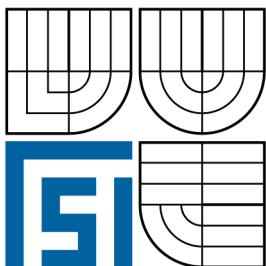


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

KOREKCE A KOMPENZACE PŘI MĚŘENÍ TEPLŮT CORREKTION AND COMPENSATION IN TEMPERATURE MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOM'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV ZÁBRANSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky
Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka) : Bc. Jaroslav Zábranský

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902T001)**

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 diplomové práce:

Korekce a kompenzace při měření teplot

v anglickém jazyce:

Correktion and Compensation in Temperature Measurement

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V technické praxi je velmi častou úlohou měření teploty. Toto měření doprovází řada průvodních negativních vlivů které je třeba korigovat a kompenzovat.

Cíle diplomové práce:

Práce je zaměřena na vlivy, působící negativně na přesnost výsledku měření teploty. Uvádí přehled těchto chyb a jejich možných kompenzací a korekcí s důrazem na časté chyby dynamické. Součástí je rovněž jednodušší model pro automatické řešení některých vybraných korekcí.

Doporučená osnova práce:

1. Měření teploty
2. Nepřesnosti při měření
3. Možnosti korekcí a kompenzací zásadních problémů
4. Model automatické korekce vybraných nepřesností

Seznam odborné literatury:

1. CHUDÝ, Vladimír; Palenčár, Rudolf; Kureková, Eva; Halaj, Martin. Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava: Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
2. JENČÍK, J; Volf, J.; Technická měření : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
3. KREIDL, M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4. Ďaďo,S.,Kreidl,M.:Senzory a měřicí obvody,ČVUT,Praha 1999

Vedoucí diplomové práce : Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně,dne 20.11.2008

L.S.

doc.RNDr.Ing.Miloš Šeda,Ph.D.
Ředitel ústavu

doc.RNDr.Miroslav Doupovec,CSc.
Děkan fakulty

ANOTACE

Teplota je považována za základní veličinu v oblasti průmyslového měření, protože na její hodnotě je závislá řada výrobních procesů a regulací. Práce je zaměřena na vlivy, působící negativně na přesnost výsledku měření teploty. Uvádí přehled těchto chyb a jejich možných kompenzací a korekcí s důrazem na časté chyby dynamické. Dynamické vlastnosti je nutné znát pro analýzu a syntézu měřících a regulačních systémů. Součástí je rovněž jednodušší model pro automatické řešení některých vybraných korekcí.

ANNOTATION

The temperature belongs to the one of the basic values for a commercial measuring processes. The exact measuring of the temperature is the essential for a multitude manufacturing procedures and their regulations. This study is mainly focused to determine what influences can take the negative effect to exact temperature measurement.

Content:

List of of possible mistakes and their compensation wit the special focus on a notorious and frequent dynamic errors. Characteristic of those dynamic properties are important to analyze all the possibilities to correct different measuring systems. In this study we also present the simple model to deal with some error corrections.

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za věcné připomínky při vypracování této diplomové práce.

OBSAH

Zadání závěrečné práce	3
Anotace	5
Poděkování	6
Obsah	7
1. Úvod	9
1.1 Měření.....	9
2. Fyzikální veličina teplota	10
2.1 Teplota.....	10
2.2 Teplotní stupnice.....	10
2.3 Principy měření teploty.....	14
2.4 Zásady měření.....	14
3. Senzory teploty	15
3.1 Volba senzoru teploty.....	16
3.2 Dilatační teploměry.....	17
3.3 Elektrické teploměry.....	18
3.3.1 Teploměry odporové.....	18
3.3.1.1 Teploměry odporové- kovové.....	19
3.3.1.2 Teploměry odporové- polovodičové.....	23
3.3.1.3 Termoelektrické teploměry (termočlánek).....	25
3.3.2 Přístroje pro elektrické snímače	27
3.4 Speciální indikační teploměry.....	27
3.5 Pyrometry.....	28
3.6 Měřící převodník.....	29
4. Vlastnosti senzorů teploty	31
4.1 Chyby měření.....	31
4.1.1 Rozdělení chyb.....	31
4.2 Statické vlastnosti senzorů teploty.....	33
4.3 Nejistoty měření.....	33
4.3.1 Standardní nejistota typu A.....	34
4.3.2 Standardní nejistota typu B.....	35
4.3.3 Kombinovaná standardní nejistota.....	37
4.3.4 Rozšířená nejistota.....	37
4.3.5 Výpočet nejistoty při nepřímém měření.....	38
5. Metody zmenšení chyb senzorů	39
5.1 Metoda kompenzačního senzoru	40
5.2 Metoda diferenčního senzoru	40
5.3 Metoda zpětnovazebního senzoru	40
5.4 Metoda sériového(paralelního) zapojení linearizačního členu	40
5.5 Metoda linearizace při číslicovém zpracování signálu	41
5.6 Metoda automatické kalibrace	41
5.7 Metoda filtrace	42
5.8 Metoda posunu spektra.....	42
5.9 Metoda korekce dynamických chyb senzoru.....	42
6. Dynamické vlastnosti senzorů teploty	43
6.1 Přechodová charakteristika senzorů teploty	44
6.2 Rychlostní charakteristika senzorů teploty.....	46

7. Experimentální ověření	48
7.1 Výběr teploměru.....	48
7.2 Postup práce.....	48
7.3 Termočlánek K2.....	49
7.4 Odporový kovový teploměr Pt 100.....	50
7.5 Aproximační metoda výpočtu teploty.....	56
7.6 Nastavení nového teploměru Pt100 dle časové konstanty.....	61
7.7 Další možnost jak zmenšit dopad dynamických chyb.....	62
8. Model automatické korekce	64
8.1 Vestavěný systém.....	64
8.2 Mikroprocesory.....	65
8.3 Inteligentní převodníky teploty.....	65
8.4 Simulace.....	67
9. Závěr	68
Seznam použité literatury	69
Přílohy	70

1. ÚVOD

V technické praxi je velmi častou úlohou měření teploty. Teplota je jedna z nejdůležitějších vlastností, určujících stav hmoty. Většina látek je závislá na teplotě. Měření teploty, jak ho dnes známe, je mnohem přesnější, rychlejší, účinnější a mobilnější než tomu bylo dříve. Pro měření teploty se ve velké míře využívá měřidel spolupracujících s osobními počítači. Toto měření doprovází řada průvodních negativních vlivů které je třeba korigovat a kompenzovat. Tato práce se zaměřuje na časté chyby dynamické, ovlivňující měření teploty velkou měrou a na možnosti odstranění jejich působení. Celá práce je rozdělena na tři části. První část je převážně teoretická a odpovídá rozsahu dané problematiky, neboť pro správné pochopení problematiky jsou nezbytné znalosti z oblasti měření teploty. V druhé části je proveden výběr vhodného senzoru teploty, měření a výpočet pro názornost zakomponovaný do excelovského dokumentu pomocí Visuál Basic. V třetí části je uveden nástin modelu automatické korekce. Závěr je kompletní zhodnocení experimentu.

1.1 Měření

Měření objektu zahrnuje jeho srovnání s jednotkou standardu použitím měřicího nástroje v kontrolovaných podmínkách. Mezi měřicí přístroje patří i teploměr, který nám ukazuje standardizované jednotky (°C, F, K). Pomocí měření, tak určujeme vlastnosti měřeného předmětu, nebo děje teploty. Samotné měření, pokud je to možné, má probíhat opakovaně, a za stejných podmínek, přičemž se zaznamenávají všechny měřené veličiny. Výsledky jediného měření nebývají věrohodné. Jako konečný výsledek pak bývá brána průměrná hodnota naměřených veličin.

Měření se stále modernizuje (dokonalejší počítače, nové technologie...atd.), tak se můžeme setkat s jejich postupným upřesňováním a standardizací. Většinou jsou již měřicí jednotky definovány, což umožňuje opakované měření pozorovaných jevů. Dnes používáme mezinárodně domluvenou soustavu jednotek tzv. soustavu SI (zkratka z francouzského Le **S**ystème **I**nternational d'**U**nités)

2 FYZIKÁLNÍ VELIČINA TEPLOTA

Abychom mohli o měření teploty dále psát, je nutné si nejprve říci co to teplota je, jak se měří a pracuje s ní. Teplota je považována za základní veličinu v oblasti průmyslového měření, protože na její hodnotě je závislá řada výrobních procesů a regulací, ať již přímo nebo nepřímo.

2.1 Teplota

Teplota je nejdůležitější veličinou užívanou v technických, i ostatních oborech. Je to základní termodynamická stavová veličina. Přesto, že všichni máme dobrou představu o tom, co teplota je, její fyzikální definování je složité. Pro dosažení stejných výsledků měření, nezávisle na jeho principu, byla odvozena z účinnosti ideálního Carnotova cyklu termodynamická teplotní stupnice. Teplota je veličina, která charakterizuje, zda látka při tepelném kontaktu s jinou látkou je nebo není v tepelné rovnováze, zda bude nebo nebude přijímat či předávat teplo. Je mírou kinetické energie pohybu molekul a atomů. Molekuly navzájem na sebe narážejí a rychlost jejich pohybu se mění v čase. Pokud by na hmotu nepůsobilo okolní prostředí, pak je rychlost molekul konstantní. Za nejnižší teplotu, kterou nazýváme absolutní teplotní nulou, je považován takový stav hmoty, kdy v ní ustane jakýkoli pohyb částic (0 Kelvínů pohyb ustává). Pro stanovení teploty se používají teplotní závislosti jiných fyzikálních veličin.(teplotní roztažnost, elektrický odpor,..atd.). Měření teploty je tedy **měření nepřímé**. Volí se takové fyzikální jevy, u nichž lze závislost veličiny matematicky vyjádřit teplotní stupnicí. Patří mezi základní diagnostické veličiny jak v technice tak i medicíně. Je základem bezpečnosti a spolehlivosti.

2.2 Teplotní stupnice [5]

Při měření teploty se používají teplotní stupnice. **Termodynamická teplotní stupnice** je základní stupnicí, je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu. Počátkem je absolutní nula. Jednotkou teploty T je kelvin – K podle irského fyzika Williama Thomsona lorda Kelvina. Jeden kelvin (1 K) je 273,16-tý díl termodynamické teploty trojného bodu vody, základní jednotka SI. Absolutní nula je definována základním referenčním bodem kterým je trojný bod vody.

Platí vztah :

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \quad (1)$$

η účinnost Carnotova cyklu

Q_2 teplo odebrané teploměrovou látkou z lázně s teplotou T_2

Q_1 teplo odevzdané teploměrovou látkou do lázně s teplotou T_1

platí $T_2 > T_1$

Ze vztahu (1.) vyplývá (2.)

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2)$$

Teploměrná látka-dokonalý plyn, pro který platí stavová rovnice

$$pV = R_m T \quad (3)$$

R_m - molární plynová konstanta ($R_m = 8,3143 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

V - objem plynu

Pro konstantní objem V vyplívá ze vztahu (3) rovnice pro plynový teploměr

$$T = T_0 \cdot \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

$P_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 273,15 \text{ K}$.

Kromě termodynamické teploty T (K) se používá ještě **Celsiova teplota** t ($^{\circ}\text{C}$) vyjadřovaná v Celsiových stupních, platí: $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$ a $T_0 = 273,15 \text{ K}$. V běžné praxi se používá Celsiova (teplotní) stupnice, $^{\circ}\text{C}$ je 1/100 rozpětí mezi bodem tuhnutí a bodem varu vody. Termodynamickou teplotu je zvykem označovat T (K) a Celsiovu teplotu t ($^{\circ}\text{C}$).

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K}$$

Dále pak stupnice **Fahrenheitova**, která se dosud užívá v anglosaských zemích t1 ($^{\circ}\text{F}$). Ta má pro bod mrazu vody hodnotu 320F a pro bod varu vody 2120F. Převodní vztahy mezi stupnicí Celsiovou a Fahrenheitovou jsou pak následující:

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t - 32$$

Pro praktickou realizaci termodynamické teploty dnes slouží mezinárodní teplotní stupnice ITS 90.

Mezinárodní teplotní stupnice ITS 90

Realizace měření je velmi náročná, proto se na termodynamické stupnici určují jen některé body. Teplotní rozsah je vymezen varem kyslíku při 90,20 K ($-182,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a tuhnutím wolframu při 3 660 K ($3\,387 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Od roku 1990 je tato stupnice empirickou stupnicí stanovenou na 17 pevně definovaných teplotních bodů (*Tab.1*). Tyto odpovídají rovnovážným stavům mezi fázemi vybraných látek a na interpolačních rovnicích a interpolačních přístrojích.

Mezinárodní teplotní stupnice ITS-90 uvažuje čtyři hlavní rozsahy:

- **v rozsahu 0,65 K až 5,0 K** se teplota definuje pomocí tlaku páry $^3\text{H}_e$ a $^4\text{H}_e$;

$$T_{90} = A_0 + \sum_i^9 A_i \left[\frac{\ln(p - B)}{C} \right]^i \quad (5)$$

• **v rozsahu 3,0 K až 24,556 K** (trojný bod neónu) se teplota definuje prostřednictvím heliového plynového teploměru kalibrovaného při experimentálně realizovatelných teplotách, které mají přiřazené číselné hodnoty (definované pevné body);

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90}) \frac{N}{V}} \quad (6)$$

a,b,c – získají se kalibrací (při teplotě trojného bodu neonu a trojného bodu rovnovážného vodíku a při teplotě mezi 3K a 5K

B_x - konstanta, je dána tím, jestli je použit H^3 a H^4

(N/V) - hustota plynu v teploměru v molech na m^3

• **v rozsahu 13,8033 K** (trojný bod rovnovážného stavu vodíku) **do 961,8 °C** (bod tuhnutí stříbra) je definován rovnicemi pro platinový odporový teploměr. Dále se člení do čtyř rozsahů v pásmu od 13,8033K do 273,15K a do dalších šesti v pásmu od 0°C do 961,8°C. Pro tyto rozsahy se zavádí odporový poměr $W(T_{90})$.

$$W(T_{90}) = \frac{R(T_{90})}{R(273,15K)} \quad (7)$$

$R(T_{90})$ - odpor platinového teploměru

Vztah mezi měřenou teplotou T_{90} a odporem platinového teploměru

$$W(T_{90}) = W_r(T_{90}) + \Delta W(T_{90}) \quad (8)$$

$W_r(T_{90})$ - referenční funkce

$\Delta W(T_{90})$ - odchylková funkce

• **nad teplotou 961,8°C** se teplota definuje pomocí definičních pevných bodů a Planckova radiačního zákona.

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda(T_{90}(X))} = \frac{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T_{90}(X)}\right)} - 1}{e^{\left(\frac{c_2}{\lambda T_{90}}\right)} - 1} \quad (9)$$

$T_{90}(X)$ - odpovídá teplotě tuhnutí stříbra, zlata, mědi (tabulkové hodnoty)

$L_\lambda(T_{90}), L_\lambda(T_{90}(X))$ - spektrální hustoty

$c_2 = (1,438769 \pm 0,000012) \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{K}$

Tab.1 Mezinárodní teplotní stupnice ITS 90.

Číslo	T_{90} / K	$t_{90} / ^\circ\text{C}$	Látka	Stav	$W_r(T_{90})$
1	3 až 5	-270,15 až -268,15	He		
2	13,8033	-259,3467	e-H₂	Trojný bod	0,001 190 07
3	≈ 17	≈ -256,15	e-H₂ (nebo He)	Tlak syté páry	
4	≈ 20,3	≈ -252,85	e-H₂ (nebo He)	Tlak syté páry	
5	24,5561	-248,5939	Ne	Trojný bod	0,008 449 74
6	54,3584	-218,7916	O₂	Trojný bod	0,091 718 04
7	83,8058	-189,3442	Ar	Trojný bod	0,215 859 75
8	234,3156	-38,8344	Hg	Trojný bod	0,844 142 11
9	273,16	0,01	H₂O	Trojný bod	1,000 000 00
10	302,9146	29,7646	Ga	Bod tání	1,118 138 89
11	429,7485	156,5985	In	Bod tuhnutí	1,609 801 85
12	505,078	231,928	Sn	Bod tuhnutí	1,892 797 68
13	692,677	419,527	Zn	Bod tuhnutí	2,568 917 30
14	933,473	660,323	Al	Bod tuhnutí	3,376 008 60
15	1234,93	961,78	Ag	Bod tuhnutí	4,286 420 53
16	1337,33	1064,18	Au	Bod tuhnutí	
17	1357,77	1084,62	Cu	Bod tuhnutí	

Poznámka: **e-H₂** je vodík v rovnovážné koncentraci s ortovodíkem nebo paravodíkem, body tání respektive tuhnutí jsou body při skupenské proměně za tlaku $p = 101325 \text{ Pa}$

2.3 Principy měření teploty

Při měření neznámé teploty se využívá možnost měření rozličných sekundárních veličin, které se mění v závislosti na měřené teplotě.

Měřidla teploty využívají tyto základní principy:

- 1) teplotní roztažnost (dilatační a tlakové teploměry)
- 2) změnu elektrických vlastností (odporové teploměry-termistory, termočlánky)
- 3) celková energie záření (tepelné detektory)
- 4) spektrální záření (s růstem teploty měřeného objektu roste i jeho spektrální záření)

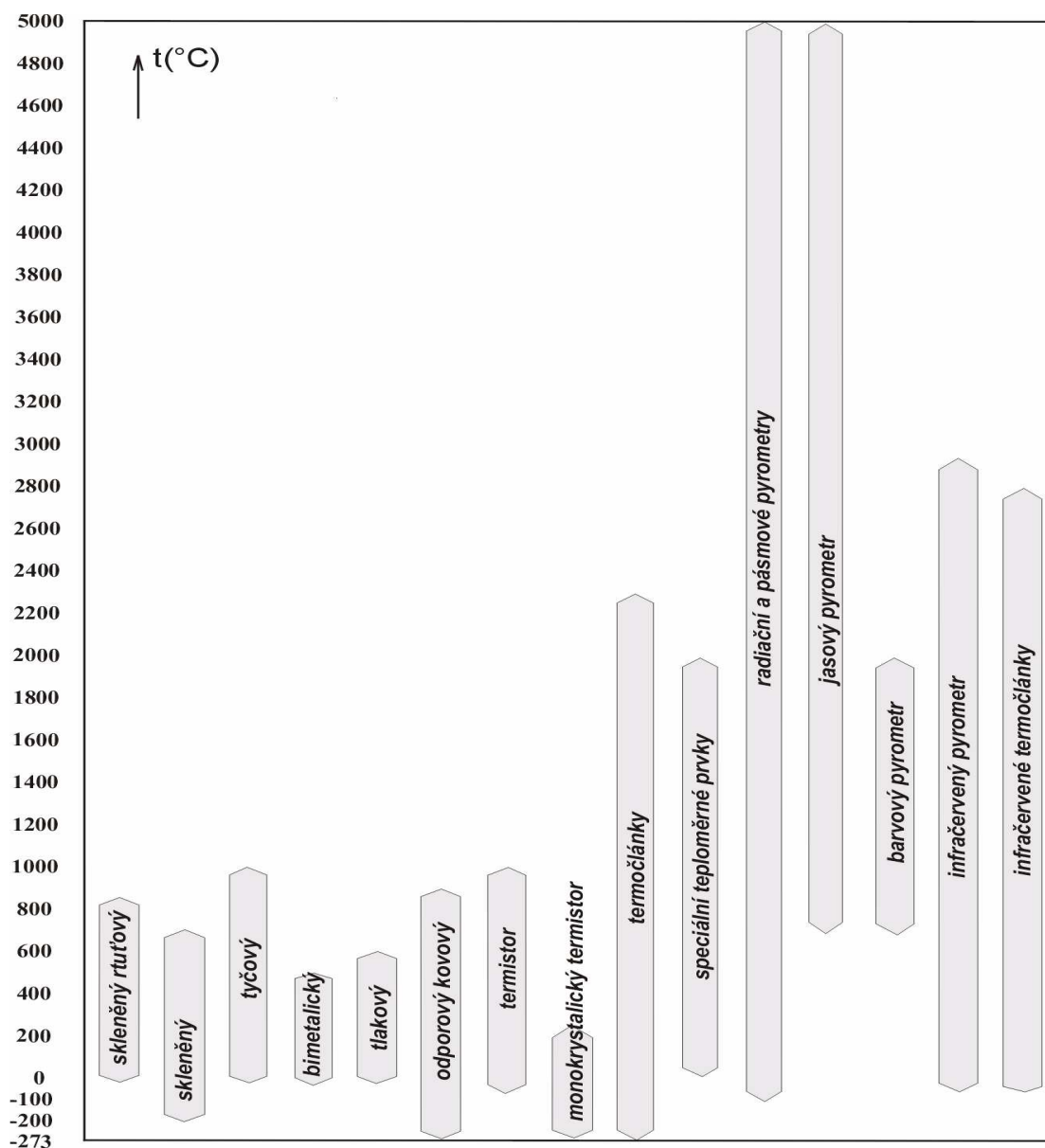
2.4 Zásady měření [8]

Na výsledný údaj má vliv umístění teplotního čidla, při měřeních v prostoru vyloučit nepříznivý vliv sálání nebo konvekčních proudů. Při měření v potrubí je nutné dobré obtékání měřenou tekutinou, s výhodou se umísťují čidla do oblouků, při použití teploměrných jímek zajistit dobrý styk mezi jímkou a čidlem. Ve vzduchovém potrubí je také nutné eliminovat vliv sálání (povrchu potrubí, výměníku tepla). Při měření povrchové teploty zajistit dobrou tepelnou vodivost mezi povrchem a čidlem, např. tepelně vodivou pastou, omezit odvod tepla přírady k čidlu (dráty vést zpočátku podél povrchu).

Při měření časově proměnné teploty je třeba vzít v úvahu *dynamické vlastnosti* čidla. Měření teploty kapaliny (vody) je z tohoto hlediska bezproblémové, časová konstanta je řádově sekundy, kdežto při měření teploty nepříliš rychle proudícího vzduchu může časová konstanta u robustnějších čidel přesáhnout i několik minut.

3. Senzory teploty [3]

Senzor teploty je vstupní prvek měřicího řetězce. Je to část, která je v přímém styku s měřeným prostředím. Senzor teploty je ekvivalentní pojmu snímač teploty (samostatná součást zařízení na měření teploty, teplotní čidlo), ale také pojmu čidlo teploty (část snímače převádějící teplotu na jinou fyzikální veličinu). Nebo také detektor tepelného záření, *teploměr*. Využívají různé měřící principy a existují v mnoha konstrukčních provedeních. Dle umístění snímací části (styku s měřeným prostředím) se dělí na dotykové a bezdotykové. Dle fyzikálního principu se dělí na odporové, termoelektrické, polovodičové s PN přechodem, dilatační, chemické, šumové, akustické, magnetické, kapacitní, aerodynamické...atd. Dále se dělí na aktivní (působením teploty jsou jako zdroj elektrické energie), a pasivní (nutné elektrické napájení). S jediným přístrojem (teploměrem) však nevystačíme v celém rozsahu teplot. V praxi se jednotlivé skupiny přístrojů vhodně doplňují a překrývají. Dělí se podle měřících rozsahů *Obr.1*:



Obr.1 Rozdělení termoměrů podle měřících rozsahů

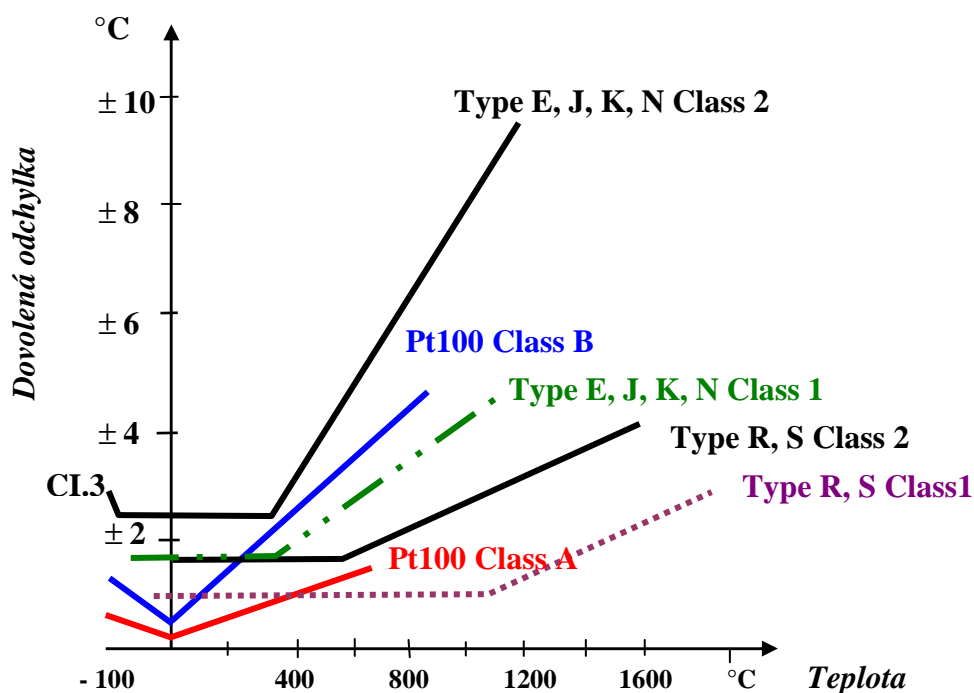
Tab.2 Přehled technických teploměrů

Skupina teploměrů	Typ teploměru	Fyzikální princip	Teplotní rozsah [°C]	
Speciální teploměry	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+ 1 300
	teploměrné barvy	změna barvy	+ 20	+ 1 000
	kapalné krystaly	změna orientace	0	+ 300
Dilatační teploměry	plynový	změna tlaku	- 5	+ 500
	tenzí	změna tenze par	- 40	+ 400
	kapalinový	změna objemu	- 200	+ 750
	kovový	délková roztažnost	0	+ 900
Elektrické teploměry	termoelektrické	termoelektrický jev	- 200	+ 1 700
	odporové kovové	změna elektrického odporu změna prahového napětí	- 250	+ 1 000
	odporové polovodičové diodové		- 200	+ 400
Bezdotykové IČ-teploměry	širokopásmové	zachycení veškerého tepl. záření	- 40	+ 5 000
	monochromatické	zachycení úzkého svazku záření	+ 100	+ 3 000
	poměrové	srovnání dvou svazků teplotního záření o různých vlnových délkách	+ 700	+ 2 000
	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa	- 30	+1 200

V další části je prezentován jen výběr z širokého spektra senzorů teploty.

3.1 Volba senzoru teploty

Volba senzoru teploty je velmi důležitá, je potřeba správně zvolit druh senzoru, jeho rozpětí, vhodnost použití čímž ovlivníme i poruchové veličiny.



Obr.2 Orientační graf pro volbu snímače

3.2 Dilatační teploměry

Využívají princip objemové roztažnosti plyných, kapalných nebo tuhých teploměrných látek při konstantním tlaku, (tlakové, tyčové, bimetalické teploměry). Teplotní dilatace se projevuje změnou délky, objemu, tlaku, tenzí par použité látky.

Výpočtové vztahy:

$$\begin{aligned} l &= l_0 \cdot (1 + \alpha \Delta \vartheta) \\ v &= v_0 (1 + \beta \Delta \vartheta) \\ p &= p_0 \cdot (1 + \beta \Delta \vartheta) \end{aligned} \quad (10)$$

l, v, p - ($\text{m}, \text{m}^3, \text{Pa}$) - výsledná délka, objem, tlak

l_0, v_0, p_0 ($\text{m}, \text{m}^3, \text{Pa}$) - původní délka, objem, tlak

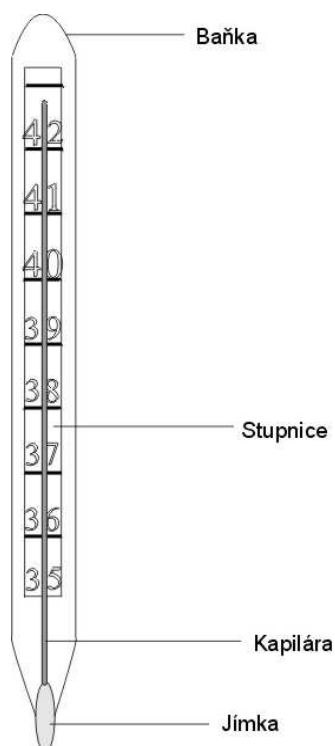
α - součinitel délkové teplotní roztažnosti

β - součinitel objemové teplotní roztažnosti

$\Delta \vartheta$ ($^{\circ}\text{C}, \text{K}$) - teplotní rozdíl

Tato skupina teploměrů se podle použití teploměrné látky dále dělí na:

- kapalinové;
- tenzní;
- bimetalové;
- plynové.



Obr.3 Lékařský rtuťový teploměr



Obr.4 Tyčový teploměr bimetalický

3.3 Elektrické teploměry

Využívají závislosti některé elektrické veličiny na teplotě. U elektrických teploměrů se ve snímači převádí teplota na elektrickou veličinu (odpor, výstupní proud, respektive napětí), která je vyhodnocena elektronickým obvodem a převedena na teplotní údaj. Materiál odporového teploměru určuje jeho vlastnosti (rozsah, přesnost, konstrukci). Na materiál se kladou hlavně požadavky :

- teplotní koeficient odporu (změna odporu v závislosti na teplotě), co největší a stálý.
- nominální odpor, odpor snímače při referenční teplotě (co největší). Snímačem prochází malý proud = malý ohřev.

Odporové teploměry mají nelineární charakteristiku, proto je používáme jen v omezeném teplotním rozsahu.

Mezi elektrické teploměry patří odporové (využívající teplotní změny odporu) a termočlánky (využívající termoelektrického jevu).

Elektrický výstup mají i některé speciální typy teploměrů a infračervené snímače teploty.

Elektrické teploměry jsou díky svému elektrickému výstupu nejrozšířenějšími teploměry v automatizovaných systémech.

3.3.1 Teploměry odporové

Principem odporových teploměrů je teplotní závislost odporu na teplotě. Tyto teploměry dnes patří k základním (etalónovým) měřidlům v rozsahu

- 259°C až + 961 °C (rozmezí mezi trojným bodem vodíku a bodem tuhnutí stříbra).

Dělíme je na teploměry:

- kovové
- polovodičové
- polykrystalické
- monokrystalické

Odpor snímače pro stanovení teploty se zjišťuje podle Ohmova zákona. Při měřicím proudu I je měřen úbytek napětí na měřicím odporu (snímači) U , odpor snímače potom je

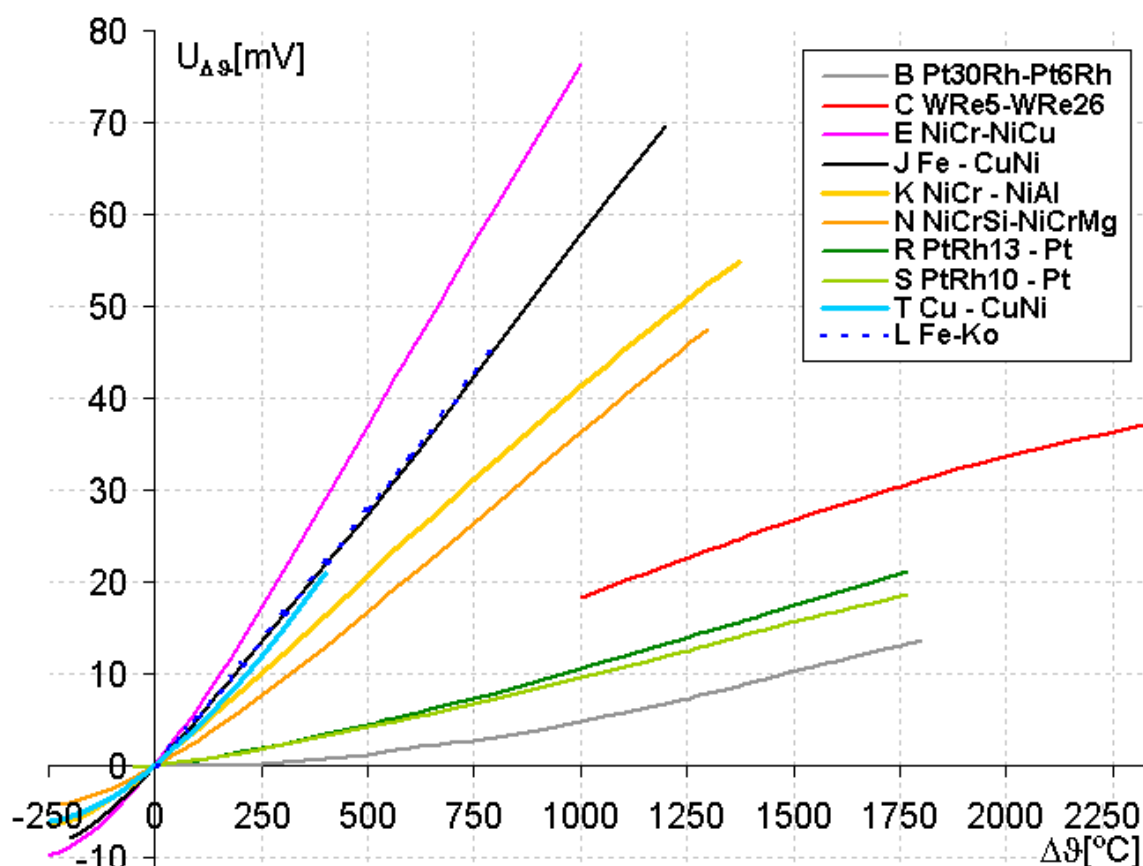
$$R = \frac{U}{I}, \quad (11)$$

průchodem proudu se však měřicí odpor zahřívá elektrickým (ztrátovým) výkonem

$$P = R \cdot I^2 \quad (12)$$



Obr.5 Průmyslové snímače teploty



Obr.6 Charakteristiky termočlánků (statické)

3.3.1.1 Teploměry odporové – kovové

Odporové teploměry jsou relativně odolné elektrickému rušení, a proto se dobře hodí k měření teploty ve výrobních prostorách, zejména u motorů, generátorů a jiných zařízení s vysokým napětím. Za průmyslový standard kovových odporových teploměrů se považuje platinový odporový drát Pt 100 (při 0°C má odpor 100Ω a při 100°C odpor 138,5 Ω). Platina je výhodná pro svou chemickou stálost, vysokou teplotou tavení a možnost dosažení vysoké čistoty, která se pohybuje v rozmezí 99,9 až 99,999%. Hlavní výhodou platinových čidel je jejich vynikající dlouhodobá stálost odporu, která zaručuje jejich vysokou přesnost a reprodukovatelnost měření. Jejich nevýhodou je velká citlivost na magnetické pole především při nižších teplotách.

Měřicí odpor, tvořící základní konstrukční část teploměru, se vyrábí:

- drátkovou technologií
- tenkovrstvou technologií
- tlustovrstvou technologií

Mimo platiny se používá nikl a měď i jiné materiály (balko, wolfram), které mají menší dlouhodobou stálost. Od teploty 3,4K se používá indium, které se vyznačuje vyšší citlivostí. Ve speciálních případech se používá paladium, stříbro a zlato.

Pro měření nízkých nebo středních teplot se používají slitiny (slitina železa s rhodiem, nebo fosforový, popřípadě křemíkový bronz).

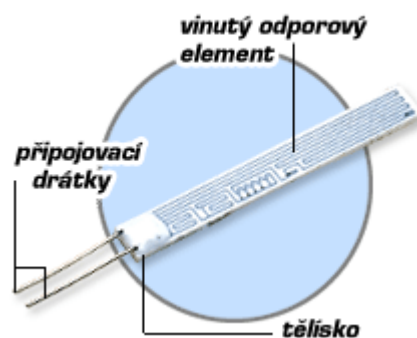
Podle konstrukčního provedení lze odporové teploměry dělit na keramické, skleněné

a pertinaxové, všechny tři typy se liší nosným materiálem, na kterém je navinut odporový drát o průměru 0,05 mm.

- **Keramické teploměry:** pokrývají celý rozsah měřených teplot (montáž do jímek , nebo plášťové).
- **Pertinaxové teploměry:** používají se pro měření teploty prostředí nebo povrchů do 150°C. Jsou k dispozici i odporové teploměry plošné.
- **Skleněné teploměry:** vyrobené jako plášťové, používají se rovněž v celém rozsahu měření, ale pro velké změny teplot se u nich může projevit tzv. tenzometrický jev.



Obr.7 Pt100 s přívodními vodiči



Obr.8 Odporový snímač [10]

Elektrický odpor s narůstající teplotou narůstá, tuto změnu charakterizuje tepelný koeficient odporu α .

α -definujeme jako průměrný přírůstek odporu při změně teploty o 1K (1°C) v rozsahu 0 až 100°C:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta t} \quad (13)$$

α - tepelný koeficient odporu

$$\Delta R = R_{100} - R_0$$

R_0 - odpor vodiče při 0°C

R_{100} - odpor vodiče při 100°C

Δt - tepelná změna rovná 100°C

Standart je Pt 100 pro nějž je podle (13) $\alpha = 0,00385 \text{ } \Omega / (\Omega \cdot ^\circ\text{C})$

Tepelný koeficient odporu α ve velkém rozsahu teplot není konstantní, mění se s teplotou. V malém rozmezí teplot se tato závislost linearizuje a závislost odporu na teplotě se vyjádří vztahem:

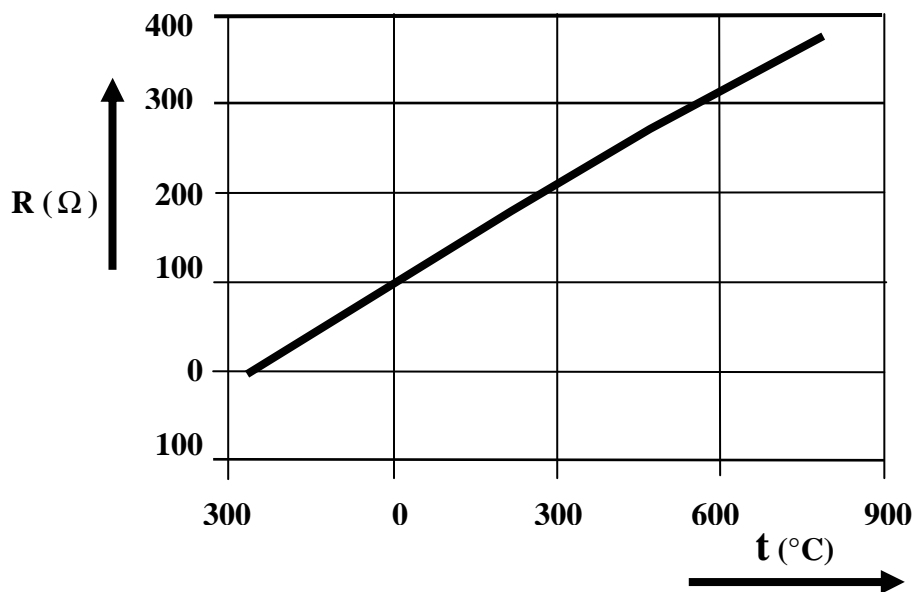
$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha t) \quad (14)$$

R_t - elektrický odpor vodiče při naměřené teplotě

R_0 - elektrický odpor vodiče při referenční teplotě 0°C

α - průměrný tepelný koeficient odporu

t - teplota vodiče



Obr.9 Závislost odporu Pt100 senzoru na teplotě

Pro větší přesnosti (nebo rozpětí) měřených teplot, je nutné vyjádření v polynomiálním tvaru.

Do 420°C, respektive do 630°C platí vztah:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + At + Bt^2) \quad (15)$$

Pro záporné teploty platí vztah:

$$R_t = R_0 \left[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100) \right] \quad (16)$$

A, B, C - konstanty odporového materiálu

Konstanty A, B, C , uvádí výrobce, nebo se určují kalibrací teploměru v pevných bodech, nebo porovnáním s přesným etalonem.

Konstanty A, B, C mají dle ČSN IEC 751 hodnoty:

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

$$B = -5,802 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$$

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

$$C = 0 \quad \text{pro } t > 0^\circ\text{C}$$

Pro stanovení teploty ze změřeného odporu platí pro teplotu vyšší než 0°C vztah:

$$t = \frac{(R_t - R_0)}{\alpha R_0} + \delta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \frac{t}{100} \right] \quad (17)$$

pro teplotu nižší než 0°C

$$t = \frac{(R_t - R_0)}{\alpha R_0} + \delta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \cdot \frac{t}{100} \right] + \beta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \quad (18)$$

$$\alpha = 3,85055 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

$$\beta = -0,108634 K^{-3}$$

$$\delta = 1,499786 K^{-2}$$

Pomocí koeficientů lze vyjádřit vztahy(15) a (16)

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right] \right\} \quad (19)$$

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \right\}$$

Dle IEC-751 (Internacional Electrotechnical Commission) se dělí platinové měřící odpory ($W_{100} = 1,385$) do dvou tolerančních tříd :

Třída A: Rozsah teplot -200°C až 650°C , tolerance($^{\circ}\text{C}$): $\pm (0,15 + 0,002 \cdot |t|)$

Třída B: Rozsah teplot -200°C až 850°C , tolerance($^{\circ}\text{C}$): $\pm (0,3 + 0,005 \cdot |t|)$

Tab.3 Dovolené tolerance dle IEC-751

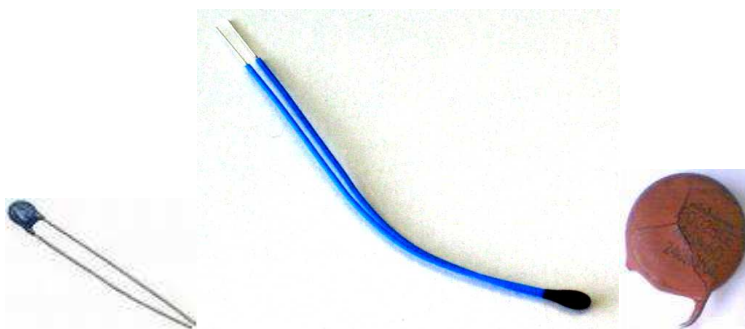
Měřená teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Dovolené odchylky			
	Třída přesnosti A		Třída přesnosti B	
	(Ω)	($^{\circ}\text{C}$)	(Ω)	($^{\circ}\text{C}$)
-200	$\pm 0,24$	$\pm 0,55$	$\pm 0,56$	$\pm 1,3$
-10	$\pm 0,14$	$\pm 0,35$	$\pm 0,32$	$\pm 0,8$
0	$\pm 0,06$	$\pm 0,15$	$\pm 0,12$	$\pm 0,3$
100	$\pm 0,13$	$\pm 0,35$	$\pm 0,30$	$\pm 0,8$
200	$\pm 0,20$	$\pm 0,55$	$\pm 0,48$	$\pm 1,3$
300	$\pm 0,27$	$\pm 0,75$	$\pm 0,64$	$\pm 1,8$
400	$\pm 0,33$	$\pm 0,95$	$\pm 0,79$	$\pm 2,3$
500	$\pm 0,38$	$\pm 1,15$	$\pm 0,93$	$\pm 2,8$
600	$\pm 0,43$	$\pm 1,35$	$\pm 1,06$	$\pm 3,3$
650	$\pm 0,46$	$\pm 1,45$	$\pm 1,13$	$\pm 3,6$
700	-	-	$\pm 1,17$	$\pm 3,8$
800	-	-	$\pm 1,28$	$\pm 4,3$
850	-	-	$\pm 1,34$	$\pm 4,6$

3.3.1.2 Teploměry odporové – polovodičové

Polovodičové odporové senzory využívají rovněž teplotní závislost odporu na teplotě. Dále dělíme na:

- negastory (NTC) hodnota elektrického odporu klesá se vzrůstající teplotou.
- pozistory (PTC) hodnota elektrického odporu roste se vzrůstající teplotou.
- monokrystalické odporové senzory

Termistory se vyrábějí práškovou metalurgií oxidů $Fe_2O_3, TiO_2, MnO, NiO, \dots$. Výhodou je cca 5 až 50 krát vyšší koeficient teplotní závislosti odporu termistoru oproti kovovým odporům. Citlivost = ztráta linearity.



Obr. 10 NTC termistor [15]

Teplotní závislost termistoru lze popsat exponenciální funkcí:

$$R = R_0 e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (\Omega) \quad (20)$$

R - odpor termistoru při teplotě T (Ω)

R_0 - odpor termistoru při teplotě T_0 (Ω)

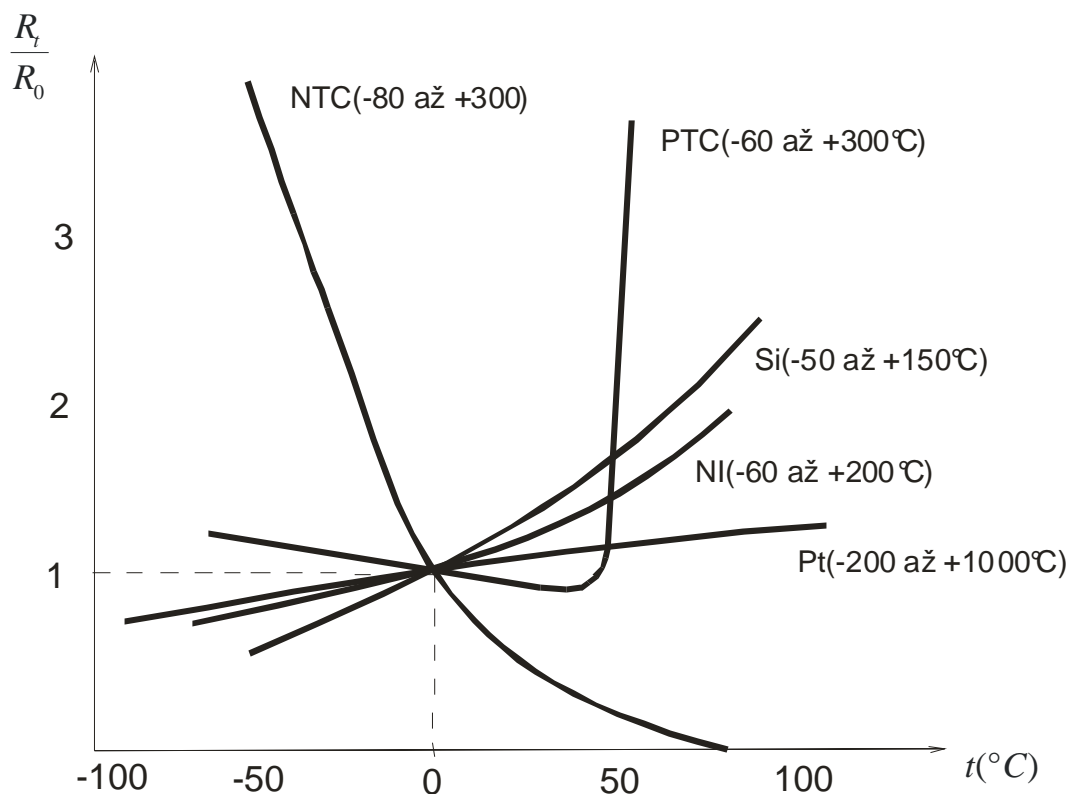
B - materiálová konstanta (úměrná měrnému odporu materiálu)

Pro úzký teplotní rozsah se dá tento vztah linearizovat a platí

$$R = R_0 \cdot (1 - \alpha_T \cdot (T - T_0)) \quad (21)$$

α_T - teplotní koeficient odporu termistoru, a platí

$$\alpha_T = -\frac{B}{T_0^2} \quad (22)$$



Obr.11 Teplotní závislost odporových snímačů [12]

- polovodičové senzory vykazují vyšší citlivost než kovové
- polovodičové senzory mají příznivější dynamické vlastnosti
- pozistory se obvykle používají jako dvoustavové senzory
- kovové senzory vykazují vysokou stabilitu, reprodukovatelnost a přesnost

Činnost termistoru se dá přesněji popsat individuálními termistorovými křivkami, které aproximuje Steinhart-Hartova rovnice:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln R + C \cdot (\ln R)^3 \quad (23)$$

T - měřená teplota

R - odpor termistoru

A, B, C - konstanty

Konstanty A, B, C se vypočítají ze třech rovnic, když se odměří odpory R_1 při teplotě T_1 , R_2 při teplotě T_2 a R_3 při teplotě T_3 . Je třeba dodržet tyto podmínky:

- a) $-40^{\circ}\text{C} \leq T_1$
- b) $T_2, T_3 \leq 150^{\circ}\text{C}$
- c) $(T_2 - T_1) \leq 50^{\circ}\text{C}$
- d) $(T_3 - T_2) \leq 50^{\circ}\text{C}$

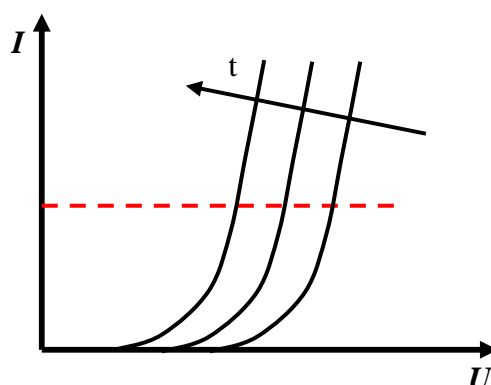
Jsou realizovatelné v malých rozměrech, rozdělujeme na tyčinkové, destičkové a perličkové (rozsah -60 až $+200^{\circ}\text{C}$).

Negastory se používají častěji než pozistory (nazýváme je termistory). Používají se i na těžko přístupných místech.

Monokrystalické odporové senzory se vyznačují vysokou stálostí charakteristik a považujeme je za kvazilineární. Dělíme je do dvou skupin:

Snímače bez PN přechodu: Na měření velmi nízkých teplot. Používá především germanium, křemík, indium a jejich slitiny. V průmyslu se vyrábějí Si senzory v rozsahu -190°C až $+100^{\circ}\text{C}$.

Snímače s přechodem PN (diody, tranzistory): PN přechod v propustném směru. (rozsah 100 až 200K). Výhodou je její lineární závislost výstupní termodynamické veličiny na teplotě.



Obr.12 Princip PN snímače teploty

3.3.1.3 Termoelektrické teploměry (termočlánek)

Využívají vznik termoelektrického napětí působením teploty. Termočlánek využívá Seebeckův jev. Termočláanky se používají hlavně pro měření teploty, bývají vyrobeny z tenkého vodiče o průměru 0,1 - 0,5 mm, které jsou na konci svařené a uložené v keramické dvojkapiláře. Skládá se ze dvou elektricky vodivých vodičů různého chemického složení. Napětí článku se obvykle měří kompenzátozem, nebo jiným citlivým přístrojem na jednosměrný proud. Při zahřátí vzniká termoelektrické napětí (je to vlastně generátor napětí). V malém tepelném rozsahu se dá termoelektrické napětí linearizovat a popsat vztahem

$$U_{te} = \alpha \cdot \Delta T \quad (24)$$

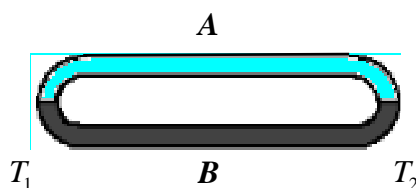
U_{te} termoelektrické napětí
 α koeficient úměrnosti
 ΔT rozdíl teplot na obou koncích obvodu

V určitém teplotním intervalu se dá měřená teplota odvodit z naměřeného termoelektrického napětí podle polynomiální rovnice

$$t = \sum_{i=0}^n a_i U_{te}^i \quad (25)$$

- t neznámá teplota
 a_i koeficienty (odvozené, dle termočlánku)
 U_{te} termoelektrické napětí
 n řád polynomu

Seebeckův jev se projevuje u dvou vodičů A a B , u kterých je udržována teplota jejich spojů na rozdílných teplotách $T_1 > T_2$.

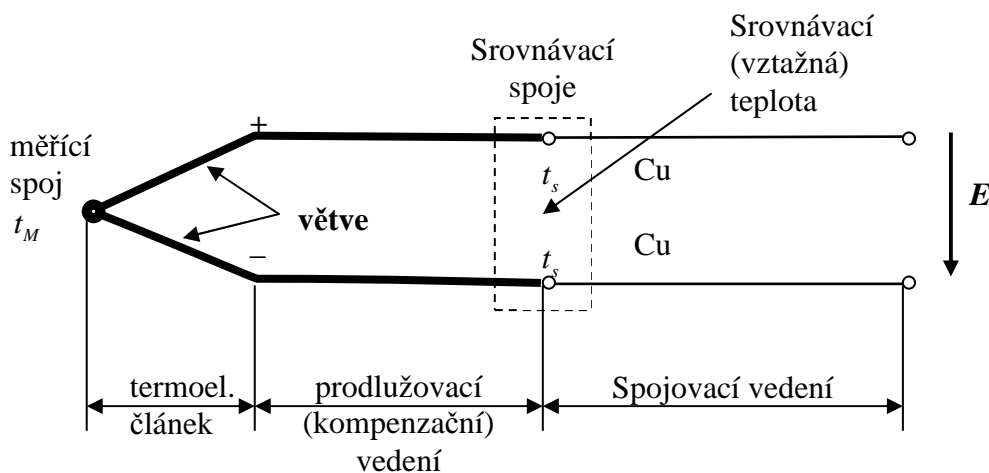


Obr.13 Seebeckův jev - termoelektrický článek (termočlánek)

Pro elektromotorické napětí U_{AB} a absolutní teploty spojů platí experimentálně zjištěný vztah:

$$U_{AB} = (a_A - a_B) \cdot (T_2 - T_1) + 0,5(b_A - b_B) \cdot (T_2 - T_1)^2 \quad (26)$$

U_{AB} - elektromotorické napětí, a, b - Seebeckovy koeficienty, T - teplot



Obr.14 Termočlánek

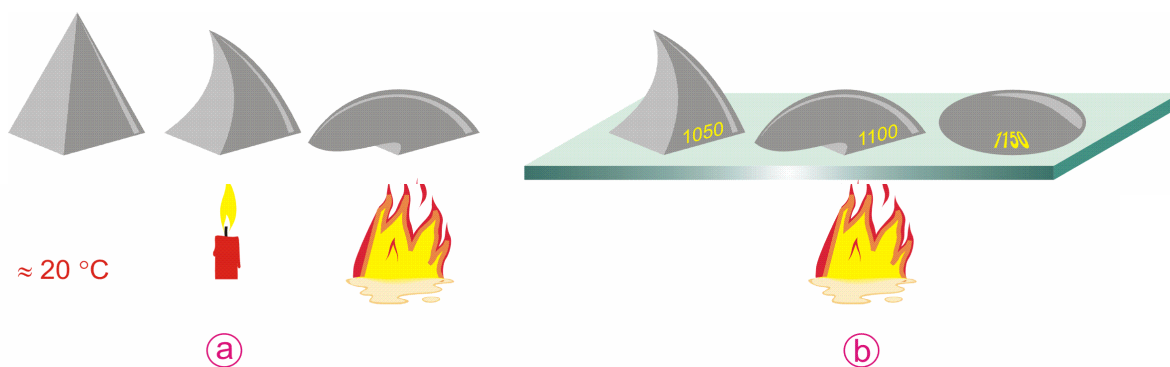
3.3.2 Přístroje pro elektrické snímače

Elektrické snímače teploty se používají u systémů pro měření a sběr dat a systémů **měření a regulace**, tyto snímají teplotu na více měřicích místech. U těchto systémů je u čidla převodník, který dává standardizovaný signál (4 až 20 mA, 0 až 10 V nebo digitální komunikace RS232, RS485, ...), ten je schopný systém zpracovat. Dochází k velkému rozmachu ručních elektronických (digitálních) teploměrů s velkým výběrem vyměnitelných teplotních čidel (ponorné, vzduchové, pro povrchovou teplotu atd.). Signál z čidla je přístrojem elektronicky vyhodnocen (včetně kompenzace teploty srovnávacího spoje u termočláňkových čidel) a výsledek zobrazen na displeji, případně zaznamenán do paměti, přenesen do počítače. Přístroje jsou provedeny buď jako jednoúčelové teploměry, nebo jako multimetry (pro měření více veličin). Přístroje s možností připojení dvou termočláňkových čidel jsou výhodné pro měření teplotních diferencí.

Pro některé účely je zapotřebí zaznamenávat časový průběh teploty osamoceně - mimo systém měření a regulace: transport potravin, zhodnocení mikroklimatu..atd. Zde se používají miniaturní elektronické záznamníky teploty - tzv. dataloggery, schopné pojmout do paměti až několikaměsíční data. Zaznamenaná data se pak přenesou ke zpracování do počítače.

3.4 Speciální indikační teploměry

Na orientační indikování teploty se používají různá keramická a teploměrná tělíska, teploměrné tablety, tužky a nálepky.



Obr.15 Keramická tělíska

a) keramické tělísko při zvyšování teploty, b) sada tělísek s různými teplotami

Samolepící štítky



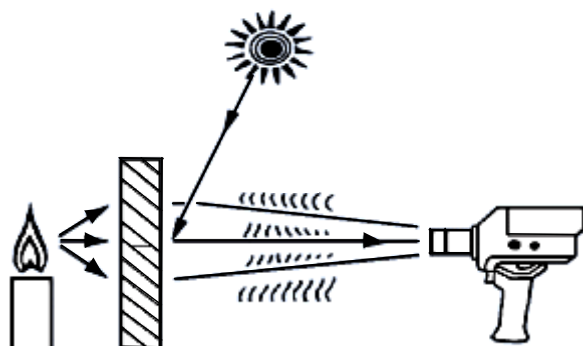
- nevratná změna barvy při překročení mezní teploty

- vratná změna barvy při překročení mezní teploty
- využití na etiketách některých výrobků (např. lahvévé pivo)

Obr.16 Samolepící štítky

3.5 Pyrometry

Snímají tepelné a nebo světelné záření, které vyzářují tělesa do chladnějšího prostředí. Pyrometry jsou bezdotykové teploměry, které určují teplotu měřeného tělesa z teplotního záření. Měří se jimi převážně teploty v rozsahu -50°C až $+3500^{\circ}\text{C}$

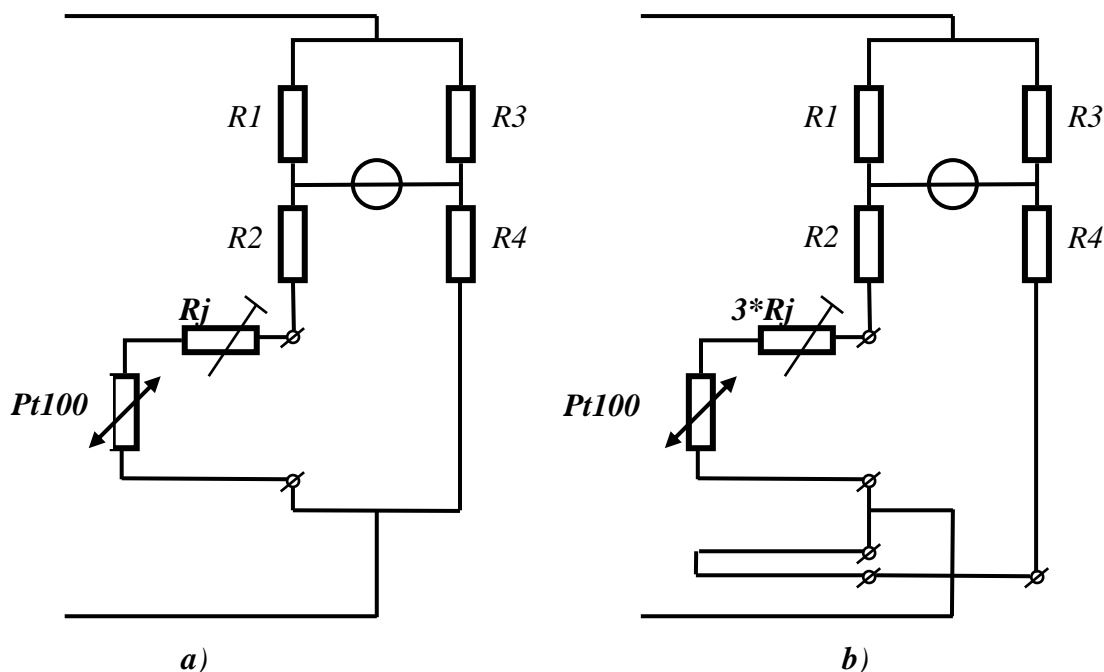


Obr. 17 Měření pyrometrem

3.6 Měřicí převodník

Musí mít vstupní obvod navržen tak, aby vyhovoval měřené veličině. Transformovaný elektrický signál je nutno zesílit. Musíme zajistit dostatečný odstup signálu od šumu snímače a zesilovače a také od parazitních vlivů. Toto realizujeme speciálními zapojeními zesilovačů, frekvenčním omezením signálu, modulací měřené veličiny s následnou synchronní demodulací nebo číslicovým zpracováním signálu.

Převodník pracuje ve dvou nebo čtyřvodičovém zapojení a po zesílení převádí vstupní měřený signál, zpravidla analogový, na signál digitální (tento převod odpadá, pokud senzor poskytuje digitální výstup).



Obr.18 Příklad zapojení Pt100 a) dvouvodičový, b) čtyřvodičový

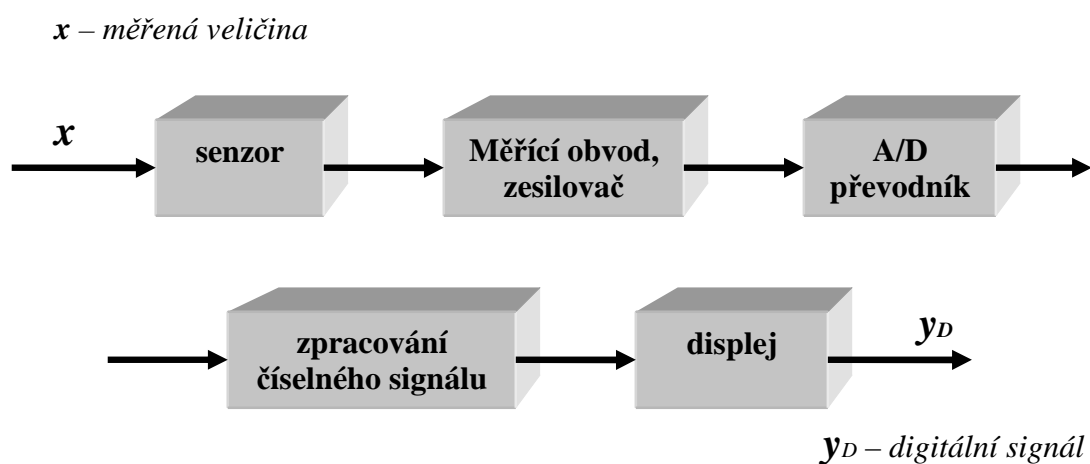
Ve vyhodnocovací jednotce řízené mikroprocesorem probíhá zpracování zesíleného signálu, především kompenzace vlivu teploty provozních podmínek (výpočet, kalibrace, atd.). Diskrétní signál v upravené podobě se převádí převodníkem D/A obvykle na unifikovaný analogový výstupní signál proudový 0/4 až 20 mA nebo napětí 0 až 10 V, a zobrazuje se i na displeji v digitálním tvaru.

Převodník lze konfigurovat přes komunikační rozhraní nejčastěji se používá (RS-232 C pro oboustranný přenos potřebují 5 a více vodičů - dosah 20 kbitů/s asi 15m nebo RS-485 -20 Mbitů/s; 1200m), s podporou menu na displeji.

Měřené hodnoty se ukládají do energeticky nezávislé paměti EEPROM. Převodníky jsou vybaveny LCD displeji, z nich čteme měřenou veličinu a jiné údaje (čas, teplota, úroveň signálu...).

Je možná i komunikace přes PC (PC-převodník/analyzátor) vhodným programem je možné konfigurovat systém na požadované měření (nastavit rozsah, kalibraci, kompenzace provozních vlivů atd.). PC může dle programu okamžitě vyhodnocovat data.

Převodníky a analyzátoři se liší mechanickým uspořádáním, měřicím rozsahem a přesností, obvodovým zapojením, způsobem teplotní kompenzace, komunikačními schopnostmi a dalším vybavením (autokalibrace, autodiagnostika, hlídání mezí, automatické čištění, regulační funkce....).

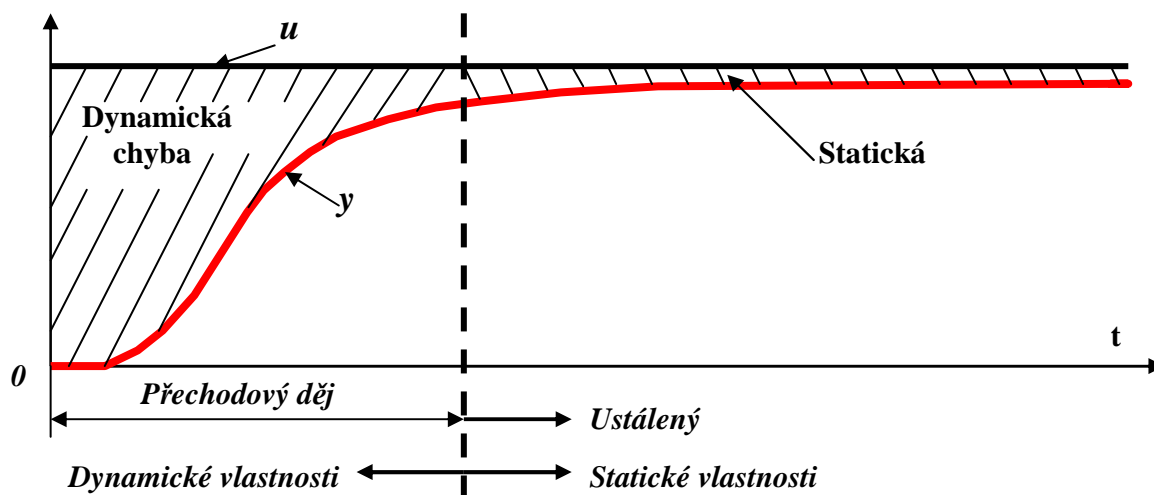


Obr.19 Blokové schéma číslicového měřícího přístroje

- **měřicí obvod, zesilovač**
- úprava signálu pro jeho další zpracování
- **A/D převodník**
- převod analogového signálu na číslicový signál
- **displej**
- koncový blok řetězce, výstupem je číslicový údaj přístroje

4. Vlastnosti senzorů teploty [5]

V této kapitole chci poukázat na chyby při měření a na statické vlastnosti senzorů, dynamické vlastnosti rozeberu podrobně v kapitole 6. jelikož se týkají mé práce.



Obr.20 Přechodová charakteristika

4.1 Chyby měření

Neexistuje žádné měření absolutně přesné. Vždy působí na měření negativní vlivy, které ovlivní naměřenou hodnotu, ta se projeví jako odchylka mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené teploty. Výsledek se tak pohybuje v tolerančním poli kolem skutečné hodnoty, téměř nikdy nenastane ideální shodnost obou hodnot. Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami se v minulosti nazýval chybou měření. Chyby se vyjadřují v absolutních nebo relativních hodnotách. Jako chyba absolutní $\Delta(x)$ se označuje rozdíl mezi hodnotou naměřenou x_m a skutečnou x_s .

$$\Delta(x) = x_m - x_s \quad (27)$$

Podělíme-li absolutní chybu skutečnou hodnotou, dostaneme poměrné vyjádření chyby, tj. chybu relativní $\delta(x)$.

$$\delta(x) = \frac{\Delta(x)}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (28)$$

4.1.1 Rozdělení chyb

Rozdělují se podle jejich působení na výsledek měření

- chyby systematické
- chyby náhodné
- chyby hrubé

Systematická chyba se při stejných podmínkách měření nemění, nebo se při změně podmínek měření mění podle určité závislosti („systematicky“ ovlivňuje výsledek měření). Rozdíl od náhodné chyby, systematickou chybu nelze určit na základě opakovaných měření. Ke stanovení jejich velikosti postačí většinou vztah pro výpočet absolutní chyby.

Jejich vliv je možné zmenšit vhodnou kompenzací, uplatněním příslušných korekcí, odstraněním příčin které je způsobily. Možnost rozpoznání systematické chyby je omezená, poznáme jen její odhad a ne její skutečnou hodnotu, a proto odstraníme odhad. Vždy zůstává nevylučitelná část, jejíž hodnotu neznáme. Tuto část systematické chyby nazýváme nevylučitelnou systematickou chybou.

Náhodná chyba působí zcela nahodile, je nepředvídatelná a nelze ji vyloučit. Pro určení jejich velikosti se vychází z opakovaného měření s použitím statistických metod odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu modelu, reprezentovanému zákonem rozdělení příslušné náhodné chyby (normální-Gaussovo). Při opakovaném měření nezávislé veličiny X za stejných podmínek, získáváme v důsledku náhodných chyb různé hodnoty $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$. Výsledek měření je

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (29)$$

n - počet měření

Náhodnou chybu zastupuje směrodatná odchylka výběrového souboru $s(x)$, méně často směrodatná odchylka aritmetického průměru $s(\bar{x})$, získané z následujících vztahů

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2(x_i)}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (30)$$

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (31)$$

Obě směrodatné odchylky charakterizují, jak jsou výsledky měření rozptýlené. Hodnota směrodatné odchylky není hodnota chyby.

Směrodatná odchylka nebo její násobek vyjadřují jen hranici, kterou může náhodná chyba s určitou pravděpodobností překročit, nebo nepřekročit. Náhodné chyby existují, neumíme je však v jednotlivých případech určit, ale umíme z pravděpodobnostního hlediska popsat jejich chování a ve výsledku měření hodnotíme nejistotou.

Hrubé chyby jsou nevyzpytatelné. Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celé měření, které se vyloučí z dalšího zpracování. Omezit riziko výskytu hrubých chyb lze důsledným dodržováním příslušných měřících postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy (většinou je to lidský faktor).

Výsledná chyba měření je vyjadřována jako součet systematické e a náhodné složky ε což lze zapsat

$$\Delta(x) = e + \varepsilon \quad (32)$$

a její maximální hodnotu je možné odhadnout jako

$$\Delta_{\max} = (\bar{x} - x_s) + 2s \quad (33)$$

kde systematická složka je $e = \bar{x} - x_s$, a náhodná složka je $e = s$, nebo $\varepsilon = 2s$

Součinitel rozšíření směrodatné odchylky souvisí s pravděpodobností pokrytí intervalu a typem rozdělení. Dvojka u Gaussova rozdělení přísluší často užívané 95% pravděpodobnosti.

4.2 Statické vlastnosti senzorů teploty

Statická charakteristika senzoru je dána funkční závislostí $Y=f(x)$ mezi měřenou veličinou X a transformovanou veličinou Y v časově ustáleném stavu. Tuto závislost lze často popsat polynomem

$$Y = f(x) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n \quad (34)$$

Ideální, téměř nerealizovatelná, statická charakteristika senzoru je

$$Y = KX \quad (35)$$

K je *citlivost* senzoru (konstanta přenosu)

Obecně je citlivost proměnnou veličinou definovanou přírůstkem $\Delta Y, \Delta X$ dle vztahu

$$K = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{df(X)}{dX} \quad (36)$$

- **Práh citlivosti** je dán hodnotou měřené veličiny, při níž je na výstupu senzoru signál odpovídající střední kvadratické odchylce šumu senzoru.
- **Dynamický rozsah** je dán intervalem přípustných hodnot snímané veličiny, ohraničený prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny.
- **Reprodukovatelnost** je dána odchylkou naměřených hodnot při krátkodobě neměnné měřené veličině a neměnných rušivých vlivech okolí.
- **Rozlišitelnost** je poměr věrohodné měřené hodnoty a prahu citlivosti.

4.3 Nejistoty měření

Nahrazují vyjádření přesnosti měření pomocí chyb měření. Je to parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, které lze důvodně (racionálně a s určitou pravděpodobností) přiřazovat k měřené veličině. Je to parametr charakterizující rozptyl hodnot okolo naměřené hodnoty v němž s jistotou pravděpodobností je hodnota pravá. Standardní nejistotou je nejistota daná směrodatnou odchylkou veličiny, pro níž je nejistota udávána. Znamená to, že byly vyloučeny odstranitelné systematické jevy.

Dělení do skupin

- standardní nejistota typu **A** označovaná symbolem u_A
- standardní nejistota typu **B** označovaná symbolem u_B
- kombinovaná standardní nejistota u_C
- rozšířená nejistota $U_{(X)}$

4.3.1 Standardní nejistota typu A

Tato nejistota je způsobena kolísáním naměřených údajů. Statické zpracování naměřených hodnot. Nejprve se stanoví odhad hodnoty x . Výběrový aritmetický průměr měřené veličiny X pro n měření je dán vztahem

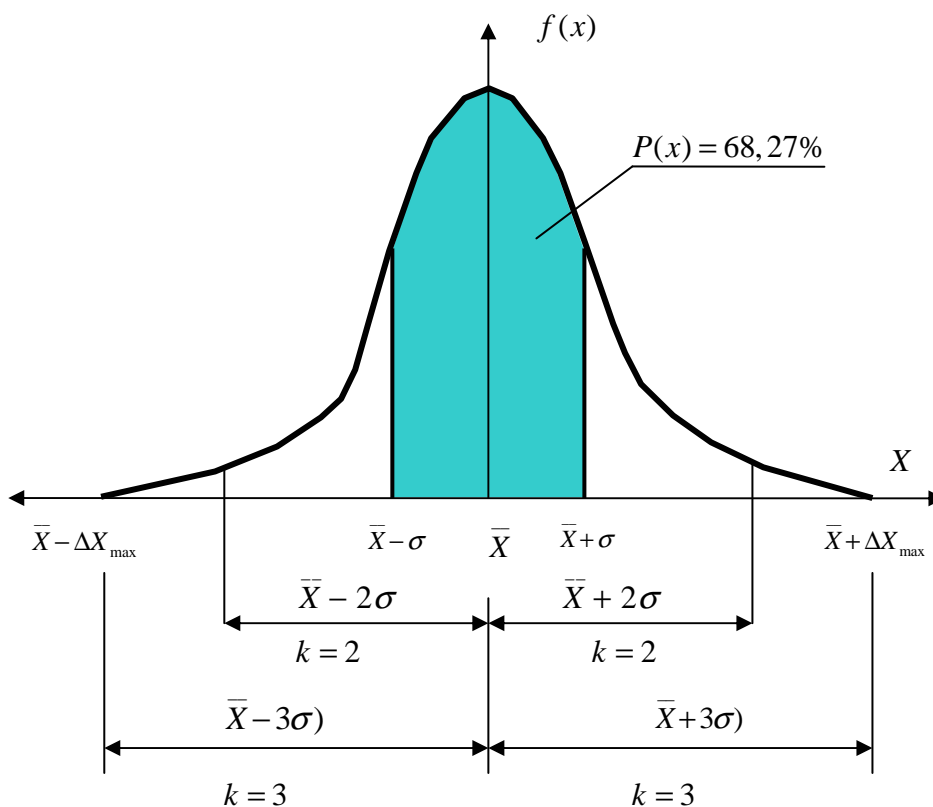
$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (37)$$

Standardní nejistota typu $u_A(x)$ k odhadu x je pak dána výběrovou směrodatnou odchylkou výběrového aritmetického průměru

$$u_A(x) = \sigma(\bar{X}) = \sqrt{D(\bar{X})} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n(n-1)}}, \quad (38)$$

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

Statické rozdělení odchylek od výběrového průměru, odpovídá rozdělení normálnímu (Gaussovu).



Obr.21 Hustota pravděpodobnosti normálního rozdělení

Hustota pravděpodobnosti $f(x)$ normálního rozdělení (Obr.18) je dána vztahem

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (39)$$

Při větším počtu měření než 9 je $k = 1$ (doporučuje se volit počet měření > 10 , v krajním případě > 5).

4.3.2 Standardní nejistota typu B

Zahrnuje ostatní zdroje nejistoty, které nejsou zahrnuty ve standardní nejistotě typu A, vyhodnocení není založeno na statickém zpracování dat. Jsou stanoveny na základě všech možných informací a odhadnutelných příčin vzniku (nejistoty dané technickými parametry a certifikacemi měřicího zařízení, normovanými tolerancemi součástek, vlivy zabudování čidel, stárnutí čidel (časová nestabilita), vlivy měřících metod, vlivy dynamických vlastností snímače, vlivy vnějších podmínek, nejistoty dané linearizací charakteristik, korekcí, aproximací, interpolací, extrapolací při vyhodnocování naměřených hodnot, nejistoty dané referenčními hodnotami, konstantami z tabulek, údaji z katalogů, protokoly při kalibraci. Toto jsou hlavní vlivy na měření teploty.

Obecně - Možné zdroje nejistot typu B :

➤ **Vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení.**

Nejistoty kalibrace nebo ověření, stabilita (časová specifikace) přístrojů, dynamické chyby přístrojů, zanedbané systematické chyby, rozlišitelnost / rozlišení odečtu z přístrojů, hystereze, mrtvý chod, specifikace výměnných částí přístrojů.

➤ **Vlivy okolního prostředí a jejich změny**

Tlak, změna tlaku, relativní vlhkost, magnetické pole, elektrické pole, osvětlení, příp. jeho frekvence a tepelné vyzařování, hustota vzduchu, čistota prostředí, ovzduší, prašnost, napájecí napětí, stabilita, frekvence, harmonické zkreslení, zemní smyčky.

➤ **Vlivy metody**

Ztráty, svodové proudy, interakce s měřeným předmětem, nejistoty použitých konstant, vlivy reálných parametrů, oproti ideálním uvažovaných v modelech, vlastní ohřev, odvod či přestup tepla.

➤ **Vlivy operátora**

Nedodržení metodik, paralaxa, elektrostatické pole, tepelné vyzařování, osobní zvyklosti.

➤ **Ostatní vlivy**

Náhodné omyly při odečtech nebo zápisu hodnot, těžko postihnuteľné globální vlivy (vliv měsíce, vlivy ročních období, vlivy denní doby, vliv polohy ionosféry a pod.).

Pro standardní nejistotu typu B platí pro jedinou složku nejistoty (jeden zdroj nejistoty Z s maximální odchylkou Δz_{\max}) vztah

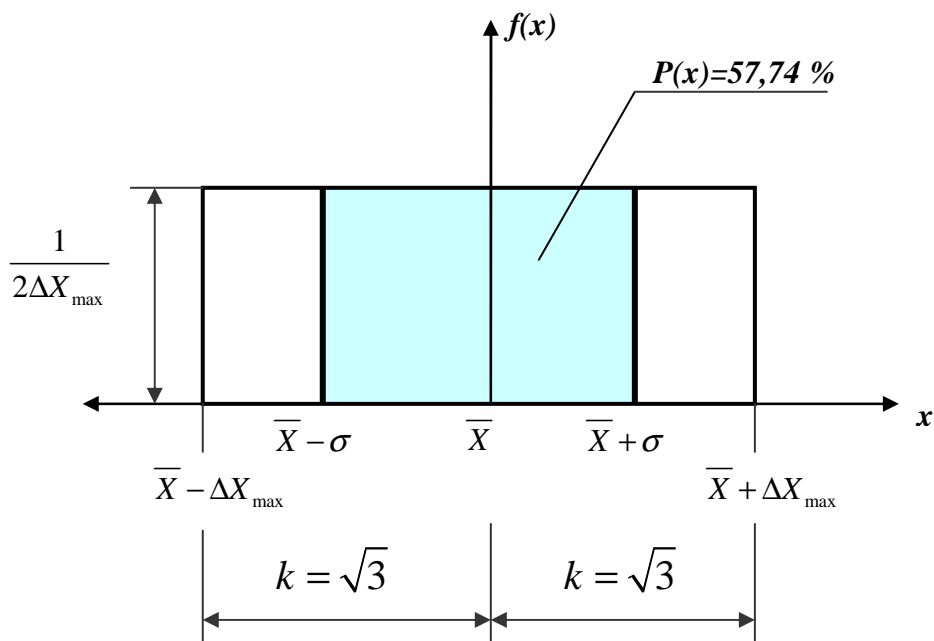
$$u_B(z) = \frac{\Delta z_{\max}}{k} \quad (40)$$

Z maximální odchylky $\Delta z_{i,\max}$ a pravděpodobnostního rozdělení (Obr.21, Obr.22) se získá koeficient k , po čí něhož lze vypočítat odpovídající směrodatnou odchylku.

Pro rovnoměrné rozdělení (Obr.22) jsou rozptyl D a směrodatná odchylka σ dány vztahy

$$D(\bar{X}) = \frac{[\Delta X_{\max} - (-\Delta X_{\max})]^2}{12} = \frac{\Delta X_{\max}^2}{3} \quad (41)$$

$$\sigma(\bar{X}) = \sqrt{D(\bar{X})} = \frac{\Delta X_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (42)$$



Obr.22 Hustota pravděpodobnosti symetrického rovnoměrného rozdělení

V intervalu $\langle -\Delta X_{\max}, +\Delta X_{\min} \rangle$ je výsledek měření veličiny x s pravděpodobností 100 %.

Jednotlivé složky $u_{B,zj}$ standardní nejistoty typu B pro m zdrojů se za předpokladu vzájemné nezávislosti složek sčítají dle vztahu

$$u_B(x) = \sqrt{A_{x,zj}^2 \sum_{j=1}^m u_{Bzj}^2} \quad (43)$$

A_{x,z_j} - citlivostní koeficienty, určují přesnost odhadnuté nejistoty do nejistoty měření veličiny X . Za předpokladu, že je známá závislost

$$x = f(z_1, \dots, z_m),$$

platí pro výpočet citlivostních koeficientů rovnice

$$A_{x,z_j} = \frac{\partial f(z_1, \dots, z_m)}{\partial z_j}, j = 1, \dots, m \quad (44)$$

Pokud koeficient korelace mezi složkami není nulový, je nutné pro přesné výpočty nejistoty znát nebo z koeficientů korelace vypočítat kovariance mezi složkami a použít složitější vztahy.

4.3.3 Kombinovaná standardní nejistota

Se skládá z obou základních typů nejistot A a B a je dána vztahem

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (45)$$

Pokud je jeden typ nejistoty výrazně větší (alespoň 4x) lze druhý typ zanedbat.

4.3.4 Rozšířená nejistota

Umožňuje prostřednictvím koeficientu rozšíření k zvětšit pravděpodobnost, že naměřená hodnota je v intervalu daném standardní nejistotou. Platí

$$U(x) = k u_c(x) \quad (46)$$

$u_c(x)$ - standardní nejistota

k - $k \in \langle 2, 3 \rangle$, volí se většinou $k=2$, který odpovídá intervalu spolehlivosti 95 % viz (Obr.21).

4.3.5 Výpočet nejistoty při nepřímém měření

Nepřímá měření (měření teplot) jsou měření, u kterých je měřená veličina Y funkcí přímo měřených veličin X (včetně veličin ovlivňujících výsledek).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (47)$$

Vzhledem k tomu, že neznáme pravé hodnoty přímo měřených veličin (X_1, X_2, \dots, X_m) , a tedy také ne hodnoty výstupní funkce Y , funce se uvádí ve tvaru

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (48)$$

y, x_1, x_2, \dots, x_m - lze stanovit odhadem v určitém intervalu

Pro výpočet nejistoty při nepřímém měření se použije **zákon šíření nejistot**. Pokud vstupní veličiny $x_i (i=1, \dots, m)$ ve vztahu (45) nejsou vzájemně korelovány, platí pro standardní nejistoty vztah

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2} \quad (49)$$

Pokud nelze koeficienty korelace zanedbat (hodnota koeficientu může nabývat hodnoty od -1 do +1), je nutné znát vzájemné vazby, kovariance. Vztah (46) je nutno rozšířit:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2 + 2 \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m A_i A_j \text{cov}(x_i, x_j)} \quad (50)$$

$\text{cov}(x_i, x_j)$ - kovariance mezi navzájem korelovanými veličinami x_i, x_j . Pro nejistoty typu A platí rovnice

$$\text{cov}_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (51)$$

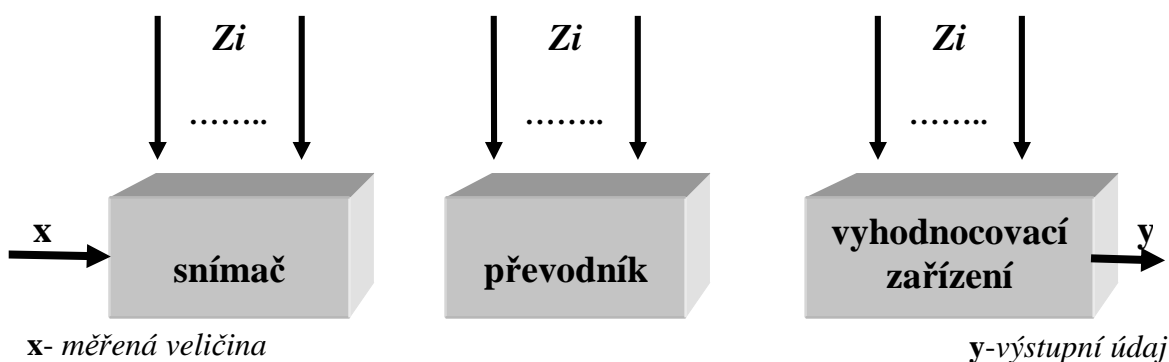
Pro nejistoty typu B je kovariance dána prostřednictvím koeficientu korelace r vztahem

$$\text{cov}_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u_B(x_i) u_B(x_j) \quad (52)$$

Nejistota výsledku měření se zaokrouhlí max. na dvě platné číslice.

5. Metody zmenšení chyb senzorů [7]

Z hlediska chyb je třeba kromě systematických a nahodilých chyb jednotlivých funkčních bloků senzoru uvažovat zapojení senzoru do systému tj. musí se respektovat vazba senzoru s ostatními částmi systému a parazitní vazby uvnitř senzoru. K rušivým veličinám prostředí patří například tlak, vlhkost, teplota, radiace, elektromagnetické, elektrické, magnetické pole a jiné. Zpětná vazba senzoru na měřený proces má za následek, že hodnota měřené veličiny se změní vlivem senzoru (například dotykový teploměr sníží teplotu měřeného místa). Jako zpětný vliv rozhraní, přístroje a jiného zařízení připojeného k senzoru lze uvést zatěžovací impedance, rušivé signály vedení nebo parazitními zemními smyčkami. Vnitřní rušení uvnitř senzoru a případného elektronického řetězce je způsobeno oteplením, parazitními kapacitami nebo jinými vazbami.



Obr.23 Vliv ovlivňujících veličin na měřicí zařízení,
 Z_i – ovlivňující (poruchové) veličiny

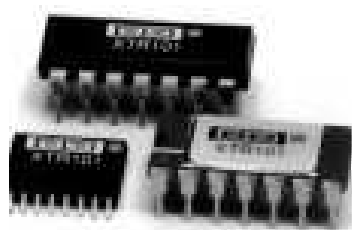
Ovlivňující veličiny

- ovlivňují výstupní signál
- nejsou předmětem měření
- jejich vliv je nutné minimalizovat
- vliv na výstupní údaj se vyjadřuje pro každou ovlivňující veličinu zvlášť

V praxi se můžeme setkat s celou řadou metod, které zmenšují chybu senzorů. Mezi ně náleží například:

5.1 Metoda kompenzačního senzoru

Lze použít, pokud je výstup snímače ovlivňován samostatně měřitelnou poruchovou veličinou, jejíž vliv na vlastní měřenou veličinu známe. Potom lze poruchovou veličinu měřit samostatně a odečítat ji od vlastní měřené veličiny poruchovou veličinou zatížené. Často lze použít dvou identických snímačů, kdy jeden měří užitečnou i poruchovou veličinu a druhý pouze poruchovou. Signál druhého snímače od prvního odečteme (např. zatížený i nezatížený tenzometr jsou stejně ovlivňovány teplotou – od výstupu zatíženého tenzometru odečteme hodnotu nezatíženého).



Obr.24 Kompenzační obvod

5.2 Metoda diferenčního senzoru

Může být takovým uspořádáním dvou identických snímačů, které měří užitečnou hodnotu s opačnou polaritou, avšak poruchové veličiny se stejnou polaritou. Odečtením výstupů takových snímačů získáme dvojnásobnou hodnotu užitečného signálu, signály poruchových veličin se však od sebe odečtou (a eliminují). Diferenční snímač může být uspořádán tak, aby již ve svém principu eliminoval některé poruchové veličiny.

5.3 Metoda zpětnovazebního senzoru

Vytváříme zpětnovazební veličinu, jejíž hodnotu známe, aby byla co nejpodobnější veličině měřené. Zpětnovazební a měřenou veličinu poté vzájemně porovnááme. Vlastní snímač slouží pouze k relativnímu porovnání zpětnovazební a měřené veličiny. Po takovém snímači pak požadujeme pouze dostatečnou citlivost, jeho vlastní přesnost nebo linearita již není podstatná. Pomocí zpětnovazebního uspořádání lze vytvořit snímač, který jen minimálně mění svůj tvar respektive polohu s velikostí měřené veličiny.

5.4 Metoda sériového(paralelního) zapojení linearizačního členu

Linearizace výstupního signálu – analogová (číslicová (viz 5)) Má smysl, pokud výstup snímače není přímo úměrný měřené veličině.

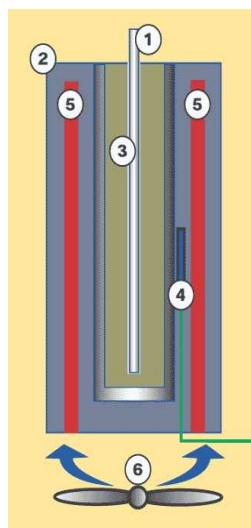
Nelinearitu snímače lze kompenzovat například nerovnoměrností stupnice vyhodnocovacího zařízení nebo vhodnou korekční převodní charakteristikou navazujícího převodníku.

5.5 Metoda linearizace při číslicovém zpracování signálu

V číslicovém zpracování lze (statickou) převodní charakteristiku popsat tabulkou a korigovat výpočtem.

5.6 Metoda automatické kalibrace

Princip kalibrační pece je založen na suchém kovovém bloku (2), jehož teplota je kontrolována pomocí topných těles (5) a řídicího teploměru (4). Výkon v topných tělesech je regulován tak, aby bylo dosaženo maximální stability nastavené teploty. Práce s pecí pak probíhá tak, že kalibrováný snímač teploty (1) je umístěn do otvoru (3) v bloku pece a po ustálení je jeho výstupní signál porovnán se známou teplotou v peci. Chlazení pro dosažení nižší teploty usnadňuje ventilátor (6).



Obr.25 Schématický řez pecí

Fyzikální možnosti pecí jsou ohraničeny zhruba těmito parametry teploty:

Teplotní rozsah: -80°C až $1\ 800^{\circ}\text{C}$, Stabilita $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ až 1°C , homogenita od $0,005^{\circ}\text{C}$

Jako etalonové teploměry jsou obvykle používány odporové snímače teploty Pt 25, Pt 100 v rozsahu teplot do 650°C a nad touto teplotou pak termoelektrické články typu S (Pt - PtRh).

Řešením pro většinu aplikací je odporový teploměr Pt 100, model STS 100, který je navíc konstrukčně řešen tak, že již ponor 70 mm je pro jeho bezchybné měření zcela postačující a STS 100 se tak stává ideálním doplňkem kalibračních pecí.

Automatizované systémy založené na dokumentačních kalibrátorech poskytují informaci o kalibraci ve formě kalibračního listu. Kalibrační list obsahuje obvykle požadované náležitosti, jako je seznam použitých etalonů, datum kalibrace a jméno pracovníka i jeho dozoru.



Obr.26 Kalibrační sada

5.7 Metoda filtrace

Frekvenční filtrace výstupního signálu - analogová, číslicová
 Pokud je měřený signál střídavým signálem se známou frekvencí a poruchy mají odlišné frekvenční spektrum, lze tyto rušivé frekvence odfiltrovat.

Dolnopásmová frekvenční propust (odfiltruje vysoké frekvence – jejím výsledkem je v podstatě střední hodnota měřené veličiny za definovaný časový úsek) odstraňuje poruchové kmitání měřené hodnoty – má smysl v případě superponovaných kmitavých poruch s nulovou střední hodnotou.

Prakticky významnou poruchou elektrických signálů je vliv síťového kmitočtu. Ten lze eliminovat synchronizovaným vzorkováním měřeného signálu při průchodu síťového střídavého napětí nulou.

Frekvenční filtraci lze realizovat buď klasickou analogovou technikou nebo číslicově pomocí *rychlé Fourierovy transformace* (FFT – buď speciálními čipy nebo i programově)

5.8 Metoda posunu spektra

Má-li signál $s(k)$ spektrum $S(\Omega)$, má signál posunutý o veličinu a spektrum. Amplitudové spektrum posunutého signálu se nemění, mění se jen fázové spektrum a to úměrně zpoždění a kmitočtu. Na rozdíl od věty o translaci v Laplaceově transformaci platí věta pro libovolné a , tedy i pro $a < 0$.

5.9 Metoda korekce dynamických chyb senzoru

Dynamická chyba ε_d je rozdíl mezi hodnotou výstupní veličiny měřicího přístroje (údajem přístroje) a hodnotou výstupní veličiny ideálního přístroje, popsaného rovnicí nultého řádu, který má shodné statické vlastnosti. $\varepsilon_d = y - y_{id}$ U některých moderních měřicích zařízení vybavených mikroprocesorem je možno velikost dynamické chyby spočítat a provést automaticky korekci výstupního údaje.

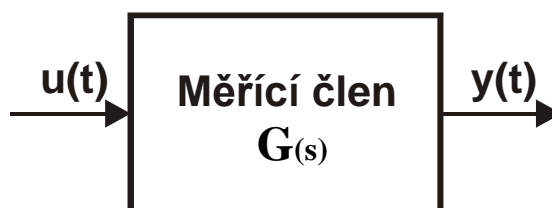
(Tato metoda bude podrobně rozebrána v další kapitole.)

6. Dynamické vlastnosti senzorů teploty [5]

Měřicí přístroje nebo části přístrojů obvodů nepřenášejí vstupní signál na výstup okamžitě, ale jejich kapacity, odpory a jiné vlastnosti způsobují zkreslení výstupního signálu. Měřená teplota se neustále mění s časem. Pojem čas můžeme chápat ve vědecké práci, jak dlouho daná událost trvala, abychom mohli popsat sled událostí. Znalost dynamických vlastností je velmi důležitá pro měření veličin, jejichž hodnota se rychle mění s časem, tj. například pro měření okamžitých hodnot veličin a pro účely řízení technologických procesů (ochrany, alarmy, blokování, rychlé regulační smyčky). Dynamické vlastnosti senzorů teploty je potřeba znát pro analýzu a syntézu měřících a regulačních systémů. Sensory zařazené v regulačních smyčkách nebo indikující mezní stavy procesu musí být navrženy tak, aby výstupní signál $Y = y(t)$ sledoval s minimálním zkreslením vstupní signál teplotu $t = u(t)$.

Dynamické vlastnosti senzoru teploty lze popsat lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty (53).

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 \cdot u(t)$$



Obr.27 Blokové schéma měřícího členu
 $u(t)$ je vstupní veličina, $y(t)$ je výstupní veličina

$$a_n \cdot Y^{(n)} + \dots + a_2 \cdot Y'' + a_1 \cdot Y' + a_0 Y = X \quad (53)$$

X - měřená veličina (teplota)

Dynamické vlastnosti lze popsat rovnicemi prvního, druhého výjimečně vyššího řádu.

Pokud rovnice není lineární, je nutné ji po úsecích linearizovat a dynamické chování sledovat v daných úsecích. Graficky se zobrazují dynamické vlastnosti dynamickými charakteristikami:

- **Přechodová charakteristika** - odezva na skokovou změnu teploty, popisuje ji přechodová funkce
- **Rychlostní charakteristika** - odezva na změnu teploty měnící s konstantní rychlostí; popisuje ji rychlostní funkce

Průběh libovolné dynamické charakteristiky lze určit experimentálně, nebo výpočtem.

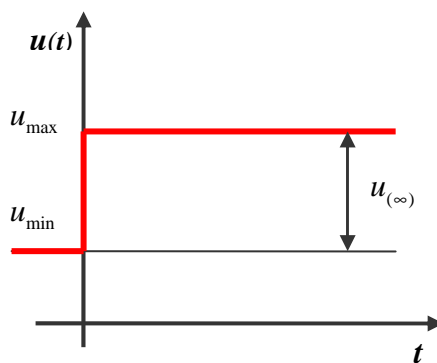
6.1 Přechodová charakteristika senzorů teploty [5]

Ze vztahu (53) lze odvodit pro charakteristiku 1.řádu rovnici

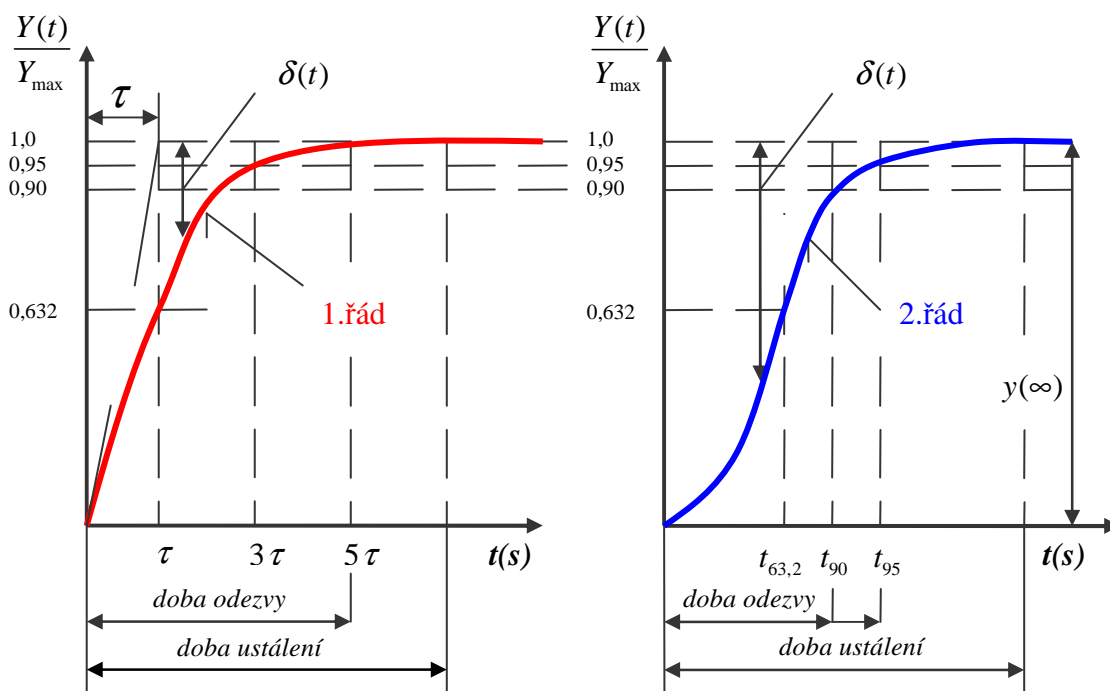
$$\frac{Y(t)}{Y_{\max}} = \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (54)$$

kde: t je čas (s).
 τ časová konstanta (čas za který odezva na skokovou změnu dosáhne 63,2 % ustálené hodnoty).

Za čas $t = 4,606 \tau$ dosáhne odezva 99,0 % a za $6,909 \tau$ dosáhne 99,99 %. U většiny senzorů teploty je přechodová charakteristika 2 nebo 3 řádu lze aproximovat charakteristikou 1.řádu nebo dopravním zpožděním a charakteristikou 1.řádu.



Obr.28 Vstupní signál ve tvaru skokové změny



Obr.29 Přechodová charakteristika 1. a 2. řádu

Pro charakteristiku 1.řádu platí pro dynamickou odchylku od ustálené hodnoty vztah

$$\delta(t) = \frac{Y(t) - Y_{\max}}{Y_{\max}} = \frac{Y(t)}{Y_{\max}} - 1 \quad (55)$$

Ze vztahu vyplývá že pro $\delta(t) < 1\%$ je nutné odčítat naměřenou veličinu v čase $t > 5T$.

Z grafů (Obr.29) je patrné že dynamické vlastnosti mají velký vliv na stanovení nejistot měření.

Pokud dynamické chování senzoru teploty odpovídá lineární diferenciální rovnici 1. řádu a časový průběh regulované a měřené teploty lze aproximovat harmonickou funkcí s jedinou harmonickou, lze dynamické chování senzoru popsat frekvenčním přenosem $F(j\omega)$.

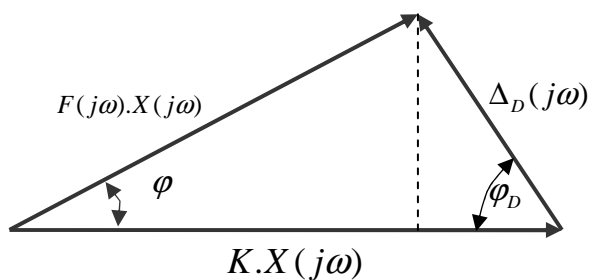
$$F(j\omega) = |F(j\omega)| \cdot e^{j\varphi(\omega)} \quad (56)$$

Pro dynamickou harmonickou odchylku měřené teploty od ustálené teploty platí

$$\Delta_D(j\omega) = X(j\omega) \cdot [F(j\omega) - K] \quad (57)$$

K- konstanta přenosové funkce.

Odchylku Δ_D pro jedinou harmonickou složku lze znázornit ve fázovém diagramu (viz Obr.30).



Obr.30 Fázový diagram

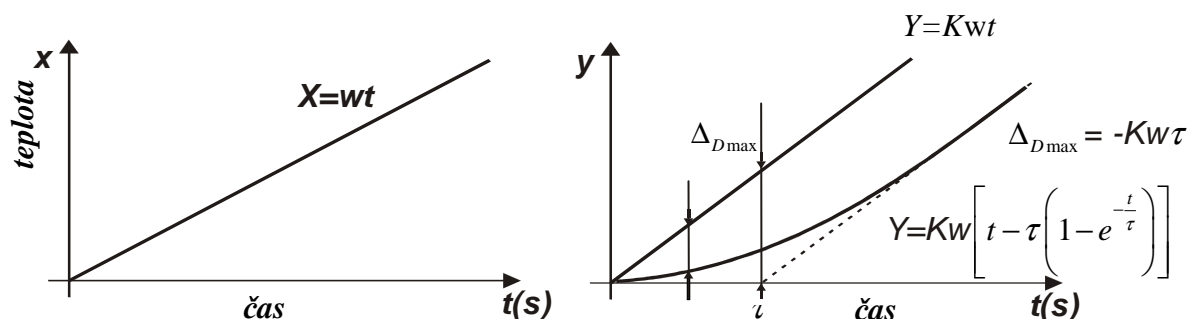
Pro absolutní hodnotu odchylky Δ_D platí dle kosinové věty

$$|\Delta_D(j\omega)|^2 = |KX(j\omega)|^2 + |F(j\omega)X(j\omega)|^2 - 2|F(j\omega)X(j\omega)||KX(j\omega)|\cos\varphi \quad (58)$$

nejistota typu B

$$u_B(y) = \frac{|\Delta_D(j\omega)|_{\max}}{\sqrt{3}} \quad (59)$$

6.2 Rychlostní charakteristika senzorů teploty



Obr.31 Rychlostní charakteristika 1.řádu

Pro odhad maximální odchylky stačí zjistit maximálně možnou rychlost w změny teploty senzoru a pro stanovení nejistoty typu B lze použít vztah

$$u_B(y) = \frac{\Delta_{D\max}}{\sqrt{3}} \quad (60)$$

Pokud senzor vykazuje dynamické chování vyššího řádu a známe časové konstanty, lze použít pro výpočet maximální odchylky vztah

$$\Delta_{D\max} = -wK \cdot (T_D + T_1 + T_2 + \dots + T_n) \quad (61)$$

T_D - dopravní zpoždění

Za předpokladu nekonečně velké tepelné vodivosti materiálu senzoru teploty a za předpokladu přenosu tepla z měřeného prostředí do senzoru pouze prouděním bude pro teplo dQ_1 přivedené do senzoru a teplo dQ_2 akumulované v senzoru platit tepelná bilance $dQ_1 = dQ_2$, platí

$$S \cdot \alpha \cdot (\vartheta_m - \vartheta_t) dt = m \cdot c \cdot d\vartheta_t \quad (62)$$

- S - plocha povrchu senzoru
- α - součinitel přestupu tepla
- ϑ_m - teplota měřeného prostředí
- ϑ_t - teplota senzoru
- t - čas
- m - hmotnost senzoru (ponořené části)
- c - měrná tepelná kapacita materiálu senzoru

Pro skokovou změnu teploty ϑ_0 na teplotu ϑ_m platí rovnice (54):

$$\vartheta_t - \vartheta_0 = (\vartheta_m - \vartheta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (63)$$

časová konstanta $\tau = \frac{m \cdot c}{S \cdot \alpha}$

Pokud je možné přechodovou charakteristiku aproximovat charakteristikou 1 řádu, potom je nutné místo α dosadit součinitel prostupu tepla k ($Wm^{-2}K^{-1}$).

Velikost dynamické chyby závisí na :

- zesílení
- časové konstantě τ
- průběhu měřené veličiny

7. Experimentální ověření

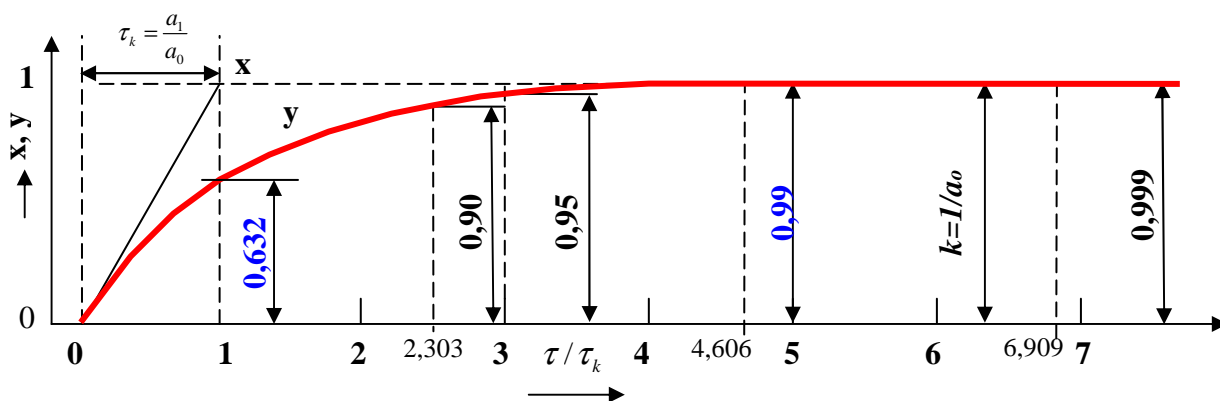
7.1 Výběr teploměru

Byl vybrán odporový kovový teploměr s označením **Pt 100** a termočlánek typu **K 2** a u obou teploměrů byly pomocí měření sestrojeny přechodové charakteristiky, na základě kterých mohl experiment pokračovat.

7.2 Postup práce

Bylo využito laboratorní pracoviště. Termostat s vodní lázní (*termostat U 10*) byl vyhřátý na 90 °C. Teplotu jsme kontrolovaly rtuťovým teploměrem. Dále byla přichystána studená voda o teplotě cca.18°C. Na multimetr *METEX - M3850* byl zapojen teploměr (termočlánek typu K a později odporový teploměr Pt-100) a multimetr byl připojen k počítači. Provedly jsme měření přechodových charakteristik, a zároveň i času kdy dosáhne teplota 63,2 %, což je čas pro určení **časové konstanty** τ , ta je velmi důležitým parametrem, protože rozhoduje o dosahovaném výsledku měření jak je patrné i z *Obr.32*, dynamická chyba poklesne pod 5% v jejím cca. trojnásobku a pod 1% se dostaneme až v čase cca 5τ .

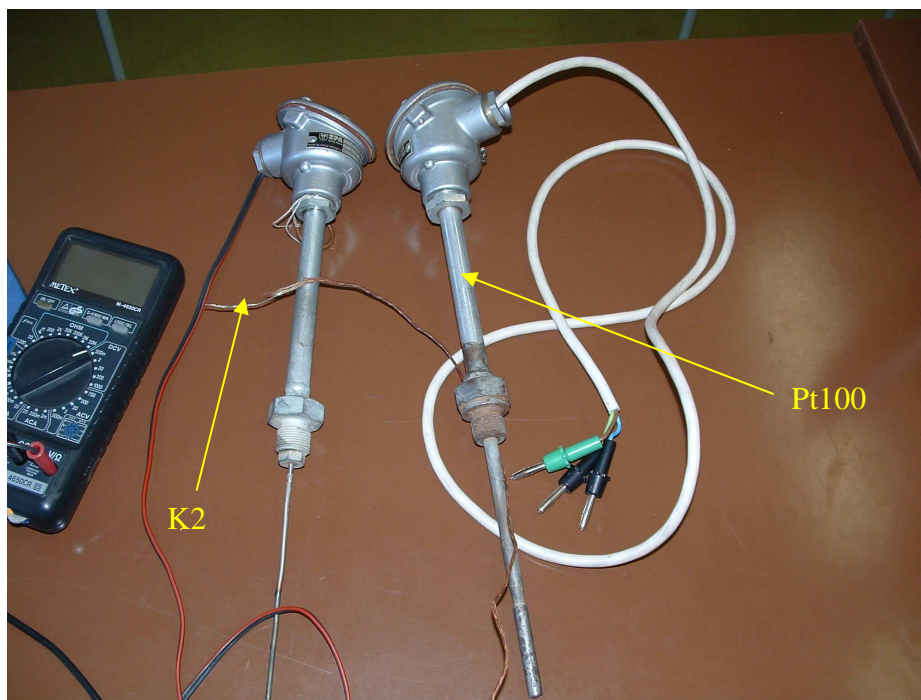
Složitější situace pak nastane pro přístroje, jejichž měřicí systém vytvoří model soustavy vyšších řádů. Pak přistupují další časové konstanty, které již vypovídají o dalších kmitavých průbězích a z toho vyplývá význam charakteristik frekvenčních, pomocí nichž můžeme zabránit tomu, aby se systém dostal do rezonanční oblasti apod.



Obr.32 Přechodová charakteristika



Obr.33 Pohled na laboratorní pracoviště



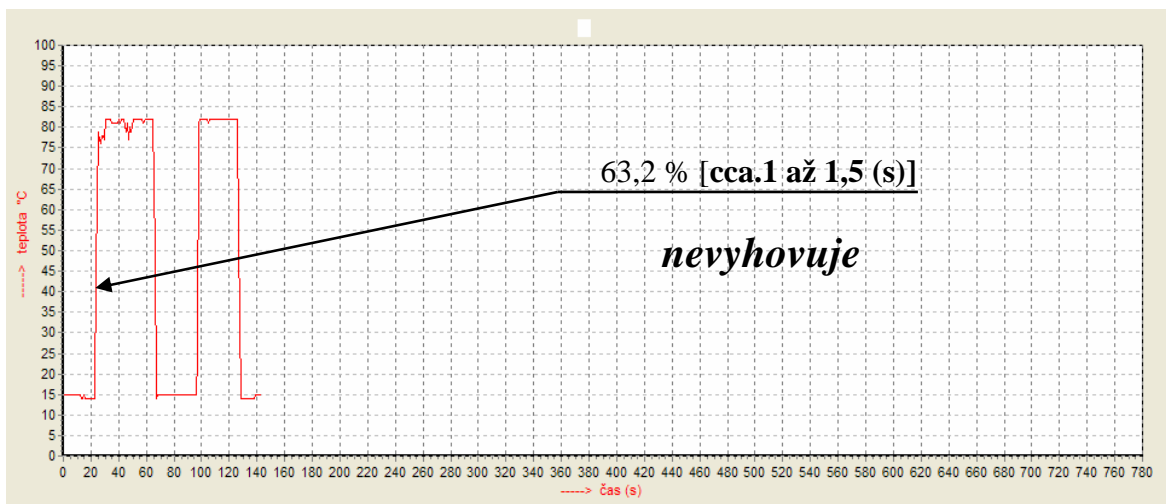
Obr.34 Teploměry Pt100 (na pravo) a K2 („holý drátek“)

Podmínky měření experimentu:

Laboratoř: Teplota – 24,5 °C
 Tlak - 1022 hPa
 Termočlánek K2

7.3 Termočlánek K2

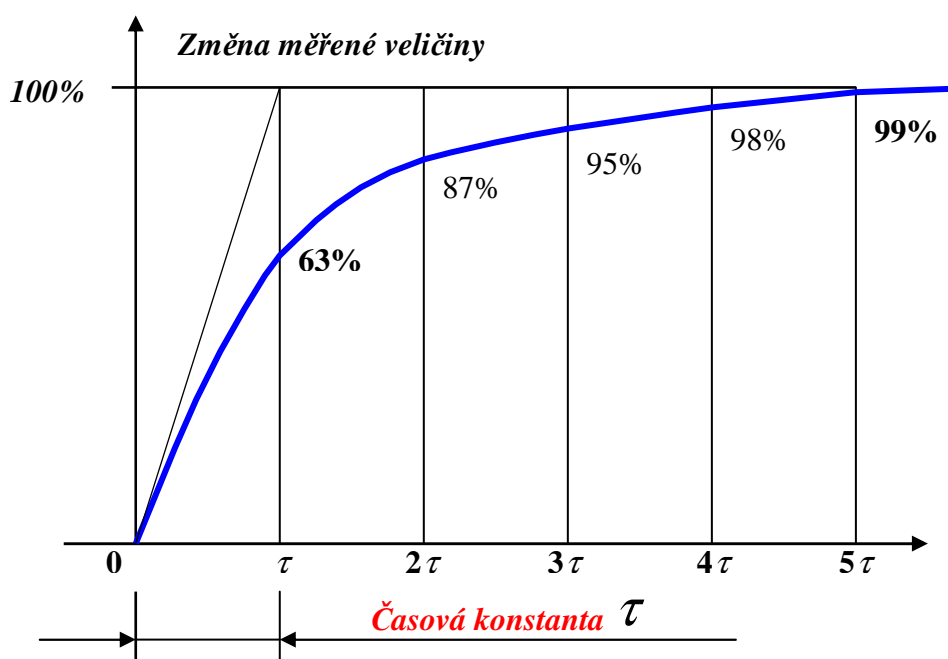
Nejdříve byl odměřen termočlánek typu K 2 (0 až 500 °C) pro porovnání. Z jeho přechodové charakteristiky je jasné, že má okamžitou reakci na změnu teploty. Jeho odezva je cca.1 až 1,5 (s) bez jímky (Obr.35). S jímkou je odezva cca.18 (s). Z těchto důvodů termočlánek experimentu **nevyhovuje**.



Obr.35 Přechodová charakteristika termočláneku K2

7.4 Odporový kovový teploměr Pt 100

Pro tuto práci byl vybrán **odporový kovový teploměr s označením Pt 100** (typ 2050, do 180 °C, od firmy ZPA EKOREG, [http://www.zpaul.cz]), je platinový a při 0 °C má odpor 100 Ω. V praxi je to jeden z nejvíce používaných teploměrů, a považuje se za průmyslový standard. Zaručuje vysokou přesnost a reprodukovatelnost měření. Další výhodou pro experiment je doba ustálení přechodové charakteristiky, která je u termoelektrických teploměrů (termočlánků) velmi rychlá, nevyhovující. Nevýhodou jsou nepříznivé dynamické vlastnosti (velká tepelná kapacita), jsou však **časově velmi stálé**. Proto je možné měřením a následným dopočtem dosáhnout s 99 % přesností (5τ) koncovou teplotu.



Obr.36 Průběh přechodové charakteristiky (časové konstanty)

Dynamické vlastnosti senzoru teploty lze popsat lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty

$$a_n \cdot Y^{(n)} + \dots + a_2 \cdot Y'' + a_1 \cdot Y' + a_0 Y = X \quad (53)$$

Ze vztahu (53) lze odvodit pro charakteristiku 1. řádu rovnici

$$\frac{Y(t)}{Y_{\max}} = \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (54)$$

$$\delta(t) = \frac{Y(t) - Y_{\max}}{Y_{\max}} = \frac{Y(t)}{Y_{\max}} - 1 \quad (55)$$

Ze vztahu (55) vyplývá že pro $\delta(t) < 1\%$ je nutné odčítat naměřenou veličinu v čase $t > 5T$.

Podmínky měření experimentu:

Laboratoř: Teplota – 24,5 °C
 Tlak - 1022 hPa
 Odporový kovový teploměr Pt 100 – Typ 2050 (ZPA EKOREG)

Pt100 bez jímky

Přechod ze 109 Ω na 126 Ω = 63 % = $(\tau) \cdot \left(1 - \frac{1}{e}\right) \approx 63\%$

Při našem měření:

86°C = 134 Ω, 18°C = 107,1 Ω ⇒

⇒ 134 - 107,1 = 26,9 · 0,632 = 17 + 107,1 = **124,1 Ω** ⇒ τ (63%)

T63,2% = $(T_{\infty} - T_0) \cdot 0,632 + T_0 = (86 - 18) \cdot 0,632 + 18 \doteq$ **60 °C**

Dle tabulek ITS-90:

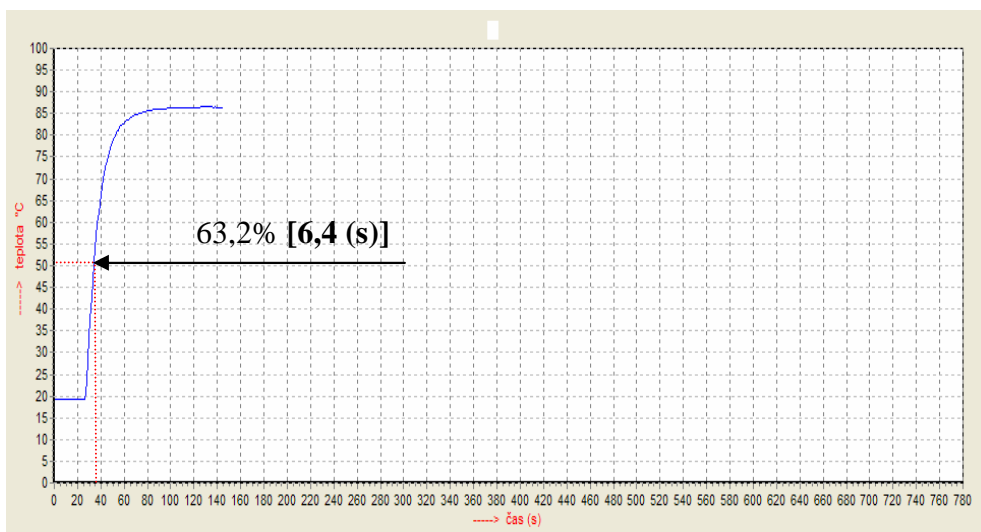
86°C = 133,19 Ω, 18°C = 107,02 Ω ⇒

⇒ 133,19 - 107,02 = 26,17 · 0,632 = 16,54 + 107,02 = **123,56 Ω**

To znamená že měření je mírně ovlivněné chybami měření (vedení, prostředí, měnící se teplota vody i termostatu...atd.), hlavně lidský faktor (při stopování kdy není možné přesné měření). Odpor elektrického vedení byl nastaven na 1,2 Ω.

Tab.4 měření časové konstanty stopkami

Měření číslo	τ (s)
1	6,3
2	6,2
3	6,3
4	6,5
5	6,7
průměr	6,4



Obr.37 Přechodová charakteristika Pt100 bez jímky

Tab.5 Naměřené hodnoty (průměrné) Pt100 bez jímky

Čas (s)	Odpor (Ω)	Teplota (°C)	Čas (s)	Odpor (Ω)	Teplota (°C)
1	107,1	18,12	31	133,9	85,65
2	107,2	18,37	32	134	85,9
3	107,7	19,64	33	134	85,9
4	111	28,03	34	134,1	86,15
5	114,8	37,66	35	134,1	86,15
6	118,1	46	36	134,1	86,15
7	121	53,31	37	134,1	86,15
8	123,3	59,1	38	134,2	86,4
9	125,2	63,88	39	134,2	86,4
10	126,7	67,64	40	134,2	86,4
11	128	70,9	41	134,2	86,4
12	129,1	73,66	42	134,2	86,4
13	130	75,91	43	134,2	86,4
14	130,7	77,66	44	134,2	86,4
15	131,2	78,91	45	134,2	86,4
16	131,7	80,16	46	134,2	86,4
17	132,1	81,16	47	134,2	86,4
18	132,4	81,91	48	134,2	86,4
19	132,7	82,66	49	134,2	86,4
20	132,9	83,16	50	134,2	86,4
21	133,1	83,66	51	134,2	86,4
22	133,3	84,16	52	134,2	86,4
23	133,4	84,41	53	134,2	86,4
24	133,5	84,66	54	134,2	86,4
25	133,6	84,91	55	134,2	86,4
26	133,7	85,16	56	134,2	86,4
27	133,7	85,16	57	134,2	86,4
28	133,8	85,4	58	134,3	86,65
29	133,9	85,65	59	134,3	86,65
30	133,9	85,65	60	134,3	86,65

Bylo provedeno několik měření a z nich vypočítány průměrné hodnoty, podle kterých se pokračovalo ve výpočtech. Rovněž byly kontrolovány výsledky měření podle tabulkových hodnot závislosti teploty na odporu ITS-90 (Tab.8).

Pt100 s jímkou

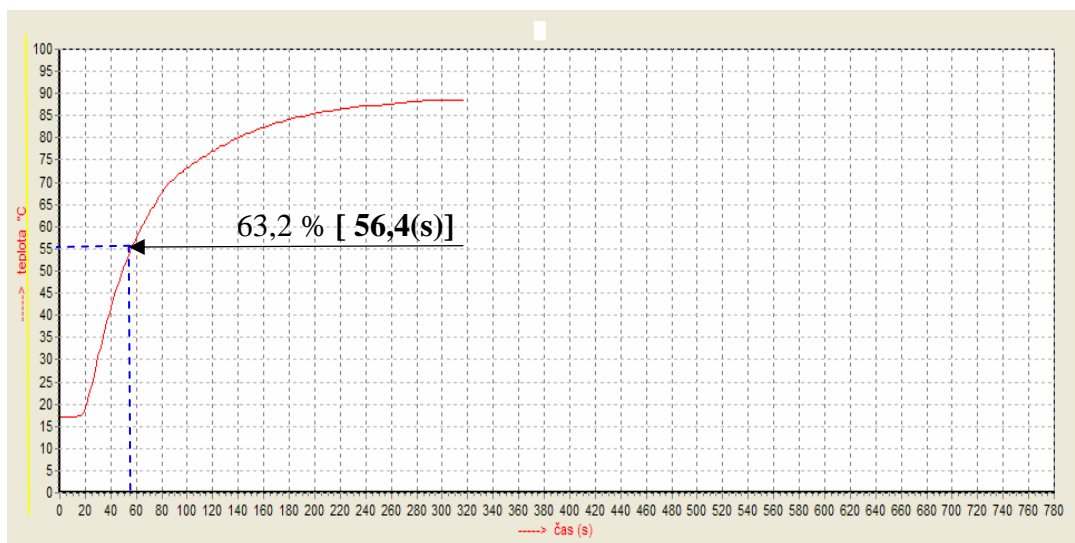
Časový průběh teploměru s jímkou je mnohem delší a proto je experiment pro tuto možnost zajímavější. V některých provozech může toto měření s jímkou trvat i několik minut, a tímto návrhem (dopočtem) by se zamezily nežádoucí poruchy v případě výpadku.



Obr.38 Jímka nerezová PN160 550°C 17248

Tab.6 měření časové konstanty stopkami

Měření číslo	τ (s)
1	56,2
2	56,9
3	55,7
4	56,5
5	56,7
průměr	56,4



Obr.39 Přechodová charakteristika Pt100 s jímkou

Tab.7 Odečtené hodnoty (průměrné) Pt100 s jímkou

Čas (s)	Odpor (Ω)	Teplota (°C)	Čas (s)	Odpor (Ω)	Teplota (°C)
1	107,1	18,12	178	133,1	83,72
7	107,3	18,42	187	133,3	84,22
16	107,8	19,80	196	133,4	84,52
25	110,9	27,97	205	133,5	84,78
34	114,8	38,10	214	133,6	84,92
43	118,1	45,80	223	133,7	85,15
54,6	120,9	53,15	232	133,7	85,15
61	123,2	59,20	241	133,8	85,45
70	125,1	63,77	250	133,9	85,67
79	126,6	67,58	259	133,9	85,67
88	128,1	71,20	268	133,9	85,67
97	129,2	73,80	277	134,0	85,90
106	130	76,05	282	134,0	85,90
115	130,8	77,68	291	134,1	86,25
124	131,3	78,98	300	134,1	86,25
133	131,8	80,20	309	134,1	86,25
142	132,2	81,32	318	134,1	86,25
151	132,5	82,05	327	134,2	86,4
160	132,6	82,59	336	134,2	86,4
169	132,9	83,15	345	134,2	86,4

Bylo provedeno několik měření a z nich byly vypočítány průměrné hodnoty podle kterých se pokračovalo ve výpočtech. Čas v tabulce je rozdělen po 9s., to je takový čas, aby rozdělení odpovídalo teplotám naměřeným bez jímky.

Tab.8 Závislost teploty na odporu ITS-90 (ČSN IEC 751).
Výběr hodnot potřebných k experimentu.

RTD Temperature vs. Resistance Table

For European Curve, Alpha = .00385, ITS-90 1° Celsius Increments

°C	Ohms	Diff.	°C	Ohms	Diff.	°C	Ohms	Diff.
±0	100.00	0.39	41	115.93	0.39	82	131.67	0.38
+1	100.39	0.39	42	116.31	0.38	83	132.05	0.38
2	100.78	0.39	43	116.70	0.39	84	132.43	0.38
3	101.17	0.39	44	117.08	0.38	85	132.81	0.38
4	101.56	0.39	45	117.47	0.39	86	133.19	0.38
5	101.95	0.39	46	117.85	0.38	87	133.57	0.38
6	102.34	0.39	47	118.24	0.39	88	133.95	0.38
7	102.73	0.39	48	118.62	0.38	89	134.33	0.38
8	103.12	0.39	49	119.01	0.39	90	134.71	0.38
9	103.51	0.39	50	119.40	0.39	91	135.09	0.38
10	103.90	0.39	51	119.78	0.38	92	135.47	0.38
11	104.29	0.39	52	120.16	0.38	93	135.85	0.38
12	104.68	0.39	53	120.55	0.39	94	136.23	0.38
13	105.07	0.39	54	120.93	0.38	95	136.61	0.38
14	105.46	0.39	55	121.32	0.39	96	136.99	0.38
15	105.85	0.39	56	121.70	0.38	97	137.37	0.38
16	106.24	0.39	57	122.09	0.39	98	137.75	0.38
17	106.63	0.39	58	122.47	0.38	99	138.13	0.38
18	107.02	0.39	59	122.86	0.39	100	138.51	0.38
19	107.40	0.38	60	123.24	0.38	101	138.89	0.38
20	107.79	0.39	61	123.62	0.38	102	139.27	0.38
21	108.18	0.39	62	124.01	0.39	103	139.65	0.38
22	108.57	0.39	63	124.39	0.38	104	140.03	0.38
23	108.96	0.39	64	124.77	0.38	105	140.39	0.38
24	109.35	0.39	65	125.17	0.40	106	140.77	0.38
25	109.73	0.38	66	125.55	0.38	107	141.15	0.38
26	110.12	0.39	67	125.93	0.38	108	141.53	0.38
27	110.51	0.39	68	126.32	0.39	109	141.91	0.38
28	110.90	0.39	69	126.70	0.38	110	142.29	0.38
29	111.28	0.38	70	127.08	0.38	111	142.66	0.37
30	111.67	0.39	71	127.46	0.38	112	143.04	0.38
31	112.06	0.39	72	127.85	0.39	113	143.42	0.38
32	112.45	0.39	73	128.23	0.38	114	143.80	0.38
33	112.83	0.38	74	128.61	0.38	115	144.18	0.38
34	113.22	0.39	75	128.99	0.38	116	144.56	0.38
35	113.61	0.39	76	129.38	0.39	117	144.94	0.38
36	113.99	0.38	77	129.76	0.38	118	145.32	0.38
37	114.38	0.39	78	130.14	0.38	119	145.69	0.37
38	114.77	0.39	79	130.52	0.38			
39	115.15	0.38	80	130.90	0.38			
40	115.54	0.39	81	131.28	0.38			

7.5 Aproximační metoda výpočtu teploty

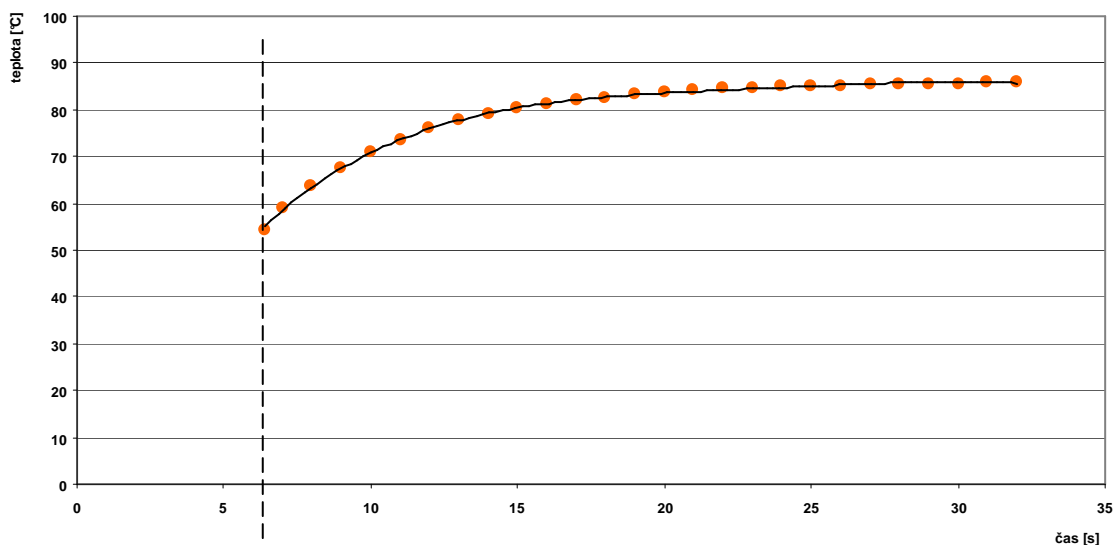
Prostředí pro naprogramování automatické korekce jsou různá, (chybějí standardizace komunikačních protokolů senzorů různých výrobců) proto je použit univerzální, jednodušší nástroj, který zachytí algoritmus (Aproximační metodu) a pro názornost je zakomponován do excelovského dokumentu pomocí Visual Basic. Programové prostředí pro aplikace MS – Office.

Tab.9 Mikrosoft Excel – aproximace 1

Aproximační metoda výpočtu teploty					
PT 100 bez jímky			PT 100 s jímkou		
výchozí teplota 18°C			výchozí teplota 18°C		
τ - 0,63 %	-	čas - 6,4 s	τ - 0,63 %	-	čas - 56,4 s
5 τ - 0,99%	-	čas - 32 s	5 τ - 0,99%	-	čas - 282 s
Teplota při 63%		54,3 °C	Teplota při 63%		54,3 °C
Teplota při 99%		85,9 °C	Teplota při 99%		85,9 °C
Aproximované hodnoty			Aproximované hodnoty		
Čas		Teplota	Čas		Teplota
[s]		[°C]	[s]		[°C]
6,4		54,30	56,4		54,30
7		59,10	61		59,20
8		63,88	70		63,77
9		67,64	79		67,58
10		70,90	88		71,20
11		73,66	97		73,80
12		75,91	106		76,05
13		77,66	115		77,68
14		78,91	124		78,98
15		80,16	133		80,20
16		81,16	142		81,32
17		81,91	151		82,05
18		82,66	160		82,59
19		83,16	169		83,15
20		83,66	178		83,72
21		84,16	187		84,22
22		84,41	196		84,52
23		84,66	205		84,78
24		84,91	214		84,92
25		85,16	223		85,15
26		85,16	232		85,15
27		85,40	241		85,45
28		85,65	250		85,67
29		85,65	259		85,67
30		85,65	268		85,67
31		85,90	277		85,90
32		85,90	282		85,90

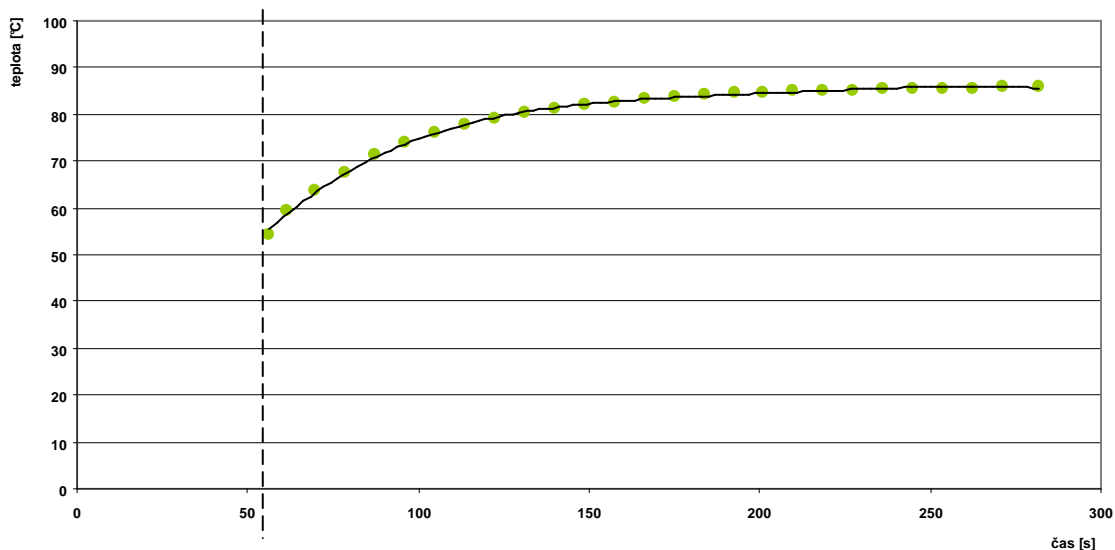
Výstupy (grafy a výpočet konečné teploty) jsou použity v práci.

Přechodová charakteristika PT100 bez jímky



Obr.40 Přechod z 63,2% po ustálení 99% Pt100 bez jímky

Přechodová charakteristika PT100 s jímkou



Obr.41 Přechod z 63,2% po ustálení 99% Pt100 s jímkou

Program funguje tak, že zadám do buňky „teplota při 63 %“ teplotu a ta se automaticky dopočítá na teplotu při 99 %, což je hodnota ustálená. Ukázka je v příloze (Aproximace 1).

Tab.10 Mikrosoft Excel – aproximace 2, znovu naměřené a průměrné hodnoty

Aproximační metoda výpočtu teploty					
PT 100 bez jímky			PT 100 s jímkou		
výchozí teplota 18°C			výchozí teplota 18°C		
τ - 0,63 %	-	čas - 8 s	τ - 0,63 %	-	62 s
5 τ - 0,99%	-	čas - 40 s	5 τ - 0,99%	-	čas - 310 s
Teplota při 63%		59,1 °C	Teplota při 63%		59,1 °C
Teplota při 99%		86,4 °C	Teplota při 99%		86,4 °C
Čas		Teplota	Čas		Teplota
[s]		[°C]	[s]		[°C]
8		59,10	62		59,10
9		63,88	70		63,77
10		67,64	78		67,58
11		70,90	86		71,20
12		73,66	94		73,80
13		75,91	102		76,05
14		77,66	110		77,68
15		78,91	118		78,98
16		80,16	126		80,20
17		81,16	134		81,32
18		81,91	142		82,05
19		82,66	150		82,59
20		83,16	158		83,15
21		83,66	166		83,72
22		84,16	174		84,22
23		84,41	182		84,52
24		84,66	190		84,78
25		84,91	198		84,92
26		85,16	206		85,15
27		85,16	214		85,15
28		85,40	222		85,45
29		85,65	230		85,67
30		85,65	238		85,67
31		85,65	246		85,67
32		85,90	254		85,90
33		85,90	262		85,90
34		86,15	270		86,25
35		86,15	278		86,25
36		86,15	286		86,25
37		86,15	294		86,25
38		86,40	302		86,40
39		86,40	310		86,40
40		86,40	318		86,40

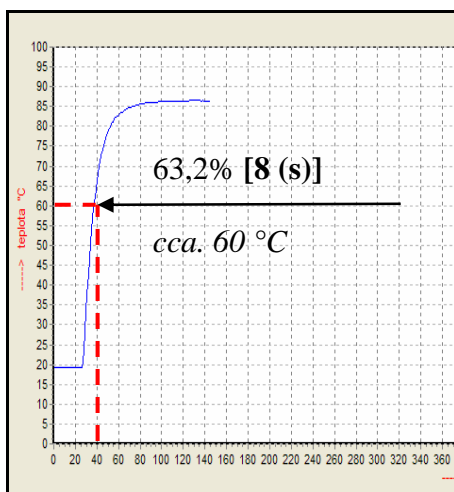
Čas v tabulce je rozdělen po 8s., to je takový čas, aby rozdělení odpovídalo teplotám naměřeným bez jímky.

Tab.11 měření časové konstanty
Bez jímky

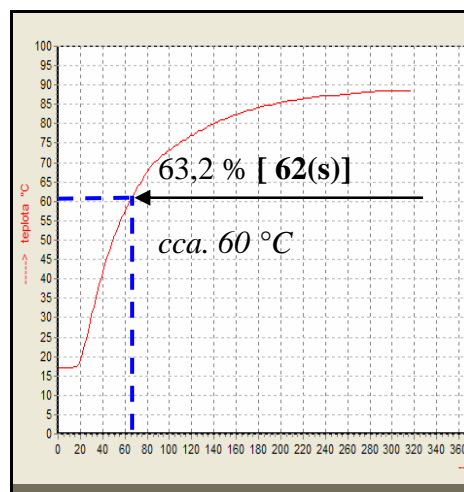
Měření číslo	τ (s)
1	8,2
2	8,1
3	8,3
4	8,2
5	8,1
6	7,8
7	7,5
průměr	8,02

Tab.12 měření časové konstanty
S jímkou

Měření číslo	τ (s)
1	61,2
2	61,8
3	62,2
4	62,5
5	63,1
6	61,7
7	61,5
průměr	62,0



Obr.42 Přebodová charakteristika
Pt100 bez jímky

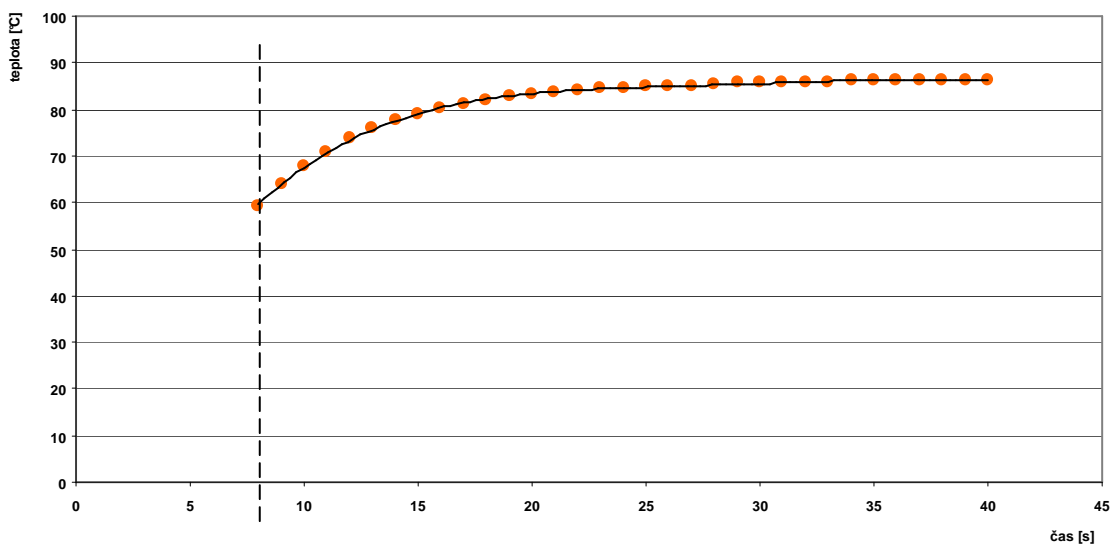


Obr.43 Přebodová charakteristika
Pt100 s jímkou

$$T_{63,2\%} = (T_{\infty} - T_0) \cdot 0,632 + T_0 = (86 - 18) \cdot 0,632 + 18 \doteq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

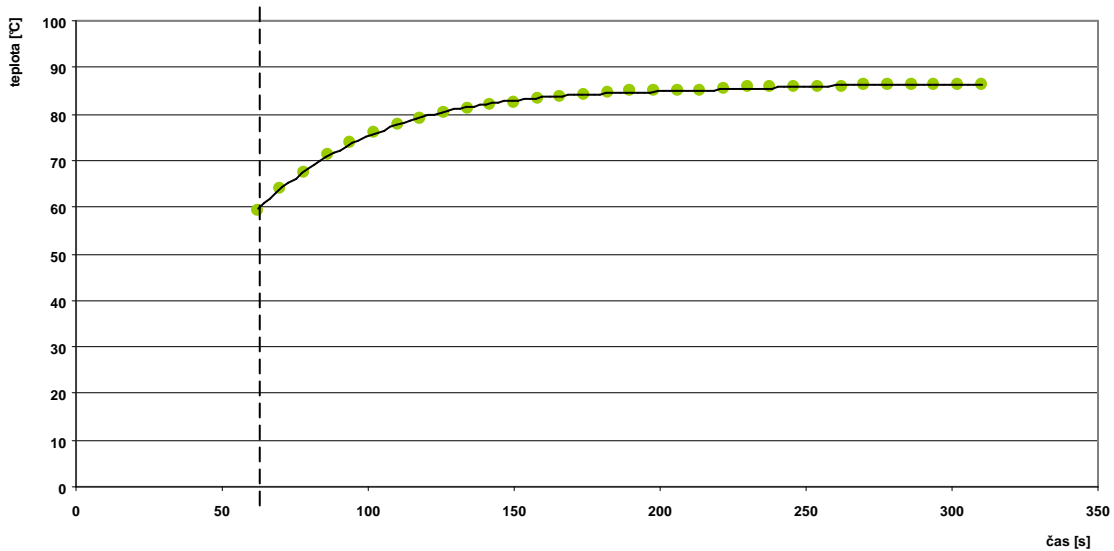
Tato vypočítaná hodnota se již blíží časové konstantě $\tau = 8\text{s}$. a $\tau = 62\text{s}$.
Po prozkoumání a zjištění nesrovnalostí byla provedena nová měření s důrazem na přesnější odečítání časové konstanty τ , a kontrola hodnot podle tabulky závislosti teploty na odporu ITS-90 (Tab.8) a hodnot z multimetru. Toto přineslo kvalitnější výsledky.

Přechodová charakteristika PT100 bez jímky



Obr.44 Přechod z 63,2% po ustálení 99% Pt100 bez jímky

Přechodová charakteristika PT100 s jímkou



Obr.45 Přechod z 63,2% po ustálení 99% Pt100 s jímkou

7.6 Nastavení nového teploměru Pt100 dle časové konstanty

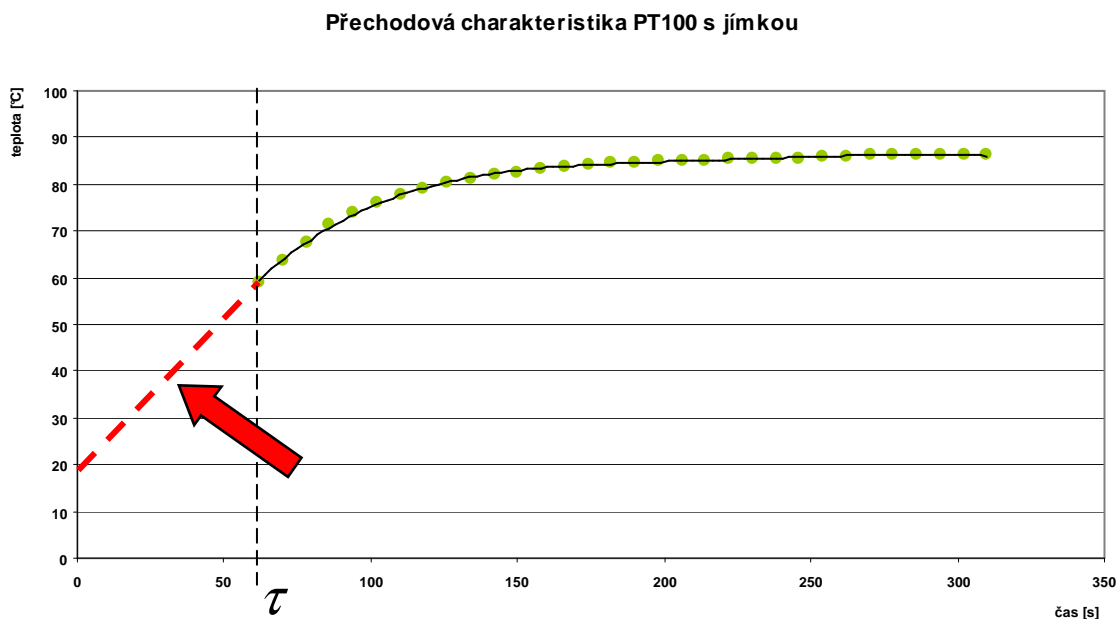
V této aproximaci jsme řešily problém možného poškození Pt100 a možnosti nahrazení novým teploměrem. Způsobem porovnání s již použitým teploměrem Pt100 dle naměřených hodnot (Tab.5). Po identifikaci teploměru (zjištěním časové konstanty τ 63%), a dosazením do programu. Tento experiment předpokládá že se časová konstanta ověří sérií měření před aplikací, nebo se bude věřit orientační hodnotě z firemních podkladů. Stačí jen zadat naměřenou (nebo katalogovou) časovou konstantu a program dopočítá přibližný časový průběh teploměru. Ukázka je v příloze (Aproximace 2, List).

Tab.13 Dopčet času od časové konstanty τ

Zadat čas při 63%:			
8,0	s		
PT 100			
výchozí teplota 18°C			
τ - 0,63 %		8,00	s
5 τ - 0,99%		40,00	s
Teplota při 63%		59,1	°C
Teplota při 99%		86,4	°C
Čas	Teplota		
[s]	[°C]		
8,00	59,10		
9,00	63,88		
10,00	67,64		
11,00	70,90		
12,00	73,66		
13,00	75,91		
14,00	77,66		
15,00	78,91		
16,00	80,16		
17,00	81,16		
18,00	81,91		
19,00	82,66		
20,00	83,16		
21,00	83,66		
22,00	84,16		
23,00	84,41		
24,00	84,66		
25,00	84,91		
26,00	85,16		
27,00	85,16		
28,00	85,40		
29,00	85,65		
30,00	85,65		
31,00	85,65		
32,00	85,90		
33,00	85,90		
34,00	86,15		
35,00	86,15		
36,00	86,15		
37,00	86,15		
38,00	86,40		

7.7 Další možnost jak zmenšit dopad dynamických chyb

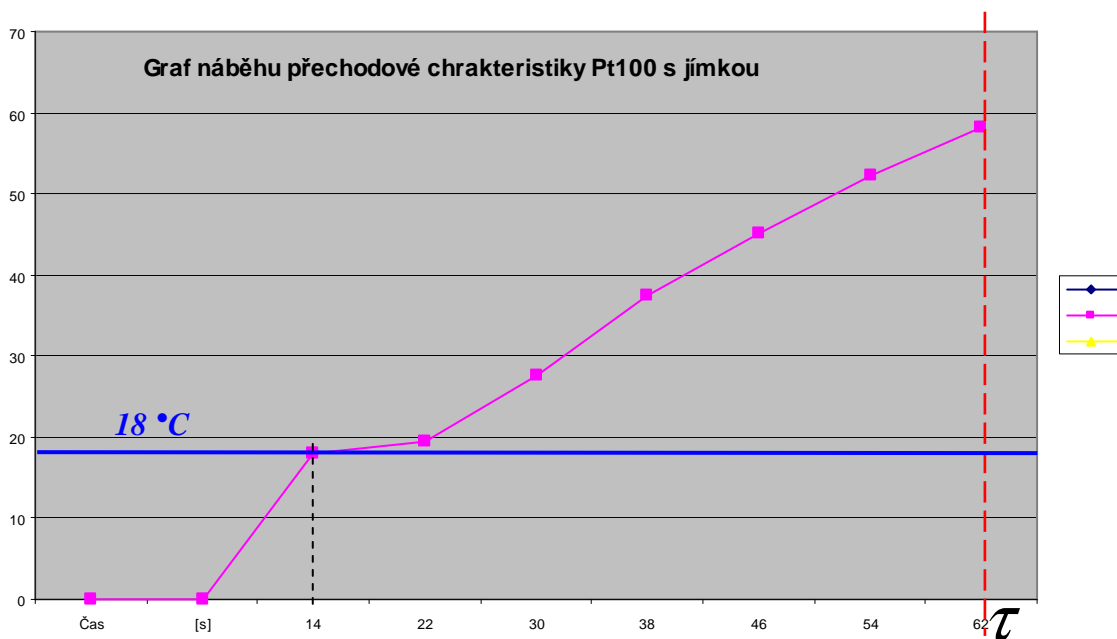
Dále by byla zajímavá konstrukce (*aproximace, linearizace*), nebo proložení několika počátečních hodnot (bodů průběhu teploty) *přímkou* a následným dopočtem (podobným jako aproximační metoda výpočtu teploty), v první části měření (náběhu) do τ 63% (*obr 46*), a následným dopočtem (doběhu) od τ 63% do 5τ 99% dle aproximační metody výpočtu teploty (*Obr.45*). Tímto řešením by bylo možné zlepšit dynamiku teploměru Pt100.



Obr.46 Možné řešení dopočtu do τ a přechod z τ po ustálení 99%, ukázka na grafu Pt100 s jímkou

Tab.14 Dopočet hodnot do τ (63%).

Dopočet do τ			
Zadat teplotu při 14s:			
18,1	°C		
PT 100 s jímkou			
výchozí teplota 18°C			
τ - 0,63 %		62	s
Teplota při 14s		18,1	°C
Čas		Teplota	
[s]		[°C]	
14		18,10	
22		19,46	
30		27,48	
38		37,44	
46		45,00	
54		52,23	
62		58,07	



Obr.47 Náběh přechodové charakteristiky na τ (63,2%)

Tato část je jen ukázka možného řešení odstranění dynamické chyby při náběhu teploměru Pt100 do časové konstanty τ (63,2%). Není však ověřena ani nemáme řádně odměřené hodnoty jak je vidět na grafu (Obr.47) jsou jisté nesrovnalosti, které by bylo třeba ověřit. Pro větší přesnost by bylo nutné provést více experimentálních měření a porovnání s tabulkovými hodnotami ITS-90 (ČSN IEC 751).

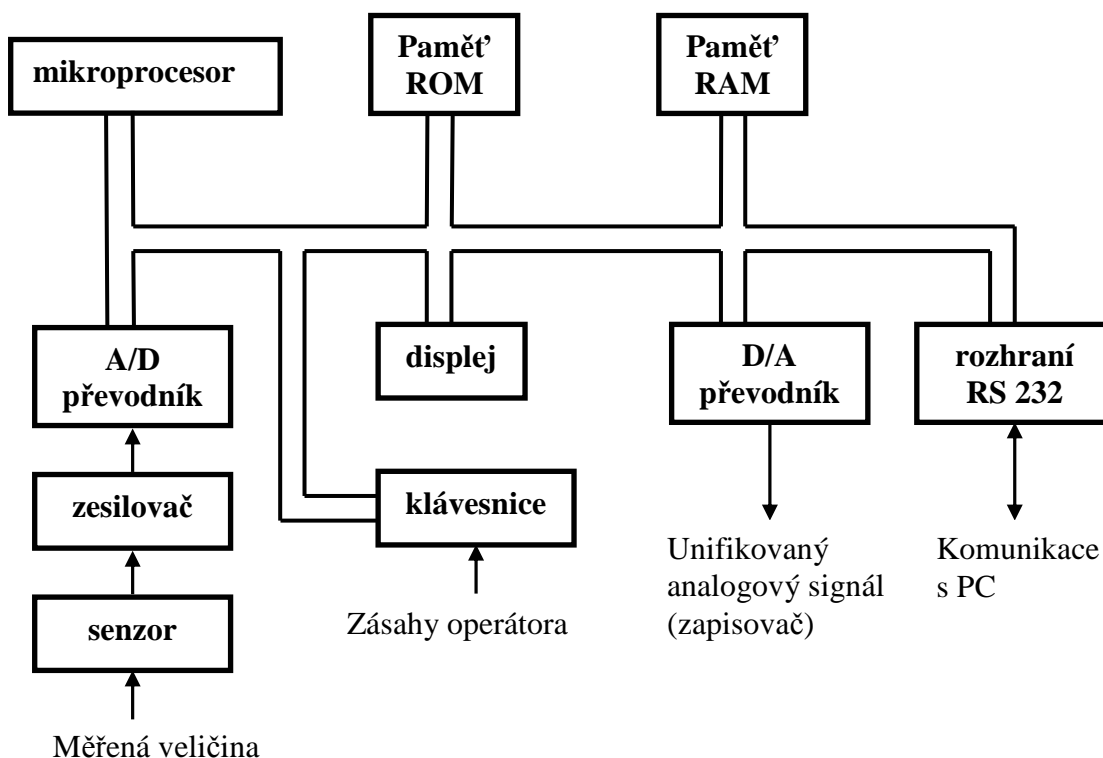
Program funguje tak, že zadám do buňky „zadat teplotu při 14s.“ a ta se automaticky dopočítá na teplotu τ (63,2%), což je hodnota časové konstanty. Ukázka je v příloze (Aproximace 2, List 2).

8. Model automatické korekce

8.1 Vestavěný systém (Embedded systém, zabudovaný systém)

Je jednoúčelový systém, ve kterém je řídicí počítač zcela zabudován do zařízení, které ovládá. Jsou většinou jednoúčelové, určené pro předem definované činnosti. Protože systém je určen pro konkrétní účel, mohou tvůrci systému při návrhu optimalizovat pro konkrétní aplikaci a tak snížit cenu výrobku. Embedded by byl výhodný i pro aplikaci našeho experimentu.

Měřicí přístroj řízený mikroprocesorem je v dnešní době již standardem, bez kterého si již nedovedeme představit náš život.



Obr.48 Měřicí přístroj řízený mikroprocesorem

8.2 Mikroprocesory

V současné době je na našem trhu obrovské množství procesorů založených na jádře procesoru 8051 (8052), které vyrábí firma Intel, Analog Device, Texas Instruments, Philips, Siemens a Atmel. Mikroprocesory řady 8051 získaly mezi vývojáři značnou popularitu, a ještě v současné době se řada výrobců orientuje na výrobu mikrořadičů s jádrem procesoru 8051. Toto jádro bývá rozšířeno o další periferie jako jsou:

- paměť programu o velikosti 2 kB až 32 kB
- paměť EEPROM pro uchování konstant, rozšířená vnitřní paměť RAM na 256B,
- až 24-bitový AD převodník s několika-kanálovým analogovým multiplexerem,
- rozšířené vstupně/výstupní brány,
- dvoudrátová přístrojová sběrnice I^2C

Vyrábějí se procesory od hodinového kmitočtu 12 MHz až 33 MHz. Některé firmy se orientují na procesory s rozšířenými operacemi nebo s odlišným vnitřním časováním, který má až trojnásobný výkon. Základem všech těchto procesorů je jádro procesoru 8051.

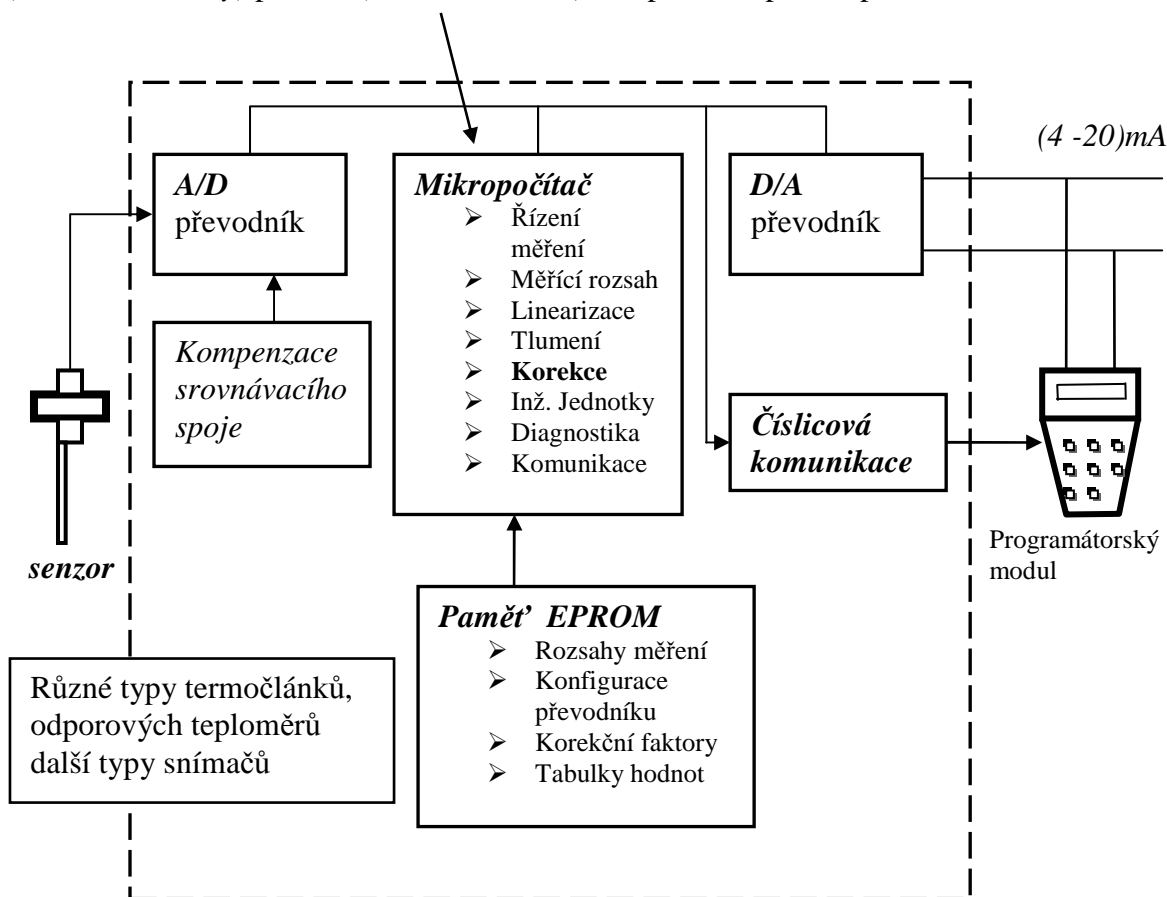
Do tohoto mikroprocesoru je možné naprogramovat podmínky pro dopočet teploty a tím zkrácení času (doběhu teploměru na ustálenou hodnotu 99%), což zmírní působení dynamické chyby. Je možné tento program naprogramovat i do inteligentních převodníků teploty.

8.3 Inteligentní převodníky teploty

[12]

Výstupní změnu odporu u odporových senzorů nelze v průmyslových aplikacích přímo použít pro vyhodnocení měřené teploty. Je k tomu zapotřebí převodník, který změnu odporu senzoru převede na unifikovaný proudový nebo napěťový výstupní signál. Převodník musí signál ze senzoru zesílit a vhodně upravit. Používají se inteligentní (smart) převodníky vybavené jedním i několika mikroprocesorů, které vedle úpravy vstupního signálu (zesílení, linearizace charakteristiky, přizpůsobení rozsahu aj.) zajišťují i automatickou kalibraci, filtraci, digitální zobrazení, hlídání nastavených mezí a obousměrnou komunikaci s počítačem nebo nadřazeným řídicím systémem. Inteligentní převodníky jsou obvykle univerzální a lze je přizpůsobit nejenom pro různé typy termočlánků a odporových teploměrů, ale i pro připojení odporových vysílačů nebo různých snímačů s napěťovým či proudovým výstupem. Často se také označují jako programovatelné převodníky. Funkce a základní části typického inteligentního převodníku jsou zřejmé z blokového schématu na *Obr.49*.

Do mikropočítače je možné naprogramovat program, který je schopen po dosažení τ 63% (časové konstanty) přerušit (bude-li to nutné) a dopočítat teplotu s přesností na „1%“.



Obr.49 Schéma inteligentního převodníku teploty

Pro uživatele je velmi důležitá a příjemná obousměrná komunikace mezi inteligentním převodníkem teploty a nadřazeným počítačem nebo řídicím systémem, která výrazně zvyšuje komfort obsluhy. Z počítače lze vhodným programem pohodlně zkonfigurovat univerzálně programovatelný převodník pro konkrétní aplikaci, tj. zvolit odpovídající vstup (odporový senzor apod.), nastavit měřicí rozsah, zajistit kalibraci. Počítač může číst konfigurační data naprogramovaného převodníku, uložit je do paměti a použít pro naprogramování dalších převodníků. Samozřejmě může počítač ukládat naměřené hodnoty do paměti, podle vhodného programu zpracovat a vyhodnotit.

Inteligentní převodníky různých výrobců se liší konkrétním uspořádáním obvodového zapojení i doplňujícím vybavením (např. vestavěný regulátor, paměť měřených hodnot, nastavení mezí, automatická kontrola funkce, kalibrace a zároveň program pro ochranu před poruchou.) Přes poměrně složité zapojení jsou inteligentní převodníky velice kompaktní přístroje s malými rozměry. Inteligentní převodníky teploty jsou určeny pro přímé nasazení ve výrobních procesech a tomu odpovídá i jejich provedení buď pro montáž přímo do hlavičky teploměru nebo do panelu či na montážní lištu.

Inteligentní senzor má oproti klasickým tyto **výhody**:

- Omezení a kompenzace rušivých vlivů pomocí číslicového přenosu informace. Přechodem na číslicový signál lze radikálně zvýšit odstup signál/šum.
- Kontrola integrity údajů (např. vyloučením z fyzikálního hlediska rozporných výsledků). K verifikaci dat se využívá informací z vestavěných testovacích senzorů, jejichž výstupy mohou být využity i pro diagnostiku externími prostředky.
- Dálková diagnostika senzorů pomocí obousměrné komunikace po sběrnících. Dálková diagnostika usnadňuje rozšíření Inteligentních senzorů do automobilového a leteckého průmyslu - diagnostika senzorů na těžko přístupných místech.
- Možnost zapojení do sítě. Umožněním adresace senzorů lze jednotlivé senzory centrálně nastavovat a testovat.
- Možnost decentralizovaného zpracování naměřených hodnot. V rozsáhlých měřicích systémech dochází k výraznému snížení zátěže centrálního subsystému, uvolněný výkon centra lze využít na jiné účely.

Nevýhodou inteligentních senzorů je jejich cena, omezené použití v těžkých podmínkách (agresivní prostředí, vysoké teploty, magnetické pole...) a chybějící standardizace komunikačních protokolů senzorů různých výrobců.

8.4 Simulace

Dále je možná simulace v **LabVIEW**, pro náročnou analýzu a pro spolehlivý běh aplikací reálného času. Poslední verze LabVIEW je vybavena novými funkcemi pro práci s „multicore“ procesory a dalšími funkcemi pro zjednodušení vývoje aplikací, jako je např. nový Statechart modul pro tvorbu stavových diagramů.

Sběr dat a řízení přístrojů – rychlé měření s okamžitými výsledky

Automatické testování – vytvořte výkonný automatizovaný testovací systém

Průmyslová měření – změřte cokoliv a připojte se k jakémukoliv PLC

Akademická oblast – rychlý návrh a ověření komplexních algoritmů

Řízení strojů – vývoj komplexních a rychlých aplikací pro řízení strojů

Návrh embedded systémů – návrh programů pro embedded hardware

Dalším nástrojem pro simulace a modelování dynamických systémů, Model-Based Design je **MATLAB Simulink**. Simulink je nadstavba MATLABu pro simulaci a modelování dynamických systémů, který využívá algoritmy MATLABu pro numerické řešení nelineárních diferenciálních rovnic. Poskytuje uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

9. ZÁVĚR

Předmětem této práce bylo zaměřit se na vlivy, působící negativně na přesnost měření teploty. Byl uveden přehled těchto chyb. Tato část je převážně teoretická a odpovídá rozsahu dané problematiky, s tím, že jsme se zaměřily na chyby dynamické u odporového kovového teploměru Pt100 (s jímkou a bez ní).

V praxi je to jeden z nejvíce používaných teploměrů a považuje se za průmyslový standard. Časový průběh teploměru je mnohem delší, a proto byl experiment pro tuto možnost zajímavější. V některých provozech může toto měření teploměry Pt 100 s jímkou trvat i několik minut. Jsou však velmi přesné, ale charakteristické svými dlouhými časovými konstantami, na rozdíl např. od termočlánků. Proto je možné měřením a následným dopočtem dosáhnout s 99 % přesností (5τ) koncovou teplotu. Tímto návrhem (dopočtem) by se zamezily nežádoucí poruchy v případě výpadku, a nebo rychlejší určování konečné (ustálené) teploty. Měření sice bylo ovlivněno negativním vlivem lidského faktoru, například nepřesné měření časové konstanty, nepřesné odečítání hodnot z teploměrů atd. I přesto je experiment možné realizovat, samozřejmě pro odporový teploměr Pt100. Bylo by však zapotřebí provést více měření a odstranění chyb vzniklých při měření.

Model automatické korekce závisí na výběru z velkého množství převodníků teploty různých výrobců. Liší se konkrétním uspořádáním obvodového zapojení a různými programovacími metodami. Nakonec bylo upuštěno od realizace HW – vestavěný přístroj nebyl pořízen. Orientovat se některými z nabídky „jednočipů“ (PIC, Motorola, Intel, Analog Device, Texas Instruments, Philips, Siemens, Atmel. ...) bylo z časových důvodů rovněž zavrženo.

Řešení pro měření s klasickým PC jako modelová situace pro potvrzení použitelnosti v této fázi postačuje. Proto byl zvolen pro svoji jistou univerzálnost jednodušší nástroj, který zachytil korekci a pro názornost je zakomponován do excelovského dokumentu pomocí Visual Basic. Výstupy jsou použity v práci.

Pro další použití by bylo zapotřebí ještě dodělat i variantu s automatickou identifikací teploměru (zjištěním časové konstanty τ). Tento experiment předpokládá, že se časová konstanta ověří sérií měření před aplikací, nebo se bude věřit orientační hodnotě z firemních podkladů. Z uvedených grafů je rovněž vidno, že doběhy z τ (63,2%) jsou velmi podobné i když časově různé.

Zajímavé by bylo další řešení náběhu teploměru na hodnotu τ (63%), což by ještě podstatněji ovlivnilo dynamickou charakteristiku. Provedli jsme malý nástin tohoto problému, není však jisté zda by byl funkční.

Tato práce je možným úkolem pro vývojáře teploměrů Pt100.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ďaďo,S.,Kreidl,M.: Senzory a měřicí obvody, ČVUT, Praha 1999.
- [2] Zehnula, K.: Převodníky fyzikálních veličin, FE VUT Brno 1990.
- [3] CHUDÝ, Vladimír; Palenčár, Rudolf; Kureková, Eva; Halaj, Martin. Meranie technických veličín : 1.vydání Bratislava:Vydavatelstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
- [4] JENČÍK, J; Volf, J.; Technická měření : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
- [5] KREIDL, M.; Měření teploty – Senzory a měřicí obvody : 1. vydání Praha : BEN – technická literatura, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [6] Normy IEC-751 (IEC-ČSN 751), DIN 43760, ITS 90

WWW stránka

- [7] Měřicí technika, senzory a jejich použití
Ing. Stanislav Scholle, CSc., scholle_bs@volny.cz, (ČD a.s., TÚČD - Technická ústředna ČD) [cit. 20.12.2008] dostupné z
<http://genesis.upce.cz/priloha/fcht-krpvt-literatura-mt>
- [8] Teplota a její měření, Datum: 6.3.2006 Autor: Ing. Luděk Mareš
[cit. 20.12.2008] dostupné z
<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3115>
- [9] Odporové teploměry. Omegaeng.cz
[cit. 17.1.2009] dostupné z
<http://www.omegaeng.cz/prodinfo/RTD.html>
- [10] Český metrologický institut
[cit. 8.4.2009] dostupné z
<http://www.cmi.cz/>
- [11] Termistor
[cit. 8.4.2009] dostupné z
<http://images.google.cz/images?hl=cs&q=termistor&lr=&um=1&ie=UTF->
- [12] MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA Doc. Ing. Karel Kadlec, CSc.Ústav fyziky a měřicí techniky, Doc. Ing. Miloš Kmínek, CSc.Ústav počítačové a řídicí techniky, ver. 2.01, únor 2005 [cit. 25.4.2009] dostupné z
<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k43-tepl.htm>
- [13] hw.cz [cit. 25.4.2009] dostupné z <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1095-Mereni-teploty kovove-odporove-senzory-teploty.html>

PŘÍLOHY

Součástí diplomové práce je CD obsahující:

- Diplomové práce ve formátu Adobe Acrobat [PDF]
- Diplomové práce ve formátu MS Word [DOC]
- Aproximační metoda výpočtu teploty [Microsoft Excel]
 - Aproximace 1
 - Aproximace 2