



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## ČASOVÁ KONSTANTA TEPLOMĚRŮ

RESPONSE TIME OF THERMOMETERS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Novák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Foral

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** David Novák

**ID:** 154818

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Časová konstanta teploměrů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Vysvětlete princip funkce termočlánků a Pt teploměrů.
2. Popište konstrukci oplášťovaných (tyčových) termočlánků a Pt teploměrů.
3. Odhadněte, jaký vliv mohou mít konstrukční a provozní charakteristiky obou typů teploměrů na časovou konstantu.
4. Proměřte časové konstanty vybraných teploměrů a zhodnoťte výsledky.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Dle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 8.2.2016

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Štěpán Foral

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady**

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

### Bibliografická citace práce:

NOVÁK, D. *Časová konstanta teploměru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Štěpán Foral.

Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu Ing. Štěpánu Foralovi za vedení, odbornou pomoc, cenné rady, připomínky a trpělivost při vypracování méj bakalářské práce.

Dále bych mu chtěl poděkovat za poskytnutí měřícího přípravku k měření.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....

## ABSTRAKT

Cílem práce je rozbor vlastností odporových a termočláňkových čidel, popis jejich principu, základních parametrů, konstrukčních provedení a v neposlední řadě je asi nejdůležitější částí práce vysvětlení, rozbor a také praktický experiment k tématu časové konstanty snímače.

V první části práce jsou vysvětleny základní pojmy tepelných veličin a principy termoelektrických jevů. Dále pak je provedeno základní rozřazení metod měření teploty se zařazením hlavních bodů obsahu této práce.

Další části se zabývají hlavními tématy práce. Nejprve přichází vysvětlení podstaty odporových čidel a v další kapitole je vysvětlen princip termočláňků.

Následuje kapitola o konstrukci snímačů. Zde je rozebrána konstrukce snímače pro praktická použití v průmyslu i v jiných aplikacích.

V další kapitole je rozebrána problematika časové konstanty snímače. Tato kapitola obsahuje nejen vysvětlení tohoto pojmu, ale i odvození rovnic důležitých pro popis chování snímačů v měnicích se podmínkách reálného provozu.

Následuje část, kde jsou rozebrány vlivy ovlivňující časovou konstantu přístroje. Tyto vlivy mohou zásadně ovlivnit jinak vysokou přesnost výše zmíněných teploměrů.

Poslední část se věnuje praktickému měření časové konstanty zadaných teploměrů. Měření bylo provedeno ve dvou různých prostředích, ve vroucí vodě a teplém vzduchu. Z vyhodnocení výsledků měření vyplynulo, že časová konstanta v prostředí vroucí vody je výrazně menší než je tomu v případě horkého vzduchu, a to u všech měřených objektů.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Časová konstanta; Termočláňek; Odporový teploměr

## ABSTRACT

The aim of the work is the analysis of the characteristics of resistive and termočlánkových sensors, the description of their principle, basic parameters, structural design and last but not least is probably the most important part of the work of the explanation, analysis and practical experiment to see the time constant of the sensor.

In the first part of the thesis explains the basic concepts and principles of thermal quantities of phenomena. Then it is done the basic classification of methods of measuring temperature with the inclusion of the main points of the content of this work.

The next section will deal with the main issues of the work. First comes an explanation of the nature of resistive sensors and is explained in the next chapter the principle of thermocouples.

The following is the chapter on the construction of the sensors. Here is a design of the sensor for the dismantled the practical use in industry and in other applications..

In the next chapter is described in detail at the issue of the time constants of the sensor. This chapter contains not only an explanation of this concept, but also to derive equations for the description of sensor behavior important in changing the conditions of real traffic.

The following is the part where they are dismembered influences affecting the time constant of the device. These effects can significantly affect the otherwise high accuracy thermometers mentioned above.

The last chapter deals with practical measurement of time constants specified thermometers. The measurement was carried out in two different environments, in boiling water and warm air. The assessment of the results of the measurements showed that the time constant in an environment of boiling water is significantly smaller than in the case of hot air, and that for all of the measured objects.

**KEY WORDS:** Time constant; Thermocouple; Rtd thermometer

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2 ZÁKLADNÍ POJMY .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 TEPLLO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 TEPLOTA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 TERMOELEKTRICKÉ JEVY .....</b>	<b>17</b>
2.3.1 SEEBECKŮV JEV .....	17
2.3.2 PELTIERŮV JEV.....	18
<b>3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ METOD MĚŘENÍ TEPLoty .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 DOTYKOVÉ METODY MĚŘENÍ .....</b>	<b>19</b>
3.1.1 DILATAČNÍ TEPLOMĚRY .....	19
3.1.2 ODPOROVÉ TEPLOMĚRY .....	19
3.1.3 TERMOČLÁNKY .....	19
<b>3.2 BEZDOTYKOVÉ METODY MĚŘENÍ.....</b>	<b>20</b>
3.2.1 ŠIROKOPÁSMOVÉ PYROMETRY .....	20
3.2.2 ÚZKOPÁSMOVÉ PYROMETRY .....	20
3.2.3 TERMOKAMERY .....	20
<b>3.3 SPECIÁLNÍ METODY MĚŘENÍ.....</b>	<b>20</b>
<b>4 ODPOROVÉ TEPLOMĚRY .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 KOVOVÉ ODPOROVÉ TEPLOMĚRY .....</b>	<b>21</b>
4.1.1 PRINCIP ČINNOSTI .....	21
4.1.2 PROVEDENÍ A POUŽITÉ MATERIÁLY .....	21
<b>4.2 ZAPOJENÍ KOVOVÝCH ODPOROVÝCH ČIDEL .....</b>	<b>24</b>
4.2.1 ODPOROVÝ MŮSTEK.....	24
4.2.2 ZAPOJENÍ S PROUDOVÝM ZDROJEM .....	27
<b>4.3 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ TEPLOMĚRY .....</b>	<b>28</b>
4.3.1 POZISTORY .....	28
4.3.2 NEGASTORY .....	28
<b>5 TERMOČLÁNKY .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 PROVEDENÍ MĚŘÍČÍHO KONCE TERMOČLÁNKU .....</b>	<b>29</b>
<b>5.2 DRUHY TERMOČLÁNKŮ .....</b>	<b>30</b>
<b>5.3 ZAPOJENÍ OBVODU S TERMOČLÁNKEM .....</b>	<b>31</b>
<b>6 KONSTRUKCE SNÍMAČŮ.....</b>	<b>34</b>
<b>7 DYNAMICKÝ REŽIM SNÍMAČE, ČASOVÁ KONSTANTA .....</b>	<b>36</b>
<b>7.1 ZÁKLADNÍ ODVOZENÍ .....</b>	<b>36</b>

7.2 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA .....	37
8 Vlivy ovlivňující časovou konstantu teploměru .....	40
8.1 Provedení měřícího konce termočlánků .....	40
9 Měření časové konstanty .....	44
9.1 Měření prováděné ve vodě .....	45
9.2 Měření prováděné na vzduchu.....	50
9.3 Srovnání výsledku .....	56
10 Závěr.....	57
Použitá literatura .....	58

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Princip vzniku termoelektrického napětí [3].....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 2 Princip Peltierova jevu [4] .....</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 3 Drátkový platinový odporový snímač [5] .....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4 Plošný tenkovrstvý odporový teploměr [5] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5 Ukázka tlustovrstvé technologie [9] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 6 Dvou vodičové zapojení, třívodičové zapojení a čtyřvodičové zapojení [13].....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 7 Můstkové zapojení s rozdílovým zesilovačem[13].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 8 Asymetrický přístrojový zesilovač pro zesílení rozdílového napětí můstku[13] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 9 Třívodičové zapojení senzoru v aktivním můstku[13] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 10 Blokové schéma převodníku se zdrojem proudu[13].....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 11 Detailní schéma zapojení s proudovým zdrojem s negativním vnitřním odporem[13] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 12 Porovnání charakteristik polovodičových a kovových odporových teploměrů[5] .....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 13 Měřící zakončení různých termočlánků [15].....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 14 Ukázka provedení termočlánků A) bodový B) plošný C) kombinovaný D) víceúčelový .....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 15 Základní uspořádání termočlánku [5] .....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 16 Zapojení se spojovacím vedením s justančním odporem [5] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 17 Termočlánek s termostatem [24].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 18 Zapojení s pomocným termočlánkem[24] .....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 19 Schéma kompenzační krabice [24] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 20 Blokové schéma dvou vodičového převodníku [5] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 21 Teploměr s číslicovým výstupem [5].....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 22 Tyčový opláštěvaný odporový snímač[19] .....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 23 Tyčový opláštěvaný termočlánekový snímač [20] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 24 Různé varianty nástavců, ochranných trubek a ochranných jímek [19] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 25 Možné způsoby řešení rovnic[25].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 26 Přehled testovacích signálů[25].....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 27 Přechodová charakteristika[25].....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 28 Přechodová charakteristika pro systém druhého řádu[25].....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 29 Další možné tvary přechodové charakteristiky pro dané případy[25].....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 30 Zabudování teploměru do potrubí [5] .....</i>	<i>40</i>



<i>Obrázek 31 Provedení měřicího konce termočlátku- izolovaný (vlevo) a uzemněný (vpravo) [21]</i>	41
<i>Obrázek 32 Určení parametru D pro termočláanky a) nechráněný s holým vodičem b) uzemněný c) nechráněný "korálkovitý" d) izolovaný [26]</i>	41
<i>Obrázek 33 Závislost časové konstanty na parametru D ve vzduchu [26]</i>	42
<i>Obrázek 34 Závislost časové konstanty na parametru D ve vzduchu [26]</i>	42
<i>Obrázek 35 Závislost časové konstanty na parametru D ve vodě [26]</i>	43
<i>Obrázek 36 Měřené snímače. Zleva PT1 až PT3, následuje TC1 až TC4</i>	44
<i>Obrázek 37 Fotka pracoviště pro měření časové konstanty pro vodu</i>	45
<i>Obrázek 38 Přechodová charakteristika čidla PT-1</i>	46
<i>Obrázek 39 Přechodová charakteristika čidla PT-2</i>	46
<i>Obrázek 40 Přechodová charakteristika čidla PT-3</i>	47
<i>Obrázek 41 Přechodová charakteristika čidla TC-1</i>	47
<i>Obrázek 42 Přechodová charakteristika čidla TC-2</i>	48
<i>Obrázek 43 Přechodová charakteristika čidla TC-3</i>	48
<i>Obrázek 44 Přechodová charakteristika čidla TC-4</i>	49
<i>Obrázek 45 Porovnání přechodových charakteristik všech čidel</i>	49
<i>Obrázek 46 Porovnání přechodových charakteristik všech čidel</i>	49
<i>Obrázek 47 Principiální schéma přípravku</i>	50
<i>Obrázek 48 Fotka měřicího pracoviště</i>	51
<i>Obrázek 49 Porovnání přechodové charakteristiky čidla TC-1 u vertikálního a horizontálního měření</i>	52
<i>Obrázek 50 Přechodová charakteristika čidla PT-1</i>	52
<i>Obrázek 51 Přechodová charakteristika čidla PT-2</i>	53
<i>Obrázek 52 Přechodová charakteristika čidla PT-3</i>	53
<i>Obrázek 53 Přechodová charakteristika čidla TC-1</i>	54
<i>Obrázek 54 Přechodová charakteristika čidla TC-2</i>	54
<i>Obrázek 55 Přechodová charakteristika čidla TC-3</i>	55
<i>Obrázek 56 Porovnání přechodových charakteristik čidla TC-3 pro vodu a vzduch</i>	56

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tabulka 1 Třídy přesnosti a příslušné hodnoty tolerancí platinových čidel [12].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2 Třídy přesnosti niklových čidel [12] .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 3 Příklad Seebeckových koeficientů pro některé kovy vztažené k olovu [16] .....</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 4 Přehled typů termočlánků, popis jejich vlastností a příklady jejich použití [10].....</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 5 Popis měřených čidel a) .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6 Popis měřených čidel b) .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 7 Časové konstanty pro jednotlivá čidla změřena ve vroucí vodě.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 8 Časové konstanty jednotlivých snímačů na vzduchu.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 9 Porovnání výsledků z měření ve vodě a na vzduchu .....</i>	<i>56</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

A	Zesílení zesilovače	(-)
A/D	Analogově digitální převodník	
$a_i$	Obecný teplotní koeficient i-tého řádu	( $^{\circ}\text{C}^{-i}$ )
$a_n$	Obecný koeficient diferenciální rovnice	(-)
B	Materiálová konstanta	(-)
$\text{BaTiO}_3$	Polykrystalická ferroelektrická keramika	
$b_n$	Obecný koeficient diferenciální rovnice	(-)
c	Měrná tepelná kapacita látky	( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Cu	Měď	
ČSN	Česká norma	
h(t)	Přechodová charakteristika	(-)
I	Elektrický proud	(A)
IEC	Mezinárodní norma	
k	Zesílení systému	(-)
m	hmotnost	kg
Ni	Nikl	
$p_{1,2}$	Kořeny kvadratické rovnice	
PT	Platinové čidlo	
Pt	Platina	
PT-X	X-tý měřený odporový snímač	
Q	Teplo	(J)
R	Elektrický odpor	( $\Omega$ )
$R_{\text{cu}}$	Odpor přívodních měděných kabelů	( $\Omega$ )
$R_t$	Odpor reprezentující senzor	( $\Omega$ )
$R_x$	X-tý rezistor	( $\Omega$ )
$R_0$	Elektrický odpor při teplotě $t_0$	( $\Omega$ )
$R_9$	Proměnný odpor reprezentující senzor teploty	( $\Omega$ )
t	Teplota	( $^{\circ}\text{C}$ )
T	Termodynamická teplota	(K)
$T_1$	Teplota prvního konce termočlánku	(K)
$T_2$	Teplota druhého konce termočlánku	(K)
TC-X	X-tý měřený termočlánek	
$t_d$	Dopravní zpoždění	(s)
Anemometr	Přístroj na měření rychlosti proudění	
$t_n$	Doba náběhu	(s)
$t_p$	Doba průtahu	(s)
$t_t$	Doba ustálení	(s)
U	Napětí	(V)
U. S.	Americká Industrial Standard norma	
$U_1$	Vstupní napětí	(V)

---

$U_{st}$	Napájecí napětí	(V)
UT-71A	Multimetr	
$U_{vys}$	Napětí na výstupu	(V)
W	Redukovaný odpor	(-)
W	Wolfram	
Wave-Scan	Měřicí program	
$x^n$	N-tá derivace vstupní veličiny	(-)
$y^n$	N-tá derivace výstupní veličiny	(-)
$\alpha$	Seebeckův koeficient prvního řádu	(V.K <sup>-1</sup> )
$\alpha$	Teplotní koeficient prvního řádu	(°C <sup>-1</sup> )
$\beta$	Teplotní koeficient druhého řádu	(°C <sup>-2</sup> )
$\beta$	Seebeckův koeficient druhého řádu	(V.K <sup>-2</sup> )
$\Delta T$	Relativní rozdíl teplot	(K)
$\Delta U$	Termoelektrické napětí	(mV)
$\lambda$	Vlnová délka	( $\mu\text{m}$ )
$\tau$	Časová konstanta	(s)
$\vartheta$	Teplota vyjádřena ve Fahrenheitově stupnici	(°F)

# 1 ÚVOD

Měřením teploty se zabývá lidstvo už od dob starověkého Říma, kdy Hérón Alexandrijský popsal přístroj na měření teploty, který využíval teplotní roztažnosti vzduchu.

Později se začaly objevovat i další teploměry, nebo spíše lépe řečeno předchůdci teploměrů, protože s dnešními teploměry měly málo společné. Zásadní byl problém absence vakua, prostoru beze vzduchu, kde by nepůsobil atmosférický tlak a neovlivňoval by zásadním způsobem měření.

Již v 17. století se začaly objevovat i teploměry s kapalnou teploměrnou látkou. První takový teploměr sestrojil francouzský lékař Jean Rey. Jako teploměrnou látku použil ale vodu, která má velmi malou roztažnost. Proto se hledaly jiné teploměrné látky. Jako nejvýhodnější se ukázaly líh a rtuť. První lihový teploměr sestrojil roku 1641 toskánský velkovévoda Ferdinand II, což znamenalo velký převrat a tento princip se udržel s malými změnami až do dnes[27][28].

V dnešní době se již používají teploměry i na zcela jiné bázi, než jen na bázi rtuti a lihu. Jedním z těchto principů je využití závislosti elektrického odporu materiálu na teplotě. K tomuto účelu se využívají kovy i polovodiče. Mezi kovy vede v použitelnosti platina pro svoji časovou stálost, chemickou odolnost a pro svoji dobrou lineární závislost odporu na teplotě. Pro polovodičové teploměry jsou to nejrůznější oxidy ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ), nebo speciální keramiky ( $\text{BaTiO}_3$ ).

Další možností je využití Seebeckova termoelektrického jevu. Při spojení dvou kovů a zahřátí jejich spojeného konce, naměříme na druhém rozpojeném konci napětí. Tohoto jevu se nedá využít při výrobě elektřiny pro příliš malý generovaný signál (napětí) ale pro měření je generované napětí dostačující. Spojovat se dají různé materiály (dokonce i slitiny polovodičů). Jednotlivá spojení jsou normalizovaná a označena písmeny. Nejpoužívanější jsou termočlánky typu J, K, T a E.

Konstrukce snímačů se odvíjí od jejich použití. Pro praktická použití například v průmyslu se snímače upravují do takzvané tyčové opláštěvané podoby, aby vydržely vysoké nároky kladené některými aplikacemi. Opláštění má různé podoby, od malých trubiček, přes větší ochranné trubky, až po přídavné ochranné jímký. S tím souvisí jeden nepříjemný fenomén. Se zvyšující se ochranou pomocí opláštěvání se zvyšuje i teplotně časová setrvačnost teploměru a nastává zde zpoždění v měření teploty.

Tato práce se zabývá rozborem tohoto problému a proměření časové konstanty daných teploměrů [27][28].

## 2 ZÁKLADNÍ POJMY

### 2.1 Teplo

Částice látky, to jest atomy a molekuly se neustále chaoticky pohybují. Teplo popisuje množství jejich kinetické energie při určité teplotě vztažené nejčastěji k tělesu s jinou teplotou nebo tělesu s teplotou absolutní nuly, která má nulovou kinetickou energii.

Pokud se dostanou dvě tělesa do vzájemného styku (nebo má těleso větší teplotu než okolí), začne docházet k přestupu tepla. To je způsobeno tím, že částice na povrchu jednoho tělesa, které se chaoticky pohybují, naráží ve styku těles do částic na povrchu druhého tělesa a teplejší těleso (těleso s větší tepelnou kinetickou energií) předává teplo chladnějšímu tělesu. Nikdy ne naopak. Tento děj se nazývá tepelná výměna. Přenos tepla probíhá třemi způsoby- vedení (pevné látky), prouděním (kapaliny a plyny) a radiací (plyny).

Množství tepla se měří relativně poměrem energie jednoho tělesa o určité teplotě poměrně k energii druhého tělesa o určité teplotě. Pro výpočet se používá kalorimetrická rovnice:

$$dQ = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{J; kg, J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}) \quad (2.1.1)$$

kde  $m$  je hmotnost tělesa

$c$  je měrná tepelná kapacita látky

$\Delta T$  je relativní rozdíl teplot mezi vztažnými tělesy [1],[2]

### 2.2 Teplota

Teplota je stavovou veličinou charakterizující stav tepelné rovnováhy soustavy. Je-li izolovaná soustava v rovnovážném stavu, pak to znamená, že všechna tělesa v soustavě mají přiřazenou stejnou teplotu. Je-li soustava tvořena jen jedním tělesem, pak všechny části tohoto tělesa mají přiřazenou stejnou teplotu. Pokud nejsou v rovnovážném stavu, nemají stejnou teplotu. Po určité době přejdou obě tělesa do rovnovážného stavu díky tepelné výměně.

Na tomto ději je založeno měření teploty- k měřenému objektu přiložíme určité srovnávací těleso. Po vyrovnání teplot je teplota srovnávacího tělesa stejná jako měřeného objektu. K měření teploty je dále potřeba definovat teplotní stupnici.

Základní stupnicí je takzvaná termodynamická teplotní stupnice. Teplota vyjádřená v této stupnici dostává také přívlastek termodynamická a označení T. Její jednotkou je 1 K. Teplota 0 K se nazývá jako absolutní nula. Je to teplota, při které ustává jakýkoliv pohyb částic látky. K této teplotě se lze pouze přiblížit, nikoliv však jí dosáhnout. Další charakteristickou teplotou je takzvaný trojný bod vody, neboli rovnovážný stav vody, ledu a syté páry. Tomuto bodu byla přiřazena termodynamická teplota 273,16 K. Výhodou termodynamické stupnice je nezávislost na teploměrné látce. K měření se používá plynový teploměr. Termodynamické teploty se využívá ve většině výpočtech v termodynamice.[1]

V běžné praxi se ale nejvíce používá Celsiova stupnice. Mluvíme tedy o Celsiově teplotě, kterou značíme  $t$  a která má jednotu  $1^\circ\text{C}$ . Tato stupnice má dvě základní teploty-bod tání vody a bod varu vody. Bodu tání byla přiřazena teplota  $0^\circ\text{C}$  a bodu varu teplota  $100^\circ\text{C}$ . Mezi těmito body je stupnice rozdělena rovnoměrně na 100 dílků.

Tohoto rozdělení bylo využito i pro termodynamickou teplotu a proto platí  $1 \text{ K} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$ . Toho se využívá v některých výpočtech ve fyzice, protože absolutní rozdíl teplot vyjádřený z termodynamické a Celsiové stupnice je stejný.

Pro převod mezi termodynamickou a Celsiovou teplotou platí vztah:

$$t = (T - 273) \quad (^\circ\text{C}; \text{K}) \quad (2.2.1)$$

kde  $T$  je hodnota teploty v termodynamické stupnici

Dále se v některých zemích používají i další stupnice. Nejznámější je anglosaská stupnice Fahrenheitova s jednotkou  $1 \text{ }^\circ\text{F}$ . V této stupnici je přiřazeno bodu tání  $32 \text{ }^\circ\text{F}$  a bodu varu je přiřazeno  $212 \text{ }^\circ\text{F}$

Pro převod platí rovnice:

$$t = \frac{5}{9} \cdot (\vartheta - 32) \quad (^\circ\text{C}; \text{K}) \quad (2.2.2)$$

kde  $\vartheta$  je teplota ve Fahrenheitově stupnici [1]

## 2.3 Termoelektrické jevy

### 2.3.1 Seebeckův jev

Vytvoříme-li spojením dvou kovů termočlánek a na obou koncích termočláneku bude rozdílná teplota, naměříme v obvodu napětí a obvodem začne protékat proud. Tento jev objevil náhodně německý fyzik Thomas Johann Seebeck (1770 - 1831) v roce 1821.

V neuzavřeném obvodu lze mezi rozpojenými konci naměřit termoelektrické napětí. Jeho velikost se dá vyjádřit pomocí zjednodušeného vztahu:

$$\Delta U = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{V}; \text{V}\cdot\text{K}^{-1}, \text{K}, \text{K}) \quad (2.3.1.1)$$

kde  $\alpha$  je Seebeckův koeficient

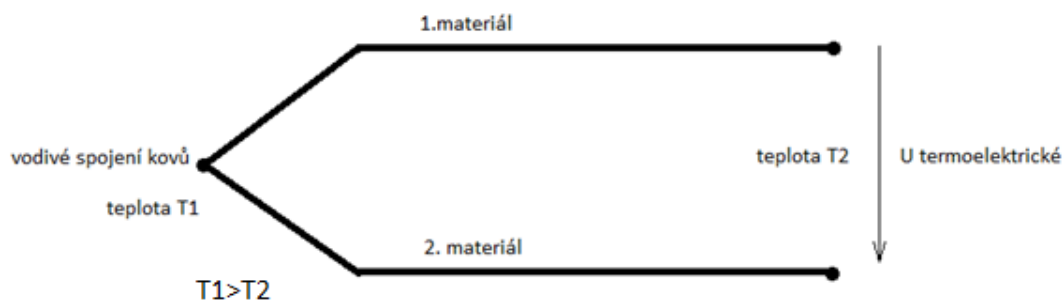
$T_1$  a  $T_2$  jsou teploty na opačných koncích termočláneku

Seebeckův koeficient závisí na dané dvojici materiálu a jeho hodnota se zjišťuje pro každý materiál zvlášť

Výše zmíněný vztah (2.3.1.1) lze použít pouze pro malý rozsah teplot. Pro větší rozsahy teplot nelze použít, protože závislost termoelektrického napětí není ve větším rozsahu teplot zdaleka lineární.

Výsledné termoelektrické napětí nabývá hodnot řádově  $\mu\text{V}$  na každý  $1^\circ\text{C}$  rozdílu teplot, proto tento princip lze jen ve velmi omezeném míře využít jako zdroj el. energie, protože generované napětí a výkon jsou příliš nízké. Navíc z tepelné energie na elektrickou se přemění jen zhruba 1% až 3% přivedené tepelné energie.

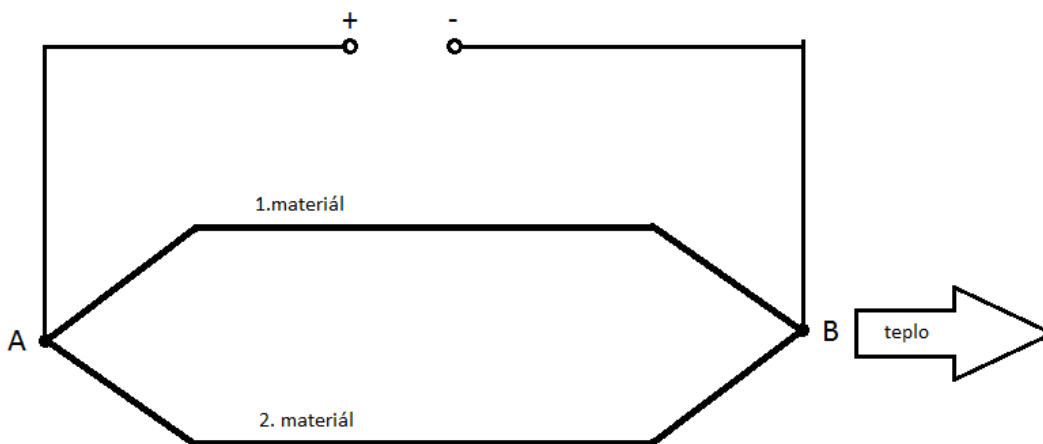
Na druhou stranu lze tohoto principu využít k měření teploty a také se toho hojně využívá u termočláneků. [3]



Obrázek 1 Princip vzniku termoelektrického napětí [3]

### 2.3.2 Peltierův jev

Pokud spojíme dva materiály (kovy nebo polovodiče) a vytvoříme tak termočlánek a na tento obvod připojíme vnější napětí, bez toho abychom jeden konec vystavili vyšší teplotě, začne působit Peltierův jev. Tento jev zapříčiní, že působením průchodu elektrického proudu v závislosti na polaritě zdroje se začne jeden konec oteplovat a jeden ochlazovat.



Obrázek 2 Princip Peltierova jevu [4]

Na obrázku 2 je situace, kdy je přiloženo napětí dané polarity. Elektrický proud začne procházet podle dohody od kladného pólu zdroje k zápornému a jeho působením se začne spoj B ohřívat a spoj A ochlazovat. Pokud bude polarita přiloženého napětí obrácená, bude situace podobná s tím rozdílem, že jelikož i proud prochází obráceným směrem, tak zahřívát se bude spoj A.

Tento jev má reálné využití v takzvaných Peltierových člancích. [4]



## 3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ METOD MĚŘENÍ TEPLoty

### 3.1 Dotykové metody měření

#### 3.1.1 Dilatační teploměry

Jsou založeny na délkové nebo objemové roztažnosti látek všech skupenství.

##### **Bimetalické teploměry**

Využívají principu délkové roztažnosti a její rozdílnosti pro různé materiály. Základ teploměru je proužek dvou spojených kovů s různou délkovou teplotní roztažností. Pásek je na jedné straně uchycen pevně a na druhé je spojen s ručičkou přístroje. Při zvýšení teploty dojde vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k prohnutí pásku a ten je převeden na ručku přístroje. [5]

##### **Kapalinové teploměry**

Jedná se o klasické rtuťové nebo lihové teploměry používané běžnými lidmi při běžných aplikacích. Využívají objemové roztažnosti kapalin. Konstrukčně jsou řešeny jako tenká skleněná kapilára naplněná teploměrnou kapalinou. Jsou jednoduché, levné a spolehlivé. Jejich nevýhodou je křehkost a s tím související nebezpečí kontaktu s jedovatou rtuťí. Navíc se téměř nedá použít dálkový přenos hodnot. [5]

##### **Plynové teploměry**

Využívají vlastností plynu, kdy plyn má při stálém objemu přímo úměrnou teplotní závislost svého tlaku. Anebo případně využívají naopak přímo úměrnou teplotní závislost objemu plynu při jeho stálém tlaku. Konstrukčně jsou řešeny tak, že na jedné straně je vlastní baňka s plynem, která je spojená kapilárou s měřicím ústrojím na druhé straně. Měřicí ústrojí bývá většinou deformační tlakoměr. Využívají se v malé míře v průmyslových aplikacích. [5]

#### 3.1.2 Odporové teploměry

Dělí se podle použitého materiálu na kovové a polovodičové. Využívají závislost elektrického odporu na teplotě. Podrobně rozebráno v kapitole 4.

#### 3.1.3 Termočlánky

Termočlánky pracují na principu Seebeckova jevu. Podrobně popsány v kapitole 5.

## 3.2 Bezdotykové metody měření

Měření pomocí bezdotykových metod se v současnosti rychle rozvíjí. Dříve se jeho použití omezovalo na měření vysoké teploty na malém prostoru nebo v případech, kdy byl měřený objekt v pohybu. Dnes se bezdotykové metody měření teploty rozšířili blíže k nízkým teplotám, včetně měření teplot pod bodem mrazu. [7]

### 3.2.1 Širokopásmové pyrometry

Tyto přístroje pracují s poměrně velkým rozsahem vlnových délek, zhruba v rozmezí od 0,5  $\mu\text{m}$  až do 20  $\mu\text{m}$ . Jako detektor se nejčastěji používá detektor tepelný jako například baterie termočlánků, bolometr (foliový odporový teploměr) nebo speciální pyroelektrický senzor. Důležité je, aby funkce detektoru nebyla závislá na vlnové délce.

Měřené teplota se vyhodnocuje nepřímou a to na základě použití Stefanova-Boltzmannova zákona pro černé těleso. [7]

### 3.2.2 Úzkopásmové pyrometry

Jak už název napovídá, úzkopásmové přístroje pracují v úzkém rozmezí vlnových délek v závislosti na účelu měření. K detekci je využíváno kvantových senzorů, jako jsou fotonky, fotočlánky, fotodiody, fototranzistory nebo fotorezistory.

Velkou výhodou těchto přístrojů je rychlá reakce na změny teplot měřeného objektu a možnost měřit i poměrně malé objekty.

Teplota se stejně jako u širokopásmových přístrojů měří nepřímou a to tentokrát na základě aplikace Planckova zákona. [7]

### 3.2.3 Termokamery

Zásadní rozdíl mezi pyrometrem a termokamerou je ten, že pyrometr měří teplotu v jednom bodě (malé oblasti), termokamera zobrazuje teplotní rozložení na povrchu větších objektů.

Dříve pracovaly tyto přístroje na složitěm principu rozkladu obrazu na jednotlivé body. Dnes už většina přístrojů pracuje bez rozkladu obrazu využívajíc maticové nebo mozaikové detektory. Tento maticový detektor obsahuje na rozdíl od pyrometrů, které mají pouze jeden senzor tepelného záření, velký počet senzorů. [7]

## 3.3 Speciální metody měření

Jedná se většinou o jednorázově použitelné teploměry, které nelze použít do regulačních obvodů.

Mezi tyto metody patří **keramické žároměrky**. Jedná se o šikmé trojboké jehlany vyrobené z keramické hmoty o dané teplotě měknutí. Po dosažení teploty měknutí se jehlan zdeformuje a ohne a tím signalizuje dosažení dané teploty.

Další jsou **teploměrné barvy, pásky a tužky**. Využívají změny barvy pásky při teplotě zvratu. Barvy jsou nanášeny většinou přímo na měřený objekt, kde slouží ke zjištění rozložení teploty. [6]

## 4 ODPOROVÉ TEPLoměRY

### 4.1 Kovové odporové teploměry

#### 4.1.1 Princip činnosti

Elektrický odpor kovů roste spolu s teplotou. Zvyšování elektrické odporu se zvyšující se teplotou si vysvětlujeme tak, že atomy krystalické mřížky kovu s rostoucí teplotou zvyšují amplitudu svých kmitů a proto kladou větší odpor průchodu elektronů.

Tuto závislost lze popsat vztahem:

$$R = R_0 \cdot [1 + (\sum_i a_i \cdot \Delta t^i)] \quad (\Omega; \Omega, ^\circ C^{-i}, ^\circ C^i) \quad (4.2.1.1)$$

kde  $R_0$  je odpor při teplotě  $t_0$

$a_i$  jsou obecné teplotní koeficienty  $i$ -tého řádu

$\Delta t$  je rozdíl teplot od teploty  $t_0$

V technické praxi se používá zjednodušený vzorec:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta t + \beta \cdot \Delta t^2] \quad (\Omega; \Omega, ^\circ C^{-1}, ^\circ C, ^\circ C^{-2}, ^\circ C^2) \quad (4.2.1.2)$$

kde  $\alpha$  je teplotní koeficient prvního řádu

$\beta$  je teplotní koeficient druhého řádu

Pro velmi malé teplotní rozsahy (např.: 0-100 °C) lze vztah zjednodušit až na lineární:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta t] \quad (\Omega; \Omega, ^\circ C^{-1}, ^\circ C) \quad (4.2.1.3)$$

Důležitým parametrem odporových snímačů je redukovaný odpor  $W$ , jenž lze vyjádřit vztahem:

$$W_\vartheta = \frac{R_\vartheta}{R_0} \quad (-; \Omega, \Omega) \quad (4.2.1.4)$$

kde  $R_\vartheta$  je odpor při teplotě  $\vartheta$

$R_0$  je odpor při teplotě 0 °C

Podle tohoto parametru se posuzuje čistota materiálu odporového teploměru. Většinou je vztažná teplota  $\vartheta = 100$  °C. [5][8]

#### 4.1.2 Provedení a použité materiály

Pro odporové kovové teploměry se využívá hlavně čistých kovů. Hlavní požadavky, které by kovy měly splňovat je především neměnná hodnota koeficientu odporu v co největším teplotním rozsahu, dále musí být chemicky stabilní, odolný vůči oxidaci a musí mít možnost se dát vyrábět ve velmi čistém stavu. Nejčastější je použití platiny díky vynikajícím vlastnostem. Dále se používá nikl a měď, jak bude popsáno dále.

Značení kovových odporových snímačů se skládá ze zkratky použitého materiálu a dále následuje jmenovitá hodnota elektrického odporu při 0 °C, například nejpoužívanější jsou Pt100 a Pt1000. [5],[8],[11]

Čidlem kovového odporového snímače je tzv. měřící rezistor. Ten se vyrábí třemi možnými technologiemi.

První z nich je drátková technologie. Měřící odpor je, jak už název technologie napovídá, tvořen tenkým drátkem, který je spirálovitě stočen a zataven do keramického nebo skleněného tělíska. Viz obrázek 3.

Druhou možností je tenkovrstvá technologie. Vrstva měřícího odporu se vytváří napařováním nebo iontovým leptáním na plochu nejčastěji korundovou destičku. Výsledná vrstva je velmi tenká a i výsledné celkové rozměry destičky jsou velmi malé. Příklad použití tenkovrstvé technologie je na obrázku 4.

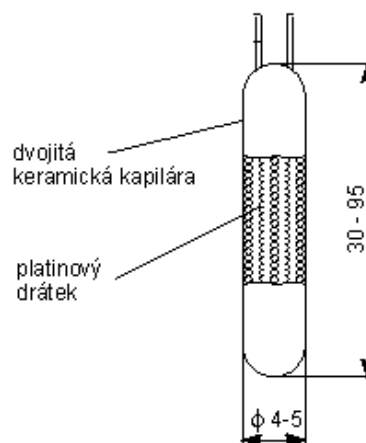
Třetí je tlustovrstvá technologie. Měřící odpor se vytváří pomocí pasty, která je nanášena na daný substrát a poté tepelně vytvrzena. Pasta vzniká rozdrčením daného odporového materiálu, a poté se do ní přidává pojivová matrice. Výsledný snímač je tvořen dlouhou, tenkou a různě tvarovanou linkou z vodivé pasty. Ukázka tlustovrstvé technologie je na obrázku 5. [8],[9],[11]

### Platina

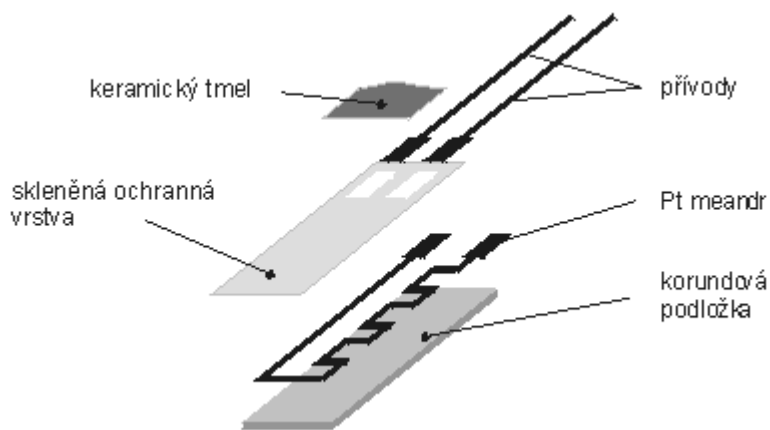
Nejčastěji používaný materiál z důvodu svých výborných vlastností. Platinové odporové teploměry se vyrábějí drátkovou, tenkovrstvou nebo i tlustovrstvou technologií. Při použití drátkové technologie je měřící odpor tvořen spirálovitě stočeným tenkým drátkem zataveným do dobrého izolantu, nejčastěji keramiky nebo skla. Pro výrazné zlepšení stability měření je nejlepší uložit volně platinovou cívku do atmosféry směsi hélia a kyslíku. Odpadne tak chyba měření, která vzniká uložení platinové cívky na izolantu, který má jinou délku teplotní roztažnost. Ukázku drátkové technologie máme na obrázku 3.

Moderní způsob výroby je vyrábět měřící čidla tenkovrstvou technologií, při níž se platinový odpor vytvoří na ploché korundové destičce technikou napařování a iontového leptání. Výhodou je rychlejší odezva. Další velké výhody jsou vyšší odpor a nižší cena. Nevýhodou je nižší časová stálost. Příklad použité tenkovrstvé technologie na obrázku 4.

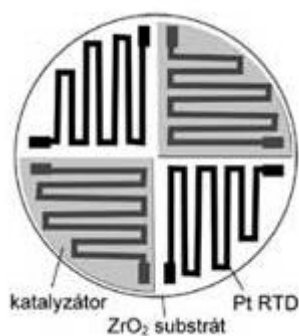
Pro přesnost platinových čidel platí norma, konkrétně je to norma IEC-751 (IEC ČSN 60 751). Ta udává pro danou třídu přesnosti teplotní toleranci na daném teplotním rozsahu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Ve světě ale nejsou výjimkou ani přísnější normy, například U. S. Industrial Standard. [5],[8],[11]



Obrázek 3 Drátkový platinový odporový snímač [5]



Obrázek 4 Plošný tenkovrstvý odporový teploměr [5]



Obrázek 5 Ukázka tlustovrstvé technologie [9]

### Nikl

Obvykle se vyrábějí tenkovrstvou technologií. Jejich velkou výhodou je velká citlivost, rychlá časová odezva a malé rozměry. Ve srovnání s platinovými teploměry trpí ale velmi vysokou nelinearitou. Při vyšších teplotách dochází ke změnám v krystalické modifikace niklu a tím změně teplotního součinitele odporu, proto mají i omezený rozsah použití. Používají se většinou v rozsahu teplot od  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  do pouhých  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Trpí také na menší časovou stálost.

Z pohledu přesnosti lze opět stejně jako platinová čidla i niklová čidla rozdělit do tříd přesnosti. Hodnoty pro jednotlivé třídy přesnosti jsou v tabulce 2. [8],[11]

### Měď

Měděné odporové teploměry se příliš nepoužívají. Největší nevýhody jsou malá rezistivita a snadná oxidace mědi. Výhodnou aplikací je přímé měření měděného vinutí elektromotoru. Obvykle používaná technologie je drátková. Nejpoužívanější měřiče jsou se jmenovitou hodnotou odporu 50 a  $100\ \Omega$ . Rozsah měřených teplot je od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [8],[11]

Tabulka 1 Třídy přesnosti a příslušné hodnoty tolerancí platinových čidel [12]

třída přesnosti	teplotní tolerance $\Delta\vartheta$	teplotní rozsah
1/10 B	$\pm (0,03+0,0005 \vartheta )$	0 až 100 °C
1/3 B (AA)	$\pm (0,10+0,0017 \vartheta )$	-50 až 250 °C
A	$\pm (0,15+0,002 \vartheta )$	-50 až 650 °C
B	$\pm (0,3+0,005 \vartheta )$	-200 až 850 °C
C	$\pm (0,60+0,01 \vartheta )$	-200 až 850 °C

Tabulka 2 Třídy přesnosti niklových čidel [12]

třída přesnosti	teplotní tolerance $\Delta\vartheta$	
	$\vartheta < 0$	$\vartheta > 0$
A	$\pm (0,2+0,014 \vartheta )$	$\pm (0,2+0,0035 \vartheta )$
B	$\pm (0,4+0,028 \vartheta )$	$\pm (0,2+0,007 \vartheta )$

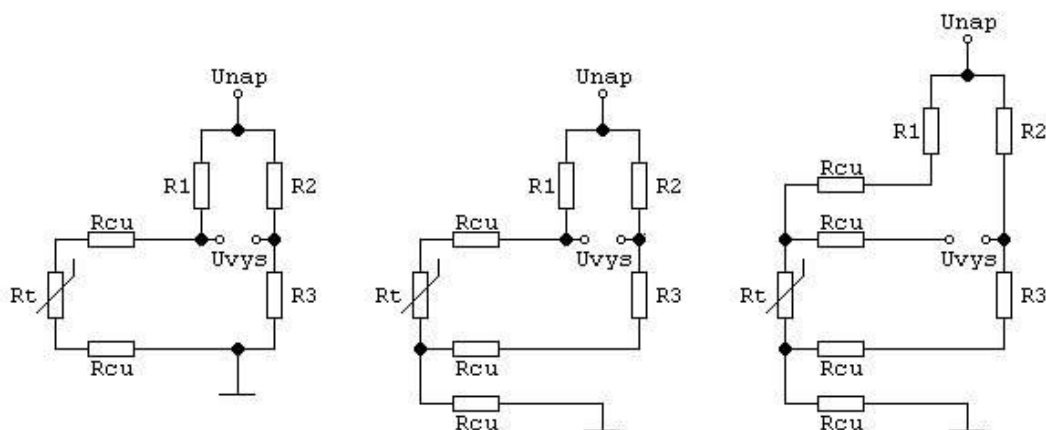
## 4.2 Zapojení kovových odporových čidel

Měření s kovovými odporovými senzory teploty je velmi přesné. Může na ně ale působit několik zásadních vlivů, které mohou přesnost výrazně snížit. Mezi nejvýraznější nežádoucí vlivy ovlivňující měření patří vliv měřicího proudu, neboli elektrického proudu, který prochází přímo senzorem teploty. Průchodem elektrického proudu se odporový senzor zahřívá a dochází k nežádoucí změně odporu. Dalším výrazným nežádoucím vlivem je vliv odporu vedení k senzoru. Základním úkolem zapojení odporových čidel je tedy převod změny odporu na napětí a dále též minimalizace nežádoucích vlivů, které snižují přesnost měření.

Existuje mnoho zapojení, které se dají rozdělit do dvou základních skupin. Podle principu dělíme zapojení na odporová můstková a na zapojení se zdrojem proudu. [13]

### 4.2.1 Odporový můstek

Tato zapojení využívají odporové můstky, nejčastěji Wheatstonův můstek. Základním zapojení je takzvané **více vodičové připojení snímače**.



Obrázek 6 Dvou vodičové zapojení, třívodičové zapojení a čtyřvodičové zapojení [13]

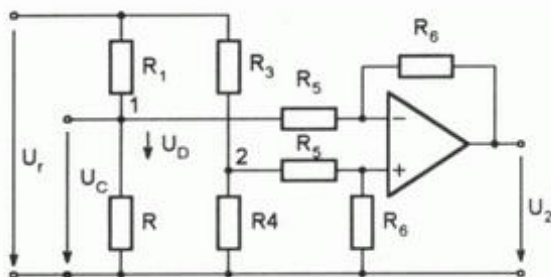
V zapojení představuje odpor  $R_t$  samotný odporový senzor a odpory  $R_{cu}$  reprezentují odpory přívodních vodičů (měděné). Zapojení funguje tak, že změnou odporu senzoru dojde k rozvážení do té doby vyrovnaného můstku a na výstupu se objeví  $U_{vys}$ . Hodnoty odporů můstku se volí tak, aby při minimální hodnotě měřené teploty dané navrhnutým teplotním rozsahem, byl můstek vyvážen a při maximálně teplotě aby bylo výstupní napětí maximální.

V reálných podmínkách se odpor vedení mezi přístrojem a snímačem vlivem změn teploty okolí mění. U dvou vodičového zapojení jsou spojovací vedení i snímač zapojeny do jedné větve můstku. Tato skutečnost působí chybu měření. Proto se dvou vodičového zapojení používá pouze na kratší vzdálenosti mezi snímačem a vyhodnocovacím přístrojem a pro větší rozsahy teplot, kde je chyba v poměru k rozsahu relativně menší.

U tří vodičového zapojení je tento problém částečně řešen připojením vyrovnávacího odporu. Třetí vodič je v napájecí větvi a napájecí bod je posunut až ke snímači teploty. Vliv změn teploty na spojovací vedení nepůsobí rušivě, protože změny odporu působí ve dvou sousedních větvích, a tím se navzájem kompenzují.

U čtyřvodičového zapojení je vložen další vyrovnávací odpor a tím je dosaženo ještě lepší kompenzace. [5][13]

V praxi je potřeba poměrně malý napěťový signál zesílit na určitou vyšší hodnotu, to zajistí **zapojení s operačními zesilovači**. Základní zapojení s rozdílovým zesilovačem je na obrázku 7.



Obrázek 7 Můstkové zapojení s rozdílovým zesilovačem [13]

Výsledná hodnota napětí je potom dána vztahem:

$$U_2 = U_r \cdot \frac{R_6}{R_5} \cdot \left( \frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (V; V, \Omega, \dots) \quad (4.2.1.1)$$

Kde  $U_2$  je výstupní napětí

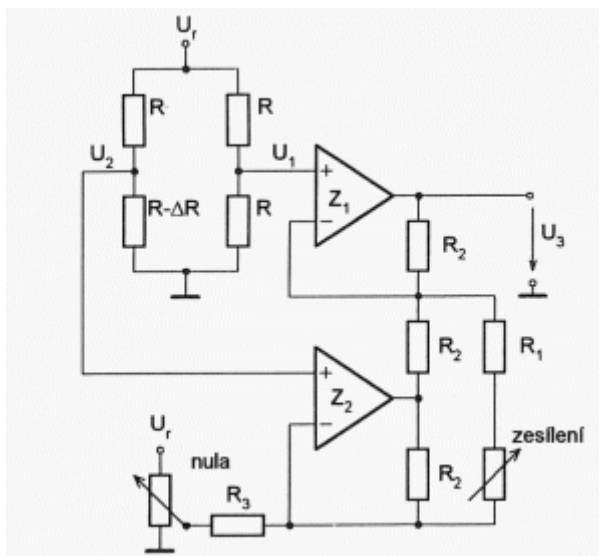
$U_r$  je napětí od snímače teploty

$R_x$  jsou jednotlivé hodnoty odporů

Hodnota zesílení je pevně dána poměrem  $R_6/R_5$ . Při použití zapojení na obrázku 8. lze zesílení měnit a tím kompenzovat nesymetrie rezistorů v můstku, napěťovou nesymetrii operačních zesilovačů a jiné další nežádoucí nesymetrie.

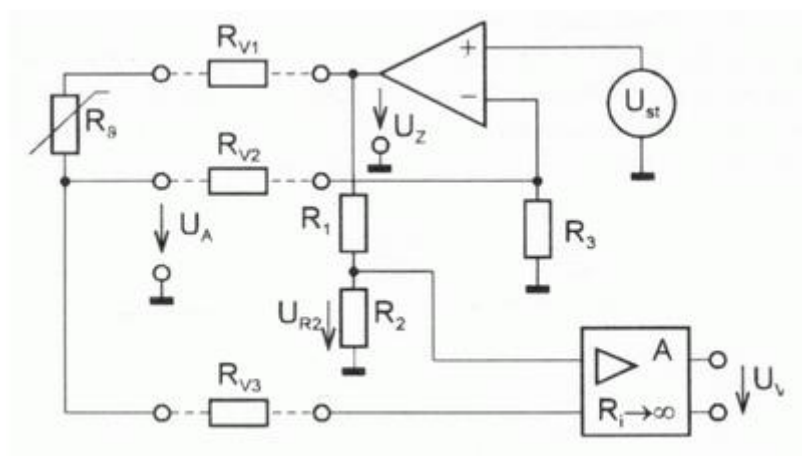
Zesílení rozdílového napětí  $U_1 - U_2$  je dáno vztahem :

$$\frac{U_3}{(U_1 - U_2)} = 2 \cdot \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (V, \Omega) \quad (4.2.1.2)$$



Obrázek 8 Asymetrický přístrojový zesilovač pro zesílení rozdílového napětí můstku[13]

Problém výše uváděných pasivních můstků je nelineární převodní charakteristika. Proto se v praxi používá tzv. **aktivní můstek**. Tohoto zapojení poskytuje linearizaci převodní charakteristiky senzoru a tím snížení výsledné chyby měření, omezení vlivu kolísání napájecího napětí a parazitních napětí a proudů apod. Třívodičové zapojení senzoru v aktivním můstku je na obrázku 9.



Obrázek 9 Třívodičové zapojení senzoru v aktivním můstku[13]

Pro výstupní napětí platí vztah:

$$U_v = A \cdot U_{st} \cdot \frac{R_v \cdot R_2 - R_v \cdot R_1 + R_s \cdot R_2 - R_3 \cdot R_1}{R_3 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (V; -, V, \Omega, \dots) \quad (4.2.1.3)$$

Kde  $U_v$  je výstupní napětí

$A$  je zesílení aktivního zesilovače

$U_{st}$  je napájecí napětí obvodu

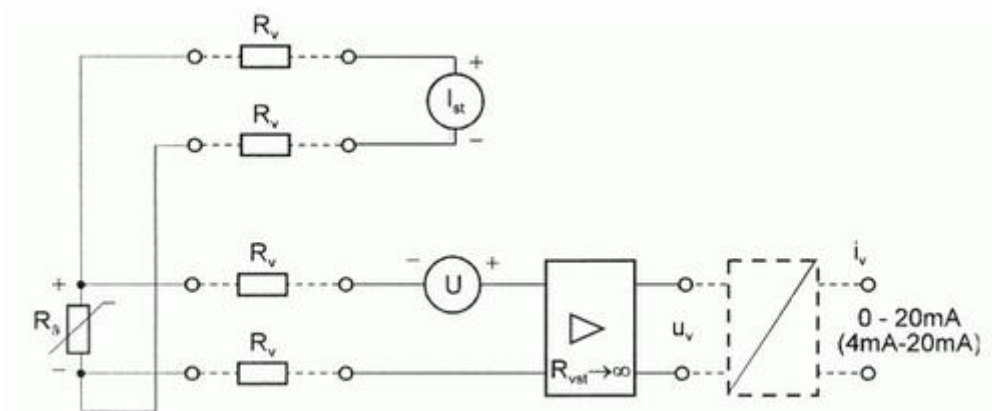
$R_s$  je proměnný odpor reprezentující senzor teploty

$R_x$  jsou jednotlivé hodnoty odporů



### 4.2.2 Zapojení s proudovým zdrojem

Tato zapojení využívají většinou čtyřvodičová zapojení. Blokové schéma převodníku je na obrázku 10.

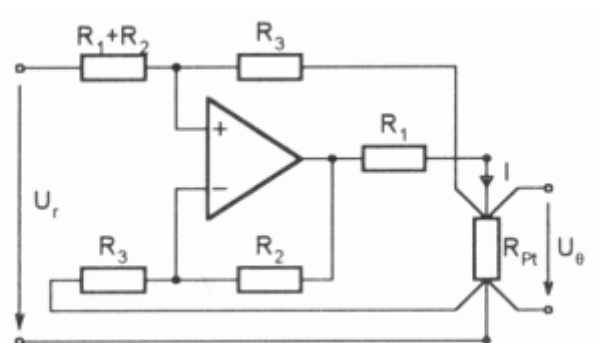


Obrázek 10 Blokové schéma převodníku se zdrojem proudu[13]

Protože napěťový zesilovač má teoreticky nekonečný vstupní odpor, neuplatní se úbytky napětí na odporu vedení k zesilovači. Naopak úbytky na odporech vedení od zdroje proudu sice vznikají, ale vlivem konstantního protékajícího proudu, nemají vliv na vzniklém napětí na senzoru. Proto se zde vliv vedení neuplatní.

Výstupem je unifikovaný signál 0-20 mA, častěji pak 4-20mA. Výhoda použití druhé varianty je snazší detekce poruchy (u první varianty nevíte, jestli při výstupu 0 mA je teplota na spodní mezi rozsahu anebo jestli došlo k poruše).

Detailnější schéma zapojení obvodu s proudovým zdrojem s negativním vnitřním odporem je na obrázku 11.



Obrázek 11 Detailní schéma zapojení s proudovým zdrojem s negativním vnitřním odporem[13]

Velikost negativního odporu se reguluje hodnotou odporu  $R_1$

Zapojením s regulací negativního vnitřního odporu proudového zdroje lze snížit nelinearitu platinového senzoru z původních 0,6 % až na 0,04%. [13]

## 4.3 Polovodičové odporové teploměry

### 4.3.1 Pozistory

Pozistory jsou polovodičové odporové snímače s kladným teplotním součinitelem odporu. Na výrobu se používá polykrystalická feroelektrická keramika (např.: BaTiO<sub>3</sub>).

Použití pozistoru je v závislosti na tvaru jejich charakteristiky teplotní závislosti odporu, která nejdříve mírně klesá a později strmě stoupá. Proto se používají v malém teplotním rozsahu právě v té strmě stoupající části jejich charakteristiky. [5]

### 4.3.2 Negastory

Jsou to nejpoužívanější polovodičové odporové teploměry. Negastory se vyrábějí spékáním oxidů Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, CuO, MnO, NiO, CoO, BaO a dalších.

Negastory jsou termistory se záporným teplotním součinitelem odporu. Této vlastnosti se valně využívá. Jejich teplotní součinitel je zhruba o řád větší než u kovů.

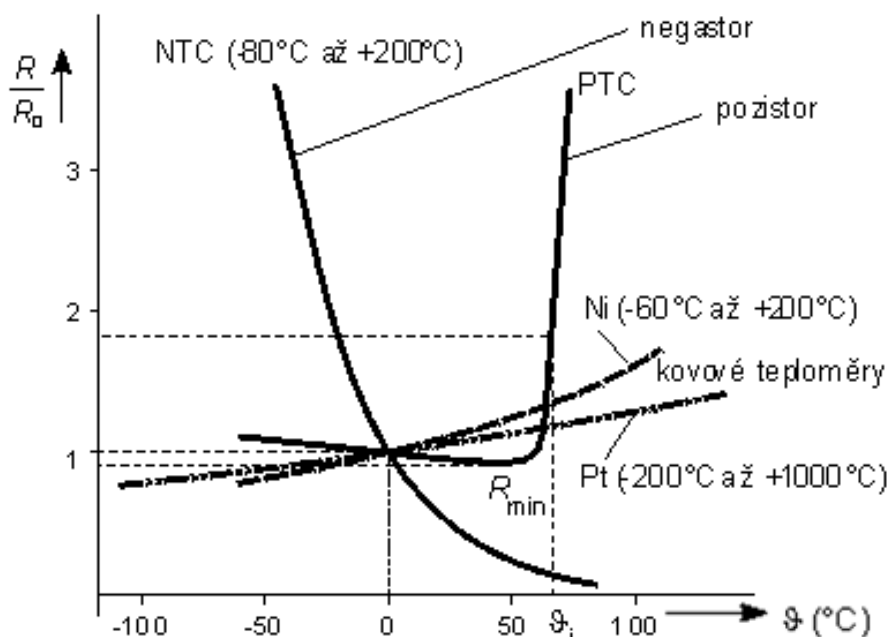
Závislost elektrického odporu na teplotě je nelineární a popisuje ji vztah:

$$R = R_0 * e^{-B * (\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T})} \quad (\Omega; \Omega, -, K, K) \quad (4.3.2.1)$$

kde  $R_0$  je odpor při teplotě  $T_0$

$B$  je materiálová konstanta

Negastory se vyrábějí ve velmi širokém rozmezí hodnot odporu od 0,1  $\Omega$  až do jednotek M $\Omega$ . Pro měřicí účely se používají většinou v takzvané perličkové formě ve skleněném držáku. Průměr perličky bývá poměrně malý zhruba 0,2 a 3 mm, což je jejich velká výhoda. Další výhoda je vysoká citlivost. Proto se negastory používají pro měření velmi malých a rychlých teplotních změn, pro bodové měření teploty nebo pro měření povrchových teplot těles. Jejich běžný teplotní rozsah je 60 °C až do +200 °C. Vyrábějí se ale i negastory co zvládají měřit až do 400 °C. Jejich hlavní nevýhodou je časová nestálost. [5]



Obrázek 12 Porovnání charakteristik polovodičových a kovových odporových teploměřů[5]

## 5 TERMOČLÁNKY

Termočlánky pracují na principu Seebeckova jevu, to znamená, pokud spojíme dva kovy a tím vytvoříme termočlánek a na jednom (měřicím) konci bude vyšší teplota než na druhém konci, naměříme v obvodu termoelektrické napětí a obvodem začne procházet elektrický proud. Experimentálně byl zjištěn vztah pro termoelektrické napětí:

$$\Delta U_{AB} = (\alpha_A - \alpha_B) \cdot \Delta T + 0,5 \cdot (\beta_A - \beta_B) \cdot \Delta T \quad (\text{V}; \text{V} \cdot \text{K}^{-1}, \text{V} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}, \text{V} \cdot \text{K}^{-2}, \text{V} \cdot \text{K}^{-2}, \text{K}) \quad (5.1)$$

kde  $\alpha_A$  a  $\beta_A$  jsou Seebeckovy koeficienty prvního a druhého řádu pro první kov  
 $\alpha_B$  a  $\beta_B$  jsou Seebeckovy koeficienty prvního a druhého řádu pro druhý kov  
 $\Delta T$  je rozdíl teplot obou spojů

Pro technickou praxi je vztah zbytečně složitý a proto se používá zjednodušený vztah:

$$\Delta U = \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (\text{V}; \text{V} \cdot \text{K}^{-1}, \text{K}, \text{K}) \quad (5.2)$$

kde  $\alpha$  je Seebeckův koeficient

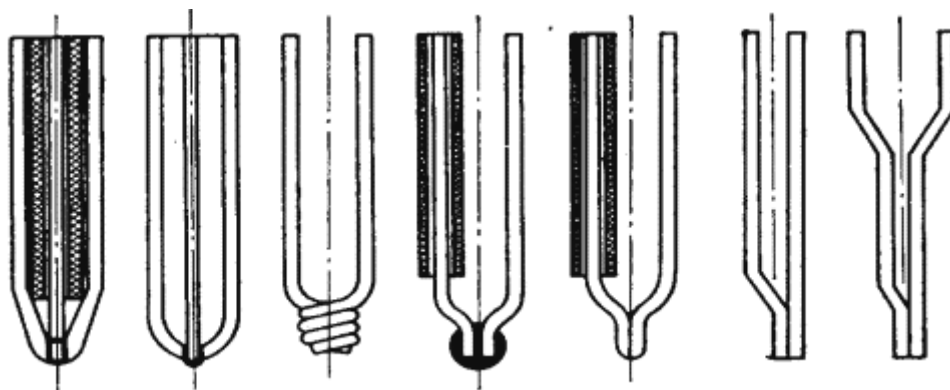
$T_1$  a  $T_2$  jsou teploty na opačných koncích termočlánku [3][16]

Tabulka 3 Příklad Seebeckových koeficientů pro některé kovy vztahované k olovu [16]

Kov	$\alpha$ [ $\mu\text{V}/\text{K}$ ]	$\beta$ [ $\mu\text{V}/\text{K}^2$ ]
Antimon	35,6	0,145
Bismut	-74,4	0,032
Konstantan	-38,1	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,1	-3,02
Platina	-3,03	3,25
Železo	16,7	-0,0297

### 5.1 Provedení měřícího konce termočlánku

Jednou z nejdůležitějších věcí, která má zásadní vliv na vlastnosti a tím i použití termočlánku je provedení měřícího konce. Spojení měřícího konce se provádí mechanickým spojením, pájením anebo svařením daných drátů. Příklady řešení měřícího spoje jsou na obrázku 13. [14]



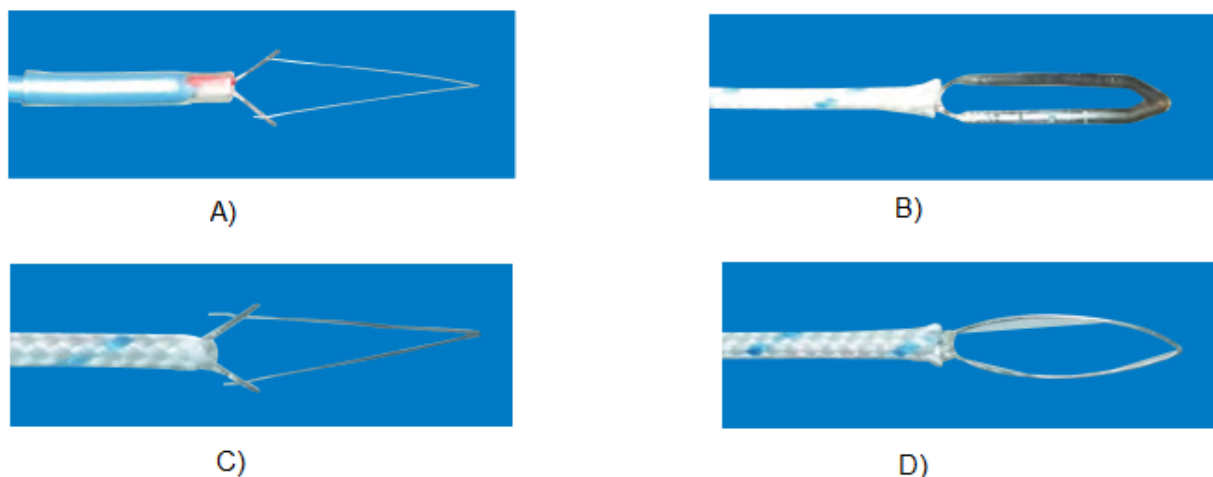
Obrázek 13 Měřící zakončení různých termočlánků [15]

Mezi nejčastěji používané patří bodový termočlánek (obrázek 14 A.). Průměr kontaktního hrotu je velmi malý, pohybuje se kolem hodnoty 25  $\mu\text{m}$ . Hlavní aplikací tohoto termočlánu je měření teploty malých objektů případně měření teploty proudění vzduchu. Čidlo má extrémně krátkou časovou konstantu a vysokou přesnost. Nevýhodou je malá mechanická stabilita, která neumožňuje použití v náročnějších aplikacích jako je například měření proudící kapaliny.

Pro měření menších ploch je ideální plošný termočlánek (obrázek 14 B.). Délka jeho měřicího hrotu je cca 10mm a průměr 40  $\mu\text{m}$ . Předností je malá časová konstanta a vyšší mechanická odolnost oproti bodovému termočlánu.

Kombinací dvou výše uvedených řešení vznikne takzvaný kombinovaný termočlánek (obrázek 14 C). Tento termočlánek spojuje výhodou obou řešení, tj. velmi nízká časová konstanta a slušná mechanická odolnost. Průměr hrotu je zhruba 25  $\mu\text{m}$ , délka pak cca 7mm.

Pro specifické aplikace se používá víceúčelový termočlánek (obrázek 14 D.). Provedením velmi robustní termočlánek se používá hlavně při měření extrémně rychlých změn měřených teplot. Je též vhodný pro měření menší ploch. [14],[18],[23]



Obrázek 14 Ukázka provedení termočlánků A) bodový B) plošný C) kombinovaný D) víceúčelový

## 5.2 Druhy termočlánků

Základní vlastností materiálu na výrobu termočlánekových snímačů je velký a pokud možno co nejvíce lineární přírůstek napětí v závislosti na teplotě. Důležitá je též stabilita materiálu, která zajistí přesnost i při dlouhodobém měření. Neméně důležitá je též odolnost proti vnějším mechanickým a chemickým vlivům.

Vlastnosti termočlánu závisí z velké části na dvojici použitých materiálů. Známých spojení materiálu je asi 300. Jednotlivá spojení materiálu jsou normalizována a označena velkým písmenem. Typy termočlánků použitelné jako průmyslové měřiče teploty popisuje norma DIN EN 60584-1. Na průmyslové měření se používá nejčastěji typ J, K, T a E. Pro vysoké teploty R, S a C.

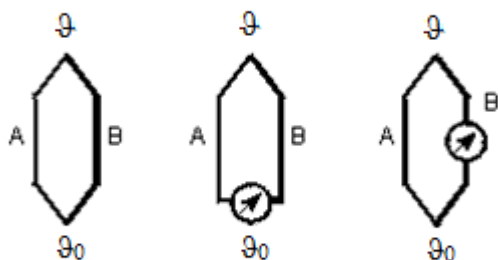
Velký přehled typů termočlánků, jejich měřicí rozsah a popis jejich možností použití je v tabulce 4. [5],[14],[17]

Tabulka 4 Přehled typů termočlánků, popis jejich vlastností a příklady jejich použití [10]

typ	měřicí rozsah [°C]	kombinace materiálů	Použití
B	0-1700	Pt, 30%Rh - Pt, 6%Rh	pro měření vyšších teplot, nevyžaduje kompenzační vedení
C	0-2300	W, 5%Re - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
D	0-2300	W, 3%Re - W, 25%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
E	-200-950	Ni, 10%Cr - Cu, 45% Ni	všeobecné použití, pro měření středních a nižších teplot
G	0-2300	W - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
J	-210-1200	Fe - Cu, 45%Ni	pro měření vyšších teplot v redukční atmosféře
K	-200-1250	Ni, 10%Cr - Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si	všeobecné použití v oxidační atmosféře
L	0-900	Fe - Cu, 45% Ni	zastaralý typ, nepoužívá se
M	-50-1410	Ni - Ni, 18%Mo	
N	-270-1300	Ni, 14%Cr, 1,5%Si - Ni, 4,5%Si, 0,1%Mg	nový typ, náhrady typu K
P	0-1395	Platinel - Platinel	stabilnější, ale dražší než typy K a L
R	-50-1750	Pt, 13%Rh - Pt	velmi přesný, pro vyšší teploty
S	-50-1750	Pt, 10%Rh - Pt	velmi přesný, pro vyšší teploty
T	-270-400	Cu - Cu, 45%Ni	všeobecné použití pro nižší teploty, odolný vlhkosti
U	0-600	Cu-Cu, 45%Ni	zastaralý typ, podobný typu T, nepoužívá se

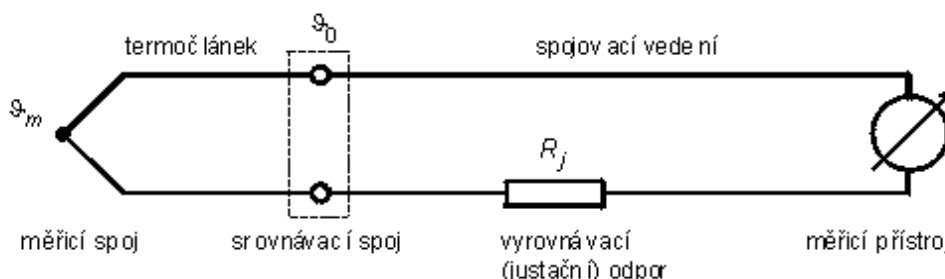
### 5.3 Zapojení obvodu s termočlánkem

Základní uspořádání obvodu termočlánku je zobrazeno na obrázku 15 vlevo. Obvod je složen ze dvou kovů A a B, které jsou v horní a dolní části vodivě spojeny. Horní spoj označujeme jako měřicí spoj, který měří teplotu  $\vartheta$  a dolní spoj označujeme jako referenční spoj. Pro správnou funkci termočlánku je nezbytně důležité, aby teplota  $\vartheta_0$  byla konstantní. Toho se dosahuje kompenzací teploty spoje. Pro potřeby změření vzniklého termoelektrického napětí se do obvodu zapojí měřicí přístroj jak naznačeno na obrázku 15 uprostřed a napravo. [5]



Obrázek 15 Základní uspořádání termočlánku [5]

V praxi se do obvodu vkládá spojovací nebo kompenzační vedení s korekčním nastavovacím odporem. Tento odpor se nazývá justanční a nastavuje se na hodnotu většinou  $20 \Omega$ , případně  $15 \Omega$ . (obrázek 16.) Při použití kompenzačního vedení se do obvodu ještě vkládá další prodlužovací vedení většinou z mědi. Kompenzační vedení slouží k přenosu termočlánekové napětí k srovnávacímu místu, aniž by nastalo působení teploty prostředí. [5]



Obrázek 16 Zapojení se spojovacím vedením s justančním odporem [5]

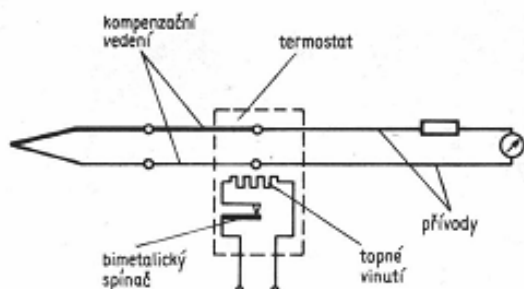
Jak už bylo řečeno, je zásadní pro přesnost měření, aby teplota srovnávacího konce byla konstantní. K tomuto účelu slouží **kompenzační metody**.

První metodou je použití **Dewarových nádob naplněných směsí vody a ledu**. Srovnávací konec je v této směsi držen na teplotě  $0^\circ\text{C}$ . V reálných provozních podmínkách není tato metoda realizovatelná, používá se pouze při přesných laboratorních měření.

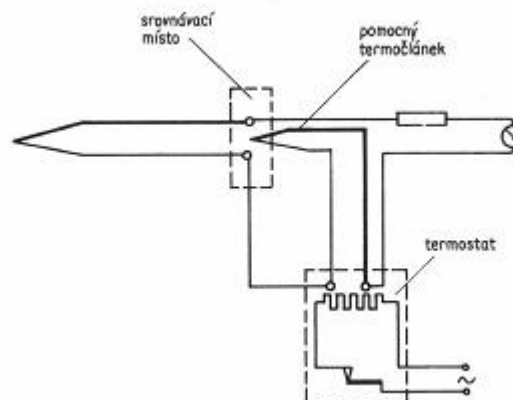
Další používanou možností je použití **termostatu** na srovnávacích koncích termočláneků (obrázek 17). Termostat vyhříváný na danou teplotu (obvykle  $50^\circ\text{C}$ ) se většinou používá jako srovnávací místo pro více termočláneků na jednou.

Často používaný je **pomocný termočlánek** (obrázek 18), který měří kolísající teplotu srovnávacích konců. Změny srovnávací teploty jsou kompenzovány díky sériovému zapojení pomocného termočláneku. Pro správnou funkci zapojení je nezbytné, aby oba termočlánky byly ze stejných materiálů.

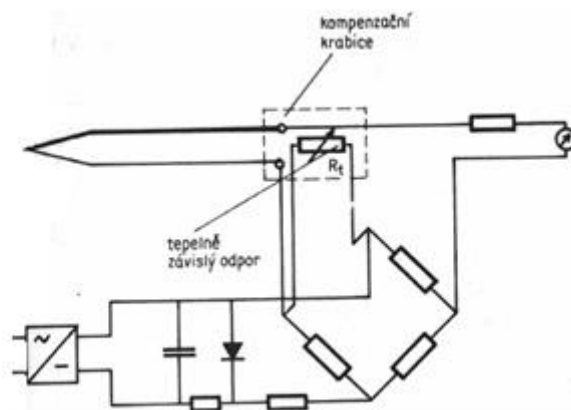
Někdy se používá takzvaná **kompenzační krabice** (obrázek 19). Srovnávací konce jsou vyvedeny do robustní skříně, v níž je umístěn teplotně závislý odpor. Ten je zapojen do můstku. Zvýšená teplota vyvolá snížení termočlánekového napětí, ale i zvýšení odporu  $R_t$  a na diagonále se zvýší napětí. Tak se vykompenzuje pokles termočlánekového napětí. [24]



Obrázek 17 Termočlánek s termostatem [24]

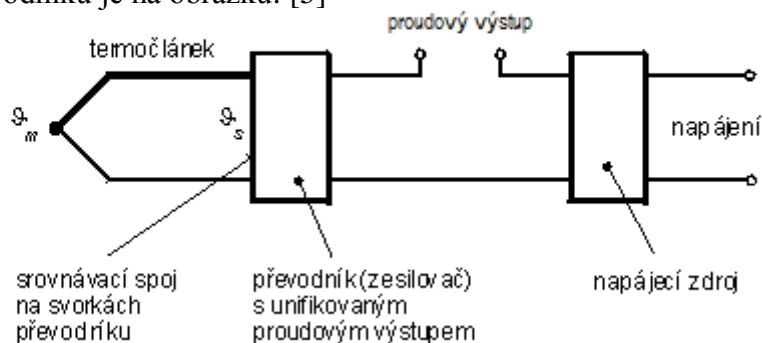


Obrázek 18 Zapojení s pomocným termočlánekem [24]



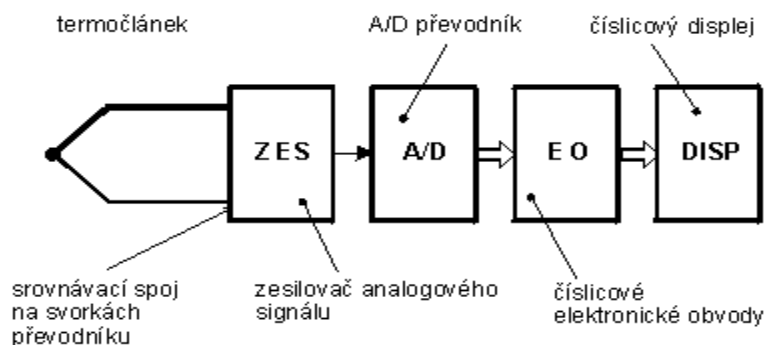
Obrázek 19 Schéma kompenzační krabice [24]

Ke snadnějšímu dalšímu zpracování signálu je výhodné ho upravit na danou unifikovanou hodnotu. K tomuto účelu nám slouží **dvouvodičový převodník** (obrázek 20). Tato metoda využívá skutečnosti, že zesilovače proudu v převodníku je menší než 4mA. Výstup zesilovače je navrhnout tak, aby při minimální hodnotě teploty byl na výstupu proud 4mA. Poté se proudový signál lineárně zvyšuje až do maximální teploty, které odpovídá signál 20 mA. Toto zapojení je výhodné z důvodu úspory materiálu na kompenzační vedení a také z důvodu lehké identifikace závady, protože 0mA je mimo povolený rozsah. Nevýhodou je nutnost vnějšího napájení. Blokové schéma převodníku je na obrázku. [5]



Obrázek 20 Blokové schéma dvouvodičového převodníku [5]

Moderní je převod signálu na číslicovou digitální hodnotu. Blokové schéma takového teploměru je na obrázku 21. Analogový signál z termočlánu je po zesílení převeden na číslicovou hodnotu v A/D převodníku. Digitální signál je pak zpracován a zobrazen na displeji. [5]



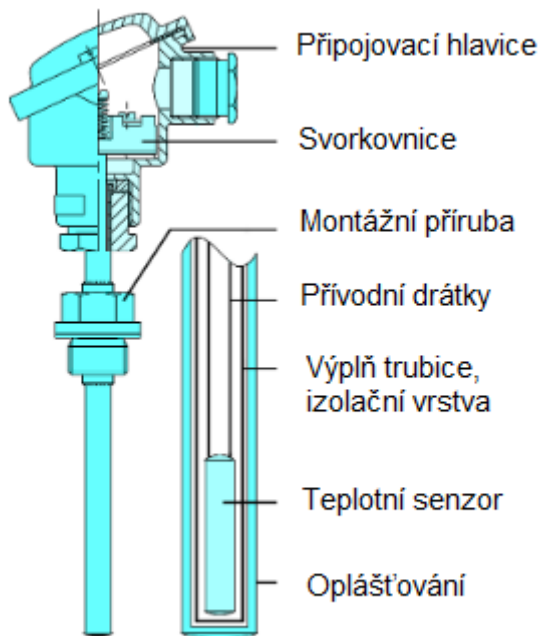
Obrázek 21 Teploměr s číslicovým výstupem [5]

## 6 KONSTRUKCE SNÍMAČŮ

Snímače teploty se skládají z daného měřicího čidla (u odporového snímače je odporové čidlo a termočlánek je to samotný měřící konec termočlátku) a dále přívodního anebo případně kompenzačního vedení.

Pro praktické použití jsou snímače upravovány do takzvané tyčové opláštěvané podoby. Měřící čidlo je vloženo do tenké trubičky, která je na druhém konci opatřena přírubou, na které je svorkovnice sloužící k připojení snímače. Vodiče přívodního nebo případného kompenzačního vedení u termočláneků, jsou vzájemně elektricky izolovány keramickými trubičkami. Další možností izolace vedení je vložení do niklové trubičky naplněné práškem z některého z elektrických izolantů, který je ale zároveň vynikajícím tepelným vodičem. Nejčastěji se používá MgO nebo  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ukázka tyčového opláštěvaného senzoru je na obrázku 22 a obrázku 23.

[5],[14],[19]



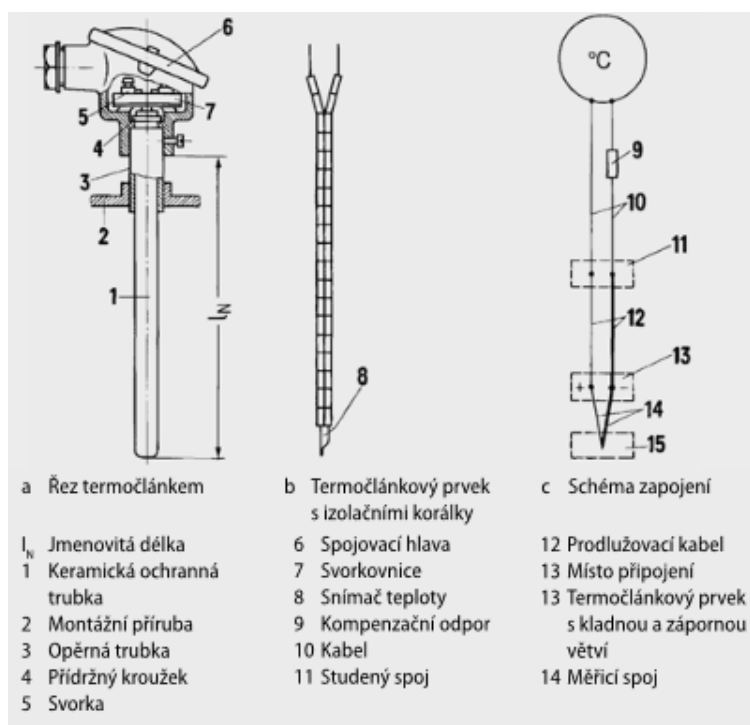
Obrázek 22 Tyčový opláštěvaný odporový snímač[19]

Tato úprava snímačů zajišťuje dobrou mechanickou i chemickou odolnost měřící aparatury. Pro její další zlepšení je možné nainstalovat ochrannou trubku z kovu nebo keramiky anebo případně ještě ochrannou jímku. Ochranné trubky a jímky se nejčastěji vyrábí z nerezové oceli. Nerezová ocel má totiž velmi dobrou chemickou odolnost a zároveň její cena není tak vysoká. Dalším používaným materiálem je Inconel, který má velkou teplotní odolnost.

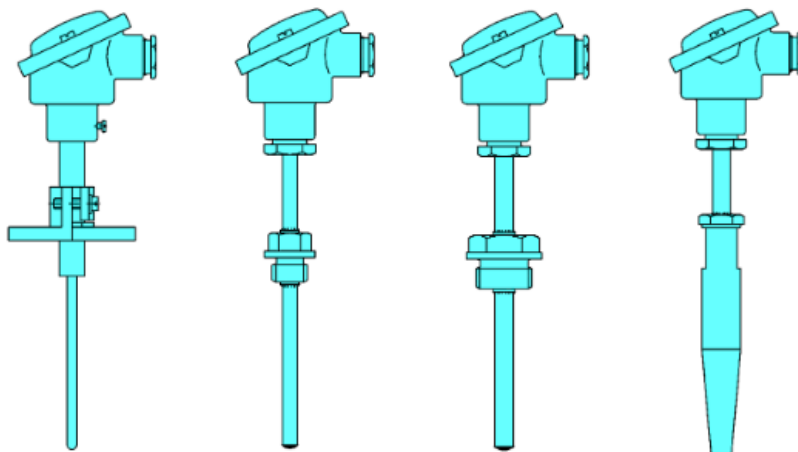
Příklady provedení ochranných trubek a jímk jsou na obrázku 24.

[5],[14],[19]





Obrázek 23 Tyčový oplášťovaný termočlánkový snímač [20]



Obrázek 24 Různé varianty nástavců, ochranných trubek a ochranných jímek [19]

## 7 DYNAMICKÝ REŽIM SNÍMAČE, ČASOVÁ KONSTANTA

Teplotní snímač (termočlánek i odporový snímač) je většinou pro praktické využití chráněn před vnějšími nepříznivými vlivy ochranou trubkou nebo jímkou. Z principu měření teploty se ale musí vyrovnat teplota snímače a měřeného objektu a proto se při použití ochranné bariéry zvyšuje časově teplotní setrvačnost článku a nastává zde časové zpoždění nazývané též časová konstanta přístroje. Toto zpoždění závisí na materiálu, rozměrech snímače a také na vlastnostech prostředí. [14],[22]

### 7.1 Základní odvození

Pro popis dynamických vlastností snímače je možné použít diferenciální rovnice. Při předpokládané linearitě přenosu jsou to lineární diferenciální rovnice. Zápis diferenciálních rovnic vypadá obecně takto:

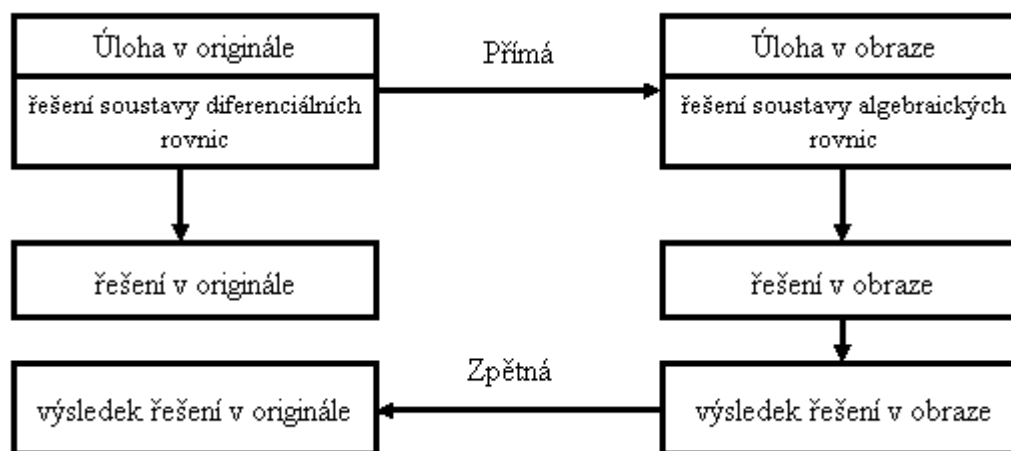
$$a_n y^n + a_{(n-1)} y^{(n-1)} + \dots + a_1 y^1 + a_0 y^0 = b_m x^m + b_{(m-1)} x^{(m-1)} + \dots + b_1 x^1 + b_0 x \quad (7.1.1)$$

kde na levé straně jsou derivace výstupní veličiny  $y$ , na pravé straně jsou derivace vstupní veličiny  $x$  a  $a$  a  $b$  jsou obecné koeficienty diferenciální rovnice

Podle nejvyššího stupně derivace výstupní veličiny se určuje stupeň diferenciální rovnice a tím i stupeň popisovaného přístroje.

Klasické řešení diferenciálních rovnic je ale často poměrně složité, proto se může použít řešení pomocí Laplaceovy transformace. Celá úloha je převedena nejdříve přímou transformací na obraz, tam je vyřešena, a poté je zpětnou transformací převedena zpět [25].

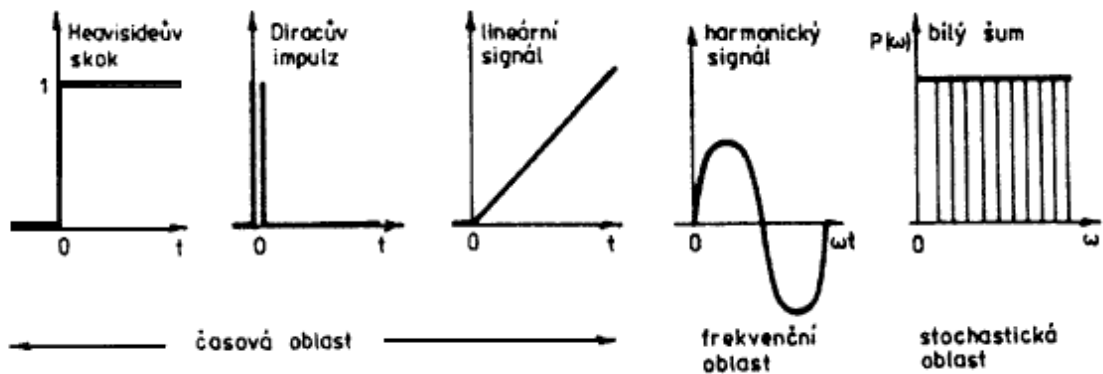
Možné způsoby řešení jsou zobrazeny na obrázku 25.



Obrázek 25 Možné způsoby řešení rovnic[25]

Pro popis chování přístrojů se používají výsledky odezvy na charakteristické vstupní testovací signály. Definované testovací signály jsou:

- jednotkový skok, tzv. Heavisideův skok** – výsledkem je přechodová charakteristika  $h(t)$ ,
- jednotkový impuls, tzv. Diracův impuls** -výsledkem je impulsní charakteristika
- signál s konstantní rychlostí změny** - odezva je rychlostní charakteristika
- harmonický signál** - odezva je harmonický přenos
- bílý šum** (signál s konstantní spektrální výkonovou hustotou v daném pásmu) [25].



Obrázek 26 Přehled testovacích signálů[25]

## 7.2 Přechodová charakteristika

Přechodová charakteristika  $h(t)$  je odezva systému na jednotkový skok. Jednotkový skok je matematicky definován jako:  $x(t)=0$  pro  $t<0$  a  $x(t)=1$  pro  $t>0$ .

Pokud je systém popsán diferenciální rovnicí prvního řádu je postup řešení následující.

Vychází se ze základní rovnice:

$$a_1 y' + a_0 y = b_0 x \quad (7.2.1)$$

Tento výraz se upraví podělením rovnice členem  $a_0$  :

$$\frac{a_1}{a_0} y' + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (7.2.2)$$

Poté se definují nové pojmy a to časová konstanta přístroje  $\tau$  a zesílení systému  $k$ , pro které platí:

$$\tau = \frac{a_1}{a_0} \quad k = \frac{b_0}{a_0} \quad (7.2.3)$$

Po dosazení:

$$\tau y' + y = kx \quad (7.2.4)$$

Rovnici se řeší pro  $x=1$  (jednotkový skok)

Řešení homogenní diferenciální rovnice se předpokládá ve tvaru:

$$y = ce^{pt} \quad (7.2.5)$$

Z toho vyplývá tvar charakteristické rovnice  $Tp + 1 = 0$ , odkud  $p = -\frac{1}{T}$ , takže řešením je:

$$y = ce^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7.2.6)$$

Partikulární integrál se určí ve tvaru  $y_p = A$  a dostane se tedy  $A = k$ . Integrál má pak tvar:

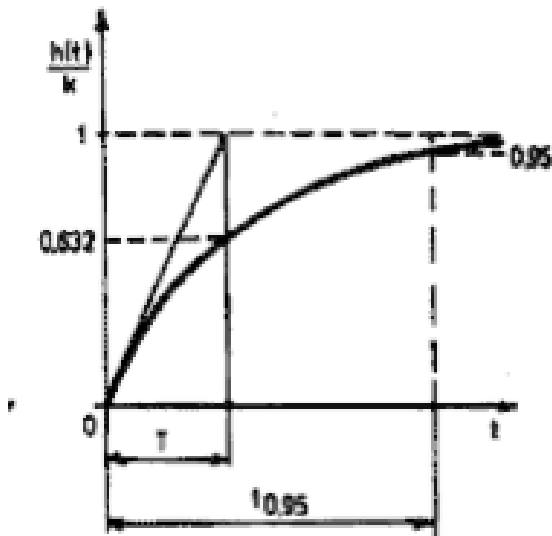
$$y = k + ce^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7.2.7)$$

Integrační konstantu  $C$  se určí z počáteční podmínky  $y=0$  pro  $t=0$ . Výsledkem je tedy  $C = -k$ .

Konečné řešení je:

$$y = h(t) = k \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7.2.8)$$

Samotná hodnota časové konstanty se v praxi určí tak, že se změří čas potřebný k nárůstu měřené veličiny na 63,2% z maximální hodnoty. Pro náběh měřené veličiny na plnou hodnotu je potřeba 4-5 časových konstant [25].



Obrázek 27 Přechodová charakteristika[25]

Pokud je systém popsán diferenciální rovnicí druhého řádu, je situace komplikovanější.

Základní diferenciální rovnici druhého řádu ve tvaru  $a_2 y'' + a_1 y' + a_0 y = b_0 x$  se opět upraví na tvar:

$$\frac{a_2}{a_0} y'' + \frac{a_1}{a_0} y' + y = \frac{b_0}{a_0} x \quad (7.2.9)$$

Její charakteristická rovnice je:

$$p^2 + \frac{a_1}{a_2} p + \frac{a_0}{a_2} = 0 \quad (7.2.10)$$

Kořeny se vypočítají podle známého vzorce pro kvadratickou rovnici:

$$p_{1,2} = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \sqrt{\left(\frac{a_1}{2a_2}\right)^2 - \frac{a_0}{a_2}} \quad (7.2.11)$$

Podle hodnoty kořenů  $p_1$  a  $p_2$  mohou nastat tyto případy:

1. Kořeny jsou ryze imaginární.

Tato situace nastane pro  $a_1=0$ . Přejchodová charakteristika má tvar harmonické funkce.

Tuto charakteristiku mají přístroje bez tlumení.

2. Kořeny jsou komplexně sdružené

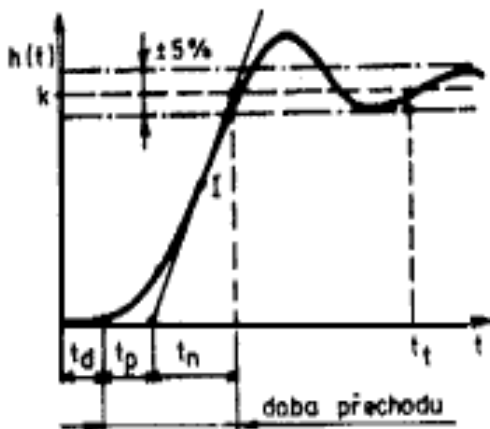
Tato situace nastane pro  $\frac{a_0}{a_2} > \left(\frac{a_1}{2a_2}\right)^2$ . Přejchodová charakteristika má tvar tlumených harmonických kmitů.

3. Kořeny jsou reálné a shodné.

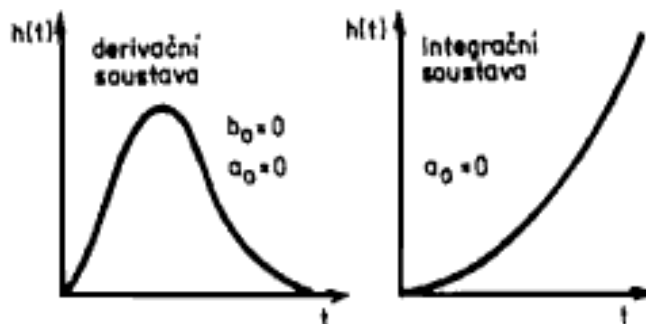
Tato situace nastane pro  $\frac{a_0}{a_2} = \left(\frac{a_1}{2a_2}\right)^2$ . Charakteristika má tlumený průběh na mezi aperiodicity.

Jak vidíte na obrázku 31., tak přechodová charakteristika má více charakteristických hodnot.

Je to dopravní zpoždění  $t_d$ , doba průtahu  $t_p$ , doba náběhu  $t_n$  a doba ustálení  $t_t$  (doba, po jejímž uplynutí nepřekročí funkce  $h(t)$  odchylku větší než 5% od ustálené hodnoty) [25].



Obrázek 28 Přechodová charakteristika pro systém druhého řádu[25]



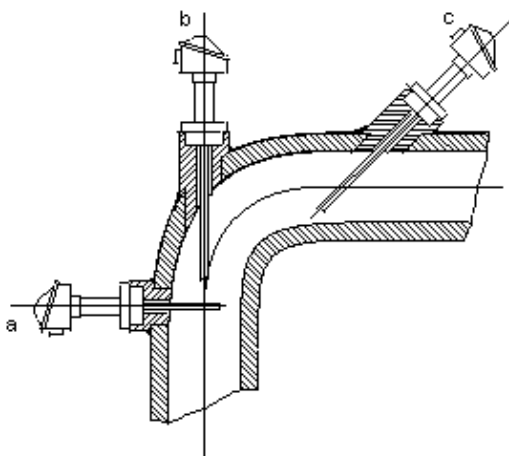
Obrázek 29 Další možné tvary přechodové charakteristiky pro dané případy[25]

## 8 VLIVY OVLIVŇUJÍCÍ ČASOVOU KONSTANTU TEPLOMĚRŮ

Existuje mnoho vlivů, které mění časovou konstantu teploměrů. Patří mezi ně například rozdíly mezi materiály použitými na výrobu teploměru. Každý materiál má tepelnou kapacitu a tudíž má i jinou tepelnou setrvačnost, která je zásadní pro délku časové konstanty. Pro běžně používané materiály na výrobu termočlánků i odporových teploměrů jsou ale tyto rozdíly tak malé, že se zanedbávají.

Velký vliv má vhodné uložení a zajištění dobrého kontaktu teploměru s měřeným objektem nebo látkou. Nedokonalý kontakt má za následek špatný přestup tepla a to může mít za následek výrazné prodloužení časové konstanty a navíc může docházet k výrazné chybě měření.

Zvláště delikátní je tento problém u měření teploty kapalin nebo plynů proudících potrubím. Do potrubí větších průměrů se umísťuje teploměr kolmo na směr proudění (obr. 30. a). U potrubí menších průměrů (do 200 mm) se umísťuje teploměr šikmo (pod úhlem 45°) proti směru proudění (obr. 30. c), popřípadě do kolena potrubí proti směru proudění (obr. 30. b).

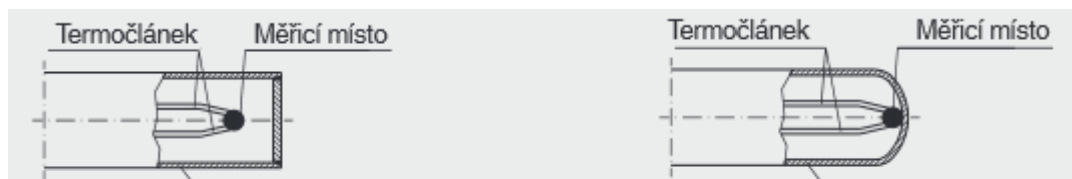


Obrázek 30 Zabudování teploměru do potrubí [5]

Pravděpodobně největší vliv na časovou konstantu má ale samotné konstrukční uspořádání daného snímače. Přídavnou ochranou sice zajistíme lepší mechanickou a chemickou odolnost, ale za cenu zvýšení tepelné setrvačnosti článku a tím prodloužení časové konstanty snímače[5][14][21].

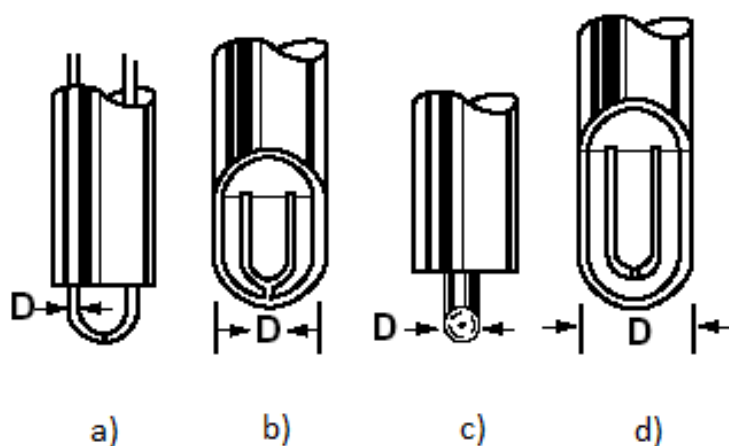
### 8.1 Provedení měřícího konce termočlánků

Samostatnou kapitolou je problematika provedení měřících konců termočlánků. Jejich provedení má totiž zásadní vliv na časovou konstantu termočlánků. Rozlišujeme mezi nechráněným, izolovaným a uzemněným měřícím koncem. Nechráněný termočlánek nemá oddělený měřící konec od měřeného prostředí žádným pláštěm. Tato úprava má nejkratší časovou konstantu ale za cenu velmi špatné mechanické a chemické odolnosti. Uzemněný spoj má měřící konec termočlánku přivařen k plášti. To má za následek kratší časovou konstantu, ale termočlánek je pak je citlivý na uzemněné elektrické smyčky. Izolovaná varianta má měřící konec termočlánku izolovaný od pláště snímače. Ukázka na obrázku 31.[5]



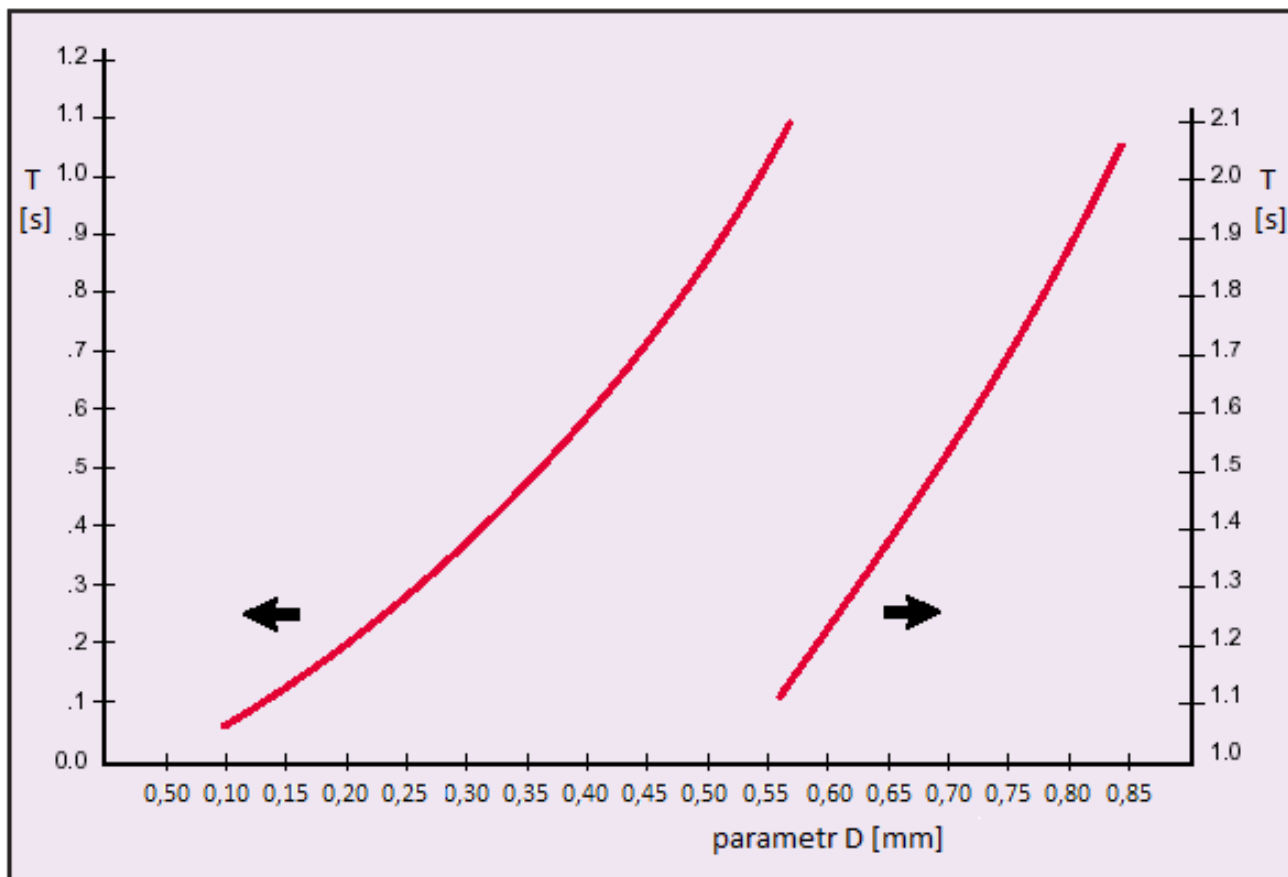
Obrázek 31 Provedení měřicího konce termočláneku- izolovaný (vlevo) a uzemněný (vpravo) [21]

Různá provedení konců se dají porovnávat. Slouží k tomu parametr  $D$ , který vyjadřuje buď šířku drátu u nechráněných termočláneků, anebo šířku pláště u chráněných termočláneků. (obrázek 32.)

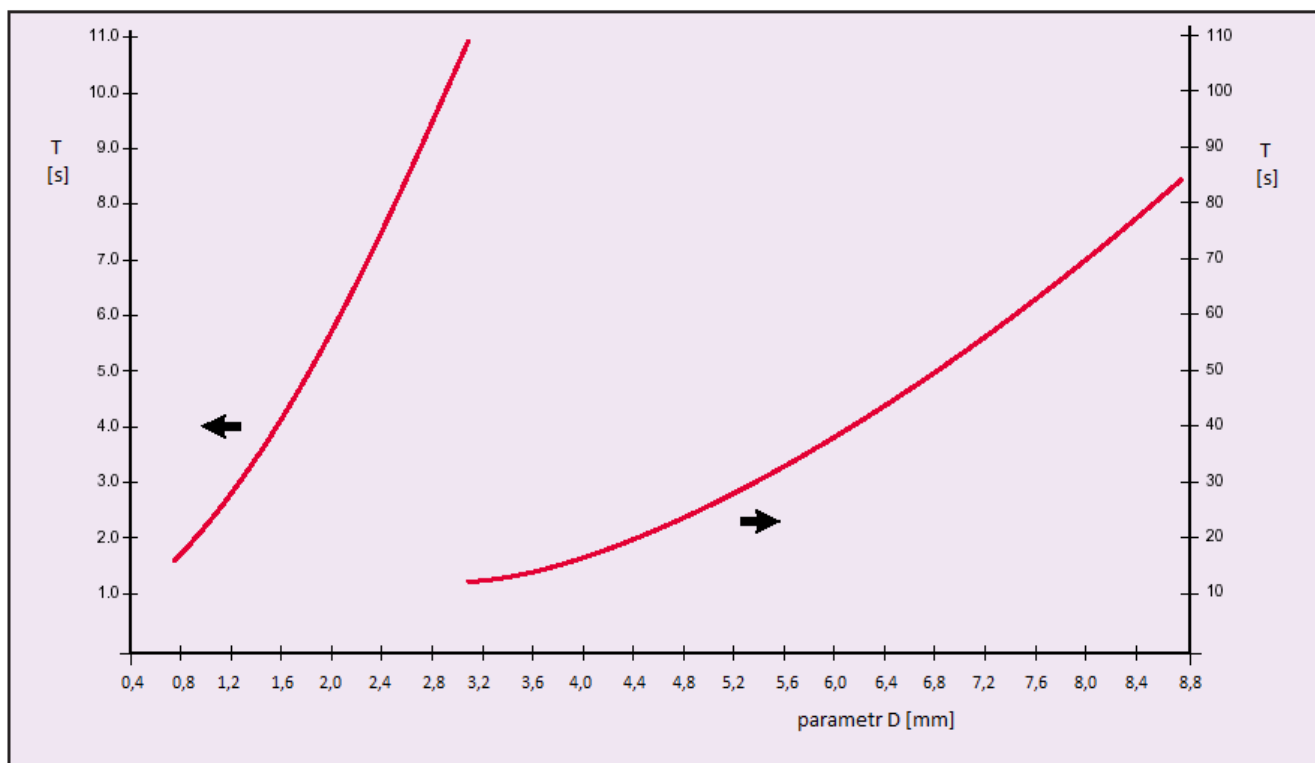


Obrázek 32 Určení parametru  $D$  pro termočláneky a) nechráněný s holým vodičem b) uzemněný c) nechráněný "korálovitý" d) izolovaný [26]

Pomocí tohoto parametru se může také orientačně určit časová konstanta termočláneku. Závislost časové konstanty na různých hodnotách parametru  $D$  pro vzduch o pokojové teplotě a barometrickém tlaku znázorňují obrázky 33. a 34. Stejnou závislost, tentokrát ve vodním prostředí ukazuje obrázek 35. [14][21][26]

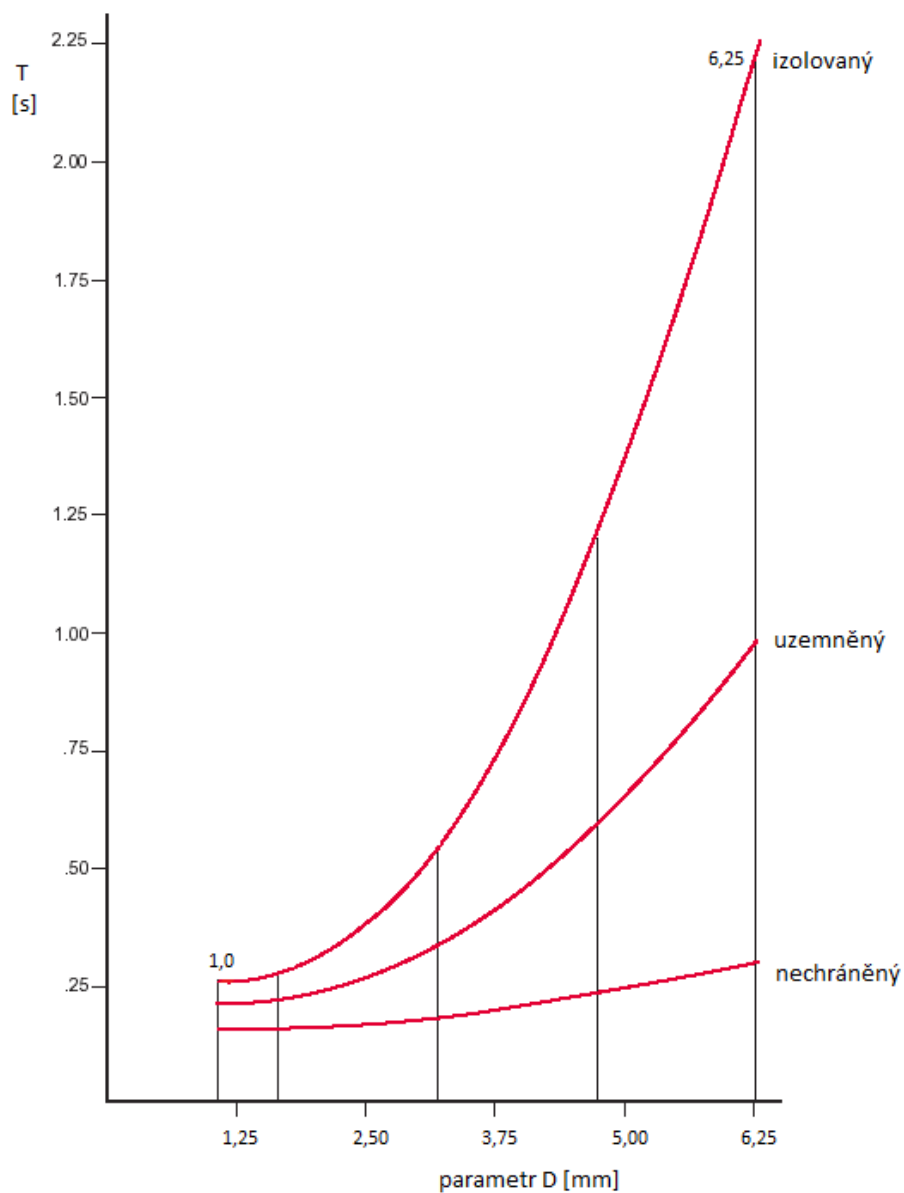


Obrázek 33 Závislost časové konstanty na parametru  $D$  ve vzduchu [26]



Obrázek 34 Závislost časové konstanty na parametru  $D$  ve vzduchu [26]





Obrázek 35 Závislost časové konstanty na parametru  $D$  ve vodě [26]

## 9 MĚŘENÍ ČASOVÉ KONSTANTY

V rámci experimentální části práce se provede měření přechodové charakteristiky daných teplotních snímačů (Obrázek 36). Z naměřených charakteristik se poté určí časová konstanta pro daný snímač v daném prostředí (voda nebo vzduch).

### Stručný popis měřených čidel

Tabulka 5 Popis měřených čidel a)

	označení	typ	popis	rozsah
Platinová čidla	PT-1	Pt 100	v.č.23100 V12	max. 600 °C
	PT-2	Pt 100	v.č. 1,3850/4C	-200 °C až 600°C
	PT-3	Pt 100	ČSN 258345-500	-
Termočlánky	TC-1	J	-	-
	TC-2	J	tov.č :P10	max.600 °C
	TC-3	K	v.č. 223121-2, Yokogawa ele.	max. 850 °C
	TC-4	K	Mk 800/j , čsn 258320/4	max. 900 °C

Tabulka 6 Popis měřených čidel b)

	označení	vnitřní obalová trubka (tloušťka +materiál)	vnější ochranná trubka	délka [cm]
Platinová čidla	PT-1	1mm ,Al	3mm, ocel	50
	PT-2	-	0,5mm, ocel	16
	PT-3	1mm ,Al	-	43
Termočlánky	TC-1	1mm ,Al	-	34
	TC-2	1mm, kroužková keramická	2,2 mm, ocel	45
	TC-3	1mm, kroužková plastová	2mm, ocel	40
	TC-4	2mm, plastová trubka	2,5 mm, ocel	80



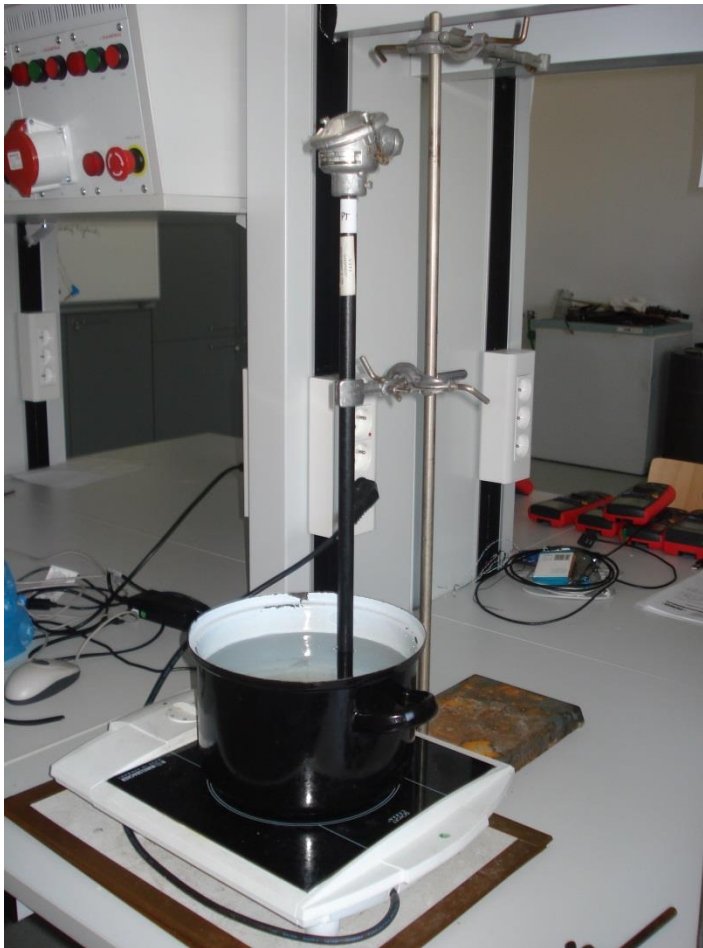
Obrázek 36 Měřené snímače. Zleva PT1 až PT3, následuje TC1 až TC4

Pro měření platinových čidel bylo využito multimetru UT-71A pro měření odporu, který se poté přepočítal na teplotu. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 1 sekundu. Pro měření termočlánků bylo použito měřicího programu Wave-Scan společně s měřicí kartou Advantech USB 4718, který dokáže přepočítat výstupní hodnotu napětí termočlánku na teplotu. Vzorkovací frekvence byla opět nastavena na 1 sekundu.

## 9.1 Měření prováděné ve vodě

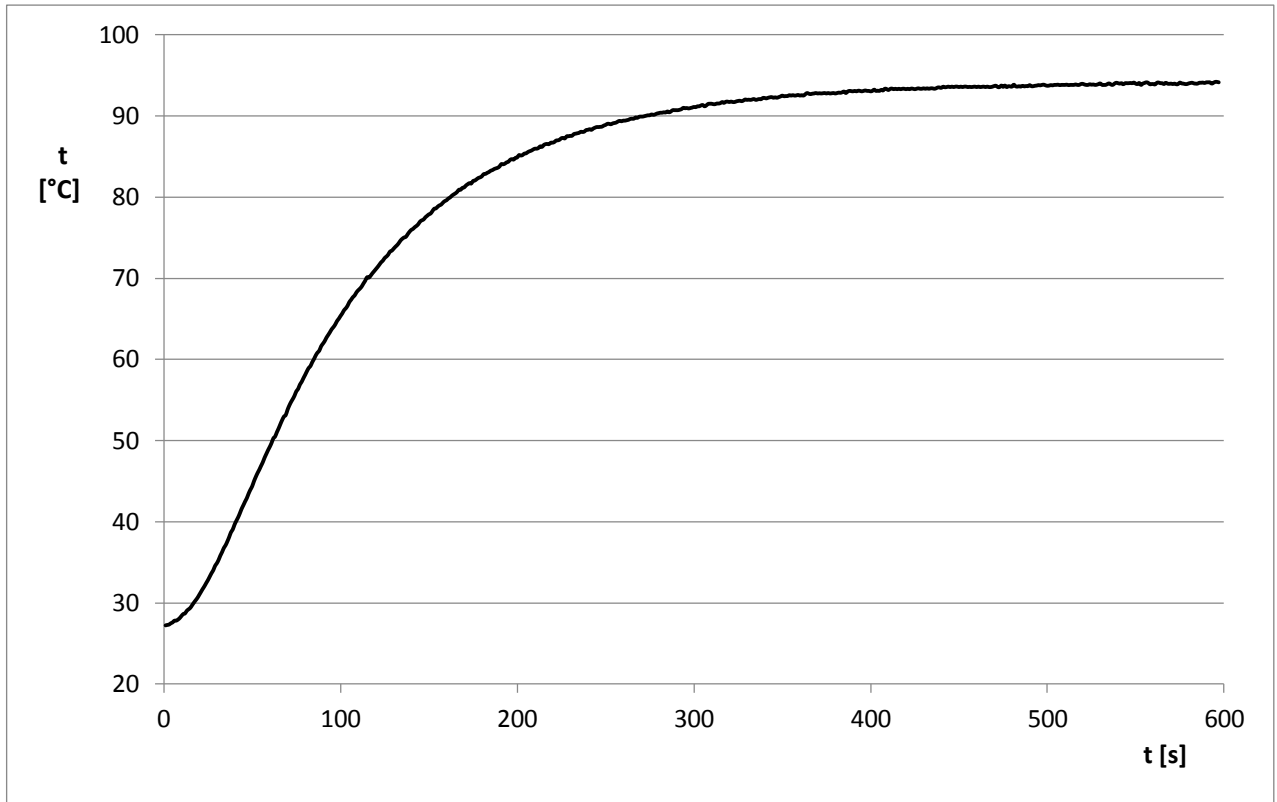
Pro toto měření byla vybrána nejjednodušší konfiguraci, tj. vroucí vodu o teplotě přibližně 100 °C. Využil se hrnec s vodou na vařiči, který zajišťoval stálý var vody a tedy potřebnou stálou teplotu vody po celou dobu měření (Obrázek 37).

Hloubka ponoření snímače ve vodě byla zhruba 12cm.

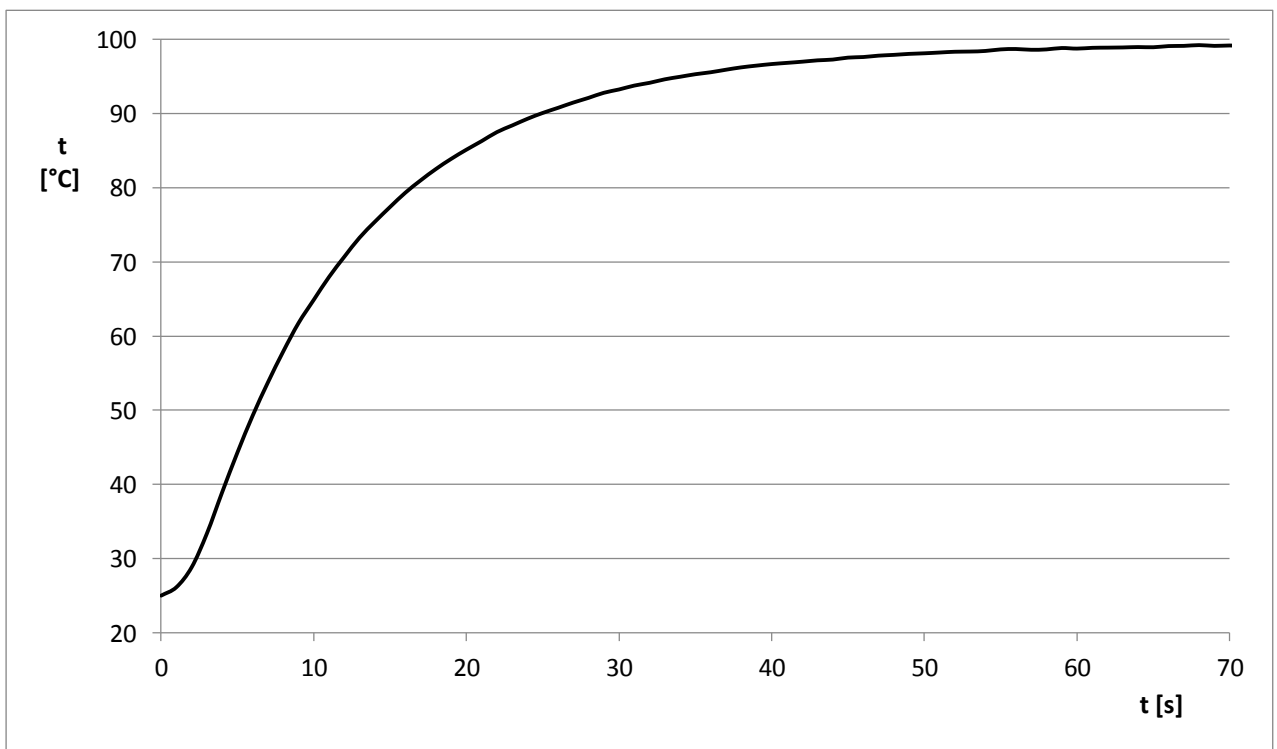


Obrázek 37 Fotka pracoviště pro měření časové konstanty pro vodu

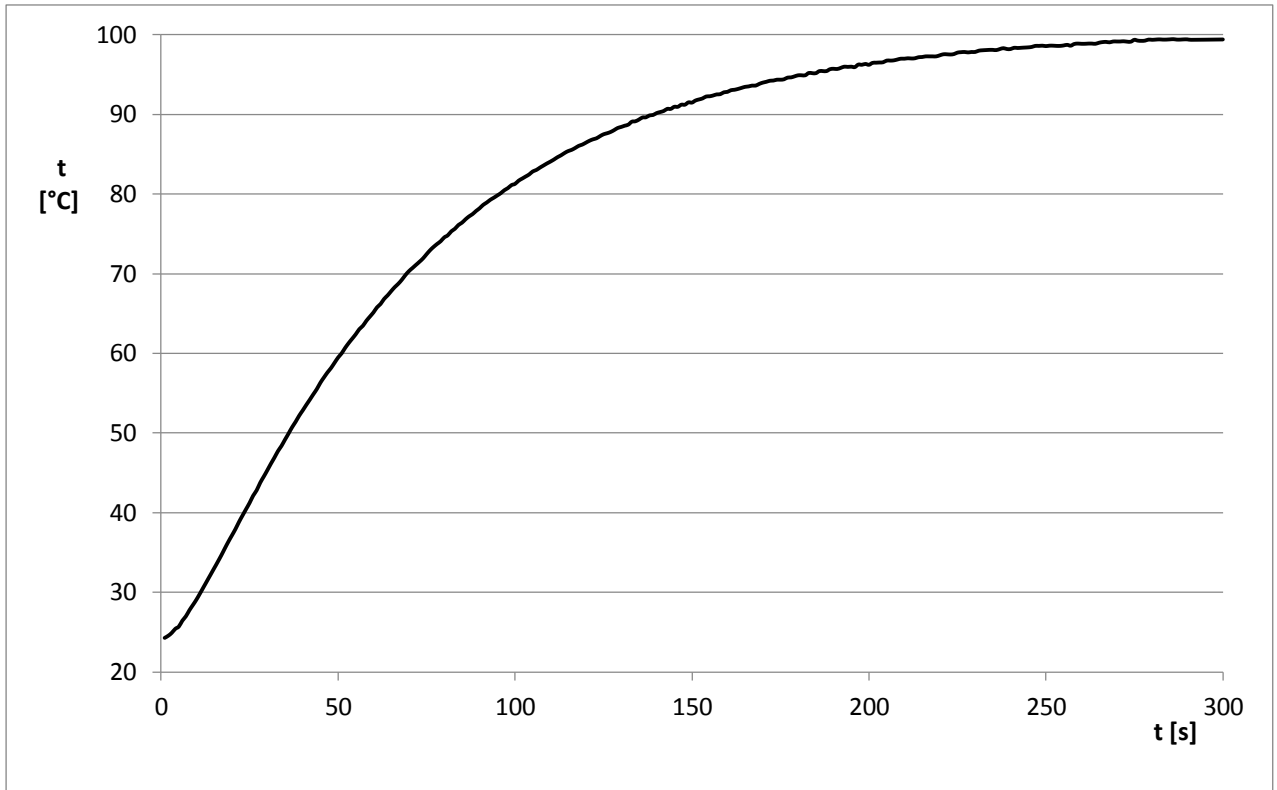
Výsledné naměřené průběhy přechodových charakteristik jsou zobrazeny na obrázcích 38 až 44. Na obrázku číslo 45 je možno vidět porovnání všech přechodových charakteristik v jednom grafu.



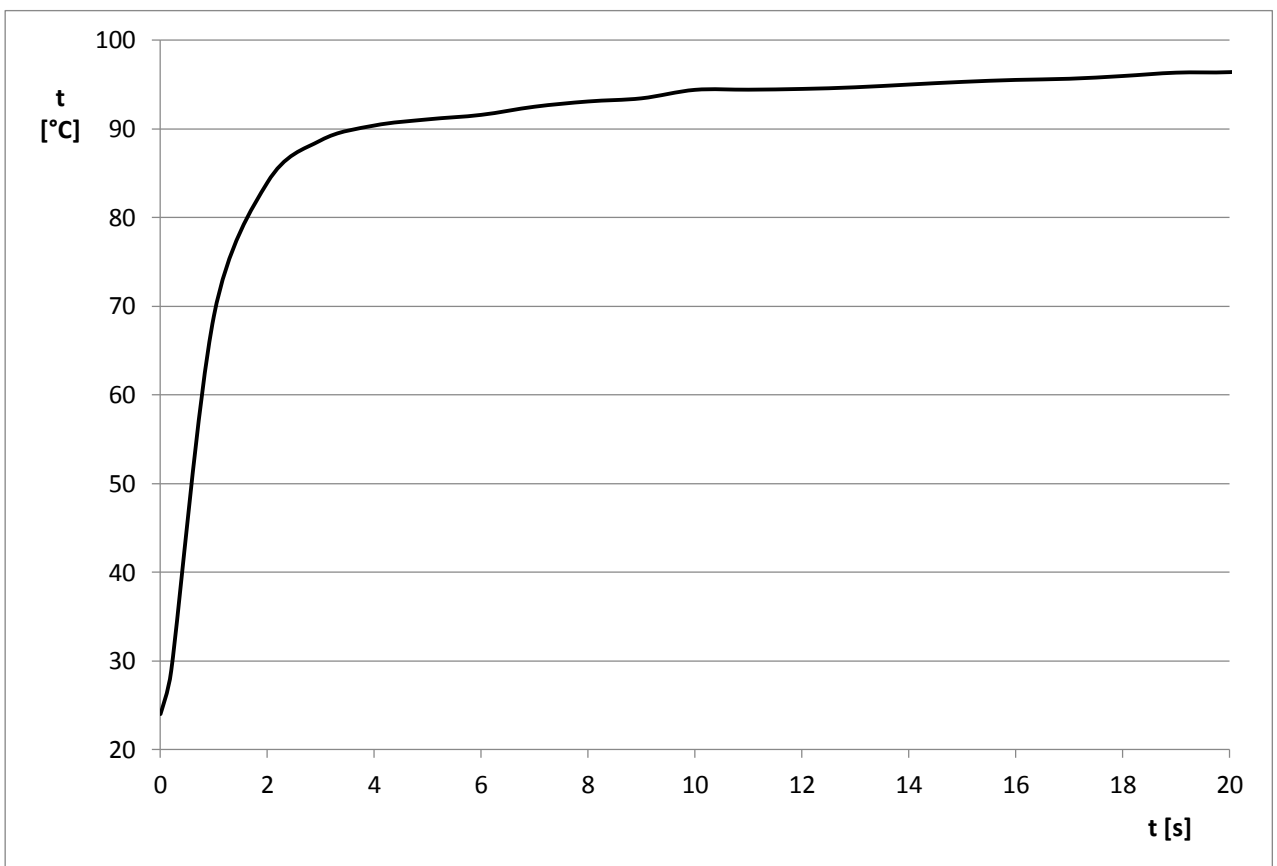
Obrázek 38 Přechodová charakteristika čidla PT-1



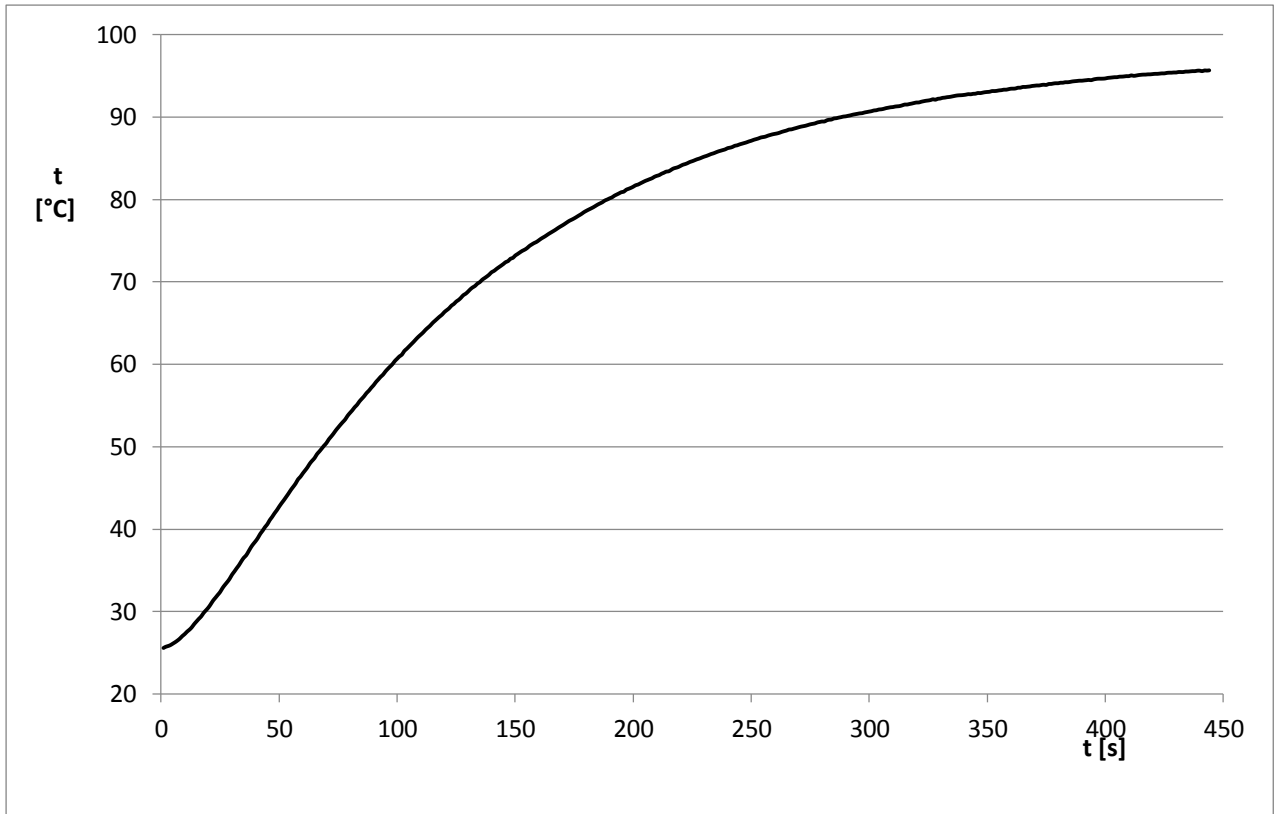
Obrázek 39 Přechodová charakteristika čidla PT-2



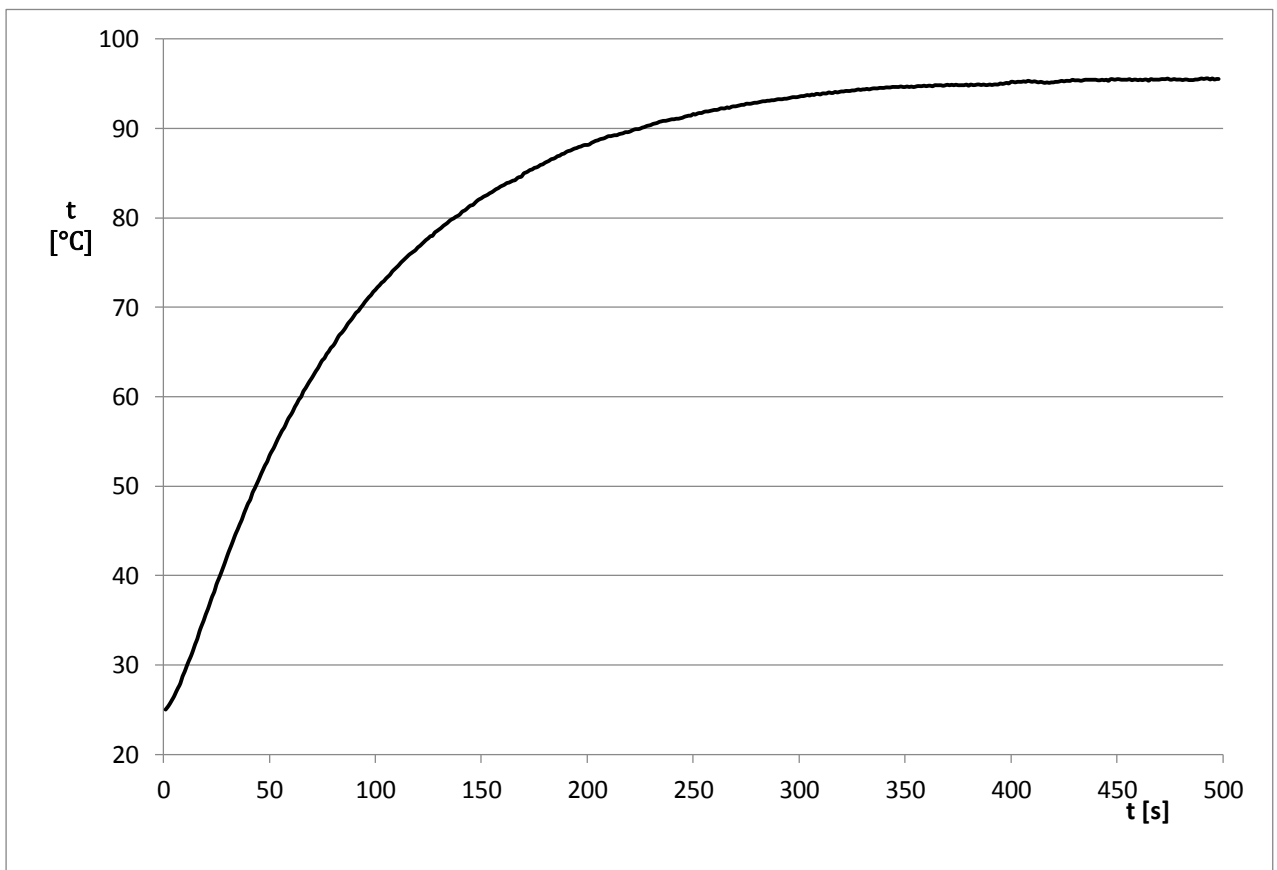
Obrázek 40 Přechodová charakteristika čidla PT-3



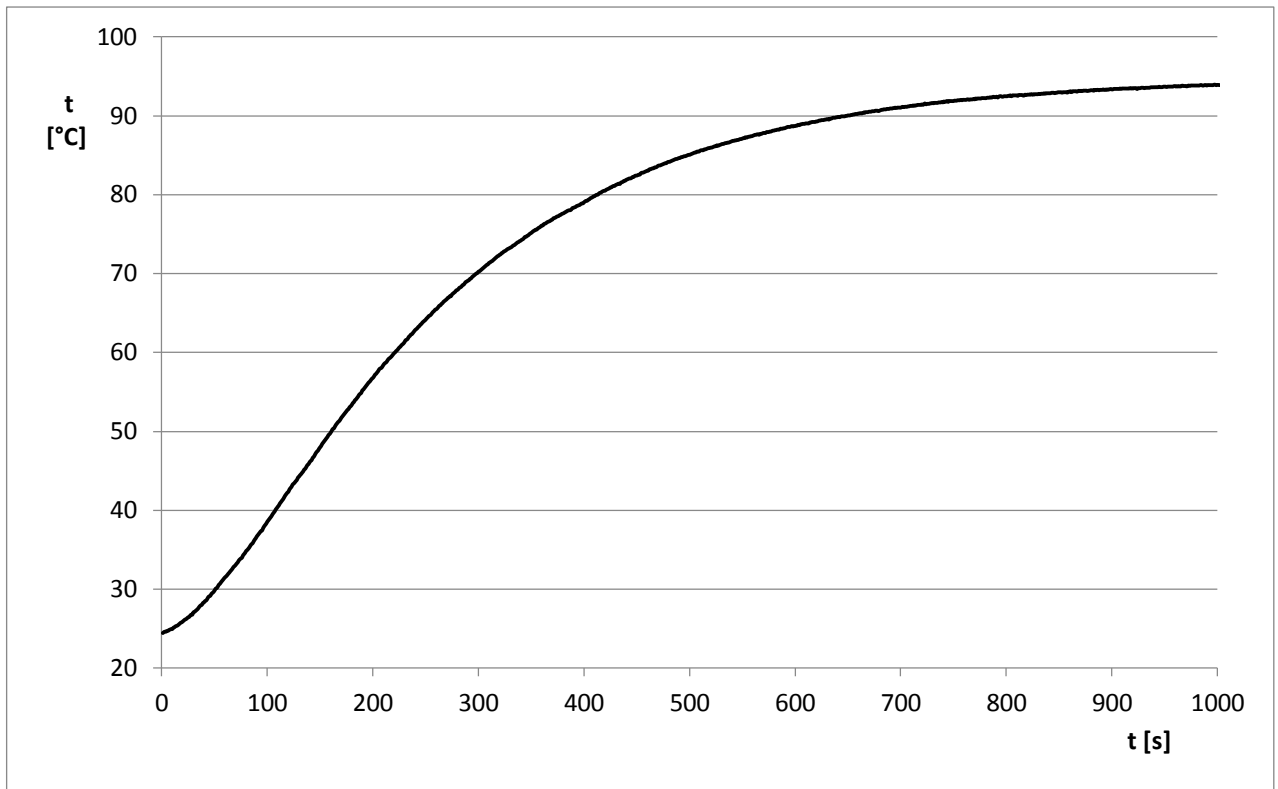
Obrázek 41 Přechodová charakteristika čidla TC-1



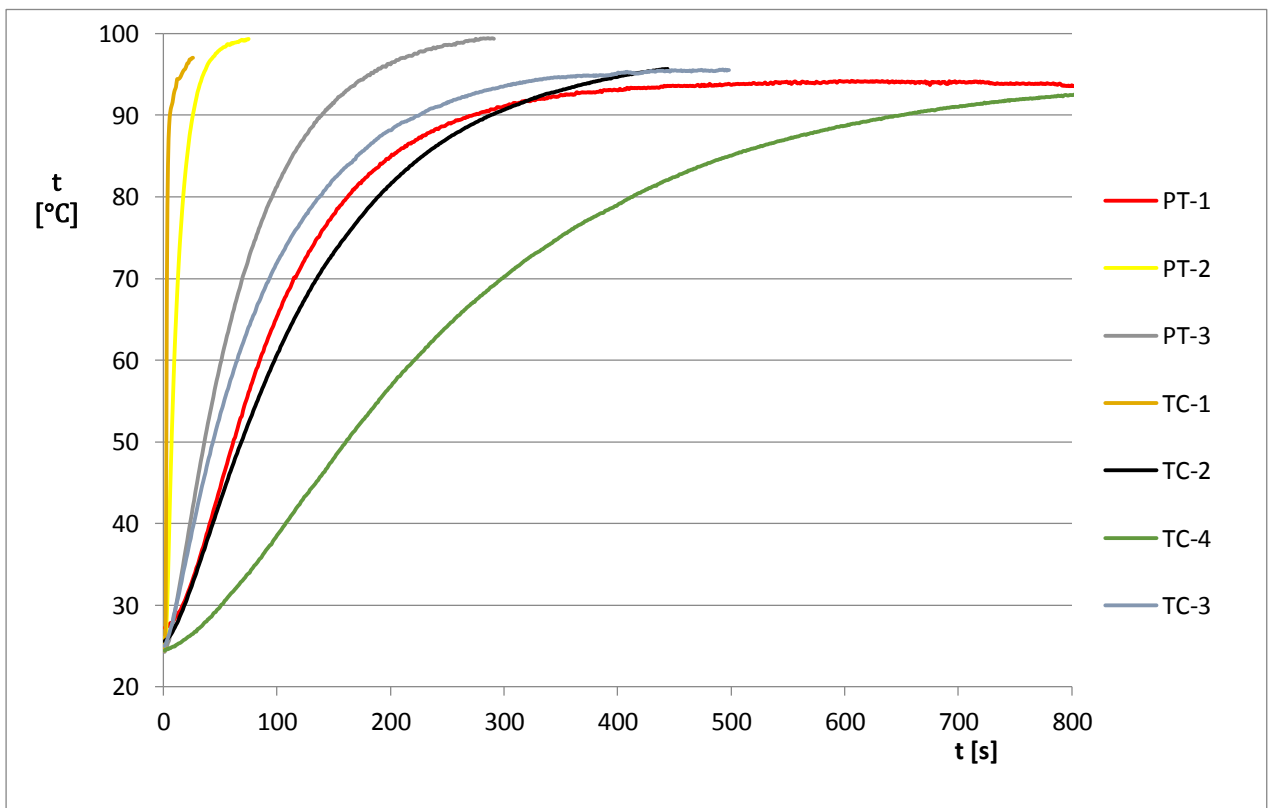
Obrázek 42 Přechodová charakteristika čidla TC-2



Obrázek 43 Přechodová charakteristika čidla TC-3



Obrázek 44 Přejchodová charakteristika čidla TC-4



Obrázek 45 Porovnání přechodových charakteristik všech čidel

Z charakteristik je zřejmé, že v reálném prostředí není tvar charakteristiky ideální. Jde především o začátek náběhu, kde se projevuje dopravní zpoždění  $t_d$  a doba průtahu  $t_p$  (viz kapitola 7.2).

Dále je na naměřených průbězích vidět, že některé snímače nenaměřili maximální hodnotu blížíci se  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Toto je pravděpodobně způsobeno tím, že u delších snímačů docházelo vlivem malého ponoru ve vroucí kapalině k ochlazení ve vrchní neponořené části snímače a ten tak nemohl naměřit maximální možnou teplotu. Řešením by bylo ponoření celého snímače (nebo alespoň významné části) do vroucí vody. Bohužel toto nebylo v našich podmínkách realizovatelné vzhledem k délce některých snímačů.

Časová konstanta je doba, za kterou měřená veličina vystoupá na 63,2% maxima. Časové konstanty pro jednotlivé senzory jsou uvedeny v následující tabulce:

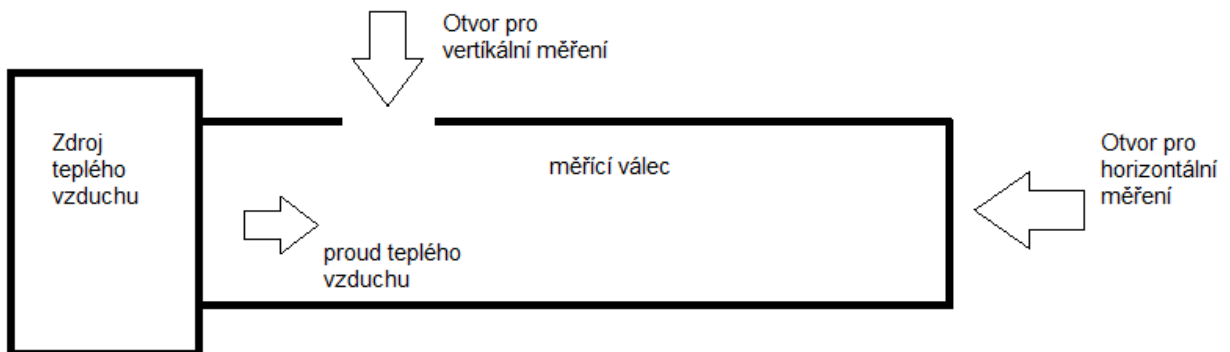
Tabulka 7 Časové konstanty pro jednotlivá čidla změřena ve vroucí vodě

Čidlo	$\tau$ [s]
PT-1	124,7
PT-2	12,6
PT-3	74,9
TC-1	1,12
TC-2	146,1
TC-3	101,8
TC-4	320,6

Z výsledků vyplývá, že největší vliv na časovou konstantu snímače má jeho konstrukční uspořádání a především tloušťka ochranných trubic.

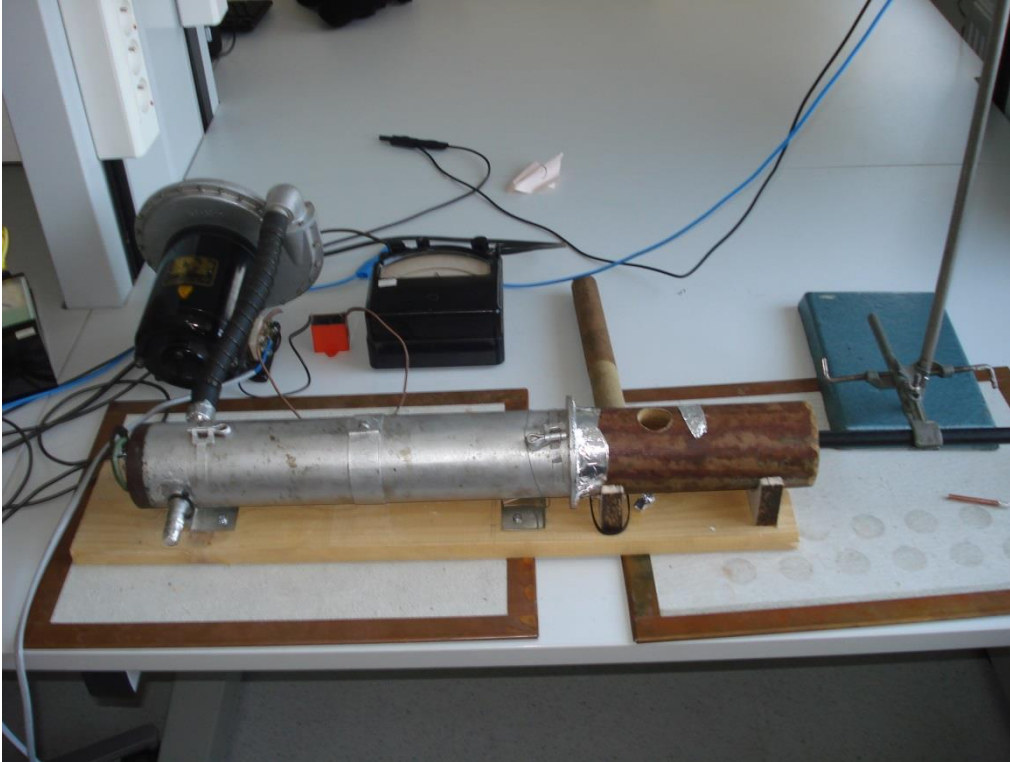
## 9.2 Měření prováděné na vzduchu

K tomuto měření byl k dispozici měřicí přípravek poskytnutý vedoucím práce, který se skládal z fukaru, který vhněl vzduch do válcového ohříváče, jenž pracoval s přímým odporovým ohřevem. Ohříváč byl dále připojen k válci, který sloužil jako měřicí prostor. Principiální schéma je na obrázku 47. Fotka pracoviště je na obrázku 48.



Obrázek 47 Principiální schéma přípravku





Obrázek 48 Fotka měřicího pracoviště

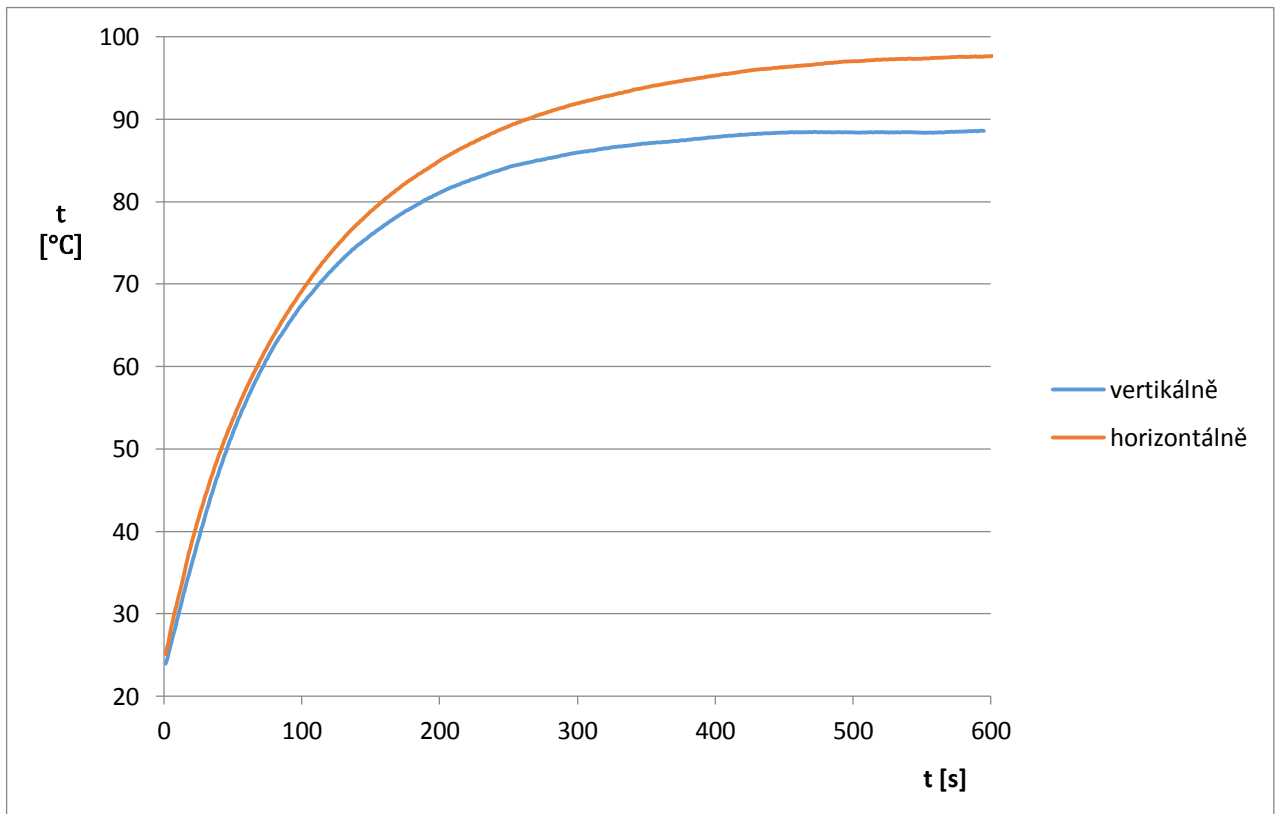
Měřicí válec měl na délku 21 centimetrů a vnitřní průměr 4,9 centimetrů. Střed otvoru pro vertikální měření byl vzdálen od zdroje tepla 7 centimetrů a měl průměr 3 centimetry. Snímače se horizontálně zasouvaly do měřicího válce zhruba do hloubky 18-ti centimetrů.

Bylo zjištěno, že se v proudu vzduchu utvořil nerovnoměrný teplotní profil s maximální teplotou v jeho centru, přičemž teplota na kraji vzduchového proudu byla až o několik stupňů Celsia nižší. Z tohoto důvodu je nutno maximální teplotu proudu považovat za spíše orientační údaj.

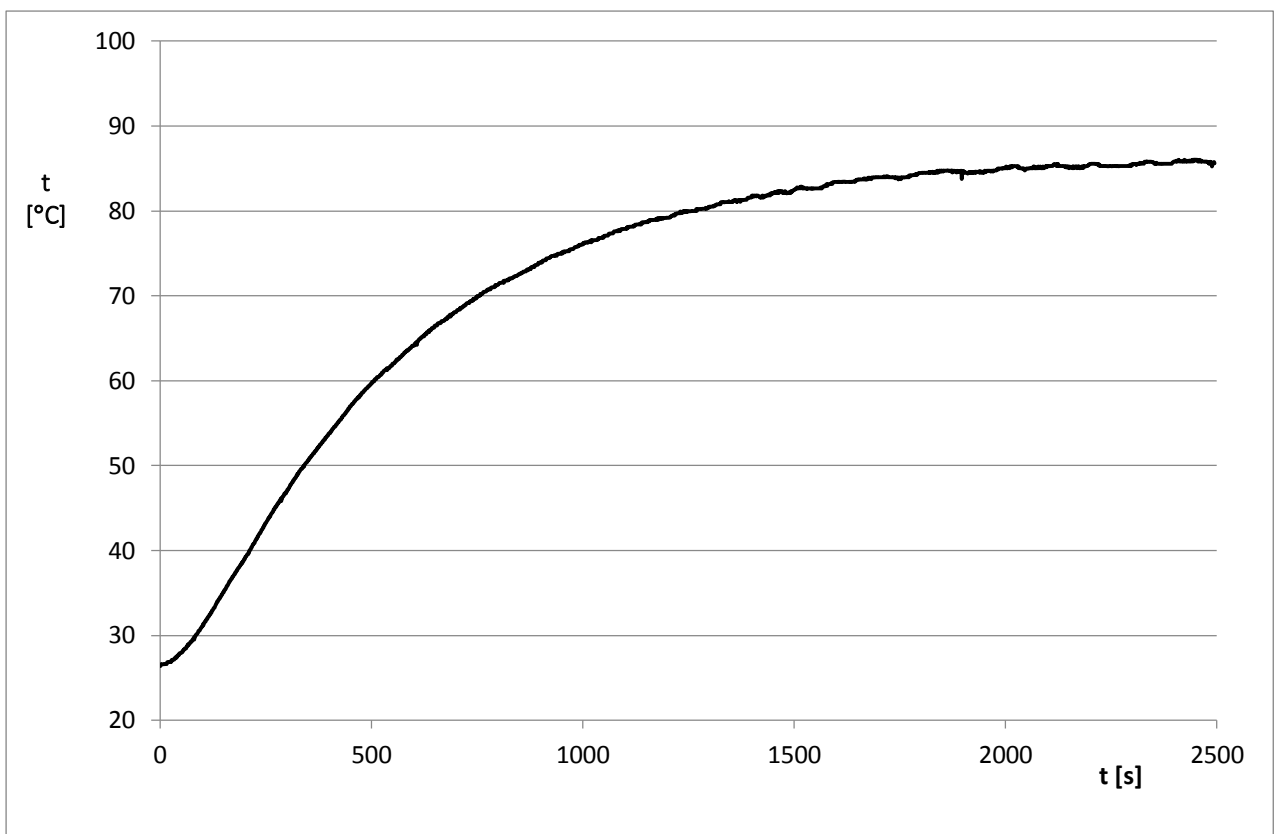
Přístroj Thermo-Anemometer CFM/CMM AN100 od firmy EXTECH instrumets byla zjištěna rychlost proudění vzduchu o hodnotě 0,46 metrů za sekundu.

Cílem bylo nastavit stejnou teplotu jako u experimentu s vodou, tj. 100°C. Vnější termočláňovým čidlem byla naměřena maximální hodnotu 105°C.

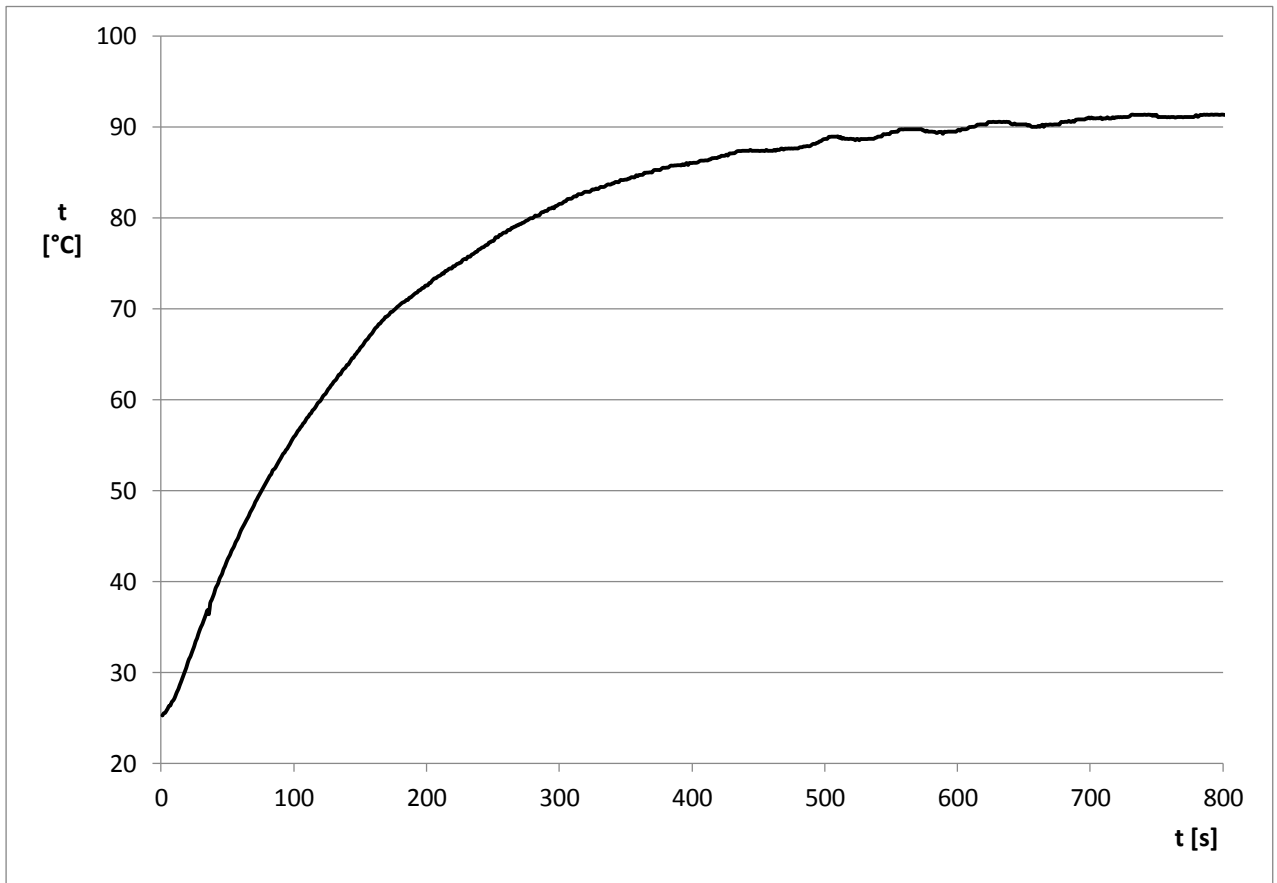
Nejprve bylo provedeno měření, kdy se čidla zasouvala otvorem pro vertikální měření. Bylo ale zjištěno, že dochází, podobně jako u experimentu s vroucí vodou, k odvodu tepla z prohřátého konce neaktivní neprohřátou částí. Porovnání pro čidlo TC-1 je na obrázku 49. U velkých čidel byl ten rozdíl ještě markantnější. Dále tedy bylo prováděno měření zasouváním snímačů do otvoru pro horizontální měření. Vrchní otvor pro vertikální měření byl pro horizontální měření zaslepen. Naměřené průběhy přechodových charakteristik pro jednotlivá čidla jsou na obrázcích 50 až 55.



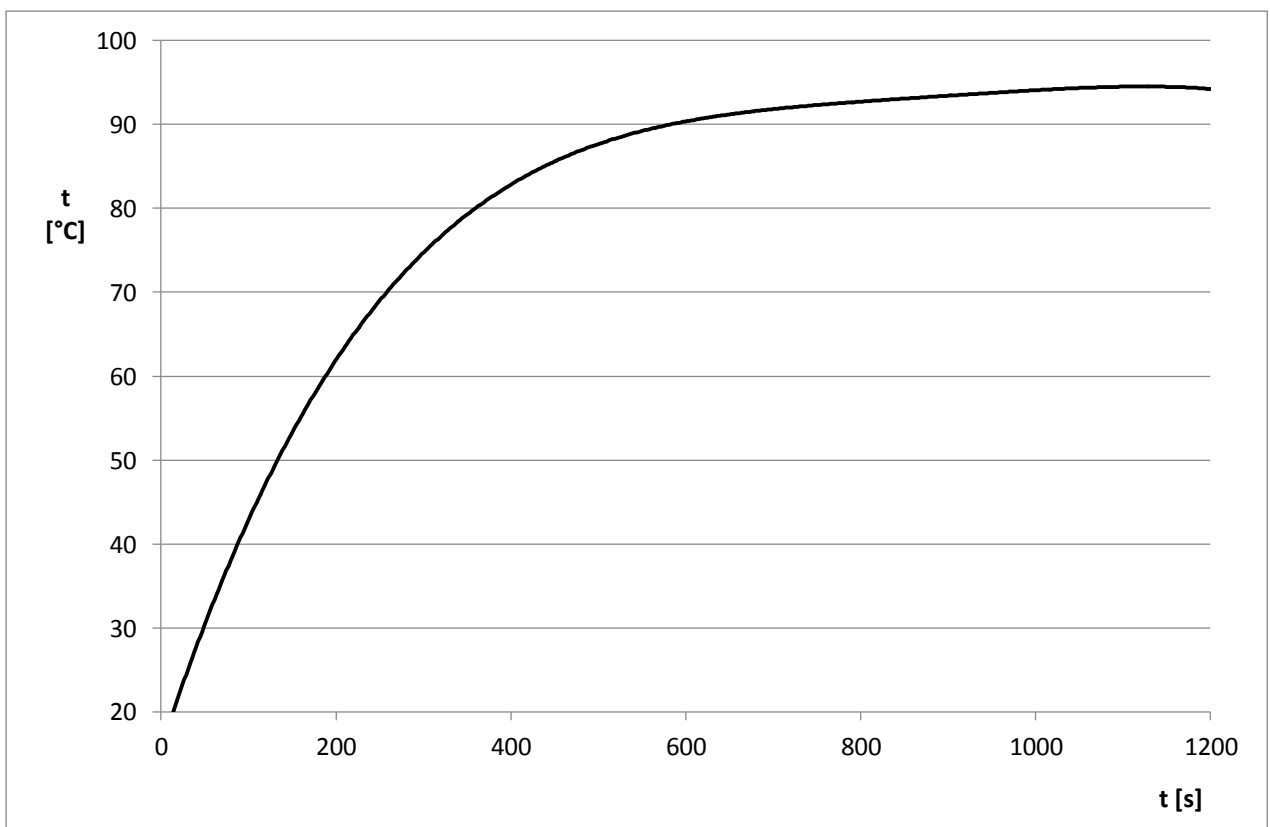
Obrázek 49 Porovnání přechodové charakteristiky čidla TC-1 u vertikálního a horizontálního měření



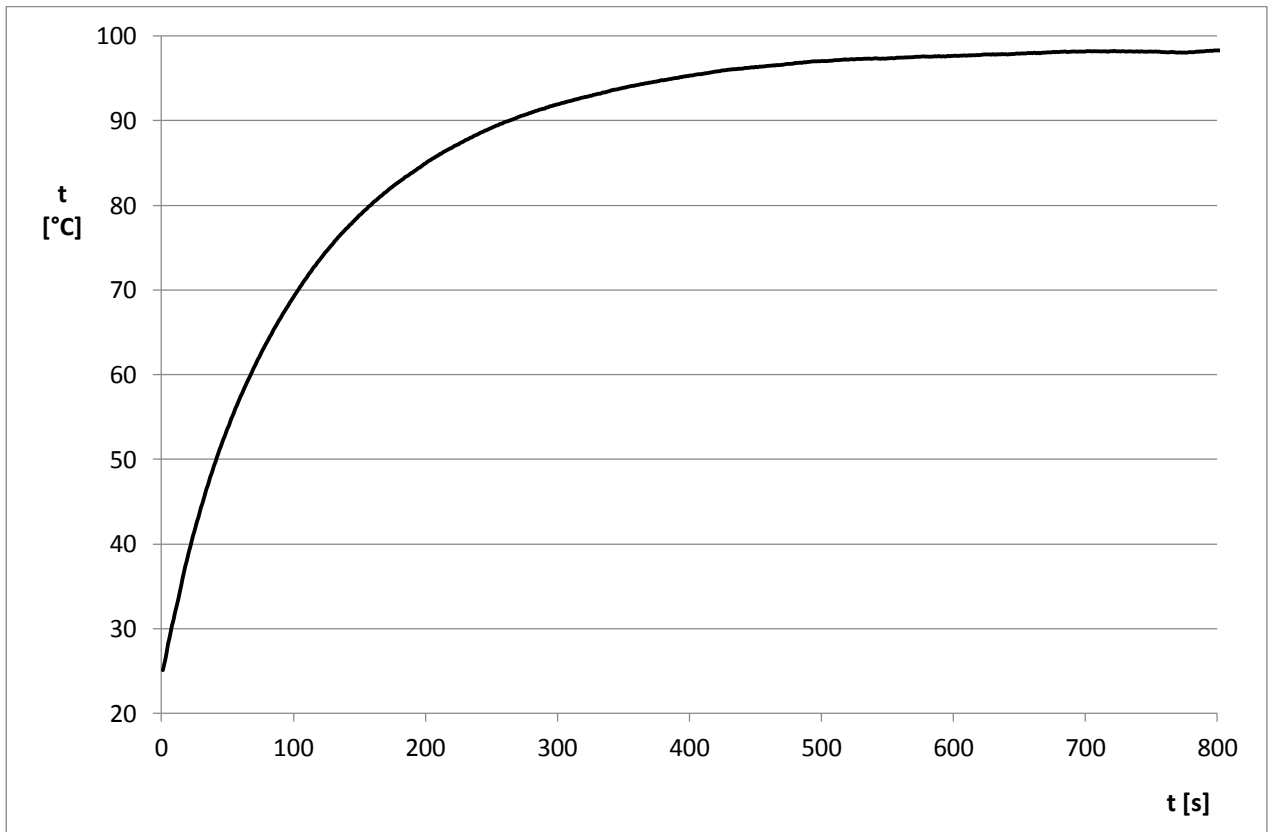
Obrázek 50 Přechodová charakteristika čidla PT-1



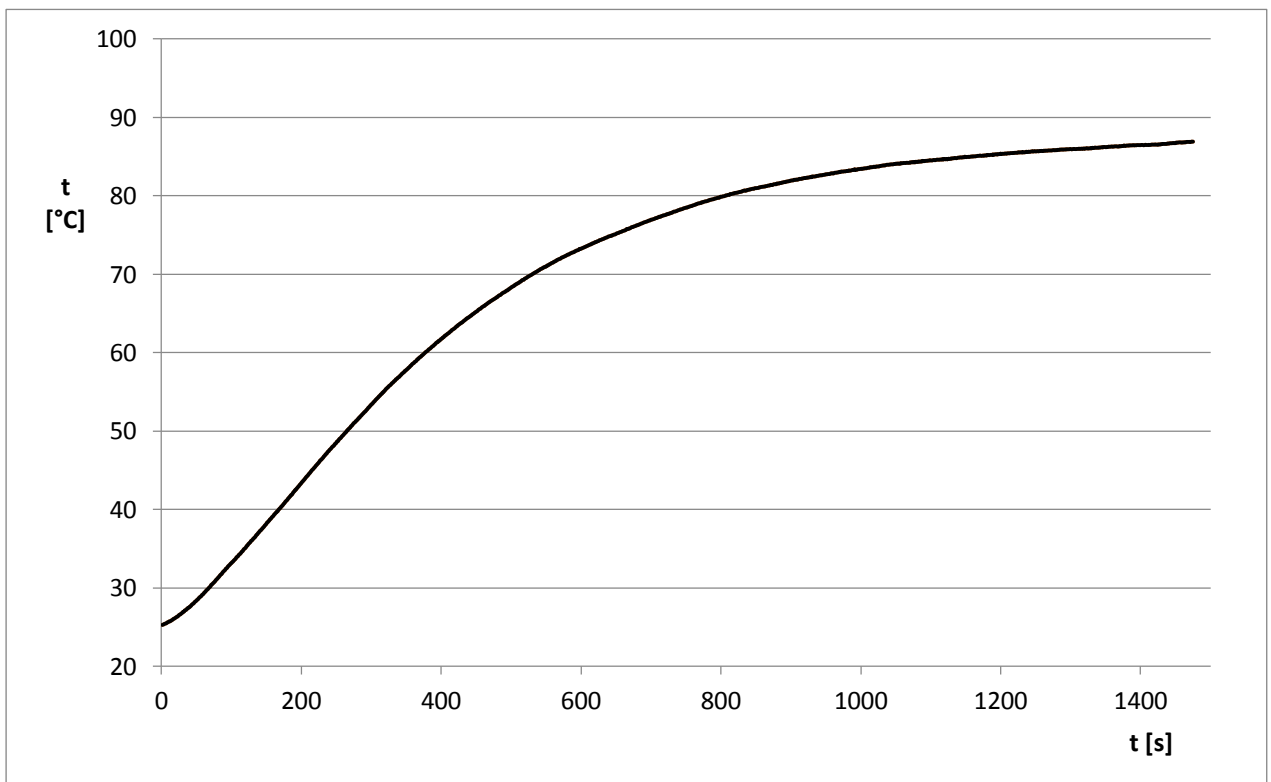
Obrázek 51 Přechodová charakteristika čidla PT-2



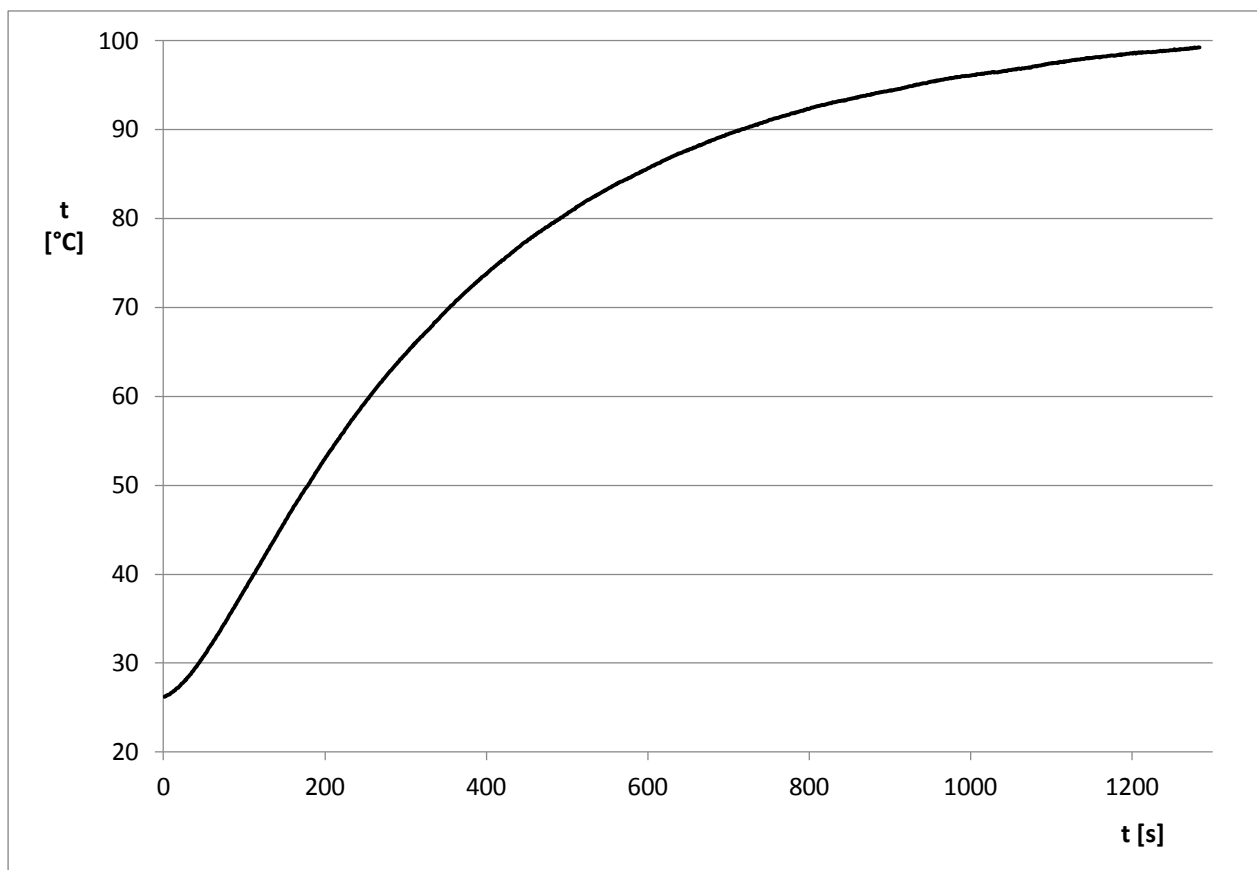
Obrázek 52 Přechodová charakteristika čidla PT-3



Obrázek 53 Přechodová charakteristika čidla TC-1



Obrázek 54 Přechodová charakteristika čidla TC-2



Obrázek 55 Přechodová charakteristika čidla TC-3

Nyní se můžou opět určit časové konstanty pro jednotlivé senzory. Časové konstanty snímačů ve vzduchovém prostředí jsou v následující tabulce:

Tabulka 8 Časové konstanty jednotlivých snímačů na vzduchu

Čidlo	$\tau$ [s]
PT-1	584
PT-2	159
PT-3	245,5
TC-1	111
TC-2	434,5
TC-3	383

### 9.3 Srovnání výsledku

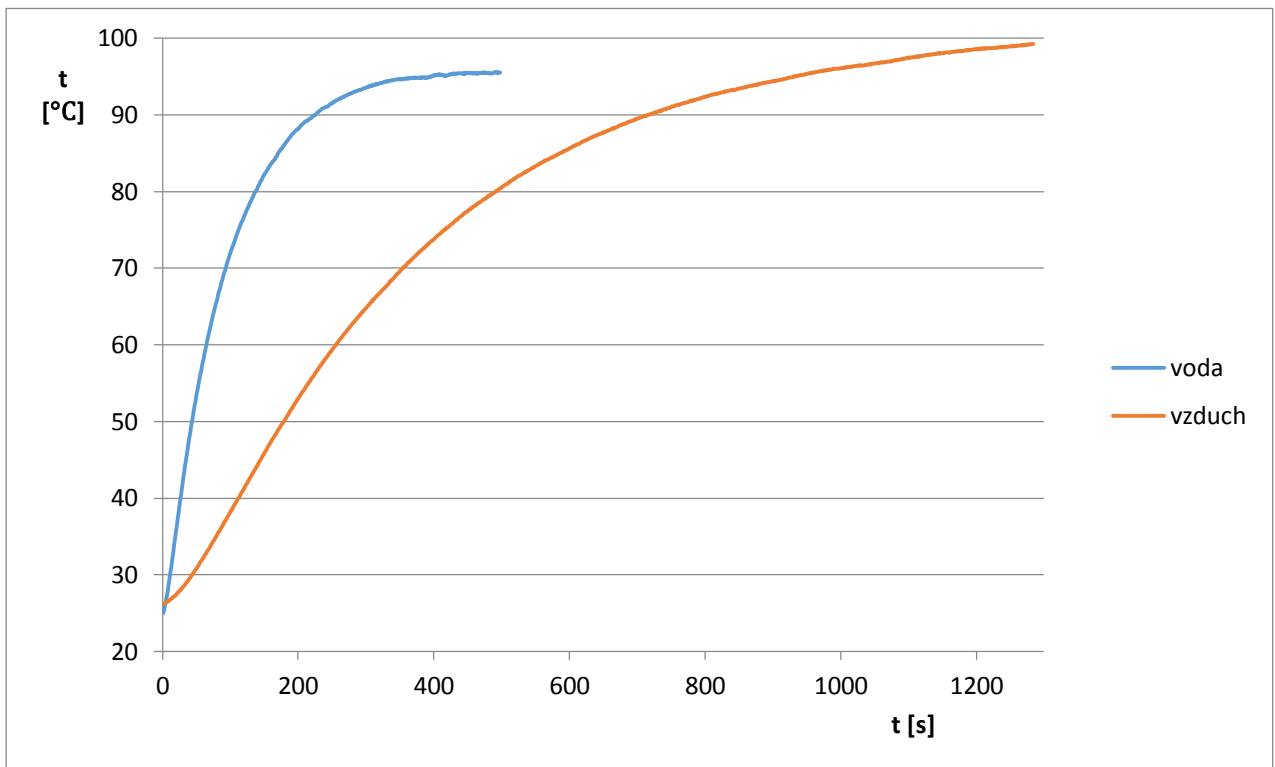
Nyní se může přejít k porovnání výsledků. Kvůli nerovnoměrnému teplotnímu profilu v měřicím válci při měření v horkém vzduchu sice došlo k nepřesnostem v maximální měřené teplotě snímačů, ale měření jsou do jisté míry porovnatelná.

Tabulka 9 Porovnání výsledků z měření ve vodě a na vzduchu

	voda	vzduch
Čidlo	$\tau$ [s]	$\tau$ [s]
PT-1	124,7	584
PT-2	12,6	159
PT-3	74,9	245,5
TC-1	1,12	111
TC-2	146,1	434,5
TC-3	101,8	383
TC-4	320,6	-

Z porovnání z tabulky 9 je vidět, že časové konstanty jednotlivých čidel jsou na vzduchu několikanásobně vyšší. Je to podle předpokladů, protože vzduch má menší tepelnou kapacitu a zejména součinitel přestupu tepla je možné u vařící vody považovat za značně vyšší než u proudícího vzduchu.

Porovnání přechodových charakteristik čidla TC-3 pro vodu a vzduch je na obrázku 56.



Obrázek 56 Porovnání přechodových charakteristik čidla TC-3 pro vodu a vzduch

## 10 ZÁVĚR

V teoretické části práce bylo úkolem rozebrat princip a konstrukci odporových čidel a termočlánků. Toto je podrobně popsáno v prvních kapitolách. Oba druhy snímačů patří v průmyslových aplikacích k nezastupitelným řešením pro jejich spolehlivost, v daných rozsazích velmi velké přesnosti a v neposlední řadě i ekonomické výhodnosti.

Další část práce je věnována pojmu časová konstanta a rozboru situací, které mají vliv na jejich hodnotu. Časová konstanta se určuje z přechodové charakteristiky. Přechodová charakteristika je odezva snímače na jednotkový skok měřené veličiny. Časová konstanta je potom doba, za kterou vystoupá měřená veličina na 63,2% z maxima

Velký vliv nejen na časovou konstantu, ale i na celkové přesnosti měření, má správný kontakt mezi měřeným objektem a teploměrem. Špatný kontakt může mít za následek i velmi velkou chybu měření. Ale největší vliv na časovou konstantu má pravděpodobně konstrukční uspořádání snímače. Pro větší mechanickou a chemickou odolnost se v praxi musí přidávat ochranné trubky. To má ale za následek rapidní nárůst velikosti časové konstanty. Proto se musí pro dané reálné aplikaci vhodně volit kompromis mezi ochranou a mezi rychlou časovou konstantou.

Stěžejní ale byla praktická část práce. V praktické části bylo úkolem změřit časové konstanty zadaných snímačů pro dvě různé prostředí- vroucí voda a ohřátý vzduch. U vody bylo zvolena základní konfigurace s vroucí vodou na vařiči. Výsledky potvrdily teorii, že čím větší přidaná ochrana, tím delší časová konstanta.

Druhá část experimentální části byla měření v proudu horkého vzduchu. K tomuto měření byl k dispozici měřicí přípravek od vedoucího práce. Teplota vzduchu byla nastavena na téměř stejnou úroveň jako u experimentu s vodou. U tohoto měření byla zjištěna nepřesnost v měření, kdy se v měřícím válci utvořil nerovnoměrný teplotní profil. Výsledky jsou ale pořád reprezentativní a do jisté míry porovnatelné s experimentem s vroucí vodou.

Porovnání mezi vodou a vzduchem dopadlo opět podle předpokladů. Voda má několikanásobně kratší časovou konstantu, protože voda má větší tepelnou kapacitu a součinitel přestupu tepla je u vroucí vody větší než u proudícího vzduchu.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] *Fyzika pro bakaláře: Termika* [online]. 2010 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: [http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/2\\_2\\_1\\_Termika.pdf](http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/2_2_1_Termika.pdf)
- [2] HAWLICZEK, Petr. *Využití Peltierových termočlánků jako alternativního zdroje energie*. Ostrava, 2011. Dostupné také z: <http://hawliczek.cz/BP.pdf>. Bakalářská práce. Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra Elektroenergetiky. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec
- [3] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Elektřina a magnetismus, Vznik elektrického proudu, Termoelektrické články, Seebeckův jev* [online]. 2006 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [4] REICHL, Jaroslav a VŠETIČKA. *Encyklopedie fyziky: Elektřina a magnetismus, Vznik elektrického proudu, Termoelektrické články, Peltierův jev* [online]. 2006 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [5] Doc. Ing. Karel KADLEC CSC a Doc. Ing. Miloš KMÍNEK CSC. VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE. *MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA: Technologická měření, Měření teploty* [online]. 2005 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4-ram.htm>
- [6] BRZOBOHATÝ Lukáš: *Měření teploty*. Brno, 2011. 19s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D
- [7] doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., *Teoretické základy bezdotykového měření teploty: Bezdotykové teploměry* [online]. 2014, **2014**(02) [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://automa.cz/teoreticke-zaklady-bezdotykoveho-mereni-teploty-cast-2-52626.html>
- [8] SPRINGL, Vít. *Měření teploty: kovové odporové senzory teploty* [online]. 2004 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove->
- [9] BALOS, Michal. *Teplotní senzory realizované technologií tlustých vrstev* [online]. **2002**(/30) [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/02030/index.html>
- [10] E-KONSTRUKTÉR. *Termočlánky: konstrukce, využití a účinnost: Stavba termočlánků, jejich účinnost a využití* [online]. 2014 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>
- [11] FRK, Martin a Zdenka ROZSÍVALOVÁ. Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi. *Elektrorevue*. 2012, **2012**(14/4). Dostupné také z: <https://www.google.cz/url?sa=t>
- [12] Senzit. Příručka pro konstruktér, projektanty a realizátory měřicí a regulační techniky. Rožnov pod Radhoštěm, 2011
- [13] VOJÁČEK, Antonín. *Teorie zpracování signálu platinových teplotních senzorů. Automatizace.hw* [online]. 2012 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/zpracovani-signalu-platinovych-senzoru>
- [14] Úvod do termočlánků. *Omega* [online]. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>



- [15] FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. *Laboratorní měření: Termočlánky* [online]. 1999 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-00-103.gif>
- [16] Čičmanec, P., *Všeobecná fyzika 2, Elektrina a magnetismus*, Bratislava: Alfa a SNTL, 1980.
- [17] Termočlávkové snímače teploty: Termočlánky podle DIN EN 60584. *Guenther* [online]. 2013 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/77cf12c1-d174-207b-1d81-57864b5d063b?Edition=cz>
- [18] Termočlánky. *Telemeter* [online]. 2005 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.telemeter.info/documents/termoclanky.pdf>
- [19] Construction and application of resistance thermometers. *JUMO* [online]. 2009 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: [http://www.jumo.cz/media/PDFs/Support\\_Download/FAQ/Temperature\\_measurement/t90.2000gb.pdf](http://www.jumo.cz/media/PDFs/Support_Download/FAQ/Temperature_measurement/t90.2000gb.pdf)
- [20] *Přístroje na měření teploty SITRANS T: Termočlánky* [online]. [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: [http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data\\_files/procesni\\_instrumentace/mereni\\_teploty/katalog\\_termoclanky\\_2011\\_cz.pdf](http://stest1.etnetera.cz/ad/current/content/data_files/procesni_instrumentace/mereni_teploty/katalog_termoclanky_2011_cz.pdf)
- [21] Odporové teploměry a termočlánky: Návod k použití. *WIKA: Alexander Wiegand SE & Co. KG* [online]. 2012 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: [http://www.wika.at/upload/OI\\_TR\\_TC\\_EExi\\_CZ\\_40434.pdf](http://www.wika.at/upload/OI_TR_TC_EExi_CZ_40434.pdf)
- [22] FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Technologická měření: Odporové snímače, odporové snímače teploty [online]. Brno, 1998 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-01.htm>
- [23] HYRŠ, Jan. Měření teploty termočlánky [online]. Brno, 2012 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53351](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53351). Bakalářská práce. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [24] Marys. MĚŘENÍ TEPLITY: Termočlánky [online]. [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mtttd.htm>
- [25] ODBOR TERMOMECHANIKY A TECHNIKY PROSTŘEDÍ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Dynamické vlastnosti přístrojů [online]. Brno, 2005 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/daq/Ka03-02.htm>
- [26] ENGINEERING, OMEGA. Thermocouple Response Time. In: OMEGA [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.omega.com/temperature/Z/ThermocoupleResponseTime.html>
- [27] OTYCH, Jan. Metrologie teploty [online]. Brno, 2012 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace\\_08\\_1206\\_3.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_08_1206_3.pdf). Pzentace. ČMI Brno.
- [28] Měření teploty: Objev a vývoj teploměru. Teploměry Galileo [online]. 2008 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.teplomery-galileo.cz/t-mereni-teploty/>