloženy v kovovém plášti ve tvaru trubky. Jsou izolovány zhutnělou minerální izolací z  $Al_2O_3$  nebo MgO. Vnější průměr pláště se obvykle pohybuje od 0,1 mm do 8 mm. Plášťový článek může obsahovat až šest termočlánkových větví. Provedení se dělí na izolované, uzemněné a otevřené. Izolované provedení chrání spoj proti vlivům prostředí, má ale delší dobu odezvy než uzemněné nebo otevřené prostředí.



Obrázek 15 Plášťový termočlánek [18]

### Drátové termoelektrické články

Termoelektrický článek u této aplikace tvoří dvě kovové větve. Jsou uloženy v izolačních trubičkách. Většinou se používají keramické trubičky. Tyto trubičky slouží k ochraně obou větví proti vlivům vnějšího prostředí a k elektrické izolaci obou větví. Průměr termoelektrických vodičů je od 0,5 mm do 3,5 mm. Uspořádání se dělí na snímače do jímky, s jímkou, bez jímky, tyčové a sondy k měřicím přístrojům [1].



Obrázek 16 Termočlánek s ochrannou jímkou [16]

### 3 SROVNÁNÍ SENZORŮ TEPLoty

Pro použití v praxi je nutné znát jednotlivé typy dotykových senzorů, aby je bylo možné vhodně použít a nepoškodit tak měřené zařízení. Použijeme-li nevhodný senzor teploty, například z důvodu neznalosti jeho teplotního rozsahu, může dojít v některých případech k poškození měřeného zařízení.

#### 3.1 POUŽITÍ DOTYKOVÝCH SENZORŮ

##### Odporové kovové senzory

Jedná se o velmi rozšířené a přesné senzory teploty. Pro případy, kdy je nutné velice přesného měření teploty, se používají miniaturní teplotní čidla. Vhodné využití nacházejí například v klimatizacích, teplotní sondách nebo medicínské technice.

##### Monolitické PN senzory

Díky tomu, že se jedná o senzory velmi malých rozměrů, jsou tyto senzory vhodné pro použití v integrovaných čípech či miniaturních aplikacích.

##### Odporové polovodičové senzory

Nejčastěji používanými typy polovodičových senzorů jsou negastory. Používají se pro sledování teploty plynů a kapalin, v termostatech nebo pro kontrolu teploty elektrických přístrojů. Pozistory lze použít pro dvoupolohovou regulaci nebo signalizaci překročení mezní teploty. Monokrystalické Si senzory je možné nalézt v klimatizační technice.

##### Termoelektrické senzory

Termoelektrické senzory jsou ze všech zmíněných nejrozšířenější. Můžeme se s nimi setkat takřka kdekoli. Například u motorů, výměníků tepla, v laboratořích nebo elektrárnách, a to hlavně díky jejich nízké ceně a jednoduchosti.

#### 3.2 POUŽITÍ U SPALOVACÍCH MOTORŮ [19],[20],[21]

##### Čidlo teploty chladící kapaliny

- nalezneme ho u výstupu chladící kapaliny z hlavy válců
- podle teploty se mění odpor čidla řídicí jednotka tím nastavuje bohatost směsi
- dva snímače: pro řídicí jednotku motoru a pro teploměr na palubní desce
- teplotní rozsah  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přesnost  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- NTC termistor

##### Čidlo teploty výfukových plynů

- známé také jako lambda sonda
- používá se k regulaci výfukových plynů
- umístěn ve výfukovém systému
- teplotní rozsah  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přesnost  $\pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Termočlánek typ K

##### Čidlo teploty paliva

- podle teploty paliva si řídicí jednotka nastavuje množství vstřikovaného paliva
- teplotní rozsah  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přesnost  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplotní senzor Pt100



**Čidlo teploty nasávaného vzduchu**

- umístěn ve vzdálenosti 0,15m od sacího potrubí
- používá se měření teploty nasávaného vzduchu
- teplotní rozsah -40 °C až +120 °C, přesnost  $\pm 2$  °C
- NTC termistor

**Čidlo teploty motorového oleje**

- používá se k měření teploty motorového oleje
- teplotní rozsah -40 °C až +170 °C, přesnost  $\pm 2$  °C
- teplotní senzor Pt100

**Čidlo teploty spalin turbodmýhadla (EGT)**

- může být umístěno před nebo za turbodmýhadlem
- používá se k mapování tepelných toků, důležité pro zvýšení účinnosti turbodmýhadla
- teplota na vstupu běžně 800 °C, krátkodobě až 1050 °C, přesnost  $\pm 20$  °C
- Termočlánek typ K

**3.3 VLASTNOSTI DOTYKOVÝCH SENZORŮ TEPLoty****Platinové odporové senzory**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vysoká přesnost</li> <li>• časová stálost</li> <li>• velmi dobrá linearita</li> <li>• velký teplotní rozsah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vysoká cena</li> <li>• horší dynamické vlastnosti</li> <li>• zahřívání proudem</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> -20 až 850 °C	

**Niklové odporové senzory**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>• časová odezva</li> <li>• malé rozměry</li> <li>• vysoká přesnost</li> <li>• vysoká úroveň signálu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nižší stálost (dlouhodobá)</li> <li>• horší linearita než u platinových</li> <li>• menší teplotní rozsah</li> <li>• zahřívání proudem</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> -60 až +180 °C	

**Měděné odporové senzory**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>• lze měřit přímo na vinutí</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• slabá rezistivita</li> <li>• lehce oxidují</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> -200 až +200 °C	

**PTC termistory (Pozistory)**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>rychlá časová odezva</li> <li>vysoká citlivost</li> <li>malé rozměry</li> <li>dvoupolohové měření</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>menší stálost</li> <li>malý teplotní rozsah</li> <li>zahřívání proudem</li> <li>nevhodné k běžnému měření</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> záleží na teplotě přechodu +60 až +180 °C	

**NTC termistory (Negastory)**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>rychlá časová odezva</li> <li>vysoká citlivost</li> <li>malé rozměry</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>křehké</li> <li>menší stálost</li> <li>velká nelinearita</li> <li>omezený teplotní rozsah</li> <li>zahřívání proudem</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> běžné -50 až 150 °C, speciální 4 °C až 1000 °C	

**Monokrystalické Si senzory**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>dlouhodobá stabilita</li> <li>přijatelná cena</li> <li>dobrá linearita proti termistorům</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>omezený teplotní rozsah</li> <li>nízké měřicí proudy</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> -50 až +150 °C	

**Monokrystalické PN senzory**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>skoro lineární</li> <li>jednoduché</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nížší přesnost</li> <li>omezený teplotní rozsah</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> běžně -55 až +0 °C	

**Termočlánky**

Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> <li>široký teplotní rozsah</li> <li>odolné</li> <li>jednoduché</li> <li>levné</li> <li>příznivé dynamické vlastnosti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nízká úroveň signálu</li> <li>nízká citlivost</li> <li>nelinearita</li> <li>nízká dlouhodobá stálost</li> </ul>
<b>Teplotní rozsah:</b> -200 až +2300 °C záleží na typu	

## 4 KALIBRACE

V dnešní době se kalibrují téměř všechny druhy snímačů. Snímače pomáhají kontrolovat bezpečnost zařízení, proto je důležitá jejich kalibrace z důvodu ověření jejich přesnosti. Samotná kalibrace snímačů se provádí na pracovišti, kde je demontáž většinou nereálná, jedná se tedy o snímače zapojené v řetězci. V tomto případě se kalibrují i všechny ostatní členy řetězce. Další možností je kalibrace snímačů samostatně. Samotné snímače kalibrujeme v laboratořích. Nejčastěji se pro kalibraci používá kalibrační pícka. Pokud dojde k tomu, že kalibrační pícku nelze použít, můžeme položit vedle snímače etalon, což je teploměr s vyšší přesností. Čidla se pravidelně kalibrují a výsledky jejich kalibrace jsou uváděny spolu s nejistotou měření.

### 4.1 KALIBRACE ODPOROVÝCH SNÍMAČŮ

U odporových snímačů je nutné před prvním použitím zkontrolovat jejich přesnost. Stejně tak musíme ověřit přesnost po určité době používání v provozu, kdy jejich přesnost klesá. Pro ověření přesnosti se používá kalibrace metodou komparační (srovnávací). Kalibrace se provádí na schválených pracovištích. Kalibrované snímače se označí ověřovací známkou s rokem ověření a značkou ověřovacího pracoviště. Doba mezi kalibracemi se odvíjí od provozních podmínek těchto snímačů [14].

### 4.2 KALIBRACE TERMoeLEKTRICKÝCH SNÍMAČŮ

Termoelektrické snímače teploty se kalibrují metodou komparační, stejně jako odporové snímače. Kalibrace se provádí v průmyslových provozech, případně na schválených pracovištích. Přesnost kalibrací v laboratořích je samozřejmě vyšší než v průmyslových provozech. Vyhovující termočlánky se označí ověřovací známkou. Obdobně jako u kalibrace odporových snímačů není doba mezi kalibracemi pevně daná, ale záleží na provozních podmínkách termočlánků.

### 4.3 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Při měření teplot nesmíme zapomínat na přítomnost chyb, které způsobují nejistotu měření. Cílem je eliminace těchto chyb, které mohou mít vliv na výsledky měření. Pokud bychom tak neučinili, mohlo by dojít poškození zařízení.

Nejistota měření je definována jako parametr přidružený k výsledku měření. Tento parametr charakterizuje rozptyl hodnot, které lze přiřadit k měřené veličině, tedy určuje oblast, ve které se nachází měřená veličina. Jestliže chceme docílit toho, aby byly naměřené hodnoty co nejpřesnější, měli bychom realizovat více stejných měření a tyto hodnoty statisticky zpracovat. Problém však může nastat, pokud nedokážeme zachovat stejné podmínky, jako při prvním měření, a tedy nejsme schopni provést daná měření znovu.

Pro stanovené nejistoty máme dva způsoby:

- statistické zpracování naměřených údajů – nejistota typu A
- jiné než statistické zpracování naměřených údajů – nejistota typu B

### 4.3.1 STANDARTNÍ NEJISTOTA TYPU A

Nejistota typu A se stanoví statistickým zpracováním nejméně deseti nezávislých naměřených hodnot veličiny  $x$  měřených za stejných podmínek. Z naměřených hodnot poté vypočítáme odhad hodnoty měřené veličiny jako aritmetický průměr

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (9)$$

kde  $n$  je počet měření [1].

Standartní nejistotu typu A je poté rovna směrodatné odchylce

$$u_A(x) = \sigma(\bar{X}) = \sqrt{D(\bar{X})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (10)$$

kde  $D(\bar{X})$  je výběrový rozptyl aritmetického průměru.

### 4.3.2 STANDARTNÍ NEJISTOTA TYPU B

Nejistota typu B zahrnuje všechny ostatní nejistoty, které nejsou zahrnuty v nejistotě typu A. Tento typ však nevychází z vyhodnocení nejistoty pomocí statistického zpracování dat. Její odhadnutí se provádí na základě dostupných informací a vlastních zkušeností. Její odhadnutí se provádí na základě dostupných informací a vlastních zkušeností. Obvykle se vychází ze zkušeností z předešlého měření, údajů získaných při kalibraci a certifikátů [1].

Pro standartní nejistotu typu B platí

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_{x,zj}^2 u_{Bzj}^2} \quad (11)$$

kde  $A_{x,zj}$  je citlivostní koeficient a  $u_{Bzj}$  jsou nejistoty jednotlivých zdrojů

### 4.3.3 STANDARTNÍ KOMBINOVANÁ NEJISTOTA

Slouží ke společnému vyjádření nejistoty typu A a nejistoty typu B jedním číslem

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (12)$$

#### 4.4 ZDROJE CHYB A NEJISTOT [22]

V praxi není žádný přístroj ani žádné měření absolutně přesné. Všechny negativní vlivy, které se během reálného měřicího procesu vyskytnou, jsou odchylkou mezi skutečnou a naměřenou hodnotou sledované veličiny. Čím více je negativních vlivů, tím se zvyšuje rozdíl pravé a naměřené hodnoty. Jednotlivé zdroje chyb lze rozdělit do několika skupin:

- používání a údržba snímačů
- normalizované nebo výrobní tolerance čidla
- časová stabilita snímače
- konstrukční provedení a aktuální stav snímače
- metody provádění měření a přepočty měřené veličiny na veličinu požadovanou
- nejistoty spojovacích prvků vedoucích od snímače k měřicímu zařízení

Některé konkrétní zdroje se projevují méně, či výrazněji v nejistotách vyhodnocovaných typu A, jiné při použití nejistoty typu B. Většina zdrojů však mohou být příčinou obou typů nejistot. V tomto případě se jedná o největší hrozbu v podobě opomenutí jedné ze složek. Ať už se jedná o opomenutí výraznější nebo mírnější složky, v obou případech se jedná o zkreslující účinek.

Vhodné způsoby zabudování a s nimi související ochranné prvky teplotních snímačů jsou taktéž velmi důležité a v žádném případě by neměly být opomíjeny. Je důležité vědět, kde lze daný snímač zapojit do měřicího řetězce tak, aby jeho přesnost byla co největší, ale zároveň nedošlo k případnému poškození zařízení. To stejné platí pro jejich ochranné prvky. Pokud by vedení bylo nevhodně umístěno, mohlo by dojít k přetržení o ostrou hranu nebo upálení drátu například o výfuk motorového vozidla. V těchto případech lze použít kovové opletení drátů jako ochranný prvek.

## 5 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato kapitola se bude zabývat samotnou realizací lineární kalibrace. Cílem praktické části je využitím různých teplotních čidel získat hodnoty teploty v různých bodech, vynesení zprůměrovaných hodnot do bodového grafu a pomocí lineární regrese zjištění odchylky měření na jednotlivých teplotních čidlech.

Jako nezbytné vybavení pro kalibraci bude použit kalibrátor OMEGA CL 1000A, plášťový termočlánek typu T, termočlánek s teflonovou izolací typu T, teplotní sonda Pt100 a procesní kalibrátor, který má za úkol simulaci termočláneku typu T.

Pro získání hodnot budou do kalibrátoru zabudovány všechny sondy. Naměřená data z těchto čidel budou dále využita pro výsledné funkce neboli vlastní charakteristiky jednotlivých čidel. Nastavením referenční teploty na 40 °C a vyčkáním na ustálení teploty na požadovanou, získáme první potřebné hodnoty snímačů. Měření dále opakujeme pro teploty 80 °C, 120 °C, 160 °C, 200 °C a 240 °C.

V následujících podkapitolách se budeme zabývat popisem jednotlivých vybavení, zpracováním naměřených dat a vyhodnocením kalibrace.

### 5.1 POPIS POTŘEBNÉHO VYBAVENÍ

V našem případě se jedná o kalibraci v pevných bodech. Tento typ kalibrace je časově náročný a závislý na vybavení, bez kterého by nebylo možné realizovat tuto kalibraci. Vybavení bylo poskytnuto vedoucím bakalářské prof. Ing. Josefem Štětinou a zapojení bylo realizováno za jeho odborného dohledu.

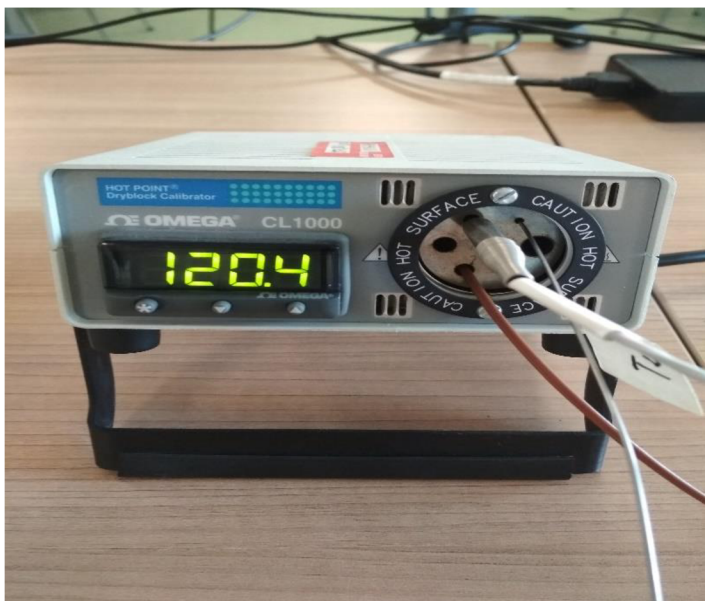
Pro záznam teplot byla použita kalibrační pícka, procesní kalibrátor, měřicí modul National Instruments a teplotní čidla. Naměřená data se ukládala do počítače, konkrétně do záznamového programu FlexLogger.

#### 5.1.1 KALIBRÁTOR OMEGA CL 1000A

Jedná se o přenosný typ kalibrátoru. Kalibrátor se používá k testování a kalibraci teplotních sond. Během ochlazování je nezbytné, aby byl kalibrátor stále připojen k elektrické síti. Kalibrátor umožňuje vložení sond v šesti různých velikostech. I když má sedm otvorů, středový slouží k větrání, nikoliv k vložení sondy. Nejvyšších naměřených hodnot lze dosáhnout při teplotě okolí 24 °C. Při zvýšení teploty okolí o +0,6 °C, klesá maximální možná hodnota kalibrátoru o 4 °C. Kalibrátor je možné používat pouze v prostředí relativní vlhkosti až 80 % bez kondenzace [16].

*Tabulka 3 Technický popis kalibrátoru OMEGA CL 1000A [16]*

Parametr	Hodnoty
teplotní rozsah	11 °C (nad teplotou okolí) až 260 °C
teplotní stabilita	± 0,15 °C
přesnost	1 °C
rozlišení displeje	0,1 °
zahřívací čas 38 °C až 260 °C	15 min
ochlazovací čas 260 °C až 28 °C	70 min



Obrázek 17 Kalibrátor OMEGA CL 1000A

### 5.1.2 PROCESNÍ KALIBRÁTOR OMEGA CLD-II

Jedná se o univerzální teplotní a procesní kalibrátor s tlakovým modulem. Slouží například k měření a simulaci termočlánků a odporových teploměrů nebo měření a generování proudů, napětí, odporu a frekvence. S použitím podpůrného softwaru lze provádět automatickou kalibraci podle přednastavené procedury, včetně výpočtů a zobrazení chyb.



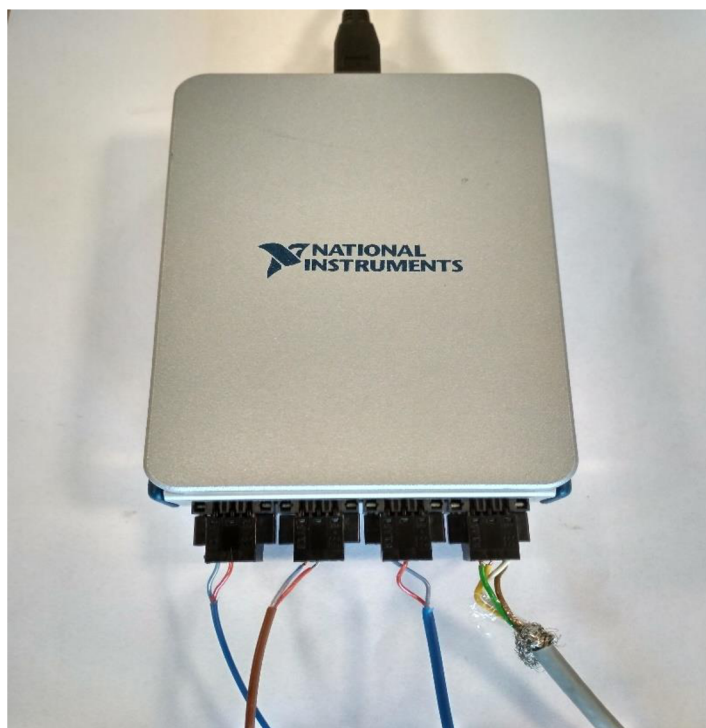
Obrázek 18 Procesní kalibrátor OMEGA CLD-II

### 5.1.3 MĚŘÍCÍ MODUL NATIONAL INSTRUMENTS

Jde o sběrnicové šasi, které jsou určeny pro malé přenosné snímací systémy. Poskytuje jednoduchost USB propojení pro snímače a elektrická měření. Řídí časování, synchronizaci a převod analogového signálu na signál digitální. Chyba modulu je přibližně  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  [23].

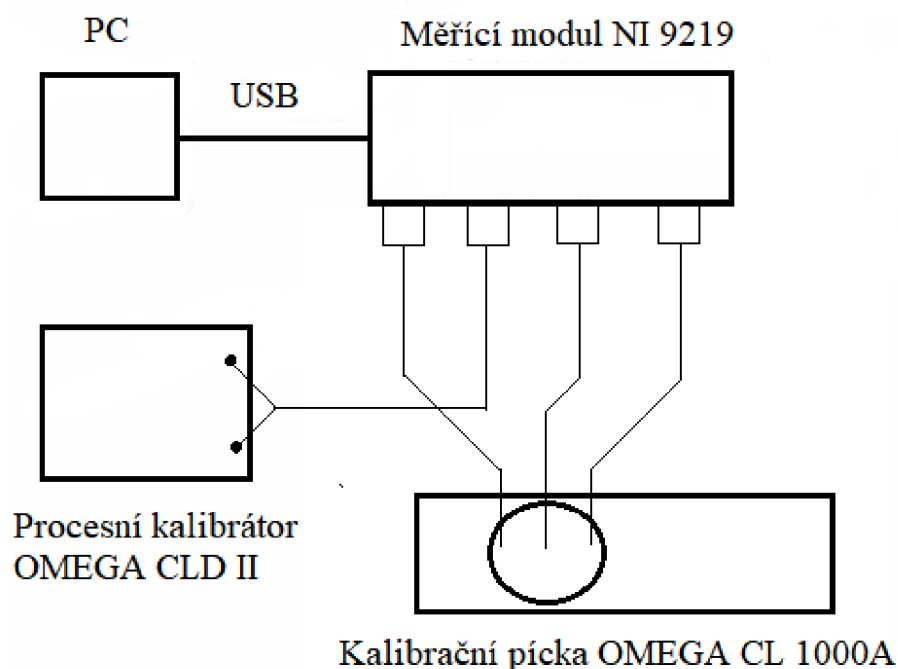
Tabulka 4 Technické parametry měřicího modulu NI 9219 [23]

Typ měření	Rozsah	Chyba měření (procentuální)	
		běžná teplota ( $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	maximální teplota ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C}, 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
napětí (U)	$\pm 60\text{ V}$	$\pm 0,30$	$\pm 0,40$
	$\pm 15\text{ V}$	$\pm 0,30$	$\pm 0,40$
	$\pm 4\text{ V}$	$\pm 0,30$	$\pm 0,40$
	$\pm 1\text{ V}$	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$
proud (I)	$\pm 25\text{ mA}$	$\pm 0,10$	$\pm 0,60$
termočlánek	$\pm 125\text{ mV}$	$\pm 0,10$	$\pm 0,18$
Pt 100	$5,05\text{ k}\Omega, 505\ \Omega$	$\pm 0,10$	$\pm 0,50$



Obrázek 19 Šasi National Instruments CDAQ - 9219





Obrázek 20 Schéma zapojení kalibrace

## 5.2 LINEÁRNÍ KALIBRACE

Cílem této kalibrace je stanovení míry přesnosti kalibrace u vybraných teplotních čidel. Hodnoty naměřených teplot těchto čidel jsou uvedeny v následující tabulce 5.

### 5.2.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Tabulka 5 Naměřených hodnot

Referenční teplota [°C]	Teplotní sonda Pt100 [°C]	Simulace termočlánu [°C]	Plášťový termočlánek [°C]	Termočlánek s teflonovou izolací [°C]
40,1	39,71293237	39,66480229	39,85258806	39,68802700
80,1	80,29356738	79,66463139	80,31200908	80,00377461
120,1	120,4511194	119,2643070	119,5427636	119,24399550
160,1	160,3738145	159,4611294	159,7745819	159,45916820
201,1	201,1852713	199,3237704	200,0010057	199,66307320
240	240,5612873	239,3616028	239,5293824	239,39926960

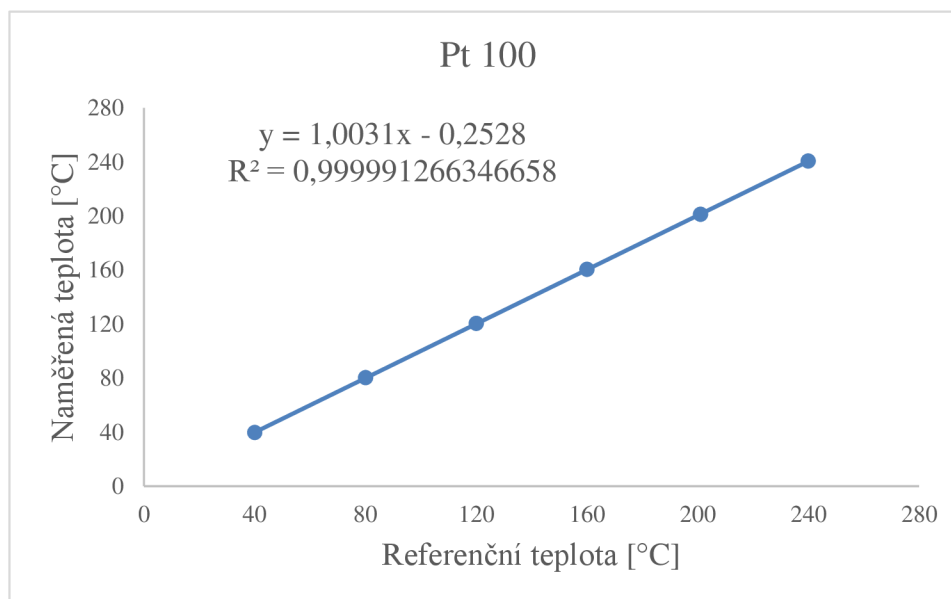
### 5.2.2 NÁVRH MODELU

Z charakteru dat je zřejmé, že se jedná o lineární závislost. Pokusíme se naměřené hodnoty proložit pomocí metody nejmenších čtverců. Lineární regrese je určena touto rovnicí:

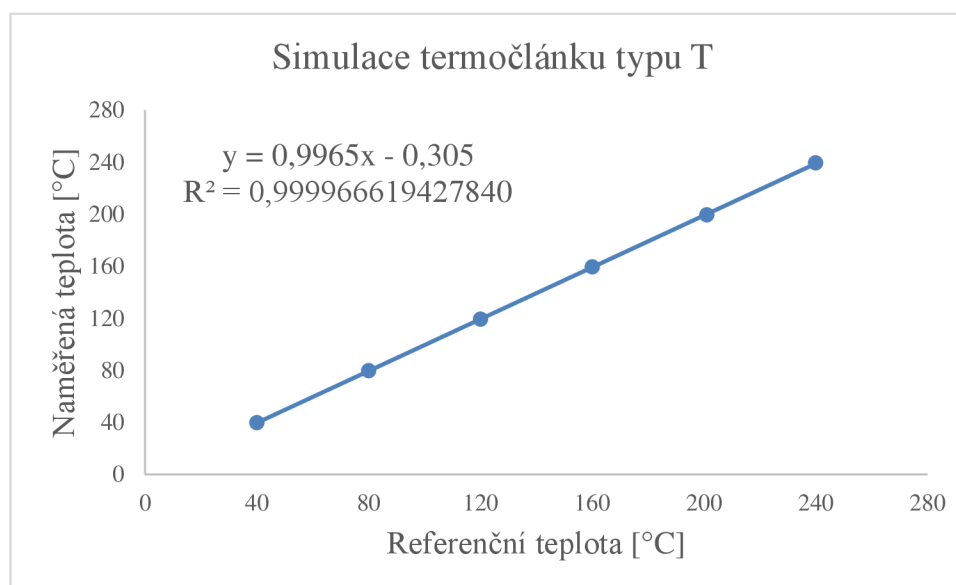
$$y = a * x + b \quad (13)$$

kde  $x$  je nezávislá proměnná,  $a$  a  $b$  jsou koeficienty a  $y$  je závislá proměnná.

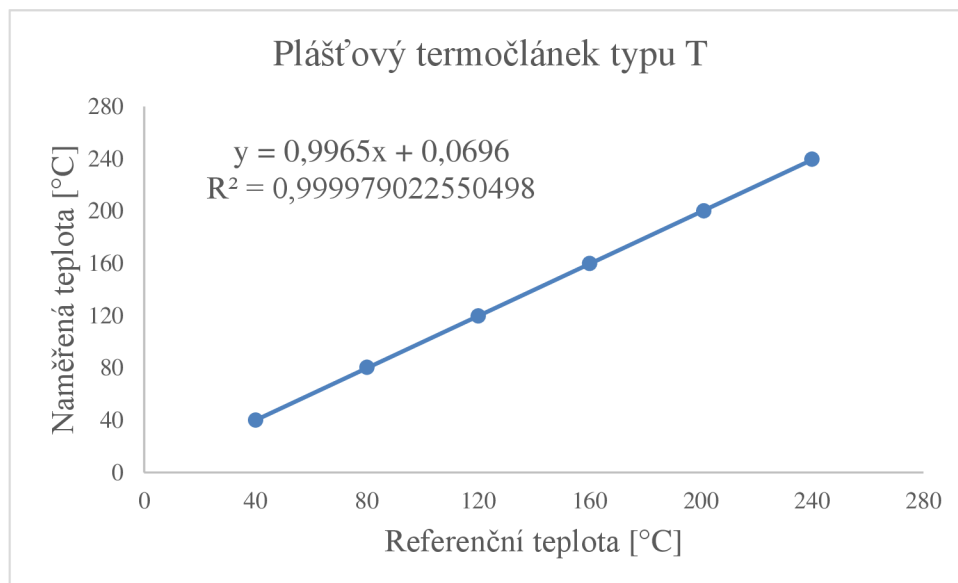
## 5.2.3 KALIBRAČNÍ KŘIVKY JEDNOTLIVÝCH ČIDEL



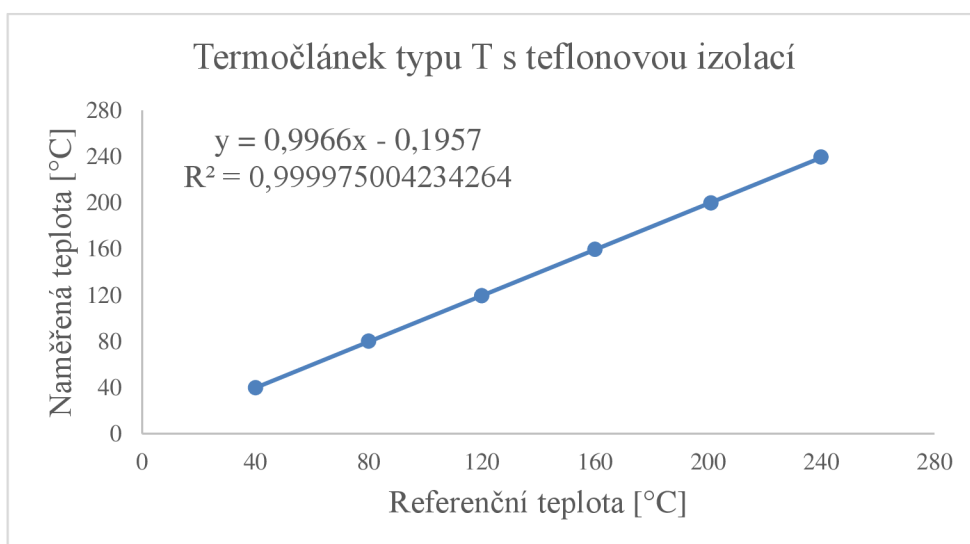
Graf 1 Kalibrační křivka – Pt 100



Graf 2 Kalibrační křivka – simulace termočlánku typu T



Graf 3 Kalibrační křivka – plášťový termočlánek typu T



Graf 4 Kalibrační křivka – termočlánek typu T s teflonovou izolací

### 5.3 VYHODNOCENÍ

Jedná se o lineární závislosti. Byly splněny předpoklady použití metody nejmenších čtverců. Díky lineární regresi jsme získali kalibrační křivky neboli vlastní charakteristiky teplotních čidel. Všechna čidla jsou správně kalibrována a lze je tedy použít pro další měření. Kalibrací jsme získali vlastní charakteristiky a chybu jednotlivých čidel.

$$y_1 = 1,0031x - 0,2528 \quad (14)$$

$$R_1^2 = 0,999991266346658 \quad (15)$$

$$y_2 = 0,9965x - 0,305 \quad (16)$$

$$R_2^2 = 0,999966619427840 \quad (17)$$

$$y_3 = 0,9965x + 0,0696 \quad (18)$$

$$R_3^2 = 0,999979022550498 \quad (19)$$

$$y_4 = 0,9966x - 0,1957 \quad (20)$$

$$R_4^2 = 0,999975004234264 \quad (21)$$

kde  $R^2$  je koeficient determinace neboli Hodnota spolehlivosti R.

Nutno podotknout, že v případě instalace do měřicího řetězce je vhodné použít shodný měřicí modul NI 9219, který byl použit při kalibraci. Hlavním důvodem nastává fakt, že samotný modul má také jistou chybu měření. Při použití odlišného, by mohlo dojít ke zvýšení nejistoty měření.

Dosáhnout shodných výsledků během dalších kalibrací není téměř možné. Jedním z hlavních důvodů je fakt, že nebyly zaznamenány hodnoty teploty prostředí, vlhkost vzduchu a tlak v místnosti, ve které probíhalo měření. Proto by kalibrační rovnice při opakované kalibrace mohly mít malou odchylku od současných hodnot.

## ZÁVĚR

První kapitola práce byla věnována definicím základních pojmů týkajících se měření teplot. Seznámení s teplotními stupnicemi a popis teplotních čidel. Výsledkem je uvedení do problematiky dotykových snímačů teploty.

Rešeršní část popisuje principy dotykového měření teplot a jejich srovnání, přičemž každý typ senzoru má více možností konstrukčního provedení. Teplotní snímače s elektrickým výstupem měřené veličiny jsou nesmírně důležité z důvodu schopnosti být součástí řetězců. Nutnost neustálé kontroly a zjišťování změn teploty vedla k jejich velkému vývoji. Bez těchto teplotních snímačů bychom nebyli schopni realizovat vysoce účinné zařízení.

V kapitole, která se zabývá srovnáním jednotlivých typů dotykových senzorů teploty z hlediska použití a vlastností byly využity internetové stránky a katalogy od výrobců teplotních senzorů jako Jakar Electronics, Omega, Telemeter elektronik a Siemens. Samozřejmě existuje mnoho dalších internetových stránek, kde lze tyto informace získat. Ze srovnání vyplývá vhodnost použití jednotlivých snímačů pro různá měření a také teplotní rozsahy jednotlivých snímačů. Nejčastěji používanými dotykovými senzory teplot jsou termoelektrické senzory následované kovovými odporovými senzory.

Kalibrace je nezbytnou součástí každého teplotního snímače, díky kalibraci se zjišťuje velikost odchylky měření na celém teplotním čidle nebo v měřícím řetězci. S velikostí odchylky souvisí také správnost měření teploty, což je podmínkou pro zaručení správného chodu zařízení. Proto je nutné věnovat pozornost při návrhu zařízení. Vhodné umístění snímače je důležitým aspektem pro jejich kalibraci. Od vhodnosti umístění se dále odvíjí metody kalibrace.

První metodou je kalibrace teploměru v pevných bodech. Tento způsob lze použít, pokud je možnost teplotní snímač demontovat ze zařízení. Kalibrační pícka nebo tekutá lázeň umožňují kalibraci snímače s velkou přesností během několika hodin. Záznam a zpracování dat je možné provádět v počítači, což zkracuje celkovou dobu kalibrace. Lze tedy konstatovat, že tento způsob kalibrace je relativně rychlou záležitostí. Pokud teplotní snímač nelze demontovat, nebo není možné pořízení kalibrační pícky z důvodu vysoké pořizovací ceny dovolit, použijeme kalibraci srovnávací metodou.

Etalon neboli o třídu přesnější teploměr je měřidlo, které se vkládá do potrubí nebo lázně, kde je teplotní snímač umístěn. Nevýhodou této metody je délka měření ve srovnání s kalibrační píckou. Další nevýhodou je způsob zaznamenávání naměřených hodnot. V tomto případě hodnoty nelze zaznamenávat jednoduše do počítače, ale musí být manuálně zaznamenávány. To samozřejmě přináší riziko chyb.

Poslední část bakalářské práce popisuje praktickou ukázkou metody kalibrace. Cílem této ukázky bylo provést kalibraci vybraných snímačů pomocí kalibrační pícky. Z naměřených hodnot jsou sestaveny kalibrační křivky a kalibrační rovnice jednotlivých snímačů. Výsledky měření ukázaly, že se jedná o lineární závislosti, což jsme předpokládali a jednotlivé snímače jsou tedy správně kalibrovány.

Snímače teplot prošly dlouhým vývojem. Nejčastěji se můžeme setkat se snímači, které jsou závislé na elektronice. To ale neznamená, že bychom měli opomínat dilatační teploměry, které fungují bez potřeby napájení a poskytují tak výsledky v případě, kdy není možnost přístupu k napájení. Tyto teploměry pracují na principu teplotní roztažnosti.

V dnešní době se dostává do popředí bezdotykové měření teploty, tzv. pyrometrie, která využívá fyzikálního principu vyzařování infračerveného záření zahřátého objektu. Záření je poté zachycováno senzorem, který ho převede na elektricky měřitelnou veličinu. Tuto veličinu již další elektrické obvody zpracují obdobně jako u dotykových senzorů. Mezi přednosti bezdotykového měření patří velmi rychlé měření, možnost měření velmi vysokých teplot, zanedbatelný vliv měřicí techniky na měřený objekt, možnost měření pohybujících se objektů a další. Ovšem mají také své nevýhody, jako možnost měření pouze povrchové teploty, problematické určování emisivity měřeného objektu nebo viditelnost měřeného objektu pro optický senzor.

U kalibrace bezkontaktních teploměrů je nutné monitorovat teplotu uvnitř laboratoře. To je obzvláště důležité, jelikož pro některé infračervené teploměry hraje okolní teplota velkou roli v nejistotě. Okolní teplota negativně ovlivňuje referenční teplotu infračerveného teploměru. S tím úzce souvisí dotykové snímače teploty a jejich kalibrace, bez nichž není kalibrace bezkontaktních teploměrů možná.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] *SNÍMAČE TEPLITY* [online]. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://skriptum.wz.cz/autom/teplota.htm>
- [3] *Měření teploty – kovové odporové senzory teploty* [online]. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [4] *Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty* [online]. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [5] *Snímače teploty - odporové teploměry* [online]. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty\\_2004/Benes/soubory/pols.html](http://www.umel.feec.vutbr.cz/bmms/projekty_2004/Benes/soubory/pols.html)
- [6] *Encyklopedie fyziky - Seebeckův jev* [online]. [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [7] *Teplota versus teplo* [online]. [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/641-teplota-versus-teplo.html>
- [8] MICHNA, Vladimír. *Prezentace - Měření teploty* [online]. In: . [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12048506/>
- [9] *Termistor NTC B57237S330M* [online]. In: . [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/termistor-ntc-b57237s330m>
- [10] *Termistor PTC B59873C120A570* [online]. In: . [cit. 2019-02-14]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/termistor-ptc-b59873c120a570>
- [11] *Měření teploty polovodičovými integrovanými obvody*. Zlín, 2006. Bakalářská práce. Universita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [12] *Bipolární tranzistory* [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/586>
- [13] *Wikipedie-Dioda* [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Dioda>
- [14] *Jakar* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz/e-shop/#>
- [15] *Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi* [online]. , 9 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/prehled--presnost-a-citlivost-teplotnich-senzoru-v-praxi/>
- [16] *OMEGAGAENG* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz>

- [17] Měření teploty. [online]. 2000 [cit. 2019-04-28]. Dostupné na World Wide Web: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [18] *MĚŘENÍ POVRCHOVÝCH TEPLŮ VE STROJÍRENSTVÍ* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/71629>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [19] *Panasonic, Industrial Devices & Solutions* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://industrial.panasonic.com/ww/products/sensors/sensors/temperature-sensors>
- [20] *Střední škola – Centrum odborné přípravy technické Kroměříž: Čidla v automobilu a jejich poslání 2. díl* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=44675&docGroup=151&cmd=0&instance=1>
- [21] *Temperature Sensors* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/sensors/temperature.html>
- [22] *NEJISTOTY MĚŘENÍ* [online]. In: . s. 10 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/Podklady/AT/nejistoty1.pdf>
- [23] *National Instruments* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Jednotka	Veličina
$A_{x,zj}$	[-]	Citlivostní koeficient
$a$	[-]	Koeficient lineární závislosti
$b$	[-]	Koeficient lineární závislosti
$D(\bar{X})$	[-]	Výběrový rozptyl aritmetického průměru
$F$	[°F]	Fahrenheitova teplota
$I$	[A]	Proud
$Q$	[J]	Přijaté teplo
$Q_z$	[J]	Odevzdané teplo
$R$	[Ω]	Elektrický odpor
$R^2$	[-]	koeficient determinace
$R_t$	[Ω]	Lineární růst odporu při 0 °C až 100 °C
$R_0$	[Ω]	Elektrický odpor při 0 °C
$R_{100}$	[Ω]	Elektrický odpor při 100 °C
$R_{min}$	[Ω]	Minimální odpor
$T$	[K]	Termodynamická teplota
$t$	[°C]	Celsiova teplota
$T_{TR}$	[°C]	Teplota přechodu
$U$	[V]	Napětí
$u_A(x)$	[-]	Nejistota typu A
$u_B(x)$	[-]	Nejistota typu B
$u_{Bzj}$	[-]	Nejistoty jednotlivých zdrojů
$u_C(x)$	[-]	Kombinovaná nejistota
$\bar{X}$	[-]	Aritmetický průměr
$x$	[°C]	Nezávislá proměnná
$y$	[°C]	Závislá proměnná
$W_{100}$	[Ω]	Poměr odporů
$\alpha$	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel odporu
$\Delta T$	[K]	Rozdíl teplot

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1      Kalibrace vybraných snímačů