



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## STANOVENÍ STANDARDNÍ NEJISTOTY PŘI KONFIRMACI TEPLOTNÍ KOMORY

EVALUATION OF STANDARD UNCERTAINTY OF CLIMATIC CHAMBER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Dojava

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Václav Dojava

**ID:** 147373

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Stanovení standardní nejistoty při konfirmaci teplotní komory

#### POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je popsat konfirmaci teplotní komory a provést analýzu a výpočet nejistot při této konfirmaci.

1. Proveďte literární rešerši v oblasti nejistot měření se zaměřením na stanovení nejistot měření teploty a dále proveďte literární rešerši v oblasti konfirmace teplotních komor.
2. Navrhněte způsob měření a umístění snímačů teploty v teplotní komoře při konfirmaci této teplotní komory.
3. Navrhněte a popište postup stanovení nejistot měření teploty v teplotní komoře při konfirmaci.
4. Realizujte měření v teplotní komoře, která je součástí zkušební laboratoře CVVOZE, pro definovaná nastavení teploty.
5. Vypočtete nejistoty měření teploty.
6. Zhodnoťte dosažené výsledky měření.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] EURAMET: Calibration of Temperature and/or Humidity Enclosures. Version 4.0. 2015.

[2] ČSN EN 60068-3-5 Zkoušení vlivů prostředí - Část 3-5: Doprovodná dokumentace a návod - Konfirmace výkonnosti teplotních komor. Vydáno 10.2002

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 14.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou konfirmace teplotní komory CTS 65/50, která je součástí vybavení zkušební laboratoře CVVOZE. Teoretická část práce se zaměřuje na rozbor a popis metodiky konfirmace teplotních komor, vycházejících především z technických norem. Tato část práce dále obsahuje stručný popis obecné teorie nejistot měření. Praktická část práce se zabývá návrhem měřicí procedury, podle které bylo provedeno konfirmační měření deseti teplotních úrovní. V této části je dále obsažena analýza naměřených dat spolu se stanovením rozšířené kombinované nejistoty měření teploty. Poslední část obsahuje zhodnocení výsledků konfirmace, na základě kterých se mělo určit, zda ověřované teplotní úrovně splňují požadavky na stabilitu teploty v ustáleném stavu uvnitř pracovního prostoru teplotní komory plynoucí z norem pro klimatické zkoušky.

## **Klíčová slova**

konfirmace, teplotní úroveň, gradient, kolísání, odchylka, tolerance, nejistota

## **Abstract**

The thesis deals with the problematics of confirmation of the climatic chamber CTS 65/50, which is a component of CVVOZE testing laboratory. Theoretical part deals with the analysis and description of methods of confirmation of climatic chambers based primarily on technical standards. This part then contains a brief description of a theory of measurement uncertainty. Practical part deals with the design of measurement procedure, which was used for confirmation measurement of ten temperature setpoints. This section then also contains an analysis of the measured data with the evaluation of standard combined uncertainty of temperature measurement. The last part contains an evaluation of the confirmation results, which were the basis for the determination of whether the climatic chamber meets the requirements for the steady-state temperature stability inside the workspace resulting from the standards for the climatic testing

## **Keywords**

confirmation, temperature, setpoints, gradient, fluctuation, tolerance, uncertainty

## **Bibliografická citace:**

DOJAVA, V. *Stanovení standardní nejistoty při konfirmaci teplotní komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 101 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Stanovení standardní nejistoty při konfirmaci teplotní komory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: **11. května 2018**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí diplomové práce Ing. Soně Šedivé, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat zkušební laboratoři CVVOZE za poskytnutou spolupráci.

V Brně dne: **11. května 2018**

.....  
podpis autora

# Obsah

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1.      | Úvod .....  | 20 |
| 2.      | Konfirmace teplotní komory.....                       | 21 |
| 2.1     | Metody.....   | 21 |
| 2.1.1   | Metoda konfirmace .....                               | 21 |
| 2.1.1.1 | Zkouška bez zátěže .....                              | 21 |
| 2.1.1.2 | Zkouška se zátěží.....                                | 22 |
| 2.1.2   | Metoda rutinního monitorování .....                   | 22 |
| 3.      | Konfirmace komory bez zátěže .....                    | 24 |
| 3.1     | Senzory a měřicí systém.....                          | 24 |
| 3.1.1   | Snímače .....   | 24 |
| 3.1.2   | Rozmístění snímačů .....                              | 26 |
| 3.1.3   | Měřicí systém.....                                    | 27 |
| 3.2     | Měření dat.....                                       | 27 |
| 3.3     | Podmínky ve zkušebně .....                            | 28 |
| 3.4     | Vyhodnocení.....                                      | 28 |
| 4.      | Teorie nejistot měření.....                           | 29 |
| 4.1     | Stanovení standardní nejistoty vstupní veličiny ..... | 29 |
| 4.1.1   | Stavení nejistoty typu A .....                        | 29 |
| 4.1.2   | Stavení nejistoty typu B .....                        | 30 |
| 4.2     | Obecné zdroje nejistoty typu B.....                   | 30 |
| 4.3     | Zdroje nejistot typu B.....                           | 32 |
| 4.3.1   | Nejistoty kalibrace přístrojů .....                   | 32 |
| 4.3.2   | Nejistoty přístroje.....                              | 32 |
| 4.3.3   | Nejistoty vznikající v době měření .....              | 32 |
| 4.3.4   | Nejistoty způsobené sáláním .....                     | 32 |
| 4.3.5   | Další nejistoty .....                                 | 33 |
| 4.3.6   | Důležité zdroje nejistot.....                         | 33 |
| 4.3.7   | Nejistota nepřímých měření [12] .....                 | 33 |
| 4.3.8   | Kombinovaná standardní nejistota.....                 | 34 |
| 4.3.9   | Rozšířená standardní nejistota .....                  | 34 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 5.      | Návrh měření .....                           | 35 |
| 5.1     | Teplotní komora.....                         | 35 |
| 5.2     | Konfirmace teplotní komory.....              | 35 |
| 5.3     | Měřicí řetězec.....                          | 36 |
| 5.4     | Měřicí systém.....                           | 36 |
| 5.5     | Měřicí karta.....                            | 36 |
| 5.6     | Snímače .....                                | 37 |
| 5.6.1   | Charakteristiky snímače .....                | 38 |
| 5.7     | Měřicí procedura.....                        | 39 |
| 5.7.1   | Optimalizace pro zkoušku .....               | 39 |
| 5.7.2   | Konfirmace teplot .....                      | 39 |
| 5.7.3   | Teplotní specifikace .....                   | 40 |
| 5.7.4   | Doba ustálení .....                          | 40 |
| 5.7.5   | Cyklus měření .....                          | 40 |
| 5.7.6   | Posloupnost teplot .....                     | 40 |
| 5.7.7   | Podmínky ve zkušebně.....                    | 41 |
| 5.7.8   | Požadavky na vyhodnocení .....               | 41 |
| 6.      | Vlastní provedení Experimentu .....          | 42 |
| 6.1     | Příprava.....                                | 42 |
| 6.2     | Umístění snímačů, konstrukce.....            | 43 |
| 6.3     | Zapojení a karty .....                       | 44 |
| 6.4     | Změna teploty a nastavení komory .....       | 45 |
| 6.5     | Cyklus měření .....                          | 45 |
| 6.6     | Podmínky okolního prostředí ve zkušebně..... | 46 |
| 6.7     | Sběr dat.....                                | 46 |
| 6.7.1   | Způsob vyhodnocení .....                     | 47 |
| 7.      | Výpočty nejistoty měření.....                | 48 |
| 7.1     | Nejistota typu A .....                       | 48 |
| 7.2     | Nejistota typu B .....                       | 48 |
| 7.2.1   | Měřicí řetězec .....                         | 48 |
| 7.2.2   | Snímač SENSIT Pt 100/3850 .....              | 49 |
| 7.2.2.1 | Přesnost snímače.....                        | 49 |



|         |  |    |
|---------|--|----|
| 7.2.2.2 | Hystereze .....                                  | 50 |
| 7.2.2.3 | Nelinearita snímače .....                        | 51 |
| 7.2.3   | Měřicí karta NI 9219 .....                       | 52 |
| 7.2.3.1 | Přesnost měřicích karet .....                    | 52 |
| 7.2.3.2 | Teplotní stabilita měřicích karet .....          | 53 |
| 7.2.4   | Systém cDAQ-9178 .....                           | 54 |
| 7.2.5   | Nejistoty způsobené zapojením .....              | 54 |
| 7.3     | Nejistoty dané vlastnostmi teplotní komory ..... | 54 |
| 7.3.1   | Gradient teploty .....                           | 56 |
| 7.3.2   | Kolísání teploty .....                           | 56 |
| 7.4     | Nejistota nepřímého měření .....                 | 57 |
| 7.4.1   | Standardní kombinovaná nejistota měření .....    | 59 |
| 7.5     | Pravděpodobnost shody výsledku a tolerance ..... | 60 |
| 8.      | Zhodnocení výsledků .....                        | 62 |
| 8.1     | Výsledky pro jednotlivé teplotní úrovně .....    | 62 |
| 8.1.1   | Teplotní úroveň 25 °C .....                      | 62 |
| 8.1.1.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru .....      | 63 |
| 8.1.1.2 | Odchylka průměrné teploty od žádané .....        | 65 |
| 8.1.1.3 | Teplotní gradient .....                          | 65 |
| 8.1.1.4 | Kolísání teploty .....                           | 66 |
| 8.1.1.5 | Nejistota měření .....                           | 67 |
| 8.1.1.6 | Zhodnocení výsledků .....                        | 67 |
| 8.1.2   | Teplotní úroveň 50 °C .....                      | 68 |
| 8.1.2.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru .....      | 68 |
| 8.1.2.2 | Teplotní gradient .....                          | 68 |
| 8.1.2.3 | Odchylka průměrné teploty od žádané .....        | 68 |
| 8.1.2.4 | Kolísání teploty .....                           | 69 |
| 8.1.2.5 | Nejistota měření .....                           | 69 |
| 8.1.2.6 | Zhodnocení výsledků .....                        | 69 |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 8.1.3   | Teplotní úroveň 75 °C .....                 | 70 |
| 8.1.3.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 70 |
| 8.1.3.2 | Teplotní gradient.....                      | 70 |
| 8.1.3.3 | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 71 |
| 8.1.3.4 | Kolísání teploty.....                       | 71 |
| 8.1.3.5 | Nejistota měření.....                       | 71 |
| 8.1.3.6 | Zhodnocení výsledků .....                   | 72 |
| 8.1.4   | Teplotní úroveň 100 °C .....                | 72 |
| 8.1.4.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 73 |
| 8.1.4.2 | Teplotní gradient.....                      | 73 |
| 8.1.4.3 | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 73 |
| 8.1.4.4 | Kolísání teploty.....                       | 73 |
| 8.1.4.5 | Nejistota měření.....                       | 73 |
| 8.1.4.6 | Zhodnocení výsledků .....                   | 74 |
| 8.1.5   | Teplotní úroveň 125 °C .....                | 75 |
| 8.1.5.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 75 |
| 8.1.5.2 | Teplotní gradient.....                      | 75 |
| 8.1.5.3 | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 75 |
| 8.1.5.4 | Kolísání teploty.....                       | 76 |
| 8.1.5.5 | Nejistota měření.....                       | 76 |
| 8.1.5.6 | Zhodnocení výsledků .....                   | 76 |
| 8.1.6   | Teplotní úroveň 150 °C .....                | 77 |
| 8.1.6.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 77 |
| 8.1.6.2 | Teplotní gradient.....                      | 77 |
| 8.1.6.3 | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 78 |
| 8.1.6.4 | Kolísání teploty.....                       | 78 |
| 8.1.6.5 | Nejistota měření.....                       | 78 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 8.1.6.6  | Zhodnocení výsledků .....                   | 78 |
| 8.1.7    | Teplotní úroveň 175 °C .....                | 79 |
| 8.1.7.1  | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 79 |
| 8.1.7.2  | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 79 |
| 8.1.7.3  | Kolísání teploty.....                       | 80 |
| 8.1.7.4  | Teplotní gradient.....                      | 80 |
| 8.1.7.5  | Nejistota měření.....                       | 80 |
| 8.1.7.6  | Zhodnocení výsledků .....                   | 81 |
| 8.1.8    | Teplotní úroveň 0 °C .....                  | 81 |
| 8.1.8.1  | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 81 |
| 8.1.8.2  | Teplotní gradient.....                      | 82 |
| 8.1.8.3  | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 82 |
| 8.1.8.4  | Kolísání teploty.....                       | 82 |
| 8.1.8.5  | Nejistota měření.....                       | 82 |
| 8.1.8.6  | Zhodnocení výsledků .....                   | 83 |
| 8.1.9    | Teplotní úroveň -25 °C.....                 | 83 |
| 8.1.9.1  | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 84 |
| 8.1.9.2  | Teplotní gradient.....                      | 84 |
| 8.1.9.3  | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 84 |
| 8.1.9.4  | Kolísání teploty.....                       | 84 |
| 8.1.9.5  | Nejistota měření.....                       | 84 |
| 8.1.9.6  | Zhodnocení výsledků .....                   | 85 |
| 8.1.10   | Teplotní úroveň -50 °C.....                 | 86 |
| 8.1.10.1 | Průměrná teplota v pracovním prostoru ..... | 86 |
| 8.1.10.2 | Teplotní gradient.....                      | 86 |
| 8.1.10.3 | Odchylka průměrné teploty od žádané.....    | 86 |
| 8.1.10.4 | Kolísání teploty.....                       | 86 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 8.1.10.5 | Nejistota měření.....                                      | 87 |
| 8.1.10.6 | Zhodnocení výsledků .....                                  | 87 |
| 9.       | Souhrnné zhodnocení výsledků .....                         | 88 |
| 9.1      | Průměrná stanovená teplota a celková nejistota měření..... | 89 |
| 9.2      | Odchylka průměrné teploty od žádané .....                  | 90 |
| 9.3      | Teplotní gradient .....                                    | 91 |
| 9.4      | Kolísání teploty .....                                     | 91 |
| 9.5      | Výsledek confirmace teplotní komory .....                  | 92 |
| 10.      | Závěr.....   | 93 |

# Seznam symbolů a zkratek

## Zkratky:

|        |  |
|--------|--|
| FEKT   | Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií                                  |
| VUT    | Vysoké učení technické v Brně  |
| CVVOZE | Centrum výzkumu a využití obnovitelných zdrojů energie                               |
| L1     | Délka přední stěny teplotní komory   |
| L2     | Délka boční stěny teplotní komory  |
| L3     | Výška stěny teplotní komory  |
| RTD    | Odporový teplotní snímač   |
| EX     | Svorky karty NI 9219   |
| HI     | Svorky karty NI 9219   |
| LO     | Svorky karty NI 9219   |
| T1     | Teplotní snímač umístěný v levém horním rohu u dveří<br>teplotní komory              |
| T2     | Teplotní snímač umístěný v pravém horním rohu u dveří<br>teplotní komory             |
| T3     | Teplotní snímač umístěný v levém dolním rohu u dveří<br>teplotní komory              |
| T4     | Teplotní snímač umístěný v pravém dolním rohu u dveří<br>teplotní komory             |
| T5     | Teplotní snímač umístěný v levém horním rohu u zadní<br>stěny teplotní komory        |
| T6     | Teplotní snímač umístěný v pravém horním rohu u zadní<br>stěny teplotní komory       |
| T7     | Teplotní snímač umístěný v levém dolním rohu u zadní<br>stěny teplotní komory        |
| T8     | Teplotní snímač umístěný v pravém dolním rohu u zadní<br>stěny teplotní komory       |
| T9     | Referenční teplotní snímač umístěný ve středu pracovního<br>prostoru teplotní komory |

**Symbols:**

|                   |                                     |
|-------------------|-------------------------------------|
| $T_i$             | Hodnota daná teplotním snímačem $i$ |
| $R$               | Odpor teplotního snímače            |
| $t$               | Teplota                             |
| $t_m$             | Doba ustáleného stavu teploty       |
| $t_n$             | Doba náběhu teploty                 |
| $t_s$             | Doba sestupu teploty                |
| $s^2(q)$          | Výběrový rozptyl                    |
| $q$               | Naměřená hodnota                    |
| $\bar{q}$         | Aritmetický rozptyl                 |
| $s_{\bar{q}}$     | Výběrová směrodatná odchylka        |
| $u_a$             | Nejistota typu A                    |
| $k_s$             | Koeficient rozšíření                |
| $u_{Bz}$          | Nejistota typu B                    |
| $z_i$             | Zdroj nejistoty typu B              |
| $u_{Bz_i}$        | Nejistota typu B zdroje $z_i$       |
| $\Delta z_{iMax}$ | Maximální rozsah odchylek           |
| $\chi$            | Pravděpodobnostní rozdělení hodnot  |
| $\Delta_p$        | Absolutní povolená chyba            |
| $\delta_M$        | Chyba z hodnoty                     |
| $\delta_R$        | Chyba z rozsahu                     |
| $X_M$             | Změřená hodnota                     |
| $X_R$             | Hodnota rozsahu                     |
| $s_g$             | Opakovatelnost                      |
| $x_i$             | $i$ -té měření                      |
| $\bar{x}_g$       | Výběrový průměr $n$ měření          |
| $R_M$             | Měřená hodnota veličiny $R$         |
| $\delta_H$        | Chyba způsobená hysterezí           |
| $R \uparrow$      | Odpor měřený směrem vzhůru          |
| $R \downarrow$    | Odpor měřený směrem dolů            |
| $R_{max}$         | Maximální odpor                     |

|               |   |
|---------------|---|
| $R_0$         | Odpor teplotní snímače při teplotě 0 °C         |
| $R_{lin}$     | Linearizovaný odpor snímače                     |
| $T_{lin}$     | Linearizovaná hodnota teploty                   |
| $\delta_{KT}$ | Chyba způsobená kolísáním teploty               |
| $\delta_G$    | Chyba způsobená gradientem                      |
| $\Delta_s$    | Chyby způsobené stabilitou měřicí karty         |
| $u_{BD}$      | Nejistota daná driftem                          |
| $u_{BG}$      | Nejistota daná gradientem                       |
| $u_{BH}$      | Nejistota daná hysterezí                        |
| $u_{BK}$      | Nejistota kalibrace                             |
| $u_{BKT}$     | Nejistota daná kolísáním teploty                |
| $u_{BL}$      | Nejistota daná nelinearitou snímače             |
| $u_{Bo}$      | Nejistota daná opakovatelností                  |
| $u_{Bt}$      | Nejistota daná přesností snímače                |
| $u_{Bs}$      | Nejistota daná teplotní stabilitou měřicí karty |
| $c_i$         | koeficient citlivosti                           |
| $u_c$         | Kombinovaná standardní nejistota                |
| $U$           | Rozšířená standardní nejistota                  |
| $k_U$         | Koeficient rozšíření                            |
| $\eta$        | Hodnota tolerance                               |
| $a$           | Dolní hodnota tolerančního pásma                |
| $b$           | Horní hodnota tolerančního pásma                |
| $\text{erf}$  | Chybové funkce normálního rozložení             |
| $\Phi$        | Pravděpodobnostní funkce                        |

## Seznam obrázků

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Obrázek 1: Rozmístění jednotlivých snímačů v pracovním prostoru [6] .....</i>  | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 2: Vzdálenosti jednotlivých snímačů od stěn pracovního prostoru teplotní komory [7].....</i>                                     | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 3: Blokový diagram měřicího řetězce použitého při konfirmaci teplotní komory .....</i>   | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 4: Schéma zapojení RTD snímače a měřicí karty NI 9219 [16] .....</i>   | <i>37</i> |
| <i>Obrázek 5: Charakteristika závislosti odporu platinového snímače na teplotě [18]</i>   | <i>38</i> |
| <i>Obrázek 6: Průběh změny teplot v průběhu zkoušky, jeden konfirmační cyklus .....</i>   | <i>41</i> |
| <i>Obrázek 7: Úchyt snímače teploty ke konstrukci .....</i>   | <i>42</i> |
| <i>Obrázek 8: Konstrukce s upevněnými snímači teploty umístěná v pracovním prostoru teplotní komory.....</i>                                | <i>43</i> |
| <i>Obrázek 9: Zapojení snímačů v měřicích kartách NI 9219 .....</i>   | <i>44</i> |
| <i>Obrázek 10: Zobrazení stanovených průměrných teplot naměřených jednotlivými snímači při teplotní úrovni 25 °C.....</i>                   | <i>63</i> |
| <i>Obrázek 11: Prostorové znázornění rozložení teploty v horní části pracovního prostoru teplotní komory při teplotní úrovni 25°C .....</i> | <i>64</i> |
| <i>Obrázek 12: Zobrazení průměrné absolutní odchylky pro jednotlivé teplotní snímače při teplotní úrovni 25 °C.....</i>                     | <i>65</i> |
| <i>Obrázek 13: Kolísání teploty na snímači T7 při konfirmaci teplotní úrovně 25 °C. 66</i>  |           |
| <i>Obrázek 14: Zobrazení celkové rozšířené kombinované nejistoty pro jednotlivé konfirmované teplotní úrovně.....</i>                       | <i>89</i> |
| <i>Obrázek 15: Zobrazení absolutní odchylky průměrné teploty od žádané.....</i>   | <i>90</i> |
| <i>Obrázek 16: Zobrazení hodnoty teplotního gradientu v závislosti na konfirmované teplotní úrovni. ....</i>                                | <i>91</i> |



## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabulka 1: Třídy snímačů odporového typu [25]</i> .....  | 25 |
| <i>Tabulka 2: Třída 1 (A) pro termoelektrické snímače [25]</i> .....                                      | 25 |
| <i>Tabulka 3: Tabulka deficientů rozšíření ks pro n měření</i> .....                                      | 30 |
| <i>Tabulka 4: Tabulka nejpoužívanějších pravděpodobnostních rozdělení měřené veličiny.</i> .....          | 31 |
| <i>Tabulka 5: Tabulka koeficientu rozšíření kU a pravděpodobnosti P [11]</i> .....                        | 34 |
| <i>Tabulka 6: Specifikace teplotní komory CTS T-65/50 [13]</i> .....                                      | 35 |
| <i>Tabulka 7: Tabulka parametrů měřicí karty NI-9219 [16]</i> .....                                       | 36 |
| <i>Tabulka 8: Přehled základních specifikací snímače SENSIT TG3 [17]</i> .....                            | 37 |
| <i>Tabulka 9 Tabulka závislosti vybraných odporů R na teplotě t [18]</i> .....                            | 38 |
| <i>Tabulka 10: Hodnoty chyby snímače pro vybrané teploty [18]</i> .....                                   | 39 |
| <i>Tabulka 11: Teplotní úrovně, které budou ověřovány</i> .....   | 40 |
| <i>Tabulka 12: Přehled použitých zařízení</i> .....   | 44 |
| <i>Tabulka 13: Přehled jednotlivých teplotních snímačů a jejich sériových čísel</i> .....                 | 44 |
| <i>Tabulka 14: Cyklus konfirmovaných teplotních úrovní</i> .....  | 45 |
| <i>Tabulka 15: Klimatické podmínky ve zkušebně</i> .....  | 46 |
| <i>Tabulka 16: Průměrné hodnoty teploty a odporu stanovených při teplotní úrovni 25 °C</i> .....          | 49 |
| <i>Tabulka 17: Hodnoty odporů potřebných k výpočtu nejistoty dané hysterezí</i> .....                     | 50 |
| <i>Tabulka 18: Tabulka hodnot pro výpočet nelinearity snímače SENSIT Pt100/385052</i> .....               | 54 |
| <i>Tabulka 19: Podmínky ve zkušebně</i> .....   | 54 |
| <i>Tabulka 20: Ukázka naměřených hodnot potřebných k výpočtu gradientu a kolísání</i> .....               | 55 |
| <i>Tabulka 21: Přehled dílčích nejistot při měření teploty, které byly uvažované při konfirmaci</i> ..... | 59 |
| <i>Tabulka 22: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 25 °C</i> .....                       | 62 |
| <i>Tabulka 23: Zjištěné hodnoty při konfirmaci teplotní úrovně 25 °C</i> .....                            | 67 |
| <i>Tabulka 24: Přehled vybraných stanovených hodnot snímačů pro teplotní úroveň 50 °C</i> .....           | 68 |

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 25: Hodnoty zdrojů nejistot vystupujících při confirmaci teplotní úrovně 50 °C .....</i> | <i>69</i> |
| <i>Tabulka 26: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 50 °C .....</i>                      | <i>70</i> |
| <i>Tabulka 27: Přehled vybraných stanovených hodnot snímačů pro teplotní úroveň 75 °C .....</i>     | <i>70</i> |
| <i>Tabulka 28: Hodnoty zdrojů nejistot vystupujících při confirmaci teplotní úrovně 75 °C .....</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabulka 29: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 75 °C .....</i>                      | <i>72</i> |
| <i>Tabulka 30: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 100 °C.....</i>                 | <i>72</i> |
| <i>Tabulka 31: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 100 °C .....</i>  | <i>74</i> |
| <i>Tabulka 32: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 100 °C.....</i>                      | <i>74</i> |
| <i>Tabulka 33: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 125 °C .....</i>                | <i>75</i> |
| <i>Tabulka 34: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 125 °C .....</i>  | <i>76</i> |
| <i>Tabulka 35: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 125 °C.....</i>                      | <i>77</i> |
| <i>Tabulka 36: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 150 °C .....</i>                | <i>77</i> |
| <i>Tabulka 37: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 150 °C .....</i>  | <i>78</i> |
| <i>Tabulka 38: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 150 °C.....</i>                      | <i>79</i> |
| <i>Tabulka 39: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 175 °C .....</i>                | <i>79</i> |
| <i>Tabulka 40: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 175 °C .....</i>  | <i>80</i> |
| <i>Tabulka 41: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 175 °C.....</i>                      | <i>81</i> |
| <i>Tabulka 42: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 0 °C .....</i>                  | <i>81</i> |
| <i>Tabulka 43: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 0 °C .....</i>    | <i>82</i> |
| <i>Tabulka 44: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 0 °C .....</i>                       | <i>83</i> |
| <i>Tabulka 45: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň -25 °C .....</i>                | <i>83</i> |
| <i>Tabulka 46: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně -25 °C .....</i>  | <i>85</i> |
| <i>Tabulka 47: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně -25 °C .....</i>                     | <i>85</i> |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 48: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň -50 °C .....</i>               | <i>86</i> |
| <i>Tabulka 49: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně -50 °C .....</i> | <i>87</i> |
| <i>Tabulka 50: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně -50 °C .....</i>                    | <i>87</i> |
| <i>Tabulka 51: Souhrn stanovených výsledků pro jednotlivé teplotní úrovně .....</i>                | <i>88</i> |
| <i>Tabulka 52: Přehled hodnot kolísání teploty pro jednotlivé teplotní úrovně .....</i>            | <i>92</i> |

# 1. ÚVOD

V oblasti elektrotechniky, měřicí techniky, materiálů, farmacie, biologie a v dalších oblastech se provádí celá řada měření, testů a zkoušek. Velká část těchto zkoušek se provádí za účelem zjištění, jak se vzorek chová a jak mění své vlastnosti v různých klimatických podmínkách. Mezi nejvýznamnější klimatické podmínky patří teplota a relativní vlhkost. V oblasti elektrotechniky a měřicí techniky se tímto zabývá především soubor norem ČSN EN 60068 Zkoušení vlivů prostředí.

Klimatické zkoušky se provádějí v teplotních, případně teplotně-vlhkostních komorách. Tyto komory musí splňovat základní požadavky na přesnost a stabilitu v ustáleném stavu. Tyto požadavky vyplývají z norem pro jednotlivé klimatické zkoušky. Procedura, ověřující zda daná teplotní komora splňuje konkrétní požadavky, se nazývá konfirmace teplotní komory, případně stanovení výkonnosti teplotní komory.

Při konfirmaci teplotní komory je možné vycházet z několika základních zdrojů, jako jsou například soubor norem ČSN EN 60068-3, příručka německého akreditačního orgánu DKD DKD-R 5-7 vydaná v roce 2009 a kalibrační příručka vydaná Evropským sdružením národních metrologických ústavů EURAMET vydaná v roce 2007 EURAMET/cg-13/v.01. V následující diplomové práci se vychází především z postupů uvedených v normě ČSN EN 60068-3-5 Konfirmace výkonnosti klimatických (teplotně vlhkostních) komor, viz [4]. Avšak ve výše uvedených dokumentech se od sebe uvedené postupy liší jen v malých detailech.

Diplomová práce je věnována návrhu metodiky použitelné pro konfirmaci teplotní komory CTS T-65/50, samotné realizaci měření ve zkušební laboratoři CVVOZE, stanovení a vyčíslení relevantních zdrojů nejistot zatěžující měření a vyhodnocení konfirmace teplotní komory.

V diplomové práci jsou popsány metody, které se používají při konfirmaci teplotních komor. Jsou zde popsány tři metody konfirmace teplotních komor, které vycházejí z norem, jejich výhody a nevýhody a popis, kdy je vhodné jednotlivé metody použít. Diplomová práce se zabývá především základní metodou konfirmace teplotní komory bez zátěže, kdy se měření teploty provádí v prázdném pracovním prostoru teplotní komory. Pro tuto metodu jsou zde popsány například nároky na měřicí systém, snímače, jejich rozmístění, na sběr dat a další nároky, které plynou z norem.

Diplomová práce se také věnuje praktickému návrhu měření během konfirmace a popisu měřicí procedury, která byla posléze použita při konfirmaci teplotní komory v navržených teplotních úrovních.

Dále se práce věnuje popisu a výpočtu hodnot významných zdrojů nejistot zatěžujících výsledek měření. Závěr diplomové práce je věnován zhodnocení výsledků provedené konfirmace teplotní komory CTS T-65/50.

## 2. KONFIRMACE TEPLOTNÍ KOMORY

Konfirmace teplotní komory se provádí za účelem zjištění, zda teplotní komora splňuje požadavky, které jsou na ni kladeny během různých zkoušek, například klimatických zkoušek popsanych souborem norem ČSN EN 60068-1. Konfirmace teplotní komory se však může provádět nejen za účelem technických zkoušek, ale třeba i pro zkoušky používané ve farmacii a dalších oblastech, kde se teplotní komory používají [1].

Pro konfirmaci teplotní komory, je možné v normách postupy popisující jednoduchou a snadno opakovatelnou metodiku konfirmace. Tato metodika uvažuje konfirmaci teplotních komor za účelem provádění klimatických zkoušek chladem, popsanych v ČSN EN 60068-2-1 [21] a zkoušky suchým teplem popsanych v ČSN EN 60068-2-2 [20]. Z těchto dvou norem pak vyplývají kriteria hodnocení teplotní komory. Ve stejném souboru norem je možné nalézt i postupy konfirmace teplotně vlhkostních komor.

### 2.1 Metody

Konfirmaci teplotní komory je možné provádět několika různými metodami, např. metodou konfirmace nebo metodou rutinního sledování.

Každá z metod má své výhody a nevýhody a je vhodná za jiných podmínek. Tyto metody a jejich charakteristiky jsou popsány v normě ČSN EN 60068-3-5 a dále pak jsou popsány v ČSN EN 60068-3-7. Jednotlivé metody jsou stručně popsány níže.

#### 2.1.1 Metoda konfirmace

Při této metodě se předpokládá samostatné měření za účelem konfirmace, tedy jako samostatná zkouška. V rámci této metody je možné si vybrat ze dvou základních zkoušek a to zkoušky bez zátěže nebo se zátěží.

##### 2.1.1.1 Zkouška bez zátěže

Zkouškou bez zátěže se rozumí takový způsob konfirmace, kdy pracovní prostor konfirmované klimatické komory je zcela prázdná, s výjimkou měřicích snímačů a nutné aparatury pro jejich upevnění v prostoru [3].

Postup průběhu této zkoušky je popsán v normě ČSN EN 60068-3-5 a zároveň je i předmětem této diplomové práce. V normě jsou popsány základní principy a postupy prováděné během zkoušky, jako například požadavky na měřicí systém, snímače, rozmístění snímačů, doporučený postup změny teploty během zkoušky a požadavky na výstupní protokol o zkoušce. Detailní popis zkoušky, požadavků a postupu během zkoušky je uveden v kapitole 3.

Mezi výhody této zkoušky patří například [3]

- Je kalibrován celý pracovní prostor teplotní komory
- Kalibraci je nutné opakovat jednou či dvakrát za rok
- Při použití různých testovaných vzorků není nutná opětovná kalibrace
- Teplotní komoru je možné posoudit bez zkušební vzorku
- Relativně nízké náklady na měření

Mezi nevýhody této zkoušky patří například [3]

- Nelze určit, nebo velmi obtížně vliv zkušební vzorku
- Nelze určit, nebo velmi obtížně vliv vzorku uvolňujícího teplo
- Nejistoty způsobené teplotní komorou musí být uvažovány při zkouškách ve výpočtu nejistoty měření

#### 2.1.1.2 Zkouška se zátěží

V případě, kdy se předpokládá opakování podobných zkoušek, například pro podobné, nebo stejné zkušební vzorky, je vhodné použít zkoušku s typickou zátěží. Jako zátěž zde může být v pracovním prostoru komory umístěna umělá zátěž, simulující tepelné vlastnosti uvažovaného vzorku, nebo je do prostoru komory umístěn reálný vzorek [23].

Mezi výhody této zkoušky patří například [3]

- Vliv zkušební vzorku na řízení komory je možné definovat
- Před zkouškou může být vybrána vhodná komora
- Správné umístění snímačů může poskytnout informace o kritických částech zařízení
- Je možné kvantifikovat vliv zátěže uvolňující teplo
- Relativně nízké náklady

Mezi nevýhody této zkoušky patří například [3]

- Při významné změně zkušební vzorku je potřeba opětovná confirmace
- Nejistoty způsobené teplotní komorou musí být uvažovány při zkouškách ve výpočtu nejistoty měření

### 2.1.2 Metoda rutinního monitorování

Průběh této zkoušky je obdobný, jako u výše uvedených metod s tím rozdílem, že se provádí v průběhu standardních klimatických zkoušek popsanych souborem norem ČSN EN 60068. Tím, že bude komora confirmována během prováděné klimatické zkoušky, je získána největší přesnost odhadu měřených podmínek uvnitř pracovního prostoru teplotní komory [23]. Nevýhodou je, že tento výsledek je vázán na danou

klimatickou zkoušku s daným zkušebním vzorkem. Proto je vhodné při této zkoušce použít různé druhy zátěží a provést různé druhy klimatických zkoušek [3].

Mezi výhody této zkoušky patří například [3]

- Je možné přesně stanovit vliv zátěže na řízení komory
- Není nutné uvažovat teplotní drift teplotní komory
- Správné umístění snímačů může poskytnout informace o kritických bodech prostoru teplotní komory
- Komora není kalibrována na podmínky, které nejsou požadovány

Mezi nevýhody této zkoušky patří například [3]

- Pro každou zkoušku může být požadováno jiné měřicí zařízení
- Pro každou zkoušku musí být vypočteny nejistoty měření
- Z důvodu neustálé potřeby měřicího zařízení, může být metoda nejdražší

### 3. KONFIRMACE KOMORY BEZ ZÁTĚŽE

Popisem postupu a metodiky při konfirmaci teplotních komor se zabývá oblast technických norem ČSN EN 60068 pro zkoušky vlivů prostředí. Ze souboru těchto norem je pak pro naše účely konfirmace teplotní komory nejvhodnější využít normu ČSN EN 60068-3-5 konfirmace výkonnosti teplotních komor.

V této normě lze najít stručný popis průběhu a postupu měření při konfirmaci výkonnosti teplotních komor s prázdným prostorem uvnitř komory, tedy zkouška bez zátěže. Je zde dále popsáno, na které parametry a vlastnosti komory by se mělo při vyhodnocování hodnot z měření zaměřit a které vlastnosti komory z těchto hodnot určit.

Dále norma popisuje rozmístění snímačů během zkoušky a postup měření při stanovení rychlosti změny teploty. Norma ČSN EN 60068-3-5 pak v odstavci 5 uvádí postup měření při konfirmaci teplotních komor. Tento postup a posloupnost úkonů jsou však považovány za doporučené minimum k získání dat potřebných ke konfirmaci teplotních komor.

Při postupu, který norma udává, se ověří výkonnost teplotní komory jen ve třech pracovních bodech komory. Tyto pracovní body jsou stanoveny jako nejnižší a nejvyšší teplota, které je komora schopná dosáhnout, a dále pak jako teplota při nastavené teplotě na teplotu okolí [4]. Při provádění tohoto minima norma popisuje postup změn teploty mezi těmito pracovními body, a také postup jejich měření.

Protože postup ověřování výkonnosti teplotních komor popisovaný v normě ČSN EN 60068-3-5 je považován za minimum, další norma konkrétně ČSN EN 60068-3-11 uvádí, že je možné ověřovat vlastnosti teplotní komory v předpokládaných pracovních bodech. A že pokud se provádí pouze měření teploty, mělo by se do měření teplotní komory zahrnout dostatek měřených bodů, aby pokryly výše zmíněné minimální požadavky a dále pak alespoň dvě pracovní teploty při zapnutém topení a dvě pracovní teploty při zapnutém chlazení. [3]

#### 3.1 Senzory a měřicí systém

Ke správnému měření je potřeba použít správně snímače teploty. Druh těchto snímačů také určuje norma ČSN EN 60068-3-5. V této normě jsou definovány požadavky na měřicí systém, jako rozmístění snímačů, počet vzorků měření, doba, po kterou má být teplota v komoře měřena, čas mezi jednotlivými vzorky a další.

##### 3.1.1 Snímače

Pro měření teploty při konfirmaci teplotní komory jsou doporučovány termočlávkové snímače nebo odporové snímače třídy A [5], viz tabulka č. 1 a č. 2.

Snímače by měly být vybrány s ohledem na rozsah teplot měřených při konfirmaci komory, tedy snímače obvykle zahrnující hodnoty od -200 °C do 200 °C [6]. Norma



ČSN EN 60068-3-5 pak dále v odstavci 4.2 stanovuje další parametry použitých snímačů jako například dobu 50% odezvy použitého typu snímače.[6] Pro účely našeho měření byly vybrány odporové snímače třídy A SENSIT TG3-60 Pt100.

*Tabulka 1: Třídy snímačů odporového typu [2]*

| Toleranční třída | Rozsah teplot     |                       | Hodnota tolerance [°C]         |
|------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|
|                  | Drátové rezistory | Tenkovrstvé rezistory |                                |
| AA               | -50 až 250 °C     | 0 až 150 °C           | $\pm (0.1 + 0.0017 \cdot  t )$ |
| A                | -100 až 450 °C    | -30 až 300 °C         | $\pm (0.15 + 0.002 \cdot  t )$ |
| B                | -196 až 600 °C    | -50 až 500 °C         | $\pm (0.3 + 0.005 \cdot  t )$  |
| C                | -196 až 600 °C    | -50 až 600 °C         | $\pm (0.6 + 0.01 \cdot  t )$   |

*|t| je absolutní teplota ve °C bez ohledu na znaménko*

*Tabulka 2: Třída 1 (A) pro termoelektrické snímače [2]*

| Typ článku | Rozsah teplot  | Hodnota tolerance [°C]  |
|------------|----------------|---|
| Typ T      | -40 až 350 °C  | 0.5 nebo $0.004 \cdot  t $  |
| Typ E      | -40 až 800 °C  | 1.5 nebo $0.004 \cdot  t $  |
| Typ J      | -40 až 750 °C  | 1.5 nebo $0.004 \cdot  t $  |
| Typ K      | -40 až 1000 °C | 1.5 nebo $0.004 \cdot  t $  |
| Typ N      | -40 až 1000 °C | 1.5 nebo $0.004 \cdot  t $  |
| Typ R a S  | 0 až 1600 °C   | 1.0 pro $t < 1100^\circ\text{C}$<br>$[1.0 + 0.003 \cdot (t-1100)]$ pro $t > 1100$ |
| Typ B      | -              | -   |
| Typ C      | -              | -   |
| Typ A      | -              | -   |

*|t| je absolutní teplota ve °C bez ohledu na znaménko*

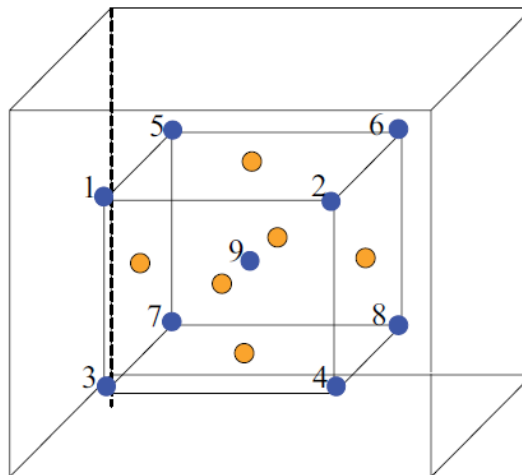
Tabulka 1 uvádí třídy přesnosti platinových odporových snímačů pro dva druhy rezistorů a k nim pak dále uvádí rozsah teplot a toleranci odchylky při měření teploty. Tabulka 2 uvádí obdobné informace pro jednotlivé druhy termočlánekových snímačů.

### 3.1.2 Rozmístění snímačů

Rozmístění snímačů v teplotní komoře a jejich počet je závislý na pracovním prostoru teplotní komory. Pro komory s pracovním prostorem menším než 2000 litrů je požadováno minimálně devět snímačů teploty. V tomto případě jsou tedy snímače rozmístěny do jednotlivých rohů pracovního prostoru komory a jeden ze snímačů do jeho středu prostoru [7].

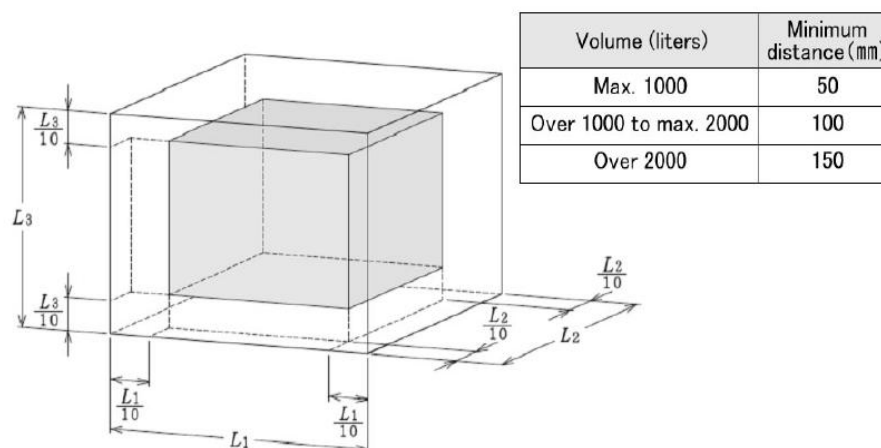
Pro komory s větším objemem než 2000 litrů je pak zapotřebí více snímačů a to alespoň patnáct. V tomto případě je rozmístění snímačů obdobné, avšak na středu každé stěny pracovního prostoru teplotní komory je umístěn další snímač teploty [7].

Vzhledem k tomu, že testovaná komora má objem pracovního prostoru menší než 2000 litrů, bude ke confirmaci postačovat devět snímačů. Jejich rozmístění v pracovním prostoru komory je zobrazeno na obrázku č. 1.



Obrázek 1: Rozmístění jednotlivých snímačů v pracovním prostoru [7]

V obrázku č. 1 je zobrazeno rozmístění snímačů v pracovním prostoru teplotní komory pro confirmaci. V obrázku jsou zakresleny modré a oranžové body, přičemž modré body znázorňují snímače v prostoru o objemu do 2000 litrů. Oranžové body znázorňují přidané snímače pro komory s pracovním prostorem nad 2000 litrů [6]. Vzdálenosti snímačů od stěn pak dále znázorňuje obrázek č. 2. Číslo označení bodu v obrázku č. 1 odpovídá označení snímačů v této diplomové práci. Tedy bod 1 je snímán snímačem T1.



Obrázek 2: Vzdálenosti jednotlivých snímačů od stěn pracovního prostoru teplotní komory [7]

Na obrázku č. 2 jsou znázorněny vzdálenosti jednotlivých snímačů od stěn pracovního prostoru teplotní komory. Délky jednotlivých stěn jsou v obrázku označeny  $L_1$ ,  $L_2$  a  $L_3$ . Vzdálenost snímače od konkrétní stěny je závislá právě na její délce. Vzdálenost snímače by měla být jedna desetina délky  $L$ . Avšak vzdálenost mezi snímačem a stěnou nesmí být menší než 50 mm pro komory s pracovním prostorem do 1000 litrů, 100 mm u komor s pracovním prostorem větším než 1000 litrů a menších než 2000 litrů a u komor s pracovním prostorem větším než 2000 litrů nesmí být tato vzdálenost menší než 150 mm. [7]

### 3.1.3 Měřicí systém

Norma ČSN EN 60068-5-3 dále uvádí několik požadavků na měřicí systém. Jeden z hlavních požadavků je kladen na dobu odezvy měřícího systému. Tato doba by neměla přesáhnout hodnotu 40 sekund [7]. Dále pak stanovuje požadavky na teplotní snímače, viz kapitola 3.1.1, a aby byla zajištěná návaznost použitých měřicích přístrojů na příslušné etalony [7].

## 3.2 Měření dat

Za účelem confirmace teplotní komory je zapotřebí mít k vyhodnocení dostatek dat. Proto norma ČSN EN 60068-3-5 uvádí doporučené a minimální požadavky na sběr dat během confirmace.

Z normy a i obecně vyplývá, že je vhodné zapisovat výstupy ze všech snímačů v intervalech nejméně po jedné minutě a to po dobu nejméně 30 minut. Tato doba by však měla pokrýt alespoň jeden regulační cyklus teplotní komory [8]. Větší množství dat je pak vhodné pro přesnější určování nejistoty měření a k zaznamenání kolísání teploty během cyklů komory.

Měření by mělo započít až po ustálení teploty na stabilním bodě. Případně je možné, aby ve specifikacích ke confirmaci komory byla tato doba pevně stanovena. [7]

Během confirmace teplotní komory může být požadováno ověřit i rychlost změny teploty při ohřevu a chladnutí teplotní komory. Data pro stanovení těchto vlastností komory se získávají ještě před dosažením ustáleného stavu komory. Přesný průběh stanovení těchto hodnot popisuje norma ČSN EN 60068-3-5. [4]

### 3.3 Podmínky ve zkušebně

Podmínky ve zkušebně během confirmace teplotní komory by měly vyhovovat normálním klimatickým podmínkám podle ČSN EN 60068-1. Normální klimatické podmínky bývají obvykle doporučovány z následujících hodnot [7]:

- Teplota +15 °C až +35°C
- Relativní vlhkost vzduchu 25 % RH až 75 % RH
- Tlak vzduchu 860 hPa až 1060 hPa

Dále by mělo být během confirmace teplotní komory zajištěno, aby teplotní komora nebyla vystavena dalším možným vnějším vlivům, které by mohly ovlivnit měření [8]. Tyto vlivy popisuje kapitola 4.1 normy ČSN EN 60068-3-5.

### 3.4 Vyhodnocení

Při vyhodnocování měření se jako naměřená hodnota bere celkový výběrový průměr ze všech hodnot pro danou teplotu, která je naměřena jednotlivými snímači [1]. Dále se z těchto hodnot vypočítává celková směrodatná odchylka, která je dále používána k výpočtu nejistot daného měření. Vyplývá to z postupu pro vyhodnocení confirmace teplotních komor, který je popsán v ČSN EN 60068-3-11.

V normě jsou dále krátce vyjmenovány některé významné zdroje nejistot, které je nutné při vyhodnocování měření uvažovat. Mezi nejvýznamnější zdroj nejistot při confirmaci teplotní komory patří gradient [8]. Gradient je definován jako maximální rozdíl střední hodnoty teploty po stabilizaci mezi dvěma měřenými body v prostoru komory [8].

Výsledek měření pro danou teplotu se uvádí obvykle ve tvaru, kdy naměřená hodnota je tedy celkový výběrový průměr, nejistota je rozšířená kombinovaná nejistota při konfidenční úrovni 95 %. Výsledek pak může být ve tvaru například  $39,8 \pm 0,96$  °C při konfidenční úrovni 95 % [3].

Při stanovení jistých předpokladů týkajících se odhadů velikosti některých nejistot stanovených na základě například zkušeností, nebývá zbytková chyba těchto odhadů dostatečně velká na to, aby způsobila významné ovlivnění výsledku. Tyto předpoklady by se však neměli týkat dvou či tří nejvýznamnějších složek nejistoty [2].

## 4. TEORIE NEJISTOT MĚŘENÍ

Nedílnou součástí stanovení správného výsledku měření je i stanovní celkové nejistoty měření. Za pomoci celkové nejistoty měření je možné stanovit interval hodnot, ve kterém se s určitou pravděpodobností správný výsledek měření nachází. K tomu, aby bylo možné hodnotu celkové nejistoty vyčíslit, je nutné nejdříve sestavit základní nejistotu typu A a typu B. Zatímco nejistota typu A se stanovuje na základě statistické analýzy naměřených dat, nejistota typu B se stanovuje na základě odborného posudku nad možnými zdroji této nejistoty, které by mohly negativně ovlivnit měření.[10]

Seznam nejvýznamnějších zdrojů nejistot typu B, které nejvíce zatěžují konečný výsledek confirmace teplotní komory, je možné nalézt v normách zabývajících se confirmací teplotních komor, například viz [3].

### 4.1 Stanovení standardní nejistoty vstupní veličiny

Standardní nejistota měření, která se vztahuje k odhadu hodnot vstupní veličiny, se stanovuje pomocí postupů pro stanovení standardních nejistot typu A, typu B.

Postup pro stanovení nejistoty typu A je založen na statické analýze série naměřených dat, viz [10]. Nejistota typu A se stanovuje jako směrodatná odchylka vycházející z výpočtu regresní analýzy.

Postup při stanovení standardní nejistoty typu B je založen na stanovení nejistoty odlišným způsobem než u nejistoty typu A. U této nejistoty se vychází z odborné znalosti dané problematiky měření.

#### 4.1.1 Stavení nejistoty typu A

Při určování nejistoty typu A je zapotřebí mít k dispozici několik nezávislých měřených veličin, které byly pořízeny za stejných podmínek [9]. V případě, že bude měřeno s dostatečným rozlišením, rozptyl měřených hodnot bude patrný.

Výběrový rozptyl je stanoven dle vztahu [10]:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (4.1)$$

Kde  $\bar{q}$  je aritmetický průměr podle následujícího vzorce a  $q$  naměřená hodnota:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (4.2)$$

Výběrová směrodatná odchylka se pak stanoví jako odmocnina výběrového rozptylu podle vzorce [10]:

$$u_A(x) = s_{\bar{q}} = \sqrt{\frac{s^2(q)}{n}} \quad (4.3)$$

Obecně platí, že v případě, kdy je počet opakovaných měření  $n$  malý ( $n < 10$ ), musí se použít koeficient rozšíření podle vztahu:

$$u_A(x) = k_s s_{\bar{q}} \quad (4.4)$$

V tabulce č. 3 je uveden přehled koeficientů rozšíření.

*Tabulka 3: Tabulka deficietů rozšíření  $k_s$  pro  $n$  měření*

|       |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $n$   | 10  | 9   | 8   | 7   | 6   | 5   | 4   | 3   | 2   |
| $k_s$ | 1,0 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 1,7 | 2,3 | 7,0 |

### 4.1.2 Stavení nejistoty typu B

Nejistota typu B se stanovuje odlišným způsobem než nejistota typu A. U stanovení této nejistoty se tedy nevyužívá statistické analýzy [9]. Nejistota typu B se stanovuje za pomoci odborného posudku a to vyčíslením jednotlivých typických zdrojů nejistot ( $u_{Bz}$ ), které mají na dané měření vliv. Typické nejistoty lze odvodit například na základě: [10]

- dat z dřívějších měření
- zkušenosti s chováním a vlastnostmi daných materiálů a zařízení nebo jejich obecných znalostech
- údajů výrobce
- údajů v kalibračních listech nebo jiných specifikacích referenčních nejistot
- údajů převzatých z příruček

### 4.2 Obecné zdroje nejistoty typu B

Ve většině případů měření je měřená veličina převáděna vhodnými převodníky na elektrický signál. Při měření tohoto signálu se může v celém měření projevat celá řada zdrojů nejistot typu B a je na uvážení a zkušenostech kvalifikované osoby rozhodnout, které zdroje nejistoty typu B je vhodné a opodstatněné do výpočtu celkové nejistoty zahrnout. Na měřený signál může působit celá řada vlivů, které se podílejí na celkové nejistotě. Tyto vlivy je možné rozdělit do několika oblastí, jako například:

- vlivy vázané na použité přístroje, etalony a vybavení [11]

- nejistoty kalibrace, stabilita, dynamické chyby přístrojů, hystereze a další
- vlivy okolního prostředí a jeho změny [11]
    - tlak, teplota, vlhkost vzduchu, magnetické a elektrické pole a další
  - vlivy metody
    - ztráty, svodové proudy, vlastní ohřev, přestup tepla a další [11]
  - vliv operátora
    - nedodržení metodiky, osobní zvyklosti, elektrické pole a další [11]
  - ostatní vlivy
    - omyly při odečítání dat

Každý ze zdrojů nejistoty typu B, který je pro dané měření relevantní, je označen jako  $z_1, z_2, \dots, z_i$ . Pro každý tento zdroj se vyčíslí jeho nejistota typu B  $u_{Bz_i}$ , kterou přispívá k celkové nejistotě měření. K vyčíslení nejistot vybraných zdrojů je možné použít například technickou dokumentaci, katalogové listy, případně je na základě zkušeností odhadnout [10].

Dále se pak pro jednotlivé zdroje určí maximální rozsah (odchylek)  $\pm \Delta z_{iMax}$  od jmenovité hodnoty měřené veličiny příslušného zdroje  $z_i$ . viz [12]. Na základě teorie nebo zkušeností se určí pravděpodobnostní rozdělení hodnot  $\chi$  v rozsahu hodnot  $\pm \Delta z_{iMax}$ . Hodnotu pravděpodobnostního rozdělení je možné určit podle tabulky č. 4.

*Tabulka 4: Tabulka nejpoužívanějších pravděpodobnostních rozdělení měřené veličiny.*  
(P znamená pravděpodobnost) [12]

| Typ rozdělení | Koeficient $\chi$ | Poznámka    |
|---------------|-------------------|-------------|
| normální      | 3                 | pro P=0,997 |
| normální      | 2                 | pro P=0,95  |
| rovnoměrné    | $\sqrt{3}$        |             |

Nejistota typu B pro jednotlivé zdroje se pak určí podle vztahu [10]:

$$u_{Bz_i} = \frac{\Delta z_{iMax}}{\chi} \quad (4.5)$$

Celková nejistota typu B se pak určí jako geometrický součet všech zvolených zdrojů nejistoty typu B podle vzorce [10]:

$$u_{Bz} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bz_i}^2} \quad (4.6)$$

### **4.3 Zdroje nejistot typu B**

Během měření se uplatňuje celá řada nejistot, avšak je možné určit čtyři základní zdroje těchto nejistot, viz ČSN EN 60068-3-11. Mezi tyto základní zdroje patří nejistota vzniklá při kalibraci měřicích přístrojů, nejistota daná metrologickými charakteristikami měřicího přístroje, nejistoty vznikající během měření a dále pak nejistoty způsobené sáláním. Popis těchto zdrojů je uveden níže. [7]

#### **4.3.1 Nejistoty kalibrace přístrojů**

Jeden ze základních zdrojů nejistot je nejistota použitých přístrojů k měření. Tyto nejistoty jsou uvedeny v kalibračním listu, specifikacích, či manuálu daného přístroje. Nejistoty uvedené v kalibračním listu přístroje jsou obvykle uváděny s konfidenční úrovní 95 % [3].

#### **4.3.2 Nejistoty přístroje**

Mezi nejistoty přístroje patří vlastnosti měřicího přístroje způsobené například rozlišením, opakovatelností, driftem atd. Při interpretaci nejistot ze specifikací přístroje je třeba brát v úvahu měřenou veličinu, měřicí rozsah, rozlišení přístroje, dobu od poslední kalibrace, teplotu okolí přístroje a další možné vlivy. Podle těchto vlivů je pak možné ze specifikací vybrat správnou hodnotu nejistoty pro konkrétní přístroj. Velkým chybám, které by byly způsobeny těmito faktory, je možné částečně zamezit opakovanými měřeními a zvýšit tak pravděpodobnost platnosti odhadnutým nejistotám.[22]

#### **4.3.3 Nejistoty vznikající v době měření**

Hlavní nejistoty během měření jsou obvykle spjaty s gradienty a kolísáním podmínek během doby měření. Při použití dané metody měření musejí být kolísání a gradienty určeny [3].

#### **4.3.4 Nejistoty způsobené sáláním**

V teplotních komorách může někdy být velký vliv sálání. Jestliže snímače teploty dávají hodnoty neočekávaně velké nebo se u jednotlivých zkoušek mění, nebo pokud je například teplota v některé části komory výrazně odlišná od nastavené teploty, potom je třeba použít další zkoušku se snímači s odlišnou vyzařovací barvou. Při teplotách nad 100 °C má sálání stoupající vliv na snímače i na vzorek v teplotní komoře [3].



### 4.3.5 Další nejistoty

Jako další nejistoty měření je nutné brát v úvahu jakékoli další vlivy, které mohou ovlivnit měření. Například rozdílné podmínky při kalibraci a při používání snímačů, teplota prostředí, ve kterém jsou umístěny měřicí přístroje apod. [3].

### 4.3.6 Důležité zdroje nejistot

K analýze nejistot je nutné sestavit si seznam všech zdrojů nejistot, které významně přispívají k celkové nejistotě měření. Norma ČSN EN 60068-3-11 uvádí krátký seznam těchto nejistot. Některé z uvažovaných nejistot však mohou být svou velikostí nevýznamné, a tak není třeba s nimi počítat [9]. Mezi takovéto zdroje může pařit například chyba metody, vliv obsluhy, vliv způsobu zapojení. [9]

### 4.3.7 Nejistota nepřímých měření [13]

V případě, že je měřený výsledek měřené veličiny  $Y$  určen výpočtem funkce  $f$  z naměřených veličin  $X_1$  až  $X_n$ , je zapotřebí brát tuto skutečnost v potaz při stanovení nejistoty. Nejistota nepřímého měření se pak skládá z takzvaného citlivostního koeficientu podle vzorce [10]:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad (4.7)$$

Kde  $c_i$  je koeficient citlivosti odpovídající odhadu hodnoty  $x_i$  vstupní veličiny  $X_i$ . Koeficient citlivosti se určí jako parciální derivace funkce  $f$  podle vstupní veličiny  $X_i$  pro odhad její veličiny  $x_i$ .

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \quad (4.8)$$

Koeficient citlivosti  $c_i$  popisuje, do jaké míry odhad výstupní veličina  $y$  může být ovlivňován vstupní veličinou  $X_i$ . Ke stanovení výsledku se obvykle používá střední hodnota  $\bar{y}$  získaná pomocí  $\bar{x}_1$  až  $\bar{x}_n$ .

Standardní nejistota typu B se pak stanoví z dílčích nezávislých nejistot typu B podle vzorce [10]:

$$u_{Bx} = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_{xi}^2 \cdot u_{Bxi}^2} \quad (4.9)$$

### 4.3.8 Kombinovaná standardní nejistota

Tato nejistota se vypočítá jako geometrický součet nejistoty typu A a nejistoty typu B [10].

$$u_c = \sqrt{u_A^2 \cdot u_B^2} \quad (4.10)$$

Tímto výpočtem je získán interval, ve kterém leží skutečná měřená veličina s pravděpodobností  $P = 68,28 \%$ , a to za předpokladu použití normální pravděpodobnosti [10]. Aby se zvýšila pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží v daném intervalu, používá se dále rozšířená standardní nejistota [12].

### 4.3.9 Rozšířená standardní nejistota

Tato nejistota se používá, pokud je požadována větší přesnost měření a tedy větší pravděpodobnost, že skutečná měřená hodnota spadá do daného vypočteného intervalu [9]. Tato rozšířená nejistota se vypočítá podle vzorce:

$$U = k_U \cdot u_c \quad (4.11)$$

Kde  $k_U$  je koeficient rozšíření. Hodnoty koeficientu rozšíření pro normální rozdělení hustoty pravděpodobnosti je možné vidět v tabulce č. 5.

Tabulka 5: Tabulka koeficientu rozšíření  $k_U$  a pravděpodobnosti  $P$  [12]

| P [%] | $k_U$ [-] |
|-------|-----------|
| 68,27 | 1         |
| 95,45 | 2         |
| 99,00 | 2,58      |
| 99,73 | 3         |

V tabulce je vypsáno, s jakou pravděpodobností  $P$  skutečná veličina leží v intervalu stanoveném rozšířenou nejistotou  $U$ .

Po stanovení hodnot jednotlivých nejistot, které v daném měření vystupují a jsou pro měření relevantní, je možné zapsat výsledek. Tento výsledek se skládá z naměřené hodnoty, kterou reprezentuje celkový výběrový průměr a nejistoty měření. Dále se pak u výsledku uvádí takzvaná konfidenční úroveň, která odpovídá výše uvedené pravděpodobnosti  $P$ .

## 5. NÁVRH MĚŘENÍ

Cílem této práce je provést konfirmaci teplotní komory CTS T-65/50, viz [14]. Za tímto účelem je zapotřebí definovat pracovní postup, podle kterého se má samotné měření provádět. Postup by měl obsahovat základní informace k provedení konfirmace teplotní komory a tyto informace by dále měly být dostatečně podrobné, aby bylo možné snadno celou zkoušku kdykoli zopakovat za stejných podmínek.

### 5.1 Teplotní komora

Teplotní komora, která má být v rámci této práce posuzována, zda splňuje požadavky pro provádění klimatických zkoušek, je teplotní komora firmy CTS řady T-65/50. Tato teplotní komora patří se svým objemem 50 litrů mezi malé teplotní komory. Teplotní komora umožňuje měnit teplotu vnitřního prostoru v rozsahu od  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  [14]. Z klimatických podmínek komora umožňuje nastavovat pouze teplotu. Relativní vlhkost vzduchu není možné nastavovat a teplotní komora se tedy hodí pouze pro určité druhy klimatických zkoušek, jako je například zkouška suchým teplem. Další specifikace teplotní komory CTS T-65/50 jsou obsaženy v tabulce č. 6.

Tabulka 6: Specifikace teplotní komory CTS T-65/50 [14]

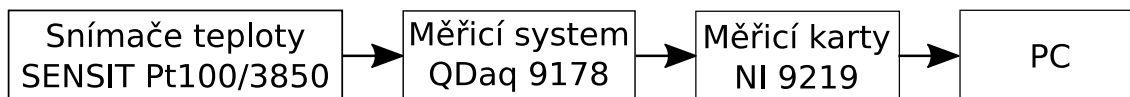
| Objem [l] | Výška [mm] | Šířka [mm] | Hloubka [mm] | Rozsah teplot [ $^{\circ}\text{C}$ ] | Ohřev [K/min] | Chlazení [K/min] | Odchylka teploty [K] |
|-----------|------------|------------|--------------|--------------------------------------|---------------|------------------|----------------------|
| 50        | 400        | 400        | 320          | -65/180                              | 6             | 4                | $\leq \pm 0,3$       |

### 5.2 Konfirmace teplotní komory

Úkolem je ověřit, zda teplotní komora splňuje požadavky na přesnost teploty v pracovním prostoru, které udávají specifikace výrobce komory. Odchylka nastavené teploty a teploty v pracovním prostoru teplotní komory během zkoušky by měla být menší nebo rovna  $\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , viz [14]. Při stanovení požadavků a průběhu konfirmace teplotní komory je vycházeno ze souboru norem ČSN EN 60068. Protože pro konfirmaci byl vybrán typ zkoušky bez zátěže, kdy je pracovní prostor komory prázdný, vychází zkouška z normy ČSN EN 60068-3-5 Konfirmace výkonnosti teplotních komor. Tato norma také stanovuje, že při této zkoušce má být ověřena rychlost změny teploty v pracovním prostoru teplotní komory. Tato část zkoušky ovšem není předmětem této diplomové práce. V následujícím návrhu postupu při zkoušce se vychází z požadavku, že přesnost dosažené teploty má být ověřována v nejčastěji používaných pracovních bodech teplotní komory.

### 5.3 Měřicí řetězec

Měřicí řetězec, který byl sestaven pro confirmaci teplotní komory, se skládá především z několika základních částí a to zejména z měřicího systému NI CompactDAQ, měřicích karet NI 9219 a z devíti platinových snímačů SENSIT TG3-60, viz obrázek č. 3.



Obrázek 3: Blokový diagram měřicího řetězce použitého při confirmaci teplotní komory

### 5.4 Měřicí systém

Základem měřicího řetězce je měřicí systém CompactDAQ od firmy National Instruments, konkrétně cDAQ-9178, viz [15]. Systém cDAQ slouží jako šasi k připojení měřicích karet, které je možné si vybrat dle povahy měření. Je možné si vybrat například analogové, či digitální karty, karty pro měření napětí, proudu, měření pomocí RTD článků a dalších [15]. Systém cDAQ se dále stará o synchronizaci měření mezi měřicími kartami, přenos naměřených dat mezi měřicím systémem a počítačem. Komunikace mezi systémem a počítačem probíhá pomocí USB portu. Systém cDAQ dále disponuje osmi sloty pro měřicí karty, čtyřmi čítači/časovači a pracuje v rozlišení 32 bitů [15].

### 5.5 Měřicí karta

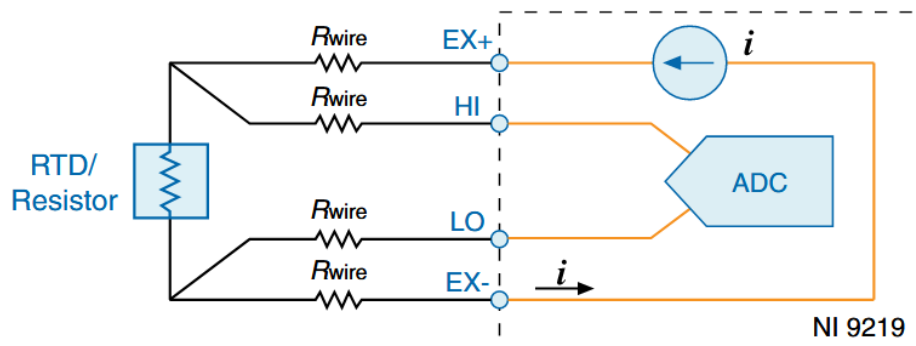
K měření teploty byla poskytnuta zkušební laboratoří CVVOZE trojice měřicích karet NI-9219, viz [17]. Tento typ karet je určen pro víceúčelové měření v systémech jako je například cDAQ. Karta NI-9219 umožňuje měřit několik měřicích kanálů současně, jako například kanály od tenzometrů, RTD snímačů teploty, termočlánků, snímačů polohy a dalších [17]. Karta disponuje čtyřmi kanály, na které je možné připojit různé typy snímačů. Rozsah měření se liší pro různé typy měření. Vybrané důležité parametry ze specifikací měřicí karty jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka 7: Tabulka parametrů měřicí karty NI-9219 [17]

| 4-Wire (25°C ± 5°C)   | Pt100 RTD | R [1kΩ] | R [10kΩ] | Teplota okolí |
|-----------------------|-----------|---------|----------|---------------|
| Chyba ze vstupu [%]   | ±0,1      | ±0,1    | ±0,1     | -40 až 70 °C  |
| Chyba z rozsahu [ppm] | ±2400     | ±1200   | ±120     |               |

Hodnoty uvedené v tabulce jsou výběrem některých důležitých parametrů, které se týkají především měření teploty pomocí odporových snímačů RTD. Tyto hodnoty byly vybrány na základě použitého platinového snímače Pt100.

Jednou z výhod dané karty je, že umožňuje čtyř-vodičové zapojení RTD snímače, čímž se částečně sníží negativní vliv vedení během měření teploty. Schéma zapojení je vidět na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Schéma zapojení RTD snímače a měřicí karty NI 9219 [17]

Na obrázku je vidět schéma zapojení RTD snímače na vstup karty NI-9219, kde je odpor vedení znázorněn jako  $R_{wire}$  a svorky karty jsou označeny jako  $EX$ ,  $HI$  a  $LO$  [17].

## 5.6 Snímače

Požadavky na snímače pro měřicí systém jsou uvedeny v normě ČSN EN 60068-3-5 odstavec 4.2. Mimo jiné požadavky na snímače je zde uveden jako jeden z hlavních požadavků, aby snímače byly odporového nebo termočlánekového typu v rozsahu teplot  $-200\text{ °C}$  až  $200\text{ °C}$  a třídy A podle normy 60751 [6]. Snímače, které byly na základě požadavků normy vybrány pro měření teploty v pracovním prostoru teplotní komory během konfirmace, jsou od firmy SENSTIT a to typ TG3-60-Pt100/3856/A, viz literatura č. 18. Základní parametry tohoto snímače je možné vidět v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Přehled základních specifikací snímače SENSIT TG3 [18]

| Snímač                  | TG 3   |
|-------------------------|--|
| Teplotní rozsah použití | -50 až 200 °C  |
| Typ čidla               | PT, Ni, NTC, Termočlánek K, J  |
| Stupeň krytí            | IP 67 dle ČSN EN 60529   |
| Materiál pouzdra        | nerezová ocel DIN 1.4301   |
| Průměr pouzdra          | 3 mm   |
| Délka pouzdra L         | 25 až 60 mm  |
| Přívodní kabel          | teflon nestíněný 2 x 0,205 mm <sup>2</sup><br>teflon stíněný 4 x 0,051 mm <sup>2</sup> |
| Odpor vedení            | 0,16 Ω na 1 m kabelu pro 2vodičové zapojení  |
| Doba odezvy             | $\tau_{0,5}$ = do 3 s, $\tau_{0,9}$ = do 9 s   |

V tabulce č. 8 jsou zapsány základní údaje o snímači TG3. V tabulce lze nalézt teplotní rozsah, typ snímače, informace o odporu vedení a doby odezvy snímače. Další charakteristiky snímače se odvíjejí od konkrétního provedení snímače, viz dále.

### 5.6.1 Charakteristiky snímače

Snímacím prvkem tohoto snímače je tenkovrstvý platinový odpor typu Pt100/3850, jehož odpor  $R$  je při teplotě  $0\text{ °C}$   $100\ \Omega$  [19]. Teplotní závislost odporu čidla je dána vztahem

$$R = 100 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C(t - 100)t^3) \quad \text{Pro } -50 \leq t < 0\text{ °C} \quad (5.1)$$

$$R = 100 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad \text{Pro } 0 \leq t \leq 600\text{ °C} \quad (5.2)$$

Kde  $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}\text{ °C}^{-1}$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7}\text{ °C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12}\text{ °C}^{-4}$$

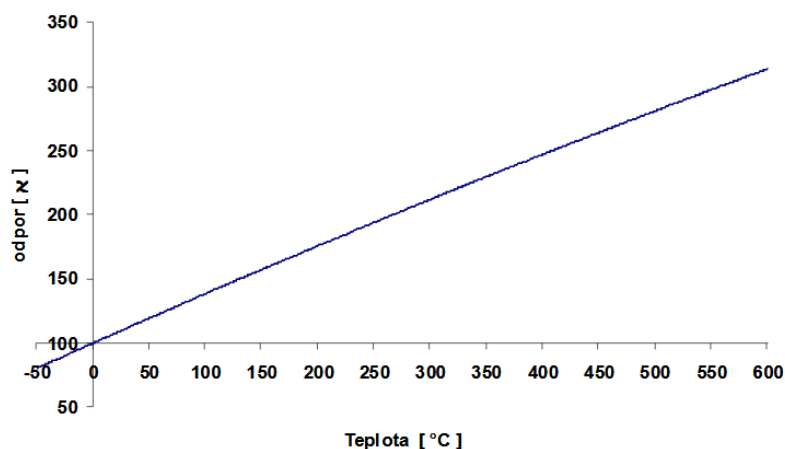
Některé vybrané hodnoty odporu závislé na teplotě jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Tabulka 9 Tabulka závislosti vybraných odporů  $R$  na teplotě  $t$  [19]

| $t\text{ [°C]}$            | -50   | -25  | 0      | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 100   | 200   |
|----------------------------|-------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $R\text{ [}\Omega\text{]}$ | 80,31 | 90,1 | 100,00 | 103,9 | 107,8 | 111,7 | 115,4 | 119,4 | 138,5 | 175,9 |

Z hodnot závislosti odporu na teplotě lze sestavit graf charakteristiky čidla, viz obrázek č. 5.

### Charakteristika čidla



Obrázek 5: Charakteristika závislosti odporu platinového snímače na teplotě [19]

Další charakteristikou typickou pro vybraný snímač je jeho přesnost s tolerančním pásmem založeným na třídě přesnosti, kterou snímač splňuje. Protože snímač splňuje požadavky na přesnost třídy A, je jeho přesnost dána vztahem  $\pm (0,15 + 0,002|t|)$ , kde  $t$  je absolutní teplota ve °C [3]. Jako příklad jsou uvedeny v tabulce č. 10 hodnoty tolerance pro některé zvolené teploty.

Tabulka 10: Hodnoty chyby snímače pro vybrané teploty [19]

| t [°C]                  | -50 | -30        | 0          | 25         | 100        | 150        | 200        |
|-------------------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\Delta t$ [°C]         | -   | $\pm 0,21$ | $\pm 0,15$ | $\pm 0,20$ | $\pm 0,35$ | $\pm 0,45$ | $\pm 0,55$ |
| $\Delta R$ [ $\Omega$ ] | -   | $\pm 0,08$ | $\pm 0,06$ | $\pm 0,08$ | $\pm 0,13$ | $\pm 0,17$ | $\pm 0,20$ |

## 5.7 Měřicí procedura

Měřicí procedura byla navržena podle požadavků plynoucích z norem zabývajících se konfirmací teplotních komor, především pak normou ČSN EN 60068-3-5. Do navržené procedury byly dále zahrnuty požadavky na ověření teploty ve stanovených pracovních bodech teplotní komory a přizpůsobení se časové vytíženosti teplotní komory například zkrácením doby ustálení teploty.

### 5.7.1 Optimalizace pro zkoušku

Specifikace zkoušky pro konfirmaci teplotní komory byly dále optimalizovány s přihlédnutím k tomu, že se předpokládá, že v dané teplotní komoře se budou převážně provádět klimatické zkoušky suchým teplem dle normy ČSN EN 60068-2-2. Tato norma, mimo jiné, klade požadavky na rychlost změny teploty, udává toleranční pásmo teploty vzduchu proudícího do komory v ustáleném stavu a předepisuje stupně přesnosti zkoušky. Stupně přesnosti popisují dobu zkoušky a teplotu v pracovním prostoru teplotní komory během zkoušky a to v rozsahu od 30 do 1000 °C [19]. Obdobné požadavky na specifikace zkoušky pro konfirmaci má i norma zabývající se klimatickou zkouškou – Chlad dle normy ČSN EN 60068-2-1. Ta popisuje klimatickou zkoušku za teplot nižších než +5 °C [21].

### 5.7.2 Konfirmace teplot

Za účelem konfirmace teplotní komory byla zvolena metoda bez zatížení teplotní komory. Při této metodě je do prázdného pracovního prostoru teplotní komory rozmístěno devět snímačů teploty. Osm snímačů je umístěno do rohu komory v definované vzdálenosti od stěn a jeden do středu komory, viz kapitola 3 obrázek č. 1. Jelikož je teplotní komora svými rozměry malá, viz tabulka č. 6, jsou vzdálenosti snímačů od vnitřních stěn teplotní komory stanoveny na 50 mm, což je dovolené minimum [8].

### 5.7.3 Teplotní specifikace

Jako vhodné pracovní body teplotní komory k ověření bylo vybráno několik nejčastěji využívaných teplot s přihlédnutím k teplotám uvedeným v normě pro zkoušku suchým teplem. Vybrané teploty jsou uvedeny v tabulce č. 11.

Tabulka 11: Teplotní úrovně, které budou ověřovány

|        |     |     |   |    |    |    |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|---|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
| t [°C] | -50 | -25 | 0 | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 |
|--------|-----|-----|---|----|----|----|-----|-----|-----|-----|

Rychlost změny teploty by neměla přesáhnout 1 K za 5 minut a to jak při ohřevu, tak při chladnutí. Kolísání teploty proudícího vzduchu v ustáleném stavu by nemělo přesáhnout hodnotu  $\pm 2$  °C [7].

### 5.7.4 Doba ustálení

Teplota v komoře je ustálená, pokud všechny snímače v pracovním prostoru komory ukazují nastavenou teplotu  $\pm$  tolerance ( $\pm < 0.3$  °C), viz [14]. Protože konfirmace teplotní komory se provádí mimo jiné za účelem určení vhodnosti komory pro konkrétní klimatickou zkoušku, viz [4], lze také dobu ustálení definovat na základě informací obsažených v příslušné technické normě. Normy pro klimatické zkoušky obvykle uvádějí dobu ustálení na 24 hodin, avšak tuto dobu můžou specifikace ke zkoušce dané zadavatelem zkoušky stanovit jinak, viz [20].

### 5.7.5 Cyklus měření

Cyklus měření započne vždy poté, co se teplota v komoře ustálí. Během tohoto cyklu se ze všech snímačů budou vyčítat data o teplotě uvnitř komory a to minimálně každou minutu. Během měření se odebere minimálně 30 vzorků teploty [6]. Pro danou teplotní úroveň by měření teploty mělo pokrýt alespoň jeden regulační cyklus komory. Obvykle postačuje měření provádět po dobu 30 minut [7].

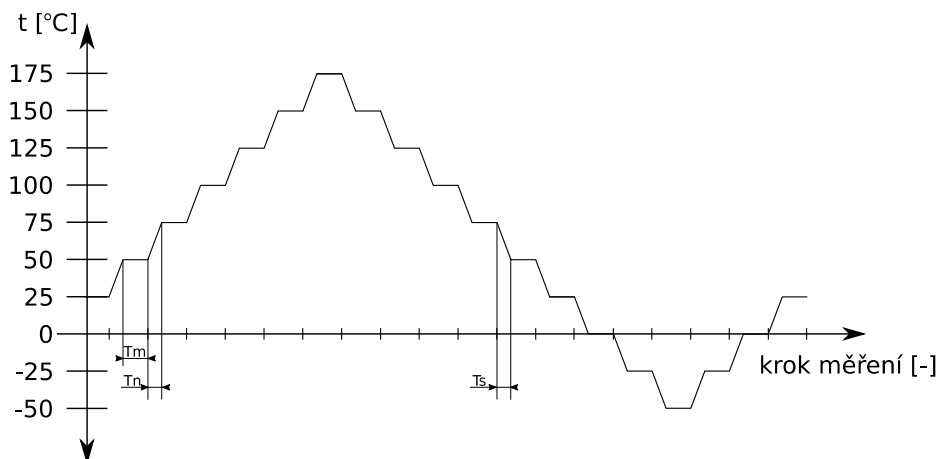
### 5.7.6 Posloupnost teplot

Na teplotní komoře se nastaví teplota blízké teplotě okolí, viz kapitola 5.7.7 a nechá se stabilizovat. Poté se začínají postupně nastavovat teploty uvedené v tabulce č. 8 až po nejvyšší specifikovanou teplotu. Vždy po dosažení nastavené teploty se nechá teplota uvnitř komory ustálit, viz 5.7.4, poté se provede série měření. Po provedení požadovaného počtu měření se nastaví další teplotní úroveň a celý proces ustálení a měření se opakuje.

Po odměření teploty za nejvyšší specifikované teploty se obdobným způsobem postupuje i v opačném směru nastavováním teplot až po nejnižší teplotu uvedenou v



tabulce č. 11. Po odměření nejnižší teploty se opět postupuje směrem vzrůstající teploty až do bodu, kdy se nastaví teplota okolí a při této teplotě se provede poslední série měření. Tento postup je znázorněn graficky na obrázku č. 6, kdy teplota 25 °C je považována za teplotu okolí.



Obrázek 6: Průběh změny teplot v průběhu zkoušky, jeden konfirmační cyklus

V obrázku č. 5 je vidět zjednodušený chronologický průběh jednoho cyklu konfirmace definovaných teplotních úrovní. V obrázku č. 5 je znázorněna změna teploty a ustálený stav. Jednotlivé hodnoty, které jsou v rámci zkoušky ověřovány, jsou vyneseny na svislé ose grafu. Na vodorovné ose je vyznačen krok měření.

Doba  $t_m$  je doba, po kterou má být měření v ustáleném stavu,  $t_n$  je doba náběhu s rychlostí ohřevu 1 °C/ 5 minut [20]. A  $t_s$  je doba sestupu se stejnou rychlostí ochlazování.

### 5.7.7 Podmínky ve zkušebně

Podmínky ve zkušebně během konfirmace teplotní komory mají být normální dle definice uvedené v ČSN EN 60068-1, viz kapitola 283.3. Klimatické podmínky ve zkušebně by měly být zaznamenány a uvedeny ve zprávě o měření.

### 5.7.8 Požadavky na vyhodnocení

Jako metoda vhodná pro vyhodnocení byl zvolen postup, kdy se k vyhodnocení výkonnosti teplotní komory použijí průměrné hodnoty stanovené z naměřených dat. Další možnost je použít postup vyhodnocení nejhoršího případu, kdy se používají data jen od snímače s nejhorší průměrnou odchylkou od nastavené hodnoty. [3]

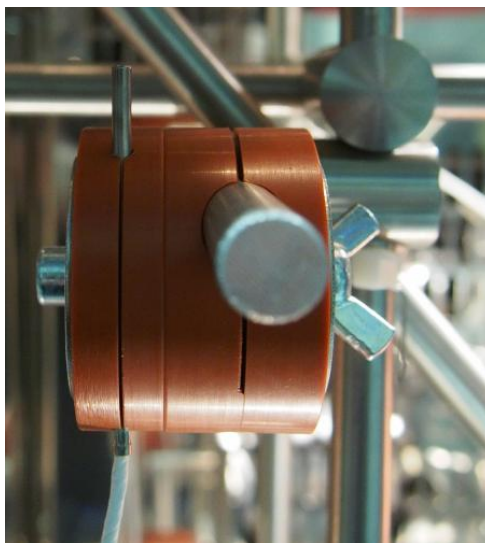
## 6. VLASTNÍ PROVEDENÍ EXPERIMENTU

Cílem experimentu bylo získat data potřebná ke confirmaci teplotní komory a tedy k vyhodnocení přesnosti, s jakou je teplotní komora schopna dosáhnout a udržet nastavené teplotní podmínky uvnitř pracovního prostoru komory. Během měření byla data o teplotě sbírána z devíti odporových snímačů umístěných po pracovním prostoru komory. Osm snímačů bylo umístěno v rozích pracovního prostoru v určité vzdálenosti od stěn a devátý snímač byl umístěn na středu pracovního prostoru teplotní komory. S ohledem na větší přesnost bylo provedeno nepřímé měření teploty, a tedy byly zaznamenány hodnoty odporu jednotlivých snímačů a tyto hodnoty byly pak dále zpracovávány.

Samotný experiment vychází z obecného popisu měřicí procedury popsáno v kapitole 5.7, avšak bylo nezbytné provést několik změn. Confirmace teplotní komory CTS T-65/50 a celý experiment byl proveden ve zkušební laboratoři CVVOZE.

### 6.1 Příprava

Aby mohlo být provedeno měření uvnitř pracovního prostoru teplotní komory, bylo zapotřebí nechat vyrobit konstrukci pro upevnění držáků snímačů teploty. Tato konstrukce byla vyrobena zkušební laboratoří CVVOZE. Konstrukce byla vyrobena z pohyblivých dílů, aby bylo možné, v určité míře, měnit její uspořádání a rozměry. Samotná konstrukce byla vyrobena z nerezové oceli. Společně s konstrukcí bylo zapotřebí vyrobit i úchyty snímačů teploty. Tyto úchyty se skládají ze dvou částí spojenými šroubem. Jedna část slouží k připevnění úchytu ke konstrukci a druhá část slouží k uchycení snímače teploty. Celý úchyt je vyroben z materiálu zvaného ERTALON 4.6 a je vidět na obrázku č. 7.

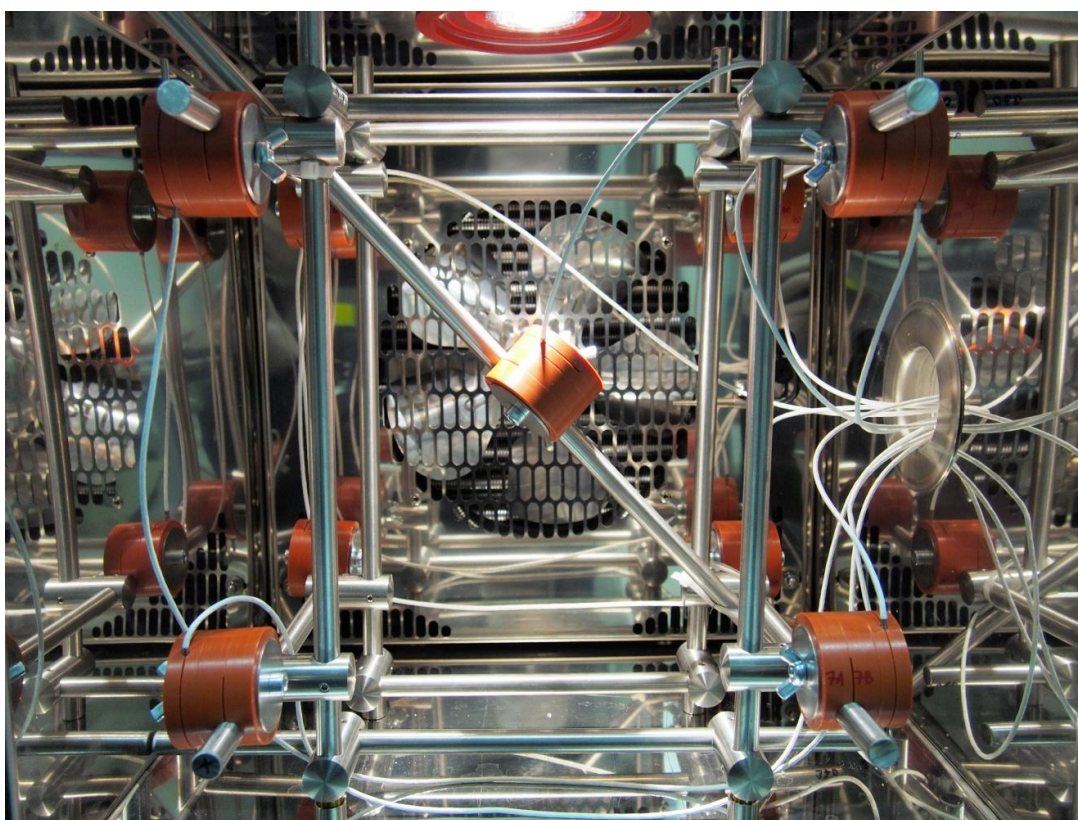


*Obrázek 7: Úchyt snímače teploty ke konstrukci*

Na obrázku č. 7 je zobrazen způsob uchycení snímače ke konstrukci za pomoci vyrobeného úchytu.

## 6.2 Umístění snímačů, konstrukce

Konstrukce pro uchycení snímačů byla uspořádána tak, aby bylo možné dodržet požadovanou minimální vzdálenost snímačů od stěn pracovního prostoru teplotní komory, viz kapitola 3.1.2. Konstrukce byla dále uspořádána tak, aby snímače byly umístěny i v co možná největší možné vzdálenosti od samotné nosné kovové konstrukce. Konstrukce s úchyty a snímači je vidět na obrázku č. 8.



*Obrázek 8: Konstrukce s upevněnými snímači teploty umístěná v pracovním prostoru teplotní komory*

Na obrázku č. 8 je vidět sestavená konstrukce s upevněnými snímači teploty. Konstrukce je umístěna uvnitř pracovního prostoru teplotní komory a nastavena tak, aby snímače byly ve správné vzdálenosti od stěn komory.

### 6.3 Zapojení a karty

K měření byly použity tři měřicí karty NI 9219, do kterých bylo zapojeno devět snímačů teploty SENSIT Pt100/3850. Snímače teploty byly k těmto kartám připojeny pomocí čtyřvodičového zapojení. Praktický způsob zapojení snímačů do měřicích karet NI 9219 je vidět na obrázku č. 8. Měřicí karty pak byly zapojeny do šasi cDAQ-9178.

Tabulka 12: Přehled použitých zařízení

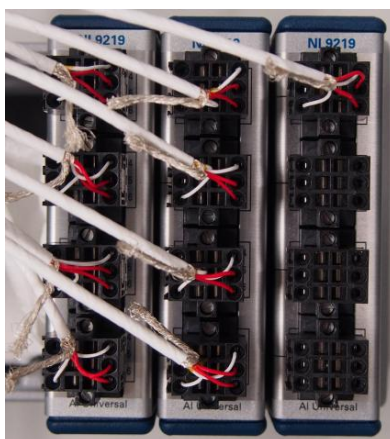
| Měřicí přístroj | Sériové číslo | Připojený snímač |
|-----------------|---------------|------------------|
| NI 9219         | 17000ED       | T1, T2, T3, T4   |
|                 | 17000F5       | T5, T6, T7, T8   |
|                 | 1700118       | T9               |
| cDAQ-9178       | 196654C       |                  |

V tabulce č. 12 jsou zapsány přístroje a snímače, které byly použity v měřicím řetězci použitým při confirmaci teplotní komory.

Tabulka 13: Přehled jednotlivých teplotních snímačů a jejich sériových čísel

| Označení snímače | Sériové číslo | Označení snímače | Sériové číslo | Označení snímače | Sériové číslo |
|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|
| T1               | 15878/1216    | T5               | 15877/1216    | T9               | 15879/1216    |
| T2               | 15876/1216    | T6               | 15882/1216    |                  |               |
| T3               | 15884/1216    | T7               | 15881/1216    |                  |               |
| T4               | 15883/1216    | T8               | 15875/1216    |                  |               |

V tabulce č. 13 jsou uvedena sériová čísla pro jednotlivé teplotní snímače spolu s jejich označením. Číslice označení snímače odpovídá rozložení snímačů po pracovním prostoru komory podle obrázku č. 1.



Obrázek 9: Zapojení snímačů v měřicích kartách NI 9219

## 6.4 Změna teploty a nastavení komory

Vzhledem k omezenému času, po který bylo možné měření v teplotní komoře provádět z důvodu její vytíženosti, bylo nutné změnit rychlost změny teploty mezi jednotlivými měřenými teplotními body ze zamýšleného 1 °C/ 5 min na 2 °C/ min. Doba ustálení byla ze stejného důvodu stanovena 1,5 hodiny. Po této době pak následovalo půlhodinové měření, jehož výsledky se posléze použily k vyhodnocení měření.

Rychlost proudění vzduchu vháněného do pracovního prostoru komory byla nastavena pomocí ovládacího panelu v přední části teplotní komory a byla po celou dobu experimentu ponechána na hodnotě 100 %.

Vnitřní osvětlení komory bylo po celou dobu experimentu vypnuto z důvodu zvyšování měřené teploty a to především na snímači T9 umístěném ve středu komory, přímo pod zdrojem osvětlení.

## 6.5 Cyklus měření

V rámci měření byly postupně nastavovány teploty od teploty blízké okolí tedy od 25 °C s krokem 25 °C až do 175 °C. Při každé změně teploty o 25 °C se nechala teplota uvnitř teplotní komory ustálit po dobu jedné 1,5 hodiny a poté nastal půlhodinový úsek měření, při kterém byla získána data vhodná k vyhodnocení.

Poté, co byla odměřena data pro teplotu 175 °C, bylo postupováno stejným způsobem se snižující se teplotou až na teplotu -50 °C. Po sběru naměřených vzorků k vyhodnocení, byla teplota opět zvyšována na hodnotu 25 °C.

Tímto způsobem byla získána data pro jeden cyklus měření, který pokrývá deset teplotních úrovní měřených celkem v devatenácti bodech, viz tabulka č. 14 a obrázek č. 5.

Tabulka 14: Cyklus potvrzených teplotních úrovní

|                     |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |
|---------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| Žádaná teplota [°C] | 25 | 50 | 75 | 100 | 125 | 150 | 175 | 150 | 125 | 100 | 75 | 50 | 25 |
| Směr změny teploty  | ↓  | ↑  | ↑  | ↑   | ↑   | ↑   | ↑   | ↓   | ↓   | ↓   | ↓  | ↓  | ↓  |

|                     |   |     |     |     |   |    |
|---------------------|---|-----|-----|-----|---|----|
| Žádaná teplota [°C] | 0 | -25 | -50 | -25 | 0 | 25 |
| Směr změny teploty  | ↓ | ↓   | ↓   | ↑   | ↑ | ↑  |

V tabulce č. 14 je zobrazen jeden cyklus provedeného měření spolu se směrem změny teploty. Šipka nahoru říká, že teploty bylo dosaženo za vzrůstající teploty a šipka dolů pak naopak.

Na začátku měření bylo třeba dosáhnout teploty blízké teplotě prostředí tedy 25 °C. Protože bylo v teplotní komoře po dlouhou dobu zapnuté osvětlení z důvodu instalace konstrukce pro upevnění snímačů, byla počáteční teplota vyšší než 25 °C. Proto je u prvního bodu měření negativní směr změny teploty.

## 6.6 Podmínky okolního prostředí ve zkušebně

Během měření byla teplota okolí udržována na normálních podmínkách prostředí. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 15.

*Tabulka 15: Klimatické podmínky ve zkušebně*

|                   |            |
|-------------------|------------|
| Teplota vzduchu   | 23 ± 2°C   |
| Relativní vlhkost | 31,5 ± 3 % |
| Tlak vzduchu      | 986,1 hPa  |

Hodnoty teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu uvedených v Tabulka 15 byly určeny na základě údajů poskytnutých měřidlem COMET, které bylo současné stacionáře zkušební laboratoře. Tlak vzduchu byl pak stanoven na základě údajů z meteostanice TESTO (SN:39507568/505).

## 6.7 Sběr dat

K nastavování teploty v teplotní komoře a sběru dat byl použit již připravena aplikace navržená v prostředí LabVIEW, napsaná zkušební laboratoří CVVOZE. Tento program není součástí této diplomové práce ani jejích příloh. Jeho účelem bylo pouze zajistit vzorkování dat a jejich následné zaznamenání,

Data získána během měření byla zaznamenávána v intervalech po pěti sekundách po dobu celého měření. V naměřených datech jsou tedy zaznamenány všechny změny teplot během jednoho cyklu měření. To znamená, že v datech je zaznamenána jak změna teploty mezi jednotlivými teplotními úrovněmi, tak i průběh teploty v době ustalování, stejně jako data o teplotě, která byla dále vyhodnocována.

Ve výpočtech potřebných ke confirmaci teplotní komory nejsou zahrnuta data získaná ze snímače teplotní komory a to z důvodu, že měřicí systém použitý při confirmaci teplotní komory, má být nezávislý na systému komory samotné.

## 6.7.1 Způsob vyhodnocení

Jako jeden z možných způsobů pro vyhodnocení konfirmace teplotní komory byl zvolen postup, při němž se vyhodnocují průměrné teplotní podmínky, které po sledovaný úsek měření panují v pracovním prostoru teplotní komory. Takovéto vyhodnocení vede k prohlášení, že průměrná teplota v pracovním prostoru je například  $25,2 \pm 1,6$  °C při konfidenční úrovni 95%. Při vyhodnocování průměrných podmínek jsou co nejpřesněji naznačovány podmínky, které během zkoušky panovaly v pracovním prostoru teplotní komory, avšak tento postup vnáší do vyhodnocení zkoušky určitou nejistotu.[6]

Při vyhodnocování konfirmace teplotní komory za pomoci průměrné hodnoty, může nastat případ, kdy se zjistí, že teplotní komora nespĺňuje specifikované požadavky. V takovém případě tato metoda alespoň ukazuje, které zdroje nejistot mají největší podíl na celkové nejistotě měření a jak se tyto nejistoty jednotlivých zdrojů mění v průběhu zkoušky. Z těchto poznatků se pak může vycházet při opakování zkoušky a vhodnými metodami je možné se pokusit o snížení jejich vlivu na celkovou nejistotu měření. [3]

K vyhodnocení měření byla použita vždy data, která byla získána až po uběhnutí doby ustálení. K výpočtům byla tedy použita data z posledních třiceti minut měření, pro daný bod měření. Tyto data jsou v následujících kapitolách pro zjednodušení uváděna jako naměřená data, či naměřené hodnoty.

Během měření byla zaznamenávána data, ze všech devíti teplotních snímačů umístěných v pracovním prostoru teplotní komory. Přičemž data ze snímačů T1 až T8 byla použita k nezbytným výpočtům a snímač T9 umístěný ve středu teplotní komory poskytoval referenční data.

Během měření byly dále zaznamenávány údaje o teplotě vzduchu vháněném do pracovního prostoru teplotní komory. Tato data poskytoval snímač teplotní komory.

Postup vyhodnocení a stanovení celkové nejistoty je popsán a předveden na konkrétním příkladu, viz níže.

## 7. VÝPOČET NEJISTOT MĚŘENÍ

V následující kapitole jsou uvedeny konkrétní výpočty, které byly použity k vyčíslení celkové nejistoty měření pro konkrétní teplotu. Tyto výpočty byly implementovány do vyhodnocovacího programu psaného v programu MATLAB v. 14. Vytvořený vyhodnocovací program je součástí elektronické přílohy diplomové práce. V níže uvedeném příkladu výpočtu je demonstrován výpočet kombinované rozšířené nejistoty měření teploty pro žádanou teplotu 25 °C.

Protože nebyla přímo měřena teplota, ale odpor teplotního snímače, bylo potřeba dílčí nejistoty měření stanovené v jednotkách  $\Omega$  převést za pomoci citlivostního koeficientu na nejistotu měření ve °C.

### 7.1 Nejistota typu A

Tento zdroj nejistoty je založen na statistické analýze. Určuje se jako celková směrodatná odchylka. Ta je dána součtem výběrových směrodatných odchylek jednotlivých snímačů. Výpočet výběrové směrodatné odchylky viz kapitola č. 4.1.1. Nejistota plynoucí z tohoto zdroje se pak vypočítá podle následujícího vzorce [10].

$$u_a = \sqrt{\frac{s^2(q)}{n}} = \frac{0,0347}{\sqrt{8 \cdot 360}} = 6,4660 \cdot 10^{-4} \doteq 0,65 \text{ m}\Omega. \quad (7.1)$$

Proto že počet vzorku je větší než 10 není již třeba hodnotu nejistoty typu A násobit koeficientem rozšíření.

### 7.2 Nejistota typu B

Jako základ níže vyčíslených nejistot typu B byl v této práci použit seznam možných zdrojů nejistoty typu B uvedený v normě ČSN EN 60068-3-11, viz [3].

#### 7.2.1 Měřicí řetězec

Při confirmaci teplotní komory je možné rozdělit zdroje nejistoty do dvou hlavních skupin. Jednou z těchto skupin zdrojů je měřicí řetězec. V měřicím řetězci se může uvažovat celá řada možných zdrojů nejistot, ne všechny však nabývají v porovnání s ostatními zdroji nejistot takového významu a hodnot, aby musely být nezbytně do celkové bilance nejistoty měření započítány. Pro významné zdroje nejistoty typu B je postup jejich stanovení popsán v následujících podkapitolách.



## 7.2.2 Snímač SENSIT Pt 100/3850

Mezi jedny z hlavních zdrojů nejistoty typu B v měřicím řetězci patří použité RTD snímače. Snímače teploty jsou zatíženy hned několika významnými zdroji nejistot typu B například přesností snímače, hysterezí a jeho nelinearitou.

### 7.2.2.1 Přesnost snímače

Na základě přesnosti snímače definované výrobcem se stanovuje hodnota nejistoty typu B, kterou přispívá snímač k celkové nejistotě měření. Hodnoty potřebné k výpočtu je možné najít ve specifikacích použitého snímače. Nejistota, kterou snímač přispívá, se vypočítá podle vztahu č. 7.2.

$$\Delta t = \pm (0,15 + 0,002|t|), \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.2)$$

kde  $\Delta t$  - je chyba snímače při teplotě  $t$ .

K výpočtu nejistoty měření způsobenou chybou snímače byly použity průměrné hodnoty teploty vypočítané z dat od snímačů T1 až T8. Jelikož bylo měření prováděno jako měření odporu, bylo nejprve nutné průměrnou hodnotu naměřeného odporu přepočítat podle rovnice snímače, viz rovnice č. 8.3, na hodnotu ve  $^{\circ}\text{C}$ .

Hodnotu vypočítaného průměrného odporu pro teplotní úroveň  $25^{\circ}\text{C}$   $\overline{R_{t25}}$  a jeho přepočítaný ekvivalent jako teplotu  $\overline{t_{25}}$ , zobrazuje tabulka č. 16.

Tabulka 16: Průměrné hodnoty teploty a odporu stanovených při teplotní úrovni  $25^{\circ}\text{C}$

|  |            |
|--|------------|
| $\overline{R_{t25}} [\Omega]$          | 109,7770   |
| $\overline{t_{25}} [^{\circ}\text{C}]$ | 25,1091    |
| $\chi$                                 | $\sqrt{3}$ |

Po dosazení hodnoty  $\overline{t_{25}}$  z tabulky č. 16 do rovnice č. 7.2 [19], byla získána hodnota chyby snímače  $\Delta t_{25}$  při požadované teplotní úrovni  $25^{\circ}\text{C}$ .

$$R = 100 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad [\Omega] \quad (7.3)$$

kde

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

Dosazením hodnot do rovnice č. 7.3 je získána chyba měření daná snímačem teploty.

$$\Delta t_{25} = 0,2002 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Nejistota  $u_{Bt}$  daná přesností snímače se pak vypočítá dosazením do rovnice č. 7.4.

$$u_{Bt} = \frac{\Delta t_{25}}{\chi} = \frac{0,2002}{\sqrt{3}} = 0,1156 \doteq 0,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.4)$$

### 7.2.2.2 Hystereze

Hystereze je rozdíl výstupní hodnoty odporu snímače zjištěné při stoupající a klesající teplotě. Hodnotu nejistoty způsobenou hysterezí je možné najít ve specifikacích snímače nebo ji vypočítat, viz rovnice č. 7.5 až rovnice č. 8.7 [13].

$$\delta_H = \left( \frac{R \uparrow - R \downarrow}{R_{max}} \right)_{max} = \frac{\Delta H_{max}}{R_{max}} \quad [\Omega] \quad (7.5)$$

$$\delta_H = \left( \frac{R - \bar{R}}{R_{max}} \right)_{max} \quad [\Omega] \quad (7.6)$$

$$u_{BH}(R) = \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{\chi}, \quad [\Omega] \quad (7.7)$$

kde  $\delta_H$  je chyba způsobená hysterezí  
 $R \uparrow$  je odpor měřený směrem vzhůru  
 $R \downarrow$  je odpor měřený směrem dolů  
 $R_{max}$  je maximální odpor  
 $H_{max}$  je maximální rozdíl odporu.

Při vyhodnocování hystereze byla ze souboru naměřených hodnot odporů snímačů T1 až T8 vypočítána průměrná hodnota odporu. Z těchto hodnot odporů byla vybrána vždy dvojice úseků záznamu měření v ustáleném stavu, jež odpovídají měření při stejných teplotních úrovních, ovšem byly dosaženy buď změnou teploty z nižší úrovně na vyšší ( $R \uparrow$ ) či přechodem z vyšší teplotní úrovně na nižší ( $R \downarrow$ ). Po aplikaci vzorce pak byl z výsledků rozdílu mezi  $R \uparrow$  a  $R \downarrow$  nalezen největší rozdíl a byl vydělen největší nalezenou hodnotou odporu, nalezenou v jednom ze dvou souborů hodnot odporu. Hodnoty odporu pro  $R \uparrow$ ,  $R \downarrow$  a  $R_{max}$ , použité pro výpočet chyby hystereze teploty v pracovním prostoru komory, jsou uvedeny v tabulce č. 17.

Tabulka 17: Hodnoty odporů potřebných k výpočtu nejistoty dané hysterezí

| $R \uparrow$ [ $\Omega$ ] | $R \downarrow$ [ $\Omega$ ] | $R_{max}$ [ $\Omega$ ] | $\chi$ [-] |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------|------------|
| 109,7860                  | 109,7385                    | 109,7929               | $\sqrt{3}$ |

V případě, že je pro výpočet k dispozici jen jeden soubor dat, jako například při teplotě - 50 a 175 °C, je rozdíl mezi  $R \uparrow$  a  $R \downarrow$  nahrazen rozdílem mezi největší naměřenou odporu hodnotou  $R$  a průměrnou hodnotou odporu  $\bar{R}$ , ze souboru hodnot odporu, viz rovnice č. 7.6.

Hodnota chyby hystereze teploty  $\delta_H$  pak byla vypočítána dosazením hodnot z tabulky č. 47 do rovnice č. 8.6.

$$\delta_H = \left( \frac{R \uparrow - R \downarrow}{R_{max}} \right)_{max} = \left( \frac{109,7860 - 109,7385}{109,7929} \right)_{max} = \left( \frac{0,0475}{109,7929} \right)_{max} = 4,3229 \cdot 10^{-4} \Omega.$$

Příspěvek nejistoty hystereze teploty  $u_{BH}$  daný hodnotou chyby hystereze teploty  $\delta_H$  se vypočítá dosazením do rovnice č. 7.7.

$$u_{BH}(y) = \frac{1}{2} \frac{\Delta H_{max}}{\chi} = \frac{1}{2} \frac{109,7860 - 109,7385}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2} \frac{0,0475}{\sqrt{3}} = 1,2479 \cdot 10^{-3} \doteq 1,3 \text{ m}\Omega.$$

### 7.2.2.3 Nelinearita snímače

Nelinearita snímače je dána maximální odchylkou výstupu snímače od ideální lineární regrese charakteristiky snímače.

Pro výpočet nelinearity byly použity průměrné hodnoty odporu pro měřené teploty vypočtené jako průměr ze snímačů T1 až T8. Pomocí lineární regrese, viz rovnice č. 7.8, a znalosti převodní rovnice snímačů, viz rovnice 7.3, byly vypočítány parametry přímky charakterizující ideální lineární závislost mezi měřenou teplotou a výstupním odporem na intervalu teplot od - 50 do 175 °C.

$$T_{lin} = K \cdot R + R_0 \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.8)$$

kde - K je směrnice přímky,  
-  $R_0$  je ofset přímky.

Po stanovení parametru rovnice přímky byly do rovnice č. 8.8 postupně dosazovány vypočítané průměrné hodnoty odporu  $\bar{R}$ , viz tabulka č. 48, pro všechny potvrzené teplotní úrovně, viz rovnice č. 8.9. Tím byly stanoveny linearizované hodnoty teploty pro danou teplotní úroveň  $T_{lin}$ , které bylo nutné opět převést na ekvivalentní hodnotu odporu  $R_{lin}$ , podle rovnice 7.8.

$$T_{lin} = 2,6065 \cdot \bar{R}_{-50} - 260,5930 = -51,8069 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.9)$$

$$T_{lin} = T_{Lt} \Rightarrow R_{lin} = 79,5885 \doteq 79,59 \Omega$$

Nejistota daná nelinearitou snímače  $u_{BL}$  se vypočítá dosazením hodnot z tabulky č. 18 do rovnice č. 7.10 [13].

$$u_{BL}(R) = \frac{(R_{lin} - \bar{R})_{max}}{\chi} \frac{80,1011 - 79,5885}{\sqrt{3}} = \frac{0,5126}{\sqrt{3}} = 0,2959 \doteq 0,30 \Omega. \quad (7.10)$$

Tabulka 18: Tabulka hodnot pro výpočet nelinearity snímače SENSIT Pt100/3850

| t [°C]           | -25   | -50   | 0     | 25     | 50     | 75     | 100    | 125    | 150    | 175    |
|------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\bar{R}$ [Ω]    | 90,03 | 80,10 | 99,95 | 109,78 | 119,43 | 128,99 | 138,42 | 147,75 | 156,98 | 166,16 |
| $R_{lin}$ [Ω]    | 89,82 | 79,59 | 99,97 | 109,95 | 119,67 | 129,22 | 138,58 | 147,77 | 156,79 | 165,70 |
| $ \Delta R $ [Ω] | 0,20  | 0,51  | 0,02  | 0,17   | 0,24   | 0,24   | 0,16   | 0,02   | 0,19   | 0,46   |
| $u_{BL}$ [Ω]     | 0,12  | 0,30  | 0,01  | 0,10   | 0,14   | 0,14   | 0,09   | 0,01   | 0,11   | 0,26   |

Tabulka č. 18 obsahuje průměrné naměřené hodnoty odporu  $\bar{R}$  ze snímačů T1 až T8, pro žádané teploty  $t$  a jejich ekvivalent  $R_{lin}$ , které byly vypočítány za pomoci lineární regrese. Z těchto dvou hodnot byla vypočítána chyba linearit jako absolutní hodnota jejich rozdílu  $|\Delta R|$ . V tabulce je šedou barvou vyznačen sloupeček s největší chybou linearit, z které se vypočítá nejistota plynoucí z nelinearity snímače podle rovnice č. 7.10.

## 7.2.3 Měřicí karta NI 9219

Dalším prvkem měřicího řetězce, který vnáší nejistotu typu B do celkové bilance nejistoty měření je měřicí karta NI 9219. U této karty bylo zapotřebí počítat především s nejistotou danou její přesností a stabilitou.

### 7.2.3.1 Přesnost měřicích karet

Tento zdroj nejistoty popisuje míru nejistoty, kterou do měření přináší měřicí přístroj na základě měřené hodnoty a použitého rozsahu. Hodnota se obvykle počítá z chyby měřicího přístroje, která je uváděna ve specifikacích přístroje. Nejistota karty NI 9219 se stanoví na základě následujících rovnic č. 7.11 a č. 7.12 [13].

Při výpočtech byly použity hodnoty chyby  $\delta_M$  a je chyba z rozsahu  $\delta_R$  převzaté z dokumentace k měřicím kartám NI 9219, viz [17].

$$|\Delta_P| = \frac{|\delta_M \cdot X_M| + |\delta_R \cdot X_R|}{100} \quad [\text{Jednotka veličiny}] \quad (7.11)$$

- Kde
- $\Delta_P$  je absolutní povolená chyba
  - $\delta_M$  je chyba z hodnoty
  - $\delta_R$  je chyba z rozsahu

- $X_M$  je změřená hodnota
- $X_R$  je hodnota rozsahu.

Hodnoty chyby z hodnoty  $\delta_M$  a chyby z rozsahu  $\delta_R$  pro měřicí rozsah  $1\text{ k}\Omega$  jsou následující [17]:

$$\delta_M = 0,1\% \text{ z hodnoty} \qquad \delta_R = 1200 \text{ ppm na rozsahu } 1\text{ k}\Omega$$

Protože chyba z rozsahu je ve specifikacích udávána v jednotkách ppm jako absolutní chyba z rozsahu, byla rovnice č. 8.11 upravena na rovnici č. 7.12 [13], kde  $X_R$  je rovno jedné.

$$|\Delta_P| = \frac{|\delta_M \cdot X_M|}{100} + \frac{\Delta_R}{10^6} \cdot X_R. \qquad \text{[Jednota veličiny]} \qquad (7.12)$$

Za měřenou hodnotu  $X_M$  byla opět dosazena celková průměrná hodnota odporu z naměřených dat ze snímačů T1 až T8, pro žádanou teplotu  $25\text{ }^\circ\text{C}$   $\overline{R_{t25}}$ .

$$|\Delta_P| = \frac{|\delta_M \cdot \overline{R_{t25}}|}{100} + \frac{\Delta_R}{10^6} = \frac{|0,1 \cdot 109,7770|}{100} + \frac{1200}{10^6} = 0,1110 \Omega. \qquad (7.13)$$

U chyby dané přesností přístroje se předpokládá, že má charakter normálního rozložení. Proto je nezbytné po získání nejistoty, která je způsobena touto chybou, vydělit hodnotu chyby dvěma.

$$u_{BK} = \frac{|\Delta_P|}{\chi} = \frac{0,1110}{2} = 0,0555 \doteq 0,06 \Omega. \qquad (7.14)$$

### 7.2.3.2 Teplotní stabilita měřících karet

K výpočtu nejistoty vycházející z teplotní stability měřící karty byly použity hodnoty teploty prostředí, v němž zkouška probíhala. Protože celá zkouška probíhala za normálních teplotních podmínek, viz tabulka č. 19, není třeba výpočet dále korigovat vzhledem k teplotě okolí. Jelikož výsledná nejistota je v porovnání s jinými významnými zdroji nejistoty zanedbatelná, je zde výpočet uveden jen pro úplnost.

Tabulka 19: Podmínky ve zkušebně

|                   |           |
|-------------------|-----------|
| Teplota           | 23 ± 2°C  |
| Relativní vlhkost | 31,5 ± 3% |
| Tlak vzduchu      | 986,1 hPa |

$$|\Delta_S| = \frac{|\delta_M \cdot R_{t25}|}{10^6} + \frac{\Delta_R}{10^6} = \frac{|15 \cdot 109,7770|}{10^6} + \frac{30}{10^6} \cdot 1 = 1,68 \cdot 10^{-3} \Omega. \quad (7.15)$$

U chyby způsobené stabilitou měřicí karty se opět předpokládá rovnoměrné rozložení. Z tohoto důvodu je výslednou chybu potřeba vydělit druhou odmocninou ze tří.

$$u_{Bs} = \frac{|\Delta_S|}{\chi} = \frac{1,68 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 9,6995 \cdot 10^{-4} \doteq 9,7 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (7.16)$$

## 7.2.4 Systém cDAQ-9178

Systému cDAQ je dalším zařízením zapojeným v měřicím řetězci. V případě tohoto systému nebylo uvažováno, že by do celkové bilance nejistoty měření mohl přispět významnější měrou. Je to z důvodu, že již pouze pracuje s digitalizovanou hodnotou měřené veličiny, která již do této formy byla převedena měřicí kartou NI 9219. Je tedy předpokládáno, že nejistota způsobená digitalizací měřené veličiny, je zahrnuta v nejistotě způsobené měřicí kartou.

## 7.2.5 Nejistoty způsobené zapojením

Výsledné měření by mohlo být zatíženo dalšími nejistotami, které vznikají na dalších místech měřicího řetězce, jako například odporem přívodních vodičů, přechodovým odporem a termoelektrickým napětím.

Protože při konfirmaci teplotní komory bylo předpokládáno, že budou měřeny malé změny odporu na teplotních snímačích, bylo zvoleno čtyřvodičové zapojení snímačů. Čtyřvodičové zapojení by mělo zajistit, aby se výše zmíněné možné zdroje nejistot nemohly uplatnit v celkové bilanci nejistoty měření.[26] Tyto zdroje nejistot typu B je tedy možné zanedbat.

## 7.3 Nejistoty dané vlastnostmi teplotní komory

Druhou hlavní skupinou, do které je možné zdroje nejistot rozdělit jsou nejistoty dané vlastnostmi teplotní komory. Mezi nejvýznamnější zdroje nejistot typu B patří gradient, který souvisí s rozdílnými teplotami naměřenými v různých bodech

pracovního prostoru teplotní komory. Dalším významným zdrojem je kolísání teploty, které souvisí se změnou teploty v konkrétním bodě pracovního prostoru teplotní komory.

Postup stanovení hodnot těchto dvou nejistot je uveden v následujících kapitolách. Tabulka č. 20 obsahuje naměřené a vypočítané hodnoty, na kterých je demonstrován postup stanovení nejistot daných teplotní komorou.

Tabulka 20: Ukázka naměřených hodnot potřebných k výpočtu gradientu a kolísání

| Time stamps             | Set point [°C] | T1 [Ω] | T2[Ω]  | T3 [Ω] | T4[Ω]  | T5 [Ω] | T6 [Ω] | T7 [Ω] | T8 [Ω] | $\overline{R_{vz}}$ [Ω]  | $S_{R_{vz}}^2$ [Ω] |
|-------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|--------------------|
| 10:25:18                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,75 | 109,8  | 109,78 | 109,83 | 109,74 | 109,7783                 | 0,0394             |
| 10:25:23                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,75 | 109,8  | 109,78 | 109,83 | 109,74 | 109,78                   | 0,0396             |
| 10:25:28                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,76 | 109,8  | 109,78 | 109,83 | 109,75 | 109,7812                 | 0,04               |
| 10:25:33                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,76 | 109,8  | 109,78 | 109,83 | 109,75 | 109,7816                 | 0,0406             |
| 10:25:38                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,76 | 109,8  | 109,78 | 109,83 | 109,75 | 109,7822                 | 0,04               |
| 10:25:43                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,76 | 109,8  | 109,78 | 109,83 | 109,75 | 109,7822                 | 0,04               |
| 10:25:48                | 25             | 109,78 | 109,72 | 109,83 | 109,76 | 109,81 | 109,78 | 109,83 | 109,75 | 109,7825                 | 0,0396             |
| $\overline{R_{Ti}}$ [Ω] | 25             | 109,78 | 109,73 | 109,83 | 109,75 | 109,8  | 109,78 | 109,82 | 109,74 | $\overline{R_{t25}}$ [Ω] | 109,777            |
| $S_{Ti_{vz}}^2$ [Ω]     | 0              | 0,0018 | 0,0035 | 0,0045 | 0,0041 | 0,0024 | 0,0025 | 0,0092 | 0,0041 | $S_{R_{t25}}^2$ [Ω]      | 0,0347             |

V tabulce č. 20 je uveden výtah z naměřených dat pro potvrzenou teplotní úroveň 25 °C. Jsou zde uvedeny hodnoty odporu naměřené jednotlivými snímači T1 až T8, spolu s časovou značkou a s požadovanou teplotou. V tabulce jsou dále uvedeny hodnoty průměrného naměřeného odporu  $\overline{R_{Ti}}$  pro jednotlivé teplotní snímače a také průměrné hodnoty odporu stanovené z dat vzorků  $\overline{R_{vz}}$  zaznamenaných ve stejný časový okamžik. Obdobným způsobem byly stanoveny i hodnoty pro výběrovou směrodatnou odchylku odporu pro jednotlivé snímače  $S_{Ti_{vz}}^2$  a pro vzorky zaznamenané ve stejný časový okamžik  $S_{R_{vz}}^2$ . Na základě hodnot  $S_{Ti_{vz}}^2$  a  $S_{R_{vz}}^2$  se pak podle níže uvedeného postupu stanoví hodnota nejistoty daná gradientem a kolísáním teploty.

Průměrná hodnota měřeného odporu  $\overline{R_{t25}}$  a průměrná výběrová směrodatná odchylka  $S_{R_{t25}}^2$  byly stanoveny z celého souboru dat pro danou teplotní úroveň.

Kompletní tabulku naměřených hodnot je možné nalézt v elektronické příloze diplomové práce.

### 7.3.1 Gradient teploty

Pro výpočet nejistoty způsobené gradientem tepelné komory se při výpočtu vychází z naměřených dat. Gradient se určuje jako maximální výběrová směrodatná odchylka výběrového průměru osmy snímačů umístěných v rozích teplotní komory, viz rovnice č. 7.17 [10]. Tedy pro vzorky ze snímačů T1 až T8 pořízené ve stejný časový okamžik ze souboru dat k vyhodnocení, se vypočítá výběrová směrodatná odchylka, viz řádek tabulky č. 20 zvýrazněný oranžovou barvou. Z vypočtených hodnot odchylek se vybere ta největší a ta reprezentuje gradient teploty v pracovním prostoru komory pro danou teplotu.

$$\delta_G(T) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (T_j - \bar{T})^2} \quad [\Omega] \quad (7.17)$$

$$\delta_G(T) = \sqrt{\frac{1}{n-1} [(T_1 - \bar{T})^2 + (T_2 - \bar{T})^2 + \dots + (T_8 - \bar{T})^2]} \quad (7.18)$$

$$\delta_G(T) = \sqrt{\frac{1}{8-1} [(109,78 - 109,7816)^2 + (109,72 - 109,7816)^2 + \dots + (109,75 - 109,7816)^2]}$$
$$\delta_G(T) = 0,0406 \text{ } \Omega.$$

Nejistota daná gradientem teploty v pracovním prostoru teplotní komory je vypočítána podle rovnice č. 7.19 [3].

$$u_{BG} = \frac{\delta_G(T)}{\chi} = \frac{0,0406}{1} = 0,0406 \doteq 0,041 \text{ } \Omega. \quad (7.19)$$

Protože je nejistota daná gradientem teploty počítána, jako výběrová směrodatná odchylka předpokládá se u ní rovnoměrné rozdělení. V případě, kdy by se tato nejistota počítala jako největší rozdíl teplot v prostoru, byl by použit koeficient rovnoměrného rozdělení. [6]

### 7.3.2 Kolísání teploty

Výpočet nejistoty daný kolísáním teploty se vypočítá obdobně jako gradient s tím rozdílem, že výběrová směrodatná odchylka se vypočítá pro jednotlivé snímače, viz rovnice č. 7.20 [10]. Z výsledků se pak opět vybere hodnota největší výběrové směrodatné odchylky, která pak reprezentuje příspěvek této nejistoty do celkové bilance nejistot. V tabulce je pro ukázkou vyznačena zelenou barvou malá část hodnot odporu použitých při výpočtech nejistoty, která je daná kolísáním teploty.

$$\delta_{KT}(T_7) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (T_{7j} - \bar{T}_7)^2} \quad [\Omega] \quad (7.20)$$



$$\delta_{KT}(T_7) = \sqrt{\frac{1}{n-1} [(T_{71} - \bar{T})^2 + (T_{72} - \bar{T})^2 + \dots + (T_{7n} - \bar{T})^2]},$$

kde  $n = 360$ .

$$\delta_{KT}(T_7) = \sqrt{\frac{1}{360-1} [(109,83 - 109,82)^2 + (109,83 - 109,82)^2 + \dots + (109,81 - 109,82)^2]}$$

$$\delta_{KT}(T_7) = 0,0092 \text{ } \Omega.$$

Nejistota daná kolísáním teploty v pracovním prostoru teplotní komory je stanovena dle rovnice č. 7.19.

$$u_{BKT} = \frac{\delta_{KT}(T_7)}{\chi} = \frac{\delta_{KT}(T_7)}{1} = 0,0092 \doteq 0,01 \text{ } \Omega \quad (7.21)$$

Použití koeficientu rovnoměrného rozdělení je stejně jako u nejistoty dané gradientem teploty, viz kapitola č. 7.3.1.

## 7.4 Nejistota nepřímého měření

Vzhledem k tomu, že se při confirmaci teplotní komory jednalo o nepřímé měření teploty, kdy byl měřen odpor, a tedy standardní kombinovaná nejistota byla stanovena v  $\Omega$ , bylo zapotřebí tuto hodnotu nejistoty převést na jednotky  $^{\circ}\text{C}$ . Pro přepočítání na jednotku  $^{\circ}\text{C}$  bylo zapotřebí vypočítat citlivostní koeficient. Ten se vypočítá jako parciální derivace funkce pro přepočítání měřeného odporu na teplotu, viz rovnice č. 7.24 až rovnice č. 7.26 [10].

$$u_{\bar{x}} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{df}{dx_i}\right)^2 \cdot (u_{\bar{x}_i})^2} \quad [\Omega] \quad (7.22)$$

V našem konkrétním případě lze zápis změnit na:

$$u_{\bar{t}} = \sqrt{\left(\frac{df}{dR}\right)^2 \cdot (u_z)^2},$$

kde funkce  $f$  je popsána rovnicí č. 7.25.

Pro výpočet je tedy třeba znát rovnici závislosti teploty na odporu, kterou lze získat ze vztahů, které uvádí výrobce snímače teploty v technické dokumentaci. Tedy z rovnic č. 7.23 a 7.24 [19].

$$R = 100 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C(t - 100)t^3) \quad [\Omega] \quad (7.23)$$

Pro  $-50 \leq t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$R = 100 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad [\Omega] \quad (7.24)$$

Pro  $0 \leq t \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,

kde

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}.$$

Z těchto dvou rovnic závislosti odporu snímače na teplotě je možné vyjádřit hledanou teplotu. Pro účely ukázkové výpočtu je zde uvedena rovnice výpočtu kladné teploty z měřeného odporu, viz rovnice č. 7.25 [24].

$$t_{plus} = -\frac{A}{B} - \sqrt{\frac{\left(\frac{A}{B}\right)^2}{4} + \left(\frac{R-R_0}{R_0 \cdot B}\right)} \quad \text{Pro } 0 \leq t \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.25)$$

Kde  $R$  je měřená hodnota odporu  
 $R_0$  je hodnota odporu snímače při teplotě  $0 \text{ } ^\circ\text{C}$   
 $R_0 = 100 \text{ } \Omega$

Z rovnice pro teplotu 7.25, je pak vypočítána parciální derivace podle  $R$ , viz rovnice č. 7.26. Vyčlením této rovnice, kde se za  $R$  dosadí součet odporu  $R_0$  a hodnoty počítaného zdroje nejistoty, je získán hledaný citlivostní koeficient  $c_i$  pro danou hodnotu nejistoty měření.

$$c_i = \frac{df_{t_{plus}}}{dR} = -\frac{1}{2 \cdot B R_0 \cdot \sqrt{\frac{A^2}{4 \cdot B^2} + \frac{R-R_0}{B \cdot R_0}}} = \frac{1}{20 \sqrt{25 \cdot A^2 + B \cdot R - B \cdot R_0}}, \quad [\Omega/^\circ\text{C}] \quad (7.26)$$

kde  $R = R_0 + u_z$

$$c_i = 2,5877 \text{ } \Omega/^\circ\text{C}. \quad (7.27)$$

Dosazením dané nejistoty měření a jí odpovídajícího citlivostního koeficient je stanovena hledaná nejistota měření ve  $^\circ\text{C}$ , viz rovnice 7.28.

$$u_{Bt}' = \sqrt{C_i^2 u_{bt}^2 \cdot u_{Bt}^2} = \sqrt{2,5877^2 \cdot 0,0452^2} = 0,1170 \doteq 0,12 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.28)$$

Obdobně se přepočítají veškeré zdroje nejistot, které jsou uvažovány při konfirmaci teplotní komory.

### 7.4.1 Standardní kombinovaná nejistota měření

Na základě výše uvedených výpočtů vybraných zdrojů nejistoty typu B je nyní možné vypočítat celkovou nejistotu typu B  $u_{Bz}$  a následně pak vypočítat kombinovanou nejistotu  $u_c$  a rozšířenou nejistotu  $U$ . Celková nejistota typu B se vypočítá podle následujících vzorců [10].

$$u_{Bz} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bzi}^2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.29)$$

Do rovnice č. 7.29 se dosadí vypočítané hodnoty jednotlivých zdrojů nejistot již ve  $^{\circ}\text{C}$ , viz rovnice č. 7.30. Přehled jednotlivých zdrojů nejistot a jejich hodnota jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce č. 21.

Tabulka 21: Přehled dílčích nejistot při měření teploty, které byly uvažované při konfirmaci

| t = 25 °C              |                     |           |           |                     |                 |                     |
|------------------------|---------------------|-----------|-----------|---------------------|-----------------|---------------------|
|                        | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | R<br>[Ω]            | $C_i$<br>[Ω/°C] | t<br>[°C]           |
| Nejistota<br>přístrojů | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 0,05                | 2,5587          | 0,12                |
|                        | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | 2,5587          | $0,4 \cdot 10^{-3}$ |
|                        | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 0,3                 | 2,5592          | 0,8                 |
|                        | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 0,06                | 2,5588          | 0,16                |
|                        | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 0,001               | 2,5587          | 0,0025              |
| Nejistota<br>komory    | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 0,1                 | 2,5592          | 0,2                 |
|                        | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 0,01                | 2,5587          | 0,04                |
| Nejistota typu A       |                     | $u_A$     | Normální  | $0,7 \cdot 10^{-3}$ | 2,5587          | 0,0024              |

Tabulka č. 21 obsahuje vypočítané hodnoty jednotlivých uvažovaných zdrojů nejistot, které byly vypočítány výše. Tabulka č. 21 obsahuje označení zdroje nejistoty, typ jejího rozdělení, odpor  $R$  nejistoty, který představuje hodnotu nejistoty v  $\Omega$ , citlivostní koeficient  $C_i$ , díky kterému je hodnota  $R$  přepočítána na hodnotu nejistoty měření ve  $^{\circ}\text{C}$ .

$$u_{Bz} = \sqrt{u_{Bt}^2 + u_{BH}^2 + u_{BL}^2 + u_{BK}^2 + u_{Bs}^2 + u_{BG}^2 + u_{BKT}^2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7.30)$$

$$u_{Bz} = \sqrt{0,12^2 + (4 \cdot 10^{-4})^2 + 0,8^2 + 0,16^2 + (2,5 \cdot 10^{-3})^2 + 0,2^2 + 0,04^2}$$

$$u_{Bz} = \sqrt{0,7216} = 0,8495 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Po stanovení celkové nejistoty typu B  $u_{Bz}$  je možné vypočítat kombinovanou nejistotu, viz rovnice č. 7.31.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{Bz}^2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.31)$$

$$u_c = \sqrt{(2,4 \cdot 10^{-3})^2 + 0,8291^2} = 0,8495 \doteq 0,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Z hodnoty kombinované nejistoty  $u_c$  se dále vypočítá rozšířená nejistota  $U$ , viz rovnice č. 7.32. Ta se získá vynásobením kombinované nejistoty s koeficientem rozšíření  $k$ . Touto operací, kde  $k$  je rovno 2, se zvýší pravděpodobnost, že skutečná měřená hodnota v daném intervalu leží s 95% pravděpodobností.

$$U_{t_{25}} = k \cdot u_c \quad [^\circ\text{C}] \quad (7.32)$$

$$U_{t_{25}} = 2 \cdot 0,8495$$

$$U_{t_{25}} = 1,6990 \doteq 1,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

K získání koncového výsledku nyní stačí jen převést celkovou průměrnou hodnotu odporu pro žádanou teplotu 25 °C na hodnotu teploty pomocí rovnice č. 7.25. Dosazením do této rovnice získáme průměrnou celkovou teplotu  $t_{25} = 25,1091 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Výsledkem tedy je, že průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory při žádané teplotě 25 °C, byla stanovena na hodnotu  $25,1 \pm 1,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ , při konfidenční úrovni 95 %.

## 7.5 Pravděpodobnost shody výsledku a tolerance

Pokud se při confirmaci teplotní úrovně ukázalo, že stanovený výsledek nesplňuje požadované tolerance  $\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$  nebo  $\pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , jako například výsledek confirmace teplotní úrovně 175 °C, existují statistické metody, které určí pravděpodobnost, s jakou pravá hodnota leží v tolerančním intervalu například  $175 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ , i když stanovený výsledek spolu s rozšířenou kombinovanou nejistotou tento interval překračuje. [3]

Pravděpodobnost, s jakou pravá hodnota leží v požadovaném intervalu, se stanoví podle následujících vztahů, viz rovnice 7.33 až 7.35. Rovnice byly převzaty z [25].

Jako příklad je zde uveden výpočet pravděpodobnosti shody požadovaného intervalu  $175 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$  a stanoveného výsledku měření  $176,8 \pm 6,8 \text{ } ^\circ\text{C}$  při konfidenční úrovni 95 %. Tedy standardní kombinovaná nejistota měření  $u_c = \pm 3,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

$$Pr(a \leq t \leq b|\eta) = \Phi\left(k \cdot \frac{b-t}{u}\right) - \Phi\left(k \cdot \frac{a-t}{u}\right) \quad [-] \quad (7.33)$$

- Kde
- $T$  je žádaná teplota
  - $t$  je naměřená teplota
  - $\eta$  je hodnota tolerance
  - $a$  je dolní hodnota tolerančního pásma  $a = T - \eta$
  - $b$  je horní hodnota tolerančního pásma  $b = T + \eta$
  - $u_c$  je standardní kombinovaná nejistota měření
  - $k$  je koeficient konfidenční úrovně

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{z}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad [-] \quad (7.34)$$

$$z_1 = k \cdot \frac{b-t}{u}, z_2 = k \cdot \frac{a-t}{u} \quad [-] \quad (7.35)$$

Kde  $z$  je parametr chybové funkce normálního rozložení *erf*.

Po dosazení do rovnic 7.33 až 7.35 se tedy vypočítá pravděpodobnost, že správná hodnota teploty z rozsahu  $176,8 \pm 6,8 \text{ }^\circ\text{C}$  při konfidenční úrovni 95 %, leží v požadovaném rozsahu teplot  $175 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\Pr(173 \leq 173,8 \leq 177|2) = \Phi \left( 2 \cdot \frac{(175+2)-173,8}{3,4} \right) - \Phi \left( 2 \cdot \frac{(175-2)-173,8}{3,4} \right)$$

$$\Phi_a = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{1,9}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad \Phi_b = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{-0,5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

$$\Pr(23 \leq 25,1 \leq 27|3,2) = 0,97 - 0,32 = 0,65 \Rightarrow 65 \%$$

Na základě těchto výpočtů je tedy možné říci, že při žádané teplotě  $175 \text{ }^\circ\text{C}$  byla průměrná teplota uvnitř teplotní komory stanovena na  $173,8 \pm 6,8 \text{ }^\circ\text{C}$  při konfidenční úrovni 95 %, přičemž správná hodnota leží v tolerančním intervalu  $175 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  s pravděpodobností 65 %.

## 8. ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V následující kapitole jsou shrnuty výsledky analýzy naměřených dat získaných během confirmace teplotní komory. Je zde uveden rozbor výsledků pro jednotlivé teplotní úrovně i souhrn výsledků celkové confirmace teplotní komory. Výsledky uvedené v následující kapitole vycházejí z postupu z kapitoly 7.

### 8.1 Výsledky pro jednotlivé teplotní úrovně

Kapitola uvádí vyhodnocení výsledků pro jednotlivé teplotní úrovně. Je zde uvedeno vyhodnocení absolutní odchylky od žádané teploty, kolísání teploty, vyhodnocení gradientu teploty v pracovním prostoru teplotní komory, rozbor stanovené standardní nejistoty měření a na konec je stanoven a zhodnocen výsledek confirmace dané teplotní úrovně.

Vzhledem k tomu, že byla většina teplotních úrovní měřena během jednoho měřicího cyklu vícekrát, je v této kapitole hodnoceno měření dané teplotní úrovně, při kterém byla zjištěna větší průměrná hodnota odchylky od žádané teploty. Rozdíly ve výsledných hodnotách jsou minimální.

Tento přístup pak vede k prohlášení, že v ostatních případech, kdy byla confirmována stejná teplotní úroveň, nejsou zjištěné celkové výsledky confirmace horší než výsledky popsané v následujících kapitolách.

Obdobné obrázky, které obsahuje kapitola 8.1.1, byly vytvořeny pro všechny confirmované teplotní úrovně a je možné je nalézt v elektronické příloze diplomové práce.

#### 8.1.1 Teplotní úroveň 25 °C

Při vyhodnocování výsledků confirmace teplotní komory bylo třeba zpracovat velké množství naměřených hodnot, které poskytovaly použité teplotní snímače. V tabulce č. 22 jsou pro jednotlivé použité teplotní snímače uvedeny stanovené průměrné charakteristické hodnoty. Tyto hodnoty byly vypočítány pro teplotní úroveň 25 °C.

Tabulka 22: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 25 °C

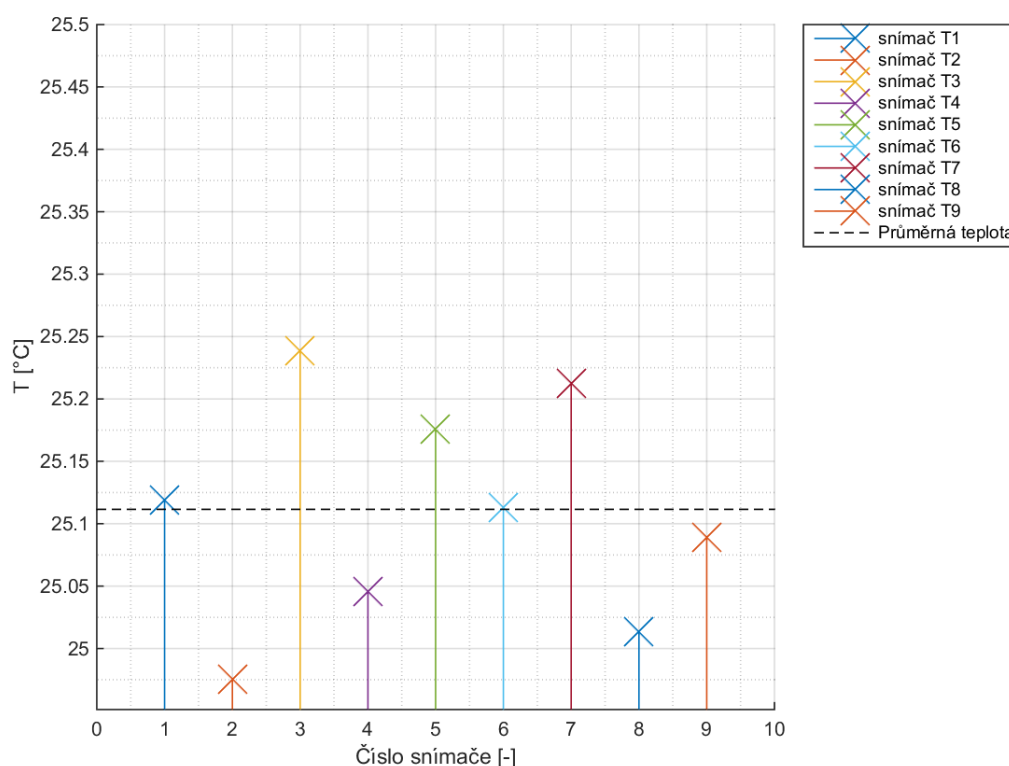
| t = 25 °C            |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 109,7808 | 109,7252 | 109,8272 | 109,7522 | 109,8027 | 109,7785 | 109,8170 | 109,7398 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 25,1190  | 24,9755  | 25,2386  | 25,0453  | 25,1754  | 25,1129  | 25,2121  | 25,0132  |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | 0,1190   | -0,0245  | 0,2386   | 0,0453   | 0,1754   | 0,1129   | 0,2121   | 0,0132   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,0047   | 0,0089   | 0,0114   | 0,0105   | 0,0061   | 0,0064   | 0,0235   | 0,0104   |

V tabulce č. 22 jsou zobrazeny vybrané průměrné hodnoty pro jednotlivé snímače, které byly vypočítány během analýzy dat pro teplotní úroveň 25 °C. Hodnoty, které tabulka obsahuje, byly konkrétně vypočítány pro první bod měření. V tabulce je možné nalézt průměrné hodnoty naměřeného odporu  $\bar{R}$ , jeho přepočítaný ekvivalent na teplotu  $\bar{t}$ , dále pak hodnotu odchylky průměrné teploty  $\Delta\bar{t}$  od teploty žádané a nakonec hodnotu chyby danou kolísáním snímače  $\delta_{KT}$ . Tyto vybrané charakteristiky měření jsou v tabulce uvedeny pro jednotlivé snímače, které zajišťovali měření po celou dobu konfirmace teplotní komory.

### 8.1.1.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Ke stanovení výsledku konfirmace teplotní úrovně bylo zapotřebí stanovit na základě hodnot teploty naměřených jednotlivých snímačů T1 až T8 celkovou průměrnou teplotu.

Hodnoty průměrné teploty  $\bar{t}$  pro jednotlivé snímače z tabulky č. 22 jsou zobrazeny spolu s hodnotou referenčního snímače T9 na obrázku č. 10.



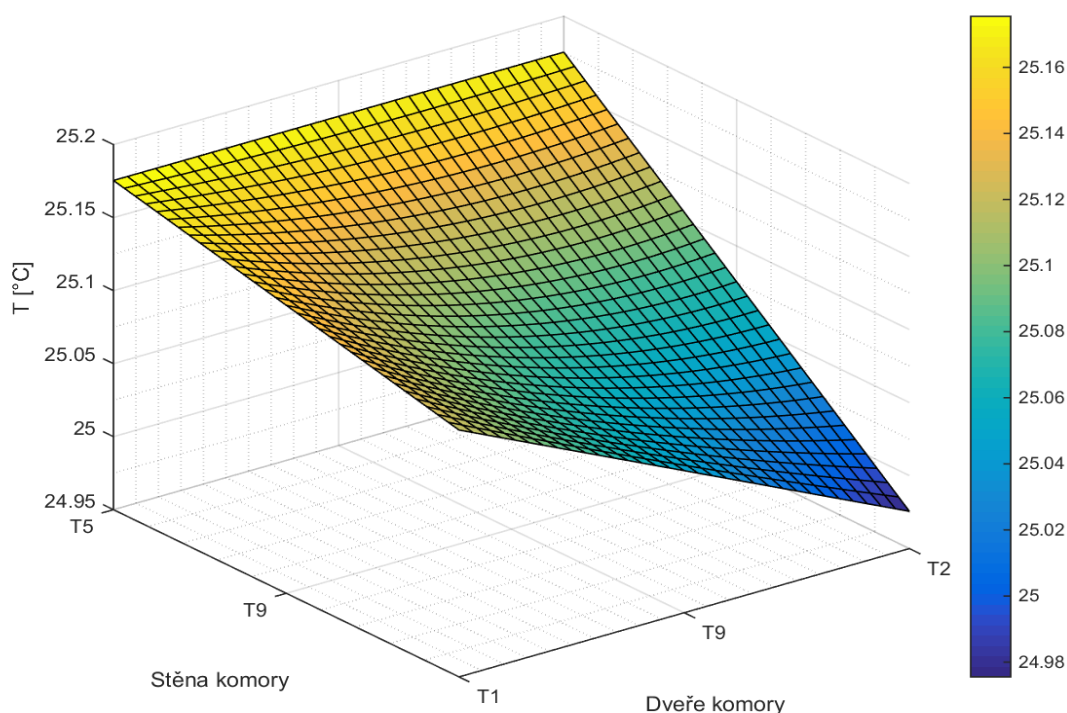
Obrázek 10: Zobrazení stanovených průměrných teplot naměřených jednotlivými snímači při teplotní úrovni 25 °C

Na základě hodnot průměrné teploty  $\bar{t}$ , viz tabulka č. 22, byl sestaven graf zobrazený na obrázku č. 10. V tomto grafu je zobrazena průměrná hodnota teploty,

kteřá byla naměřena jednotlivými teplotními snímači T1 až T9 použitými při confirmaci teplotní komory. Černá přerušovaná čára zobrazuje celkovou průměrnou teplotu v pracovním prostoru teplotní komory.

Průměrná teplota v prostoru teplotní komory byla stanovena na hodnotu 21,2 °C, viz tabulka č. 23.

Na základě stanovených průměrných hodnot teploty, měřených jednotlivými teplotními snímači rozmístěnými v pracovním prostoru teplotní komory, bylo vytvořeno orientační zobrazení, znázorňující možné rozložení teploty v dolní a horní části pracovního prostoru směrem k jeho středu, viz obrázek č. 11.



Obrázek 11: Prostorové znázornění rozložení teploty v horní části pracovního prostoru teplotní komory při teplotní úrovni 25°C

Zobrazení, které je uvedeno v obrázku č. 11, bylo vytvořené pomocí interpolace hodnot průměrné hodnoty teploty ze snímačů T1, T2, T5, T6 umístěných v horní části pracovního prostoru a snímače T9. V obrázku jsou tyto hodnoty označeny shodně s označením snímačů. Kdy hodnota daná snímačem T9 je na souřadnicích [T9,T9] ve středu zobrazené plochy. Jako název os je zde použito pro lepší orientaci označení související s konstrukcí teplotní komory.

Z obrázku č. 11 je pak snadné určit, že v horní části pracovního prostoru teplotní komory byla nejnižší teplota měřena v pravém rohu u dveří teplotní komory. Dále je vidět, že nižší teploty byly měřeny u dveří teplotní komory a směrem k zadní stěně pracovního prostoru průměrná teplota roste.



### 8.1.1.2 Teplotní gradient

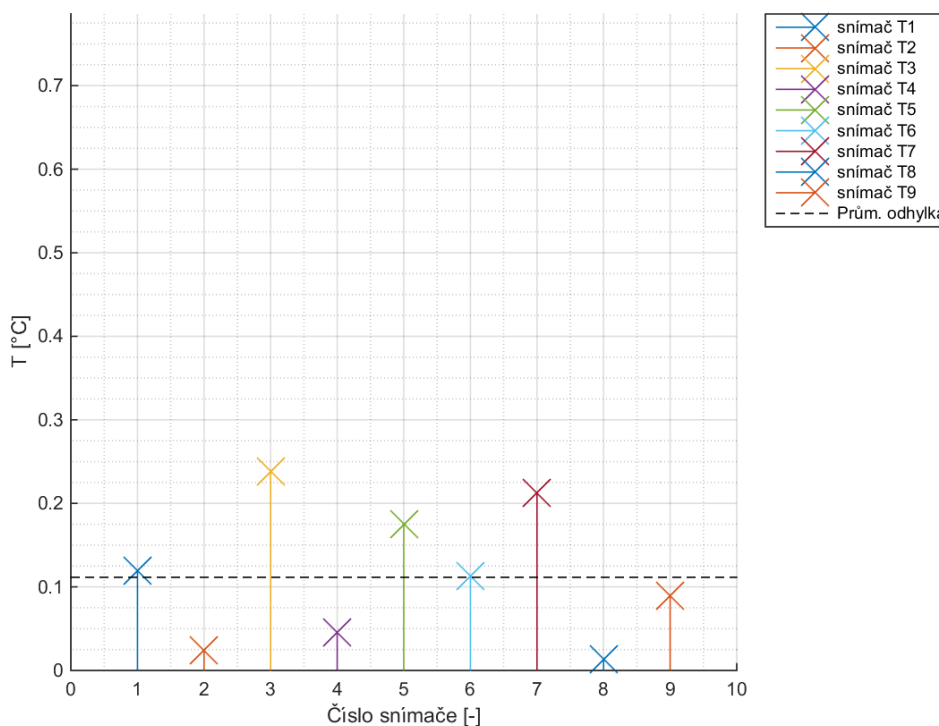
Dále byl z vypočítaných hodnot určen teplotní gradient, který popisuje maximální rozdíl teplot v pracovním prostoru teplotní komory. Teplotní gradient se stanovuje z hodnot stanovené průměrné teploty udávaných osmi snímači teplot T1 až T8 umístěných v rozích teplotní komory.

Teplotní gradient pro teplotní úroveň 25 °C byl stanoven z průměrných hodnot teploty udávaných snímači T2 a T3, viz tabulka č. 22. Hodnota teplotního gradientu byla stanovena na 0,3 °C.

### 8.1.1.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Na základě naměřených dat pro potvrzenou teplotní úroveň 25 °C, jejichž souhrn je uveden v tabulce č. 22 a v tabulce č. 23, je možné říci, že hodnota průměrné odchylky teploty svou hodnotou nepřesahuje dovolenou chybu teplotní komory  $\pm 0,3$  °C. Průměrná hodnota odchylky teploty v pracovním prostoru teplotní komory je 0,11 °C.

Největší hodnota odchylky vztažená na jednotlivé snímače byla zjištěna na snímači T3 s absolutní hodnotou odchylky 0,24 °C. Absolutní hodnota odchylky teploty pak byla na referenčním snímači T9 stanovena na hodnotu 0,09 °C, viz tabulka č. 22. Obrázek zachycující hodnoty odchylky pro jednotlivé snímače je možné nalézt níže.



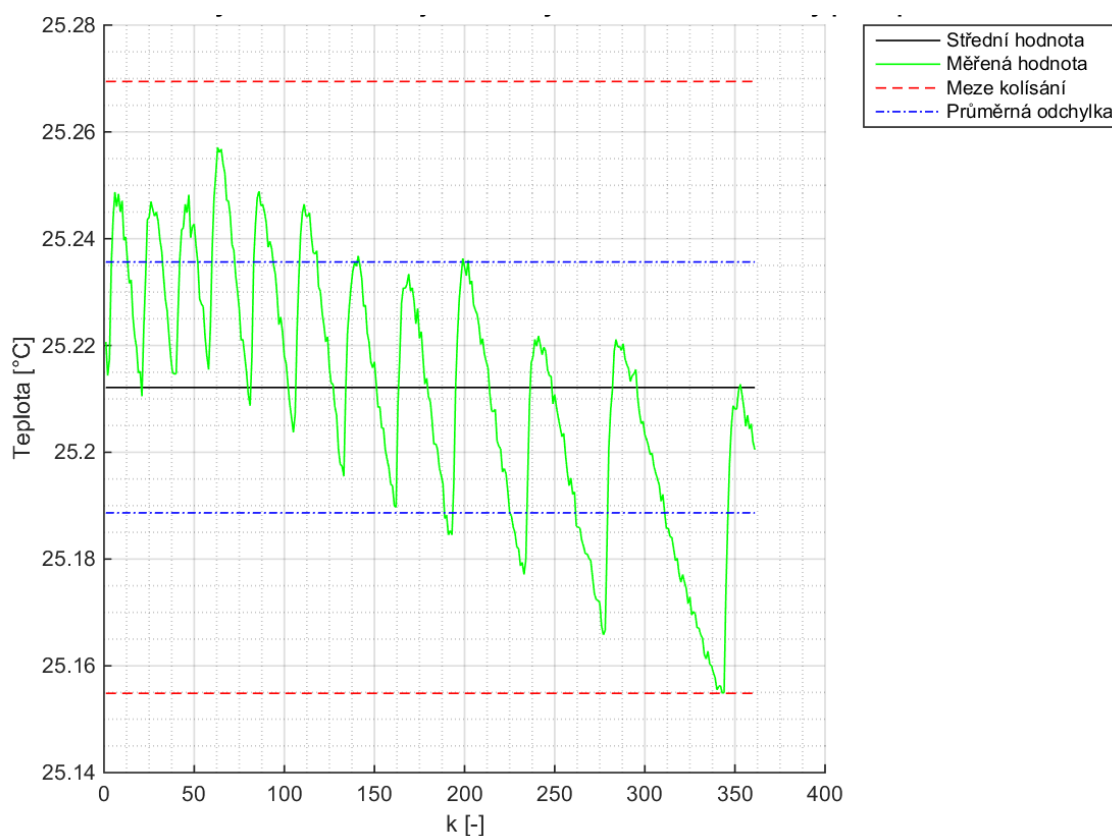
Obrázek 12: Zobrazení průměrné absolutní odchylky pro jednotlivé teplotní snímače při teplotní úrovni 25 °C

Na základě hodnot průměrné teploty  $\bar{t}$ , viz tabulka č. 22, byl sestaven graf zobrazený na obrázku č. 12. V tomto obrázku je zobrazena průměrná hodnota absolutní odchylky, která byla naměřena jednotlivými snímači T1 až T9 použitými při confirmaci teplotní komory.

Z obrázku č. 12 je patrné, že největší absolutní odchylka od žádané teploty byla zjištěna snímačem T3, tedy v levém dolním rohu u dveří teplotní komory.

#### 8.1.1.4 Kolísání teploty

Při vyhodnocování dat zaznamenaných během confirmace teplotní úrovně bylo zapotřebí mimo jiné stanovit hodnotu kolísání teploty, tedy změnu teploty v určitém bodě v pracovním prostoru komory. Na základě výpočtů a přístupu k problému jako k výpočtu směrodatné odchylky bylo zjištěno, že největší kolísání teploty bylo stanoveno pro teplotní úroveň 25 °C na hodnotu 0,02 °C na snímači T7, viz tabulka č. 22. Průběh kolísání teploty pro snímač T7 je možné nalézt níže, viz obrázek č. 13.



Obrázek 13: Kolísání teploty na snímači T7 při confirmaci teplotní úrovně 25 °C.

Na základě hodnot průměrné chyby dané kolísáním teploty  $\delta_{KT}$ , viz tabulka č. 22, byl sestaven graf zobrazený v obrázku č. 13. V tomto obrázku je zobrazen průběh měřené teploty snímačem T7, který měl při confirmaci teplotní úrovně 25 °C největší směrodatnou odchylku od průměrné hodnoty teploty daného měření, viz kapitola 7.3.2.

Na svislé ose je vynesena hodnota naměřené teploty a na vodorovné ose je pro přehlednost vyneseno číslo vzorku  $k$ , kde číslo 0 odpovídá počátku měření 30 minutového úseku dat, který byl vyhodnocován. Perioda vzorkování byla 5 sekund.

Dále je v obrázku č. 13 černou čarou znázorněna průměrná hodnota teploty, modrou čarou jsou zde znázorněny meze směrodatné odchylky naměřených hodnot teploty od průměrné teploty, tedy hodnota chyby daná kolísáním. Červená přerušovaná čára pak znázorňuje meze největší odchylky naměřené teploty od hodnoty průměrné teploty.

#### 8.1.1.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota byla stanovena na hodnotu  $\pm 1,7$  °C, při konfidenční úrovni 95 %. Tato hodnota byla stanovena na základě výpočtů uvedených v kapitole 7.

Z tabulky č. 21 je možné vidět, že největším samostatným zdrojem nejistoty měření pro tuto teplotní úroveň byla nejistota daná nelinearitou snímače. Na základě hodnoty nejistoty měření dané hysterezí, viz tabulka č. 21, je možné usoudit, že rozdíl ve výsledcích teplotních úrovní dosažených z různého směru je minimální.

#### 8.1.1.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 25 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $25,2 \pm 1,7$  °C při konfidenční úrovni 95 %. Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň splňuje přísnější požadavky na stabilitu teploty uvnitř pracovního prostoru v ustáleném stavu. Pokud je tedy během klimatických zkoušek požadována teplota  $20 \pm 2$  °C, je 95% pravděpodobnost, že správná hodnota teploty bude v tomto intervalu.

Tabulka 23: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 25 °C

| $t = 25$ °C              |            |                             |                 |                    |
|--------------------------|------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| $\overline{t_{25}}$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\overline{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| 25,2                     | $\pm 1,7$  | 0,2                         | 0,3             | 0,02               |

Tabulka č. 23 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly hledány v rámci confirmace teplotní komory. Mezi zjištěné výsledné hodnoty patří celková průměrná hodnota teploty  $\overline{t_{25}}$ , celková rozšířená kombinovaná nejistota měření  $U_c$ , hodnota teplotního gradientu  $\Delta_G$  a hodnota popisující kolísání snímače  $\delta_{KT}$ .

## 8.1.2 Teplotní úroveň 50 °C

Druhou teplotní úrovní, která byla confirmována, byla teplota 50 °C.

V tabulce č. 24 jsou pro confirmaci dané teplotní úrovně uvedeny stanovené charakteristické hodnoty pro jednotlivé snímače.

Tabulka 24: Přehled vybraných stanovených hodnot snímačů pro teplotní úroveň 50 °C

| t = 50 °C            |          |          |          |          |          |          |          |         |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8      |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 119,3106 | 119,3463 | 119,2371 | 119,5897 | 119,4017 | 119,4052 | 119,6346 | 119,527 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 49,7752  | 49,8681  | 49,5845  | 50,5003  | 50,0118  | 50,0209  | 50,6167  | 50,3374 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -0,2248  | -0,1319  | -0,4155  | 0,5003   | 0,0118   | 0,0209   | 0,6167   | 0,3374  |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,01337  | 0,0163   | 0,0139   | 0,0126   | 0,0086   | 0,0135   | 0,0228   | 0,0145  |

Tabulka č. 24 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň 50 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

### 8.1.2.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory byla stanovena obdobným způsobem jako v předchozím případě uvedeném v kapitole 8.1.1.1.

Celková průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory byla stanovena na 50,1 °C.

### 8.1.2.2 Teplotní gradient

Pro teplotní úroveň 50 °C byl teplotní gradient v pracovním prostoru teplotní komory stanoven na hodnotu 1,0 °C. Tato hodnota byla stanovena na základě hodnot průměrné teploty udávaných snímači T3 a T7, viz tabulka č. 24

### 8.1.2.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Z hodnot odchylky teploty uvedených v tabulce č. 24 je vidět, že již při teplotě 50 °C některé ze snímačů udávají výrazně větší odchylky, než je její průměrná hodnota 0,09 °C. Největší průměrná odchylka teploty od teploty žádané byla zjištěna na snímačích T3 s hodnotou -0,5 °C a největší odchylka teploty pak byla stanovena na hodnotu 0,7 °C na snímači T7. Vzhledem k odchylce teploty v kladných i záporných hodnotách byla celková průměrná hodnota odchylka stanovena na 0,09 °C. Touto hodnotou splňuje toleranci  $\pm 0,3$  °C udávanou v dokumentaci teplotní komory, viz [14].

#### 8.1.2.4 Kolísání teploty

Na základě výpočtů hodnoty kolísání teploty jako výpočtu směrodatné odchylky, bylo největší kolísání teploty stanoveno na hodnotu 0,03 °C na snímači T7, pro teplotní úroveň 50 °C. Hodnoty kolísání teploty pro jednotlivé snímače obsahuje tabulka č. 24.

#### 8.1.2.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota měření byla stanovena na hodnotu  $\pm 1,8$  °C, při konfidenční úrovni 95 %.

Nejvýznamnějším zdrojem nejistoty typu B je při této teplotní úrovni nelinearita snímače, viz tabulka č. 25.

Tabulka 25: Hodnoty zdrojů nejistot vystupujících při confirmaci teplotní úrovně 50 °C

| t = 50 °C                               |                     |           |           |              |              |
|---|---------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [Ω/°C] | Hodnota [°C] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5588       | 0,1444       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0002       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592       | 0,7553       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588       | 0,1543       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0027       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5606       | 0,3800       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587       | 0,0228       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587       | 0,0062       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |              | 1,8          |

V tabulce č. 25 jsou uvedeny vypočtené hodnoty vybraných jednotlivých zdrojů nejistot, které ovlivňovali měření.

#### 8.1.2.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 50 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $50,1 \pm 1,8$  °C při konfidenční úrovni 95 %.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň splňuje požadavky na stabilitu teploty  $50 \pm 5$  °C i přísnější toleranci  $\pm 2$  °C.

V tabulce č. 26 je zobrazen přehled výsledků, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 50 °C.

Tabulka 26: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 50 °C

| t = 50 °C           |            |                        |                 |                    |
|---------------------|------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| $\bar{t}_{50}$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\bar{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| 50,1                | ± 1,8      | 0,1                    | 1,0             | 0,02               |

Tabulka č. 26 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 50 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

### 8.1.3 Teplotní úroveň 75 °C

Další teplotní úrovní, která byla v rámci této zkoušky confirmována, byla teplota 75 °C. Následující kapitola popisuje výsledky vyhodnocení confirmace, kdy žádané teploty 75 °C bylo dosaženo za klesající teploty z vyšší teplotní úrovně 100 °C.

Konkrétní stanovené hodnoty jednotlivých snímačů pro danou teplotní úroveň jsou uvedeny v tabulce č. 27.

Tabulka 27: Přehled vybraných stanovených hodnot snímačů pro teplotní úroveň 75 °C

| t = 75 °C            |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 128,7661 | 128,8251 | 128,6179 | 129,2901 | 128,9276 | 128,9095 | 129,4577 | 129,2428 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 74,4209  | 74,5754  | 74,0334  | 75,7922  | 74,8435  | 74,7962  | 76,2309  | 75,6684  |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -0,5791  | -0,4246  | -0,9666  | 0,7922   | -0,1565  | -0,2038  | 1,2309   | 0,6684   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,0106   | 0,0200   | 0,0378   | 0,0160   | 0,0120   | 0,0152   | 0,0340   | 0,0200   |

Tabulka č. 27 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň 75 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitole 8.1.1.

#### 8.1.3.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Na základě postupu uvedeném v kapitole 8.1.1 byla celková průměrná hodnota teploty uvnitř pracovního prostoru teplotní komory stanovena na 75,1 °C. Průměrná teplota referenčního snímače T9 byla stanovena na hodnotu 74,7 °C.

#### 8.1.3.2 Teplotní gradient

Pro teplotní úroveň 75 °C byl gradient teploty v pracovním prostoru teplotní komory stanoven na hodnotu 2,2 °C. Tento teplotní rozdíl mezi měřenými body byl stanoven snímači T3 a T7, viz tabulka č. 27.

### 8.1.3.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Z hodnot uvedených v tabulce č. 29 je vidět, že při teplotě 75 °C snímače T3 a T7 udávají největší hodnoty odchylky od žádané teploty. Průměrná hodnota odchylky udávaná snímačem T3 byla -1 °C a odchylka udávaná snímačem T7 byla stanovena na 1,3 °C. Z hodnot je vidět, že odchylka teploty nabývala kladných i záporných hodnot. V důsledku toho byla celková průměrná odchylka měřené teploty stanovena pouze na hodnotu 0,05 °C. Průměrná odchylka svou hodnotou tedy splňuje specifikace výrobce teplotní komory na přesnost  $\pm 0,3$  °C, viz [14].

### 8.1.3.4 Kolísání teploty

Z tabulky č. 25 je možné vyčíst hodnotu kolísání teploty v pracovním prostoru komory, viz kapitola 8.1.1.4, která byla stanovena na 0,04 °C, konkrétně na snímači T3.

### 8.1.3.5 Nejistota měření

Při této teplotní úrovni již začíná být gradient teploty hlavním zdrojem standardní nejistoty měření. Doposud jím byla nelinearita snímače.

Celková rozšířená kombinovaná nejistota byla stanovena na hodnotu  $\pm 2,2$  °C, při konfidenční úrovni 95 %, viz kapitola 7.

Příspěvky jednotlivých zdrojů k celkové nejistotě měření uvádí tabulka č. 28.

Tabulka 28: Hodnoty zdrojů nejistot vystupujících při confirmaci teplotní úrovně 75 °C

| t = 75 °C                               |                     |           |           |                                   |                              |
|---|---------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ] | Hodnota [ $^\circ\text{C}$ ] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5588                            | 0,1733                       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0002                       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592                            | 0,7553                       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588                            | 0,1666                       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0029                       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5628                            | 0,7650                       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587                            | 0,0378                       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587                            | 0,0130                       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |                                   | 2,2                          |

V tabulce č. 28 jsou uvedeny vypočtené hodnoty uvažovaných zdrojů nejistot, které byly zahrnuty do celkové bilance nejistoty měření. Z hodnot uvedených v tabulce byla stanovena celková rozšířená kombinovaná nejistota  $U_c$ .

### 8.1.3.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 75 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $75,1 \pm 2,2$  °C při konfidenční úrovni 95 %.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň nespĺňuje přísnější požadavky na stabilitu teploty  $\pm 2$  °C uvnitř pracovního prostoru v ustáleném stavu. Pokud by byla během případné klimatické zkoušky prováděné v této teplotní komoře požadována stabilita teploty  $75 \pm 2$  °C, musí se počítat s tím, že správná hodnota v tomto intervalu bude ležet s pravděpodobností pouze 92 %.

V tabulce č. 29 je zobrazen přehled důležitých výsledků pro confirmaci teplotní úrovně 75 °C.

Tabulka 29: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 75 °C

| t = 75 °C           |            |                        |                 |                    |
|---------------------|------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| $\bar{t}_{75}$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\bar{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| 75,1                | $\pm 2,2$  | 0,1                    | 2,2             | 0,04               |

Tabulka č. 29 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 75 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

## 8.1.4 Teplotní úroveň 100 °C

V pořadí čtvrtou teplotní úrovní, která byla v průběhu zkoušky confirmována, byla teplota 100 °C. Stanovené hodnoty jednotlivých teplotních snímačů pro danou teplotní úroveň, jsou uvedeny v tabulce č. 30.

Tabulka 30: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 100 °C

| t = 100 °C           |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 137,9962 | 138,1558 | 137,6925 | 138,9560 | 138,2721 | 138,2546 | 139,1832 | 138,9760 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 98,6573  | 99,0780  | 97,8572  | 101,1881 | 99,3846  | 99,3384  | 101,7873 | 101,2408 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -1,3427  | -0,9220  | -2,1428  | 1,1881   | -0,6154  | -0,6616  | 1,7873   | 1,2408   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,0938   | 0,0935   | 0,0992   | 0,0257   | 0,0582   | 0,0904   | 0,0311   | 0,0248   |

Tabulka č. 30 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň 100 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.



#### 8.1.4.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Celková průměrná teplota uvnitř pracovního prostoru teplotní komory byla stanovena na hodnotu 99,8 °C, z hodnot uvedených v tabulce č. 30. Přičemž průměrná teplota uváděná referenčním snímačem T9, umístěným ve středu pracovního prostoru, byla 99,5 °C. Rozdíl mezi celkovou průměrnou teplotou a teplotou udávanou referenčním snímačem je menší než 0,3 °C.

#### 8.1.4.2 Teplotní gradient

Teplotní gradient, který byl určen při konfirmaci teplotní úrovně 100 °C, byl stanoven na hodnotu 3,8 °C. Tato hodnota byla opět stanovena na základě průměrných hodnot udávaných snímači T3 a T7, viz tabulka č. 30.

#### 8.1.4.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Z hodnot uvedených v tabulce č. 30 je možné opět vidět, že průměrná teplota měřená snímačem T3 byla menší než žádaná teplota a to o 2,2 °C, při čemž teplota udávaná snímačem T7 byla naopak větší o 1,9 °C. I přes větší rozdíly mezi hodnotami udávanými jednotlivými snímači byla celková průměrná odchylka měřené teploty stanovena na -0,2 °C. Průměrná hodnota odchylky od žádané teploty 100 °C tedy splňuje specifikace výrobce na přesnost teplotní komory  $\pm 0,3$  °C, viz [14].

#### 8.1.4.4 Kolísání teploty

Největší hodnota kolísání teploty byla zjištěna na teplotním snímači T3 s hodnotou 0,1 °C, viz tabulka č. 30.

#### 8.1.4.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota byla stanovena na hodnotu  $\pm 3,4$  °C, při konfidenční úrovni 95 %. Příspěvky jednotlivých zdrojů nejistoty k celkové nejistotě měření uvádí tabulka č. 31.

Tabulka 31: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 100 °C

| t = 100 °C                              |                     |           |           |                                   |                              |
|---|---------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ] | Hodnota [ $^\circ\text{C}$ ] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5588                            | 0,2019                       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0002                       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592                            | 0,7553                       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588                            | 0,1786                       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0031                       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5661                            | 1,4733                       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587                            | 0,0992                       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587                            | 0,0239                       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |                                   | 3,4                          |

Tabulka č. 31 uvádí vypočítané hodnoty uvažovaných zdrojů nejistoty, které byly zahrnuty do celkové rozšířené kombinované nejistoty měření.

#### 8.1.4.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 100 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $99,8 \pm 3,4$  °C při konfidenční úrovni 95 %.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň nesplňuje přísnější z požadavků na stabilitu teploty uvnitř pracovního prostoru v ustáleném stavu. Při použití teploty 100 °C s tolerancí  $\pm 2$  °C, by bylo nutné počítat s tím, že by pravá hodnota ležela v daném intervalu teplot s pravděpodobností 75 %.

V tabulce č. 32 je zobrazen přehled výsledků, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 100 °C.

Tabulka 32: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 100 °C

| t = 100 °C                                |                            |   |                                 |                                    |
|---|----------------------------|---|---------------------------------|------------------------------------|
| $\overline{t_{100}}$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $U_c$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $ \Delta\overline{t} $ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\delta_G$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\delta_{KT}$ [ $^\circ\text{C}$ ] |
| 99,8                                      | $\pm 3,4$                  | 0,2   | 3,8                             | 0,1                                |

Tabulka č. 32 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 100 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

## 8.1.5 Teplotní úroveň 125 °C

V následující kapitole jsou popsány stanovené výsledky žádané teploty 125 °C, kdy této teploty bylo dosaženo za rostoucí teploty z nižší teplotní úrovně 100 °C.

Stanovené hodnoty pro jednotlivé teplotní snímače jsou uvedeny v tabulce č. 33.

Tabulka 33: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 125 °C

| t=125 °C             |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 147,1587 | 147,3710 | 146,7300 | 148,4509 | 147,5255 | 147,4933 | 148,8380 | 148,6310 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 122,8946 | 123,4583 | 121,7565 | 126,3273 | 123,8687 | 123,7830 | 127,3562 | 126,8060 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -2,1054  | -1,5417  | -3,2435  | 1,3273   | -1,1313  | -1,2170  | 2,3562   | 1,8060   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,1081   | 0,1090   | 0,0898   | 0,0347   | 0,0664   | 0,1061   | 0,0527   | 0,0429   |

Tabulka č. 33 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro potvrzenou teplotní úroveň 125 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

### 8.1.5.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Celková průměrná teplota byla stanovena na hodnotu 124,5 °C, viz kapitola 8.1.1.1. Průměrná teplota stanovená referenčním snímačem teploty T9 byla 123,9 °C. Rozdíl obou hodnot je 0,6 °C. Na této hodnotě si lze všimnout stále rostoucího vlivu teplotního gradientu na průměrnou teplotu.

### 8.1.5.2 Teplotní gradient

Při potvrzení teplotní úrovně 125 °C byl teplotní gradient stanoven na hodnotu 5,4 °C. Stejně jako u předchozích teplotních úrovní byl tento výsledek stanoven z hodnot teploty daných teplotními snímači T3 a T7.

### 8.1.5.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

V tabulce č. 33 je možné vyčíst, že stejně jako v předchozích případech byla největší průměrná odchylka od žádané teploty stanovena pro snímač T3 a T7. V případě průměrné hodnoty snímače T3 byla odchylka od žádané teploty -3,3 °C a u snímače T7 2,3562 °C. I přes takto velké teplotní rozdíly byla průměrná odchylka stanovena na -0,5 °C.

Tato průměrná hodnota odchylky od žádané teploty 125 °C již nespĺňuje specifikace stanovené výrobcem teplotní komory na přesnost teploty, která byla stanovena na  $\pm 0,3$  °C, viz [14].

#### 8.1.5.4 Kolísání teploty

Z těchto hodnot, viz tabulka č. 33, je možné vyčíst hodnotu kolísání teploty pro teplotní úroveň 125 °C, která činí 0,1 °C. Tato hodnota byla stanovena na teplotním snímači T2.

#### 8.1.5.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota měření byla stanovena na hodnotu  $\pm 4,5$  °C, při konfidenční úrovni 95 %.

Obdobně jako v předchozích případech je největším zdrojem nejistoty měření gradient teploty. Hodnoty pro jednotlivé uvažované zdroje nejistoty měření jsou uvedeny v tabulce č. 34.

Tabulka 34: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně 125 °C

| t = 125 °C                              |                     |           |           |              |              |
|---|---------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [Ω/°C] | Hodnota [°C] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5588       | 0,2304       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0002       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592       | 0,7553       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588       | 0,1906       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0033       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5692       | 2,0828       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587       | 0,1090       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587       | 0,0342       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |              | 4,5          |

Tabulka č. 34 uvádí vypočítané hodnoty uvažovaných zdrojů nejistot, které byly zahrnuty do celkové rozšířené kombinované nejistoty měření.

#### 8.1.5.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 125 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $124,5 \pm 4,5$  °C při konfidenční úrovni 95 %.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň splňuje požadavky na udržovanou teplotu v ustáleném  $125 \pm 5$  °C, protože stanovená výsledná hodnota celá leží v tomto intervalu teplot i se započítanou nejistotou měření.

V případě požadované stability teploty v ustáleném stavu  $125 \pm 2$  °C, by průměrná teplota ležela v tomto intervalu pouze s pravděpodobností 61 %.

Výsledky confirmace teplotní úrovně 125 °C uvádí tabulka č. 35.

Tabulka 35: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 125 °C

| t = 125 °C           |            |                        |                 |                    |
|----------------------|------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| $\bar{t}_{125}$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\bar{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| 124,5                | ± 4,5      | 0,5                    | 5,4             | 0,1                |

Tabulka č. 35 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 125 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

## 8.1.6 Teplotní úroveň 150 °C

V pořadí šestou confirmovanou teplotní úrovní byla teplota 150 °C. Stanovené hodnoty pro jednotlivé teplotní snímače použité při confirmaci teplotní úrovně 150 °C jsou uvedeny v tabulce č. 36.

Tabulka 36: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 150 °C

| t = 150 °C           |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 156,2177 | 156,4865 | 155,6448 | 157,8162 | 156,6892 | 156,6330 | 158,4502 | 158,2436 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 147,0365 | 147,7554 | 145,5044 | 151,3151 | 148,2977 | 148,1476 | 153,0135 | 152,4599 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -2,9635  | -2,2446  | -4,4956  | 1,3151   | -1,7023  | -1,8524  | 3,0135   | 2,4599   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,1036   | 0,1021   | 0,1092   | 0,0273   | 0,0685   | 0,1025   | 0,0368   | 0,0401   |

Tabulka č. 36 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň 150 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

### 8.1.6.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Celková průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory byla stanovena na hodnotu 149,2 °C. Dále byla stanovena průměrná hodnota teploty ve středu teplotní komory, udávaná referenčním snímačem T9, na hodnotu 148,2°C. Rozdíl mezi celkovou průměrnou teplotou a teplotou udávanou referenčním snímačem se blíží k 1 °C.

### 8.1.6.2 Teplotní gradient

V rámci vyhodnocení confirmace teplotní úrovně 150 °C byl stanoven teplotní gradient na hodnotu 7,5 °C. Při výpočtu hodnoty teplotního gradient pro tuto teplotní úroveň byly použity hodnoty průměrné teploty stanovené spínači T3 a T7.

### 8.1.6.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Nejnižší průměrná odchylka teploty byla měřena teplotním snímačem T3 a byla stanovena na  $-4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Naopak nejvyšší průměrná odchylka s hodnotou  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  byla dána snímačem T7, viz tabulka č. 36. Celková průměrná odchylka teploty byla stanovena na hodnotu  $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato hodnota svou velikostí již přesahuje povolené meze udávané výrobcem teplotní komory, a to více jak o  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , viz [14].

### 8.1.6.4 Kolísání teploty

Hodnota kolísání teploty byla stanovena na hodnotu  $0,11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , přičemž tato hodnota byla stanovena z naměřených hodnot teplotního snímače T3, viz tabulka č. 36.

### 8.1.6.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota byla stanovena na hodnotu  $\pm 5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při konfidenční úrovni 95 %. Příspěvky od jednotlivých zdrojů nejistot, které byly v rámci konfirmace uvažovány, jsou zobrazeny v tabulce č. 37.

Tabulka 37: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při konfirmaci teplotní úrovně  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

| $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$       |                     |           |           |                                     |                                |
|---|---------------------|-----------|-----------|-------------------------------------|--------------------------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [ $\Omega/^{\circ}\text{C}$ ] | Hodnota [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5589                              | 0,2589                         |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587                              | 0,0002                         |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592                              | 0,7553                         |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588                              | 0,2024                         |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587                              | 0,0035                         |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5727                              | 2,7221                         |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587                              | 0,1092                         |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587                              | 0,0454                         |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | $k = 2$   |                                     | 5,7                            |

Tabulka č. 37 uvádí vypočítané hodnoty uvažovaných zdrojů nejistot, které byly zahrnuty do celkové rozšířené kombinované nejistoty měření.

### 8.1.6.6 Zhodnocení výsledků

Při konfirmaci teplotní úrovně  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $149,2 \pm 5,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  při konfidenční úrovni 95 %, viz tabulka č. 38.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň nesplňuje požadavky na stabilitu teploty uvnitř pracovního prostoru v ustáleném stavu. Z výsledku

bylo stanoveno, že by uvnitř pracovního prostoru bylo dosaženo 90% pravděpodobnosti, že pravá hodnota leží v intervalu  $150 \pm 5$  °C. Při požadované stabilitě teploty  $150 \pm 2$  °C, by bylo dosaženo pouze 50% pravděpodobnosti, že měřená hodnota leží v daném intervalu.

Tabulka 38: Zjištěné hodnoty při konfirmaci teplotní úrovně 150 °C

| t = 150 °C           |            |                        |                 |                    |
|----------------------|------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| $\bar{t}_{150}$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\bar{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| 149,2                | $\pm 5,7$  | 0,8                    | 7,5             | 0,11               |

Tabulka č. 38 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při konfirmaci teplotní úrovně 150 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

### 8.1.7 Teplotní úroveň 175 °C

Bodem s největší teplotou, u které proběhla konfirmace, byla teplotní úroveň 175 °C. Tato teplotní úroveň byla v rámci konfirmačního cyklu ověřena pouze jednou. Vybrané hodnoty vypočítané pro tuto teplotní úroveň obsahuje tabulka č. 39.

Tabulka 39: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 175 °C

| t = 175 °C           |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 165,2440 | 165,5640 | 164,4778 | 167,0722 | 165,8109 | 165,7361 | 167,9873 | 167,8221 |
| $\bar{t}$ [°C]       | 171,2715 | 172,1341 | 169,2073 | 176,2025 | 172,7997 | 172,5981 | 178,6735 | 178,2273 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -3,7285  | -2,8659  | -5,7927  | 1,2025   | -2,2003  | -2,4019  | 3,6735   | 3,2273   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,0213   | 0,0242   | 0,0747   | 0,0295   | 0,0196   | 0,0230   | 0,0513   | 0,0465   |

Tabulka č. 39 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro konfirmovanou teplotní úroveň 175 °C a její popis je obdobný jako tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

#### 8.1.7.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Celková průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory byla stanovena na hodnotu 173,9 °C a hodnota udávaná referenčním snímačem byla 172,5 °C. Jejich rozdíl je tedy 1,4 °C.

Průměrné hodnoty teploty dané jednotlivými snímači uvádí tabulka č. 39.

#### 8.1.7.2 Odchylka průměrné teploty od žádané

Největší průměrné odchylky teploty byly stanoveny pro snímač T3 a T7, viz tabulka č. 39, avšak i v případě ostatních snímačů dosahovala odchylka teploty až jednotek °C.

Pro snímač T3 byla stanovena odchylka teploty od žádané hodnoty na  $-5,8\text{ °C}$  a snímačem T7 byla stanovena odchylka teploty na hodnotu  $3,4\text{ °C}$ .

Protože odchylky teplot nabývaly kladných i záporných hodnot celková průměrná odchylka měřené teploty od teploty žádané byla stanovena na hodnotu  $-1,2\text{ °C}$ . Tato hodnota je čtyřikrát větší, než vymezuje toleranční pásmo udávané výrobcem v technických specifikacích teplotní komory, viz [14].

### 8.1.7.3 Kolísání teploty

Z tabulky tabulce č. 39 je vidět, že největšího kolísání teploty bylo dosahováno opět na snímači T3. Kolísání teploty na tomto snímači dosahovalo hodnoty  $0,08\text{ °C}$ .

### 8.1.7.4 Teplotní gradient

Nejmenší průměrná teplota byla opět naměřena snímačem T3 a nejvyšší průměrná teplota snímačem T7, viz výše. Z hodnot těchto snímačů byl stanoven teplotní gradient v pracovním prostoru komory, na téměř  $9,0\text{ °C}$ .

### 8.1.7.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota při teplotní úrovni  $175\text{ °C}$  byla stanovena na hodnotu  $\pm 6,8\text{ °C}$ , při konfidenční úrovni 95 %. Příspěvky k celkové nejistotě od jednotlivých zdrojů, které byly v rámci konfirmace teplotní komory uvažovány, jsou zobrazeny v tabulce č. 40.

Tabulka 40: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při konfirmaci teplotní úrovně  $175\text{ °C}$

| t = 175 °C                              |                     |           |           |                                   |                              |
|---|---------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ] | Hodnota [ $^\circ\text{C}$ ] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5589                            | 0,2874                       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0001                       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592                            | 0,7553                       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588                            | 0,2142                       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0037                       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5762                            | 3,2980                       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587                            | 0,0747                       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587                            | 0,0565                       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |                                   | 6,8                          |

V tabulce č. 40. Jsou uvedeny vypočítané hodnoty uvažovaných zdrojů nejistot, které byly zahrnuty do celkové rozšířené kombinované nejistoty měření.



### 8.1.7.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 175 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $173,8 \pm 6,8$  °C při konfidenční úrovni 95 %, viz tabulka č. 41.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň nespĺňuje požadavky na stabilitu  $175 \pm 5$  °C. Při tomto požadavku na stabilitu by uvnitř pracovního prostoru bylo dosaženo pravé hodnoty teploty v tomto intervalu jen s 84% pravděpodobností. Při požadované stabilitě teploty  $175 \pm 2$  °C, by bylo dosaženo pravděpodobnosti pouze 42 %.

Tabulka 41: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 175 °C

| $t = 175$ °C              |            |                             |                 |                    |
|---------------------------|------------|-----------------------------|-----------------|--------------------|
| $\overline{t}_{175}$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\overline{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| 173,8                     | $\pm 6,8$  | 1,2                         | 9,0             | 0,08               |

Tabulka č. 41 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 175 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

## 8.1.8 Teplotní úroveň 0 °C

Teplotní úroveň 0 °C byla první teplotní úrovní s nižší nastavenou teplotou, než byla teplota okolního prostředí. Vybrané hodnoty stanovené pro tuto teplotní úroveň jsou uvedeny v tabulce č. 42.

Tabulka 42: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň 0 °C

| $t = 0$ °C                  |         |         |          |          |         |         |          |          |
|-----------------------------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
|                             | T1      | T2      | T3       | T4       | T5      | T6      | T7       | T8       |
| $\overline{R}$ [Ω]          | 99,7269 | 99,8451 | 100,3240 | 100,0618 | 99,7286 | 99,9375 | 100,0006 | 100,0376 |
| $\overline{t}$ [°C]         | -0,6975 | -0,3950 | 0,8291   | 0,1582   | -0,6930 | -0,1587 | 0,0015   | 0,0962   |
| $ \Delta\overline{t} $ [°C] | -0,6975 | -0,3950 | 0,8291   | 0,1582   | -0,6930 | -0,1587 | 0,0015   | 0,0962   |
| $\delta_{KT}$ [°C]          | 0,0551  | 0,0437  | 0,0175   | 0,0094   | 0,0950  | 0,0356  | 0,0192   | 0,0124   |

Tabulka č. 42 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň 0 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

### 8.1.8.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Z naměřených dat, viz elektronická příloha, byla stanovena celková průměrná teplota na hodnotu -0,1 °C. Průměrná hodnota teploty ve středu pracovního prostoru teplotní komory byla stanovena na -0,3 °C. Rozdíl mezi celkovou průměrnou teplotou a teplotou udávanou referenčním snímačem byl stanoven na 0,2 °C.

### 8.1.8.2 Teplotní gradient

Teplotní gradient v pracovním prostoru teplotní komory byl stanoven z průměrných hodnot udávaných snímači T1 a T3 na hodnotu 1,5 °C.

### 8.1.8.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Z těchto tabulek č. 32 je zřejmé, že největší teplotní odchylky byly stanoveny pro teplotní snímače T1 a T3. Při této teplotní úrovni byla snímačem T7 udávána nejmenší odchylka od žádané teploty a to pouhých 0,002 °C. V případě snímače T1 byla průměrná odchylka teploty stanovena na -0,7 °C a pro snímač T3 0,8 °C. Přičemž právě tyto dva snímače udávají hodnou teplotního gradientu, viz výše.

Celková průměrná odchylka teploty od teploty žádané byla stanovena na - 0,1 °C.

### 8.1.8.4 Kolísání teploty

Kolísání teploty lze odvodit na základě hodnot uvedených v tabulce č. 34, z které je patrné, že největší kolísání teploty bylo zaznamenáno pomocí snímače T5 °C, přičemž byla jeho hodnota stanovena na 0,1 °C.

### 8.1.8.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota byla stanovena na hodnotu  $\pm 1,9$  °C, při konfidenční úrovni 95 %. V případě teplotní úrovně 0 °C je, stejně jako u teplotních úrovní 25 a 50 °C, největším přispěvatelem k celkové nejistotě měření nelinearita snímače. Nejistota měření daná gradientem teploty je svou hodnotou druhým a nejvýznamnějším zdrojem nejistoty. Příspěvky od jednotlivých zdrojů nejistot měření lze najít v tabulce č. 43.

Tabulka 43: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při konfirmaci teplotní úrovně 0 °C

| t = 0 °C                                |                     |           |           |              |              |
|---|---------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [Ω/°C] | Hodnota [°C] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0867       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0005       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592       | 0,7553       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5588       | 0,1294       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587       | 0,0023       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5616       | 0,5703       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587       | 0,0950       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587       | 0,0088       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |              | 1,9          |

V tabulce č. 43 jsou uvedeny jednotlivé uvažované zdroje nejistot a jejich číselné hodnoty. Tyto hodnoty byly zahrnuty do celkové bilance nejistoty měření.

#### 8.1.8.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně 0 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $-0,1 \pm 1,9$  °C při konfidenční úrovni 95 %.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň splňuje požadavky na stabilitu teploty  $0 \pm 5$  °C uvnitř pracovního prostoru v ustáleném stavu.

Při požadavku na stabilitu teploty  $0 \pm 2$  °C by uvnitř pracovního prostoru byla pravděpodobnost, že pravá hodnota leží v daném intervalu na hranici 95 %.

V tabulce č. 44 je zobrazen přehled výsledků, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 0 °C.

Tabulka 44: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně 0 °C

| t = 0 °C         |            |                        |                 |                    |
|------------------|------------|------------------------|-----------------|--------------------|
| $\bar{t}_0$ [°C] | $U_c$ [°C] | $ \Delta\bar{t} $ [°C] | $\Delta_G$ [°C] | $\delta_{KT}$ [°C] |
| -0,1             | $\pm 1,9$  | 0,1                    | 1,5             | 0,1                |

Tabulka č. 44 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně 0 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

### 8.1.9 Teplotní úroveň -25 °C

Teplotní úroveň -25 °C byla první ze dvou confirmovaných teplotních úrovní s teplotou menší než 0 °C, které byly ověřovány. Charakteristické průměrné hodnoty pro tuto teplotní úroveň jsou uvedeny v tabulce č. 45

Tabulka 45: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň -25 °C

| t = -25 °C           |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                      | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [Ω]        | 89,5609  | 89,8120  | 90,6928  | 90,3531  | 89,5414  | 89,9448  | 90,1617  | 90,2771  |
| $\bar{t}$ [°C]       | -26,6018 | -25,9643 | -23,7277 | -24,5907 | -26,6512 | -25,6273 | -25,0765 | -24,7836 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C] | -1,6018  | -0,9643  | 1,2723   | 0,4093   | -1,6512  | -0,6273  | -0,0765  | 0,2164   |
| $\delta_{KT}$ [°C]   | 0,0523   | 0,0642   | 0,0298   | 0,0136   | 0,0846   | 0,0658   | 0,0236   | 0,0195   |

Tabulka č. 45 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň -25 °C a její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

#### 8.1.9.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Celková průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory dosahovala hodnoty  $-25,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Průměrná hodnota teploty udávaná snímačem umístěným ve středu teplotní komory byla stanovena na  $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jejich rozdíl je tedy  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 8.1.9.2 Teplotní gradient

Nejnižší průměrná teplota byla udávána teplotním snímačem T5 a naopak nejvyšší průměrná teplota byla udávána snímačem T3, viz Tabulka 45. Teplotní gradient daný rozdílem jejich hodnot byl stanoven na  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 8.1.9.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Z tabulky č. 45 je vidět, že největší hodnoty teplotní odchylky bylo dosaženo na teplotních snímačích T3 a T5. Při této teplotní úrovni byla snímačem T3 udávána nejvyšší hodnota průměrné odchylky teploty od žádané hodnoty, a to  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě snímače T5 byla průměrná odchylka teploty stanovena na  $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Celková průměrná odchylka teploty od teploty žádané byla stanovena na hodnotu  $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tato hodnota je větší než meze udávané výrobcem teplotní komory, viz [14].

#### 8.1.9.4 Kolísání teploty

Z hodnot uvedených v tabulce č. 45 bylo stanoveno, že největší kolísání teploty bylo dosaženo na snímači T5 s hodnotou  $0,09\text{ }^{\circ}\text{C}$

#### 8.1.9.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota při teplotní úrovni  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  byla stanovena na hodnotu  $\pm 2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , při konfidenční úrovni 95 %. Příspěvky k celkové kombinované nejistotě měření od jednotlivých zdrojů, které byly v rámci konfirmace teplotní komory uvažovány, jsou zobrazeny v tabulce č. 46.

Tabulka 46: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně -25 °C

| t = -25 °C                              |                     |           |           |                                   |                              |
|---|---------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ] | Hodnota [ $^\circ\text{C}$ ] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,1159                       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0008                       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592                            | 0,7553                       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,1167                       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0020                       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5644                            | 1,1014                       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587                            | 0,0846                       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587                            | 0,0180                       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |                                   | 2,7                          |

V tabulce č. 46 jsou uvedeny vypočítané hodnoty uvažovaných zdrojů nejistot, které byly zahrnuty do celkové rozšířené kombinované nejistoty měření.

#### 8.1.9.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně -25 °C byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $-25,5 \pm 2,7$  °C při konfidenční úrovni 95 %, viz tabulka č. 47.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň splňuje požadavky na stabilitu teploty  $-25 \pm 5$  °C.

Avšak při požadavku na udržení teploty  $-25 \pm 2$  °C tato komora nevyhovuje. Pravděpodobnost, že pravá hodnota teploty v pracovním prostoru teplotní komory v ustáleném stavu leží v intervalu  $-25 \pm 2$  °C, je 84 %.

Tabulka 47: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně -25 °C

| t = -25 °C                           |                            |  |                                 |                                    |
|--------------------------------------|----------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|
| $\bar{t}_{-25}$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $U_c$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $ \Delta\bar{t} $ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\Delta_G$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\delta_{KT}$ [ $^\circ\text{C}$ ] |
| -25,4                                | $\pm 2,7$                  | 0,4                                    | 3,0                             | 0,09                               |

Tabulka č. 47 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně -25 °C. Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

## 8.1.10 Teplotní úroveň -50 °C

Poslední teplotní úrovní, která byla v rámci confirmace teplotní komory ověřována, byla teplota -50 °C. Hodnoty stanovené pro jednotlivé teplotní snímače při teplotní úrovni -50 °C jsou uvedeny v tabulce č. 48.

Tabulka 48: Přehled vybraných hodnot snímačů pro teplotní úroveň -50 °C

| t = -50 °C             |          |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                        | T1       | T2       | T3       | T4       | T5       | T6       | T7       | T8       |
| $\bar{R}$ [ $\Omega$ ] | 79,6120  | 79,6676  | 80,9857  | 80,5919  | 79,5858  | 79,8926  | 80,3285  | 80,4619  |
| $\bar{t}$ [°C]         | -51,7465 | -51,6066 | -48,2875 | -49,2796 | -51,8125 | -51,0402 | -49,9428 | -49,6068 |
| $\Delta\bar{t}$ [°C]   | -1,7465  | -1,6066  | 1,7125   | 0,7204   | -1,8125  | -1,0402  | 0,0572   | 0,3932   |
| $\delta_{KT}$ [°C]     | 0,0656   | 0,0775   | 0,0380   | 0,0175   | 0,1018   | 0,0829   | 0,0293   | 0,0240   |

Tabulka č. 48 obsahuje důležité vypočítané hodnoty pro confirmovanou teplotní úroveň -50 °C, její popis je obdobný jako pro tabulku č. 22, viz kapitola 8.1.1.

### 8.1.10.1 Průměrná teplota v pracovním prostoru

Celková průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory byla stanovena na hodnotu -50,5 °C. Přičemž průměrná hodnota teploty udávaná snímačem umístěným ve středu teplotní komory byla stanovena na -51,4 °C.

### 8.1.10.2 Teplotní gradient

Nejvyšší průměrnou teplotu během confirmace této teplotní úrovně udával snímač T3 a to hodnotu -48,3°C, přičemž nejnižší průměrnou teplotu udával snímač T5. Průměrná teplota udávaná tímto teplotním snímačem byla -51,9°C. Na základě rozdílu těchto teplot byl stanoven teplotní gradient na hodnotu 3,6 °C.

### 8.1.10.3 Odchylka průměrné teploty od žádané

Jak již bylo naznačeno výše, největších odchylek průměrné teploty od teploty žádané dosahovaly hodnoty teploty stanovené snímači T3 a T5. Hodnota odchylky teploty pro snímač T3 byla stanovena na 1,8 °C. Pro průměrnou teplotu udávanou snímačem T5 byla stanovena odchylka teploty od teploty žádané na -1,8125 °C.

Na základě vypočítaných hodnot uvedených v tabulce č. 48 byla celková průměrná odchylka teploty stanovena na hodnotu -0,5 °C.

### 8.1.10.4 Kolísání teploty

Největší kolísání teploty bylo zaznamenáno teplotním snímačem T5, přičemž kolísání teploty bylo stanoveno z naměřených dat na hodnotu 0,1 °C.

Stanovené hodnoty kolísání pro jednotlivé snímače je možné najít v tabulce č. 48.

### 8.1.10.5 Nejistota měření

Celková rozšířená kombinovaná nejistota měření při teplotní úrovni  $-50\text{ °C}$  byla stanovena na hodnotu  $\pm 3,3\text{ °C}$ , při konfidenční úrovni 95 %. Příspěvky k celkové nejistotě měření od jednotlivých zdrojů, jsou zobrazeny v tabulce č. 49.

Tabulka 49: Hodnoty zdrojů nejistot uvažovaných při confirmaci teplotní úrovně  $-50\text{ °C}$

| t = -50 °C                              |                     |           |           |                                   |                              |
|---|---------------------|-----------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|
|   | Zdroj nejistoty     |           | Rozdělení | $C_i$ [ $\Omega/^\circ\text{C}$ ] | Hodnota [ $^\circ\text{C}$ ] |
| Nejistota přístrojů                     | Přesnost snímače    | $u_{Bt}$  | Rovnoměr. | 2,5588                            | 0,1448                       |
|   | Hystereze           | $u_{BH}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0004                       |
|   | Nelinearita snímače | $u_{BL}$  | Rovnoměr. | 2,5592                            | 0,7553                       |
|   | Přesnost NI 9219    | $u_{BK}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,1041                       |
|   | Stabilita NI 9219   | $u_{Bs}$  | Rovnoměr. | 2,5587                            | 0,0018                       |
| Nejistota komory                        | Gradient teploty    | $u_{BG}$  | Normální  | 2,5656                            | 1,4122                       |
|   | Kolísání teploty    | $u_{BKT}$ | Normální  | 2,5587                            | 0,1018                       |
| Nejistota typu A                        |                     | $u_A$     | Normální  | 2,5587                            | 0,0234                       |
| Celková rozšířená kombinovaná nejistota |                     | $U_c$     | k = 2     |                                   | 3,3                          |

V tabulce č. 49 jsou uvedeny vypočítané hodnoty uvažovaných zdrojů nejistot, které byly zahrnuty do celkové rozšířené kombinované nejistoty měření.

### 8.1.10.6 Zhodnocení výsledků

Při confirmaci teplotní úrovně  $-50\text{ °C}$  byla výsledná hodnota měření stanovena na hodnotu  $-50,5 \pm 3,3\text{ °C}$  při konfidenční úrovni 95 %, viz tabulka č. 50.

Z tohoto výsledku vyplývá, že teplotní komora pro danou teplotní úroveň splňuje požadavky na stabilitu teploty  $-50 \pm 5\text{ °C}$  v ustáleném stavu.

Při požadované stabilitě teploty  $-50 \pm 2\text{ °C}$ , by bylo dosaženo 87% pravděpodobnosti, že pravá hodnota leží v daném intervalu teplot.

Tabulka 50: Zjištěné hodnoty při confirmaci teplotní úrovně  $-50\text{ °C}$

| t = -50 °C                           |                            |  |                                 |                                    |
|--------------------------------------|----------------------------|--|---------------------------------|------------------------------------|
| $\bar{t}_{-50}$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $U_c$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $ \Delta\bar{t} $ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\Delta_G$ [ $^\circ\text{C}$ ] | $\delta_{KT}$ [ $^\circ\text{C}$ ] |
| -50,5                                | $\pm 3,3$                  | 0,5                                    | 3,6                             | 0,1                                |

Tabulka č. 50 zobrazuje výsledné hodnoty měření, které byly stanoveny při confirmaci teplotní úrovně  $-50\text{ °C}$ . Popis této tabulky je obdobný jako pro tabulku č. 23, viz kapitola 8.1.1.6.

## 9. SOUHRNNÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Na základě výsledků uvedených v předchozí kapitole bylo možné sestavit souhrnný přehled stanovených výsledků dosažených během confirmace teplotní komory. Z tohoto přehledu pak bylo možné přehledně stanovit a zobrazit charakteristické vlastnosti teplotní komory a zhodnotit výsledky provedené confirmace. Souhrn stanovených výsledků během confirmace teplotní komory je zobrazen v tabulce č. 51.

Tabulka 51: Souhrn stanovených výsledků pro jednotlivé teplotní úrovně

| Teplotní úroveň [°C]                                  | Průměrná teplota [°C] | Nejistota Měření [°C] | Odchylka Teploty [°C] | Teplotní gradient [°C] | Kolísání teploty [°C] | Tolerance teploty ± 2 °C | Tolerance teploty ± 5 °C |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 25  | 25,2                  | 1,7                   | 0,2                   | 0,3                    | 0,02                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| 50  | 50,1                  | 1,8                   | 0,1                   | 1,0                    | 0,02                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| 75  | 75,1                  | 2,2                   | 0,1                   | 2,3                    | 0,04                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 100   | 99,8                  | 3,4                   | -0,2                  | 3,8                    | 0,10                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 125   | 124,5                 | 4,5                   | -0,5                  | 5,4                    | 0,11                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 150   | 149,2                 | 5,7                   | -0,8                  | 7,2                    | 0,11                  | Nevyhovuje               | Nevyhovuje               |
| 175   | 173,8                 | 6,8                   | -1,2                  | 9,0                    | 0,07                  | Nevyhovuje               | Nevyhovuje               |
| 150   | 149,3                 | 5,5                   | -0,7                  | 7,0                    | 0,06                  | Nevyhovuje               | Nevyhovuje               |
| 125   | 124,5                 | 4,2                   | -0,5                  | 5,3                    | 0,06                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 100   | 99,9                  | 3,1                   | -0,1                  | 3,6                    | 0,05                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 75  | 75,1                  | 2,2                   | 0,1                   | 2,1                    | 0,04                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 50  | 50,1                  | 1,7                   | 0,1                   | 1,0                    | 0,01                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| 25  | 25,1                  | 1,6                   | 0,1                   | 0,4                    | 0,03                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| 0   | -0,1                  | 1,9                   | -0,1                  | 1,5                    | 0,10                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| -25   | -25,4                 | 2,7                   | -0,4                  | 3,0                    | 0,09                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| -50   | -50,5                 | 3,3                   | -0,5                  | 3,6                    | 0,10                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| -25   | -25,4                 | 2,7                   | -0,4                  | 2,9                    | 0,08                  | Nevyhovuje               | Vyhovuje                 |
| 0   | -0,1                  | 1,9                   | -0,1                  | 1,5                    | 0,08                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| 25  | 25,1                  | 1,6                   | 0,1                   | 0,3                    | 0,06                  | Vyhovuje                 | Vyhovuje                 |
| Koeficient rozšíření standardní kombinované nejistoty |                       |                       |                       |                        |                       |                          | k = 2                    |

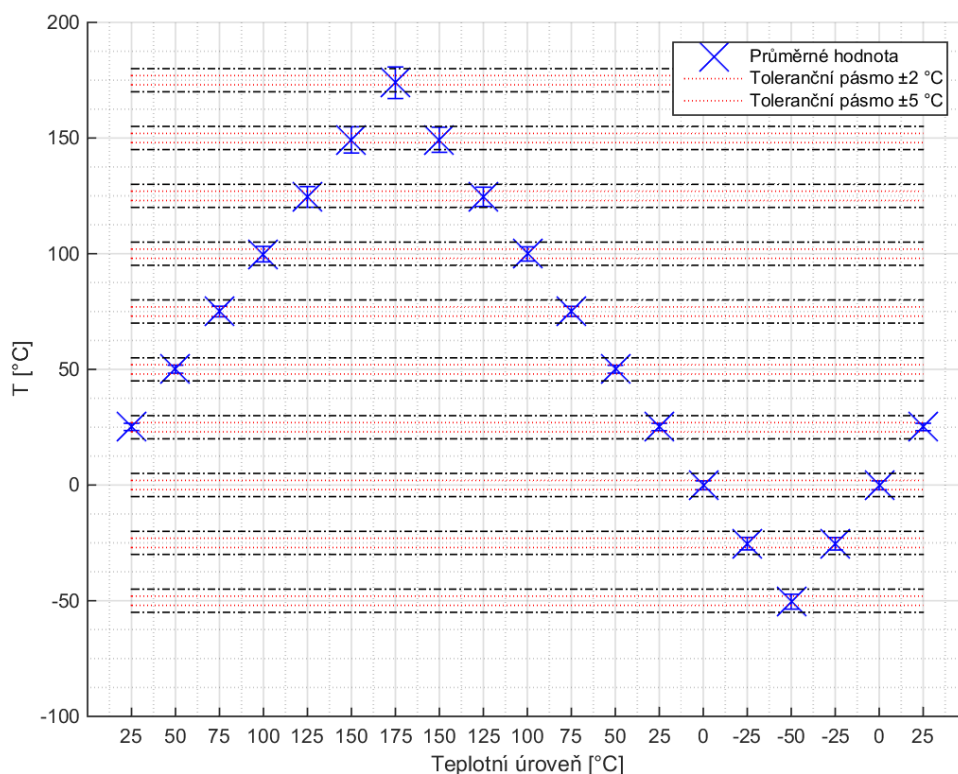
Tabulka č. 51 obsahuje stanovené výsledné průměrné hodnoty pro celý confirmační interval zahrnující teplotní úrovně od -50 °C do 175 °C při zapnutém ohřevu, i při zapnutém chlazení. Teplotní úrovně jsou seřazeny v pořadí, v kterém byly confirmovány. V tabulce jsou zvýrazněny šedou barvou teplotní tolerance, které nesplňují dané meze. Modrá barva v tabulce pak označuje hodnoty průměrné odchylky teploty od žádané hodnoty teplotní úrovně, které nesplňují přesnost teploty udávanou výrobcem ± 0,3 °C, viz [14]. Zelená barva v tabulce pak znázorňuje ty teplotní úrovně, které splňují jak meze odchylky teploty stanovené výrobcem teplotní komory, tak



i přísnější požadavky na stabilitu teploty vycházející z norem pro klimatické zkoušky, viz [20].

## 9.1 Průměrná stanovená teplota a celková nejistota měření

Z výsledků uvedených v tabulce č. 52 byl staven graf průměrné teploty v pracovním prostoru teplotní komory s vyznačenou celkovou rozšířenou kombinovanou nejistotou měření a vyznačenými tolerančními pásmy, viz obrázek č. 14.



Obrázek 14: Zobrazení celkové rozšířené kombinované nejistoty pro jednotlivé konfirmované teplotní úrovně

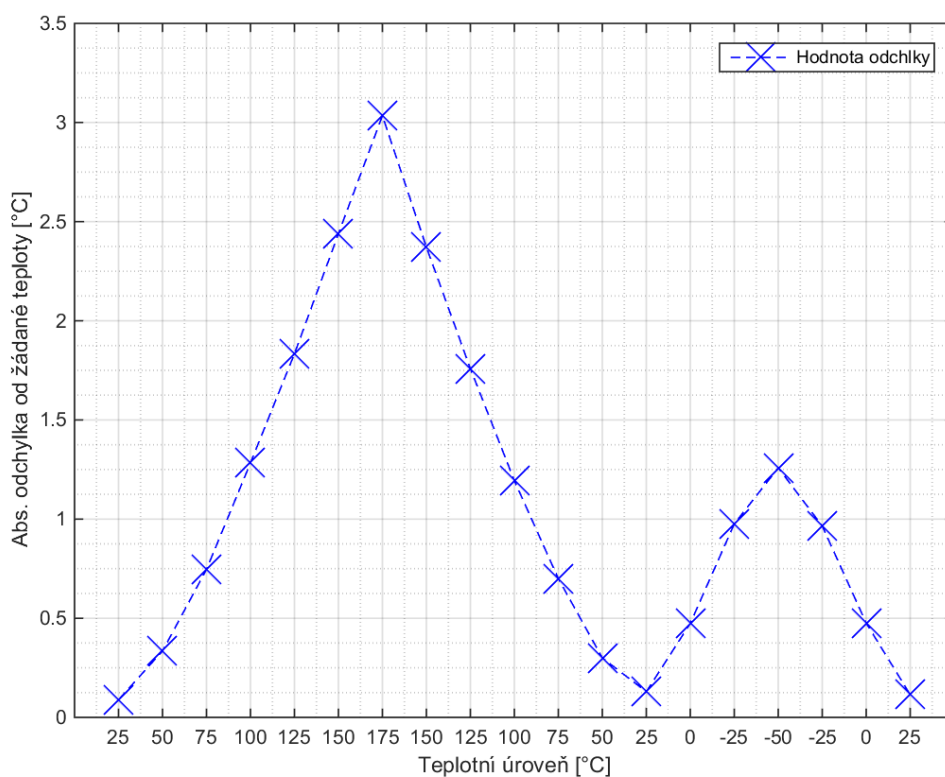
Z obrázku č. 14 je vidět, že spolu s rostoucí nastavenou hodnotou teplotní úrovně roste i celková nejistota měření, a to oběma směry, jak do nastavovaných záporných teplot, tak do kladných. Z grafu je dále možné zjistit míru, do jaké stanovený výsledek spadá, nebo přesahuje konkrétní toleranční pásmo.

Nejmenší celková rozšířená kombinovaná nejistota byla stanovena při nastavené teplotě blízké normálním teplotním podmínkám. Tedy při nastavené teplotní úrovni 25 °C byl výsledek konfirmace stanoven na  $25,2 \pm 1,6$  °C. Naopak nejhoršího výsledku bylo dosaženo při nastavené teplotní úrovni 175 °C. Výsledek při konfirmaci této teplotní úrovně byl stanoven na  $173,9 \pm 6,8$  °C. Jako největší zdroj nejistoty typu B byl ve většině případů určen gradient teploty, viz kapitola 8.1.

## 9.2 Odchylka průměrné teploty od žádané

Na základě stanovených výsledků byl dále sestaven graf zobrazený v obrázku č. 15, ve kterém je zobrazena absolutní hodnota odchylky teploty od žádané hodnoty. Z grafu je patrné, že stejně jako u nejistoty měření roste průměrná hodnota odchylky spolu s požadovanou teplotní úrovní. Průměrná odchylka teploty nabývá pro kladné teploty největší hodnoty při 175 °C a pro záporné teploty při - 50 °C. Z obrázku č. 15, je dále vidět, že rozdíly mezi odchylkou průměrné teploty, kdy požadované teplotní úrovně bylo dosaženo zvyšováním, či snižováním teploty jsou minimální v řádu setin °C.

Rozbor výsledků odchylky teploty pro jednotlivé teplotní úrovně je možné nalézt v kapitole č. 8.1.

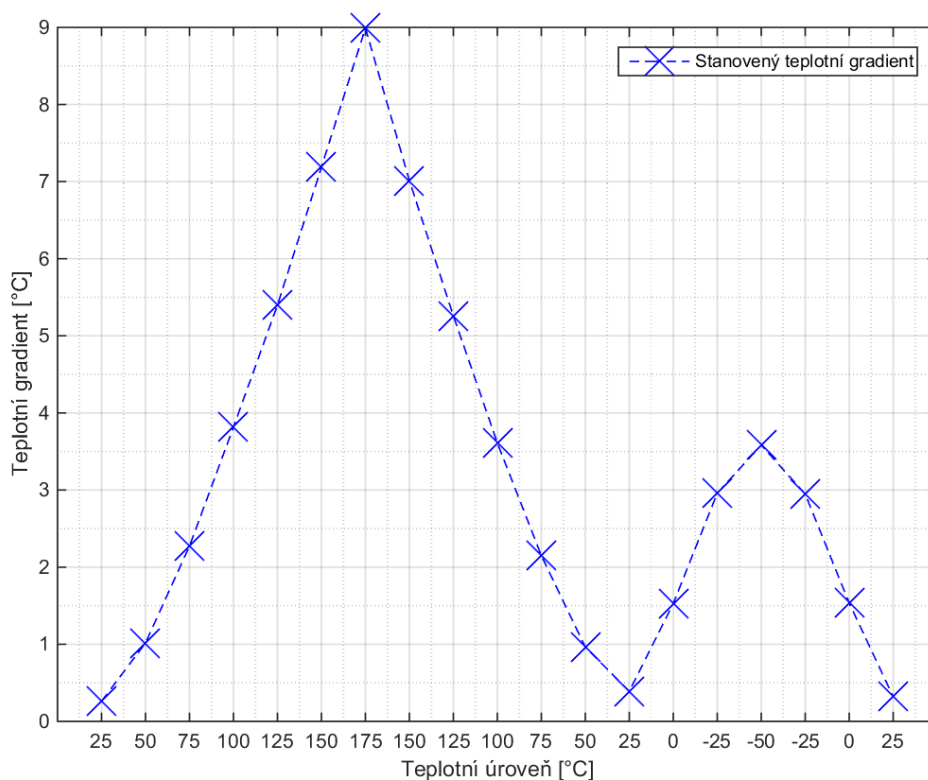


Obrázek 15: Zobrazení absolutní odchylky průměrné teploty od žádané

Obrázek č. 15 zobrazuje výsledky stanovené odchylky průměrné teploty v pracovním prostoru teplotní komory od hodnoty žádané teploty.

### 9.3 Teplotní gradient

Vývoj hodnot teplotního gradientu v závislosti na teplotní úrovni je obdobný jako u odchylky průměrné teploty, viz výše. Opět největší hodnota teplotního gradientu, tedy největšího teplotního rozdílu mezi dvěma měřenými body v prostoru, byla stanovena při teplotní úrovni 175 °C a to na hodnotu 9 °C. Průběh hodnoty teplotního gradientu v závislosti na teplotní konfirmované teplotní úrovni je zobrazen na obrázku č.16.



Obrázek 16: Zobrazení hodnoty teplotního gradientu v závislosti na konfirmované teplotní úrovni.

### 9.4 Kolísání teploty

Nejčastěji bylo dosahováno největšího kolísání teploty na teplotních snímačích T3 a T7 a to především při teplotních úrovních s teplotou větší jak 0 °C, viz tabulka č. 53. Při teplotách menších než 0 °C byla největší hodnota kolísání teploty stanovena vždy u snímače T5. Tabulka č. 52 uvádí konkrétní údaje pro jednotlivé teplotní úrovně.

Mezi průměrnými hodnotami udávanými snímači T3 a T7 byly také nejčastěji stanovené největší teplotní rozdíly, tedy teplotní gradient, viz kapitola č. 8.1.

Tabulka 52: Přehled hodnot kolísání teploty pro jednotlivé teplotní úrovně

|                       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Teplotní úroveň [°C]  | -50  | -25  | 0    | 25   | 50   | 75   | 100  | 125  | 150  | 175  |
| Kolísání teploty [°C] | 0,10 | 0,09 | 0,10 | 0,02 | 0,02 | 0,04 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,07 |
| Označení snímače      | T5   | T5   | T5   | T7   | T7   | T3   | T3   | T2   | T3   | T3   |

Tabulka č. 52 zobrazuje stanovené hodnoty kolísání teploty v závislosti na zvolené teplotní úrovni a přiřazuje k těmto hodnotám označení snímače, u kterého byla tato hodnota stanovena.

## 9.5 Výsledek confirmace teplotní komory

Konfirmaci teplotní komory bylo zjištěno, které z konfirmovaných teplotních úrovní splňují požadavky na stabilitu teploty v ustáleném stavu pro použití teplotní komory k potřebám určitých klimatických zkoušek. Ze stanovených výsledků confirmace, viz tabulka č. 52, bylo stanoveno, že průměrná teplota v pracovním prostoru teplotní komory pro teplotní úrovně 0, 25 a 50 °C splňuje požadavky přísnějšího kritéria na stabilitu teploty v prostoru komory v ustáleném stavu danou tolerancí  $\pm 2$  °C.

Dále bylo zjištěno, že teplotní úrovně -50, -20, 75, 100 a 125 °C splňují pouze méně přísné kritérium kolísání teploty  $\pm 5$  °C v pracovním prostoru teplotní komory v ustáleném stavu.

Konfirmované teplotní úrovně, které nevyhověli ani méně přísnému požadavku na stabilitu  $\pm 5$  °C, byly 150 a 175 °C. U těchto teplotních úrovní již nabývala nejistota daná gradientem teploty příliš velkých hodnot, přičemž tato nejistota typu B byla stanovena ve většině případů jako největší dílčí nejistota měření, viz kapitola č. 8.1. Výše stanovené výsledky platí pro konfidenční úroveň 95 %.

Z výsledků dále vyplývá, že ve většině případů confirmace kladných teplot dosahovala odchylka průměrné teploty od žádané největších hodnot na snímačích T3 a T7. Na snímači T3, který byl umístěn v levém dolním rohu u dveří teplotní komory, byla opakovaně měřena podprůměrná teplota. Naopak na snímači T7, který byl umístěn v levém dolním rohu u zadní stěny teplotní komory, byla měřena teplota nadprůměrná.

Obdobný případ nastává pro teploty nižší než 0 °C. Při těchto teplotách byla opět nejnižší průměrná teplota měřena snímačem T3 a nejvyšší teplota byla dána hodnotou snímače T5, který byl umístěn v levém horním rohu u zadní stěny teplotní komory. Teploty měřené ve výše uvedených bodech v pracovním prostoru pak stanovovaly výsledný teplotní gradient.

## 10. ZÁVĚR

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo navrhnout metodiku pro provedení konfirmace teplotní komory CTS T-65/50, která je součástí zkušební laboratoře CVVOZE a stanovit standardní nejistotu měření. K ověření teplotních podmínek uvnitř pracovního prostoru teplotní komory byly použity odporové teplotní snímače SENSIT Pt100/3850, měřicí karty NI 9219 a měřicí systém cDAQ 9187. K záznamu měřených dat byl použit počítač s měřicí aplikací poskytnutou zkušební laboratoří CVVOZE.

V rámci přípravy na konfirmaci teplotní komory byly nastudovány mimo jiné normy zabývající se problematikou konfirmace teplotní komory a klimatických zkoušek. Pro účely konfirmace teplotní komory CTS T-65/50 byla na základě zjištěných informací vybrána metoda konfirmace bez zátěže. To z důvodu, že výsledky dané touto metodou nejsou vázány na zkušební vzorek používaný při ostatních metodách. V rámci přípravy byla také nastudována problematika nejistot měření při konfirmaci teplotní komory.

Na základě dostupných informací byla navržena metodika a parametry měření teploty uvnitř pracovního prostoru teplotní komory během konfirmace.

Podle navrženého postupu bylo provedeno měření v konfirmované teplotní komoře, při kterém bylo ověřeno 10 teplotních úrovní, pro které bylo provedeno zpracování a vyhodnocení naměřených dat. V rámci zpracování výsledků byla stanovena rozšířená kombinovaná nejistota měření teploty v teplotní komoře.

Z dosažených výsledků vyplývá, že přísnější toleranci teploty  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  v ustáleném stavu splňují pouze konfirmované teplotní úrovně 0, 25 a 50  $^{\circ}\text{C}$ . Mírnější toleranci stability teploty v ustáleném stavu  $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pak splňují teplotní úrovně -50, -20, 75, 100 a 125  $^{\circ}\text{C}$ . Konfirmované teplotní úrovně 150 a 175  $^{\circ}\text{C}$  nesplňují ani jedno z výše uvedených kritérií stability teploty v ustáleném stavu.

Z výsledků dále vyplývá, že nejvýznamnějším zdrojem nejistoty typu B při konfirmaci byl gradient teploty, který se v závislosti na žádané teplotě zvětšoval. Druhým významným zdrojem nejistoty typu B byla nelinearita použitých snímačů. Naopak neočekávaně malou hodnotou přispívala k celkové nejistotě měření nejistota daná kolísáním teploty v pracovním prostoru teplotní komory.

Na základě zjištěných výsledků bych doporučoval na teplotní komoře CTS T-65/50 provést servis a opakovaně provést konfirmaci teplotní komory, případně její kalibraci.

Při opětovné konfirmaci teplotní komory CTS T-65/50 například pro akreditační účely, by bylo vhodné pokusit se omezit vliv nejistoty, která je způsobena nelinearitou použitých teplotních snímačů. Tato nejistota typu B má velký vliv na výsledek celkové standardní nejistoty měření pro teplotní úrovně do 100  $^{\circ}\text{C}$ . Pro další snížení celkové standardní nejistoty měření teploty a na základě požadavku souboru norem 60068-3, by bylo nutné použít kalibrované měřicí přístroje s návazností na etalony. Dále by bylo vhodné pro stanovení přesnějších výsledků provést měření s více konfirmačními cykly a s delší dobou ustálení teploty, v ideálním případě 24 hodin.

# Literatura

- [1] Mac Lochlainn, D., White, M., Wettstein, S. et al. Int J Thermophys (2015) 36: 2199. DOI 10.1007/s10765-015-1889-0
- [2] CRITERIA FOR TEMPERATURE SENSOR SELECTION OF T/C AND RTD SENSOR TYPES: The Basics of Temperature Measurement Using RTDs Part 2 of 3. 1. Wixom: Acromag, Incorporated, 2011. 8500-917-a11e000.
- [3] ČSN EN 60068-3-11: Zkoušení vlivů prostředí - Část 3-11: Doprovodná dokumentace a návod - Výpočet nejistoty podmínek v klimatických zkušebních komorách. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [4] ČSN EN 60068-3-5: Zkoušení vlivů prostředí - Část 3-5: Doprovodná dokumentace a návod - Konfirmace výkonnosti teplotních komor. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
- [5] J. Bojkovski, D. Hudoklin, J. Drnovsek, I. Pusnik, D. Agrez, "Custom made automated system for determination of humidity and temperature gradients in climatic chambers", Instrumentation and Measurement Technology Conference 2003. IMTC '03. Proceedings of the 20th IEEE, vol. 1, pp. 2-5, 2003, ISSN 1091-5281.
- [6] TEGELER, Erich, Martti HEINONEN, Mary WHITE, Miltiadis ANAGNOSTOU a Jan OTYCH. Guidelines on the Calibration of Temperature and/or Humidity Controlled Enclosures: EURAMET Calibration Guide No. 20. Version 5.0. Germany: EURAMET e.V., 2017. ISBN 978-3-942992-44-2.
- [7] Commission SFSTP. - Confirmation métrologique des thermomètres/ Thermometers metrological confirmation. – STP Pharma Prat., 20, 1, 17-58, 2010
- [8] NAKAHAMA, Hirokazu. Espec Technology Report No.26: Understanding the Technology Estimation method for temperature uncertainty of temperature chambers (JTM K 08). Japan: Espec Test Center, 2008. Dostupné také z: <https://www.scribd.com/document/272408438/Estimation-Method-for-Temperature-Uncertainty-of-Temperature-Chambers>
- [9] TŮMOVÁ, Olga. Metrologie a hodnocení procesů. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-249-7. Dostupné také z:

<http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:18840640-58e8-11e4-8b11-005056827e51>

- [10] LABAORATORNÍ VÝBOR EA a Český Institut pro AKREDITACI. EA – 4 /02 M:2013: Vyjádření nejistoty měření při kalibraci. Praha, 2013.
- [11] PALSTAT. Vyjadřování nejistot: Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. In: PALSTAT CAQ [online]. Vrchlabí: PALSTAT s.r.o., 2002, 2002, s. 3-5 [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://micki.hofyland.cz/vut/bmva/nejjistota.pdf>
- [12] FRANĚK, Antonín. Vývoj metrologie a hodnocení měření teplot. Plzeň, 2014. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.
- [13] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [14] CTS-Temperature Test Chambers: Bench Top Version. Germany: CTS. Dostupné také z: [https://www.cts-umweltsimulation.de/images/produkte/ps-baureihe-t/download/CTS\\_Temperature\\_Test\\_Chambers\\_Bench\\_Top\\_Version\\_eng.pdf](https://www.cts-umweltsimulation.de/images/produkte/ps-baureihe-t/download/CTS_Temperature_Test_Chambers_Bench_Top_Version_eng.pdf)
- [15] SPECIFICATIONS NI cDAQ™ -9178: NI CompactDAQ Eight-Slot USB Chassis [online]. CompactDAQ Chassis. Austin: National Instruments Corporation, 2013 [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374046a.pdf>
- [16] NI-9219: C Series Universal Analog Input Module. National Instruments [online]. Austin: National Instruments, 2017 [cit. 2017-12-1]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.ni-9219.html>
- [17] NI 9219 DATASHEET: 4 AI, 100 S/s/ch Simultaneous, Universal Measurements [online]. Austin: National Instruments Corporation, 2016 [cit. 2017-11-22]. Dostupné z: [http://www.ni.com/pdf/manuals/374473a\\_02.pdf](http://www.ni.com/pdf/manuals/374473a_02.pdf)
- [18] TG 3 a TG 3A průměr 3 mm, -50 °C až 250 °C [online]. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 2013 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.sensit.cz/shop/tg-3-a-tg-3apruumer-3-mm-50-c-az-250-c/tg-3-a-tg-3a/0b064175.html>
- [19] OSADNÍK, Lukáš. C HARAKTERISTIKA Čidla teploty Pt 100: Pt100/3850 [online]. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 2013 [cit. 2017-12-11]. Dostupné z: <http://www.sensit.cz/sqlcache/pt100-3850.pdf>

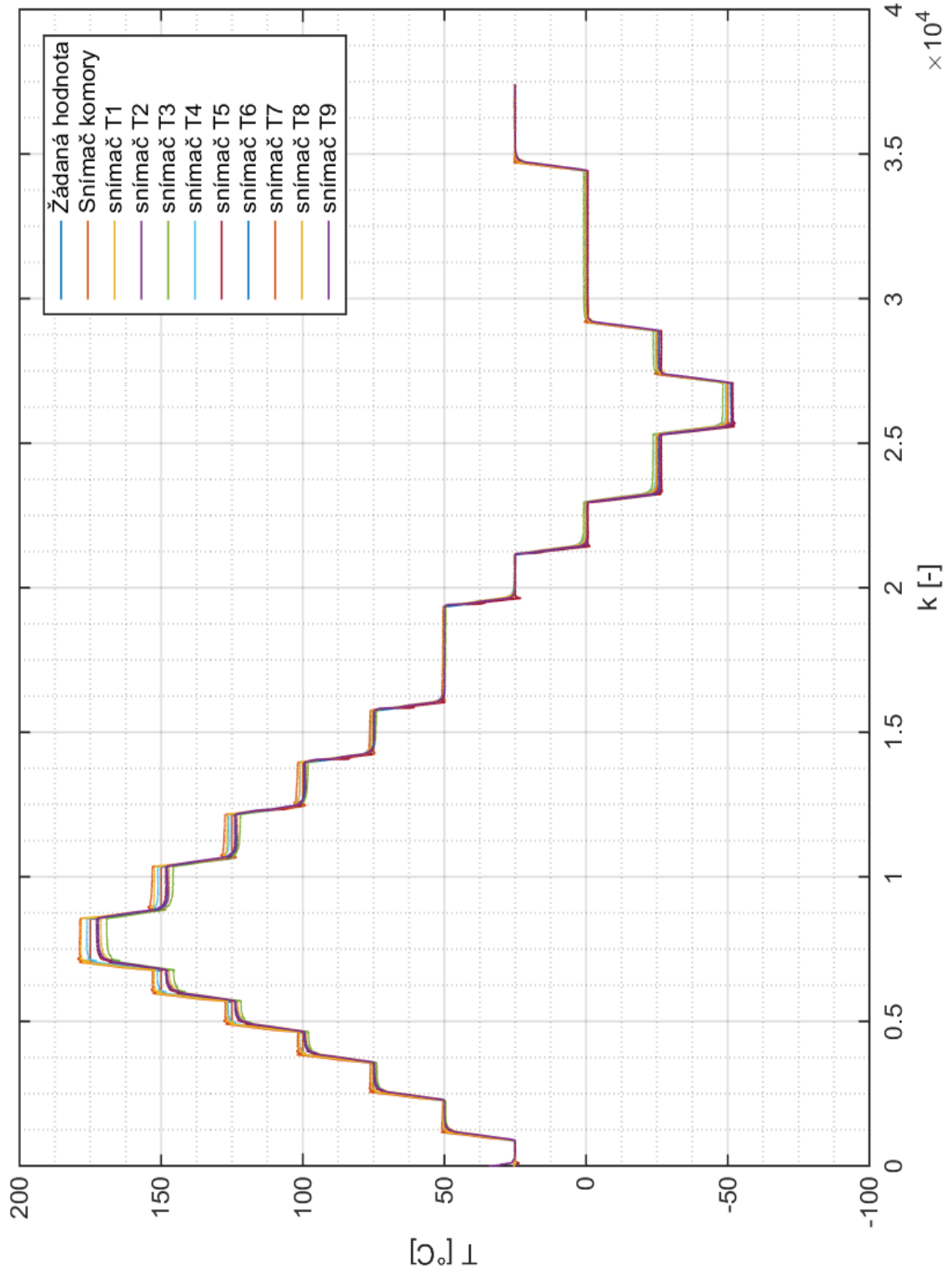
- [20] ČSN EN 60068-2-2: Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [21] ČSN EN 60068-2-1 ed. 2: Zkoušení vlivů prostředí - Část 2-1: Zkoušky - Zkouška A: Chlad. Ed.2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [22] PERNÍKÁŘ, Jiří. HODNOCENÍ ZPŮSOBILOSTI KONTROLNÍCH PROSTŘEDKŮ. Kvalita a Geometrické specifikace produktů [online]. 2005, 2005, 22 [cit. 2017-12-29]. Dostupné z: [http://gps.fme.vutbr.cz/STAH\\_INFO/31\\_Pernikar\\_VUTBR.pdf](http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/31_Pernikar_VUTBR.pdf)
- [23] ČSN EN 60068-3-7: Měření v teplotních komorách pro zkoušky A a B (se zátěží). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002.
- [24] SCHELLER, Gerd. Error analysis of a temperature measurement system: eith worked examples. Fulda: Juchheim, 2003. ISBN 9783935742139
- [25] Evaluation of measurement data — The role of measurement uncertainty in conformity assessment. JCGM 106 : 2012. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.
- [26] Automa: uchopte správně měření teploty [online]. Praha: SCC Public s.r.o., 2009, 2009(6) [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://automa.cz/page-flip/casopis/automa/2009/06/index.html#page/42>



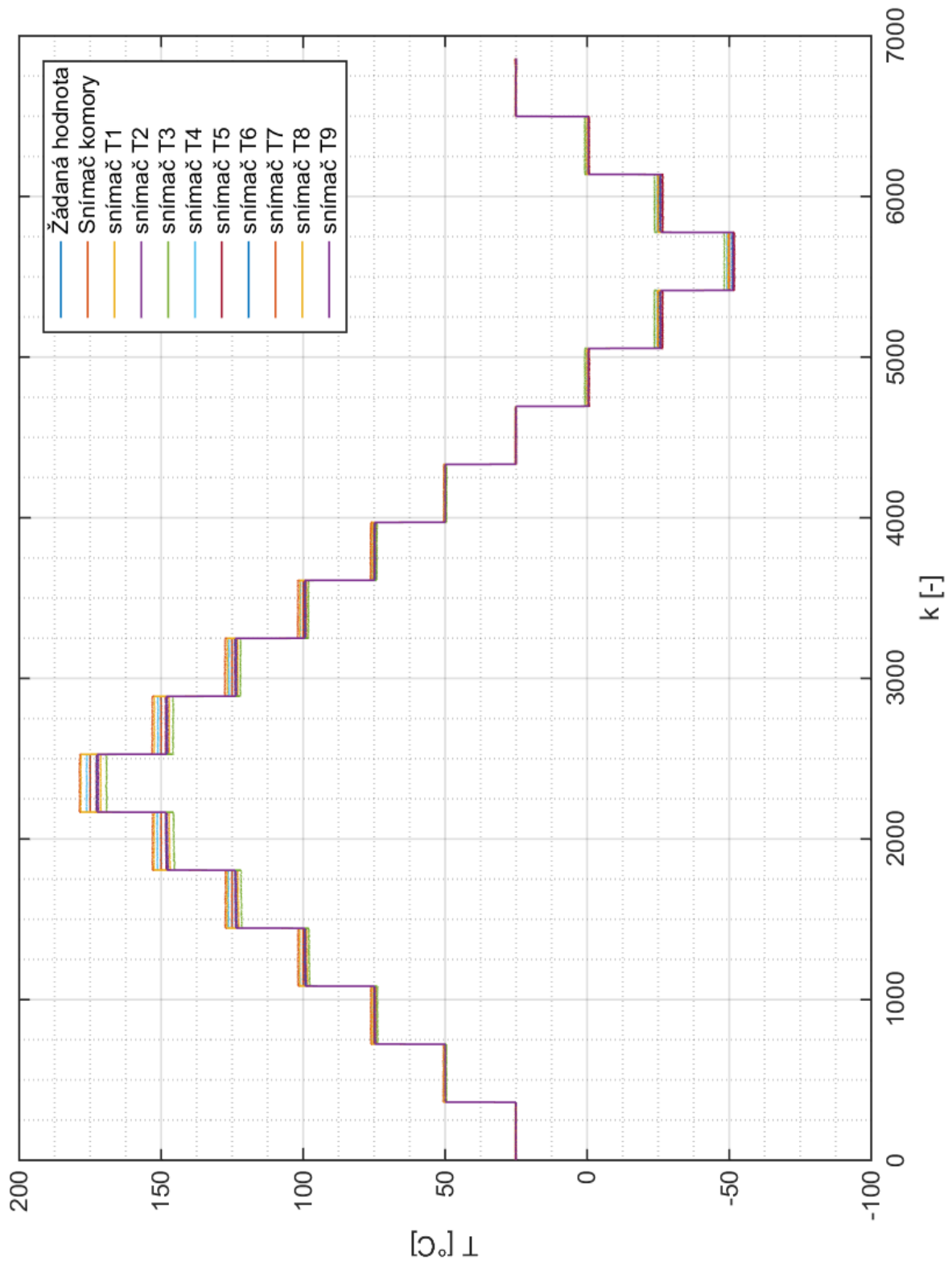
## Seznam příloh

|   |     |
|---|-----|
| Příloha 1 - Graf průběhu měření.....                            | 98  |
| Příloha 2 - Graf vybraných hodnot ke zpracování.....            | 99  |
| Příloha 3 - Souhrnný graf průměrné teploty a její odchylky..... | 100 |
| Příloha 4 - Obsah přiloženého CD.....                           | 101 |

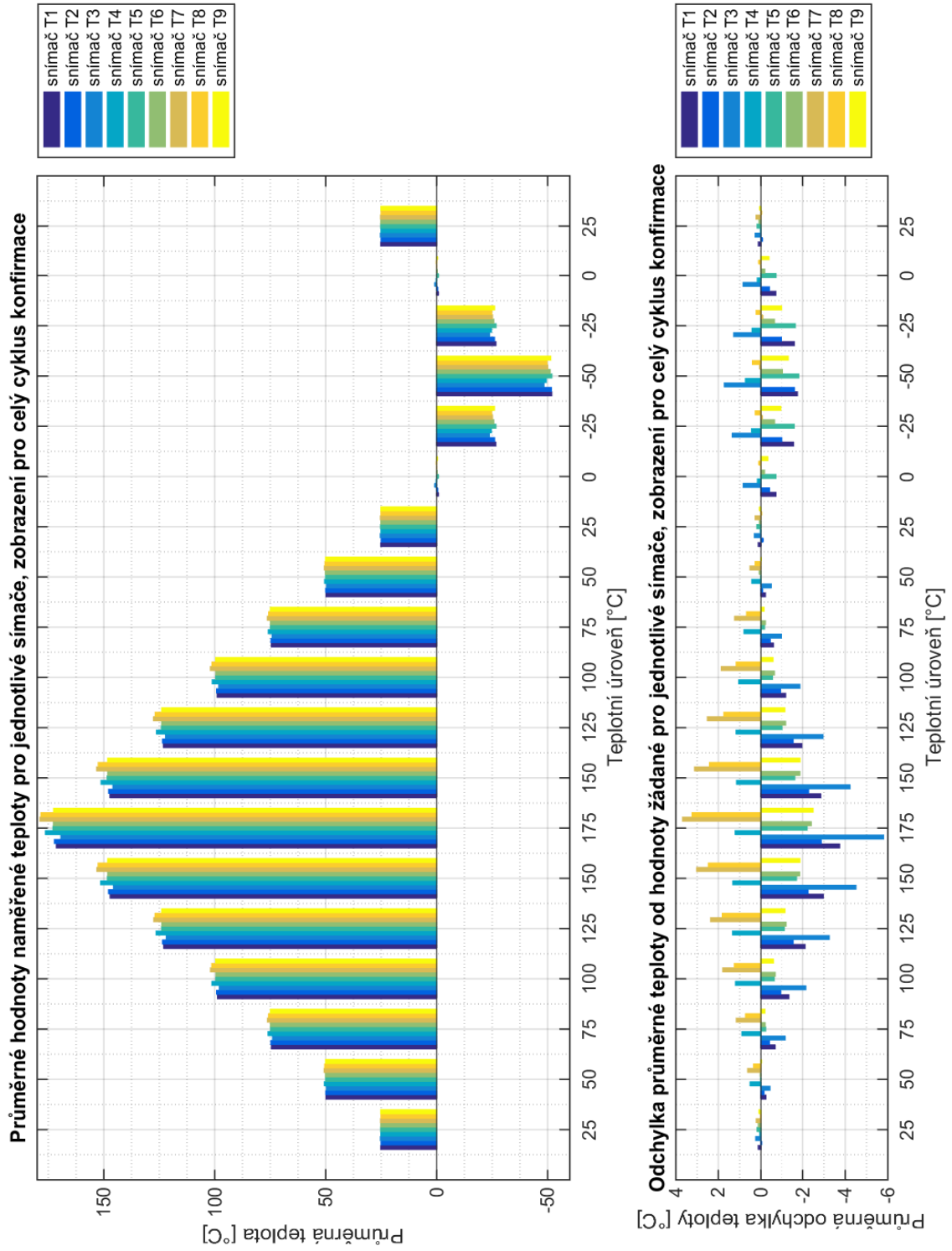
# Příloha 1 - Graf průběhu měření



## Příloha 2 - Graf vybraných hodnot ke zpracování



# Příloha 3 - Souhrnný graf průměrné teploty a její odchylky



## **Příloha 4 - Obsah přiloženého CD**

Elektronická verze práce

Program vytvořený v prostředí MATLAB v.14 pro výpočty nejistot měření  
a tvorbu grafů

Záznam měření

Souhrnné grafy a tabulky

Grafy a tabulky pro potvrzené teplotní úrovně