

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh laboratorního systému kalibrace teplotních  
senzorů**

## **Abstrakt**

Práce je zaměřena na vytvoření postupu kalibrace termistorů s využitím kalibrační lázně se silikonovým olejem a vícekanálového digitálního multimetru. Před měřením dat byly vytvořeny měřicí profily podrobné statistickému hodnocení za účelem výběru nejlepšího možného profilu pro kalibraci. Při vyhodnocování změřených dat byla pro regresi kalibračních křivek využita obecně používaná Steinhart-Hartova rovnice. Dalším výstupem této práce bylo stanovení postupu výběru referenčních teplotních senzorů a vytvoření jejich přehledného tabulkového seznamu. Zahrnuty byly nabízené referenční senzory třech největších společností zabývajících se etalonáží (Fluke, AccuMac a Isotech). Cílem práce bylo i vyhodnocení dílčích nejistot a výpočet nejistoty celkového kalibračního systému za účelem správného posouzení výsledků, ale i pro přehled nedostatků, které v kalibračním procesu mohou být zlepšeny.

## **Klíčová slova**

Termistory, kalibrace, odporové teplotní senzory, kalibrační křivka, kalibrační postup, nejistoty měření, přesnost měření, metrologie, referenční senzor, etalon, kalibrační laboratoř, měření teploty.

**Abstract**

The diploma thesis is focused on the creation of a thermistor calibration procedure using a calibration bath with silicone oil and a multichannel digital multimeter. Prior to measuring the data, measurement profiles were created for detailed statistical evaluation to select the best possible calibration profile. The generally used Steinhart-Hart equation was used for the regression of the calibration curves when evaluating the measured data. Another output of this work was to determine the procedure of selection of reference temperature sensors and to create their well-arranged table list. Included were the reference sensors offered by the three largest standardization companies (Fluke, AccuMac and Isotech). The aim of the work was also to evaluate partial uncertainties and to calculate the uncertainty of the total calibration system for the purpose of correct assessment of the results, but also for an overview of shortcomings that can be improved in the calibration process.

**Key words**

Thermistors, calibration, resistance temperature sensors, calibration curve, calibration procedure, measurement uncertainties, measurement accuracy, metrology, reference sensor, etalons, calibration laboratory, temperature measurement.

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 30.5.2019

Michal Kopejska

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce. Ing. Silvanu Pretlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>6</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1 MĚŘENÍ TEPLoty</b> .....	<b>11</b>
1.1 TEPLota A TEPLotNÍ STUPNICE .....	11
1.1.1 <i>Termodynamická teplota</i> .....	11
1.1.2 <i>Teplotní stupnice</i> .....	11
1.2 METODY MĚŘENÍ TEPLoty .....	14
1.3 ODPOROVÉ TEPLotNÍ SENZORY.....	16
1.3.1 <i>Odporové teplotní senzory kovové</i> .....	16
1.3.2 <i>Odporové teplotní senzory polovodičové</i> .....	17
1.4 TERMoeLEKTRICKÉ SENZORY TEPLoty .....	17
<b>2 KALIBRACE ELEKTRICKÝCH TEPLotNÍCH SENZORŮ</b> .....	<b>19</b>
2.1 METROLOGIE.....	19
2.1.1 <i>Struktura metrologického systému ČR</i> .....	19
2.1.2 <i>Ministerstvo průmyslu a obchodu</i> .....	19
2.2 KLÍČOVÉ POJMY Z OBLASTI METROLOGIE A KALIBRACE.....	21
2.3 CHYBY A NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	23
2.3.1 <i>Chyby měření</i> .....	23
2.3.2 <i>Nejistoty měření</i> .....	24
2.4 KALIBRACE ELEKTRICKÝCH TEPLotNÍCH SENZORŮ .....	26
2.4.1 <i>Obecný princip kalibrace teplotních senzorů</i> .....	26
2.4.2 <i>Kalibrace odporových senzorů teploty</i> .....	27
2.4.3 <i>Kalibrace termoelektrických senzorů teploty</i> .....	28
2.5 POSTUPY KALIBRACE A METODY VÝHODNOCENÍ.....	29
2.5.1 <i>Proces kalibrace teplotních odporových senzorů</i> .....	29
2.5.2 <i>Metoda ITS-90</i> .....	35
2.5.3 <i>Metoda Callendar-Van Dusen</i> .....	36
2.5.4 <i>Metoda Polynomická</i> .....	37
2.5.5 <i>Kalibrace Termistorů</i> .....	37
<b>3 REFERENČNÍ SENZORY</b> .....	<b>40</b>
3.1 VÝBĚR REFERENČNÍHO SENZORU .....	40
3.1.1 <i>Dělení platinových referenčních senzorů</i> .....	41
3.2 PŘEHLED PLATINOVÝCH REFERENČNÍCH SENZORŮ TEPLoty .....	42
<b>4 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>44</b>
4.1 SEZNÁMENÍ S LABORATOŘÍ .....	44
4.1.1 <i>Kalibrační lázeň</i> .....	44
4.1.2 <i>Digitální multimetr</i> .....	46
4.1.3 <i>Kalibrované termistory</i> .....	47
4.2 PRAKTICKÝ POSTUP A PRÁCE S DATY .....	47
4.2.1 <i>Vytvoření profilu v programu WinTherm</i> .....	48
4.2.2 <i>Vytvoření profilu v programu KickStart</i> .....	52
4.2.3 <i>Testování profilů lázně</i> .....	54
4.2.4 <i>Měření termistorů</i> .....	59
<b>5 VÝHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A NEJISTOTY</b> .....	<b>63</b>
5.1 NEJISTOTY.....	63
5.2 KRITICKÉ ZHODNOCENÍ.....	65

<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>66</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>67</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

## Úvod

Cílem diplomové práce bylo prostudovat problematiku výběru referenčního senzoru s vytvořením přehledu dostupných etalonů na trhu a navrhnout kalibrační proces pro elektrické odporové teplotní senzory, které byly v praktické části omezeny na termistory.

Teplota je veličina, která ať už přímo nebo nepřímo ovlivňuje funkcionalitu všech zařízení a je velmi důležité tuto veličinu přesně a pokud možno co nejjednodušeji měřit. Každý z nás se s měřením teploty setkává denně, ať už je to měření venkovní teploty abychom věděli co si obléknout na sebe, nebo při regulaci teploty v bytě. V dnešní době výpočetní techniky se neobejdeme bez chlazení komponentů, například procesorů, u nichž je nezbytné sledovat vývoj teploty při zatížení, aby nedocházelo ke snížení výkonu, případně ke zničení samotného elektronického zařízení. Teplota jako veličina je jednou z nejdůležitější. Mnohdy se stává limitujícím prvkem při návrhu různých zařízení a musí se vždy brát v úvahu. Aby koupený teploměr fungoval správně, musí být každý teploměr kalibrován a to za účelem korektního a přesného odečítání změřených hodnot. Kalibrace je zvláště kritická u elektrických odporových senzorů, které nedokáží měřit teplotu přímo, jelikož u těchto senzorů se měří odpor a poté je nezbytný následný přepočítání na teplotu.

Práce se tedy zaměřuje na vytvoření co nejlepšího kalibračního postupu s dostupnou laboratoří a měla by poskytnout čtenáři přehled, jak kalibrace probíhá za účelem dosažení co nejpřesnějšího měření. Neposledně je v kritickém zhodnocení vytvořeného kalibračního postupu doporučení, jakým způsobem by se proces dal v budoucnu vylepšit a na co je třeba si dávat pozor.



## Seznam symbolů a zkratk

### Symboly:

$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	Teplota
$T_{tpw}$ (K).....	Teplota trojného bodu vody, tedy 273.16 K (the tripple point of water)
$T_0$ ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	Bod tuhnutí vody
$\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ ).....	Teplotní součinitel elektrického odporu
$R_0$ ( $\Omega$ ).....	Nominální hodnota odporu
$k$ (-).....	Koeficient rozšíření nejistoty
$W$ (-).....	Odporový poměr

### Zkratky:

AC.....	Alternating current
AMS.....	Autorizovaná metrologická střediska
BMC.....	Nejlepší měřící schopnost
CMC.....	Kalibrační a měřící schopnost
CVD.....	Callendar-Van Dusen
ČIA.....	Český institut pro akreditaci, o.p.s
ČMI.....	Český metrologický institut
ČMS.....	Česká metrologická společnost
DC.....	Direct current
DMM.....	Digitální multimetr
GUM.....	Guide to the expression of uncertainty in measurement
ITS-90.....	The International Temperature Scale of 1990
IPRT.....	Industrial platinum resistance thermometers
ISO.....	International Standardisation Organisation
MPO.....	Ministerstvo průmyslu a obchodu
NMS.....	Národní metrologický systém
NTC.....	Negative Temperature Coefficient
PTC.....	Positive Temperature Coefficient
RTD.....	Resistance Temperature Detector
PRT.....	Platinum resistance thermometers
SPRT.....	Standard platinum resistance thermometers
HTSPRT.....	High tempeature standard platinum resistance thermometers

ÚMNZ ..... Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví  
VIM ..... Vocabulary of basic and general terms in metrology (Mezinárodní  
slovník základních a všeobecných termínů v metrologii)

**Jednotky:**

$K$  ..... Kelvin – jednotka teploty  
 $^{\circ}C$  ..... Stupeň celsia – jednotka teploty  
 $^{\circ}F$  ..... Stupeň Fahrenheita – jednotka teploty  
 $^{\circ}Ré, ^{\circ}Ré, ^{\circ}r$  ..... Réaumurův stupeň – jednotka teploty  
 $\Omega$  ..... Ohm – jednotka odporu  
 $k\Omega$  ..... Kilo-ohm – odvozená jednotka odporu

# 1 Měření teploty

Obecně známým faktem je, že většina fyzikálních veličin, stavů i dějů je teplotou ovlivňována, či dokonce konkrétní teplotou podmíněna, čímž technologicky správné a přesné měření teploty nabývá naprosto klíčové důležitosti.

## 1.1 Teplota a teplotní stupnice

Intenzita teploty jako absolutní veličina se determinuje konfrontací aktuálního stavu změřeného některým typem teplotního senzoru s některou z teplotních stupnic, v níž je ukazatel měřidla či měřícího řetězce cejchován. Konfigurace teplotních stupnic se vždy zakládá na některém z fyzikálních zákonů, obvykle s referencí na význačný stav některé chemické látky či sloučeniny.

### 1.1.1 Termodynamická teplota

Termodynamická teplota (dále také zkráceně jen „teplota“) patří k základním sedmi fyzikálním veličinám mezinárodního systému fyzikálních jednotek soustavy SI [1]. SI představuje zkratku vytvořenou z původního francouzského Le Système International d'Unités, anglicky The International System of Units. Termodynamická teplota označovaná v rámci soustavy písmenem T (první písmeno anglického Temperature) se základní jednotkou kelvin (K) se pohybuje v rámci Kelvinovy teplotní stupnice. Hodnotu termodynamické teploty tělesa nebo obecně hmoty fyzikálně určuje, jak už napovídá celý název veličiny, velikost kinetické energie atomů a molekul látky, z níž těleso sestává, a sice tím, že u těchto látkových elementů dochází při pohybu ke vzájemným srážkám a v důsledku toho k časovým změnám jejich rychlosti [2]. Pokud na předmětnou hmotu nijak nepůsobí okolní prostředí, setrvává průměrná rychlost částic v ustáleném konstantním stavu. Termodynamická teplota tělesa je přímo úměrná hmotnosti částic (atomů a molekul) této látky a druhé mocnině jejich rychlosti [2]. Z této fyzikální podstaty tedy plyne, že za fyzikálně nejnížší dosažitelnou teplotu (avšak pouze v limitním přiblížení) lze považovat takovou hodnotu, při níž naprosto ustane veškerý pohyb elementárních částic látky.

### 1.1.2 Teplotní stupnice

Pro účely měření teploty byly stanoveny základní teplotní stupnice a stupnice odvozené, někdy také pomocné, přičemž základní podmínkou je, aby tyto stupnice byly naprosto nezávislé na teploměrné látce. Tuto podmínku splňuje především Kelvinova termodynamická teplotní stupnice, ale i všechny z ní odvozené. Vedlejší jednotkou pro termodynamickou teplotu je zejména stupeň Celsia (°C), který se pro vyjádření číselné

hodnoty teploty v tuzemském a celkově evropském prostředí standardně používá, Kelvinova teplotní stupnice.

Již výše zmíněnou limitní teplotou, při níž ustává pohyb elementárních částic látky, představuje v rámci Kelvinovy teplotní stupnice hodnota 0 K, která současně znamená počátek této stupnice. Kelvinova stupnice je ale definována prostřednictvím teploty trojného bodu vody, tedy současného rovnovážného stavu všech tří skupenství vody (pevného skupenství v podobě ledu, kapalně vody a syté vodní páry) o molárně přesně definovaném chemickém složení a za daného tlaku, který představuje hodnotu  $T_{tpw} = 273,16$  K. Jednotka kelvin pak matematicky v zásadě znamená zlomek  $1/273,16$ . Další význačný bod Kelvinovy stupnice je bod tuhnutí vody  $T_0 = 273,15$  K, který se od trojného bodu liší pouze o 0,01 K.



Obr. 1: Sestava pevných bodů realizované teplotní stupnice ITS-90 v laboratoři termometrie ČMI, Praha (3, s. 35).

Jednotka kelvin má celosvětově univerzální použití, přičemž pro běžná použití kromě striktně fyzikálního se pro vyjádření teploty spíše používají lokálně rozšířené odvozené stupnice a kelvin se používá zejména pro vyjádření teplotních změn, rozdílů, spádů apod.

### **Celsiova teplotní stupnice**

Celsiova teplotní stupnice jako tuzemsky, evropsky a zřejmě i plošně celosvětově nejpoužívanější, dostala svůj název dle švédského astronoma jménem Anders Celsius, který ji v roce 1742 vytvořil. Nicméně oproti dnešnímu stavu byla postavena opačně, tedy 100 °C pro teplotu tání ledu a 0 °C pro teplotu varu. Opět švédský lékař a přírodovědec Carl Linné stupnici později přizpůsobil do dnešní podoby. Jednotkou Celsiovy teplotní stupnice je stupeň Celsia (°C), který má s jednotkou kelvin shodnou velikost a pro vyjádření teplotního rozdílu tedy platí

$$\Delta t = \Delta T \quad (1.1)$$

Referenční teplota trojného bodu vody 273,16 K použitá pro definici kelvinu odpovídá v Celsiově stupnici hodnotě 0,01 °C a teplota absolutní nuly je pak rovna -273,15 °C. Pro převod mezi Kelvinovou a Celsiovou teplotní stupnicí tedy platí vztah:

$$t \text{ (}^\circ\text{C)} = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K} \quad (1.2)$$

### Teplotní stupnice ITS-90

Stupnice ITS-90 (The International Temperature Scale of 1990) představuje Mezinárodní teplotní stupnici pocházející z roku 1990 [2], která sestává ze sedmnácti přesně definovaných teplotních bodů, které jsou specifikovány pro různé vybrané látky a jejich význačné skupenské body (trojný bod, tání, tuhnutí, apod.). Škála ITS-90 začíná na nejnižší hodnotě 0,65 K a dosahuje až k maximální teplotě 1357,77 K, jakožto nejvyšší prakticky měřitelné hodnotě teploty s ohledem na Planckův vyzařovací zákon [2]. Škála sedmnácti hodnot ITS-90 se rozpadá na pětici dílčích intervalů, které jsou samostatně tvořené různými referenčními rozsahy a technologiemi, pomocí kterých je daný dílčí rozsah opakovatelně určen. Tedy např. pro rozsah 0,65 K až 5 K je určující referencí tlak nasycených par prvků <sup>3</sup>He a <sup>4</sup>He, pro hodnoty v rozmezí 273,15 K až 1234,93 K a pro teploty nad touto hodnotou se využívá Planckova vyzařovacího zákona [2]. Význam ITS-90 tkví zejména v principu, že ačkoli Kelvinovu i Celsiovu stupnici přesně určují body 0 K nebo 0,01 °C pro význačné skupenské body vody, pro praktické použití jsou mnohdy tyto body špatně použitelné, neboť mohou být od používaného teplotního rozmezí příliš vzdáleny. Stupnice ITS-90, jejíž definované body se široce rozprostírají po celém reálně používaném intervalu, slouží v praxi jako přesně definovaná srovnávací škála pro jiné teplotní stupnice, ale také pro nejpřesnější kalibrace odporových teplotních senzorů v pevně stanovených bodech dle této stupnice. Mezinárodní stupnici ITS-90 znázorňuje obr. 2.

Number	Temperature (K)	Temperature (°C)	Substance	State
1	3 to 5	-270.15 to -268.15	He	Vapour pressure
2	13.8033	-259.3467	H <sub>2</sub>	Triple point
3	-17	-256.15	H <sub>2</sub> or He	Vapour pressure
4	-20.3	-252.85	H <sub>2</sub> or He	Vapour pressure
5	24.5561	-248.5939	Ne	Triple point
6	54.3584	-218.7916	O <sub>2</sub>	Triple point
7	83.8058	-189.3442	Ar	Triple point
8	234.3156	-38.8344	Hg	Triple point
9	273.16	0.01	H <sub>2</sub> O	Triple point
10	302.9146	29.7646	Ga	Melting point
11	429.7485	156.5985	In	Freezing point
12	505.078	231.928	Sn	Freezing point
13	692.677	419.527	Zn	Freezing point
14	933.473	660.323	Al	Freezing point
15	1234.93	961.78	Ag	Freezing point
16	1337.33	1064.18	Au	Freezing point
17	1357.77	1084.62	Cu	Freezing point

Obr. 2: Definiční body stupnice ITS-90 (převzato z [2]).

## Další teplotní stupnice

Kromě Kelvinovy a Celsiovy stupnice se používá či významně používalo i několik dalších stupnic a je tedy třeba se pro úplnost o nich zmínit. Zejména na území USA a v některých historicky, politicky či ekonomicky s nimi spojených zemích se pro vyjádření hodnoty teploty využívá Fahrenheitovy teplotní stupnice pojmenované po německém fyzikovi Gabrielu Fahrenheitovi. Jako jednotka zde slouží stupeň Fahrenheita ( $^{\circ}\text{F}$ ), který se svou velikostí od základní Kelvinovy i Celsiovy stupnice výrazně liší. Fahrenheitova stupnice je v rámci definice ukotvena pomocí dvou referenčních bodů, a to bodu tuhnutí vody ( $32^{\circ}\text{F}$ ) a bodu varu vody ( $212^{\circ}\text{F}$ ). Převod mezi Fahrenheitovou, Kelvinovou a Celsiovou stupnicí se řídí vztahem

$$t (^{\circ}\text{F}) = 9/5 T - 459,67 (\text{K}) = 9/5 t - 32 (^{\circ}\text{C}) \quad (1.3)$$

Mezi další vedlejší jednotky a stupnice pro vyjádření teploty patří Rankinova stupnice s jednotkou Rankinův stupeň ( $^{\circ}\text{R}$ ). Počátek této stupnice tkví v teplotě absolutní nuly, pro niž je v rámci stupnice přiřazena hodnota  $0^{\circ}\text{R}$ , přičemž jeden stupeň Rankina koresponduje svým rozměrem se stupněm Fahrenheita. Teplota tání vody pak odpovídá hodnotě  $491,67^{\circ}\text{R}$ . Rankinova stupnice se dnes již běžně nepoužívá a patří tak spíše mezi škály historické. Další takovou spíše historicky používanou je Réaumurova stupnice používající jako jednotku Réaumurův stupeň ( $^{\circ}\text{Ré}$ ,  $^{\circ}\text{Re}$ , někdy také  $^{\circ}\text{r}$ ). Definiční body této stupnice tvoří bod mrznutí vody s hodnotou  $0^{\circ}\text{Ré}$  a bod varu vody při normálním atmosférickém tlaku s hodnotou teploty,  $80^{\circ}\text{Ré}$ . Velikost teplotního rozdílu  $1^{\circ}\text{Ré}$  je rovna čtyřem pětinám  $^{\circ}\text{C}$ , a tedy i K. Réaumurova stupnice zavedená dokonce ještě před stupnicí Celsiovou byla až do počátku 20. století používána v Evropě, zejména pak ve Francii či Německu, ale také třeba v Rusku.

## 1.2 Metody měření teploty

Teplotní senzory se v českém jazyce alternativně nazývají řadou dalších slov a slovních spojení, z nichž mezi ta nejběžnější patří označení teplotní snímače, teplotní čidla, ale také jedním slovem teploměry. Angličtina běžně používá významově v zásadě velmi podobnou paletu termínů, tedy především pojmy „Thermal Sensors“ či obecněji „Thermometers“. Nutno poznamenat, že termín „teploměr“ běžně používá také Český metrologický institut (4), dále jen ČMI, jako tuzemská metrologická autorita. Metody měření teploty a jejich rozdělení pochopitelně úzce koresponduje s rozdělením teplotních senzorů. Ty lze klasifikovat na základě několika kritérií, z nichž ke stěžejním patří fyzikální vlastnost,

jejíž změna vlivem teploty se k měření využívá. Lze tak rozeznávat tyto základní kategorie teplotních senzorů:

**Dilatační** – princip činnosti tohoto typu senzorů se zakládá na roztažnosti látek všech skupenství. Délková nebo objemová roztažnost je zde funkcí teploty, a tedy změnou teploty základní látky dochází ke změně rozměru [5]. Rozměrové změny tělesa při ohřátí či ochlazení určuje součinitel teplotní roztažnosti. Příkladem mohou být klasické rtuťové či lihové teploměry. Podle charakteru teploměrné látky lze dilatační senzory dále dělit na teploměry s plynovou náplní (závislost tlaku plynu na teplotě), teploměry s kapalinovou náplní (teplotní roztažnost teploměrné kapaliny) a teploměry s pevnou látkou (bimetalový teploměr s dvěma kovy různé tepelné roztažnosti). V průmyslových aplikacích se tento typ teploměrů uplatňuje např. ve funkci základního regulačního (jednodušší aplikace, např. ohřev TUV), ale také limitního, havarijního či záložního teplotního senzoru [5]. Vzhledem k zaměření této práce nebude dilatačním teplotním senzorům dále věnována hlubší pozornost.

**Odporové** – senzory této kategorie staví na teplotní závislosti odporu základního materiálu, přičemž tento spolu s konstrukcí určuje základní parametry teploměru, jako je rozsah měřených hodnot, přesnost, časová stabilita, rychlost odezvy apod. Jedním ze zásadních požadavků je co nejvyšší a nejstabilnější teplotní součinitel odporu, a také co nejvyšší základní hodnota odporu kvůli možnému vzniku tepla v čidle vlivem procházejícího proudu. Dle charakteru základního materiálu, potažmo elektrického jevu, který slouží k měření teploty, se senzory odporové dále dělí na kovové a polovodičové, přičemž druhá kategorie se dále větví na senzory monokrystalické a polykrystalické.

**Termoelektrické** – tyto senzory tvoří dvojice různých kovových materiálů nebo jejich slitin, které jsou vodivě spojeny a na tomto spojení dochází ke vzniku rozdílového napětí, jehož hodnota závisí na teplotě tohoto vodivého spoje, čímž je v zásadě naplněn princip přeměny tepelné energie na ekvivalentní energii elektrickou. Termoelektrické články patří mezi čidla tzv. první generace a jsou dostatečně propracována. Při potřebě měření vysokých teplot kontaktním způsobem představují prakticky jediné řešení.

**Speciální** – do kategorie speciálních senzorů teploty patří celá řada dalších zařízení, které nespádají do žádné z předchozích kategorií. Patří sem např. pyrometry, ale také např. termovizní přístroje atd. Podrobnější popis těchto přístrojů přesahuje rámec tohoto textu.

Rozdělení teplotních senzorů, respektive způsobů měření lze také provést dle charakteru vzájemného působení měřeného objektu a teploměru na dotykové (kontaktní) teploměry a bezdotykové (bezkontaktní) teploměry.

### 1.3 Odporové teplotní senzory

Odporové teploměry využívají pro svoji činnost definovanou změnu elektrického odporu vodiče v závislosti na měnící se teplotě. Tento typ elektrických senzorů teploty se rozděluje na dvě skupiny v závislosti na konstrukčním materiálu, z něhož je teploměr vyroben, na teplotní senzory kovové a polovodičové [6].

#### 1.3.1 Odporové teplotní senzory kovové

Základním materiálem je kov, v tomto případě je kovem v drtivé většině případů platina vysoké chemické čistoty dosahující hodnoty 99,9 % až 99,99 %. Vedle platiny se ale používá také nikl, lze použít i měď, Balco (Ni-Fe). Pro nízké teploty se pak využívá slitiny Rh-Fe nebo Pt-Co. Podmínkou je, aby základní materiál byl chemicky čistý a také chemicky i fyzikálně stabilní co do chování v celém měřicím rozsahu teplotních změn [6]. Materiál také nesmí podléhat oxidaci a vysoce nežádoucí je také reakce s izolačním a ochranným pouzdrem. Teplotní součinitel odporu tohoto typu senzoru by měl být co největší a časově co nejvíce stálý. Konstrukční skladba odporového teploměru sestává z vlastního snímače (čidlo, vnitřní vedení, izolační materiál) spojovacího vedení, které bývá velmi často pevně nerozebíratelně spojeno s kovovým pouzdrem senzoru a měřicího přístroje, který prostřednictvím odporu čidla vyhodnocuje a zobrazuje měřenou teplotu [6].

Pro konstrukci měřicích senzorů odporových kovových teploměrů se používají tři základní technologie, a sice drátková, tenkovrstvá a tlustovrstvá. Drátkové měřicí odpory se obvykle zhotovují jako velmi tenký svinutý platinový drátek o průměru 0,007 mm až 0,05 mm fixovaný v ochranném pouzdře v podobě kovové trubice (někdy také označované jako stonek) do keramiky, popř. může také být na keramickém či skleněném jádře navinutý a obalený skleněnou ochrannou vrstvou [6]. Při tenkovrstvé technologii je odpor vytvořen metodou napařování a iontového leptání na podložce (např. korundová keramika). Tlustovrstvá technologie pak využívá nanášení vrstvy kovu prostřednictvím sítotisku na podložku z korundové keramiky. Klasickým představitelem této kategorie elektrických senzorů teploty je teploměr Pt100 se základní hodnotou odporu  $R_0 = 100 \Omega$  a teplotním součinitelem odporu  $\alpha = 3,851 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Obvyklý teplotní rozsah je  $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$  až  $+850 \text{ } ^\circ\text{C}$ .



### 1.3.2 Odporové teplotní senzory polovodičové

Podobně jako je tomu u kovových odporových senzorů teploty, využívají také polovodičové teplotní senzory principu definované a přesně charakterizované změny odporu s měnící se teplotou. Do této kategorie polovodičových odporových senzorů spadají dvě hlavní podkategorie, a sice termistory a monokrystalické odporové senzory. Termistory se pak dále dělí dle smyslu teplotní závislosti odporu na teplotě na negastory (zkratka NTC) a pozistory (zkratka PTC). Termistory mohou nabývat rozličných podob, běžný je např. tvar destičky, kapky, perličky, válečku apod. Hlavní výhody termistory nalézají ve velké teplotní citlivosti, malých rozměrech, dobré mechanické odolnosti a snadné realizaci převodu odporu na elektrické napětí. Nicméně mezi zásadní nevýhody oproti např. výše zmíněnému senzoru Pt100 je nutné zmínit silně nelineární teplotní závislost odporu na teplotě a nepříliš velkou časovou stabilitu měřené hodnoty [6].

Negastory se vyrábějí práškovou technologií, přičemž základním materiálem jsou oxidy kovů, zejména chromu, kobaltu, mědi, železa, manganu, niklu nebo titanu. Pozistory se zhotovují z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. titaničitanu barnatého ( $\text{BaTiO}_3$ ). Není bez zajímavosti, že důležitou a často využívanou vlastností pozistorů je velmi strmý nárůst odporu se změnou teploty, tedy rychlou razantní změnu klíčové elektrické vlastnosti. Tento prvek je tak předurčen k použití jako tepelná ochrana, omezovač proudu či pro teplotní regulaci. Polovodičové monokrystalické senzory teploty se zhotovují z monokrystalů křemíku, germania, india a jejich slitin. Např. z křemíku jako zřejmě nejčastěji prakticky využívaného materiálu pro tuto kategorii se zhotovují senzory pro teplotní rozsah  $-50\text{ °C}$  až  $+150\text{ °C}$ .

### 1.4 Termoelektrické senzory teploty

Termoelektrické senzory teploty se také zkráceně označují jako termočlánky a jsou tvořeny párem různých vhodně zvolených kovů, jejichž neizolované konce jsou vodivě spojeny (svařeny). Pro konstrukci se využívá čistých kovových materiálů a jejich slitin. Přeměna tepelné energie na elektrickou se pak při použití dvou vhodných kovových elementů děje prostřednictvím vzniku rozdílového napětí. Materiály zvolené pro realizaci termoelektrického článku musí nutně vykazovat co do závislosti termoelektrického napětí na teplotě přijatelnou nelinearitu pro celý pracovní teplotní interval. Dále musí být oba tyto materiály odolné proti vlivům prostředí a žádoucí je také pokud možno dlouhodobá teplotní stabilita [6]. Materiály termočlánků postihují normy, což zaručuje shodné vlastnosti stejně označených termočlánků i v případě různých výrobců. Označení termočlánku charakterizuje

nejen použité materiály, ale také tvar křivky závislosti termoelektrického napětí na teplotě, teplotní rozsah a také z těchto i dalších vlastností použitých materiálů odvozuje oblast použití. Označení je řešeno jedním písmenem abecedy, např. K, T, J, N atd.

S ohledem na konstrukční řešení lze rozdělit termočlánky na drátové a plášťové, přičemž drátkové termoelektrické články tvoří zmíněná dvojice kovů. Ochranné obaly (trubičky) drátkových termoelektrických senzorů teploty bývají nejčastěji vyrobeny z keramických materiálů. Plášťové provedení se skládá z dvojice kovových vodičů uložených v plášti z kovu, nejčastěji z nerezové oceli pro její chemickou i mechanickou odolnost. Plášť termočládku musí být odolný proti korozi [6].

## 2 Kalibrace elektrických teplotních senzorů

Kalibrace je oblast, která spadá pod oblast měření fyzikálních veličin, potažmo tedy metrologie, a pro její podrobné pochopení včetně relevantních souvislostí je třeba se metrologii alespoň ve stručnosti věnovat.

### 2.1 Metrologie

Metrologie spadá mezi technické vědní obory a předmět jejího zájmu zahrnuje otázky týkající se měření technických a fyzikálních veličin, mezi které patří např. výzkum a vývoj metod měření nebo řešení vztahu mezi měřenou a skutečnou hodnotou veličiny.

#### 2.1.1 Struktura metrologického systému ČR

Podobu struktury orgánů, institucí a subjektů metrologie určuje tzv. Národní metrologický systém (dále jen NMS), který má především za cíl zajištění jednotnosti a správnosti měřidel a měření v rámci ČR. Toho se v praxi dosahuje paletou prostředků a nástrojů k tomu určených, jimiž jednotlivé entity v rámci systému disponují, s oporou v technických předpisech a platné legislativě. Jedním ze základních prvků NMS, a de facto primárním uživatelem, pro něhož je v důsledku celý systém určen, jsou spotřebitelé a obecně veřejnost. NMS ČR zahrnuje v rámci své struktury celou řadu hierarchicky uspořádaných prvků, viz Obr. 3, v jejichž čele v rámci ČR stojí Ministerstvo průmyslu a obchodu.

#### 2.1.2 Ministerstvo průmyslu a obchodu

Ministerstvo průmyslu a obchodu (dále jen MPO) figuruje jako hlavní a řídicí instituce státního metrologického systému České republiky, čímž do jeho kompetence patří také sektor technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví, jehož představitelem je v rámci ČR stejnojmenný Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) a výkonná složka oblasti metrologie, kterou představuje Český metrologický institut (ČMI). V rámci oblasti působnosti a dílčích podoblastí řeší MPO určení směřování státní politiky z hlediska metrologie, vedle toho také přijímání relevantních legislativních opatření a v neposlední řadě i rozvoj metrologického systému ČR [7].

#### **Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví**

Stěžejní cíl ÚNMZ spočívá především v zabezpečení úkolů, které vyplývají ze zákonů České republiky, které se vztahují k oblasti technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví, a také úkolů souvisejících s technickými předpisy a normami uplatňovaných v rámci členství ČR v Evropské unii. Na základě pověření MPO má ÚNMZ na starosti

i celou řadu dalších povinností, tedy např. „zastupuje Českou republiku v příslušných mezinárodních orgánech a organizacích a zabezpečuje úkoly z toho vyplývající“ [7], dále také „zpracovává podklady k rozhodnutí MPO“ [7] a s účinností od data 1. ledna 2009 „odpovídá ÚNMZ též za zabezpečování tvorby, vydávání a řádnou distribuci českých technických norem v souladu se zákonem o technických požadavcích na výrobky.“ [7].

### **Český metrologický institut**

Jak již bylo zmíněno v rámci ČR představuje autoritu v oblasti metrologie institut ČMI, který dle Zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii [8], ve znění pozdějších předpisů „zabezpečuje jednotnost a přesnost měřidel a měření ve všech oborech vědecké, technické a hospodářské činnosti v rozsahu podle § 14 zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů“ [4]. ČMI tedy zajišťuje služby v celém spektru základních oblastí metrologie, tedy „uchovávání a rozvoj státních etalonů, výzkum a vývoj v metrologii“ [4], což patří do oblasti fundamentální metrologie, dále v rámci oblasti tzv. legální metrologie obstarává „schvalování typu měřidel, prvotní a ověřování stanovených měřidel, státní metrologický dozor, posuzování shody u měřidel“ [4] a v neposlední řadě pak „přenos jednotek, kalibrace etalonů a pracovních měřidel“ [4]. Současně s tímto také ČMI provádí certifikaci referenčních materiálů, ověřování stanovených měřidel atd.

### **Další orgány metrologického systému ČR**

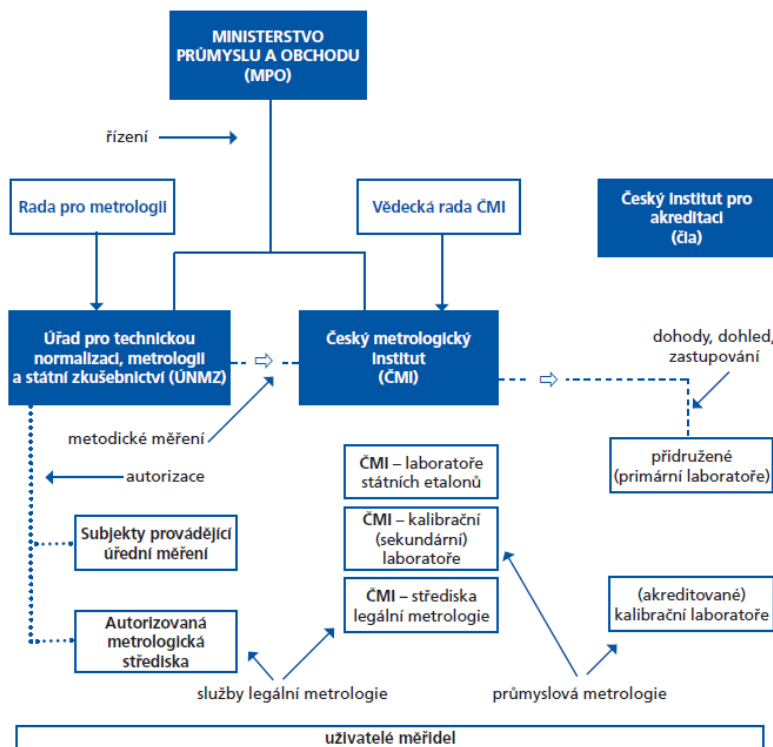
Další, rovněž důležité složky metrologického systému ČR budou uvedeny pouze ve stručném přehledu, popř. s doplněním jejich základní charakteristiky.

**Správci státních etalonů** – státní etalony ČR přísluší ke schvalování Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví a jejich uchovávání přináležejí ve standardním případě ČMI, ale ÚNMZ může touto činností v případě potřeby pověřit i jiné subjekty [7].

**Autorizovaná metrologická střediska (AMS)** – autorizovanými metrologickými středisky se rozumí takové subjekty, které jsou prostřednictvím ÚNMZ autorizovány k ověřování stanovených měřidel. Jejich aktuální seznam udržuje a poskytuje ÚNMZ [7].

**Český institut pro akreditaci, o.p.s (ČIA)** – institut působí jako národní akreditační orgán v rámci ČR, a sice ve formě soukromoprávní neziskové organizace. V rámci své činnosti poskytuje své služby v sektoru akreditace a dozoru nad subjekty posuzující shody v duchu legislativy a mezinárodních norem [7].

K dalším subjektům fungujícím v rámci metrologického systému ČR patří také Česká metrologická společnost (ČMS), výrobci měřidel a subjekty provádějící jejich montáž, subjekty provádějící úřední měření a další. Strukturu metrologického systému ČR a vztahy i závislosti mezi jednotlivými entitami přehledně znázorňuje Obr. 3.



Obr. 3: Struktura metrologického systému ČR (převzato z [7]).

## 2.2 Klíčové pojmy z oblasti metrologie a kalibrace

Před hlubším ponořením do problematiky kalibrace a s ní úzce spojených metrologických témat, a také oblastí týkajících se chyb a nejistot měření je nezbytně nutné stanovit klíčové pojmy těchto oblastí, které budou dále v textu použity.

**Měřidlo** – obecně je chápáno jako jakékoli zařízení, prostřednictvím kterého zjišťujeme hodnotu zkoumané fyzikální veličiny. Tímto měřidlem, pokud se tedy nejedná o kompaktní zařízení bez volně oddělitelných součástí, se myslí celý měřicí řetězec (konkrétně např. senzor teploty Pt100 včetně kabeláže zapojený do odečítací jednotky či měřicí ústředny). Měřidla se dále dělí na čtveřici podkategorií, kterých se týkají pojmové definice následující níže v textu: etalony, stanovená měřidla, pracovní měřidla a certifikované referenční materiály

**Etalon** – etalon měřicí jednotky nebo dané stupnice (jinak také nazývaný „standard“) zastupuje takové měřidlo, jež je určeno „k realizaci a uchování této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti.“ [9].

**Stanovené měřidlo** – patří sem všechna měřidla, která Ministerstvo průmyslu a obchodu ve vyhlášce předepisuje k povinnému ověřování. Tyto skupiny měřidel se dělí s ohledem na jejich praktické použití, např. pro ochranu zdraví a životního prostředí, bezpečnost, při prodeji nebo majetkových záležitostech apod. [9].

**Pracovní měřidlo** – měřidlo, které nezapadá do kategorie etalon ani stanovené měřidlo.

**Návaznost měřidel** – význam pojmu návaznost měřidel definuje Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii jako „*zařazení daných měřidel do nepřerušené posloupnosti přenosu hodnoty veličiny počínající etalonem nejvyšší metrologické kvality.*“ [8]. Norma ČSN EN ISO 10012 ve spojitosti s návazností měřidel hovoří také o nejistotách, které musí být v rámci nepřerušenoho řetězce porovnání uvedeny [10].

**Kalibrace** – klíčový pojem s ohledem na téma této práce zahrnuje činnosti, které za jasně specifikovaných a dokumentovaných podmínek (zabezpečujících mj. reprodukovatelnost procesu) „*stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření*“ a „*použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace*“ [9]. Kalibrace tak detailně charakterizuje posuzované měřidlo (přístroj, měřicí soustava, referenční materiál apod.) co do metrologie, což se děje v běžném případě přímým porovnáním s etalony či certifikovanými referenčními materiály. Shrnutí výsledků procesu kalibrace pak obsahuje kalibrační list a často také štítek nalepený na kalibrovaném měřidle.

**Ověření** – proces ověření představuje v zásadě činnosti, jejichž výstupem je „*potvrzení, že stanovené měřidlo má požadované metrologické vlastnosti*“ [9], Postupy uplatňované při ověřování stanovených měřidel jsou zakotveny vyhláškou Ministerstva dopravy a průmyslu příslušnou vyhláškou. Podobně jako u kalibrace je zkoumané měřidlo po ověření opatřeno úřední značkou či prostřednictvím ověřovacího listu. V tomto místě je nutno zdůraznit rozdíl mezi kalibrací a ověřením. Oba procesy jsou v zásadě co do postupu i výsledků velmi podobné a oba se týkají metrologické návaznosti měřidel, avšak zásadní rozdíl tkví v tom, že „*při ověření se zkoumá shoda metrologických vlastností těchto měřidel s úředně stanovenými požadavky, zejména s maximálními dovolenými chybami. Při kalibraci se kvantitativně zjišťuje vztah mezi naměřenou hodnotou a jmenovitou hodnotou nastavenou etalonem.*“ [9].



Obr. 4: Úřední značka pro ČMI ve formě samolepky pro označení stanoveného měřidla (číslo 6 symbolizuje vnitřní organizační jednotku ČMI, zde konkrétně OI ČMI Brno, dvojčíslí 01 vyjadřuje rok provedení ověření, zde tedy 2001 (převzato z [9]).

**Pravá hodnota** – někdy také nazývaná skutečná hodnota je hodnotou, která charakterizuje dokonale definovanou veličinu za definovaných podmínek.

**Přesnost** – jedná se o míru souhlasu mezi jednotlivými výsledky zkoušky, jež se provádí za předem jasně definovaných podmínek [11].

## 2.3 Chyby a nejistoty měření

Logický cíl každého měření tkví ve stanovení hodnoty co nejbližší pravé hodnotě dané veličiny, avšak výsledek každého měření zkresluje chyby měření a výsledky měření jsou poté prezentovány vhodným způsobem např.: provedený odhad střední hodnoty měřené veličiny  $\mu$  a stanovení relevantní nejistoty, která se od chyb měření odvíjí.

### 2.3.1 Chyby měření

Základní vyjádření chyb měření nabývá podoby relativní nebo absolutní hodnoty. Absolutní chyba měření udává přímý číselný rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou měřené veličiny a jejím rozměrem je pak jednotka měřené veličiny, zatímco relativní chyba reprezentuje poměrnou hodnotu absolutní chyby vzhledem k měřené hodnotě a obvykle se udává v procentech, popř. jako bezrozměrné číslo. Chyba měření je souhrnná hodnota, která zahrnuje celou řadu dílčích chyb, které se mohou vyskytovat buď systematicky či náhodně [12]. Velmi důležité je tedy rozdělení chyb měření z hlediska jejich působení na chyby systematické, náhodné a hrubé.

**Systematické chyby** – vykazují stálý charakter velikostní i znaménkový, výsledek tak ovlivňují systematicky a je poměrně snadné je číselně stanovit a korigovat či kompenzovat. [12]

**Náhodné chyby** – náhodné chyby oproti systematickým logicky působí naopak nahodile, nelze je tedy snadno předvídat a tím pádem ani eliminovat [12]. Jejich vliv se tak postihuje téměř vždy prostřednictvím opakovaných měření a aplikace statistických nástrojů za pomoci příslušného pravděpodobnostního rozdělení (obvykle Gaussovo normální rozdělení). Prakticky se toto provádí tak, že se ze souboru  $n$  hodnot výsledků měření

provedených za shodných, přesně specifikovaných podmínek, vypočte aritmetický průměr a náhodnou chybu pak vyjádří směrodatná odchylka výběrového souboru  $s$  dle vzorce

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.1)$$

kde  $x$  představuje hodnotu měřené veličiny.

**Hrubé chyby** – z hlediska výskytu se jeví tyto chyby jako nevyzpytatelné a prevence jejich vzniku souvisí s dodržováním předepsaných postupů, podmínek, a také s personální erudicí a disciplínou. Hrubé chyby mají obvykle v důsledku znehodnocující vliv na celé měření, proto se obvykle ze zpracování výsledku vylučují a do výsledku by se promítat neměly [12].

Výsledná chyba měření je tak vyjádřena jako součet systematické chyby a náhodné chyby. Pokud jde o praktický vznik chyb lze jejich příčiny hledat např. v měřicích přístrojích samotných (výrobní nedokonalost, opotřebení, stárnutí apod.), metodě měření (přílišné zjednodušení postupu, nedostatečný počet měření apod.), lidském faktoru (nesoustředěnost, přehlédnutí, chyba čtení údaje apod.) či ve vyhodnocení (chyba ve výpočtu, zaokrouhlování, linearizace apod.).

### 2.3.2 Nejistoty měření

Obecné vnímání významu nejistoty měření používané při kalibraci všech měřidel, tedy i teplotních senzorů říká [7], že nejistota je „*kvantitativní mírou kvality výsledku měření, umožňující porovnat výsledky měření s jinými výsledky, referencemi, specifikacemi nebo etalony.*“. Jiná slova, avšak se stejným významem používá definice nejistoty měření v souladu s GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) a VIM (Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii) a to „*parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptýlení hodnot, jež by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině.*“ [11]. Ve smyslu obou uvedených definic představuje nejistota měření nezápornou číselnou hodnotu, která vyjadřuje rozptýlení měřených hodnot zkoumané fyzikální veličiny. Nutno důrazně poukázat na první větu z druhé z uvedených definic, a sice že hodnota nejistoty je nedílnou součástí měřené veličiny. V zásadě je nutno říci, že hodnotu nejistoty měření určuje řada různých vlivů (složek nejistoty měření), které se na výsledné nejistotě měření podílejí.



Celkovou nejistotu měření lze rozložit na dvě dílčí složky, které jsou charakterizovány na základě mechanismu jejich vzniku či s ohledem na charakter jejich zdroje. Tyto složky se vyhodnocují dvěma různými postupy označovaným obvykle písmeny „A“ a „B“. V obecném chápání obvykle složky nejistot posuzované postupem A představují takové složky nejistot z místních zdrojů, které přímo souvisejí s realizací daného měření [11]. Složky celkové nejistoty měření vyhodnocované postupem B představují příspěvky, jejichž původ spočívá obvykle v externích zdrojích a jejichž příčina vzniku přímo nesouvisí s realizací měření. S jistou dávkou definiční nepřesnosti se pak zjednodušeně hovoří o složkách nejistot typu A a složkách nejistot typu B [11]. Zde je třeba podotknout, že pro rámcovou představu o původu složek nejistoty typu A a B se často používá ne zcela přesné, avšak dostatečně ilustrativní. A to takové, že složky nejistot typu A představují v zásadě náhodné chyby a jejich číselnou hodnotu lze získat např. výpočtem směrodatné odchylky získané pomocí opakovaných experimentů ve stejné měřicí konfiguraci. Zatímco složky nejistot typu B figurují jako systematické chyby, jejichž číselná hodnota představuje kvalifikovaný odhad na základě dostupných zaručených informací o měřicí soustavě, např. z kalibračních listů, certifikátů a specifikací výrobců.

#### Příklady nejistot A a B...

S ohledem na výše uvedené pak celkový výsledek měření leží v jistém intervalu rozkládajícím se okolo pravé hodnoty, ovšem za podmínky eliminace všech zásadních zdrojů odstranitelných systematických chyb. Právě tento interval pak představuje nejistotu měření a přináleží hodnotě měřené veličiny s definovanou úrovní pravděpodobnosti pokrytí zjišťované pravé hodnoty veličiny [11]. Pochopitelně úroveň pravděpodobnosti má smysl stanovit na  $n < 1$ , typicky např. 0,95, což zhruba odpovídá koeficientu rozšíření  $k = 2$  [11], protože při  $n = 1$  by se hranice intervalu nacházely v nekonečnu, resp. na maximálních teoreticky možných hranicích měřené veličiny. Číselnou hodnotu celkové nejistoty měření lze získat mnoha způsoby, z nichž ten zřejmě nejčastěji využívaný a obecně uznávaný je postup dle GUM [13].

#### Postup dle GUM

Pro konkrétní ilustraci vyjádření nejistoty ve výsledku měření může posloužit následující příklad: Teplota měřená elektronickým teploměrem dosahuje hodnoty 23,41 °C. Dle specifikace výrobce měřicího zařízení je jeho nejistota 0,11 °C. Výsledek měření se v duchu výše uvedeného vždy uvádí ve tvaru

$$Y = y \pm U \quad (2.2)$$

kde  $Y$  je výsledná měřená veličina,  $U$  představuje rozšířenou nejistotu měření (uvedenou s nejméně dvěma platnými číslicemi) a  $y$  zastupuje odhad hodnoty měření dle pravidel zaokrouhlený na stejný počet číslic. Výsledek měření bude tedy uveden ve tvaru

$$t = (23,41 \pm 0,11) \text{ } ^\circ\text{C}$$

Koeficient rozšíření je zde použit v obvyklé hodnotě  $k = 2$ , a tedy rozšířená nejistota vyjadřuje součin standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření, což při uvažování normálního rozdělení pravděpodobnosti odpovídá pravděpodobnosti pokrytí zhruba 95 %.

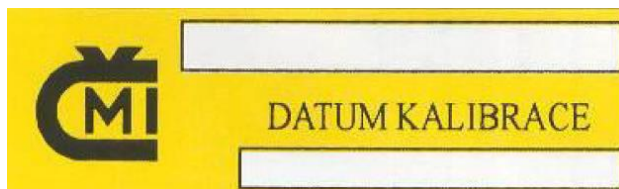
## 2.4 Kalibrace elektrických teplotních senzorů

Jak již bylo naznačeno výše, tak ze samé fyzikální podstaty žádné měření není a nemůže být absolutně správné a přesné, o čemž hovořil kromě jiných také německý matematik, teoretický fyzik, filozof a nositel Nobelovy ceny za fyziku Werner Karl Heisenberg [14]. Ten v roce 1927 zformuloval známý princip neurčitosti (někdy také relace neurčitosti), který hovoří o teoretických hranicích schopnosti provádět obecná měření [15]. Princip neurčitosti lze interpretovat tak, že ani sebedokonalejší konfigurace měřicího přístroje či soustavy neumožňuje získat absolutně přesné výsledky, neboť měřená veličina je ovlivňována již samotným pozorováním [15]. Z uvedeného mj. plyne, že chybami a nejistotami jsou ovlivněna veškerá měření a výsledek se od pravé hodnoty veličiny více či méně liší. Část zdrojů chyb lze kvantifikovat a korigovat, mj. také právě prostřednictvím kalibrace, nicméně všechny chyby korigovat z výše uvedené podstaty pochopitelně nelze. Je tedy nutné pokusit se co nejpřesněji zdroje těchto chyb v rámci prováděné kalibrace identifikovat, charakterizovat a definovaným způsobem k výsledku měření přiřadit jako jeho součást.

### 2.4.1 Obecný princip kalibrace teplotních senzorů

Jak bylo řečeno výše, v definici pojmu kalibrace představuje tento proces charakterizaci posuzovaného měřidla, kterými jsou vzhledem k tématu této práce elektrické teplotní senzory, metodou přímého porovnání kalibrovaného měřidla s etalonem. V typickém případě představuje tento etalon opět termoelektrický snímač nebo odporový snímač teploty. Kalibrace se provádí v zařízení, které ve svém teplotním rozsahu s dostatečnou přesností, ale také časovou stabilitou, homogenitou teplotního pole, vhodnou rychlostí přeběhu atd. vytváří definovanou teplotu, pro jejíž hodnotu se kalibrace

elektrického teplotního senzoru provádí. Takovým zařízením je obecně kalibrátor, a pro případ teploty se jedná nejčastěji o tzv. kalibrační pícku, či kalibrační lázeň. Existují také možnosti použití klimatické či teplotní komory s odpovídajícími parametry co do časové stability a homogenity teplotního pole, která musí být pochopitelně kalibrovaná odpovídajícím způsobem.



Obr. 5: Jedna z možných kalibračních značek ČMI (samolepicí štítek pro označení etalon či pracovního měřidla, horní rámeček je určen pro číslo kalibračního listu, spodní pro datum kalibrace). (převzato z[9])

V rámci tématu kalibrace elektrických senzorů teploty je třeba řešit některá specifika jednotlivých řešení senzorů z hlediska možných zdrojů chyb a nejistot, které mohou být také vzhledem k účelu použití měřidla fyzikálním opodstatněním nutnosti pravidelné kalibrace.

#### 2.4.2 Kalibrace odporových senzorů teploty

V rámci odporových senzorů teploty hrají zásadní roli zejména dvě oblasti možného vzniku změn, chyb vycházející z vlastností těchto senzorů. První z nich je oblast časové stability, která postihuje v zásadě veškeré změny hodnoty základního odporu senzoru během doby používání. Patří sem zejména tři podoblasti, a sice hystereze, fluktuace, nebo stárnutí [16].

**Hystereze** – projevuje se po zahřátí senzoru na teplotu nad 450 °C a jde o rozdíl měřené hodnoty na obou stranách hraničního pásma vyšších teplot při téže měřené teplotě. Hystereze je závislá na rychlosti ochlazování a na materiálu, z něhož je senzor vyroben.

**Fluktuace** – jde o změny odporu způsobené mechanickými otřesy, popř. teplotními šoky a jeví se jako skokové změny odporu senzoru. Pro nápravu závady může pomoci ohřev senzoru na vyšší teplotu.

**Stárnutí** – jde o nevratný a pro senzor trvale destruktivní proces, na němž se podílejí např. změny v izolačním odporu materiálu nebo chemické složení či koncentrace platiny.

Druhou oblastí ovlivňující vlastnosti snímače souvisí s konstrukcí odporových snímačů [16]. Patří sem zejména tyto vlivy:

**Izolační odpor** – zde je myšlen izolační odpor mezi měřicím obvodem a kovovým obalem, jehož pokles se negativně projevuje ve zvýšení chyby měření tím, že se tento odpor

promítá do celkového měřeného odporu senzoru. Příčinou může být penetrace vlhkosti dovnitř pláště, či mechanické poškození (průraz) pláště.

**Ohřev procházejícím proudem** – jde o další významný zdroj chyb a nejistot, zejména pak u senzorů s vyšší hodnotou základního odporu.

**Odpor vedení** – jedná se zejména o přídavný odpor spojovacího vedení, který se může projevit při velmi dlouhém připojovacím vedení. Obvyklá kompenzace se provádí prostřednictvím 3- vodičového nebo lépe 4- vodičového zapojení.

**Přechodové odpory spojovacích prvků** – patří sem zejména šroubová spojení a kontakty konektorů, kontakty přepínačů apod. Žádoucí jsou samozřejmě minimální přechodové odpory při zachování požadovaných izolačních odporů.

### 2.4.3 Kalibrace termoelektrických senzorů teploty

Podobné principy vzniku chyb a nejistot se projevují také u termoelektrických článků, ale svou roli tu sehrávají některé další faktory [16]. Klíčové oblasti jsou tyto:

**Okolní rušení** – vzhledem k obecně nízké úrovni termoelektrického napětí, které se pohybuje řádově v jednotkách, maximálně desítkách milivoltů, může být velmi znatelný vliv elektromagnetického rušení, nežádoucích kapacitních vazeb, čímž může dojít k významnému zvýšení výsledné nejistoty.

**Časová stabilita** – zásadní roli zde hraje konstrukční a materiálové provedení snímače.

**Spojovací prvky** – vedení je zde vždy zdrojem nejistot a zejména nevhodnou kombinací termočlánku a spojovacího vedení může být měření zatíženo značnou chybou.

**Kolísání srovnávací teploty** – projevuje se v případě, pokud má teplota srovnávacích spojů jinou hodnotu než teplotu udávanou normou, vzniká systematická chyba měření.

## 2.5 Postupy kalibrace a metody vyhodnocení

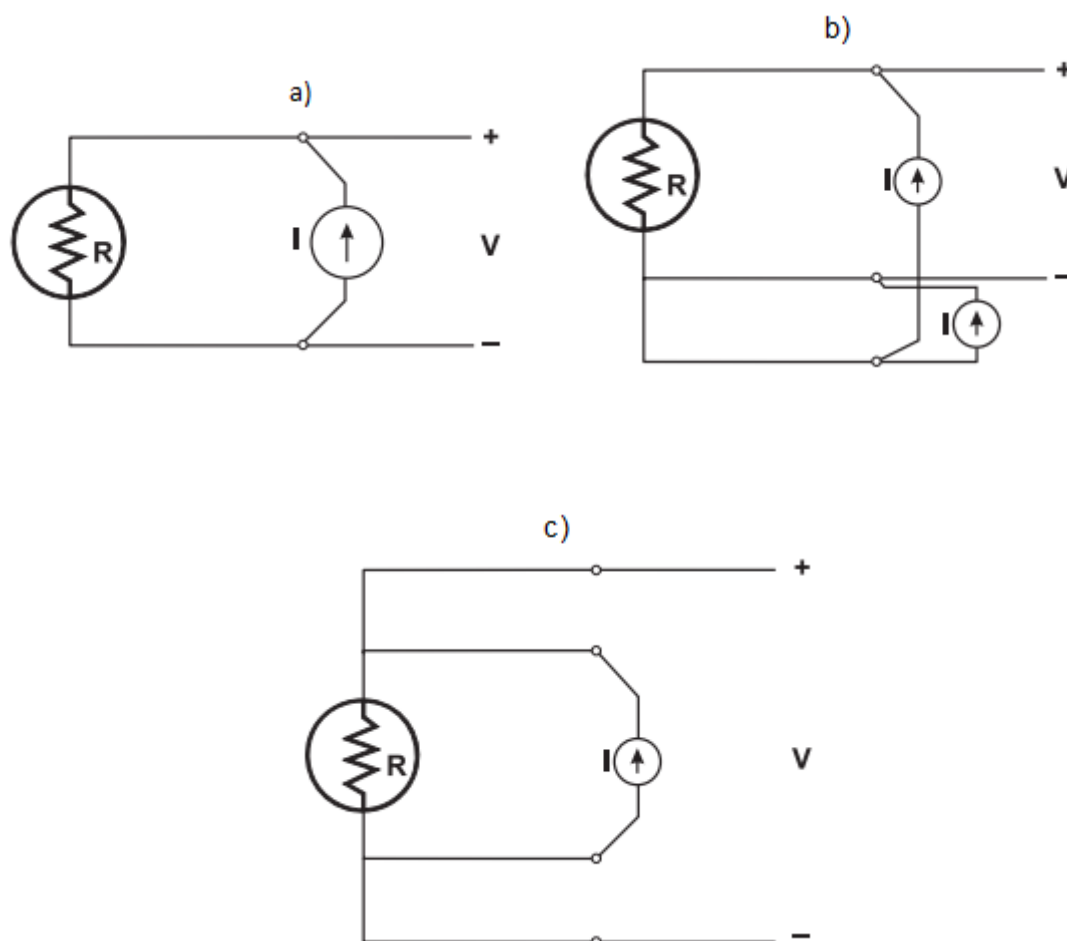
Proces kalibrace pro teplotní senzory, jak už bylo výše uvedeno, je proces při kterém se porovnává testovaný senzor se senzorem standardizovaným a ve většině případů je referenčním senzorem standardizovaný platinový odporový senzor označován zkratkou SPRT nebo-li (Standard Platinum Resistive Thermometer).

### 2.5.1 Proces kalibrace teplotních odporových senzorů

**Charakterizace** – Charakterizace je metoda používána pro kalibraci platinových odporových senzorů se střední až vysokou úrovní přesnosti kalibrace. Touto metodou je při každé kalibraci stanoven nový relativní vztah odporu vůči teplotě. Obecně řečeno tímto typem měření získáme koeficienty a kalibrační tabulku, kde získaná data jsou výsledkem kalibrace a charakterizují daný senzor [17]. Postupuje se v pěti hlavních krocích:

**Krok 1 (umístění senzorů)** – Veškeré teplotní zdroje mají body nestabilit a přechodů. Tyto anomálie v jinak homogenním prostředí se promítají do kalibračních chyb a nejistot. Pro minimalizaci těchto vlivů by měli být senzory umístovány, tak blízko sebe, jak jen je to prakticky možné. V kalibračních vanách, kde se provádí kalibrace, by se senzory měly pozicovat v radiálním vzoru a referenční senzor je umístován doprostřed, tím je zaručena stejná vzdálenost od středu, tedy od referenčního senzoru. Nicméně důležitým aspektem je také horizontální umístění. U horizontálního umístění je velice důležité, aby snímací prvky jednotlivých senzorů byly ve stejné horizontální hladině i navzdory tomu, že senzory jsou různě velké. Mezi další kritérium patří dostatečné ponoření senzoru do lázně. Obecně platí, že dostatečného ponoření senzoru je dosaženo v případě ponoření do hloubky 20-ti násobku průměru stonku plus délka snímacího elementu. Splněním výše uvedených kritérií docílíme, že každý kalibrovaný senzor by měl mít co možná nejvíce identické podmínky pro kalibraci.[17]

**Krok 2 (zapojení senzorů)** – Správné zapojení hraje důležitou roli pro zajištění správné funkcionality senzorů, ale také umožňuje korektní odčítání měřené veličiny. V naprosté většině případů se v praxi využívá tří variant a to zapojení dle počtu vývodů daného senzoru. Zapojení jsou tedy nazývána dvou, tří a čtyř vodičové, viz Obr. 6.



Obr. 6: Schématické zapojení teplotních čidel: a) 2- vodičové zapojení b) 3- vodičové zapojení c) 4- vodičové zapojení.(převzato z [17])

V tomto kroku je nejdůležitější, aby zapojení bylo pevné a v případě 4- vodičového zapojení je potřeba se ujistit především, jestli napájení senzoru je zapojeno správně a nedošlo k záměně s vývody, které jsou určeny pro čtení.

**Krok 3 (Měření referenčního senzoru a stanovení teploty)** – Testování korektnosti referenčního senzoru je nezbytné, jelikož jsou to velmi citlivá zařízení náchylná na otřesy a jiné mechanické poškození. Obecně jsou referenční senzory testovány po převozu, ale také po delší době, kdy senzory nejsou využívány. Ověření správnosti funkce referenčního senzoru a stanovení teploty se provádí pomocí dvou metod. Obě metody zajišťují při správném postupu potenciálně stejnou přesnost výsledků. Metody se od sebe liší hlavně pracností výpočtu a u výběru metody záleží na kalibračním zařízení, které je k dispozici.

První a nejčastěji používaná metoda v kalibračních institutech, kvůli její jednoduchosti, je metoda využívající sofistikovaného čtecího zařízení pro měření teploty,

kteřé je schopno změřit odpor daného senzoru a následně tuto hodnotu přepočítat pomocí kalibračních koeficientů. Kalibrační koeficienty jsou zadávány do čtecího zařízení před měřením. Největší výhodou této metody jsou data, která jsou k operátorovi předávána v reálném čase a zároveň se eliminuje možnost výskytu chyby při přepočítávání. Některé moderní čtecí zařízení jsou schopny data předávat i v grafické podobě, což umožňuje operátorovi určit nejen změřenou teplotu ale i stabilitu senzoru na první pohled. Pomocí této metody se proces měření velice zrychlil a zároveň eliminuje možnost výskytu chyby při nesprávné interpolaci operátora.[17]

Druhá metoda je používána v případě, kdy čtecí zařízení nedokáže poskytnout správný teplotní přepočet z měřeného odporu. Některé čtecí zařízení, zejména digitální multimetry, obvykle neumožňují využití kalibračních koeficientů a nelze je použít přímo pro přesnou kalibraci teploty. V těchto případech se měří odpor a teplota je určena buď pomocí kalibračních tabulek, nebo pomocí výpočetních programů v počítači. Největší nevýhodou této metody je, že po změření odporu se musí hodnoty přepočítat na teplotu. To má vliv na rychlost měření kvůli absenci okamžitých, v reálném čase poskytovaných dat, jak tomu bylo u první metody. Pro interpolaci se využívají tabulky. Jedna je přímo odpor x teplota a druhá tabulka je postavena pomocí odporového poměru [17]. Interpolace změřených dat je znázorněna v tabulce 1 a 2.

Tab. 1: Interpolace z kalibrační tabulky (odpor x teplota) převzato z [17]

t (°C)	R(t) (Ω)	dR/dt(t) (Ω/°C)
400	249,882	0,3514
401	250,2335	0,3513
402	250,5848	0,3512
403	250,936	0,3511
450	267,3108	0,3456
451	267,6564	0,3455
452	268,0019	0,3454
453	268,3472	0,3452

Při interpolaci pomocí kalibrační tabulky (odpor x teplota) se postupuje:

- Referenční sonda naměří 249,9071 Ω
- Určení kam spadá naměřená hodnota v tabulce:  
mezi 249,8820 Ω a 250,2335 Ω, tedy spadá mezi první a druhý řádek v tab.1.
- Odečíst nižší hodnotu z tabulky od změřené hodnoty senzorem:

$$249,9071 \Omega - 249,8820 \Omega = 0,0251 \Omega$$

- Výsledek vydělit sklonem křivky a vyjde teplota:

$$0,0251/0,3514 = 0,0714 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Teplota z dělení se přičte k hodnotě z tabulky a vyjde výsledná teplota:

$$0,0714 + 400 = 400,0714 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tab. 2: Interpolace z kalibrační tabulky (odporový poměr  $W$ ) převzato z [17]

t (°C)	W(t)	dt/dW(t)
300	2,1429223	275,2199
301	2,1465557	275,3075
302	2,150188	275,3951
303	2,1538192	275,4827
350	2,3231801	279,6655
351	2,3267558	279,7559
352	2,3303304	279,8464
353	2,3339037	279,9369

Při interpolaci pomocí kalibrační tabulky (odporový poměr  $W$ ) se postupuje:

- Referenční sonda naměří  $54,75258 \text{ } \Omega$
- Vypočtení hodnoty  $W = (R_t/R_{tpw})$  pro  $R_{tpw} = 25,54964 \text{ } \Omega$ :

$$54,75258 \text{ } \Omega / 25,54964 \text{ } \Omega = 2,1429883$$

- Určení kam spadá vypočtená hodnota  $W$  v tabulce:

mezi 2,1429223 a 2,1465557, tedy spadá mezi první a druhý řádek.

- Odečíst nižší hodnotu z tabulky od vypočtené hodnoty  $W$ :

$$2,1429883 - 2,1429223 = 0,000066$$

- Výsledek vynásobit s doplňkem sklonem křivky a vyjde teplota:

$$0,000066 \cdot 275,2199 = 0,0182^\circ\text{C}$$

- Teplota z násobení se přičte k hodnotě z tabulky a vyjde výsledná teplota:

$$0,0182^\circ\text{C} + 300 \text{ } ^\circ\text{C} = 300,0182 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**Krok 4 (měření testovaných senzorů)** – Vzhledem k tomu, že testované senzory jsou podobné referenčním odporovým senzorům, měření probíhá obdobným způsobem. Pokud se testuje více senzorů najednou pomocí spínačů, musí se zajistit dostatečná doba pro samo zahřátí senzoru, kvůli procházejícímu proudu, než jsou data zaznamenána. Také se musí dát pozor na nastavení rozsahu zdrojového proudu a tím se zabrání změně rozsahu při měření



různě velkých teplot. Obvykle se měření provádí od nejvyšší teploty kalibrace sestupně dolů k nejmenšímu teplotnímu bodu kalibrace. Tento postup se volí z důvodu vyšší přesnosti kalibrace pro výpočet průměrné hodnoty z více měření při stejné teplotě. [17] Způsobů, jak uskutečnit měření referenční i testované sondy, je hned několik a pro zvolení té správné metody se musí uvažovat nad několika body:

- **Přesnost** – Čím je vyžadovaná přesnost měření a kalibrace vyšší, tím více se musejí brát v úvahu následující body při vytváření měřicího postupu.
- **Stabilita teplotního zdroje** – S rostoucí stabilitou teplotního zdroje, roste i čas, po který je možno senzory měřit bez teplotních výkyvů a tedy i bez chyb měření.
- **Počet testovaných senzorů** – Obecně platí, že čím více senzorů bude měřeno, tím déle bude trvat, než se odměří všechny testované senzory a bude možné přikročit k dalšímu teplotnímu bodu.
- **Počet čtecích zařízení** – Velkou roli hraje vybavení laboratoře, které je velmi limitující. Důvodem je cena ale i dostupnost jednotlivých zařízení. Čtecí zařízení jsou však jedním ze základních prvků pro kalibraci odporových teplotních senzorů. Při měření více senzorů najednou velmi záleží na tom, zda referenční sonda bude mít vlastní čtecí zařízení a testované prvky budou připojeny na jiné čtecí zařízení, nebo jsou podmínky laboratoře takové, že je k dispozici pouze jedno čtecí zařízení. [17]
- **Typ čtecího zařízení** – Jak už je uvedeno v kroku 3 záleží, jak moc sofistikované čtecí zařízení bude při měření využíváno. Čtecí zařízení s interní kalkulací, kde tyto senzory dokáží poskytovat data změřené teploty senzorů v reálném čase a některé dokonce i grafické znázornění, totiž velmi urychlují měření a snižují chybovost procesu. [17]
- **Charakteristické vlastnosti jednotlivých teplotních senzorů** – Dalším, velmi důležitým a nezanedbatelným bodem, patří charakteristické vlastnosti senzorů, jako je např.: doba samo-ohřevu senzoru, požadavky na napájení, stabilita a další vlastnosti ovlivňující proces měření.

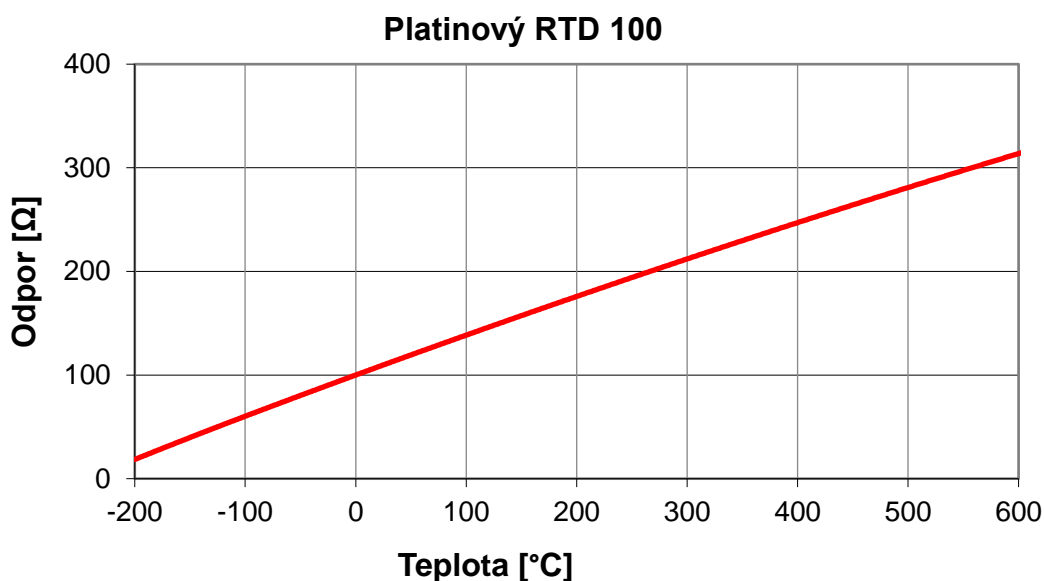
**Krok 5 kalibrace senzorů, zpracování dat** – Kalibrace odporových teplotních senzorů je stavěna na kalibračních bodech. Tyto body jsou nejčastěji udávány výrobcem. Výrobci udávají nejméně tři kalibrační body, které se následně podle typu senzoru a zvolené metody dosazují do rovnic a v rovnicích jsou značeny písmeny A, B, C. Jelikož jde o

konstanty, můžeme se tedy také setkat se značením  $k_a$ ,  $k_b$ ,  $k_c$ . Tyto body charakterizují senzor a jeho závislost odporu na teplotě. [17]

**Kalibrace platinových odporových teplotních senzorů** – Metalické odporové teplotní senzory se vyznačují tím, že zvyšují měrný odpor v poměru k teplotě téměř lineárním způsobem viz. Graf 1. Jejich charakteristiky jsou běžně popsány hodnotou základního odporu a konverzní charakteristikou rovnou 100 při 0 °C pro senzor RTD 100. Popsáno je to rovnicí:

$$R = R_0(1 + k_a \cdot T + k_b \cdot T^2 + \dots) \quad (2.3)$$

Při  $T = 0$  °C se naměřená hodnota  $R$  bude rovnat základní hodnotě  $R_0$ . Tento parametr lze změřit ponořením senzoru do ledové vodní lázně, avšak metalové odporové teplotní senzory jsou vyráběny s relativně těsnými tolerancemi a v praxi tedy lze předpokládat, že jmenovité parametry uváděné výrobcem jsou pro většinu aplikací dostatečně přesné. [17]



Graf 1: RTD 100 závislost odporu na teplotě

Platinové odporové teplotní senzory jsou charakterizovány nejen kalibračními koeficienty, ale také výrobcem uváděným teplotním koeficientem  $\alpha$ . Tento parametr udává jednotkovou změnu odporu na °C. V závislosti na použité slitině platiny a tedy čistotě samotné platiny, se může teplotní koeficient pohybovat od 0,00375 až do 0,003927. Během let organizace zabývající se standardy stanovili několik standardních hodnot pro teplotní koeficient. Pro Evropské standardy se v současnosti používají hodnoty 0,00385. A pro Americké standardy 0,003916. Při použití metalových RTD je potřeba spočítat teplotu ze

změřených hodnot odporu. Nabízí se několik metod, jak přepočtu dosáhnout a to v závislosti na teplotním rozsahu a přesnosti.

### 2.5.2 Metoda ITS-90

První metodou je ITS-90. Tato metoda se využívá při kalibraci SPRT a vysoko kvalitních PRT. Soubor rovnic byl vyvinut předními odborníky na měření teploty v oblasti metrologie, za účelem popisu chování SPRT v závislosti s velmi vysokým stupněm přesnosti v pevných teplotních bodech. ITS-90 používá referenční funkci, která má mnoho výhod před tradičními polynomickými metodami a je preferovanou metodou pro aplikace s velmi vysokou přesností. Následující rovnice znázorňují výpočet poměru odporu a poté odchylku od referenční funkce pro různé rozsahy teplot. [17]

Výpočet poměru odporu:

$$W(T) = \frac{R(T)}{R_{TPW}} \quad (2.4)$$

Kde:  $W(T)$  = poměr odporu při teplotě T v Kelvinech

$R(T)$  = změřený odpor při teplotě T v Kelvinech

$R_{TPW}$  = změřený odpor v trojném bodě vody

Odchylka z ITS-90 referenční funkce:

$$\Delta W(T) = W(T) - W_r(T) \quad (2.5)$$

Kde:  $\Delta W(T)$  = odchylka od referenční funkce

$W(T)$  = poměr odporu při teplotě T v Kelvinech (z rovnice 1)

$W_r(T)$  = referenční hodnota při teplotě T

Dále jsou referenční funkce používané pro specifické teplotní rozsahy. První z nich je využívána pro teplotní rozsah od 13,8033 K do 273,16 K to odpovídá hodnotám od -259,3467 °C do 0,01 °C.

$$\ln(W_r(T)) = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left( \frac{\ln\left(\frac{T}{273,16}\right) + 1,5}{1,5} \right)^i \quad (2.6)$$

Kde:  $W_r(T)$  = referenční hodnota při teplotě T

$A_i$  = koeficienty referenčních funkcí

Druhá funkce je pro teplotní rozsah od 273,15 K do 1234,93 K, což odpovídá rozsahu od 0,00 °C do 961,78 °C

$$W_r(T) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left( \frac{T}{K} - 754.15 \right) \quad (2.7)$$

Kde  $W_r(T)$  = referenční hodnota při teplotě T

$C_i$  = koeficienty referenčních funkcí

Po spočtení referenčních funkcí následují funkce odchylkové. První z nich je pro teplotní rozsah 83,8058 K do 273,16 K odpovídající -189,3442 °C do 0,01 °C.

$$\Delta W_4(T) = a_4 \cdot (W(T) - 1) + b_4 \cdot (W(T) - 1) \cdot \ln(W(T)) \quad (2.8)$$

Kde:  $\Delta W_4(T)$  = vypočtená hodnota odchylky z rovnice 2

$W(T)$  = vypočtená hodnota poměru odporu z rovnice 1

$a_4, b_4$  = výsledný kalibrační koeficienty

Druhá odchylková funkce pro teplotní rozsah od 273,15 K do 692,677 K, což odpovídá rozsahu od 0,00 °C do 419,527 °C

$$\Delta W_8(T) = a_8 \cdot (W(T) - 1 + b_8 \cdot (W(T) - 1))^2 \quad (2.9)$$

Kde:  $\Delta W_8(T)$  = vypočtená hodnota odchylky z rovnice 2

$W(T)$  = vypočtená hodnota poměru odporu z rovnice 1

$a_8, b_8$  = výsledný kalibrační koeficienty

### 2.5.3 Metoda Callendar-Van Dusen

Další metodou s dlouhou tradicí jsou Callendar-Van Dusen rovnice, v textech označovány také jako CVD rovnice. Po mnoho let byla metoda CVD používána pro interpolaci SPRT a PRT a tvořila základ pro teplotní stupnice v letech 1927, 1948 a 1968. Hlavní nevýhodou této metody proti ITS-90 je velké omezení v nastavení přesnosti. Metoda se však hodí pro aplikace, nevyžadující velkou přesnost. Vzhledem k její jednoduchosti, částečně dáno historií, je stále preferovanou metodou při kalibrování průmyslových platinových odporových teplotních senzorů, jinak značených také IPRT a je popsána v následujících rovnicích. [17]

Poměr odporu:

$$W(t) = \frac{R(t)}{R_0} \quad (2.10)$$

Kde:  $W(t)$  = poměr odporu při teplotě  $t$  ve  $^{\circ}\text{C}$

$R(t)$  = změřený odpor při teplotě  $t$  ve  $^{\circ}\text{C}$

$R_0$  = změřený odpor při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$

CVD rovnice:

$$W(t) = 1 + At + Bt^2 + Ct^3 \cdot (t - 100) \quad (2.11)$$

Kde:  $W(t)$  = poměr odporu při teplotě  $t$  ve  $^{\circ}\text{C}$

$A, B, C$  = kalibrační koeficienty

Tato rovnice platí v teplotním rozmezí od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $0^{\circ}\text{C}$ . Pro teploty pohybující od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $850^{\circ}\text{C}$  se rovnice zjednoduší, jelikož koeficient  $C$  se při kladných teplotách rovná nule a rovnice bude mít tvar.

$$W(t) = 1 + At + Bt^2 \quad (2.12)$$

#### 2.5.4 Metoda Polynomická

Polynomy jsou často používaný model fyzikálních jevů. Mají omezené použití s PRT, kvůli absenci poměru odporu, tedy pracují s hodnotou odporu přímo. Problémem je, že přímo odpor není tak stabilní jako poměr odporu a proto použití této metody je velmi limitující. Metodu lze účinně použít na aplikace malých teplotních rozsahů a tam, kde požadavky na přesnost nejsou velké. Rovnice běžného použití polynomu s RTD. [17]

$$t = a + bR + cR^2 + eR^3 \quad (2.13)$$

Kde:  $t$  = teplota ve  $^{\circ}\text{C}$

$R$  = odpor

$a, b, c, d$  = kalibrační koeficienty

#### 2.5.5 Kalibrace Termistorů

Termistory mají výhodu vysoké senzitivity vůči změně teploty. Na druhou stranu ale mají také velkou nevýhodu a tou je velká nelinearita charakteristiky. Charakteristika běžných NTC termistorů a rozdíl proti niklovým a platinovým senzorům je znázorněna v Grafu 2.

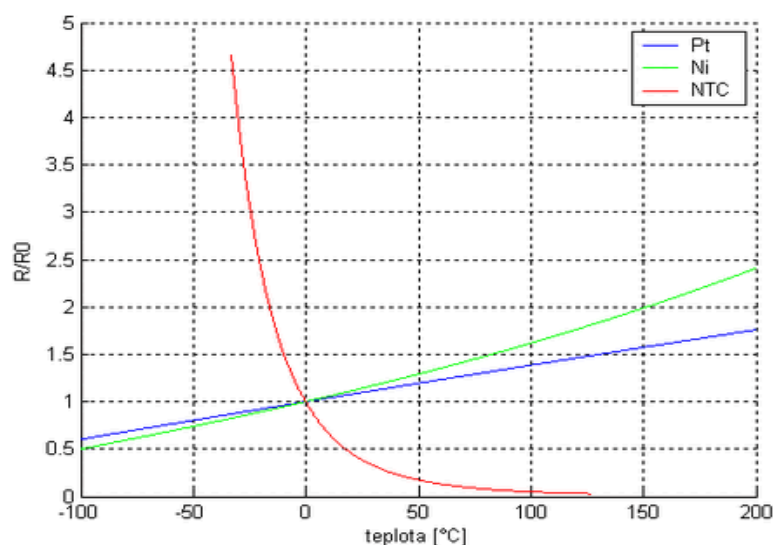
Nelinearitou je odečítání teploty ze získané hodnoty odporu složité. [18] Pro uskutečnění přepočtu se nejčastěji používá Steinhart-Hartova rovnice:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3 \quad (2.14)$$

Kde:  $T$  = teplota v Kelvinech

$R$  = odpor

$A, B, C$  = kalibrační koeficienty



Graf 2: Teplotní závislost odporových senzorů (Pt, Ni, NTC)

Koeficienty jsou často udávány výrobcem, ale může nastat situace, kdy operátor chce ověřit nebo získat tyto kalibrační koeficienty. Pro získání koeficientů je nezbytné změřit alespoň tři přesné hodnoty odporu při třech známých teplotách. [18] Nejčastěji se používají hodnoty trojného bodu vody a to tedy konkrétně hodnoty 0 °C pro ledovou vodu, 25 °C pro pokojovou teplotu a 100 °C odpovídající teplotě varu. Teplota v rovnicích musí být zadávána v Kelvinech. Rovnice, do kterých se dosazuje, jsou Steinhart-Hartovi polynomy a soustava rovnic pro vypočet tří koeficientů, vypadá následovně:

$$\begin{cases} A + (\ln R_1)B + (\ln R_1)^3 C = \frac{1}{T_1} \\ A + (\ln R_2)B + (\ln R_2)^3 C = \frac{1}{T_2} \\ A + (\ln R_3)B + (\ln R_3)^3 C = \frac{1}{T_3} \end{cases}$$

Po dosažení změřených odporových hodnot při zvolených třech konstantních hodnot teploty, se následně vytvoří tři rovnice o třech neznámých. Vyřešením těchto rovnic jsou vypočteny námi žádané kalibrační koeficienty. [19]

Pro přesnější charakterizaci kalibrační křivky lze použít rozšířené Steinhart-Hartovi rovnice:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C (\ln(R))^2 + D (\ln(R))^3 \quad (2.15)$$

Kde:  $T$  = teplota v Kelvinech

$R$  = odpor

$A, B, C, D$  = kalibrační koeficienty

Při zvolení uvedené rozšířené rovnice se dá očekávat, že pro určení kalibračních koeficientů, bude třeba řešit soustavu čtyř rovnic o čtyř neznámých. Touto rovnicí se řídí například společnost Vishay u svých termistorů. Steinhart-Hartova rovnice není zdaleka jedinou funkcí pro vytvoření regrese kalibračních charakteristik, pro nalezení vhodné regresní funkce lze použít stránky [xuru.org](http://xuru.org).

### 3 Referenční senzory

Jak už bylo uvedeno v předešlých kapitolách, kalibrace elektrických odporových teplotních čidel využívá výhradně metody komparace. Jde o metodu, kde je zapotřebí mít přesnější odporový senzor, než jsou senzory podléhající kalibraci. Tyto senzory jsou nazývány etalonem, plnící funkci reference.

#### 3.1 Výběr referenčního senzoru

Výběr referenčního senzoru je jeden z nejdůležitějších aspektů při zakládání laboratoře, jelikož referenční senzor hraje velmi podstatnou roli při přesnosti a možnostech kalibrování elektrických odporových senzorů teploty. Předtím než dojde k výběru referenčního senzoru, se musí stanovit několik faktorů ohledně ostatního vybavení laboratoře.

Jedním z faktorů, který ovlivňuje výběr referenčního senzoru je tepelný zdroj. Zdrojem teploty nejčastěji bývají plynné látky nebo kapalinové média (voda, silikonové oleje). S tímto faktorem souvisí také výběr zařízení udržující médium na požadované teplotě. Nejčastěji jsou to pece, využívající plynné médium nebo kapalinové lázně. Při výběru teplotního zdroje je často potřeba vybrat nejlepší kompromis mezi přesností a dalšími technickými požadavky. [20] Porovnání několika typů teplotních zdrojů proti běžným technickým požadavkům si lze prohlédnout v Tab. 3.

Tab. 3: Tepelné zdroje převzato z[20]

Technické požadavky	Pevný bod	Lázeň	Metrologické pece	Micro lázně	Suché pece
Přesnost $\pm 0,001$ °C do $\pm 0,01$ °C	X				
Přesnost $\pm 0,01$ °C do $\pm 0,1$ °C		X	X		
Přesnost $\pm 0,1$ °C do $\pm 1$ °C				X	X
Kalibrace možná v terénu			X	X	X
Kapalinové médium		X		X	
Rychlé dosažení teploty			X	X	X
Kalibrace různých velikostí a tvarů		X		X	
Automatická kalibrace	X	X	X	X	X



### 3.1.1 Dělení platinových referenčních senzorů

Nyní lze přistoupit k výběru referenčního senzoru. Referenční platinové senzory se dělí podle požadovaných standardů na HTSPRT (High temperature standard platinum resistance thermometers, SPRT a PRT.

První skupina je nazývána v praxi jako Standard prvního řádu, do kterého patří senzory HTSPRT a SPRT. Senzory řadící se do této skupiny jsou špičkou mezi etalony pro kalibraci teplotních čidel a jsou využívány výhradně v laboratořích. Mezi charakteristické vlastnosti těchto senzorů patří pokrytí velké části stupnice ITS-90, která je v oblasti kalibrace a měření teploty celosvětově uznávána a udává jednotný celosvětový standard. Dalšími vlastnostmi je velmi vysoká přesnost a stabilita měření s velmi nízkým driftem a tedy dlouholetou stabilitou. Nicméně nedílnou součástí těchto senzorů a tedy nevýhodou je velká křehkost, kde i malý náraz dokáže teplotní senzor zničit.[20]

Pokud je potřeba kalibrovat průmyslové senzory, kde není potřeba měřit teplotu na tisíce °C a není ani tak velký rozpočet pro vytvoření laboratoře první třídy, potom je tu skupina druhá, kterou je standard druhého řádu. Do této skupiny patří senzory PRT. Senzory PRT mají větší odolnost, nejsou tak křehké a to na úkor nejvyšší možné přesnosti, kterou vlastní senzory SPRT. Z toho důvodu lze tyto senzory používat i při průmyslových kalibracích běžných RTD nebo termistorů.[20]

Při výběru senzoru velmi záleží na teplotním rozsahu a požadované přesnosti aplikace. Mezi další proměnné při výběru referenčního senzoru jsou rozměry (délka, průměr) a robustnost daného senzoru. Obecně u platinových referenčních senzorů platí, že čím více robustný senzor je, tím se snižují nároky na přesnost. V Tab. 4 a 5 lze vidět přehled základních možností referenčních senzorů. Tabulka by měla pomoci při rozhodování a výběru správného senzoru.[20]

Tab. 4: Typy referenčních senzorů (Rozsah)(převzato z [20])

Technické požadavky	Termistor	PRT	SPRT	HTSPRT	Termočlánek
Rozsah					
0 °C do 100 °C	X	X	X		
-200 °C do 660 °C		X	X		
0 °C do 961 °C				X	X
0 °C do 1450 °C					X

Tab. 5: Typy referenčních senzorů (Přesnost) (převzato z [20])

Přesnost					
$\pm 0,001 \text{ }^\circ\text{C}$ do $\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$	X		X	X	
$\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ do $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$		X			
$\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ do $\pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$					X

### 3.2 Přehled platinových referenčních senzorů teploty

Tato část se zaměřuje na vytvoření přehledu referenčních odporových platinových teplotních senzorů, které se průmyslově využívají jako etalony pro kalibraci, ať už v laboratorních podmínkách, nebo přímo při kalibraci v průmyslu.

Vytvoření přehledu referenčních odporových senzorů teploty bylo zpracováno v tabulkovém provedení. V tabulce jsou zahrnuty senzory s jejich hlavními specifikacemi, byly čerpány ze stránek výrobců a datasheetů. Senzory jsou v tabulce děleny dle standardů na Primární standard, kde jsou HTSPRT a SPRT, dále na sekundární standard obsahující senzory PRT a poslední skupinou jsou precizní IPRT senzory. Mezi charakteristické parametry, které lze v tabulce k jednotlivým senzorům dohledat patří teplotní rozsah, materiál těla senzoru, nominální hodnota odporu, drift, napájecí proud, třídu přesnosti dle IEC a neposledně také rozměry senzoru jako je průměr a délka senzoru.



Obr. 7: Ukázka vzhledu referenčního senzoru (převzato z[20])

Mezi přední světové výrobce etalonů se řadí Americké společnosti Fluke a AccuMac. V Evropském zastoupení je to potom Anglická společnost Isotech. Všechny jmenované společnosti uvádějí, že mají dlouholeté praktické zkušenosti. Zejména společnost Fluke má velkou databázi dokumentů souvisejících s měřením teploty a kalibrace teplotních čidel.

Pro vytvoření komplexního přehledu bylo nutné kontaktovat všechny výše zmíněné společnosti a vyžádat si dodatečné informace o jednotlivých senzorech. U skupiny SPRT si lze povšimnout, že chybí některé ze specifikací jako je cena, přesnost nebo odezva. Tyto

údaje nebyli společností poskytnuty. Cena u senzorů je pouze orientační, jelikož byla získána na zahraničních internetových e-shopech. Výrobci cenu neuvádějí, ale v případě kdy si již vyberete konkrétní typ senzoru se všemi doplňujícími specifikacemi, jako je zakončení kabelů, pouzdro pro samotný senzor, nebo případně rozměrové hodnoty, potom společnost zašle konkrétní cenovou nabídku. Z tabulky je patrné, že všechny uvedené senzory mají čtyři vodiče. A to z důvodu potřeby velké přesnosti měření a přesnosti senzorů samotných, kde 4- vodičové zapojení je esenciální.

Uvedená tabulka je ukázkou části senzorů první třídy, tedy senzorů HTSPR a SPRT, s hlavními specifikacemi. Kompletní tabulku všech nabízených etalonových senzorů se všemi získanými informacemi k jednotlivým senzorům si lze prohlédnout v příloze.

Tab. 6: Ukázka části přehledové tabulky (více v příloze)

společnost	název	od [°C]	do [°C]	materiál	Nom. odpor [Ω]	vodiče	drift	Proud [mA]	r [mm]	Délka [mm]
Fluke	5681	-200	670	křemíkové sklo	25,5	4	$\pm 0,002^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	7	520
	5683	-200	480	křemíkové sklo	25,5	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	7	520
	5684	0	1070	křemíkové sklo	0,25	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/100$ hodin	14,14	7	680
	5685	0	1070	křemíkové sklo	2,5	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/100$ hodin	5	7	680
	5686 (kapsle)	-260	232	sklo	25,5	4	$\pm 0,005^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	5,8	56
	5698	-200	670	křemíkové sklo	25,5	4	$\pm 0,006^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	7	485
	5699	-200	670	slitina hliníku	25,5	4	$\pm 0,008^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	5,56	482
Isotech	670SQ	-200	670; 550	křemíkové sklo	25,5; 100	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	0,5; 1	7,5	480, 650
	670SH	-80	670; 550	metal	25,5; 100	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	0,5; 1	6	480, 650
	670 SL	-200	165	metal	25,5	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	0,5; 1	6	480
AccuMac	AM1950	-200	500	křemíkové sklo	25	4	$\pm 0,004^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	7	480
	AM1960	-200	670	křemíkové sklo	25	4	$\pm 0,005^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	7	500
	AM1880	-200	670	metal	25,5	4	$\pm 0,006^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	5,56	500
	AM 1968 (kapsle)	-260	100	platina	25	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	7,5	60
	AM 1850	-200	500	slitina hliníku	25; 100	4	$\pm 0,002^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	6,35	480
	AM 1860	-200	670	slitina hliníku	26; 100	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	6,35	500

## 4 Praktická část

Praktická část této diplomové práce se zabývá ověřením zvoleného kalibračního postupu a benefitů, které tento postup dokáže v praxi přinést. Jako kalibrační prvky byli zvoleny termistory od společností Vishay a TDK, proto se celá praktická část práce zaměřuje výhradně na kalibraci termistorů, ačkoliv postupy a metodika kalibrace jsou velmi obdobné jako při kalibraci PRT senzorů.

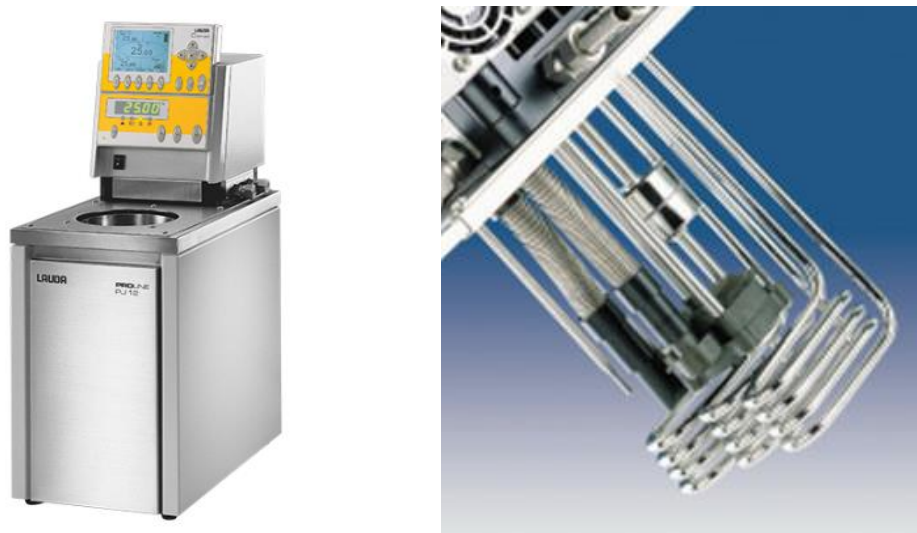
### 4.1 Seznámení s laboratoří

Správný postup a metodika kalibrace jde ruku v ruce s vybavením laboratoře. Pro uskutečnění kalibrace senzorů je tedy laboratoř jedním z mnoha limitujících hledisek cílové požadované přesnosti a preciznosti měření. Při kalibraci termistorů se pracovalo s vybavením, které poskytla Katedra technologií a měření. Laboratoř se skládala z kalibrační lázně Lauda PJL12 s rozšířením o Command panel a chladicí zařízení DLK 45, též od společnosti Lauda. Nezbytnou součástí kalibrační laboratoře je zajisté odečítání odporové hodnoty kalibrovaných termistorů, kterou odečítal digitální multimetr (dále jen DMM). Jednalo o DMM Keithley 2701 a rozšiřující multiplexní kartu Keithley 7708 dovolující až 40-ti kanálové měření. Předmětem kalibrace byly běžné průmyslové termistory pro měření teploty od společnosti Vishay a TDK ve jmenovitých hodnotách 100 k $\Omega$ , 220 k $\Omega$  a 470 k $\Omega$ .

#### 4.1.1 Kalibrační lázeň

Kalibrační lázeň Lauda PJL12 je prvním stavebním prvkem laboratoře disponující 3,6 kW odběru energie, z níž 3,5 kW je vyhraněno na výkon ohřívače. Lázeň dokáže pojmout až 13,5 L kapalného média, které proudí s tlakem 0,8 bar a maximálním průtokem 25 L za min. Vstup lázně má průměr 120 mm s hloubkou 320 mm, avšak maximální použitelná hloubka lázně je 300 mm. Tyto parametry jsou limitující pro případný správný výběr externího referenčního senzoru. Lázeň podporuje připojení externího referenčního senzoru pomocí konektoru LEMO. Referenční senzory s konektorem LEMO lze objednat pouze od společnosti Lauda. Obchodním zástupcem společnosti Lauda pro český trh je společnost Centec. V případě použití jiného externího senzoru je nutné mít k dispozici multimetr určený pro 4- vodičové měření odporových teplotních senzorů. Externí referenční senzor není podmínkou, jelikož samotná lázeň disponuje dvěma interními Pt100 senzory dle normy ČSN EN 60751 s třídou přesnosti B odpovídající toleranci  $\pm (0,3 + 0,005 |t|)$  °C v teplotním rozsahu od -196 °C až do 660°C, což s velkou rezervou spadá do rozsahu

kalibrační lázně. Jako další velmi důležitý parametr je teplotní rozsah lázně uváděný společností Lauda v rozmezí od 30 °C do 300 °C, s teplotní stabilitou  $\pm 0,01$  K.



Obr. 8: vzhled celé lázně (vlevo), ústrojí a interní referenční sondy (vpravo). (převzato z [21])

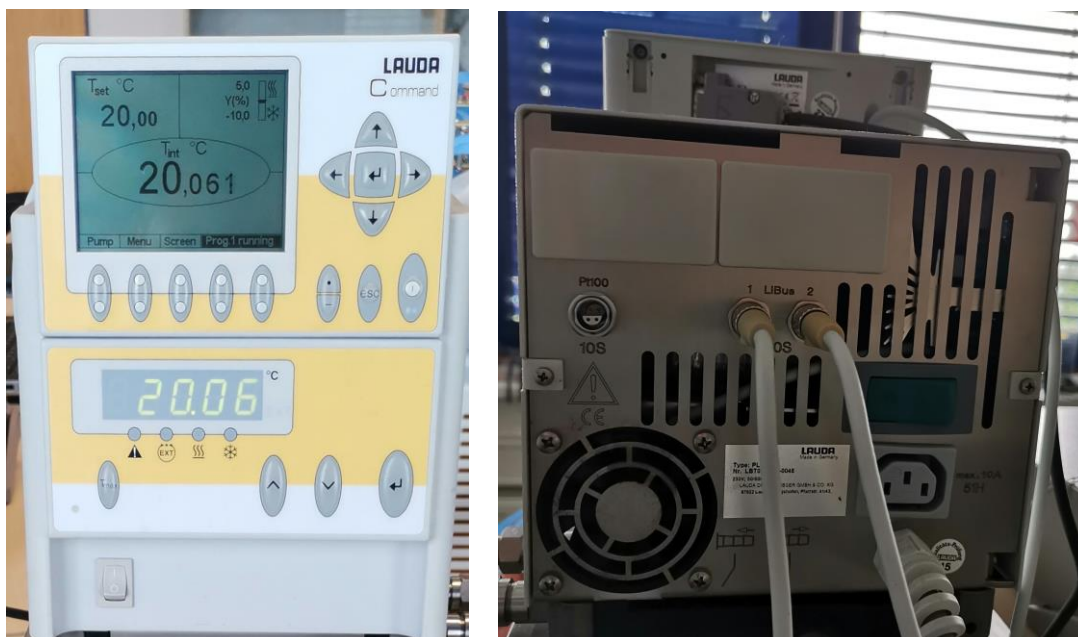
Pro dosažení nižších teplotních hodnot než je 30 °C, umožňuje lázeň rozšíření o průtokový chladič DLK 45, díky kterému lázeň zvětší svůj teplotní rozsah na -40 °C až 300 °C. Chladicí výkon tohoto zařízení je 1,05 kW při teplotě 20 °C. Spotřeba tohoto zařízení je udávána 0,9 kW. Další výhodou tohoto rozšíření je zaručení optimální teplotní stability bez nežádoucí fluktuace teploty. Toto velmi usnadňuje práci v prostředích s velkými fluktuacemi okolních teplot. Pro zaručení správného přechodu tepla a zajištění co největší homogenity prostředí byl použit silikonový olej Krylo 20, s rozsahem teplotního zatížení od -20 °C do 170 °C.



Obr. 9: pohled do pracovního prostoru kalibrační lázně se silikonovým olejem (vlevo), chladičí jednotka DLK 45 (vpravo). (převzato z [22])

Dalším rozšířením je Command panel zajišťující dálkové ovládání lázně s velkým displejem zobrazujícím např.: aktuální teplotu lázně, cílovou teplotu, teplotu externího

senzoru, případně nastavení pumpy nebo volitelným zobrazením zaznamenávaných dat. Dále displej slouží k nastavení různých teplotních profilů apod. Command panel byl připojen přes rozhraní USB k PC, s programem WinTherm. Program WinTherm je definován jako Windows-Based Thermal Modeling Tool v překladu Nástroj pro tepelné modelování. Jak z názvu vyplývá tento program je prodlouženou rukou Command panelu fungující na operačním systému Windows. Výhodou tohoto programu je ovládání lázně dálkově a mimo jiné i možnost vytváření a spouštění teplotních profilů, které jsou obsáhlejší a nevejdou se do paměti Command panelu.



Obr. 10: Command panel (vlevo), řídicí jednotka (vpravo)

#### 4.1.2 Digitální multimetr

Pro měření odporu termistorů byl použit DMM Keithley 2701. Tento DMM je schopen měřit napětí (DC a AC), proud (DC a AC), odpor (2- nebo 4- vodičově), teplotu (termočlánek, termistoru a 4- vodičově RTD), frekvenci, periodu a kontinuitu vodičů. Přesnost systému je 6 a půl digitu. DMM disponuje dvěma sloty pro rozšiřující karty řady 7700. V naší laboratoři byla použita 40-kanálová diferenciální multiplexní rozšiřující karta 7708, zajišťující přepínání mezi jednotlivými kanály. Pomocí této karty lze tedy měřit 40 termistorů 2- vodičově, nebo 20 termistorů 4- vodičově. Toto omezení je zapříčiněno využitím vždy dvou kanálů pro jeden termistor v případě 4- vodičového měření odporu.





Obr. 11: DMM Keithley 2701 (vlevo), Pohled zezadu na DMM s nainstalovanou multiplexní kartou 7708 (vpravo). (převzato z [23])

Samotný DMM s rozšiřující kartou byl připojen pomocí ethernetového rozhraní k PC, s ovládacím programem Keithley KickStart. Ten zajišťuje intuitivní vytváření měřicích profilů a hlavně jednoduchý záznam měřených hodnot v reálném čase s možností exportu dat v tabulkovém formátu.



Obr. 12: Rozšiřující karta Keithley 7708 (vlevo), termistory na svorkovnici (vpravo). (převzato z [24])

#### 4.1.3 Kalibrované termistory

Termistory použité k ověření metodiky a postupu kalibrace byli zakoupeny od společností Vishay série NTCLE100E3 a TDK série B57164K. Využilo se běžně dostupných termistorů s nominální hodnotou odporu 100 k $\Omega$ , 220 k $\Omega$  a 470 k $\Omega$ , při teplotě 25 °C, s tolerancí odporu  $\pm 5$  % v radiálním provedení koncovek. Rozsah provozní teploty pro termistory Vishay je v rozsahu od -40 °C do 125 °C, u termistorů TDK potom od -55 °C do 125 °C.

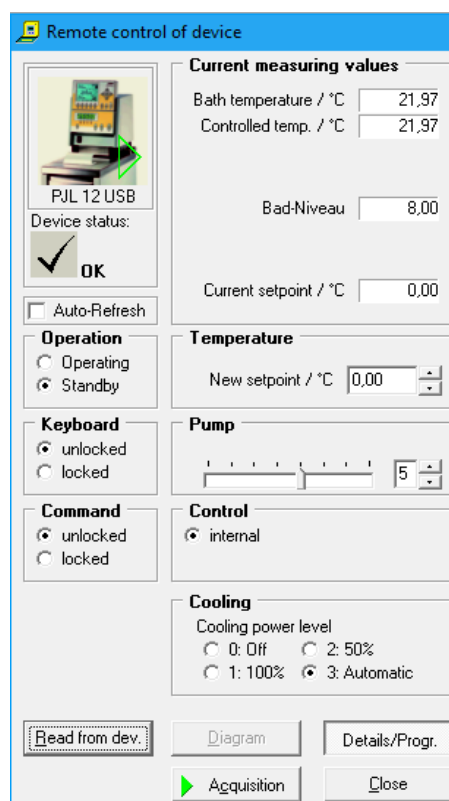
## 4.2 Praktický postup a práce s daty

Postup kalibrace jde ruku v ruce s nastavením a ověřením profilu a samotného měřicího systému pro následné správné získání dat z měření. Tato kapitola se tedy zaměří na správné nastavení popsaného vybavení, uvedeného v předchozí kapitole, popíše celý

postup měření a vysvětlí, jakým způsobem se dále nakládalo s daty ke konečnému výsledku kalibrace. Na úvod je potřebné zmínit, že veškerá měření probíhala v běžných pokojových teplotách, avšak místnost nebyla vybavena klimatizací. Je tedy možné, že během probíhajícího měření mohlo dojít k fluktuacím teplot. Toto kritérium nebylo v rámci vyhodnocování výsledků zohledněno, z předpokladu nevýznamného ovlivnění lázně.

#### 4.2.1 Vytvoření profilu v programu WinTherm

K lázním verze Lauda Proline Edition je poskytován program WinTherm vytvořený pro pohodlné nastavení lázně, vytváření profilů a zaznamenávání dat přímo v PC. Po nainstalování programu do počítače a propojení Command panelu s PC, v našem případě realizovaném pomocí USB rozhraní, se přes lištu *File*, kde je nám nabídnuta možnost *Add device* přidá připojené zařízení. Za předpokladu, že je lázeň zapnutá, vytvoří se okno s dálkovým ovládáním lázně (viz Obr. 13). Zde si lze povšimnout různých běžných informací teploty a nastavení lázně. Mezi které patří např.: přepínání lázně mezi *Standby* a *Operating*, upravování úrovně pumpy, nastavení teplotního bodu, nebo lze měnit nastavení výkonosti DLK zařízení pro chlazení. V případě, je-li připojena externí referenční sonda, přibude v nastavení *Control* u možnosti *internal* ještě možnost *external*. Toto přepínací nastavení určuje, dle jakých hodnot sondy bude lázeň regulaci provádět. Tlačítko *Acquisition* slouží pro zaznamenávání dat a pokud je zaznamenávání zapnuté, zpřístupní se tlačítko *Diagram*, které otevře další okno s grafickým znázorněním v reálném čase, viz Obr. 18. Ve většině případů se kalibrace v takovýchto lázních nedrží pouze jednoho nastaveného teplotního bodu, ale je třeba vytvářet teplotní profily pro proměření charakteristik kalibrovaného zařízení. K tomu slouží rozšířené nastavení, které jde otevřít pomocí tlačítka *Details/Progr.* Použitím tohoto tlačítka se otevře okno se čtyřmi dalšími záložkami s mnoha možnostmi.



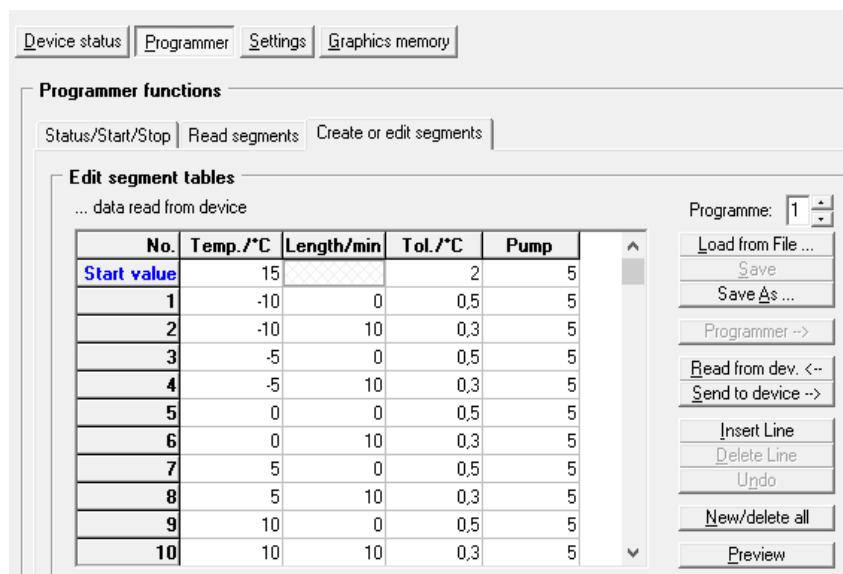
Obr. 13: Okno dálkového ovládání



První záložkou je *Device status*, poskytující informace o správnosti zapojení a používané verze kalibrační lázně. Tato záložka je pouze informativní a nelze zde nic konkrétního nastavovat.

Druhou záložkou je *Programmer*, obsahující další tři podokna. Prvním je *Status/Start/Stop*, jak už jméno napovídá, jedná se o podokno, kde lze spouštět teplotní profily. Lze si vybrat mezi spouštěním profilu ze zařízení nebo přímo z programu WinTherm. Druhým podoknem je *Read segments* sloužící pro načtení konkrétního teplotního profilu. Poslední a nejzajímavější je podokno této záložky *Creat or edit segmet*. Zde lze vytvářet teplotní profily, jeden takový lze vidět na Obr. 14. Nejprve v rozbalítku *Programme* se zvolí pozice, kam se bude vytvořený teplotní profil ukládat. V našem případě je to pozice 1. Profil vždy začíná prvním předdefinovaným řádkem nazvaným *Start value*, kde nelze nastavit dobu trvání tohoto skoku, avšak je možnost upravit sloupec *Tempeature*, *Tolerance* a *Pump*, teplota a tolerance se udává ve °C a délka skoku potom v minutách. Pro tvorbu profilu se musí přidat řádky, pomocí tlačítka *Insert Line*. Při tvoření teplotního profilu se doporučuje pro jeden teplotní skok udělat dva řádky. První sloužící pro dynamickou část a druhý pro ustálenou

část. To se dělá za předpokladu, že je potřeba fixní doba ustálené části. Což v praxi znamená, že dynamické části se stanoví čas pro ustálení regulace na nastavenou hodnotu, běžně 1 až 3 minuty a poté se teprve



Obr. 14 Ukázka profilu

přepne na další krok, kde už je ustálená požadovaná hodnota teploty a můžeme si zvolit časové omezení pro měření teplotního skoku. Obecně se nastavuje 10 až 30 minut. V našem případě je čas dynamické části nastaven na 0, což znamená, že jakmile lázeň dosáhne požadované teploty v nastavené toleranci, ihned se přepne na další krok, kterým je ustálená část. Je tedy nutné s tímto faktem počítat při práci s naměřenými hodnotami. Lze očekávat, že čas ustálené části nebude stejný s nastavenou hodnotou. Vytvořený teplotní profil lze

uložit do souboru tlačítkem *Save As...*, nebo profil poslat do paměti Command panelu tlačítkem *Send to device*. Při posílání profilu do zařízení je nutné dbát zvýšené opatrnosti, protože pokud už na dané pozici v zařízení je uložen nějaký profil, bude po poslání našeho profilu nenávratně ztracen, tzn. přepsán. Uložené profily ze zařízení lze stáhnout pomocí tlačítka *Read from device* a případně uložit do PC, nebo se musí zvolit jiná pozice v paměti. Námí používaná lázeň disponuje šesti paměťovými pozicemi.

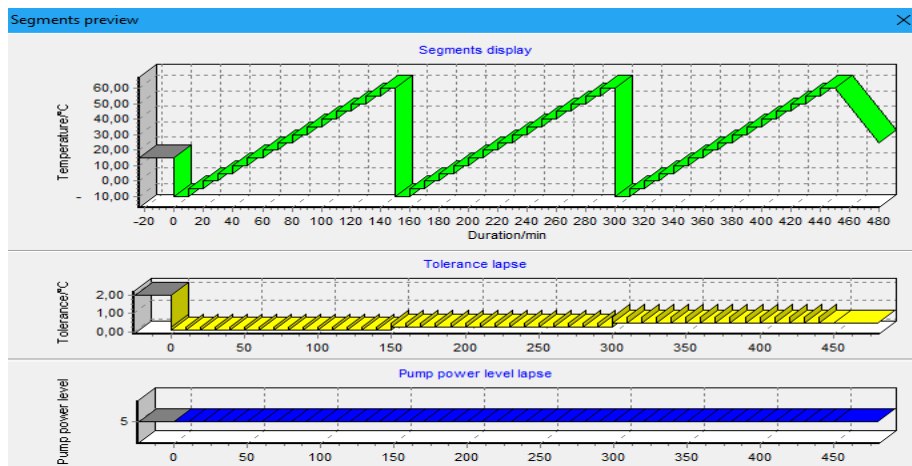
Při praktické činnosti bylo potřeba otestovat komplexní profil a nastal problém při posílání profilu do zařízení. Problém spočíval v nedostatku paměti. Profil měl celkem 90 řádků, ale do paměti zařízení se vešlo pouze 72 viz Obr. 15 . Nabízí se možnost spouštění

teplotního profilu přímo z programu, avšak při probíhajícím teplotním profilu došlo ze 3 pokusů ke dvěma selháním. Bez žádných chyb a errorů program neposlal další krok, a tudíž se lázeň zasekla na předchozím kroku, pokaždé v jiné části profilu. Na základě této

No.	Temp./°C	Length/min	Tol./°C	Pump
62	-10	10	0,5	5
63	-5	0	0,8	5
64	-5	10	0,5	5
65	0	0	0,8	5
66	0	10	0,5	5
67	5	0	0,8	5
68	5	10	0,5	5
69	10	0	0,8	5
70	10	10	0,5	5
71	15	0	0,8	5
72	15	10	0,5	5

Obr. 15: maximální počet řádků v profilu uložených v interní paměti

zkušenosti tedy doporučuji složité profily rozdělit tak, aby se vešly do paměti a poté spouštět profily ze zařízení. U takto spuštěných profilů nikdy nedošlo k podobným problémům. Po vytvoření profilu je zde možnost prohlédnout si strukturu profilu pomocí tlačítka *Preview*, který může vypadat např. jako na Obr. 16.



Obr. 16: Ukázka vytvořeného teplotního profilu

Třetí záložkou je *Settings* obsahující také tři podokna. Prvním je *Acquisition channels*. V tomto podokně týkajícího se zaznamenávání dat lze zaškrtnout veličiny, které chcete zaznamenávat. Možnosti, které se nabízejí, jsou: nastavený teplotní bod, teplota lázně, případně teplota z externího senzoru, úroveň nastavení pumpy nebo nastavení síly chlazení a časový záznam, který je vždy z logického důvodu zapnutý. Dalším podoknem je *PID control parameters*, kde se nastavují parametry PID regulátoru. V našem případě byly použity hodnoty doporučené, tyto empirické hodnoty PID regulátoru byly získány z dlouhodobého testování kalibrační lázně, viz Obr. 17. PID regulátor se nastavoval pouze v části *internal*, kvůli absenci externího referenčního senzoru.

The screenshot shows a software interface for configuring PID control parameters. The window title is "Device settings / control parameters". At the top, there are three tabs: "Acquisition channels", "PID control parameters" (which is selected), and "Temperature limits". The "PID control parameters" section is divided into three sub-sections:

- PID control parameters (internal):** Contains four input fields:  $X_p$  / °C (13,00),  $T_v$  / sec (18,00),  $T_n$  / sec (80,00), and  $T_d$  / sec (1,80).
- PID control parameters (external):** Contains four input fields:  $X_p$  (ext.) / °C (2,00),  $T_v$  (ext.) / sec (231,00),  $T_n$  (ext.) / sec (300,00), and  $T_d$  (ext.) / sec (23,10).
- PID control parameters (cascade):** Contains one input field:  $X_p$  (fol.) / °C (7,00).

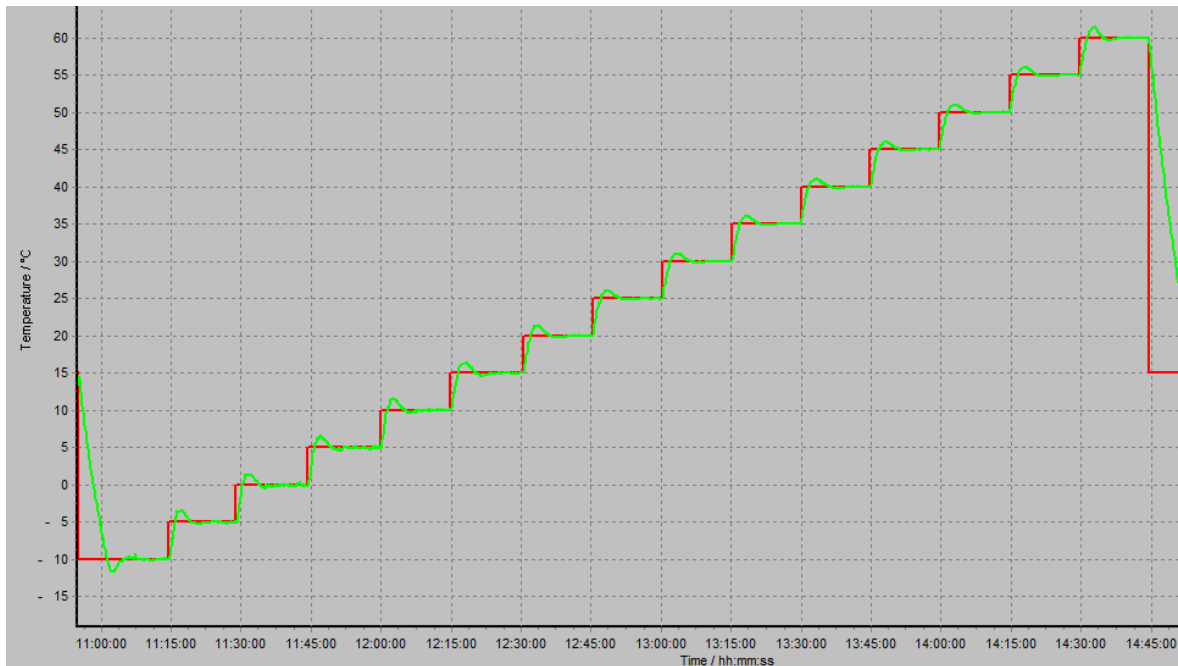
Below these sections, there is a "PropE" input field with the value 30. At the bottom right, there is a button labeled "Save control parameter settings".

Obr. 17: nastavený PID regulátor

Třetím podoknem jsou *Temperature limits* umožňující nastavení teplotního offsetu a kritických hodnot, kterých dokáže lázeň dosáhnout. Tyto hodnoty se hodí v případě, kdy se využívá kapalného média, které nepokrývá celý rozsah kalibrační lázně a je tedy třeba stanovit limitující pracovní teploty, aby se používané médium nezhodnocovalo, případně nepoškodilo měřené vybavení.

Poslední a čtvrtou záložkou je *Graphics memory*. V této záložce je možné si prohlížet data uložená a změřená Command panelem. V mém případě jsem tuto funkci nepoužíval.

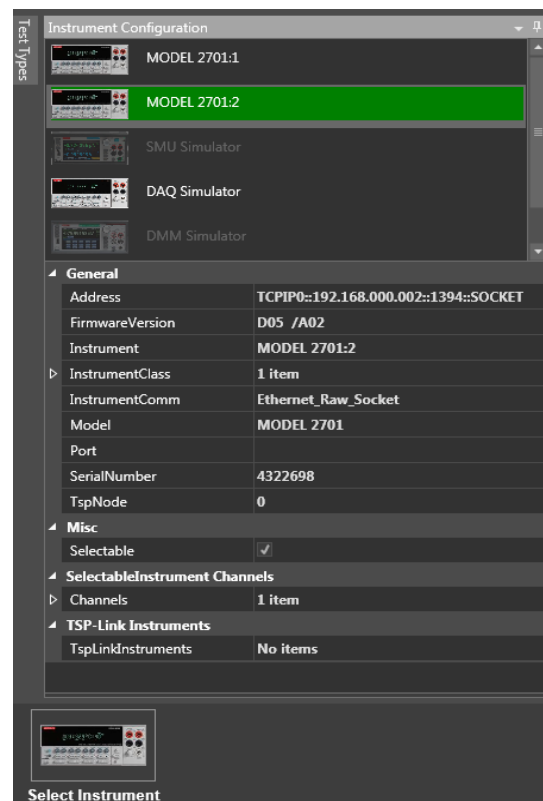
Změřená data lze z diagramu následně uložit do souboru Excel.



Obr. 18: Ukázka diagramu (červeně: nastavená hodnota), (zeleně: teplota lázně), (modrá: pouze v případě měření teploty za pomoci externího referenčního senzoru)

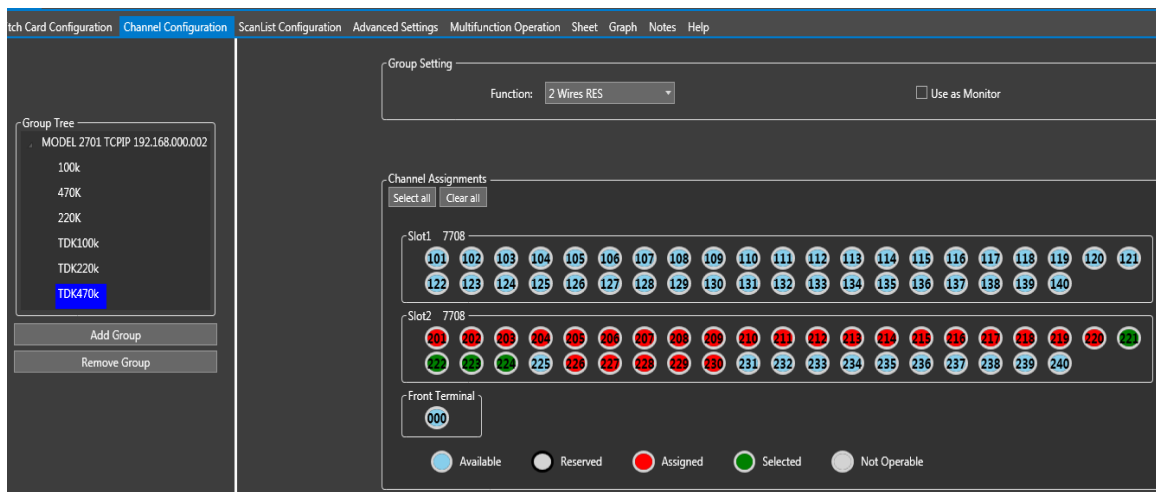
#### 4.2.2 Vytvoření profilu v programu KickStart

Zaznamenávání dat v reálném čase, je velmi důležitým aspektem měření. Pro multimetry Keitley je společností poskytován program KickStart, který mimo jiných funkcí umí i požadovaný tzv. data logging. Před spuštěním programu je třeba mít zapnutý DMM. Jakmile je tato podmínka splněna a DMM správně komunikuje přes ethernetové rozhraní lze vytvořit měřící profil. Pro vytvoření nového profilu je tlačítko *New*, které přidá tři velké ikony na spodní část okna. Jednou z nich je *Select Instrument*. Na levé části okna je rozbalítko *Instrument Configuration* v kterém se vybírají připojené zařízení. V mém případě to je DMM Keithley 2701 z toho důvodu byl vybrán MODEL 2701:2, viz Obr. 19. Po zvolení zařízení lze použít druhé tlačítko, které specifikuje, jakým způsobem zařízení bude využíváno. Rozbalí se tedy možnost *Test Types* a zvolí se *Data logging*.



Obr. 19. Zvolené zařízení

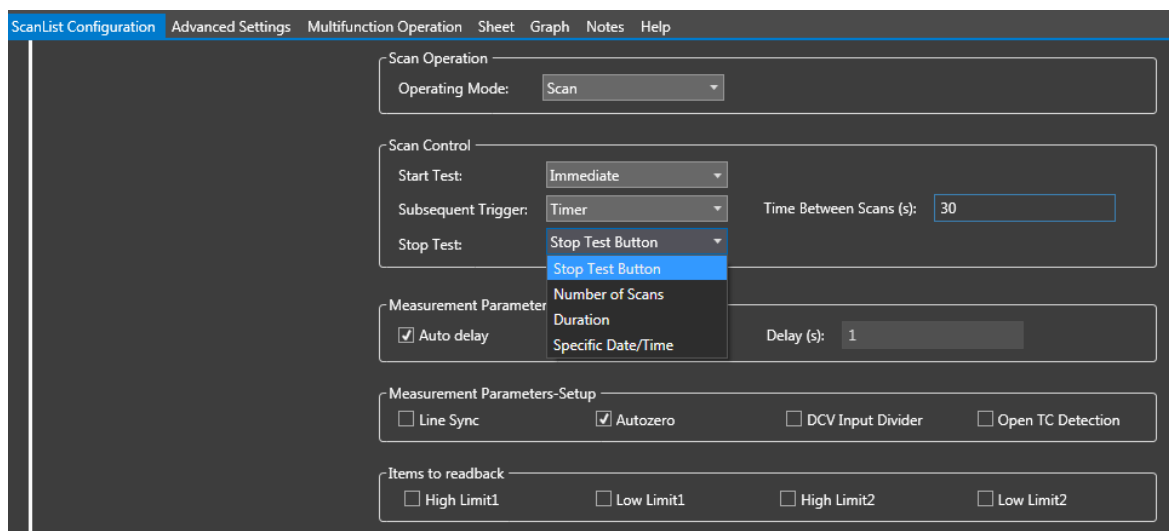
Po těchto dvou krocích je možné rozsáhlejší nastavení. V horní liště se zobrazí několik záložek. Záložka *Switch Card Configuration* se využívá pro přepínání mezi zařízeními. V našem případě bylo vše ponecháno v základním nastavení. Další záložkou je *Channel Configuration*, ve které je možné vytvořit skupiny tlačítkem *Add Group*. Pro každou skupinu se nastavuje funkce, kterou daná skupina bude měřit (např.: ACI, ACV, FREQ apod.) a následně se přiřadí ke konkrétním výstupům. V diplomové práci byly měřeny termistory dvou značek po třech skupinách a v každé skupině bylo 5 termistorů, tj. dohromady 30 termistorů. Z důvodu vysokých hodnot termistorů  $100\text{k}\Omega$  až  $470\text{k}\Omega$  bylo usouzeno, že měření 4- vodičově není nezbytné a proto bylo využito 2- vodičového měření odporu, tedy ve funkci měření bylo zvoleno *2 Wires RES*. Následně byly přiřazeny kanály ke každé vytvořené skupině. Kanály svítící červeně už byly přiřazeny u jiné skupiny a byly obsazeny. Zeleně jsou potom kanály přiřazené ke konkrétní skupině. Názorně na Obr. 20. Dalším nastavením, které se týkalo každé skupiny, bylo nastavení rychlosti měření a počtu zobrazujících se digitů. Počet digitů byl nastaven na maximální hodnotu zařízení, tedy na 6.5 digitu. Rychlost měření byla poté nastavena na *Slow*, aby nedocházelo ke zbytečnému zarušení signálu. Ostatní nastavení jako matematické parametry nebo filtry byly ponechány v základním nastavení.



Obr. 20 Vytvoření skupin, zvolení funkce a přiřazení kanálů

Po nastavení a přiřazení jednotlivých skupin se přistoupilo k nastavení skenování kanálů na záložce *ScanList Configuration*. V možnostech *Operating Mode* musí být zvolen mód *Scan*. Poté v nastavení *Scan Control* se určuje, jakým způsobem se test bude zapínat (*Start Test*), jak se bude spouštět jednotlivé mezi-měření (*Subsequent Trigger*) a jakým způsobem se ukončí měření (*Stop Test*). Nabízené možnosti pro start jsou *Immediate* (okamžitě) nebo na *Specific date/time* (specifický datum nebo čas). Pro mezi-měření lze nastavit možnosti: *Timer* (časovač) s nastavením intervalů v sekundách, *Immediate*

(okamžitě) přepínání se nikdy nezastaví, tzn. není příliš vhodný z důvodu velkého opotřebení přepínačů, *External* (externí) a *Manual* (manuální) fungující na externím impulzu nebo manuálně spínané tlačítkem start. Možnosti ukončení měření jsou: *Stop Test Button* (tlačítko stop), *Number of Scan* (počet skenů), *Duration* (doba měření) a *Specific date/time* (specifický datum nebo čas). Pro naše účely byl zvolen okamžitý start s časovačem nastaveným na 30 sec a měření se ukončovalo tlačítkem stop, viz Obr. 21. Další nastavení nebyly uvažovány ani nastavovány.



Obr. 21: Nastavení skenování

V další záložce *Advanced Settings* se nastavila pouze hodnota pro *Timestamps*, kde byla zvolena možnost *Real-time Clock* (reálný čas). Tento čas se poté zobrazuje u změřených hodnot a je brán z nastaveného času DMM. Pro správné vyhodnocení změřených dat bylo třeba synchronizovat čas DMM s časem používaným v programu Wintherm, který si časovou hodnotu bral z nastaveného času PC. Datum a čas lze nastavit pouze manuálně na DMM.

S takto nastaveným profilem v programu KickStart stačí zmáčknout tlačítko *Start test* a multimetr začne přepínat a odečítat hodnoty z kanálů. Jakmile se proměří každý kanál, čeká DMM na další impulz, s kterým se tento proces opakuje. Při nastavení času mezi skeny 30 sec a při době trvání skenu 20 sec bude DMM čekat na impulz jen 10 sec. Musí se zvolit rozumný časový interval mezi jednotlivými skeny. Data jdou následně uložit v souboru CSV nebo Excel.

#### 4.2.3 Testování profilů lázně

Realizace co nejpřesnější kalibrace si žádá řádné otestování limitů lázně jako takové. Z tohoto důvodu se po stanovení teplotního rozsahu, který se volil od -10 °C do 60 °C

s teplotními skoky po 5 °C, testovaly teplotní profily s třemi různými tolerančními mezemi, konkrétně  $\pm 0,1$  °C,  $\pm 0,3$  °C a  $\pm 0,5$  °C. Měření probíhalo bez zatížení, do lázně tedy nebyl vložen žádný objekt a lázeň obsahovala pouze teplovodivé médium. Teplotní profily byly vytvořeny v programu Wintherm viz kapitola 4.2.1.

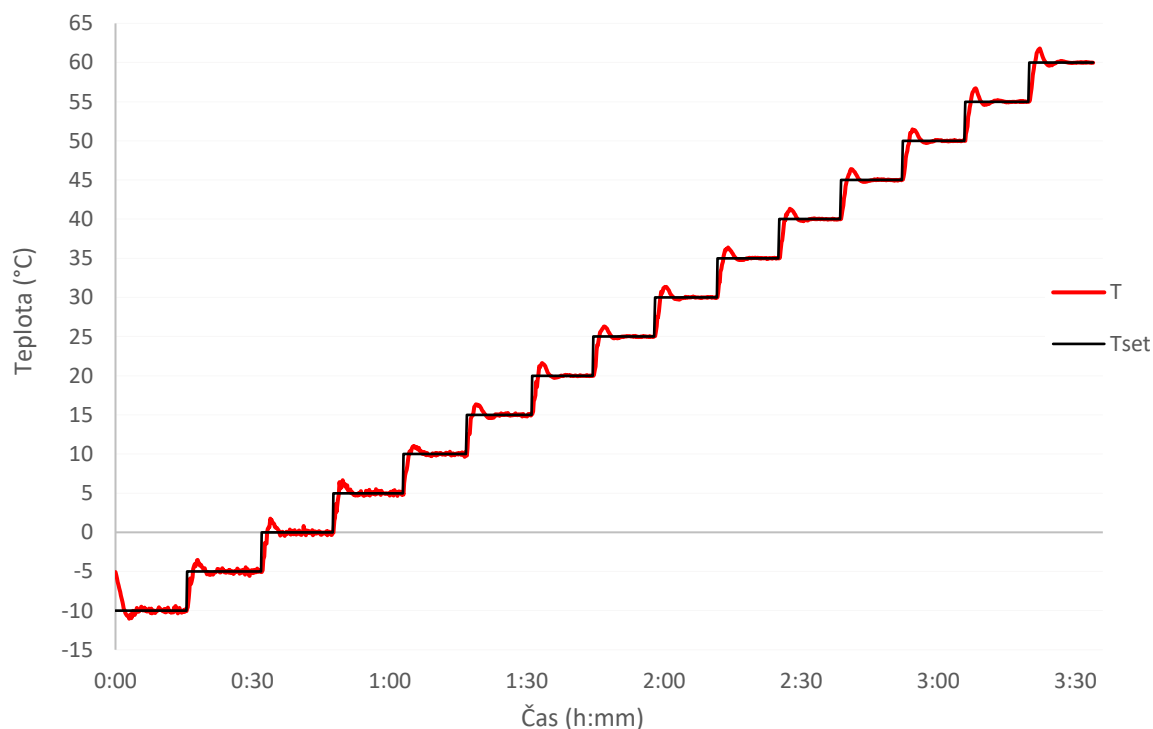
Po proměření teplotních profilů se vyexportovala naměřená data do Excel souboru, jako ukázkou vyexportovaných změřených dat, přikládám tabulku.

Tab. 8: Ukázka naměřených a dopočítávaných dat

Date	Time	Setpoint (°C)	Bath temp. (°C)	Čas	Tmin	Tmin	Tmax	Tmax
20. 4. 2019	21:11:58	-10	-5,078	0:00:00	-10,30	-10,50	-9,70	-9,50
20. 4. 2019	21:12:08	-10	-5,528	0:00:10	-10,30	-10,50	-9,70	-9,50
20. 4. 2019	21:12:18	-10	-5,880	0:00:20	-10,30	-10,50	-9,70	-9,50

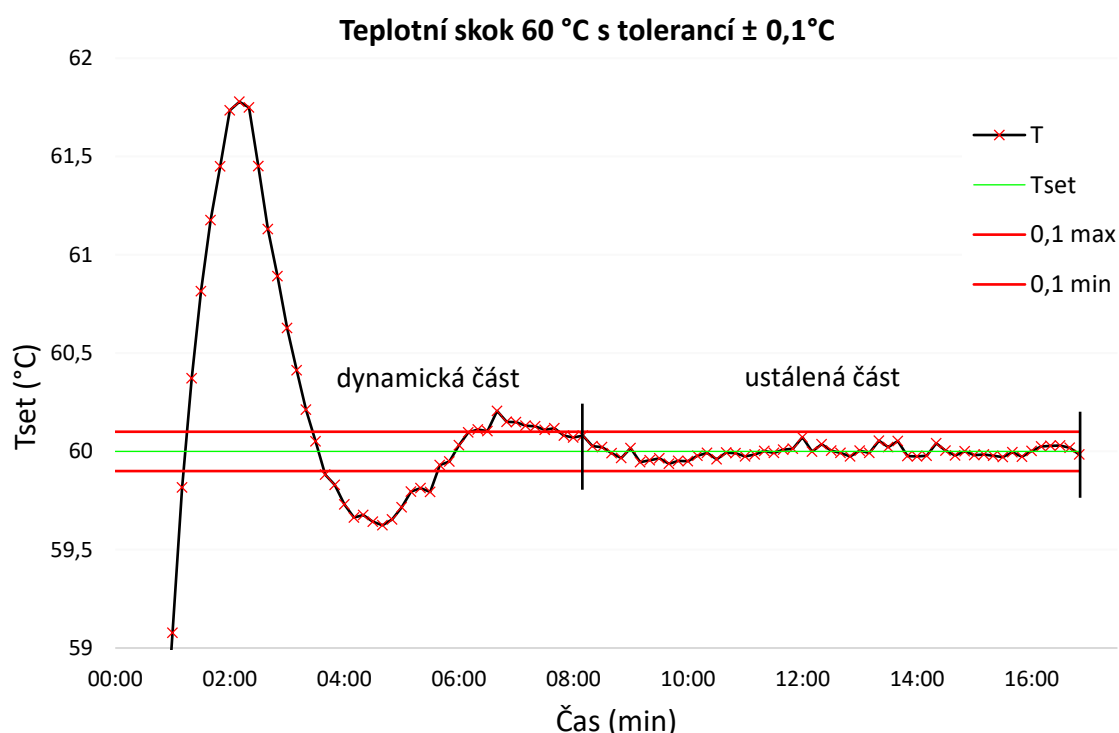
Podbarvená část tabulky jsou data změřená. Za účelem sestrojení grafu bylo přidáno do tabulky dalších pět sloupců. První přidávaný sloupec byl vytvořen za účelem sestrojení časové základny začínající od 0, z důvodu přehlednějšího grafického znázornění. Další čtyři sloupce byly vytvořeny za účelem naznačení zvolených tolerančních mezí a vznikly přičtením nebo odečtením velikosti tolerance od nastavené teplotní hodnoty (Setpoint). Sestrojený graf teplotního profilu konkrétně pro toleranci  $\pm 0,3$  °C si lze prohlédnout níže.

### Teplotní profil



Graf 3. Teplotní profil pro toleranční meze 0,3 °C

V dalším kroku je nutné oddělit dynamickou část regulace od ustálené části. Bylo potřeba projít manuálně každý krok teplotního profilu, určit počátek ustálené části a vyznačit si tento bod do tabulky. Určení potřebného bodu bylo stanoveno pomocí zvolených tolerančních mezí. Pro teplotu daného schodu se zobrazily přesné pozice změřených dat značkami a za začátek ustálené části se považoval bod, na který následovaly další čtyři body ležící v tolerančních mezích. Z bodu splňujícího tuto podmínku se následně odečetla hodnota času a vyhledala se daná hodnota v tabulce. Názorně si tento postup lze prohlédnout v Grafu 4, který odpovídá teplotnímu skoku 60 °C s tolerancí  $\pm 0,1$  °C.



*Graf 4. Zoom na teplotní skok 60 °C*

Stanovení ustálené části následně umožnilo komparaci jednotlivých měření a podrobení jednotlivých data základním statistickým výpočtům. Prvním krokem bylo vytvoření průměru, mediánu, směrodatné odchylky, minima a maxima pro teploty jednotlivých ustálených částí. Použity byly Excel funkce MIN, MAX, SMODCH.P, PRŮMĚR a MEDIAN. Orientačně byl vypočítán rozdíl mediánu od referenční hodnoty v absolutní hodnotě pro lepší zobrazení detailu diference nastavené hodnoty od naměřené. Dále se z minima a maxima vypočetlo variační rozpětí a vydělení směrodatné odchylky ( $\sigma$ ) průměrem a vynásobené 100, vznikly variační koeficienty v procentech. Nakonec bylo nutné určit časový interval jednotlivého kroku v ustálené části. Ukázkou tabulky si lze prohlédnout níže v Tab. 9.

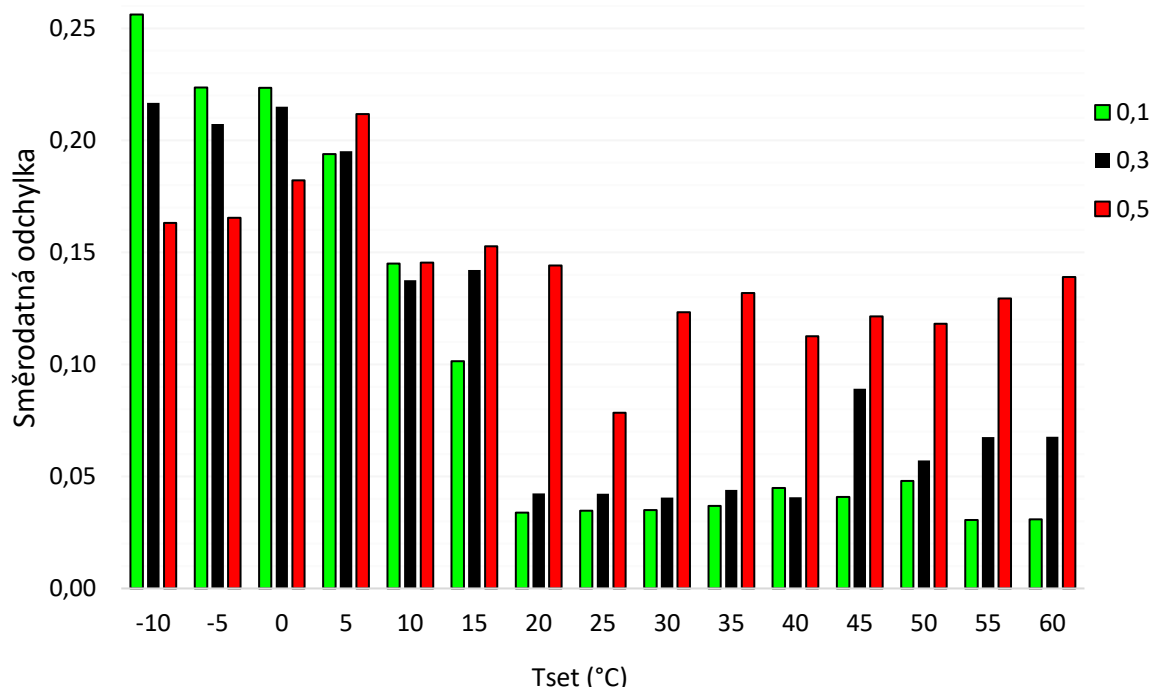


Tab. 9: Ukázka části tabulky pro toleranci 0,3 a výpočet statistických dat

0,3	průměr	med-ref t	medián	$\sigma$	variační rozpětí	variační koeficient	min	max	čas
35	35,009	0,015	35,015	0,044	0,168	0,125558142	34,909	35,077	7:10
40	40,004	0,001	39,999	0,041	0,176	0,101858902	39,918	40,094	6:50
45	44,971	0,010	44,995	0,089	0,359	0,198081683	44,747	45,106	8:30
50	50,013	0,012	50,013	0,057	0,199	0,114196676	49,910	50,109	7:10
55	55,022	0,003	55,003	0,068	0,301	0,122887138	54,899	55,200	8:10
60	60,025	0,003	60,003	0,068	0,267	0,112748993	59,947	60,214	8:00

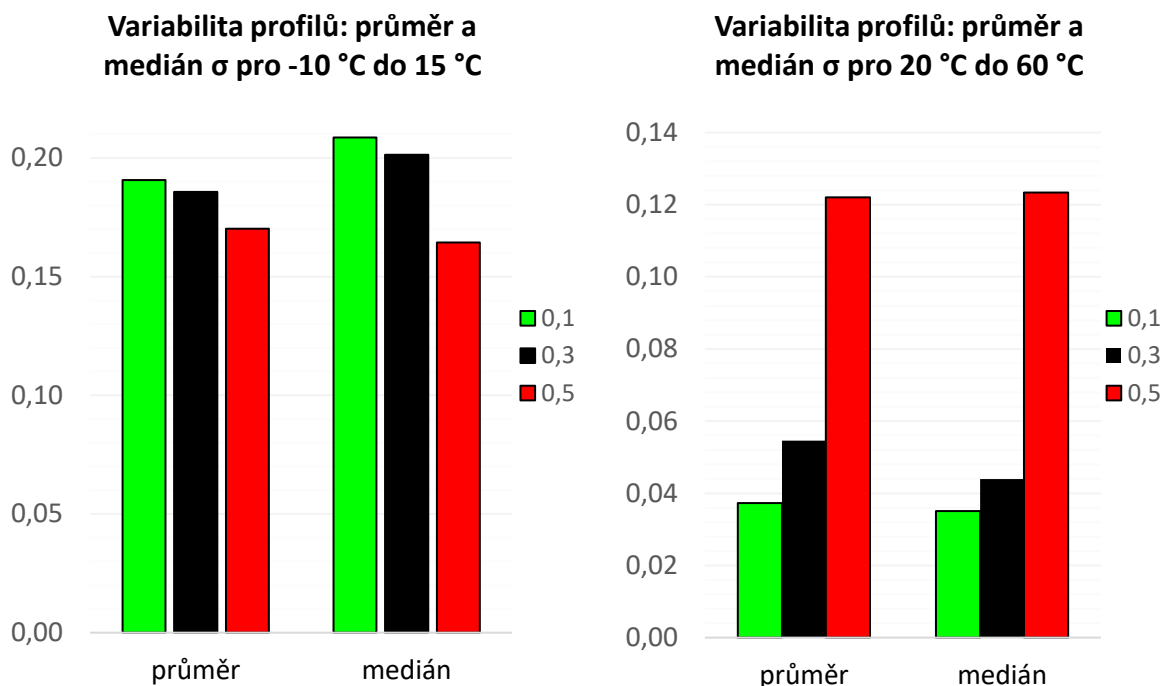
Z takto spočtených dat bylo vytvořeno několik grafů, dle kterých se následně rozhodovalo o nejvhodnějším použití profilu při samotné kalibraci termistorů. Prvním z grafů určující variabilitu profilů byl graf směrodatné odchyly, viz Graf 5.

### Variabilita profilů: Směrodatná odchyly



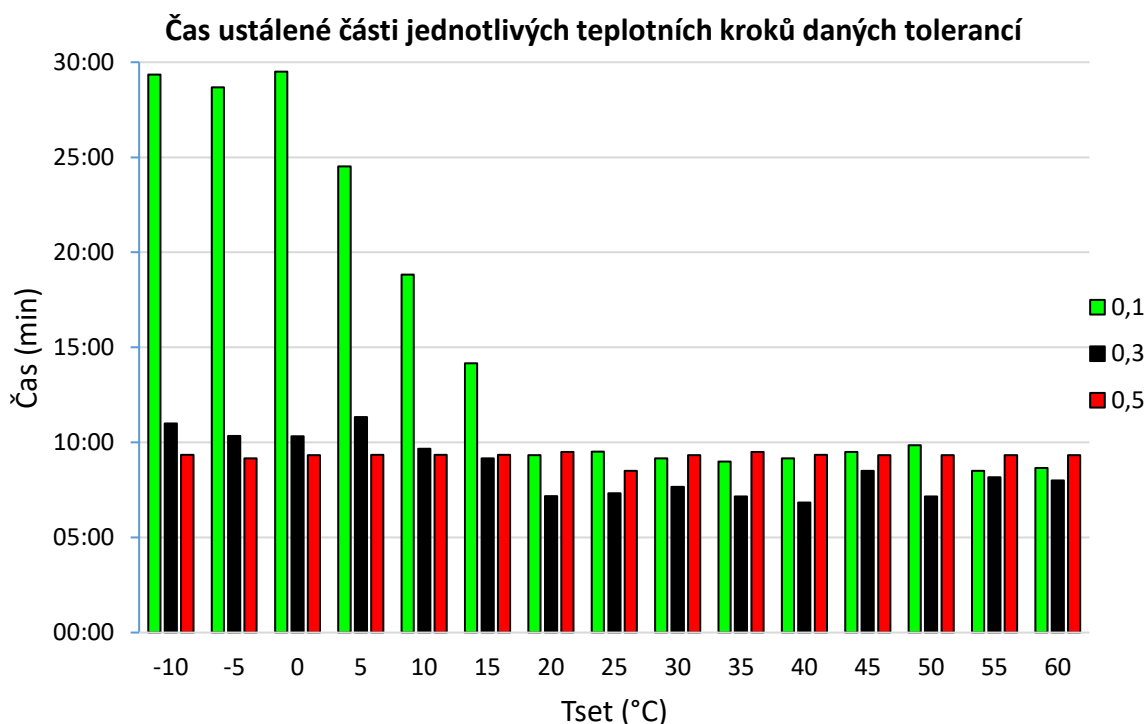
Graf 5: Směrodatná odchyly profilů

Z grafu je zřejmé, že hodnoty směrodatné odchyly se výrazně liší na začátku rozsahu a to konkrétně od  $-10\text{ °C}$  do  $15\text{ °C}$ . Naopak pro rozsah od  $20\text{ °C}$  do  $60\text{ °C}$  vyniká téměř jednoznačně tolerance  $\pm 0,1\text{ °C}$ . Pro zpřehlednění byly vytvořeny dva grafy průměru a mediánu směrodatné odchyly s rozdělenými teplotními intervaly, viz Graf 6. Z těchto dvou grafů je zřejmé, že pro teplotní interval  $\langle -10, 15 \rangle\text{ °C}$  vychází nejlépe tolerance  $\pm 0,5\text{ °C}$  a pro interval  $\langle 20, 60 \rangle\text{ °C}$  je to tolerance  $\pm 0,1\text{ °C}$



Graf 6: Detailní zobrazení směrodatné odchylky pro teplotní intervaly

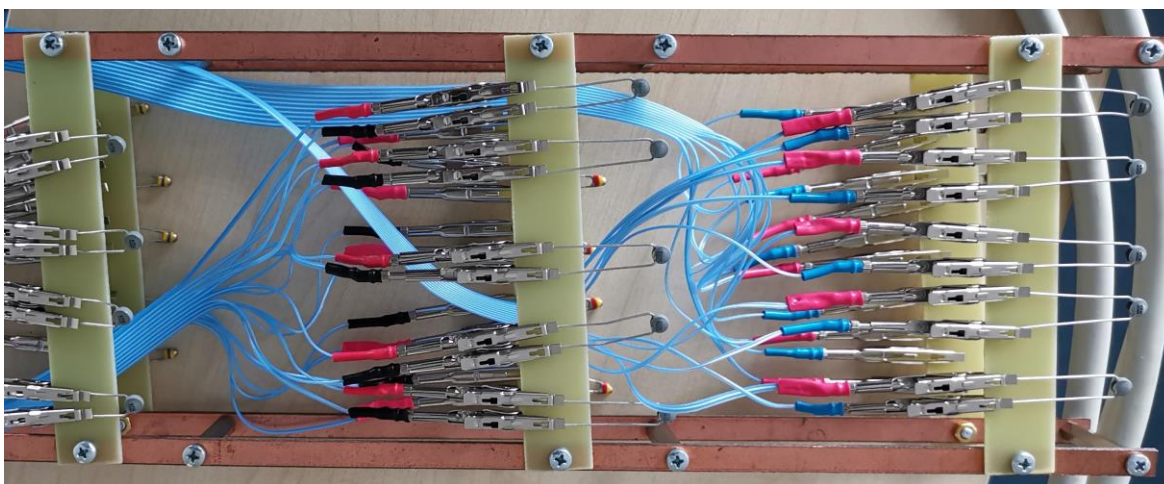
Další proměnná, která vstoupila do rozhodování, byla doba trvání ustálené části. Grafické znázornění pro dobu trvání jednotlivých ustálených částí teplotních kroků je zobrazeno v Grafu 7. Tento graf jednoznačně vylučuje použití tolerance  $\pm 0,1$  °C z důvodu téměř až trojnásobného času potřebného k regulaci pro teplotní interval  $\langle -10, 15 \rangle$  °C. Z těchto statistických dat byl zvolen rozsah  $\pm 0,3$  °C v intervalu  $\langle -10, 15 \rangle$  °C a  $\pm 0,1$  °C pro interval  $\langle 20, 60 \rangle$  °C.



Graf 7: Zobrazení délky ustálené části pro jednotlivé teplotní kroky

#### 4.2.4 Měření termistorů

Termistory byly měřeny v místnosti bez klimatizace, ale výkyvy teplot se pohybovaly pouze v zanedbatelných mezích, proto ovlivnění způsobené fluktuací teploty v místnosti nebylo uvažováno. Kalibrované termistory a jejich konkrétní hodnoty jsou podrobně popsány v kapitole 4.1.3. Termistory byly umístěny na vyrobený nosný přípravek, viz Obr 22. Nosná konstrukce pro termistory je vyrobena ze čtyř měděných proužků, které jsou od sebe odděleny pomocí kovových distančních válečků a ve třech různých výškách byly pomocí šroubků přidělané sklolaminátové destičky, na které se následně termistory připínaly za použití krokosvorek. Termistory se následně měřily 2- vodičově, jelikož bylo uvažováno, že ovlivnění měření v porovnání s 4- vodičovým zapojením při takto vysokých odporech, jako je 100 k $\Omega$ , 220 k $\Omega$  a 470 k $\Omega$ , je zanedbatelné.

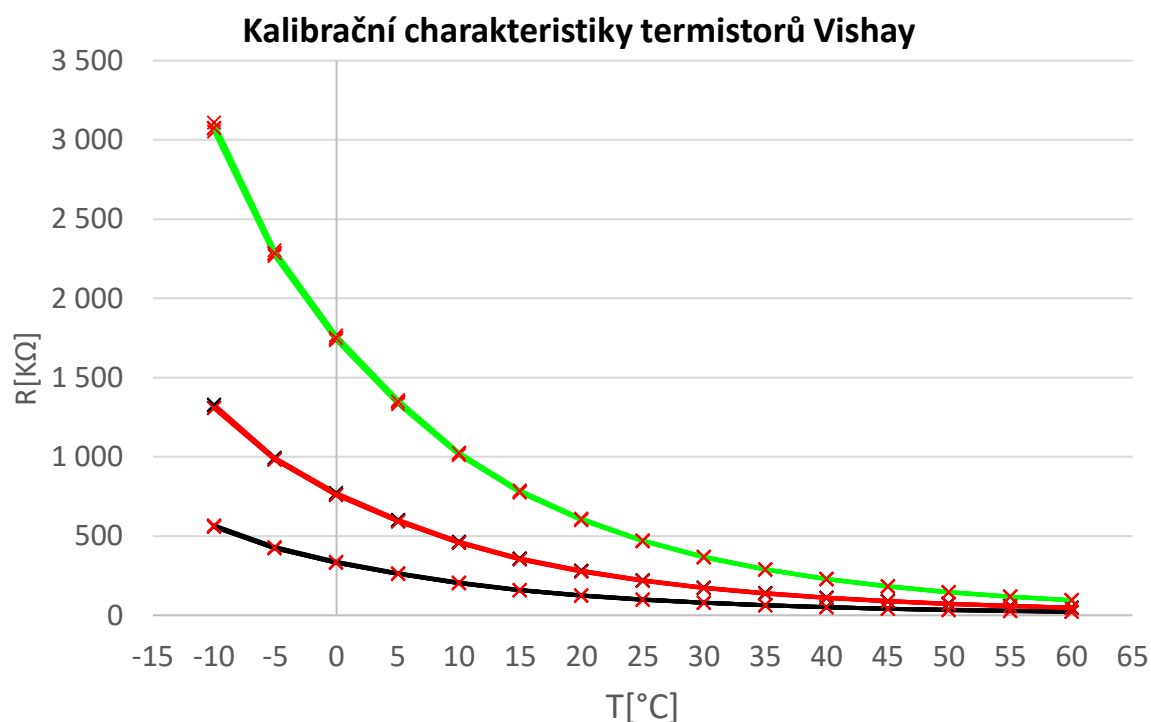


Obr. 22: Nosné zařízení pro termistory

DMM s rozšiřující kartou zvládne měřit odpor 2- vodičově pro až 40 termistorů (kanálů). Navzdory tomu se v diplomové práci měřilo pouze 30 termistorů. Toto rozhodnutí o omezení bylo z důvodu prostoru na nosné konstrukci, aby nedocházelo ke zbytečným zkratům a jiným nežádoucím efektům. Pro kalibraci byl zvolen teplotní profil s tolerancí  $\pm 0,3$  °C v intervalu  $(-10, 15)$  °C a  $\pm 0,1$  °C pro  $(20, 60)$  °C, viz kapitola 4.2.3. Po proměření termistorů se vyexportovala data do Excelu, kde se vybrala data spadající do ustálené části regulace. Následně byla vytvořena tabulka s mediánem pro všechny ustálené části a to jak pro teplotu, tak pro změřený odpor. Ukázka takovéto tabulky pro změřené termistor je níže v Tab. 10. Mediány jednotlivých teplot a odporů byly následně graficky znázorněny v Grafu 8, kde jsou zobrazeny kalibrační charakteristiky termistorů značky Vishay.

Tab. 10: Tabulka mediánů teploty a odporů pro Kalibrační křivku termistorů Vishay

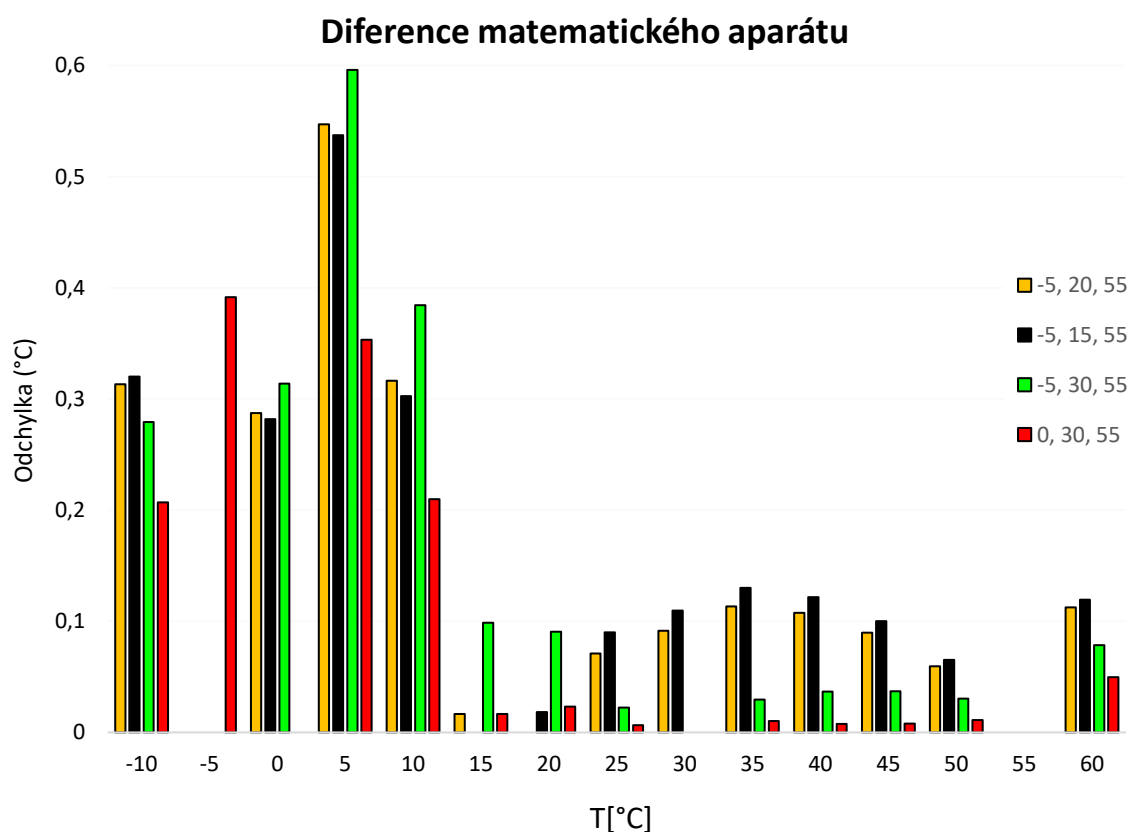
T (°C)	CH206_100k (Ω)	CH207_100k (Ω)	CH226_220K (Ω)	CH227_220K (Ω)	CH216_470K (Ω)	CH217_470K (Ω)
-10,008	558079,782	559222	1309826,755	1329789,375	3070647,250	3053966
-5,069	423601,469	424194,469	981967,625	994971,375	2279408,500	2266840,750
-0,032	332006,985	332366,438	763111,876	772797,563	1747049,755	1736221,500
5,028	260942,688	261348,750	595572,938	603046,813	1345011,630	1332694,500
9,989	202272,797	202793,571	459208,157	464545,579	1020015,845	1010369,660
14,952	157179,711	157699,344	354088,110	358918,875	779775,188	773690,938
19,993	124023,672	124467,078	277149,406	281007,500	603267,375	599649
24,988	98332,078	98708,617	217933,578	221014,500	468873,453	466207,328
30,004	78458,637	78774,953	172505,836	174923,782	366736,454	364651,094
35,004	62944,836	63213,250	137237,750	139177,125	288504,844	286853,781
40,006	50789,988	51018,129	109875,367	111426,016	228348,547	227049,297
45,009	41184,652	41376,152	88395,578	89627,547	181640,016	180598,984
49,998	33576,484	33741,156	71521,344	72513,281	145309,672	144490,438
55,015	27489,584	27631,469	58108,309	58927,395	116819,125	116161,648
60,014	22659,139	22780,759	47541,055	48204,564	94533,871	93992,770



Graf 8. Kalibrační křivky termistorů Vishay

Kalibrační křivky, které lze vidět v grafu definují dané termistory (zelená = 470 kΩ, červená = 220 kΩ a černá = 100 kΩ). Tyto charakteristiky a kalibrační tabulky lze pomocí správného matematického aparátu použít pro získání teploty ze změřené hodnoty odporu termistorů. V našem konkrétním případě byla použita dlouho používaná rovnice pro kalibrování termistoru Steinhart-Hartova rovnice, viz kapitola 2.5.5. V Excelu se vytvořilo

řešení pro tři polynomiální rovnice o třech neznámých. Kritickým bodem bylo stanovit, jaké hodnoty se budou do rovnic dosazovat, aby polynomiální regrese byla co nejmenším ovlivňujícím prvkem kalibračního systému. Dle literatury bylo doporučeno rozložení bodů rovnoměrným způsobem, tzn. po jednom bodu na krajích charakteristiky a jeden bod uprostřed. Při testování tohoto stanoviska bylo však zjištěno, že v našem případě je nejvhodnější zvolit teplotní body pro 0 °C, 30 °C a 55 °C. Testování probíhalo spočtením kalibračních koeficientů A, B, C pomocí dosazených změřených bodů a následného zpětného přepočtení naměřené hodnoty odporu termistoru na teplotu, dle spočtených kalibračních koeficientů. Takto získaná data byla odečtena od naměřených dat teploty a diference byla graficky zaznamenána, viz Graf 9. V grafu jsou vykresleny pouze nejlepší výsledky testování.



Graf 9: Diference použité Steinhart-Hartovi rovnice

Z grafu je zřejmé, že zvolené teplotní body pro regrese kalibrační křivky jsou (červeně) 0 °C, 30 °C a 55 °C a maximální chyba nastává při teplotě -5 °C.

Z důvodu přesnosti regrese kalibrační křivky bylo nutné ověřit, zda Steinhart-Hartova rovnice je dostatečná k potřebě naší aplikace. K ověření byl použit matematický aparát na stránce Xuru.org. Tato stránka poskytuje statistické a regresní nástroje, které mají uživateli pomoci při hledání ideální regresní funkce ze změřených dat. Nástroj funguje velmi

intuitivně a jeho další výhodou je, že při vkládání dat nezáleží na symbolu pro oddělení desetinného místa. Data lze do webového nástroje nakopírovat přímo pomocí tabulky naměřených dat, avšak musí se dbát na správné pořadí sloupců. V případě, že není možnost kopírovat data, webové rozhraní nabízí vlastní tabulku umožňující manuální vkládání dat. Dále lze nastavit maximálně 4 limitující parametry a po zmáčknutí tlačítka *Calculate*, se nabídne několik funkcí pro regresi s různou chybou. V našem případě se pracovalo pouze s nejlepší doporučenou funkcí. Vložení dat a doporučenou regresní funkci lze vidět na Obr. 23.

	x	y	Best Function Calculated y	Best Function Error
1.	558079.7815	-10.008	-9.911687952	9.631204753·10 <sup>-2</sup>
2.	423601.469	-5.069	-4.765449854	3.035501463·10 <sup>-1</sup>
3.	332006.9845	-0.0315	-9.522582646·10 <sup>-2</sup>	6.372582646·10 <sup>-2</sup>
4.	260942.688	5.028	4.637733452	3.902665482·10 <sup>-1</sup>
5.	202272.7965	9.9885	9.771160339	2.173396612·10 <sup>-1</sup>
6.	157179.711	14.9515	14.98887379	3.737379064·10 <sup>-2</sup>
7.	124023.672	19.9925	20.01426071	2.176071397·10 <sup>-2</sup>
8.	98332.07815	24.9875	25.05770832	0.070208323
9.	78458.63675	30.004	30.07979564	7.579563877·10 <sup>-2</sup>
10.	62944.8359	35.004	35.09361388	8.961387812·10 <sup>-2</sup>
11.	50789.9883	40.006	40.08653036	8.053036141·10 <sup>-2</sup>
12.	41184.6523	45.009	45.07201902	6.301901999·10 <sup>-2</sup>
13.	33576.4844	49.998	50.03334345	3.534345045·10 <sup>-2</sup>
14.	27489.584	55.0145	54.99383691	2.066309267·10 <sup>-2</sup>
15.	22659.1387	60.014	59.88386912	1.301308825·10 <sup>-1</sup>

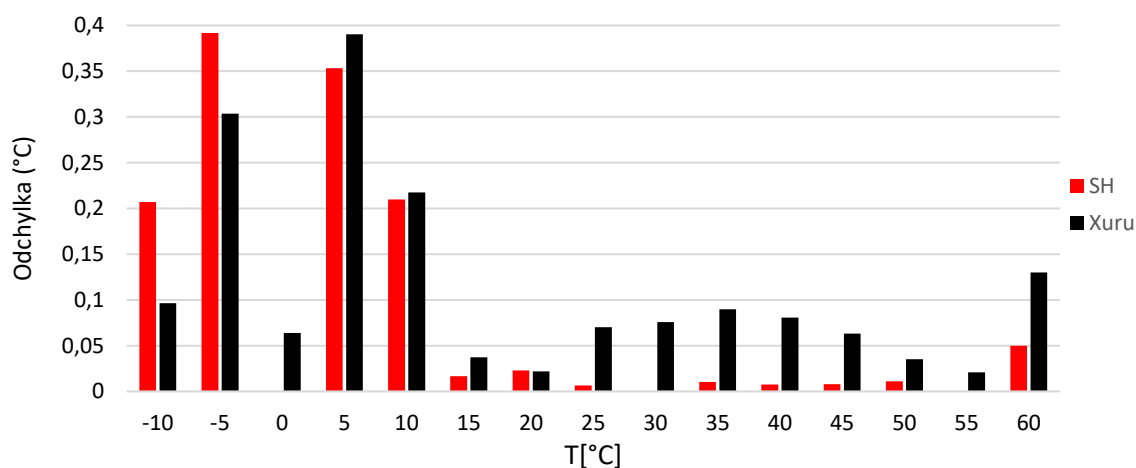
**Calculate**

**Result:**

$$y = 696.926532 x^{-1.024906089 \cdot 10^{-1}} - 189.4696206$$

Obr. 23: Výsledek ze stránky Xuru.org

Webový nástroj dosadil změřený odpor do rovnice, viz Obr. 23 a matematický aparát přepočítal naměřenou odporovou hodnotu na teplotu, která je na Obr. 23 uvedena modrou barvou. Následně vypočítal chybu této regresní funkce, viz červené hodnoty. Díky tomuto webovému nástroji, již nebylo potřeba s doporučenou funkcí dále manipulovat, jako tomu bylo u Steinhart-Hartovi rovnice. Porovnání diferencí obou metod je uvedeno v Grafu 10, z něhož je patrné, že pro naši aplikaci je vhodnější volba Steinhart-Hartovi rovnice.



Graf 10: Porovnání diferencí matematických aparátů

## 5 Vyhodnocení výsledků a nejistoty

Každá kalibrace zařízení by pro úplnost měla mít uvedenou hodnotu nejistoty výsledků. V našem případě bude uvedena nejen nejistota, ale budou rozepsány i jednotlivé aspekty ovlivňující systém a řešení, které by bylo možné podniknout pro zpřesnění kalibrace.

### 5.1 Nejistoty

Správnost vyhodnocení výsledků a samotné přesnosti systému je stanoveno pomocí nejistot měření. Jak už bylo uvedeno v kapitole 2.3.2, nejistoty se dělí na typ A a B. Nejistoty typu A jsou počítány z opakovatelných měření za stejných podmínek. Z důvodu, že se termistory proměřovaly pouze jednou a nedokázali bychom navodit stejné podmínky se nejistota typu A neuvažovala.

Do nejistot typu B spadají veškeré aspekty působící na systém jako takový. Příkladem těchto aspektů může být teplota místnosti, odpor vodičů, nepřesnosti jednotlivých zařízení, elektromagnetické ovlivňování, apod. V našem případě byly zanedbány vlivy působící na systém zvenčí, jako je teplotní vyzařování lázně, nečistota média, okolní fluktuace teploty nebo elektromagnetické působení. Důvodem zanedbání těchto aspektů bylo, že se nepředpokládalo významného ovlivnění celkového výsledku nejistoty a výpočet se tím velmi zjednodušil. Pro výpočet nejistoty systému se uvažovaly hlavně měřící přístroje a použitý matematický aparát.

První nejistota byla získána ze zvolených tolerančních mezí regulace lázně, tzn. ze zvoleného teplotního profilu. Z důvodu zvolení dvou tolerančních mezí teplotního profilu, viz kapitola 4.2.3, byla nejistota kalibrace rozdělena na dvě části a to na intervaly  $\langle -10, 15 \rangle$  °C a  $\langle 20, 60 \rangle$  °C. Výpočet samotné nejistoty byl uvažován podle normálního rozdělení a chyba  $\pm 0,3$  °C, odpovídající pro teplotní interval  $\langle -10, 15 \rangle$  °C, byla potřeba vydělit hodnotou  $k = 2$  pro zajištění výskytu hodnot s pravděpodobností 95%.

Dalšími nejistotami typu B, které se braly v úvahu, byla nejistota referenčního senzoru Pt100 uvnitř lázně, DMM a nejistota matematického aparátu pro regresi kalibrační křivky. Chyba referenčního senzoru a matematického aparátu byla určena přímo z tolerance senzoru a z grafu 9, udávající diferenci matematického aparátu. Tyto chyby byly vydělené odmocninou ze 3, odpovídající rovnoměrnému rozdělení.

Všechny výše uvedené nejistoty byli ve °C, avšak DMM měřil odporové hodnoty. K docílení kompletní nejistoty systému bylo potřeba určit toleranci DMM v  $\Omega$  a tu převést na °C. Tato hodnota se počítala dle datasheetu pro DMM jako:

$$\pm(\text{ppm z naměřené hodnoty} + \text{ppm z rozsahu}) \quad (5.1)$$

V našem případě po dosazení pro změřená data termistorů 100 k $\Omega$ , kde rozsah DMM byl 1M $\Omega$  vypadá rovnice následovně,

$$\pm(0,01\% \text{ z naměřené hodnoty} + 0,001\% \text{ z rozsahu}) \quad (5.2)$$

Z důvodu, že měřený odpor DMM u termistorů 220 k $\Omega$  a 470 k $\Omega$  přesáhl u některých hodnot rozsah 1 M $\Omega$ , bylo potřeba použití vzorce 5.2, kde se navýšil rozsah DMM na 10 M $\Omega$ .

$$\pm(0,04\% \text{ z naměřené hodnoty} + 0,001\% \text{ z rozsahu}) \quad (5.3)$$

Pokud by se vymkla teplota v místnosti z intervalu  $\langle 18, 28 \rangle$  °C, výrobce udává rozšiřující koeficient, kterým se rovnice 5.2 nebo 5.3 vynásobí. V našem případě se teplota v místnosti udržela v uvedeném teplotním intervalu a nebylo tedy nutné s koeficientem počítat. Takto vypočtená tolerance se následně musela přičíst a odečíst od hodnoty naměřené, z důvodu převedení odporové hodnoty na °C, přes Steinhart-Hartovu rovnici používanou jako matematický aparát pro regresi kalibrační charakteristiky. Převedené hodnoty na °C byly nakonec vyděleny odmocninou ze 3, za účelem získání nejistoty. Spočtené dílčí nejistoty jsou uvedeny níže v Tab. 11 a 12.

Tab. 11: Spočtené dílčí nejistoty pro interval  $\langle -10, 15 \rangle$  °C 100 k $\Omega$

Teplota	-10	-5	0	5	10	15
Přesnost regulace ( $u_A$ )	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
DMM (°C) ( $u_B$ )	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004
Pt100 ( $u_C$ )	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174
Nejistota rce ( $u_D$ )	0,120	0,227	0,000	0,204	0,122	0,010
Celková nejistota systému	0,259	0,322	0,230	0,307	0,260	0,230

Tab. 12: Spočtené dílčí nejistoty pro interval  $\langle 20, 60 \rangle$  °C 100 k $\Omega$

Teplota	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Přesnost regulace ( $u_A$ )	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
DMM (°C) ( $u_B$ )	0,005	0,006	0,006	0,007	0,009	0,010	0,012	0,014	0,016
Pt100 ( $u_C$ )	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174	0,174
Nejistota rce ( $u_D$ )	0,000	0,041	0,053	0,066	0,062	0,052	0,035	0,000	0,065
celková nejistota systému	0,181	0,185	0,188	0,192	0,191	0,188	0,184	0,181	0,193



Pro získání celkové nejistoty systému bylo nutné geometricky sečíst jednotlivé dílčí nejistoty, viz rovnice 5.4.

$$\sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2 + u_D^2} \quad (5.4)$$

Z dat uvedených v Tab. 11 a 12 je zřejmé, že celková nejistota systému pro interval  $\langle -10, 15 \rangle$  °C vychází 0,322 °C a pro interval  $\langle 20, 60 \rangle$  °C potom 0,193 °C. Takto spočtené hodnoty byly násobeny rozšiřujícím koeficientem  $k = 2$  pro normální rozdělení. Celková rozšířená nejistota poté vychází 0,644 °C pro interval  $\langle -10, 15 \rangle$  °C a 0,386 pro interval  $\langle 20, 60 \rangle$  °C.

## 5.2 Kritické zhodnocení

Vytvořený kalibrační postup byl použit pro ověření a zpřesnění hodnot námi zvolených termistorů. Lze říci, že údaje uváděné výrobcí odpovídají skutečnosti. Největší nedostatek uvedeného postupu je manuální zpracování dat. Z důvodu, že proces není plně automatizován, dochází k neúměrnému prodlužování a pracnosti celého postupu, případně k možným nepřesnostem způsobených nepozorností operátora.

Porovnání dílčích nejistot naznačilo mezery a prostor pro zlepšení kalibračního procesu. Z globálního hlediska prováděného procesu kalibrace termistorů se jeví, limitujícím článkem laboratoře referenční sensor. Naopak nejlépe na tom je DMM, který nejméně ovlivňuje velikost nejistoty systému. V úvahu se musí vzít i běžně využívaná Steinhart-Hartova rovnice, kterou lze nahradit polynomicou funkcí vyššího řádu. Polynomická rovnice vyššího řádu by měla zajistit daleko menší chybu a tedy i menší nejistotu zejména v záporných hodnotách regrese kalibrační charakteristiky.

Dalším prostorem pro zlepšení kalibrace je umístění termistorů v lázni, případně použití jiné nosné konstrukce. Pro zajištění co nejpřesnějšího měření by měly být všechny měřené termistory v lázni umístěny ve stejné vzdálenosti a úrovni jako je referenční sensor. V našem případě tomu tak nebylo, z důvodu použití nosné konstrukce, která měla tři různé hloubky ponoru. Upevnění termistorů k nosné konstrukci bylo uskutečněno pomocí krokosvorek, u kterých nelze zaručit při větším počtu měřených termistorů bez-zkratový provoz, z tohoto důvodu by bylo ideální vytvořit konstrukci s pevnými kontakty.

Kvalitu kalibrace je možné ovlivnit i výběrem jiného teplovodivého média. U námi použitého média bylo při záporných teplotách vyzorováno zakalení, nejspíše způsobené zamrznutím malých částecek vody v silikonovém oleji.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a ověřit kalibrační postup na vybraných komerčně dostupných elektrických senzorech teploty. Pro naše účely byly zvoleny termistory od společností Vishay a TDK.

První, teoretická část práce byla věnována shrnutí esenciálních informací týkajících se teploty, způsobu jejího měření, teplotních stupnic a metrologie. Byla zde uvedena i struktura metrologického institutu ČR. Dále byly popsány obecné způsoby kalibrace elektrických teplotních senzorů, včetně chyb a nejistot měření. Kapitoly 2.4 a 2.5 se věnovaly kalibračním postupům. Pro účely této práce byl vybrán, prostudován a popsán kalibrační postup společnosti Fluke, který byl následně v praktické části práce využit a aplikován. Dále zde byly popsány metody matematického vyhodnocení naměřených hodnot. V další kapitole byl vytvořen návod pro správný výběr referenčního senzoru teploty, za účelem co nejpřesnější kalibrace. Pro přehlednost byl vytvořen tabulkový seznam referenčních senzorů od tří největších výrobců etalonů (Fluke, AccuMac, Isotech). Uvedené referenční senzory jsou děleny v tabulce dle hlavních charakteristických vlastností.

Praktická část této práce byla věnována aplikaci zvoleného kalibračního postupu, jeho úpravám pro podmínky dané laboratoře tak, aby mohl být měřicí postup ověřen na vybraných komerčních termistorech. Byl zde podrobně popsán celý pracovní postup. Statisticky byly zhodnoceny naměřené teplotní profily v kalibrační lázni, s různými tolerančními mezemi. Následně byl vytvořen a popsán profil digitálního multimetru pro 2- vodičové měření termistorů. Po určení nejvhodnějších profilů byly termistory změřeny. Z výsledků měření byly sestrojeny kalibrační tabulky, které byly pro názornost převedeny do grafického znázornění. Dalším krokem bylo porovnání dvou zvolených matematických regresních funkcí (Steinhart-Hartova rovnice a doporučená funkce stránkou xuru.org). Dle výpočtů a grafického znázornění chyb jednotlivých funkcí, byla nejvhodnější regresní funkcí stanovena Steinhart-Hartova rovnice. V rámci vyhodnocení byly spočteny jednotlivé dílčí nejistoty, z nichž byla určena nejistota vytvořeného a použitého kalibračního postupu. Navržený kalibrační postup byl prakticky ověřen a je funkční, nicméně je zde prostor pro vylepšení přesnosti kalibračního postupu, zakoupením referenčního senzoru vyšší třídy přesnosti, který byl vyhodnocen jako nejrizikovější. Další případné vylepšení nedostatků je uvedeno v kritickém zhodnocení.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] The International System of Units (SI). Bureau international des poids et mesures, Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre. 8th edition. Paříž: STEDI Media, 2006, s. 94-180. ISBN 92-822-2213-6.
- [2] CHILDS, Peter R.N. Practical Temperature Measurement. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 372 stran. ISBN 0 7506 5080 X.
- [3] ŠINDELÁŘ, Martin. Etalonáž a návaznost při měření teploty. Praha: Automa-časopis pro automatizační techniku, s. r. o. Roč. 8, č. 9/2011. s. 35 - 37. ISSN 1210-9592.
- [4] ČMI – O nás. [online]. 2018 [cit. 2018-08-22] Dostupné z: [https://www.cmi.cz/vse\\_o\\_cmi](https://www.cmi.cz/vse_o_cmi)
- [5] KREIDL, Marcel. Měření teploty: Měření teploty-senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Sensory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [6] FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors. Physics, Designs, and Applications. Springer International Publishing, 2016. 758 stran. ISBN 978-3-319-19303-8.
- [7] Metrologie v kostce. Třetí upravené a doplněné vydání. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem (ČMI). Sborníky technické harmonizace, 2009.
- [8] Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. Praha: Sbíрка zákonů, 1990.
- [9] ČMI – Základní pojmy. [online]. 2018 [cit. 2018-08-22] Dostupné z: <https://www.cmi.cz/node/537>
- [10] ČSN EN ISO 10012. Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení. Český normalizační institut, 2003
- [11] LUDVÍK, Vladimír. Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků měření, 2005.
- [12] PALEŇČÁR, Rudolf, VDOLEČEK, František, HALAJ, Martin. Měřicí technika: Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. Automa, 2001, č. 7-8, s. 3-4 [cit. 2018-08-21].

- [13] ISO: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1. vyd., 1995, ISBN 92-67-10188-9.
- [14] Werner Heisenberg [online]. Wikipedia, 2018 [cit. 2018-08-22] Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Werner\\_Heisenberg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Werner_Heisenberg)
- [15] FURUTA, Aya. One Thing Is Certain: Heisenberg's Uncertainty Principle Is Not Dead. March 8, 2012. Scientific American. Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com/page/about-scientific-american/>
- [16] WEBSTER, John G., EREN, Halit. Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. CRC Press, Taylor & Francis Group. 2014. stran. ISBN 978-1-4398-4889-0.
- [17] How to calibrate an RTD or Platinum Resistance Thermometer (PRT). Instrumart.com [online]. Fluke Corporation Hart Scientific Divisio, nedatováno [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.instrumart.com/assets/Fluke-PRT-Application-Note.pdf>
- [18] *Microstar Laboratories* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.mstarlabs.com/sensors/thermistor-calibration.html>
- [19] *Dataloggerinc* [online]. 2018 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.dataloggerinc.com/resource-article/thermistor-calibration/>
- [20] *Temperature calibration equipment* [online]. 2010, , 8 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://eu.flukecal.com/literature/articles-and-education/temperature-calibration/application-notes/temperature-calibration->
- [21] *Medicalexpo* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.medicalexpo.com/prod/lauda/product-105180-688572.html>
- [22] *Paragon-sci* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.paragon-sci.com/pub/media/catalog/product/cache/c687aa7517cf01e65c009f6943c2b1e9/d1/dlk\\_45\\_re-size\\_2.jpg](https://www.paragon-sci.com/pub/media/catalog/product/cache/c687aa7517cf01e65c009f6943c2b1e9/d1/dlk_45_re-size_2.jpg)
- [23] *Voltworld* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.voltworld.cz/out/pictures/1/stolni-multimetr-keithley-2701e-kalibrovano-dle-iso.jpg>
- [24] *Farnell* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://uk.farnell.com/productimages/standard/en\\_GB/2131287-40.jpg](https://uk.farnell.com/productimages/standard/en_GB/2131287-40.jpg)

## Přílohy

Standard první třídy SPRT, HTSPRT																
společnost	název	od [°C]	do [°C]	materiál	nominální odpor [Ω]	vodiče	drift	proud [mA]	průměr [mm]	délka [mm]	měřicí část [mm]	cena [Kč]	přesnost	IEC třída přesnosti	min. délka ponoření [mm]	odezva[s]
Fluke	5681	-200	670	křemíkové sklo	25,5	4	$\pm 0,002^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	7	520	-	-	-	1/10B	203,2	-
	5683	-200	480	křemíkové sklo	25,5	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	7	520	-	-	-	1/10B	203,2	-
	5684	0	1070	křemíkové sklo	0,25	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/100$ hodin	14,14	7	680	-	-	-	1/10B	203,2	-
	5685	0	1070	křemíkové sklo	2,5	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/100$ hodin	5	7	680	-	-	-	1/10B	203,2	-
	5686 (kapsle)	-260	232	sklo	25,5	4	$\pm 0,005^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	5,8	56	-	-	-	1/10B	-	-
	5698	-200	670	křemíkové sklo	25,5	4	$\pm 0,006^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	7	485	-	-	-	1/10B	203,2	-
	5699	-200	670	slitina hliníku	25,5	4	$\pm 0,008^{\circ}\text{C}/100$ hodin	1	5,56	482	-	-	-	1/10B	203,2	-
Isotech	670SQ	-200	670; 550	křemíkové sklo	25,5; 100	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	0,5; 1	7,5	480, 650	35	-	-	1/10B	-	-
	670SH	-80	670; 550	metal	25,5; 100	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	0,5; 1	6	480, 650	35	-	-	1/10B	-	-
	670 SL	-200	165	metal	25,5	4	$\pm 0,001^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	0,5; 1	6	480	35	-	-	1/10B	-	-
AccuMac	AM1950	-200	500	křemíkové sklo	25	4	$\pm 0,004^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	7	480	42	-	-	1/10B	-	-
	AM1960	-200	670	křemíkové sklo	25	4	$\pm 0,005^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	7	500	42	-	-	1/10B	-	-
	AM1880	-200	670	metal	25,5	4	$\pm 0,006^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	5,56	500	42	-	-	1/10B	-	-
	AM 1968 (kapsle)	-260	100	platina	25	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	7,5	60	42	-	-	1/10B	-	-
	AM 1850	-200	500	slitina hliníku	25; 100	4	$\pm 0,002^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	6,35	480	42	-	-	1/10B	-	-
	AM 1860	-200	670	slitina hliníku	26; 100	4	$\pm 0,003^{\circ}\text{C}/\text{rok}$	1	6,35	500	42	-	-	1/10B	-	-

Standard druhé třídy PRT																
společnost	název	od [°C]	do [°C]	materiál	nominální odpor [Ω]	vodiče	drift	proud [mA]	průměr [mm]	délka [mm]	měřicí část [mm]	cena [Kč]	přesnost	IEC třída přesnosti	min. délka ponoření [mm]	odezva[s]
Fluke	5608	-200	500	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,02$ °C/100 hodin	1	3,18	229; 305	30	16.000	$\pm 0,008$ °C při 0 °C	1/10B	80	9
	5609	-200	670	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,02$ °C/100 hodin	1	6,35	300; 400; 500	30	30.000	$\pm 0,008$ °C při 0 °C	1/10B	100	12
	5615-12	-200	420	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,007$ °C/100 hodin	1	4,76	152	28	30.000	$\pm 0,012$ °C při 0 °C	1/10B	254	9
	5615-9	-200	420	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,007$ °C/100 hodin	1	4,76	229	28	30.000	$\pm 0,012$ °C při 0 °C	1/10B	178	9
	5615-6	-200	300	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,007$ °C/100 hodin	1	6,35	305	28	30.000	$\pm 0,012$ °C při 0 °C	1/10B	102	9
	5626	-200	661	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,006$ °C/100 hodin	1	6,35	305; 381; 508	-	65.000	$\pm 0,006$ °C při 0 °C	1/10B	127	-
	5628	-200	661	slitina hliníku	25,5	4	$\pm 0,004$ °C/100 hodin	1	6,35	305; 381; 508	-	65.000	$\pm 0,006$ °C při 0 °C	1/10B	127	-
Isotech	935-14	-196; -100; -50	250; 450; 670	nerez ocel	100	4	$\pm 0,01$ °C/rok	1	4, 6	210; 300; 350; 450	25	14.000	$\pm 0,01$ °C při 0 °C	1/10B	-	-
AccuMac	AM1760 ; AM1762	-200	670	slitina hliníku	100, 25	4	$\pm 0,004$ °C	0,5; 1	6,35	305; 500	42	31.000	$\pm 0,006$ °C při 0 °C	1/10B	-	9
	AM1751	-200	670	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,01$ °C/rok	0,5; 1	6,35	305; 501	32	45.000	$\pm 0,015$ °C při 0 °C	1/10B	-	9
	AM1730	-200	420	slitina hliníku	100	4	$\pm 0,01$ °C/rok	0,5; 1	6,35; 4,75	305; 229	32	12.300	$\pm 0,015$ °C při 0 °C	1/10B	-	9
	AM 1710	-60	160	nerez ocel	100	4	$\pm 0,01$ °C/rok	0,5; 1	6,35	305	33	18.000	$\pm 0,015$ °C při 0 °C	1/10B	-	9

Precizní IPRT																
společnost	název	od [°C]	do [°C]	materiál	nominální odpor [Ω]	vodiče	drift	proud [mA]	průměr [mm]	Délka [mm]	měřicí část [mm]	cena [Kč]	přesnost	IEC třída přesnosti	min. délka ponoření [mm]	odezva[s]
Fluke	5627A-6	-200	300	nerez ocel	100	4	±0,04 °C/ 100 hodin	1	4,7	152	-	16.000	± 0,046 °C při 0 °C	1/3 B (AA)	100	9
	5627A-9	-200	300	nerez ocel	100	4	±0,04 °C/ 100 hodin	1	4,7	229	-	16.000	± 0,046 °C při 0 °C	1/3 B (AA)	100	9
	5627A-12	-200	420	nerez ocel	100	4	±0,04 °C/ 100 hodin	1	6,35	305; 381	-	16.000	± 0,046 °C při 0 °C	1/3 B (AA)	100	12
AccuMac	AM1660	-200	670	slitina hliníku	100	4	±0,04 °C	0,5; 1	6,35	305	32	14.000	± 0,035 °C při 0 °C	1/3 B (AA)	-	5
	AM 1640	-200	420	slitina hliníku	100	4	±0,04 °C	0,5; 1	6,35	305	32	14.000	± 0,035 °C při 0 °C	1/3 B (AA)	-	5
	AM 1620	-60	300	slitina hliníku	100	4	±0,04 °C	0,5; 1	6,35	305	32	14.000	± 0,035 °C při 0 °C	1/3 B (AA)	-	5
	AM1610	-60	160	nerez ocel	100	4	±0,04 °C	0,5; 1	4,7; 6,35	229; 305	30	10.000	± 0,05 °C	1/3 B (AA)	-	5