

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Ondřej Beníšek



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

KONFIRMACE TEPLOTNÍ KOMORY A STANOVENÍ NEJISTOT

CONFIRMATION OF TEMPERATURE CHAMBER AND DETERMINATION OF MEASUREMENT
UNCERTAINTY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Beníšek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2020

Diplomová práce

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

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Ondřej Beníšek

ID: 186488

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Konfirmace teplotní komory a stanovení nejistot

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je definovat a kvantifikovat zdroje nejistot při konfirmaci teplotní komory a vytvoření programu v prostředí LabVIEW pro zpracování a vyhodnocení dat získaných při konfirmaci teplotní komory.

- 1) Proveďte literární rešerši v oblasti konfirmace teplotních komor dle ČSN 60068-3-5.
- 2) Pečlivě diskutujte vlivy a stanovte kvalifikované odhady vlivů, které se budou podílet na stanovení výsledné nejistoty měření. Dokumentujte finální výpočet nejistot měření.
- 3) Navrhněte metodiku sběru dat z použitých snímačů teploty při konfirmaci teplotních komor používaných v ZL CVVOZE.
- 4) Navrhněte program v prostředí LabVIEW pro zpracování získaných dat ze snímačů teploty a jejich vyhodnocení. Součástí vyhodnocení bude výpočet nejistot měření jak metodikou GUM, tak pomocí metody Monte Carlo.
- 5) Realizujte program navržený dle bodu č. 4 a proveďte odzkoušení programu.
- 6) Realizujte experimentální měření a zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] 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.
- [2] 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.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

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

Konzultant: Ing. Miroslav Uher

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 confirmací teplotních komor, přičemž největší důraz je kladen na stanovení standardní nejistoty měření, a to klasickou metodou (GUM) i metodou Monte Carlo. Součástí je návrh měřicího systému s přenosem dat do počítače pomocí komunikačního rozhraní USB a rozbor zdrojů nejistot do tohoto systému vstupujících, jež jsou následně i prakticky kvantifikovány. Pro získání dat byl realizován měřicí experiment ve zkušební laboratoři CVVOZE. K virtuální instrumentaci byl použit program LabView, ve kterém byla navrhnutá a vytvořena měřicí aplikace, jež se stará o sběr a zpracování naměřených dat. Výsledkem aplikace je mimo záznamu teplot ze všech měřených míst v komoře i standardní nejistota vypočtená metodou GUM i Monte Carlo, včetně vykreslení histogramu z výsledků dosažených oběma metodami s cílem jejich porovnání. Nakonec jsou dosažené výsledky srovnány a zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nejistota, měření, teplota, snímač, confirmace, program

ABSTRACT

The master's thesis deals with the confirmation of temperature chambers, with the greatest emphasis on the determination of standard measurement uncertainty, both by the classical method (GUM) and the Monte Carlo method. It includes the design of a measuring system with data transfer to a computer using the USB communication interface and an analysis of the sources of uncertainty entering the system, which are then practically quantified. To obtain the data, a measuring experiment was carried out in the CVVOZE testing laboratory. The LabView program was used for virtual instrumentation, in which a measuring application was designed and created, which takes care of the collection and processing of measured data. The result of the application is, in addition to recording temperatures from all measured points in the chamber, also the standard uncertainty calculated by the GUM and Monte Carlo methods, including plotting a histogram from the results obtained by both methods in order to compare them. Finally, the achieved results are compared and evaluated.

KEYWORDS

Uncertainty, measurement, temperature, sensor, confirmation, program

BENÍŠEK, Ondřej. *Confirmace teplotní komory a stanovení nejistot*. Brno, Rok, 140 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Konfirmace teplotní komory a stanovení nejistot“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 1. 6. 2020

.....
podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Soně Šedivé, Ph.D. a odbornému konzultantu panu Ing. Miroslavu Uhrovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno 1. 6. 2020

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	12
1 Nejistoty měření	13
1.1 Zdroje nejistot	13
1.2 Nejistoty přímých měření	14
1.2.1 Standardní nejistota typu A	15
1.2.2 Standardní nejistota typu B	15
1.2.3 Standardní kombinovaná nejistota	18
1.2.4 Rozšířená (celková) nejistota	18
1.3 Nejistoty nepřímých měření	18
1.3.1 Zákon šíření nejistot	19
1.3.2 Kovariance	20
1.4 Zásady zápisu výsledků měření	22
1.4.1 Zápis výsledku pomocí kombinované nejistoty	22
1.4.2 Zápis výsledku pomocí rozšířené nejistoty	22
1.4.3 Zápis výsledku pomocí bilanční tabulky	23
2 Metoda Monte Carlo	24
2.1 Výpočet nejistot	24
2.1.1 Algoritmus výpočtu nejistot	24
2.1.2 Software pro metodu Monte Carlo	25
2.1.3 Generátory (pseudo)náhodných čísel	26
3 Konfirmace teplotních komor	27
3.1 Metody konfirmace	28
3.1.1 Prázdna komora (bez zátěže)	28
3.1.2 Typická zátěž	29
3.1.3 Konfirmace během zkoušky	30
4 Návrh měřicího systému	31
4.1 Požadavky na měření	31
4.1.1 Rozmístění snímačů	32
4.1.2 Postup měření	34
4.1.3 Požadovaná měření	35
4.1.4 Informace v protokolu	35
4.2 Navržený hardware	35
4.2.1 Platinové odporové snímače teploty	36
4.2.2 Zkušební komory	38

4.2.3	Měřicí (systém) karty	40
4.3	Blokové schéma měřicího řetězce	43
5	Nejistoty vstupující do měřicího systému	44
5.1	Nejistoty související se snímači teploty	44
5.2	Nejistoty související se získáváním hodnot	51
5.3	Nejistoty související s teplotní komorou	53
5.4	Nejistoty související s celým měřicím řetězcem	56
6	Softwarová aplikace	58
6.1	Návrh aplikace	58
6.2	Popis řešení aplikace	60
6.2.1	Čekání na start	60
6.2.2	Inicializace	62
6.2.3	Měření	62
6.2.4	Předzpracování	64
6.2.5	„Case“ <i>True</i>	65
6.2.6	„Case“ <i>False</i>	68
6.2.7	GUM	69
6.2.8	Monte Carlo	69
6.2.9	Grafy	70
6.2.10	Zápis do souboru	70
6.2.11	Ukončení	70
6.3	„SubVI“ a pomocný program	71
7	Realizace měřicího experimentu	72
7.1	Popis měřicího experimentu	72
7.1.1	Postup měření	73
7.1.2	Podmínky měření	77
7.1.3	Použité přístroje	78
8	Postup měření a výpočtu nejistot vstupujících do měřicího systému	79
8.1	Nejistoty související se snímači teploty	82
8.2	Nejistoty související se získáváním hodnot	90
8.3	Nejistoty související s teplotní komorou	93
8.4	Nejistoty související s celým měřicím řetězcem	96
8.5	Schéma nejistot vstupujících do měřicího systému	98
9	Výsledná nejistota měření	99
9.1	Metoda GUM	99

9.1.1	Postup výpočtu celkové nejistoty	99
9.1.2	Bilanční tabulka	102
9.2	Metoda Monte Carlo	105
9.3	Porovnání nejistot měření	107
10	Vyhodnocení konfirmace	109
10.1	Rychlost změny teploty	111
10.2	Výsledné údaje	111
10.3	Závěrečné vyhodnocení	113
	Závěr	116
	Literatura	117
A	Bilanční tabulky	121
B	Ovládací panel v prostředí LabView	131
B.1	Manuál k použití	134
B.1.1	Měření	134
B.1.2	Zdroje nejistot	135
B.1.3	Celková nejistota měření	136
C	Zdrojový kód pro výpočet nejistoty metodou Monte Carlo v programu Matlab	137
D	Obsah přiloženého CD	140

Seznam obrázků

1.1	Grafické znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a ne- jistotou měření	14
1.2	Rozdělení pravděpodobnosti a příslušné koeficienty rozložení	16
2.1	Algoritmus výpočtu nejistoty pomocí metody Monte Carlo	25
3.1	Pracovní prostor v teplotní komoře	28
3.2	Přístupy k metodě konfirmace a k výpočtu nejistoty	29
4.1	Umístění snímačů v komorách do 2000 l	32
4.2	Umístění dodatečných snímačů v komorách nad 2000 l	33
4.3	Tolerance dosažené teploty	33
4.4	Příklad rychlosti změny teploty v komoře	34
4.5	Platinový odporový snímač a) drátkový b) tenkovrstvý	37
4.6	a) Závislost odporu Pt snímače na teplotě v rozsahu 0÷100 °C, b) Tolerance platinových snímačů teploty	38
4.7	Technické parametry snímače	39
4.8	a) Měřicí karta NI 9219, b) Šasi cDAQ-9178	41
4.9	Měřené veličiny a jejich odpovídající piny	41
4.10	Schéma čtyřvodičového zapojení RTD snímače	42
4.11	Schéma zapojení měření proudu	43
4.12	Schéma zapojení měření napětí	43
4.13	Blokové schéma měřicího řetězce	43
5.1	Závislost indikované teploty na ponoru senzoru	48
5.2	Schéma zapojení pro kvantifikaci termonapětí	53
5.3	Znázornění kolísání snímače teploty	54
5.4	Porovnání rozdílů teplot	55
5.5	Stabilizace teploty komor do 2 000 l	56
6.1	Vygenerovaná tabulka s daty ukládanými do .csv souboru	71
7.1	Měřicí konstrukce umístěná v komoře	72
7.2	Zapojení snímačů při klasickém měření v měřicích kartách (šasi) . . .	74
7.3	Schéma zapojení s regulovatelným zdrojem napětí	76
7.4	Pracoviště - Reálné zapojení experimentu	78
8.1	Přechodová charakteristika komory (okolí->50°C)	80
8.2	Závislost snímačů na „ponoru“ při teplotě 50°C	83
8.3	Přechodová charakteristika snímače (okolí->50°C)	88
8.4	Časová stabilita a prostorová homogenita komory při teplotě 50° C .	94
8.5	Schéma nejistot vstupujících do měřicího systému	98
9.1	Histogram KDF „přímého“ měření při 50 °C - Matlab	107
9.2	Histogram KDF „přímého“ měření při 50 °C - LabView	107

10.1	Celková confirmace teplotní komory	110
10.2	Prostorová homogenita horní části komory při 50 °C	114
10.3	Prostorová homogenita dolní části komory při 50 °C	114
B.1	Ovládací panel v prostředí Labview - záložka „Měření“	131
B.2	Ovládací panel v prostředí Labview - záložka „Zdroje nejistot“	132
B.3	Ovládací panel v prostředí Labview - záložka „Celková nejistota měření“	133

Seznam tabulek

1.1	Bezpečnostní faktor k_s v závislosti na počtu měření	15
1.2	Koeficient rozšíření k_r v závislosti na pravděpodobnosti	18
1.3	Možný způsob zápisu bilanční tabulky	23
3.1	Praktické rozměry pracovního prostoru	27
4.1	Základní údaje teplotní komory CTS T-65/50	39
4.2	Základní údaje klimatické komory CTS T-60/50	39
4.3	Základní údaje klimatické komory VCV 7060-15	40
4.4	Vybrané parametry měřicí karty NI 9219	42
4.5	Drift měřicí karty	42
5.1	Typické hodnoty ztrátové konstanty h a chyby měření	49
7.1	Umístění a popis snímačů	73
7.2	Výrobní čísla snímačů	78
8.1	Překmity přechodové charakteristiky komory	81
8.2	Hodnoty „ponoru“ při teplotě 50 °C	82
8.3	Tabulka napájecích a naměřených hodnot napětí	85
8.4	Hodnoty samoohřevu při teplotě 50 °C	85
8.5	Porovnání měřicích přístrojů	90
8.6	Hodnoty termoelektrického napětí	93
8.7	Hodnoty nejistot vlivem kolísání teploty	95
8.8	Hodnoty nejistot vlivem gradientu teploty	95
8.9	Hodnoty hystereze při teplotě 50 °C	97
8.10	Hodnoty opakovatelnosti měření s největší nejistotou	97
9.1	Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 50 °C - 1.způsob . . .	103
9.2	Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 50 °C - 2.způsob . . .	104
9.3	Porovnání všech vypočtených nejistot	108
10.1	Výsledné údaje confirmace komory	111
10.2	Souhrn dosažených výsledků a vyhodnocení confirmace	115
A.1	Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 50 °C - 1.způsob . . .	121
A.2	Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 50 °C - 2.způsob . . .	122
A.3	Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 140 °C - 1.způsob . .	123
A.4	Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 140 °C - 1.způsob . . .	124
A.5	Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 140 °C - 2.způsob . .	125
A.6	Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 140 °C - 2.způsob . . .	126
A.7	Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu -40 °C - 1.způsob . . .	127
A.8	Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu -40 °C - 1.způsob . . .	128
A.9	Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu -40 °C - 2.způsob . . .	129
A.10	Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu -40 °C - 2.způsob . . .	130

Úvod

Nedílnou součástí měření je přesnost měření. Tuto vlastnost donedávna vyjadřovaly pouze chyby měření, které udávají pouze rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou, tzv. odchylku měření. Tento termín od 90. let 20. století začaly nahrazovat nejistoty měření, které jsou komplexnější, avšak daleko složitější. I z tohoto důvodu se do běžné každodenní praxe průmyslových měření prosazují pozvolna, ale v oblasti kalibrace je tento pojem téměř neodlučitelnou součástí.

Nejistoty měření byly zavedeny při zasedání Mezinárodního výboru pro míry a váhy (CIPM – Comité International des Poids et Mesures), které se konaly v letech 1981 a 1985. Následně byla v roce 1993 v Ženevě vydána Mezinárodními metrologickými organizacemi směrnice pro určování a výpočet nejistot měření GUM (Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements) [1]. Směrnice se považuje za vrcholový a velmi důležitý dokument v této oblasti.

Dodatek ke směrnici také obsahuje jiný postup výpočtu nejistot měření, tzv. metodu Monte Carlo [2]. Ta byla definována ve 40. letech 20. století v Los Alamos při vývoji atomové bomby, konkrétně při výzkumu chování neutronů při přechodu různými materiály. Vývoj prováděli John Neumann, Stanislaw Ulam a Nicholas Metropolis, jež se inspirovali technikou rulety, od které je název odvozen.

Teplota je jednou z nejdůležitějších fyzikálních veličin a zároveň jednou ze sedmi základních jednotek soustavy SI. Ovlivňuje prakticky všechny děje v běžném životě i při průmyslovém měření, ať už pozitivně či negativně. Její určení má často zásadní význam v průmyslu, lékařství nebo i bezpečnosti. Měření teploty jsou měřeními nepřímými. Teplota se tedy neměří přímo měřicím přístrojem se stejnou vlastností, ale měří se důsledek veličiny. Diplomová práce se zabývá měřením platinovými snímači teploty, proto je důsledkem změna elektrického odporu.

Cílem práce je definovat a kvantifikovat zdroje nejistot při confirmaci teplotní komory a vytvořit program v prostředí LabVIEW pro sběr a zpracování dat.

První (teoretická) část práce bude věnována teoretickému rozboru nejistot měření, kde jsou rozebrány metody GUM a Monte Carlo pro výpočet nejistot. Jsou zde také obecně popsány teplotní komory a jejich confirmace.

Druhá část se věnuje návrhu měřicího systému. V kapitole jsou uvedeny požadavky na měření, použitý hardware a blokové schéma měřicího řetězce. V neposlední řadě jsou zde detailně (obecně) rozepsány nejistoty vstupující do měřicího systému.

V praktické části je demonstrována vytvořená měřicí aplikace pro sběr a zpracování dat při confirmaci komory, popsána realizace měřicího experimentu a detailně uveden postup měření a výpočtu nejistot vstupujících do systému.

Na konci jsou rozebrány a zhodnoceny dosažené výsledky experimentu.

1 Nejistoty měření

Kapitola je převzata z [3].

Nejistota měření je pojem související s výsledkem měření a udává interval, neboli rozsah hodnot, který je možné přiřadit k měřené veličině. Proto můžeme tvrdit, že nejistota měření říká, že v daném intervalu, přiřazeném k výsledné hodnotě, se skutečná hodnota nachází s určitou pravděpodobností, která je dána pravděpodobnostním rozdělením. Mírou nejistoty je směrodatná odchylka udávané hodnoty (odhadu skutečné hodnoty). Při určování nejistot je třeba důkladně promyslet, které vlivy (zdroje nejistot) na měření působí a umět je kvantifikovat.

Tato kapitola se věnuje vyjadřováním nejistot podle metodiky GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) [1]. Dalším hlavním zdrojem jsou články z časopisu Automa [4].

Nejistota měření je složena z dílčích nejistot (složek):

- standardní nejistota získaná metodou typu (A) nebo-li nejistota typu A - u_A
– statistické zpracování naměřených dat
- standardní nejistota získaná metodou typu (B) nebo-li nejistota typu B - u_B
– jiné než statistické zpracování naměřených dat
- kombinovaná nejistota - u_C
– součet čtverců nejistoty typu A a B
- rozšířená nejistota - U
– kombinovaná nejistota vynásobená koeficientem rozšíření udávajícím pravděpodobnost pokrytí

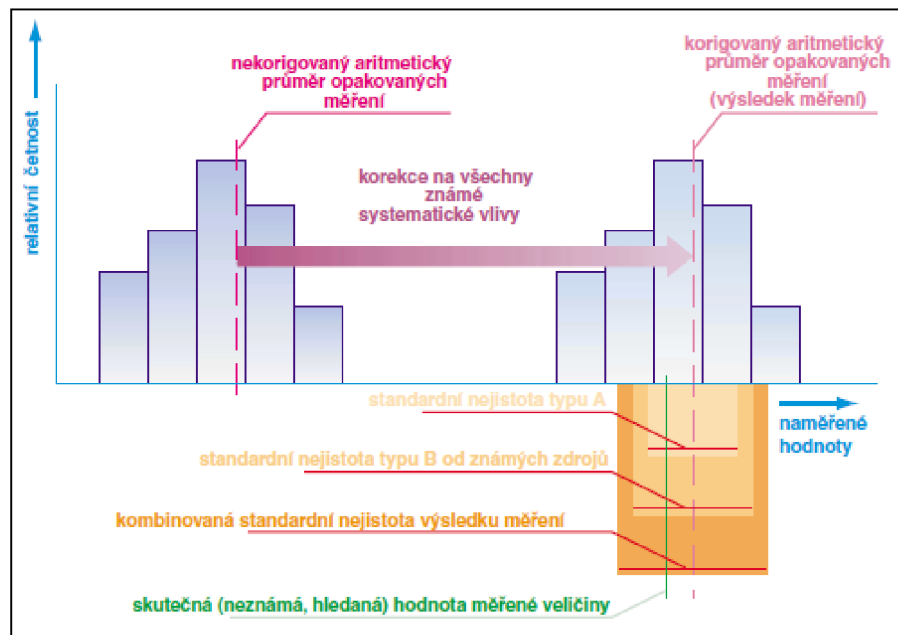
Vyhodnocování nejistot ovlivňuje typ měření:

- přímé měření
- nepřímé měření

Přiblížení principu nejistot měření v grafickém provedení je zobrazeno na Obr. 1.1.

1.1 Zdroje nejistot

Zdroje nejistot jsou všechny vlivy, které přispívají k nejistotě měření a způsobují nejednoznačné stanovení výsledku. Tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Každý zdroj nejistoty má jinou váhu. Velkou roli hraje také typ měření (přímý, nepřímý). Některé zdroje se projevují více v nejistotách typu A, některé zase v nejistotách typu B a některé u obou z nich. Pár příkladů zdrojů je uvedeno níže.



Obr. 1.1: Grafické znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření [4]

Možné zdroje nejistot: [4] [5]

- nedokonalá definice měřené veličiny nebo její realizace
- nevhodný výběr měřicího přístroje (rozlišovací schopnost)
- nevhodný výběr vzorků měření
- nevhodný postup měření
- zjednodušení (zaokrouhlení) konstant a převzatých hodnot
- linearizace, aproximace, interpolace, extrapolace
- neznámé nebo nekompensované vlivy prostředí
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních
- subjektivní vlivy obsluhy
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů
- výrobní nebo normované tolerance měřicích přístrojů
- časová stabilita měřicího přístroje
- konstrukční provedení a uložení měřicího přístroje
- současný stav měřicího přístroje (opotřebení, stárnutí)

1.2 Nejistoty přímých měření

U přímého měření fyzikální veličiny je stanovení nejistoty měření snadnější, neboť se měří přímo požadovaná veličina. Není zde třeba uvažovat další korelační nebo kovarianční vazby mezi jednotlivými měřeními nebo veličinami.

1.2.1 Standardní nejistota typu A

Složky nejistoty $u_A(x)$ pokrývají jak náhodné chyby, tak i systematické chyby. Její příčinou jsou náhodné vlivy a způsobuje kolísání měřené hodnoty. Zakládá se na statistické analýze série opakovaných měření (stejně jako u náhodných chyb měření), kterých by mělo být nejméně deset. Měření musejí být na sobě nezávislá a tvořena za stejných podmínek. Pokud tyto podmínky nejsou dodrženy, nemá cenu nejistotu typu A vyhodnocovat. Za předpokladu dodržení podmínek je výsledek měření (odhad měřené veličiny) výběrovým aritmetickým průměrem podle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.1)$$

Standardní nejistota typu A značená $u_A(x)$ potom odpovídá výběrové směrodatné odchylce výběrového aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$ podle vztahu:

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.2)$$

kde: s_x - směrodatná odchylka výběrového souboru s

Pokud je naměřených hodnot (n) méně než deset, musí se aplikovat tzv. bezpečnostní faktor k_s , uvedený v Tab. 1.1, jehož velikost závisí na počtu měření.

$$u_A(x) = k_s \cdot s_x \quad (1.3)$$

Tab. 1.1: Bezpečnostní faktor k_s v závislosti na počtu měření [6]

n[-]	≥ 10	9	8	7	6	5	4	3	2
k_s [-]	1	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

1.2.2 Standardní nejistota typu B

Na rozdíl od zdrojů nejistot typu A, zdroje nejistot typu B jsou známé nebo odhadnutelné. Těmito zdroji mohou být např. nedokonalosti měřicích přístrojů, zvolené měřicí postupy nebo podmínky okolí. Odhadují se pomocí úsudku na základě všech dostupných informací.

Nejčastěji jsou to: [4]

- údaje výrobce měřicí techniky
- zkušenosti z předchozích sérií měření

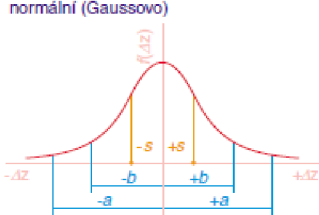
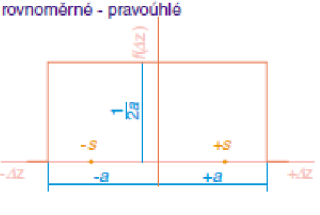
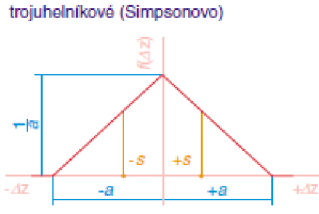
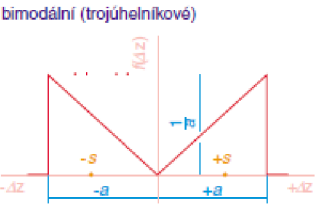

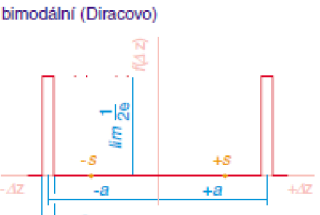
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky a poznatky o nich
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů
- nejistoty referenčních údajů v příručkách

Základem pro určení nejistoty typu B $u_B(x)$ je zjištění dílčích nejistot u_{Bz_j} od zdrojů z_j . Odhadne se maximální rozsah odchylek $\pm z_{jmax}$ od hodnoty j-tého zdroje nejistoty, tak aby byla jen malá pravděpodobnost překročení tohoto rozsahu. Odhad se provede pomocí výše uvedených dostupných informací a výběr rozdělení pravděpodobnosti se provede tak, aby co nejlépe pokrylo výskyt hodnot z_j v intervalu $\pm z_{jmax}$. Výsledná hodnota u_{Bz_j} se poté určí dle vztahu:

$$u_{Bz_j} = \frac{z_{jmax}}{\chi} \quad (1.4)$$

kde: χ - koeficient rozložení záležející na rozložení daného zdroje nejistoty

Grafické zobrazení možných rozdělení pravděpodobnosti a jejich koeficienty rozložení jsou znázorněny na Obr. 1.2.

Rozdělení	z_{max}	k	Rozdělení	z_{max}	k
normální (Gaussovo) 	a	3	rovnoměrné - pravoúhlé 	a	$\frac{\sqrt{3}}{1,73}$
trojúhelníkové (Simpsonovo) 	a	$\frac{\sqrt{6}}{2,45}$	bimodální (trojúhelníkové) 	a	$\frac{\sqrt{2}}{1,41}$
lichoběžníkové 	a	$\frac{2,32}{\text{př } b=\frac{a}{3}}$	bimodální (Diracovo) 	a	1
	a	$\frac{2,19}{\text{př } b=\frac{a}{2}}$			
	a	$\frac{2,04}{\text{př } b=\frac{2a}{3}}$			

Obr. 1.2: Rozdělení pravděpodobnosti a příslušné koeficienty rozložení [4]

Normální (Gaussovo) rozdělení

Základní rozdělení, k němuž se vztahují všechna ostatní rozdělení. Používá se za předpokladu, že je velká pravděpodobnost výskytu malých odchylek od hodnoty zdroje nejistoty, zatímco s rostoucí velikostí odchylek pravděpodobnost jejich výskytu klesá. Využití je u zdrojů, které se mohou pohybovat v širokém rozsahu hodnot, protože rozdělení není, na rozdíl od všech ostatních, ohraničeno. Velmi používané je např. u etalonů.

Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení

Vyjadřuje stejnou pravděpodobnost výskytu malých i velkých odchylek v celém daném intervalu $\pm z_{jmax}$ od hodnoty zdroje nejistoty. Toto rozdělení je nejpoužívanější, protože většinou nejsou k dispozici dostatečné informace o rozdělení pravděpodobnosti výskytu odchylek.

Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení

Velmi podobné normálnímu rozdělení, s tím rozdílem, že je ohraničeno. Velká pravděpodobnost výskytu malých odchylek a velmi malá pravděpodobnost velkých odchylek (u mezích) od hodnoty zdroje nejistoty. Průběh mezi těmito body je lineární. Používá se např. u mikrometrů.

Bimodální (trojúhelníkové) rozdělení

Používá se u měřicích přístrojů, které jsou rozděleny do tříd přesnosti. Znamená to, že u střední třídy se nemůže vyskytnout měřicí přístroj s malou ani s velkou odchylkou. Měřicí přístroj s malou odchylkou by byl zařazen do předchozí, přesnější třídy. Naopak měřicí přístroj s velkou odchylkou by byl zařazen do následující, méně přesné třídy.

Existují i další, ale jen výjimečně používaná rozdělení např. lichoběžníkové a bimodální (Diracovo), které jsou zobrazeny na Obr. 1.2, nebo také kvadratické, kosinové a U-rozdělení.

Výsledná nejistota typu B se potom určí podle vztahu:

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}^2} \quad (1.5)$$

kde: A_j - koeficient citlivosti (citlivostní koeficient)
 p - počet zdrojů

Koeficient citlivosti se určí podle vztahu:

$$A_j = \frac{\delta x}{\delta z_j} = \frac{\delta f(z_1, z_2, \dots, z_p)}{\delta z_j} \quad (1.6)$$

1.2.3 Standardní kombinovaná nejistota

V praxi nestačí jen stanovení standardních nejistot typu A a B, protože jen velmi zřídka postačí jeden nebo druhý typ nejistoty samostatně. Proto se uvádí i kombinovaná nejistota $u_C(x)$, která slučuje právě tyto dva typy nejistot. Vyjádří se tedy jako součet čtverců nejistoty typu A a nejistoty typu B podle vztahu:

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (1.7)$$

Pokud je jeden typ nejistoty výrazně menší (např. o jeden řád), můžeme ho zanedbat, což je dáno geometrickým součtem obsaženým ve vzorci.

1.2.4 Rozšířená (celková) nejistota

Tato nejistota se značí $U(x)$ a používá se v případě, že nestačí standardní nejistoty. Standardní kombinovaná nejistota totiž určuje pravděpodobnost jen cca 68 % výskytu skutečné hodnoty dané veličiny v intervalu definovaném touto nejistotou. Rozšířená nejistota se vyjádří vynásobením standardní nejistoty $u(x)$ koeficientem rozšíření k_r , uvedeným v Tab. 1.2, pomocí kterého se dosahuje většího intervalu pokrytí. V praxi to znamená, že se zvýší pravděpodobnost existence skutečné hodnoty v tomto rozšířeném intervalu. Většinou se používá $k_r = 2$ pro 95 % této pravděpodobnosti. Vztah pro výpočet:

$$U(x) = k_r \cdot u(x) \quad (1.8)$$

Tab. 1.2: Koeficient rozšíření k_r v závislosti na pravděpodobnosti [7]

k_r [-]	1	2	2,58	3
P [%]	68	95	99	99,7

1.3 Nejistoty nepřímých měření

Nepřímé měření je náročnější případ určování nejistoty, kdy se neměří přímo požadovaná veličina, ale měří se jiné veličiny, z kterých se poté tato požadovaná veličina

vypočítá. Musí se zde uvažovat i korelační nebo kovarianční vlivy mezi jednotlivými měřeními popř. měřenými veličinami, které vyhodnocování nejistot podstatně komplikují. Tato kapitola je převzata z [4].

1.3.1 Zákon šíření nejistot

Tento zákon je velmi důležitý u nepřímých měření. Základní problematika spočívá ve stanovení nejistoty odhadu požadované veličiny, která je funkcí jiných dílčích veličin, jejichž odhady i nejistoty jsou známé. Máme tedy výstupní veličinu Y , která je funkcí m vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_m . Tyto veličiny se mohou přímo změřit nebo jsou známy z jiných zdrojů jejich odhady, nejistoty, popř. jejich vzájemné kovariance. Funkci můžeme tedy zapsat způsobem:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (1.9)$$

a její odhad jako:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1.10)$$

Rozlišují se dva případy funkce f . V prvním případě jsou vstupní odhady korelované a ve druhém případě nekorelované.

Nekorelované vstupní odhady

Pojem nekorelované vstupní odhady znamená, že mezi těmito vstupními odhady neexistují žádné kovarianční vazby. Tyto úvahy se tedy týkají jak přímého měření (kapitola 1.2), tak nepřímého měření za předpokladu, že se odvodí zanedbatelnost korelace vstupních veličin.

Nejistota odhadu y veličiny Y se potom určí podle vztahu:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) \quad (1.11)$$

kde: A_i - koeficient citlivosti nebo-li převodový koeficient

Koeficient citlivosti je buď známý nebo se určí podle vztahu:

$$A_i = \left. \frac{\delta f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\delta X_i} \right|_{X_1 = x_1, \dots, X_m = x_m} \quad (1.12)$$

Tento koeficient citlivosti popisuje, do jaké míry je odhad výstupní hodnoty y ovlivňován změnami v odhadu x_i vstupní veličiny X_i .

Korelované vstupní odhady

Jak už vyplývá z předchozího tvrzení, pokud jsou vstupní odhady korelované, existují mezi nimi kovariance, které se musí uvažovat.

V tomto případě se nejistota $u(y)$ výstupní veličiny Y určí podle vztahu:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<1}^{m-1} A_i A_j u(x_i, x_j) \quad (1.13)$$

kde: $u(x_i, x_j)$ - kovariance mezi navzájem korelovanými odhady x_i a x_j

Navzájem korelované odhady x_i a x_j mohou být dvě vzájemně závislé různé veličiny nebo i dvě hodnoty stejné veličiny, mezi kterými existuje korelační vazba.

Tímto řešením se dosáhne určení celkové nejistoty odhadu y výstupní veličiny Y nejistoty. Někdy je ale výhodnější určit zvlášť nejistotu A a B a z nich pomocí vztahu 1.7 poté vypočítat kombinovanou (celkovou) nejistotu u_C .

1.3.2 Kovariance

Kovariance je míra vzájemné závislosti dvou nebo více náhodných veličin tzn. je to vlastně míra korelace. Určují tedy, jak jsou odhady vlivů jednotlivých zdrojů nejistot vzájemně ovlivněny společnými zdroji nejistot. Vznikají při opakovaném měření více veličin jedním měřicím přístrojem nebo při opakovaném měření jedné veličiny různými měřicími přístroji. Příspěvek korelačních zdrojů nejistot se odvíjí od toho, jak se příslušné nejistoty slučují. Výslednou nejistotu může zmenšit i zvětšit. Znaménko závisí na tom, zda působí souhlasně či nesouhlasně a na tvaru funkce, kterou jsou vázány na výstupní veličinu. Určují se podobně jako nejistoty, tzn. metodou A a B.

Stanovení kovariance metodou typu A

Stejně jako metoda A pro zjištění nejistoty měření je i tato metoda založena na statistickém zpracování dat. Používá se tedy, když je k dispozici n naměřených hodnot obou veličin $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ a $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}$.

Odhady x_i a x_j dvou vstupních veličin (zdrojů nejistot) X_i a X_j jsou vyjadřovány aritmetickými průměry:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik}, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{jk} \quad (1.14)$$

Kovariance určená metodou typu A je potom:

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (1.15)$$

Stanovení kovariance metodou typu B

Metoda typu B pro stanovení kovariancí nevychází stejně jako u nejistot měření ze statistického zpracování dat.

Určit ji můžeme z dokumentace přístrojů, literatury atd., nebo výpočtem. Výpočet se skládá z několika kroků:

1. Vytipování zdrojů korelací (kovariancí).
2. Na základě zkušeností se odhadne korelační koeficient $r(x_i, x_j)$ pro každý zdroj vyjadřující míru závislosti mezi odhady a pohybující se v intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Pokud se jedná o slabou závislost, hodnota se blíží nule, pokud o silnou, dosahuje krajních bodů.

Příslušná hodnota kovariance se určí ze vztahu:

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j) u_B(x_i) u_B(x_j) \quad (1.16)$$

3. Pokud jsou vstupní veličiny X_1 a X_2 s odhady x_1 a x_2 funkcemi nezávislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , které lze vyjádřit vztahy:

$$X_1 = g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m), \quad X_2 = g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m) \quad (1.17)$$

určí se kovariance mezi odhady x_1 a x_2 ze vztahu:

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_j) \quad (1.18)$$

kde: A_{1i}, A_{2i} - koeficienty citlivosti pro funkce g_1 a g_2 podle vztahu 1.12

Na základě vzorce 1.18 se kovariance veličin X_1 a X_2 určují pomocí nezávislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , což umožňuje vhodným sestavením modelu měření obejít složité, jinak nevyhnutelné, odhadování korelačního koeficientu. Model musí být sestaven tak, aby v něm veličiny X_1 a X_2 nadále nevystupovaly.

4. Pokud jsou vstupní veličiny X_1 a X_2 s odhady x_1 a x_2 funkcemi závislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , které lze vyjádřit vztahy 1.17, určí se kovariance mezi odhady x_1 a x_2 ze vztahu:

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_j) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) \quad (1.19)$$

kde: $u_B(z_i, z_j)$ - známá kovariance mezi odhady z_i a z_j

5. Pokud není možné korelační koeficient určit, ani korelace vyloučit sestavením vhodného modelu, doporučuje se určit maximální vliv korelace na výslednou nejistotu pomocí horní hranice odhadu standardní nejistoty měřené veličiny.

1.4 Zásady zápisu výsledků měření

Výsledná nejistota je nedílnou součástí výsledku měření, proto je důležité, správně výsledek zapsat. Následující pravidla vychází z [4].

Jednou ze zásad je zaokrouhlování. Při statistickém vyhodnocování se pomocí výpočetní techniky získávají výsledky, které jsou představovány dlouhými řetězci číslic. Aby tento výsledek měl smysl, musí se zredukovat. Zpřesnit získaný odhad měřené veličiny reálně lze o jeden až dva řády, ne však v rozsahu všech desetinných míst. Proto ho musíme zaokrouhlit. Zaokrouhlení se provede na jednu, maximálně dvě platné cifry, většinou směrem nahoru. Pokud však nejistota začíná číslicí 1 nebo 2, zaokrouhluje se na dvě platné cifry, stejně jako mezivýsledky nejistoty A a B. Výsledek měřené veličiny se zapíše tak, aby nejistota opravovala poslední platnou cifru (2 cifry) výsledku. Existují i jiné zápisy, které jsou používány jen výjimečně.

Příklady zápisu výsledku měření:

$$U(x) = 25,4 \pm 1,2 [X]$$
$$U(x) = 12,6 \pm 0,9 [X]$$

Podstatné je, aby u každého výsledku bylo uvedeno, o jakou nejistotu se jedná. Tento zápis je realizován pomocí rozšířené standardní nejistoty. Rozlišuje se však více druhů zápisu výsledku nejistoty, tj. s využitím kombinované nebo rozšířené nejistoty, pro přehlednost se uvádí i tzv. bilanční tabulka.

1.4.1 Zápis výsledku pomocí kombinované nejistoty

Pokud se zvolí tento způsob zápisu, musí se dodržet následující pokyny: [4]

- uvedení podrobné definice měřené veličiny Y
- uvedení odhadu y měřené veličiny Y spolu s kombinovanou standardní nejistotou $u_c(y)$ a jednotky, ve které jsou odhad i nejistota uvedeny
- je-li to vhodné, uvedení relativní standardní kombinované nejistoty
- v případě potřeby uvést bilanční tabulku (kapitola 1.4.3)

1.4.2 Zápis výsledku pomocí rozšířené nejistoty

Pravidly se řídí i zápis pomocí rozšířené nejistoty: [4]

- uvedení podrobné definice měřené veličiny Y
- uvedení výsledku měření v podobě $Y = y \pm U$, přičemž je třeba uvést jednotky, v nichž jsou vyjádřeny odhad y i nejistota U
- pokud je to vhodné, uvedení relativní rozšířené nejistoty
- uvedení hodnoty koeficientu rozšíření k_r , použité při výpočtu U
- uvedení konfidencí hladiny spjaté s intervalem $y \pm U$ a uvedení způsobu určení
- v případě potřeby uvést bilanční tabulku (kapitola 1.4.3)

1.4.3 Zápís výsledku pomocí bilanční tabulky

Kromě běžného zápisu výsledku měření v podobě aritmetického průměru s nejistotou jako tolerančním pásmem, je možné použít zápis postupu určení výsledné nejistoty měření pomocí tzv. bilanční tabulky. Tato tabulka se užívá pro zpřehlednění výpočtu jednotlivých nejistot nebo pro zjednodušení porovnání nejistot při analýze dosažených výsledků. Tabulka by se měla skládat z měřené veličiny X_i , koeficientu citlivosti A_i a příspěvku standardní nejistoty. Jako nepovinné údaje se uvádí rozdělení pravděpodobnosti nebo koeficient rozšíření k_p .

Příklad možného způsobu zápisu bilanční tabulky je na následující Tab. 1.3.

Tab. 1.3: Možný způsob zápisu bilanční tabulky [8]

Veličina	Odhad	Standardní nejistota	Rozdělení pravděpodobnosti	Citlivostní koeficient	Příspěvek k celkové nejistotě
X_i	x_i	$u(x_i)$		A_i	$u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	rovnoměrné	A_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	normální	A_2	$u_2(y)$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
X_a	x_a	$u(x_n)$	normální	A_n	$u_n(y)$
Y	y				$u(y)$

2 Metoda Monte Carlo

I tato kapitola je převzata z [3].

Metoda Monte Carlo je třída algoritmů pro simulaci dějů (systémů) využívající stochastických metod. K výpočtu tedy používá náhodná nebo pseudonáhodná čísla. Je vhodná pro řešení diferenciálních rovnic a vícerozměrných integrálů, simulaci experimentů a v neposlední řadě, k výpočtu nejistot, tzn. pro hledání přibližného řešení úloh, jejichž analytické řešení je složité. Podmínkou pro řešení úloh je znalost distribuční funkce vstupů (pravděpodobnostní rozdělení vstupů), pomocí nichž se generují jednotlivé vstupy (čísla) systému a následně se zaznamená výstup. Po několika krocích metody se prostřednictvím analýzy výstupů určí přibližný hledaný výsledek. Kapitola vychází z [2], [8] a [9].

2.1 Výpočet nejistot

Výpočet nejistot metodou Monte Carlo je uveden v dodatku ke GUM [2]. Tato metoda přináší mnoho výhod. Největší výhodou je možnost výpočtu nejistot s komplikovaným rozdělením vstupních veličin. Další z nich je možnost výpočtu i s komplexními čísly a snadnost implementace na různé modely měření, včetně složitých modelů pro nepřímá měření obsahujících nelinearity, kde je obtížné stanovit citlivostní koeficienty pomocí parciálních derivací.

Metoda ovšem má, jako každá jiná, i svá negativa. Z principu metody vyplývá, že pro její aplikaci je zapotřebí použít vhodný software (kapitola 2.1.2). Tento software je náročný na výpočetní kapacitu PC.

2.1.1 Algoritmus výpočtu nejistot

Pro samotný výpočet je třeba znát vstupní veličiny X_i , výstupní veličinu Y a z nich vyplývající model měření $f(X_1, X_2, \dots, X_i)$.

Tyto informace bylo třeba znát i u metody GUM, která pro svoji funkci vyžadovala i znalost střední hodnoty odhadů vstupních veličin x_i , jejich nejistoty $u(x_i)$ a stupně volnosti $v(x_i)$, ze kterých se určil koeficient pokrytí.

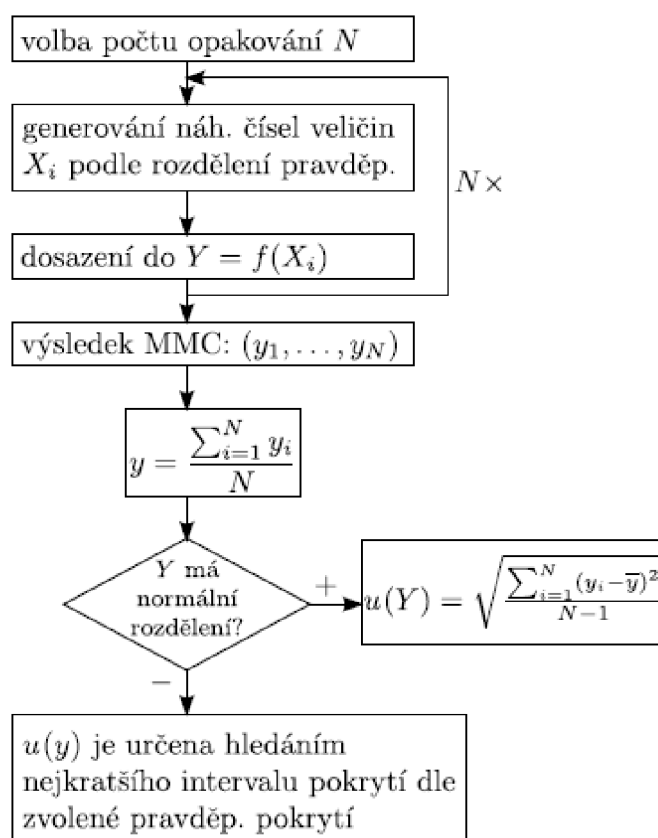
Metoda Monte Carlo vyžaduje místo těchto informací pouze znalost pravděpodobnostních rozdělení výstupní veličiny Y .

Algoritmus je popsán v následujících několika krocích: [9]

1. Zvolí se počet iterací (kroků) N . Většinou je to $10^6 \div 10^7$.
2. Pro každou vstupní veličinu X_i se vygeneruje náhodná hodnota podle odpovídajícího pravděpodobnostního rozdělení.

3. Vygenerované hodnoty vstupů se dosadí do modelu a výstup modelu se zaznamená.
4. Body 2 a 3 se opakují tolikrát, kolik bylo zvoleno iterací N .
5. Výsledek tvoří N hodnot výstupní veličiny Y , které tvoří pravděpodobnostní funkci výstupní veličiny.
6. Pokud je pravděpodobnostní rozdělení výstupní veličiny Y normální (Gaussovo), odpovídá nejistota $u(y)$ výběrové směrodatné odchylce. Pokud je pravděpodobnostní rozdělení jiné, určí se nejistota jako nejkratší interval pokrytí podle daného rozdělení.

Grafické znázornění algoritmu je na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Algoritmus výpočtu nejistoty pomocí metody Monte Carlo [9]

2.1.2 Software pro metodu Monte Carlo

Programů pro realizaci metody Monte Carlo je spousta. Nejdůležitějším faktorem je kvalita generátoru pseudonáhodných čísel [8]. Podstatná je také schopnost programu zpracovávat velké množství dat.

Nabízí se tabulkové editory, které jsou součástí kancelářských balíků, jejichž nejnámějším představitelem je Microsoft Excel. Starší verze těchto editorů však nemají dostatečně kvalitní generátory pseudonáhodných čísel a navíc mají problém se zpracováním velkého obsahu dat. Tento problém přetrvává i u novějších verzí, a proto se nepoužívají.

Další možností je použití programů přímo pro výpočet nejistot jako je GUM Workbench Pro, který zvládá výpočet nejistot metodou GUM i metodou Monte Carlo. Využívaný je také program OpenBUGS, který je zaměřen přímo na simulaci pomocí metody Monte Carlo. Jeho výhodou je také volně dostupná licence.

Nejpoužívanější je však program Matlab specializovaný na matematické výpočty, který má vhodné vlastnosti. Tento program jsem k výpočtu zvolil i já. Jeho nevýhodou je ale vysoká cena. Proto se jako náhrada používá program GNU Octave, který je částečně kompatibilní s Matlabem a má volně šiřitelnou licenci. Používá se také program LabView.

2.1.3 Generátory (pseudo)náhodných čísel

Generátory náhodných čísel rozdělujeme na pravý generátor náhodných čísel a generátor pseudonáhodných čísel.

Pravý generátor náhodných čísel

Tyto generátory generují skutečně náhodná čísla, tedy čísla, která postrádají jakýkoli vzor. Většinou jsou založeny na fyzikálním jevu, např. radioaktivní rozpad, šum nebo elektronky, o kterém se předpokládá, že je náhodný a následně se kompenzují odchylky. Jedním z prvních způsobů bylo vrhání kostkami, házení mincí nebo ruleta. Použití těchto generátorů pro simulační účely je ale složité, příliš pomalé a neúčinné, proto se používají výhradně generátory pseudonáhodných čísel.

Generátor pseudonáhodných čísel

Generátory pseudonáhodných čísel jsou takové generátory, které generují čísla deterministickým způsobem. Generují tedy posloupnost čísel, která ale vykazují dostatečné znaky náhodnosti. Tyto generátory lze dělit do dvou základních skupin podle rozdělení pravděpodobnosti. Generátory s uniformním rozdělením, jehož vygenerované čísla mají rovnoměrné rozdělení, a generátory s obecným rozdělením.

3 Konfirmace teplotních komor

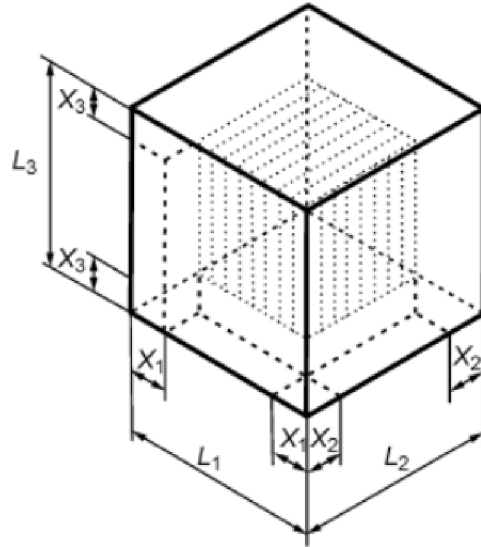
Tato kapitola vychází z norem ČSN EN 60068-3-5 [10], ČSN EN 60068-3-6 [11] a především ČSN EN 60068-3-11 [12] a z [13].

Nejdříve je nutné uvést pojmy „kalibrace“ a „konfirmace“ a rozdíl mezi nimi. Pokud se provádí měření, dá se očekávat, že výsledné údaje jsou z nějakého důvodu důležité. Proto je třeba tyto měřicí údaje validovat. Systém řízení jakosti na měřidla pamatuje jejich kalibraci definovaným způsobem. *„Kalibrace“ je soubor úkonů, kterými se za specifikovaných podmínek stanoví vztah mezi hodnotami veličin, jenž jsou indikovány měřicím přístrojem (systémem) a odpovídajícími hodnotami, které jsou realizovány referenčními standardy (etalony) [13].* Neoddělitelnou a velmi důležitou součástí kalibrace je i stanovení a kvantifikace nejistot ovlivňujících toto měření. Pojem „konfirmace“ vyjadřuje v podstatě to samé, s tím rozdílem, že se nevyžaduje provádět tuto činnost v akreditované laboratoři, ale každý uživatel si ji může vykonávat sám. Musí se však připravit taková kalibrace/konfirmace, jež co nejdříve kopíruje skutečné poměry při vlastním použití.

Dále je potřeba vysvětlit rozdíl mezi pojmem „teplotní komora“ a „klimatická komora“. *„Teplotní zkušební komora“ je kryt nebo prostor, v jehož některých částech lze dosáhnout podmínek teploty specifikovaných v ČSN EN 60068-2 (např. [15] a [14]).*[10] Zatímco *„klimatická (teplotně vlhkostní) zkušební komora“ je kryt nebo prostor, v jehož některých částech lze dosáhnout podmínek teploty a/nebo vlhkosti specifikovaných v ČSN EN 60068-2 ([15] [14]) [11].* Tato diplomová práce se věnuje pouze „konfirmaci teplotních komor“, resp. „konfirmaci teploty klimatických komor“. Ukázka typického pracovního prostoru v teplotní komoře je demonstrována na Obr. 3.1 a jeho praktické rozměry v Tab. 3.1. Všechny komory však nemusí mít rychlovou konstrukci.

Tab. 3.1: Praktické rozměry pracovního prostoru [10]

Velikost	Objem [l]	Vzdálenost X [mm]	X (min.) [mm]
Malá	Do 1 000	L/10	50
Střední	1 000 až 2 000	L/10	100
Velká	Více než 2 000	L/10	150



Obr. 3.1: Pracovní prostor v teplotní komoře [10]

3.1 Metody konfirmace

Zdrojem této kapitoly je ČSN EN 60068-3-11 [12].

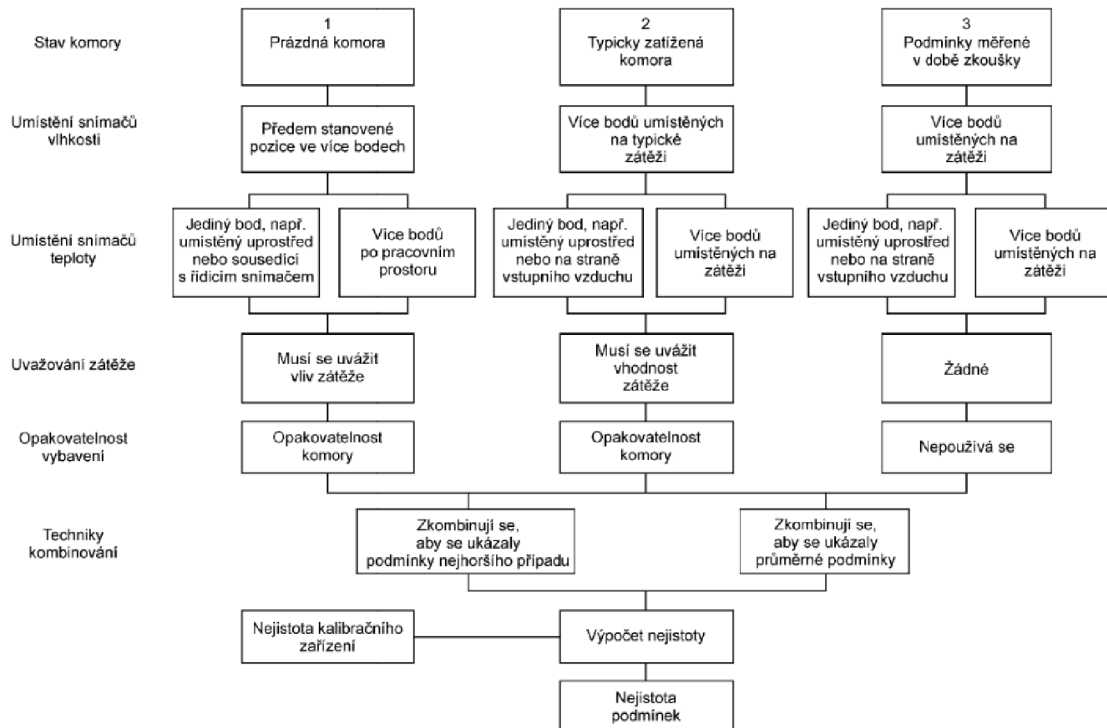
Existují tři základní metody stanovení podmínek v teplotních zkušebních komorách. Tyto tři metody odrážejí různé požadavky při různých typech zkoušení a pro každý z těchto přístupů existují dobré důvody. Metody jsou znázorněny na Obr. 3.2.

3.1.1 Prázdna komora (bez zátěže)

Prázdna komora nebo-li konfirmace bez zátěže je způsob konfirmace, kdy je teplotní komora zcela prázdná. Součástí konfirmace jsou samozřejmě snímače teploty umístěné v komoře a celkově hardware potřebný k experimentu (konstrukce pro upevnění snímačů, kabely atd.)

Výhody

- Celý pracovní prostor je konfirmován.
- Konfirmaci je nutné provádět pouze jednou či dvakrát za rok.
- Při změně zkušebního vzorku není nutná opakovaná konfirmace.
- Vhodnost komory lze posoudit bez vystavení zkušebního vzorku expozici.
- Relativně nízké náklady, protože pro mnoho komor je nutná pouze jedna souprava kalibrovaných přístrojů.



Obr. 3.2: Přístupy k metodě konfirmace a k výpočtu nejistoty [12]

Nevýhody

- Obtížné kvantifikování vlivu zkušební vzorku, ačkoli u velmi malých vzorků v porovnání s komorou může být tento vliv zanedbatelný.
- Velmi obtížné přiřazení nejistoty vlivu zátěže.
- Velmi těžké kvantifikování vlivu vzorků uvolňujících teplo.
- Musejí být posouzeny drift, rozlišení a opakovatelnost řídicí jednotky komory a jejich příspěvky k celkové nejistotě musejí být zahrnuty do výpočtu.

3.1.2 Typická zátěž

Konfirmace s typickou zátěží se často používá v případech, kdy se opakují podobné zkoušky se stejnými nebo podobnými vzorky. Jako typická zátěž může být použit přímo reálný vzorek (ideální případ) nebo modelový vzorek s ideálně totožnými vlastnostmi.

Výhody

- Vliv zátěže na řízení komory může být přesně posouzen bez vystavení zkušební vzorku neznámému namáhání.

- Před zkouškou může být vybrána nejmenší vhodná komora, která vytváří uspokojivé podmínky.
- Pečlivé umístění snímačů může poskytovat podrobné informace o kritických částech zátěže.
- Anomálie způsobené zátěžemi uvolňujícími teplo je možné kvantifikovat.
- Relativně nízké náklady, protože pro mnoho komor je nutná pouze jedna souprava kalibrovaných přístrojů.

Nevýhody

- Při významné změně zkušební vzorku se požaduje opakovaná confirmace.
- Musejí být posouzeny drift, rozlišení a opakovatelnost řídicí jednotky komory a jejich příspěvky k celkové nejistotě musejí být zahrnuty do výpočtu.

3.1.3 Confirmace během zkoušky

Tato metoda popisuje confirmaci, která se provádí přímo v průběhu standardních klimatických zkoušek. Ideální je, když se používají různé druhy zátěže a provádějí různé zkoušky.

Výhody

- Poskytuje nejlepší odhad měřené hodnoty podmínek, se kterými se zkoušený vzorek setká.
- Vliv zátěže na řízení komory lze přesně posoudit.
- Není nutné posuzovat historii driftu confirmace komory.
- Pečlivé umístění snímačů může poskytovat podrobné informace o kritických částech zátěže.
- Anomálie způsobené zátěžemi uvolňujícími teplo je možné kvantifikovat.
- Komora se neconfirmuje pro podmínky, které nejsou požadovány.

Nevýhody

- Pro každou zkoušku se požaduje měřicí zařízení.
- Pro každou zkoušku musí být provedeny výpočty nejistoty.
- Relativně vysoké náklady, protože je neustále požadováno měřicí zařízení.

4 Návrh měřicího systému

Úkolem je navrhnout automatizovaný měřicí systém pro confirmaci teplotních komor. Systém má využívat navrženou metodiku sběru dat ze snímačů teploty, a také program LabView k zpracování a vyhodnocení dat. Confirmovány budou (střídavě) tři komory, jenž patří do akreditované zkušební laboratoře CVVOZE. Následně stanovit postup pro vyhodnocení nejistoty měření teploty pro navržený systém klasickou metodou GUM i metodou Monte Carlo.

Jsou požadovány tyto přístroje:

- confirmované zařízení (Teplotní komora)
- snímače teploty (Platinové odporové snímače / Termočlánky)
- konstrukce pro upevnění snímačů
- přístroj pro získávání dat (Měřicí karty / Multimetry)
- komunikační rozhraní (USB / RS-232 / Ethernet / GPIB)
- zařízení pro zpracování dat (PC / Notebook s programem LabView)

4.1 Požadavky na měření

Informace jsou čerpány z normy ČSN EN 60068-3-5 [10]. Dále je důležité zmínit, že práce se zaměřuje pouze na confirmaci s prázdným pracovním prostorem, viz kapitola 3.1.1.

Protože okolní prostředí může ovlivňovat podmínky v komoře, má se confirmace provádět za normálních atmosférických podmínek popsanych v ČSN EN 60068-1, přičemž *nejistota měření na výstupu měřicího systému má být stanovena kalibrační systémem s návazností na mezinárodní etalony* [10] (viz kapitola 3).

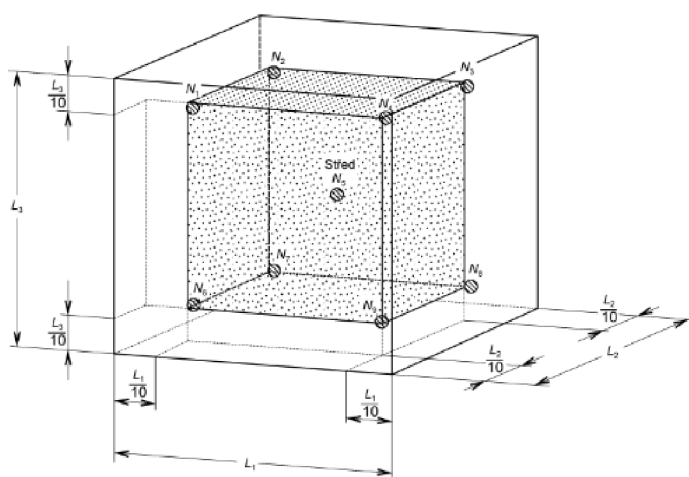
Pro měření se mohou použít platinové snímače nebo termoelektrické články (použití pro vyšší teploty, až 2 000 °C). *Doba teplotní odezvy snímačů pro 50 % odezvy musí být mezi minimální dobou 10 s a maximální dobou 40 s. Preferuje se, aby doba teplotní odezvy celého měřicího systému byla menší než 40 s. Doporučuje se použít snímače, které jsou ve shodě s ČSN EN 60584-1, toleranční třídou 1 (pro termočlánky), nebo ČSN EN 60751 [17], toleranční třídou A (pro platinové snímače)* [10].

Dle právě této normy ([10]) je při confirmaci nutné zaznamenávat data nejméně jednou za minutu, přičemž zařízení používané pro zaznamenávání dat z pracovního prostoru komory musí být nezávislé na řídicím systému. Norma ČSN 60068-3-11 [12] udává zase jiné požadavky. Ty říkají, že pro zajištění kvality confirmace se má z každého snímače v každých nastavených podmínkách pořídít nejméně 5, ale raději 20 či více záznamů po dobu nejméně 30 minut tak, aby bylo možné zaznamenat

případné kolísání teploty v komoře. Záznamy se mají pořizovat až poté, co komora dosáhne rovnováhy ve všech nastavených podmínkách. Z toho vyplývá mírný rozpor, který je způsoben pravděpodobně konkrétním zaměřením každé z norem. Další norma, ČSN 60068-3-7 [16] vztahující se ke konkrétním zkouškám A (norma ČSN 60068-2-1 [15]) a B (norma ČSN 60068-2-2 [14]), uvádí totiž intervaly mezi zaznamenanými daty také nejméně jednou za minutu.

4.1.1 Rozmístění snímačů

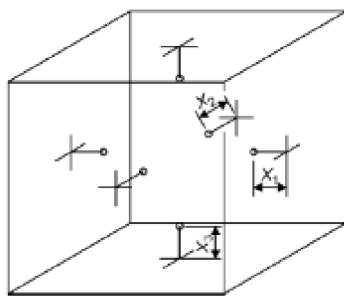
Snímače se umístí do středu a do každého rohu pracovního prostoru, tj. 9 snímačů (viz Obr. 4.1). Tento počet stačí u komor s objemem do 2 000 l. Měřicí systém musí být vytvořen tak, aby nebylo ovlivněno rozložení teploty v (prázdné) zkušební komoře.



Obr. 4.1: Umístění snímačů v komorách do 2000 l [10]

Pokud se potvrzují větší teplotní komory (nad 2 000 l), mají se umístit další snímače naproti středu každé stěny, tj. 15 snímačů (viz Obr. 4.2). U těchto komor může docházet k velkému rozdílu mezi teplotou snímanou řídicím snímačem a teplotou ve středu pracovního prostoru. Z tohoto důvodu bývá nutné seřízení nastavení teploty k dosažení nezbytné tolerance (vysvětleno níže v kapitole *Dosažená teplota*).

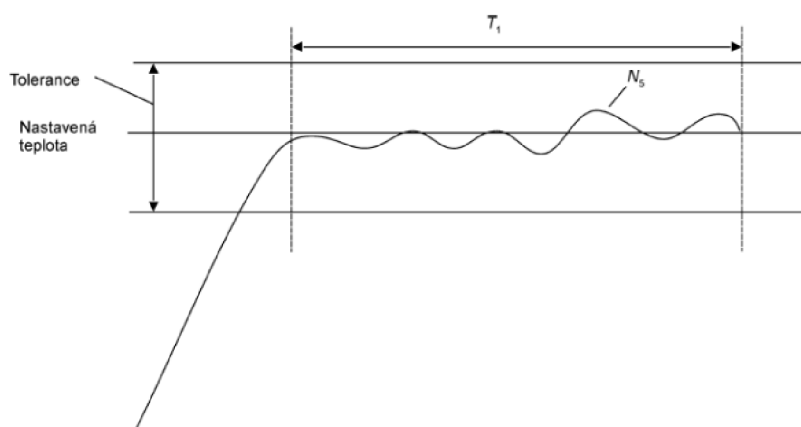
Výstup takto uspořádaného systému určuje dosaženou teplotu a kvantifikuje *Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty* - u_{Kk} a *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty* - u_{Kg} . Je ale nutné, aby se hodnoty odečítaly až po stabilizaci komory, viz *Nejistota daná stabilizací ((ne)ustálením) teploty v komoře* - u_{Kn} . Výsledná nejistota měření systému musí odpovídat ČSN EN 60068-3-11 [12].



Obr. 4.2: Umístění dodatečných snímačů v komorách nad 2000 l [10]

Dosažená teplota

Požaduje se, aby ve středu pracovního prostoru byly udržovány specifikace tolerance teplotní komory nebo, pokud je to nutné, tolerance specifikované v ČSN EN 60068-2 [15] [14] (viz Obr. 4.3). [10]



Obr. 4.3: Tolerance dosažené teploty [10]

T_1 musí být minimálně 30 minut. N_s je teplota ve středu pracovního prostoru.

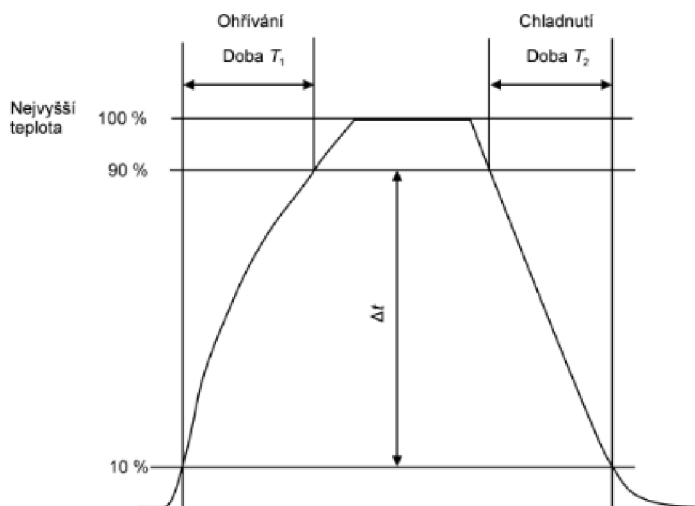
Rychlost změny teploty

Postup při měření rychlosti změny teploty v komoře (mezi specifikovanými teplotami) je následující a vychází z [10]:

1. Komora se nastaví na nejnižší specifikovanou teplotu a nechá se stabilizovat.
2. Komora se nastaví na nejvyšší specifikovanou teplotu, monitoruje se doba mezi 10 % a 90 % teplotního rozsahu.
3. Komora se nechá stabilizovat při nejvyšší specifikované teplotě.

4. Komora se nastaví na nejnižší specifikovanou teplotu, monitoruje se doba mezi 90 % a 10 % teplotního rozsahu. [10]

Výsledek měření je zobrazen na následujícím Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Příklad rychlosti změny teploty v komoře [10]

Hodnoty rychlostí se poté musí určovat podle následujících vztahů:

$$\text{Rychlost změny teploty při ohřívání} = \frac{\Delta t}{T_1} \text{ [K/min]}$$

$$\text{Rychlost změny teploty při chladnutí} = \frac{\Delta t}{T_2} \text{ [K/min]} \quad (4.1)$$

4.1.2 Postup měření

Zde je uveden postup měření při confirmaci výkonnosti teplotní komory, který se považuje za minimum doporučené k získání nezbytných dat a je převzat z [10].

1. Začíná se v podmínkách okolí.
2. Komora se nastaví na nejvyšší specifikovanou teplotu a nechá se stabilizovat.
3. Změří se výkonnost při nejvyšší teplotě.
4. Komora se nastaví na nejnižší specifikovanou teplotu, monitoruje se rychlost změny a komora se nechá stabilizovat.
5. Změří se výkonnost při nejnižší teplotě.
6. Komora se nastaví na nejvyšší specifikovanou teplotu, monitoruje se rychlost změny.
7. Komora se nastaví na atmosférické podmínky a nechá se stabilizovat.
8. Změří se výkonnost při atmosférických podmínkách okolí. [10]

4.1.3 Požadovaná měření

V normě ČSN 60068-3-11 [12] jsou uvedeny jako minimum měření následující požadavky. Zde se tedy objevuje určitý rozpor mezi normami.

Pokud se confirmuje během zkoušky, může být nejistota vypočtena pro tyto podmínky. Jakmile se však confirmace v době zkoušky neprovádí, musí se opakovat celé série měření a analýzy pro každou sadu podmínek, které musí nutně pokrývat rozsah používání. Pokud se provádí confirmace pouze teploty, má se do ní zahrnout dostatečný počet měřicích bodů, aby pokryly:

- *nejvyšší teplotu*
- *nejnižší teplotu*
- *nejméně dvě teploty při zapnutém chlazení*
- *nejméně dvě teploty při zapnutém ohřívání [12]*

4.1.4 Informace v protokolu

V protokolu o confirmaci musí být obsaženy tyto informace (opět čerpáno z [10]):

1. *atmosférické podmínky pro měření ve zkušebně*
2. *velikost a objem vnitřního prostoru a pracovního prostoru komory*
3. *kolísání teploty, odchylky teploty v prostoru a gradient teploty*
4. *rychlost změny teploty*
5. *nejvyšší a nejnižší teplota*
6. *výsledky měření z každé měřicí pozice*
7. *podrobnosti o systémech získávání dat*
8. *nejistoty měření*
9. *upevňovací přípravky použité při měření [10]*

4.2 Navržený hardware

Pro potřeby diplomové práce byl vybrán hardware, který je dostupný ve zkušební laboratoři CVVOZE. Jedná se o teplotní komory CTS T-65/50, CTS T-60/50 a VCV 7060-15 od firmy Vötsch, snímače teploty TG3-60 Pt100/3850/A (9ks) od výrobce Sensit a šasi NI CompactDAQ (cDAQ-9178) od firmy National Instruments s měřicími kartami NI 9219 (3ks), rovněž od stejného výrobce. Měřicí karty tohoto typu byly požadavkem od uživatele (ZL CVVOZE) na součást měřicího systému. Důvodem byly hlavně dostupnost v laboratoři, kompatibilita a usnadněná práce s programem LabView (stejný výrobce) a jednoduché propojení s PC pomocí komunikačního rozhraní USB. Nejdůležitějším parametrem u měřicích zařízení je však

přesnost. Protože jsou v laboratoři dostupné i multimetry Agilent 6½ digitu, je potřeba přístroje porovnat tak, aby se do měřicího systému zbytečně nezanesl vlivný zdroj, nejistoty viz kapitola *Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}* . Důvodem pro výběr je i vhodná možnost zapojení snímačů díky adaptéru na vstupu karty, do kterého se dá vodič bez problémů zacvaknout (což se nedá říci o multimetrech). Posledním vybraným důvodem je i potřeba čtení z minimálně devíti snímačů najednou. Platinové snímače jsou v praxi zase nejpoužívanější kvůli jejich vysoké přesnosti a dostupnosti (přesnější než termočlánky).

4.2.1 Platinové odporové snímače teploty

Princip všech odporových kovových snímačů teploty spočívá v teplotní závislosti odporu kovu na teplotě. Většinou se zvětšující se teplotou roste i odpor, protože jediným teplotně závislým parametrem je relaxační čas elektronů. Pro výpočet měřeného odporu platí závislost 4.2. Informace jsou dostupné z [17], [18], [19] a [20].

$$R_T = R_0 \left(1 + At + BT^2 + C(T - 100)T^3 \right) [\Omega] \quad (4.2)$$

kde: R_T - odpor při měřené teplotě
 R_0 - odpor při teplotě 0 °C
 T - měřená teplota
 A, B, C - konstanty

Dle ČSN EN 60751 [17] jsou hodnoty konstant platinových snímačů teploty:

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

Počet konstant závisí na měřeném teplotním rozsahu [18] a konstanty samotné na použitém kovu. Pro užší teplotní interval v oblasti 0÷100 °C lze použít jen konstantu A. Pokud se využívá rozsah 0÷850 °C, je zapotřebí i konstanty B. Pro ještě širší intervaly (a hlavně záporné teploty) je nutno použít i konstantu C.

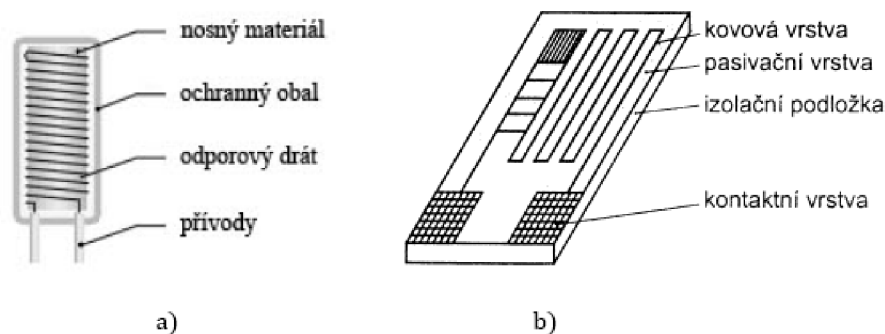
Teplotní součinitel odporu α je základní materiálovou konstantou a je určen vztahem:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} [^\circ\text{C}^{-1}] \quad (4.3)$$

kde: R_{100} - odpor při teplotě 100 °C

Platinový snímač teploty je zařízení citlivé na teplotu, které se skládá z jednoho nebo několika snímacích platinových rezistorů v ochranném plášti, s vnitřními

spojovacími vodiči a vnějšími svorkami dovolujícími připojení elektrických měřících přístrojů. Provádí se drátkovou, tenkovrstvou nebo tlustovrstvou technologií. V dnešní době je nejvíce používanou tenkovrstvá technologie, naopak drátková se už moc nevyužívá. Nejdůležitější částí snímače je jeho citlivá délka. Je to délka, jejíž teplota ovlivňuje přímo měřený odpor. Obvykle se délka citlivá na teplotu vztahuje na délku rezistoru. Realizují se dvou vodičovým, třívodičovým nebo čtyřvodičovým zapojením. Snímač se vyznačuje časovou stálostí, chemickou netečností, vysokou teplotou tání a především tím, že u něj nedochází ke změně α , tzn. nemění tvar v čase. Konstrukční uspořádání je na Obr. 4.5. Kromě platiny, která má nejlepší vlastnosti, se používají také nikl, měď nebo molybden.



Obr. 4.5: Platinový odporový snímač a) drátkový [5], b) tenkovrstvý [19]

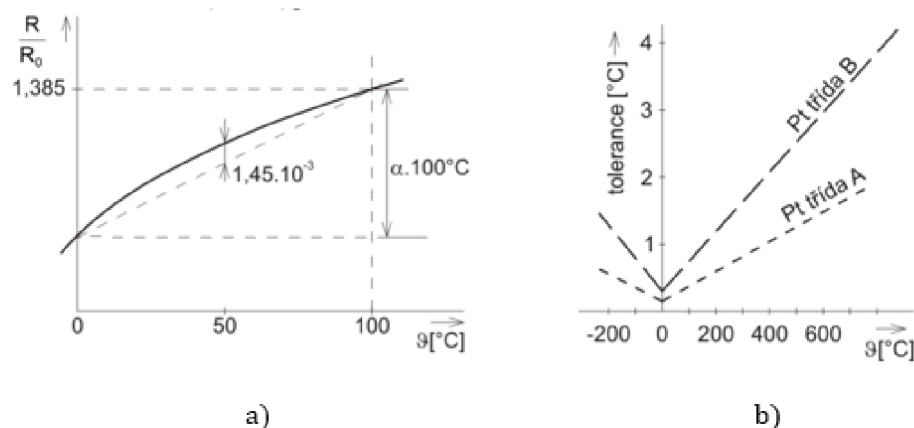
Používá se velmi čistá platina, která určuje citlivost snímače. Čistota se posuzuje podle tzv. redukovaného odporu W_{100} [20]:

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385 [-] \quad (4.4)$$

Platinové snímače se dle normy ČSN EN 60751 [17] dělí do dvou tolerančních skupin A a B. V principu jsou tyto třídy stejné, rozdíl je v rozsahu. Třída A je stanovena pro rozsah teplot od $-200 \div 650$ °C, z tohoto důvodu je přesnější, a třída B pro rozsah $-200 \div 850$ °C. Grafické znázornění je na Obr. 4.6.

Zkratka Pt100 znamená, že při teplotě 0 °C, má snímač hodnotu odporu 100 Ω. Tento je nejpoužívanější, ale používají se i Pt50, Pt200, Pt500, Pt1000 nebo Pt2000. Kromě již uvedených předností má snímač také své nevýhody, za které se považují malý teplotní rozsah a v případě drátkového provedení i hystereze způsobená dotykem drátku s izolátorem.

Pro měření při confirmaci teploty jsou normou ČSN EN 60068-3-5 [10] také doporučovány termoelektrické snímače (jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1), které ale použity nebyly, a proto se jimi práce nezabývá.



Obr. 4.6: a) Závislost odporu Pt snímače na teplotě v rozsahu 0÷100 °C, b) Tolerance platinových snímačů teploty [19]

Snímače teploty TG3-60 Pt100/3850/A

Pro konfirmaci teplotních komor se musejí použít platinové snímače toleranční třídy A, viz kapitola 4.1. Vybraný typ od firmy Sensit disponuje přesností:

$$\pm(0,15 + 0,002 |T|) \quad (4.5)$$

kde: T - absolutní hodnota teploty [°C]

Tento a další technické parametry jsou uvedeny na následujícím Obr. 4.7. Jedná se např. o zapojení čidla, měřicí rozsah, dobu odezvy, odpor přívodních vodičů, izolační odpor, průměr a délku pouzdra a další. Data jsou uvedena v datasheetu [21]. Protože se musí měřit v devíti měřicích bodech (viz kapitola 4.1.1), je zapotřebí devět těchto snímačů.

4.2.2 Zkušební komory

Obecný popis zkušebních komor byl proveden v kapitole 3.

Teplotní komora CTS T-65/50

Jak už z názvu „teplotní komora“ vyplývá, může se nastavovat pouze teplota, nikoliv relativní vlhkost, viz kapitola 3. Proto lze komoru použít jen pro určitý typ zkoušky vlivu prostředí, např. zkoušku suchým teplem popsanou ČSN EN 60068-2-2 [14] nebo zkoušku chladem (ČSN EN 60068-2-1 [15]) a další. Parametry komory jsou uvedeny v následující Tab. 4.1 a vychází ze specifikace komory [22] a z [23].

Z Tab. 4.1 je vidět, že se svým objemem 50 l, patří komora mezi „malé“, viz kapitola 3. Dále umožňuje měnit teplotní rozsah v rozmezí -65÷180 °C. Velmi

Typ čidla	Pt 100 / 3850 ppm / °C
Třída přesnosti A *	± (0,15 + 0,002 t) ve °C
Zapojení čidla teploty	4vodič
Měřicí rozsah	-50 °C až 200 °C
Napájení	Ze zdroje PELV nebo SELV
Max. / Dop. měřicí proud	Tř. A: 1,2 mA / 0,5 mA Tř. B: 2 mA / 0,8 mA
Krytí snímače	IP 67 podle ČSN EN 60 529
Doba odezvy	$\tau_{0,5} < 3$ s (v proudící vodě > 0,2 m/s)
Materiál kovového pouzdra	Nerezová ocel DIN 1.4301
Průměr pouzdra	3 ± 0,1 mm
Délka pouzdra	60mm
Elektrická pevnost	500 VAC podle ČSN EN 60730-1
Izolační odpor	> 200 MΩ při 500 VDC, 25° ± 3°C
Typ přívodního kabelu	2vodič teflon nestíněný 2 x AWG24 3 a 4vodič teflon stíněný 4 x AWG30
Délka přívodního kabelu	3m
Odpor přívodních vodičů	0,178 Ω / 1 m při teplotě 25 °C
Odolnost vůči vnějšímu tlaku	2,5 MPa
Hmotnost	20 g pro délku kabelu 1 m

Obr. 4.7: Technické parametry snímače [21]

Tab. 4.1: Základní údaje teplotní komory CTS T-65/50 [22]

Velikost	Objem [l]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Teplota [°C]	Ohřev [K/min]	Chlad [K/min]	Odchylka [K]
Malá	50	400	400	320	-65÷180	6	4	≤ ±0,3

důležitý údaj je odchylka teploty. Tento parametr vyjadřuje maximální rozdíl mezi nastavenou a naměřenou (reálnou) hodnotou během zkoušky. Zároveň je to tedy hodnota, kterou při confirmaci testujeme. Dalšími údaji jsou rychlost změny teploty při ohřívání a při chlazení, a také rozměry komory.

Teplotní komora CTS T-60/50

Z názvu opět plyne, že komora umožňuje nastavovat pouze teplotu. Základní údaje o komoře jsou identické jako v předchozím případě a jsou uvedeny v následující Tab. 4.2. Informace pochází ze specifikace komory [24].

Tab. 4.2: Základní údaje klimatické komory CTS T-60/50 [24]

Velikost	Objem [l]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Teplota [°C]	Ohřev [K/min]	Chlad [K/min]	Odchylka [K]
Malá	50	400	400	320	-60÷180	3	2,5	≤ ±(0,5÷1)

Klimatická komora VCV 7060-15

Tuto komoru tedy lze (je klimatická) využít i pro jiné zkoušky, např. zkoušku vlhkým teplem uvedenou v ČSN EN 60068-2-30 nebo ČSN EN 60068-2-78 a další, které požadují nastavování i relativní vlhkosti. Toto však není předmětem diplomové práce, a proto jsou v následující Tab. 4.3 vybrány jen ty základní údaje, které se týkají nastavování teploty, přičemž jsou vzaty z [25]. Na rozdíl od předchozích dvou komor je tato produktem firmy Vötsch.

Tab. 4.3: Základní údaje klimatické komory VCV 7060-15 [25]

Velikost	Objem [l]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Hloubka [mm]	Teplota [°C]	Ohřev [K/min]	Chlad [K/min]	Odchylka [K]
Malá	600	950	800	800	-70÷180	16,5	14,5	$\pm(0,1\div 0,8)$ $\pm(0,5\div 2)$

První hodnota odchylky, tedy $\pm(0,1\div 0,8)K$, vyjadřuje časovou odchylku teploty ve středu užitečného prostoru a druhá hodnota odchylky ($\pm(0,5\div 2)K$) udává teplotní homogenitu prostoru vzhledem k nastavené teplotě v rozsahu $T_{min}\div 150\text{ }^{\circ}C$.

4.2.3 Měřicí (systém) karty

Měřicích karet existuje velká spousta. Vyrábí se analogové i digitální karty nebo karty pro měření napětí, proudu a odporu. Měřit se dají i signály ze snímačů, jako jsou např. tenzometry, RTD snímače, termočlánky a další napájené snímače. Měřicí karty jsou individuálně nastavitelné, to přináší možnost nezávislého měření na každém kanálu. Nedílnou součástí systému s měřicími kartami je i tzv. šasi. To slouží k jejich připojení a stará se o synchronizaci měření mezi kartami a přenos dat mezi měřicím systémem a počítačem. Asi nejznámějším a nejrozšířenějším výrobcem těchto zařízení je National Instruments (CompactDAQ, CompactRIO), jehož produkty jsou v práci využity. Informace pocházejí z [23], [26], [27], [28] a z [29].

Měřicí karty NI 9219 a šasi cDAQ-9178

Základem systému je šasi CompactDAQ, konkrétně cDAQ-9178. Jak bylo uvedeno na začátku kapitoly 4.2.3, šasi slouží k připojení měřicích karet, které je možné vybrat dle aktuální potřeby a disponuje osmi sloty. Zobrazeno je na následujícím Obr. 4.8 spolu s měřicí kartou NI 9219 popsanou níže.

Tyto měřicí karty disponují čtyřmi kanály, ke kterým je možné připojit různé typy snímačů pro současné nezávislé měření. Rozsah hodnot pak závisí na daném konkrétním použití. Měření různých veličin je také možné provádět „současně“ pouze



Obr. 4.8: a) Měřicí karta NI 9219 [26], b) Šasi cDAQ-9178 [27]

na jednom kanále. Má to však svou podmínku, a tou je, že veličiny musí být možno měřit na stejných pinech měřicí karty (prakticky ověřeno při realizaci experimentu a vysvětleno v kapitole *Měření napětí/proudu*). Měřené veličiny a jejich příslušné piny jsou zobrazeny na Obr. 4.9, ze kterého se musí při zapojování obvodu vycházet.

Mode	Pin					
	1	2	3	4	5	6
Voltage	T+	T-	—	HI	LO	—
Current	T+	T-	HI	—	LO	—
4-Wire Resistance	T+	T-	EX+	HI	EX-	LO
2-Wire Resistance	T+	T-	HI	—	LO	—
Thermocouple	T+	T-	—	HI	LO	—
4-Wire RTD	T+	T-	EX+	HI	EX-	LO
3-Wire RTD	T+	T-	EX+	—	EX-	LO
Quarter-Bridge	T+	T-	HI	—	LO	—
Half-Bridge	T+	T-	EX+	HI	EX-	—
Full-Bridge	T+	T-	EX+	HI	EX-	LO

Obr. 4.9: Měřené veličiny a jejich odpovídající piny [28]

Bude se měřit odpor získaný z platinových snímačů teploty, proto nás bude zájmat měření odporu, resp. teploty pomocí odporových snímačů RTD. Systém musí zvládnout měřit současně devět hodnot odporu, viz 4.1.1. Protože každá z karet umí měřit pouze čtyři tyto hodnoty, je zapotřebí třech měřicích karet. K dispozici bude celkem tedy 12 kanálů, přičemž tři kanály na jedné z karet zůstanou neobsazené. Vybrané důležité parametry ze specifikací měřicí karty, týkající se právě snímačů RTD (platinových), jsou uvedeny v následující Tab. 4.4. Protože pro jisté zdroje nejistot, jako jsou *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím* - u_{Mt} a *Nejistota způsobená samoohřevem* - u_{Ss} , je potřeba kromě odporu měřit i proud, obsahuje tabulka právě i tyto parametry (včetně napětí - popsáno níže v *Modifikace měřicího systému*).

Tab. 4.4: Vybrané parametry měřicí karty NI 9219 [26]

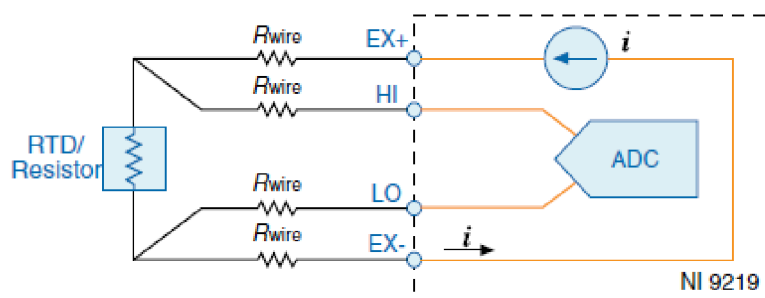
Teplota okolí $25 \pm 5^\circ\text{C}$, $-40 \div 70^\circ\text{C}$	Pt100 RTD	R(1 k Ω)	I(± 25 mA)	U(± 1 V)
$\delta_M[\%]$	$\pm 0,1$, $\pm 0,5$	$\pm 0,1$, $\pm 0,5$	$\pm 0,1$, $\pm 0,6$	$\pm 0,1$, $\pm 0,18$
$\delta_R[\text{ppm}]$	± 2400 , ± 6400	± 1200 , ± 3200	± 30 , ± 100	± 15 , ± 45

Časovou stabilitu nebo-li drift měřicí karty vyjadřuje Tab. 4.5.

Tab. 4.5: Drift měřicí karty [26]

	Pt100 RTD	R(1 k Ω)	I(± 25 mA)	U(± 1 V)
$\delta_M[\text{ppm}]$	± 15	± 15	± 15	± 10
$\delta_R[\text{ppm}]$	± 60	± 30	$\pm 0,4$	$\pm 0,2$

Velkou výhodou této karty je, že umožňuje měřit ve čtyřvodičovém zapojení, čímž se odstraní vliv odporu přívodních vodičů (vysvětleno v kapitole *Nejistota vlivem zapojení - u_{S_z}*). Schéma zapojení je na Obr. 4.10.



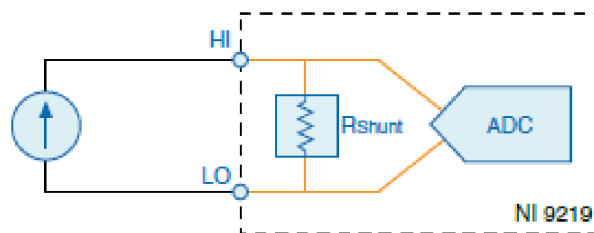
Obr. 4.10: Schéma čtyřvodičového zapojení RTD snímače [26]

Odpor vedení je znázorněn jako R_{wire} , měřicí svorky karty jako HI a LO a excitační svorky jako $EX+$ a $EX-$. Výsledný odpor se vypočítá pomocí naměřeného napětí mezi svorkami HI a LO .

Další potřebné schéma zapojení, a to pro měření proudu, je znázorněno na Obr 4.11. Měření proudu neprobíhá přímo, ale je k němu využíván bočník, pomocí kterého se získá výsledný proud přepočtem z naměřeného napětí.

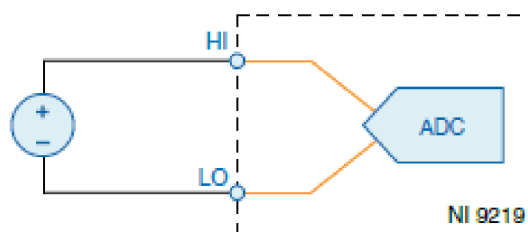
Modifikace měřicího systému

Z Obr. 4.9 je po předchozí kapitole nyní již jasné, že nelze realizovat požadované měření proudu na stejném měřicím kanále (a dokonce ani kartě - uvedeno



Obr. 4.11: Schéma zapojení měření proudu [26]

v kapitole *Měření napětí/proudu*) jako měření odporu. Proto nakonec musel být použit dvojnásobný počet měřicích kanálů (18 plus dva pro rezervní snímač - vysvětleno v kapitole 4.1.2), a tedy celkem pět měřicích karet. Bylo zvoleno řešení, které spočívá v měření proudu a napětí na různých měřicích kartách, přičemž výsledný odpor se získá výpočtem právě z těchto dvou veličin (kapitola *Měření napětí/proudu*). Schéma zapojení pro měření napětí je tedy zde, na Obr. 4.12.



Obr. 4.12: Schéma zapojení měření napětí [26]

Napětí se měří mezi svorkami *HI* a *LO*. Možné rozsahy měřeného napětí jsou $\pm 60 V$, $\pm 15 V$, $\pm 4 V$, $\pm 1 V$ a $\pm 125 mV$.

4.3 Blokové schéma měřicího řetězce

Blokové schéma celého měřicího řetězce je znázorněno na Obr. 4.13. Komunikace mezi měřicím systémem a počítačem probíhá pomocí rozhraní USB. Inspirace kapitoly pochází z [23].



Obr. 4.13: Blokové schéma měřicího řetězce

5 Nejistoty vstupující do měřicího systému

Jak již bylo řečeno v kapitole 3, velmi důležitou součástí konfirmace je také vyhodnocování nejistot, do tohoto procesu vstupujících. Pokud se zanedbají kovariance mezi jednotlivými měřeními nebo veličinami (v praxi je to běžné), můžeme výslednou nejistotu popsat podle následujícího matematického modelu:

$$u^2 = \sum u_S^2 + \sum u_M^2 + \sum u_K^2 + \sum u_C^2 \quad (5.1)$$

kde: u - výsledná nejistota konfirmace
 u_S - nejistoty související se snímači teploty (Pt100)
 u_M - nejistoty související se získáváním hodnot (Měřicí karty)
 u_K - nejistoty související s konfirmovaným zařízením (Komora)
 u_C - nejistoty související s celým měřicím řetězcem

Kapitola vychází z [3] a je pojata více obecně tak, aby práce mohla sloužit jako návod

pro konfirmaci jakékoli teplotní komory nebo i jiného (kalibračního) zařízení. Budou zde podrobně rozebrány všechny zdroje nejistot vstupujících do měřicího systému. [10] [12] [13] [30] [31] [32] [33] [34] [35]

5.1 Nejistoty související se snímači teploty

Nejistota měření snímače v bodech odlišných od kalibrace - u_{sb}

Kalibrační listy uvádějí hodnoty nejistoty snímače vždy při určitých teplotách. Problém nastává u měření, které probíhá při jiných teplotách, než jsou definované kalibrační body v kalibračním listu. V mezilehlých bodech totiž není známo chování tohoto snímače. Zdroj nejistoty lze spočítat, je to ovšem velmi zdoluhavé a náročné. Norma ČSN 60068-3-11 [12] uvádí řešení v podobě interpolace mezi dvěma konfirmovanými body. Také však dodává, že by se interpolace měla používat opatrně a pouze tehdy, jestliže jsou konfirmované úrovně rozumně blízko zkušební úrovni a služby (chlazení, ohřívání, vysoušení atd.) používané pro každou konfirmovanou úroveň jsou stejné. V praxi se to proto řeší tak, že se vezme větší z hodnot nejistot v obklopujících bodech v kalibračním listu a vynásobí se číslem 1,2.

Základní nejistota snímačů - u_{sn}

Hodnota je uvedena v kalibračním listu a neměla by být zaměňována za „chybu“ nebo „korekci“ uvedenou v tomto dokumentu. Představuje informaci o rozšířené nejistotě snímače v příslušném teplotním rozsahu. Pokud se kalibruje v okolí

teplotního bodu, ve kterém byl samotný snímač kalibrován, vezme se tato nejistota z kalibračního listu. Pokud se kalibruje v jiných teplotních bodech, než byl snímač kalibrován, postupuje se viz *Nejistota měření snímače v bodech odlišných od kalibrace* - u_{sb} . Pokud se potvrzuje mimo rozsah kalibrace snímače, nesmí se tento snímač vůbec použít. Protože je nejistota v kalibračním listu uvedena ve formě rozšířené nejistoty, musí se podělit dvěma (koeficient rozšíření pro 95 % pokrytí intervalu), abychom získali požadovanou standardní nejistotu. Může být uvedena v jednotkách $^{\circ}\text{C}$, Ω nebo jako bezrozměrná jednotka poměru W_T . V případě nového přístroje, nebo pokud kalibrační list není k dispozici, vezme se hodnota z údajů od výrobce.

Nejistota daná driftem charakteristiky (dlouhodobý drift) - u_{sd}

Nejistotu způsobuje časová (ne)stabilita přístroje, tedy pomalá změna v čase. Tomuto jevu podléhá většina přístrojů, přičemž podmínky používání mohou rychlost změny ovlivnit a u některých přístrojů může být tento vliv významný. Hodnota je odhadnuta z maximální změny (driftu) všech změn hodnot mezi po sobě jdoucími měřeními (kalibračními listy). Každá laboratoř si musí pravidelně nechávat kalibrovat svoje přístroje. Kalibrace se provádí v určitých teplotních bodech za určitý čas (2 až 3 roky). Z těchto, po sobě jdoucích, kalibračních listů se určí odchylky v každém jednotlivém teplotním bodě. Největší odchylka se poté uvede jako hodnota nejistoty dané dlouhodobým driftem. Pokud nejsou hodnoty teplotních bodů stejné, násobí se nejistota opět konstantou 1,2, viz *Nejistota měření snímače v bodech odlišných od kalibrace* - u_{sb} . V případě, že je přístroj nový nebo nejsou k dispozici kalibrační listy, jsou zohledněny údaje od výrobce o stabilitě pro výpočet nejistoty. Výrobci však většinou udávají drift za ideálních podmínek, proto by se měly použít větší hodnoty. Pokud údaje od výrobce nejsou k dispozici, je změna odhadnuta jako výše zmíněná *Základní nejistota snímačů* - u_{sn} .

Nejistota daná driftem základního odporu (krátkodobý drift) - u_{sk}

S postupem času dochází ke změně (driftu) hodnoty základního odporu, tedy hodnoty odporu při 0°C . Proto je tato hodnota, uvedená v kalibračním listu, platná pouze v době kalibrace. Nejistota se dá eliminovat dvěma způsoby. Buď se hodnota základního odporu změří těsně před každým použitím a aktualizuje se v dalších výpočtech nebo se změří těsně před a těsně po měření a do kalibračního listu se tyto hodnoty, a tím pádem i jejich změna, uvedou. V případě, že se ani jedno z toho neprovede, musí se uvést hodnota nejistoty dané krátkodobým driftem do bilanční tabulky nejistot. Sledováním vývoje hodnoty základního odporu se dá zároveň odhalit poškození teploměru.

Nejistota daná opakovatelností měření - u_{So}

Tato nejistota je nejistotou typu A (kapitola 1.2.1). Vyjadřuje tedy těsnost souhlasu mezi opakovanými měřeními stejné vlastnosti za stejných podmínek. Vypočítá se jako výběrová směrodatná odchylka výběrového aritmetického průměru (vztah 1.2). Předpokládá se, že v každém měřicím bodě se provede více měření (ideálně 10). Pokud se provede měření méně, musí se výsledná nejistota vynásobit bezpečnostním faktorem k_s v závislosti na počtu měření podle Tab. 1.1, jak bylo uvedeno právě v kapitole 1.2.1. Kvantifikace se provede tak, že se zapojí měřicí řetězec, nastaví se teplota v konfirmačním zařízení na potřebnou teplotní úroveň a po ustálení teploty se provede odměr. Poté se celý měřicí řetězec rozpojí a teplota v konfirmačním zařízení se nechá přizpůsobit teplotě okolí. Následně se řetězec opět zapojí, znovu se nastaví teplota a po ustálení zase změří. Celý proces se provede tedy vícekrát, viz výše. Opakovaná měření mohou zabránit velkým chybám a zvyšují důvěru k odhadnutým nejistotám.

Nejistota způsobená „ponorem“ - u_{Sp}

Tento zdroj nejistoty bude popisován spíše pro kalibrace snímačů v kapalinové lázni, protože se bude hovořit o „ponoru“ snímače. V případě konfirmace komor jde ale o analogii k tomuto problému. Pod pojmem „ponor“ si je v tomto případě potřeba představit, jak velká část (jaká délka) kabelů vedoucích od snímače bude umístěna v komoře a jaká část bude ponechána okolnímu prostředí. Proto bude tento pojem i nadále používán takto v uvozovkách.

Vlastní citlivý prvek snímače je vždy tepelně spojen s okolím, které teplotu prvku ovlivňuje. Nezáleží na tom, zda je to způsobeno nestabilitou teplotního pole měřené média nebo vlivy okolí při velkých teplotních gradientech. Uvádí se, že: *Snímač má být ponořený tak hluboko, že jeho povysunutí o 1cm způsobí odchylku údaje menší, než je požadovaná chyba měření.* Aby měření bylo dostatečně přesné, měla by tedy být splněna podmínka:

$$\left| \frac{\Delta T}{T_{\text{okolí}} - T_{\text{média}}} \right| \times 100 \% \leq \Delta T_{\text{dovolená}} \quad (5.2)$$

Existuje více řešení, jak se s touto problematikou vypořádat, aby byla přesnost měření dostatečná. Jedním způsobem je měřit při stejném „ponoru“ jako byl kalibrován snímač samotný. Druhým je vyzkoušet si, že je „ponor“ dostatečný. Uvádí se, že je dostatečný v případě, že se nezmění naměřená hodnota, pokud snímač „ponoříme“ hlouběji. Přibližný závěr tedy zní, že při „ponoru“ do hloubky deseti průměrů snímače je přesnost asi 0,01 %, zatímco do hloubky pěti průměrů ± 1 %.

Tato nejistota se dá sloučit s nejistotou následující (*Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{sv}*), protože jsou na sobě silně závislé.

Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{sv}

Pro tento zdroj nejistoty platí to stejné, co pro *Nejistota způsobená „ponorem“ - u_{sp}* . Kromě „ponoru“ tu bude vystupovat další pojem, a to „stonek“ teploměru. Literární zdroj totiž opět pojednává o kalibraci kovových teploměrů. Teploměrem se v tomto případě myslí klasický průmyslový kovový snímač teploty (nejčastěji Pt100), jehož součástí je i kovová konstrukce nebo-li pouzdro, ve kterém jsou samotné čidlo i jeho přívodní vodiče umístěny. Znovu jde o analogii problému, „stonek“ je v tomto případě potřeba chápat jako prosté kabely, které jsou přivedeny k samotnému čidlu.

Negativním vlivem snímačů teploty je možný odvod/přívod tepla. Na jeho velikost má velký vliv „ponor“ teploměru. Vodiče a „plášť“ (v našem případě izolace) teploměru totiž umožňují tepelnou výměnu mezi médiem a okolním prostředím. Zejména etalony mají odporový element o velikosti i jednotek cm, což může způsobit nedostatečnost „ponoru“. Podle toho, při jakých teplotách měříme, se jedná buď o přívod, nebo odvod tepla. Pokud je médium teplejší než okolní teplota (většina případů), jedná se o odvod tepla. Pokud je médium naopak chladnější, jde o přívod tepla. Nejistotu můžeme vypočítat dle vztahu:

$$u_{sv} = (T_{okolí} - T_{media})k \cdot e^{-\frac{L}{D_{eff}}} \quad (5.3)$$

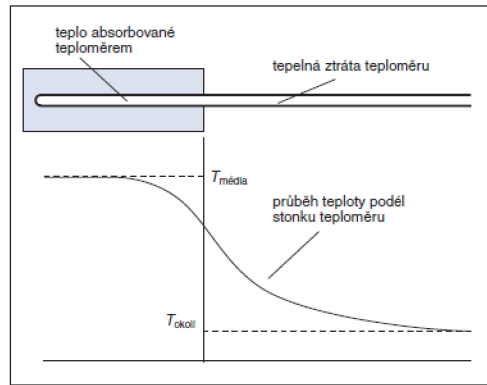
kde: L - „ponor“ snímače
 D_{eff} - efektivní průměr snímače
 k - konstanta s hodnotou blízké jedné

Důležité je, že hodnota konstanty k je jiná ve vzduchu, než v proudící kapalině, proto by se měla pro každý případ stanovit separátně, přičemž $k = 1$ platí pro dokonale promíchané médium. Obecně platí, že při „ponoření“ teploměru do hloubky minimálně patnácti průměrů snímače se zajistí přesnost 0,0001 % nebo že každým zvětšením „ponoru“ o průměr snímače se eliminuje 60 % chyby způsobené tímto zdrojem nejistoty. Průběh teploty podél „stonku“ teploměru je znázorněn na 5.1.

Tímto zdrojem je třeba se zabývat, i pokud je „ponor“ dostatečný, tudíž k vedení tepla nedochází, resp. dochází jen v minimální zanedbatelné míře. Vysvětleno je to níže v kapitole *Nejistota měření snímače v bodech odlišných od kalibrace - u_{sb}* .

Nejistota daná rozdílným prostředím při kalibraci a konfirmaci - u_{sm}

Měření by mělo probíhat ve stejném prostředí a při stejných podmínkách, v jakých byly snímače kalibrovány. Pokud tomu tak není, nebo se neměří alespoň v daném



Obr. 5.1: Závislost indikované teploty na ponoru senzoru [30]

předdefinovaném rozmezí těchto podmínek (teplota, vlhkost, tlak, ...), mělo by dojít k určité kvantifikaci nejistoty. Ta je ale velmi obtížná a složitá a navíc důsledky na měření jsou celkem malé, proto se tato nejistota většinou zanedbává.

Jeden nezanedbatelný zdroj nejistoty tímto rozdílným použitím při konfirmaci však vzniká, tudíž importované kalibrace nemusejí být při podmínkách použití plně platné. Většina kalibračních orgánů totiž provádí kalibrace teplotních snímačů v olejových nebo solných lázních. Konce snímačů jsou ponořeny a kabely jsou ponechány působení okolní teploty, kdežto při používání mohou být jak snímače, tak i kabely, uloženy v prostředí komory. Tím pádem při kalibraci snímačů dochází k vedení tepla, zatímco při konfirmaci komory k tomuto jevu docházet nemusí. Tento vliv musí být tedy uvažován a jeho velikost vyhodnocena nebo alespoň odhadnuta.

Nejistota způsobená samoohřevem - u_{S_s}

Měření odporu zahrnuje průchod proudu odporovým elementem. To má za následek vznik Jouleova tepla, tím pádem dochází k zahřívání (samoohřevu) elementu. Ten má pak většinou vyšší teplotu než jeho okolí a snímač tak měří odlišnou teplotu. Při měření je potřeba samoohřevný mechanismus sledovat nebo zvolit takový měřicí proud, aby byl vliv zanedbatelný. Nejistota je závislá nejenom na velikosti měřicího proudu, ale také na samotných měřicích podmínkách. Nejistota se dá kvantifikovat opět více způsoby. První z nich se řídí následujícím vztahem:

$$u_{S_s} = \frac{R_T I^2}{h} \quad (5.4)$$

kde: R_T - elektrický odpor

I - měřicí proud

H - ztrátová konstanta, často udávaná i jako převrácená hodnota s názvem „koeficient samoohřevu - h “

Ze vzorce tedy vyplývá, že nejistota je tím větší, čím větší je hodnota měřeného odporu a měřicího proudu. Proto je třeba tuto nejistotu kompenzovat např. hlavně u Pt1000. Hodnota ztrátové konstanty závisí na podmínkách měření. Nejběžnější rozmezí hodnot jsou uvedena v následující Tab. 5.1.

Tab. 5.1: Typické hodnoty ztrátové konstanty h a chyby měření [30]

Typ média	$h[\text{mW}\cdot\text{K}^{-1}]$	Chyba[K]
vzduch bez proudění	1 ÷ 10	0,01 ÷ 0,1
voda bez proudění	2 ÷ 400	0,00025 ÷ 0,05
proudící voda	10 ÷ 1000	0,0001 ÷ 0,01

Pro maximální přesnost se aplikuje měření při dvou proudech I_1 a I_2 (druhý způsob) a provedení příslušné korekce tak, aby se měřilo prakticky při nulovém proudu. Tuto myšlenku demonstruje vztah 5.5, kde se předpokládá, že závislost odporu na čtverci měřicího proudu je v malém rozsahu lineární.

$$R_0 = R_1 - I_1^2 \left(\frac{R_2 - R_1}{I_2^2 - I_1^2} \right) [\Omega] \quad (5.5)$$

kde: R_0 - odpor při nulovém měřicím proudu
 R_1 - odpor při proudu I_1 (zpravidla nižším)
 R_2 - odpor při proudu I_2

Pokud je $I_1 = 1 \text{ mA}$ a $I_2 = \sqrt{2} \text{ mA}$, pak $R_0 = R_1 - (R_2 - R_1)$, tedy rozdíl $R_2 - R_1$ udává hodnotu samoohřevu pro měřicí proud 1 mA. Některé firmy také uvádí hodnotu samoohřevu v datasheetu.

Nejistota způsobená hysterezí - u_{sh}

Obecně je hystereze pojem, který vyplývá z rozdílu v chování dynamického systému, když se blíží z jiné strany (myšlena charakteristika). Výstupní veličina tedy nezávisí pouze na nezávisle proměnné vstupní veličině, ale i na předchozím stavu systému. Této skutečnosti se říká paměťový efekt. Při měření teploty hystereze plyne z rozdílu odporů při dané teplotě, který je založen na tepelné historii, jíž byl snímač vystaven. Znamená to tedy, že odpor snímače bude jiný, když se teplota blíží z rostoucího směru (ohřátí) a když se blíží ze směru klesajícího (ochlazení). Velikost tohoto rozdílu bude záviset na velikosti teplotní změny a návrhu snímače. Příčinami mohou být např. mechanické pnutí, vlhkost nebo oxidace. U některých typů snímačů teploty může být hystereze velká. Důležité je také zmínit, že k této závislosti odporu na teplotě (hysterezi) dochází opakovaně.

Nejistota daná (ne)linearitou - u_{Si}

Nelinearita je velikost odchylky výstupu snímače od přímky vypočtené metodou lineární regrese. Předpokládá se, že by odchylka mohla být v obou směrech, a že bude v rámci stanovené hodnoty nelinearity stejně pravděpodobná. Má se tudíž předpokládat rovnoměrné rozložení.

Nejistota interpolace snímače - u_{Si}

Při měření dochází k interpolaci snímače. Při přepočítávání hodnot odporu na teplotu dochází vlivem nedokonalé přesnosti interpolační rovnice (záleží na počtu konstant rovnice) k zanesení nejistoty do měření. Nejistota se dá určit z kalibračního listu snímače porovnáním naměřené hodnoty odporu při dané teplotě a hodnoty odporu vypočtené podle konstant a interpolační funkce snímače. Při použití dostatečného počtu konstant (obvykle stačí dvě - A a B) je však tento zdroj zanedbatelný.

Nejistota daná rychlostí odezvy - u_{Sr}

Při confirmaci je nutné brát ohled na konečnou rychlost odezvy teploměru na změny měřené teploty, aby nedocházelo k unáhleným (brzkým) odečtům údajů. Nejistota se dá kvantifikovat podle vztahu:

$$u_{Sr} = (T_{poč} - T_{kon}) e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \quad (5.6)$$

kde: τ - doba od počátku změny
 τ_0 - časová konstanta soustavy

Jde vlastně o soustavu prvního řádu. Při průmyslovém provedení jde o systém druhého řádu obvykle bez harmonické složky, ale s inflexním bodem. V tomto případě je doba odezvy delší. Při měření ve vzduchové komoře je nejistota výrazně větší než při měření v kapalně lázni. I zde lze použít zjednodušující podmínku: *Má-li chyba být menší než 1 %, je po změně teploty nutné vyčkat po dobu rovnou nejméně pětinásobku časové konstanty.* [30]

Nejistota daná hmotou/tloušťkou snímače/odvodem tepla - u_{Sbt}

Médium v teplotní komoře musí mít několikanásobně větší tepelnou kapacitu než hmota samotného snímače. Pokud toto neplatí, musí se znát vliv použití takové kombinace snímače a prostředí, nebo se toto prostředí vůbec nesmí použít. Při použití platinového snímače, což je nejčastější řešení, je tento vliv ale zanedbatelný, protože platina má velmi malou měrnou tepelnou kapacitu (133 J/kgK). Vzduch, který se používá v teplotních komorách, má při 0 °C hodnotu 1000 J/kgK. Média

používaná v jiných kalibrátorech, jako jsou např. olej nebo voda, mají hodnoty ještě vyšší.

Nejistota vlivem zapojení - u_{Sz}

Pokud je snímač zapojen v klasickém dvou vodičovém zapojení, vzniká nejistota vlivem odporu přírodních vodičů. V tomto případě by se správně měl tento odpor při dané teplotě změřit a následně provést korekce, protože jinak je vliv na měření příliš velký a měření je tím pádem znehodnocené. Takové měření nemůže dosáhnout přesnosti lepší než 0,2 °C. Dalším, a zároveň nejlepším řešením, je použít čtyřvodičové zapojení, které vliv odporu přírodních vodičů eliminuje a nejistota je tak zanedbatelná. Princip spočívá v zanedbatelném množství proudu, který teče přes svorky *HI* a *LO* (Obr. 4.10), kvůli vysoké vstupní impedanci *ADC*. Tento pohled je čistě elektrický. Zdroj této nejistoty ale může také pocházet např. v připojení měřicího systému k PC pomocí různých komunikačních rozhraní (USB, RS-232, Ethernet, GPIB a další) nebo v připojení měřicích karet se šasim.

5.2 Nejistoty související se získáváním hodnot

Stanovení nejistoty dané *dlouhodobým driftem* - u_{Md} je shodné s kapitolou 5.1.

Základní nejistota přístroje získávajícího hodnoty - u_{Mn}

Teoretické informace viz 5.1 - *Základní nejistota snímačů*

Pokud se nejistota určuje z údajů od výrobce, platí vztah:

$$u_{Mn} = \frac{\delta_M X_M + \delta_R X_R}{100} \quad (5.7)$$

kde: δ_M - chyba z naměřené hodnoty

X_M - naměřená hodnota

δ_R - chyba z měřicího rozsahu

X_R - hodnota měřicího rozsahu

Chyba z měřicího rozsahu se určuje více způsoby, podle toho jak je zapsána v datasheetu. Může být zadána přímo hodnota (většinou v procentech), kdy se za ni v některých případech připisuje značka FS (full scale – plný rozsah).

$$\text{Př. } \pm(0,9 \text{ rdg} + 0,1 \text{ FS})$$

Někdy se také uvádí pomocí chyby tzv. „d“. Ta udává chybu v počtu digitů (jednotek) posledního místa displeje. Její přepočet na nejistotu z měřicího rozsahu závisí na maximálním počtu zobrazovaných míst displeje.

Př. $\pm(0,9 \% + 7 \text{ digit})$, *maximální počet indikovaných jednotek* : 2000

$$\delta_R = \frac{d}{\text{maximální počet indikovaných jednotek}} 100 = \frac{7}{2000} 100 = 0,35 [\%] \quad (5.8)$$

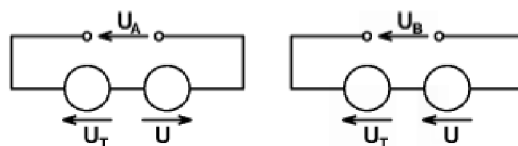
Nejistota způsobená rozlišením - u_{Mr}

Nejistotu způsobuje rozlišení multimetru, respektive nejméně významný digit. Pro tento pojem lze použít zkratku LSD (z anglického least significant digit) přeneseně z LSB (least significant bit). V praxi to znamená, že se přesně neví, jakou hodnotu přístroj ukazuje na posledním místě displeje. Jako příklad může posloužit multimetr měřící elektrický odpor s rozlišením $6\frac{1}{2}$ digitu. Tento přístroj může zobrazovat při měřicím rozsahu 100Ω hodnotu $100,0000 \Omega$. Poslední, nejméně významný digit je v řádu desetin miliohmů. Nejistota způsobená rozlišením tedy je $0,1 \text{ m}\Omega$.

Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt}

Vlivem velkých teplotních spádů v měřicím obvodu a různorodostí použitých materiálů vzniká parazitní termoelektrické napětí (dále termonapětí) jako důsledek termoelektrického jevu. Při stejnosměrném měření limituje přesnost až na $20 \text{ m}^\circ\text{C}$. V případě přesného měření je tedy třeba zkontrolovat přítomnost tohoto napětí a případně ho eliminovat. Eliminace se může provést komutací měřicího proudu či střídavým napětím. Nejběžnějším způsobem je nahradit multimetr použitím poměrového odporového mostu, napájeného ze střídavého zdroje napětí, který při své činnosti měří poměry hodnot elektrického odporu. Další možností je jeho kvantifikace a následné uvažování v bilanční tabulce. To lze v případě zjednodušeného předpokladu, že součet vlivu všech termonapětí v měřicím obvodě bude mít stále stejnou hodnotu i znaménko. Potom se při porovnání naměřených hodnot klasickým měřením a při komutaci měřicích svorek tento vliv spočítá podle vztahu 5.9, jenž vychází ze soustavy rovnic odvozené ze schémat (Obr. 5.2).

$$u_{Mt} = \frac{U_A + U_B}{2} [V] \quad (5.9)$$



Obr. 5.2: Schéma zapojení pro kvantifikaci termonapětí [35]

5.3 Nejistoty související s teplotní komorou

Postup stanovení nejistoty dané *hysterezí* - u_{Kh} , *opakovatelností* - u_{Ko} a *dlouhodobým driftem* - u_{Kd} je shodný s kapitolou 5.1.

Prostorové a časové rozložení teploty ve stabilizované teplotní komoře musí být kvantitativně stanoveno a musí se vzít v úvahu při vyhodnocování celkové nejistoty, protože se jedná o hlavní složky. Především prostorová homogenita představuje největší příspěvek k celkové nejistotě.

Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk}

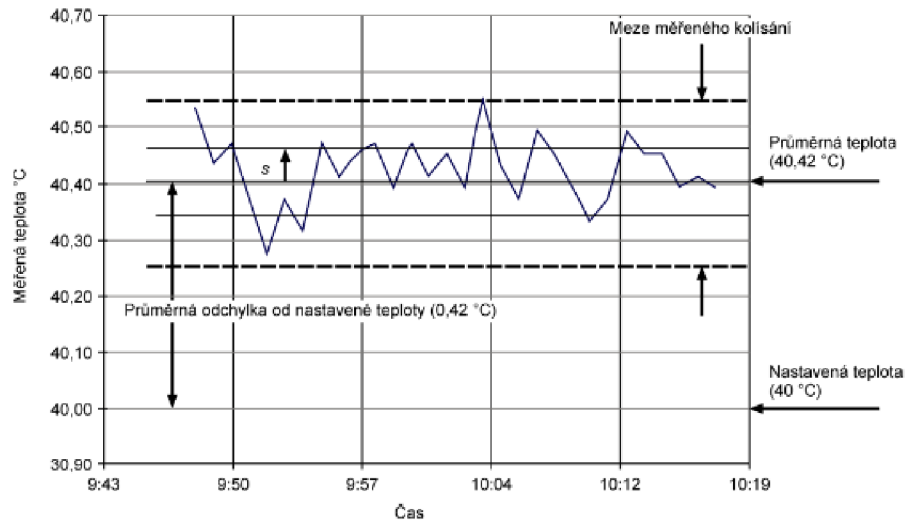
Kolísání, nebo také krátkodobá stabilita teploty média, jsou změny měřených podmínek, které se vyskytují za určité časové období a uplatňují se při většině měření. Silně závisí na typu regulace a toku média uvnitř komory. Protože jsou měření prováděna v krátkých časových intervalech, krátkodobá stabilita je relevantní.

Snímače teploty mohou reagovat různou rychlostí, nemusejí tedy zobrazovat, co se v komoře skutečně děje v daný okamžik. Kvantifikování rozsahu kolísání se provádí mnoha měřeními pomocí přístrojů, které mají rychlou odezvu. Podmínky v komoře často pravidelně cyklují kolem nastaveného teplotního bodu. Pokud se měření provádí ve stejném teplotním bodě každého cyklu, bývá výsledek zavádějící. Tento jev se nazývá chyba vzorkování a je důležité ji detekovat, popř. zabránit jejímu vzniku, např. vzorkováním nejméně čtyřikrát rychlejším, než je cyklus komory, nebo vzorkováním v náhodných intervalech.

Vliv kolísání na výpočet střední hodnoty může být snížen odečtením řady údajů a výpočtem nejistoty střední hodnoty, jako výběrové směrodatné odchylky. Zlepšení výsledku je funkcí druhé mocniny počtu údajů, kterých stačí obvykle 20. V tomto případě se předpokládá normální rozdělení, a jelikož je vstupem do bilance nejistot výběrová směrodatná odchylka z opakovaných měření, je koeficient rozložení 1. Druhou možností může být průběžné zaznamenávání teplot (po teplotní stabilizaci), většinou po dobu delší než 30 minut. Maximální teplotní rozdíl ve specifikovaném bodě komory je pak použit jako složka celkové nejistoty s rovnoměrným rozložením.

(Malý) snímač s rychlou odezvou zachytí špičky a sedla cyklického řízení klimatické komory. V opačném případě (velký) snímač s pomalou odezvou může taktéž

ukázat cyklickou povahu řízení, ale zaznamenané špičky a sedla mohou být potlačeny v důsledku pomalé odezvy snímače. Toto má za následek nutnost zahrnout do výpočtu složku nejistoty pro započítání neschopnosti snímače detekovat špičkové teploty (*Nejistota daná rychlostí odezvy - u_{Sr}*). Kolísání je znázorněno na Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Znázornění kolísání snímače teploty [12]

Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}

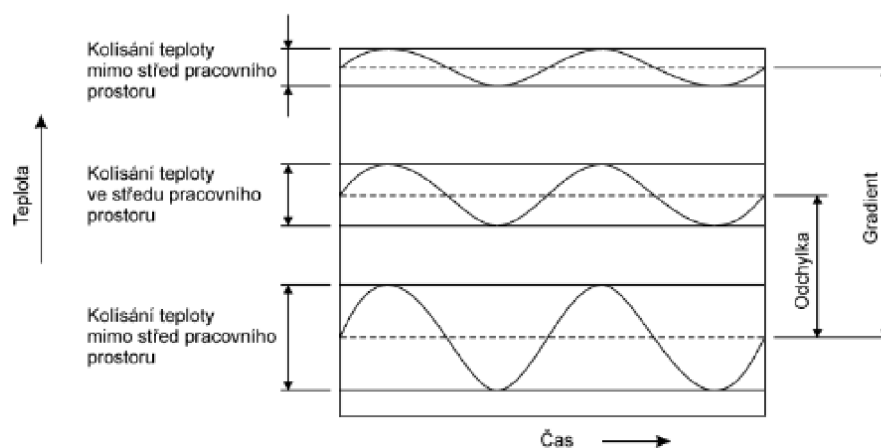
Prostorová homogenita je gradient, který je pozorován jako změna teploty naměřené snímačem, podle změny jeho pozice uvnitř lázně. Základní gradienty, které mohou být pozorovány, jsou vertikální a horizontální. Někdy je ale vhodnější definovat axiální a radiální gradient, protože většina kalibračních zařízení má buď válcový tvar nebo obsahuje vyrovnávací bloky. Příspěvek nejistoty od axiálního gradientu je určen jako maximální rozdíl teploty mezi dvěma různými pozicemi v axiálním směru. Pro radiální gradient platí to stejné, jen v radiálním směru.

Teplotní gradienty, což jsou rozdíly teplot mezi jednotlivými místy v teplotně stabilizované komoře, mohou být sníženy zavedením kovového stabilizačního bloku s otvory pro uložení snímačů. Měření může být zahájeno po ustálení teploty v komoře a po tom, co snímače samotné dosáhnou tepelné rovnováhy.

K odhadu velikosti gradientů teploty se musí provést měření z různých oblastí na zkoušeném vzorku nebo po pracovním prostoru komory, viz kapitola 4.1.1, pokud se kalibruje prázdná komora.

Nejistota daná prostorovou homogenitou (odchylkou) teploty - u_{K_o}

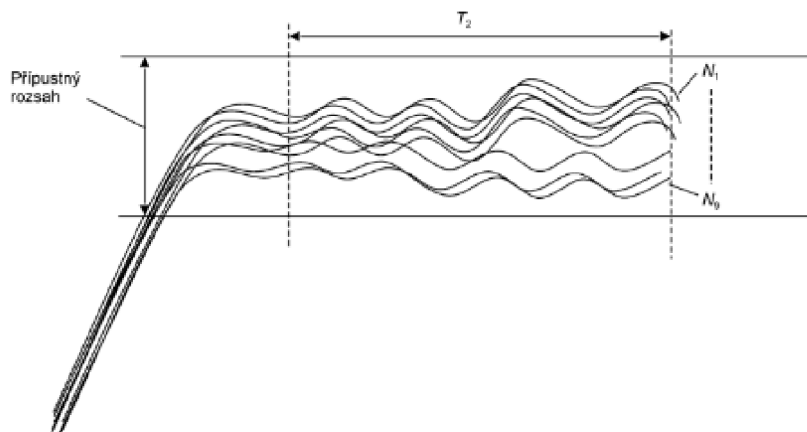
Trochu jiným přístupem k prostorové homogenitě je odchylka teploty v prostoru. Tato nejistota vyplývá ze stejného zdroje jako *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{K_g}* . Rozdíl je pouze v pohledu na danou problematiku. Zatímco gradientem je myšlen maximální rozdíl mezi jakýmkoli dvěma body v komoře, odchylka teploty vyjadřuje rozdíl střední hodnoty teploty ve středu komory a v jakémkoliv jiném bodě komory. Tato nejistota se většinou do bilanční tabulky nezahrnuje, protože předchozí nejistota je dostatečně vypovídající o tomto zdroji nejistoty. Porovnání zmíněných nejistot je ukázáno na Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Porovnání rozdílů teplot [10]

Nejistota daná stabilizací ((ne)ustálením) teploty v komoře - u_{K_n}

Aby měření mělo smysl, musí být měřená teplota v komoře ustálená. Při nastavování konfirmační teploty se tedy musí počkat, až se hodnota měřená multimetrem, odporovým mostem nebo měřicí kartou, naprosto ustálí. Teplota v pracovním prostoru dosažená a udržovaná v přípustném rozsahu je uvedena na Obr. 5.5. Přípustný rozsah je založen na kolísání teploty (*Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{K_k}*), odchylkách v prostoru (*Nejistota daná prostorovou homogenitou (odchylkou) teploty - u_{K_o}*) a na gradientu teploty (*Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{K_g}*), podle specifikace teplotní komory. Tu lze nahradit specifikacemi daných typů zkoušek, které mají být v komoře prováděny, protože konfirmace se provádí mj. i za účelem posouzení vhodnosti komory pro tyto zkoušky, viz norma ČSN 60068-3-5 [10]. Specifikovaná doba T_2 je minimálně 30 minut poté, co jsou teploty v měřicích bodech (např. N_1 až N_9) v přípustném rozsahu.



Obr. 5.5: Stabilizace teploty komor do 2 000 l [10]

Celková průměrná nejistota - u_{Kc}

Tento zdroj nejistoty se používá v případě, že je proveden malý počet měření (popsáno v kapitole 4.1), protože tehdy se může stát významným. V ostatních případech se spíše nepoužívá. Konečná celková průměrná hodnota všech naměřených dat totiž nemusí reprezentovat skutečný průměr. Nejdříve se musí vypočítat celková směrodatná odchylka ze všech měření všemi snímači, která se následně podělí druhou odmocninou počtu měření. Zdroj nejistoty je také nazýván jako „směrodatná odchylka průměrné hodnoty“.

Nejistota způsobená rozlišením - u_{Kr}

Teoretické informace viz kapitola 5.2.

Jedná se o rozlišení řídicí jednotky komory, které musí být zahrnuto do analýzy nejistot pouze v případě, že se neprovádí konfirmace v době zkoušky.

Velmi důležitou součástí je také uvážení vlivu zkušební vzorku na podmínky v komoře. Pokud není velikost zkušební vzorku nevýznamná ve srovnání s pracovním prostorem komory, má se pro stanovení příspěvku k nejistotě uvážit použití nějaké další metody. Zvláště důležité jsou v tomto případě zátěže uvolňující teplo.

5.4 Nejistoty související s celým měřicím řetězcem

Nejistota způsobená přenosem tepla - u_{Cp}

Jak je všeobecně známo, teplo může být přenášeno třemi různými způsoby: vedením (vedení tepla kabely), prouděním (přenos tepla teplosměnnou kapalinou nebo vzduchem) a sáláním (z lampy, pece nebo i slunce). Většinu nejistot je možné odstranit

správnou izolací citlivého prvku. U konfirmací je největší problém s přenosem tepla sáláním. Teplo se může přenášet např. ze svítidel v místnosti nebo jiných předmětů vyzařujících tepelnou energii. Proto by komora měla být dostatečně tepelně izolována od okolí. Pokud je toto splněno, nejistota je zanedbatelná. Tento zdroj nejistoty je nejčastější problém např. u bezkontaktního měření teploty povrchů.

Vlivy sálání mohou být v některých komorách velké. Jestliže snímače dávají naměřené hodnoty, které jsou neočekávaně velké nebo se mění od jedné zkoušky ke druhé, nebo pokud existuje podezření, že by mohl vzniknout problém se sáláním, má se provést další zkouška se snímači, které mají odlišné vyzařovací barvy (např. světlou vedle tmavé). Příznakem sálání může být např. teplota jakékoliv části komory, jež může zkušební vzorek pocítit, a je významně odlišná od nastavené hodnoty. S vyšší teplotou (nad 100 °C) má sálání stále větší vliv na měřicí snímač i na vzorek.

Nejistota vlivem teploty okolí - u_{Ct}

Mimo určitý interval teploty okolí je tato složka významná, protože všechny měřicí přístroje mají v technické specifikaci určeny rozmezí teploty okolí, ve kterých by se měření mělo pohybovat. Pokud se měří při teplotě, jež neodpovídá předepsanému rozsahu, postup, jak s touto nejistotou nakládat, většinou lze najít v údajích od výrobce. Pokud informace nejsou k dispozici, nesmí se takovýto měřicí přístroj používat. V předepsaném teplotním intervalu je nejistota ovšem zanedbatelná.

Nejistota daná kontaktem mezi snímači a prostředím - u_{Ck}

Týká se pouze měření v blokovém kalibračním zařízení. Měl by být zajištěn dostatečný tepelný kontakt mezi snímači a kovovým blokem. Pokud to teplota a technický stav zařízení dovolují, mělo by se používat kontaktní médium pro maximalizování tepelného kontaktu. V případě, že je snímač v jímce volně se vzduchovou mezerou mezi citlivým prvkem a blokem větší než 1 mm, měla by se nejistota kvantifikovat.

Nejistota daná rozdílem v dynamice snímačů - u_{Cd}

Souvisí s *Nejistota daná rychlostí odezvy - u_{Sr}* . Každý snímač má své dynamické vlastnosti. Proto je zapotřebí sledovat rozdíly v dynamice snímačů. V tomto případě se jedná o dobu ustálení. Pokud má být potenciální zdroj nejistoty zanedbatelný, hodnoty se musejí odečítat s dostatečnou prodlevou tak, aby všechny snímače byly v ustáleném stavu. Vhodné je tedy zjistit časovou konstantu všech snímačů. Jestliže se odečty budou provádět v intervalech alespoň pětinasobku největší z časových konstant, lze považovat tuto nejistotu za zanedbatelnou.

6 Softwarová aplikace

6.1 Návrh aplikace

K zpracování a vyhodnocení dat bude sloužit softwarová aplikace vytvořená v programu LabView, kompatibilní s měřicími přístroji (stejný výrobce National Instruments). Aplikace bude obsahovat možnost nového naměření, a tím pádem i kvantifikování všech zdrojů nejistot, které mají nezanedbatelný vliv na výslednou nejistotu měření. Její vyhodnocení bude také nedílnou součástí programu, který bude vytvořen architekturou stavového automatu s následujícími stavy:

- Čekání na start
 - Jak už z názvu vyplývá, stav bude sloužit k odstartování celého programu. Po zmáčknutí tlačítka se program spustí a následně načte jednotlivé zdroje nejistot. Načítat se bude moci různými způsoby (více v následující kapitole 6.2.1). Nalézat se zde bude i seřazování jednotlivých zdrojů nejistot podle názvu, což bude potřeba v dalších stavech.
- Inicializace
 - Stav *Inicializace* bude obsahovat vytvoření „tasku“, který je potřeba pro měření a práci s použitými ovladači DAQmx. Dále zde bude i konfigurace všech virtuálních kanálů, jenž budou v programu použity. Jedná se celkem o čtyři kanály, sloužící k měření teploty, odporu, napětí a proudu, přičemž konkrétní důvody jsou vysvětleny opět v další kapitole 6.2.2.
- Měření
 - Zde se bude provádět měření jednotlivých zdrojů nejistot, které nejsou kvantifikovány (zadány) dopředu a je potřeba určit jejich hodnotu novým měřením. U každého zdroje se provede měření daných veličin, které jsou potřeba pro jeho výpočet. Další věcí obsaženou tímto stavem je tzv. dialogové okno. Uživatel tedy bude informován o průběhu daných měření, a zároveň bude vždy vyzýván k potřebné akci, která povede k správnému naměření dat.
- Předzpracování
 - Tento stav slouží k předzpracování naměřených (ale i neměřených) dat, tedy těch, které zadá sám uživatel. Jedná se o data, které budou mít jinou jednotku, než je potřeba, nebo budou zadány pomocí dvou hodnot, příklady jsou uvedeny v kapitole 6.2.6. Výstupem stavu bude u každého zdroje nejistoty jeho kvantifikovaný odhad s příslušnou jednotkou požadované veličiny.

- GUM
 - Nyní následují stavy, ve kterých se realizují různé metodiky výpočtu výsledné nejistoty měření. Již podle názvu se jedná o metodu GUM, která je popsána v kapitole 1. Podrobnější popis konkrétního řešení bude následovat v další kapitole 6.2.7.
- Monte Carlo
 - Druhou metodikou je Monte Carlo - kapitola 2. Její podrobný popis se nachází v kapitole 9.2, kde se sice jedná o zdrojový kód v programu Matlab, ale postup je naprosto identický.
- Grafy
 - Ve stavu *Grafy* budou zobrazeny výsledky obou metod výpočtu výsledné nejistoty. Jedná se o histogramy kumulativní distribuční funkce s výsledným rozložením teploty a vyznačenými intervaly nejistot, vypočítané metodou Monte Carlo. Pro porovnání zde budou vygenerovány i histogramy s intervaly nejistot, které vyjdou metodou GUM.
- Zápis do souboru
 - Tento stav bude sloužit k ukládání dosažených dat do .xml souboru. Zapisování je v programu zakomponováno samozřejmě z důvodu archivování výsledků confirmace, ale také z důvodu možnosti načtení dat z předešlých confirmací při confirmaci právě prováděné, což byl jeden z požadavků na měřicí aplikaci. Ukládat se budou všechna naměřená data, výsledné, ale i dílčí hodnoty nejistot získané oběma metodami.
- Ukončení
 - Zde se budou pouze ukončovat vytvořené „tasky“ a nulovat všechna pole.

Aplikace bude splňovat následující požadavky:

- Úloha („task“) měření teploty s ovladači DAQmx
- Variantně přímé měření T, nepřímé měření T - přímé měření R s výpočtem, nepřímé měření R - přímé měření U a I s výpočtem
- Experimentální měření dílčích zdrojů nejistot
- Možnost různorodého zadávání hodnot pro kvantifikaci nejistot
- Zpracování dat aplikací
- Logování dat aplikací
- Výpočet nejistoty metodami GUM a Monte Carlo, včetně histogramu
- Výstup jako .xml soubor s domluvenou strukturou se zpětným načítáním

6.2 Popis řešení aplikace

Na začátek jen uvedu, že aplikace při měření ani při testování neproběhla celá od začátku do konce. Při měřicím experimentu byla otestována měřicí část, která končí stavem 6.2.3 a naměřená data byla následně uložena do souborů. Při testování výpočtové části, počínaje stavem 6.2.4, se data opět načetla a dále se zkoumala až zmíněná druhá část programu. Toto je naprosto legitimní způsob, jak aplikaci otestovat a výsledná funkce tím nemůže být poznamenána.

Byly vytvořeny „tasky“, jak pro měření odporu, tak i pro „přímé“ měření teploty, resp. měří se samozřejmě odpor, ale virtuální kanály jsou nakonfigurovány přímo na teplotu. Dochází zde tedy k vnitřnímu (skrytému) přepočtu odporu na teplotu, který můžeme ovlivnit pouze vybráním daného typu RTD snímače, a tudíž jeho konstant A,B a C. Jedná se vlastně o dvojí řešení, které bude sloužit k porovnání výsledků, jak pro samotné měření teplot v různých místech komory, tak i pro výslednou nejistotu.

Kvůli řešení, které jsme nakonec použili na změření *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt} a Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}* , se aplikace (*MMSK_RTverze*) výrazně zkomplikovala, viz kapitola *Měření napětí/proudu*. Protože již byla naměřena data klasickým způsobem a celá aplikace otestována, ponechal jsem staré řešení a dodělal potřebné modifikace. Kvůli budoucímu používání, kde jsou požadavky na jednoduchost a hlavně co nejkratší čas, vznikla druhá (nekompletní, ale pouze připravená k dalšímu použití) verze programu (*MMSK_UIverze*), která obsahuje pouze druhý způsob měření - proudu a napětí, ze kterých se další potřebné údaje vypočítají. Tímto způsobem se výrazně usnadní práce a ušetří čas uživateli, protože nebude muset nic přepojovat, a také se velmi zjednoduší samotný kód programu.

Principem funkce celého řešení je stavový automat, který má tedy devět stavů. Všechna data (zadaná i naměřená) jsou přenášena pomocí „clusteru“, jenž obsahuje data uvedená v následující kapitole.

6.2.1 Čekání na start

Program po spuštění čeká na zmáčknutí tlačítka, což je realizováno „event“ strukturou. Po zmáčknutí tlačítka nastává proces načítání dat. Jsou zde zakomponovány celkem dva, resp. tři způsoby načítání, které jsou vybírány „case“ strukturou.

(„Case“ *False*) se aplikuje v případě prvního použití programu nebo při potřebě nového naměření dat pro jednotlivé zdroje nejistot (celkem jich je uvažováno 11). Princip spočívá v načtení jejich hodnot zadaných uživatelem v ovládacím panelu a přiřazení dalších potřebných údajů, které jsou zabaleny do společného „clusteru“.

Přesně v tomto pořadí jsou to: indikace, jestli je zadaná hodnota nulová, rozdělení pravděpodobnosti, jednotka, název a další (naměřená) data uložená v „clusteru“. Jedná se o data vždy ve dvou 2D-polích a k nim přiřazenému „enumu“, který nese informaci o jednotce, jež hodnotám náleží. V této verzi programu (vysvětleno na začátku kapitoly (6.2)) se jedná celkem o čtyři jednotky měřených veličin - $T[^\circ\text{C}]$, $R[\Omega]$, $U[\text{V}]$ a $I[\text{A}]$.

Zde přichází na řadu další způsob načítání. Tentokrát jde o čtení ze souborů .csv, do kterých se ve stavu 6.2.3 zapisují naměřená data jednotlivých dílčích zdrojů nejistot. Funkce je v programu implementována spíše kvůli testování, ale může sloužit i jako možnost pro přerušení konfirmace a následné pokračování i v jiný den. Celé načítání .csv souborů je minimalizováno do „subVI“ s názvem *SubVI_CteniZeSouboru*, které na vstupu požaduje pouze zadání konfirmační teploty, cestu a název .csv souboru. Protože všechny konfirmované teplotní body od každého zdroje nejistoty se ukládají do jednoho souboru, odpovídá název souboru názvu dané nejistoty. Pomocí výše zmíněné indikace získá aplikace informaci o tom, jestli je daný zdroj nejistoty pro jeho kvantifikaci třeba měřit (není zadán kvantifikovaný odhad nejistoty) nebo ne (je zadán odhad). Jako poslední u tohoto načítání přichází na řadu volba způsobu určení celkové nejistoty měření, což je vysvětleno v kapitole 8. U druhé varianty („case“ *False*) je zadaná nejistota, resp. její kvadrát, pouze vynásoben devíti (podle počtu přístrojů) a sečten geometrickým součtem.

Druhou plnohodnotnou možností („case“ *True*), je načtení všech dat z předešlé konfirmace, uložených v .xml souboru ve stavu 6.2.10. V tomto případě se provede pouze nezbytně nutné nové konfirmační měření, ze kterého se získají hodnoty nejistot, viz kapitoly *Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk}* a *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}* , které je nutno kvantifikovat vždy znovu při dané konfirmaci. Všechny údaje, které se dají tímto způsobem načíst, jsou rozebrány ve stavu 6.2.10, přičemž se ale využijí v podstatě jen kvantifikované odhady zdrojů nejistot. Načtou se sice i naměřená data, která se již dále nezpracovávají, protože by to bylo nežádoucí. Čtení všech ostatních údajů je připraveno k použití, ale při nové konfirmaci je to opět (pravděpodobně) zbytečné a v diplomové práci jsem tuto možnost také nevyužil.

Stav obsahuje rovněž nulování spouštěcího tlačítka jednu sekundu po jeho zmáčknutí (řešeno „flat“ strukturou). Další funkcí je třídění zdrojů nejistot a jejich příslušných parametrů uvnitř „clusteru“, podle jejich názvu. To bude potřeba (a vysvětleno) v dalších stavech. Nedílnou součástí je i blokování „controlů“, které nebudou dále při vykonávání programu využity, což aplikace pozná podle indikace. Poslední věcí je ukončování programu, opět pomocí (jiného) tlačítka, které funguje vlivem struktury programu pouze v čase mezi vykonáváním jednotlivých stavů.

6.2.2 Inicializace

Stav *Inicializace* vytváří a inicializuje virtuální kanály potřebné pro měření. Vytváří se zde „tasky“ pro již zmíněné čtyři veličiny, a tedy i virtuální kanály. Protože se měří devíti snímači, obsahuje každý „task“ devět virtuálních kanálů, které jsou namapovány na jim odpovídající fyzické kanály zapojené podle Obr. 7.2. Všechny parametry daných měření („tasků“) si uživatel může zadat sám v ovládacím panelu. V práci jsou však přednastavené tak, aby bylo možné program spustit jedním kliknutím. Zajímavostí může být získávání konstant A, B a C u „přímého“ měření teploty. Na základě zvoleného RTD, kdy každý typ má své příslušné číslo, se načtou hodnoty jednotlivých konstant, které jsou předem zjištěné a nadefinované pro každý RTD. Konstanty si však může zadat i sám uživatel přímo v ovládacím panelu. Ve všech ostatních případech se „controly“ příslušející konstantám opět pro další použití zablokuje.

6.2.3 Měření

Tento stav si nejprve na začátku zjistí, jestli má daný zdroj nejistoty měřit, viz indikace ve stavu 6.2.1. Zde bylo potřeba přidělat ošetření kvůli testovacím souborům, protože pokud se načtou stará data, je nežádoucí nové měření. Následně se program větví na několik případů („case“) podle dané nejistoty. Každý zdroj totiž potřebuje trochu odlišný způsob měření, který se liší většinou v počtu měření, ale i (pouze v této verzi) měřenými veličinami. Protože je vstupní „cluster“ již seřazený podle názvu, budou se vykonávat (měřit) nejistoty podle požadovaného pořadí, a stejným způsobem budou tak i níže popisovány. Kvůli optimalizaci (minimalizaci) kódu, jsou k sobě připojeny ty zdroje nejistot, u kterých se provádí stejný typ měření (může být ale různý počet měření) tak, aby se stejný kód v programu neopakoval. Modifikace potřebné k naměření nejistot vycházejí z postupu jejich kvantifikování a jsou uvedeny v kapitole 5 popř. 8. Ve všech kapitolách jsou jednotné názvy.

Hlavní část kódu v tomto stavu tedy spočívá v měření. Každé měření je spuštěno stisknutím tlačítka, opět realizováno „event“ strukturou (výjimkou je pouze Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk} a ostatní). Účel tohoto řešení je v neodhadnutelné době manipulace uživatele s přístroji, ustálení teploty v komoře (týká se dalších nejistot) a celkově se tím nevyvíjí časový tlak na uživatele. V měření jednotlivých zdrojů se tedy může pokračovat kdykoli. Řešení s sebou ale přináší drobnou nevýhodu, která spočívá v nutnosti (pro správnou funkci) použití unikátního tlačítka pro každou „event“ strukturu. V tomto případě se jedná celkem o tři. Měření dvou různých veličin je odděleno „flat“ strukturou, aby nedocházelo ke kolizím a změnila se nejprve jedna veličina, a poté až druhá. Dále je ještě nulování tlačítka, které startuje jednotlivá měření.

Naměřená data se skládají do dvou 2D-polí, kterým se opět přiřadí jednotky pomocí „enumu“. Jedná se samozřejmě o stejný dílčí „cluster“ jako ve stavu 6.2.1, zde se jen přepisuje v případě, že nejsou známy kvantifikované zdroje nejistot a ani se nenačítají naměřená data z .csv souboru. Co se týče hlavního „clusteru“, jeho ostatní hodnoty se v tomto stavu pouze přenášejí do dalšího. Dále je součástí již zmíněné dialogové okno. Mezi jednotlivými měřeními se uživateli bude zobrazovat aktuální pořadové číslo měření a k tomu potřebné informace, co je potřeba změnit, udělat nebo přepojit pro správné změření daného zdroje nejistoty. Přiděláno je zde ještě „subVI“ *SubVI_ZapisovaniDoSouboru.vi* na zapisování do .csv souboru, jak bylo vysvětleno ve stavu 6.2.1.

Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt} a Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}

Jako první se bude měřit nejistota vlivem termonapětí (v programu *Termonapeti*). Tečka proto, aby nejistota byla v seřazeném seznamu jako první. Je to z čistě praktických (hardwarových důvodů), kdy se nejdříve změří napětí při komutovaných svorkách, následně se obvod přepojí na „klasické“ zapojení a dále se již přepojovat nebude. To sice neplatí pro tuto verzi, kde se obvod přepojovat musel, protože se měří v jiných jednotkách (A a V), než ostatní zdroje nejistot. Aplikace se v budoucnu ale bude používat ve verzi druhé, kde to platit bude. Obvod by se pravděpodobně nemusel přepojovat ani při změně konfirmační teploty, protože podle teoretických předpokladů by na této teplotě hodnota termonapětí záviset neměla, což se do jisté míry potvrzuje i ve výsledných bilančních tabulkách v příloze A. Tyto dvě nejistoty jsou jedinými (v této verzi programu), kde se měří proud a napětí, v ostatních se jedná o teplotu a odpor.

Nejistota daná hysterezí - u_{Ch} a Nejistota daná opakovatelností měření - u_{Co}

Tato skupina nejistot je popisována jako druhá (proto název *Opakovatelnost*), protože opakovatelnost měření by se měla podle normy ČSN EN 60068-3-11 [12] provádět před samotnou konfirmací. Hlavní rozdíl oproti předchozím nejistotám spočívá v měření odporu a teploty, jak již bylo zmíněno výše. Další rozdíl je volitelný počet měření uživatelem, to však platí již jen pro opakovatelnost měření. Proto je zde v dialogovém okně přidána i informace o celkovém počtu měření, což je součástí všech nejistot s opakovaným (volitelným počtem) měřením.

Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv}

Nejistota vlivem odvodu tepla je specifická tím, že je v diplomové práci kvantifikovatelná dvakrát. Není ovšem nutné provádět oba způsoby a je čistě na uživateli, jestli

si vybere jednu (kteroukoli) nebo obě možnosti. První vychází ze vztahu 5.3 a druhá z opakovaných měření při měnící se délce kabelu umístěného uvnitř komory - popsáno v kapitole *Nejistota způsobená ponorem - u_{Sp}* . Pokud se bude provádět druhá možnost („case“ *True*), což vybírá uživatel pomocí přepínače v ovládacím panelu, je opět možnost (nutnost) navolit počet opakování. V případě *False* se neprovádí nic, resp. pouze se přenáší data. Důvod je vysvětlen u další nejistoty, protože potom (v případě, že není zadán přímo odhad) spadá zdroj nejistoty právě do této kategorie.

Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk} a ostatní

Nyní se dostává řada na samotnou confirmaci komory jednoho teplotního bodu. Protože by se měla provádět až nakonec, má nejistota název *__Kolisani*. Hlavní rozdíl oproti výše zmíněným skupinám je ten, že se jedná o již jen obyčejné měření, tudíž se nemusí provádět žádné modifikace. Jednotlivé odměry se nespouští tlačítkem, jako všechny ostatní nejistoty, ale potřebné údaje si navolí uživatel prostřednictvím ovládacího panelu. Protože pro kvantifikaci ostatních zdrojů stačí stejné hodnoty, pocházející právě z prováděné confirmace (obyčejné měření), je měření provedeno pouze jednou a do ostatních „clusterů“, příslušejících daným nejistotám, se vloží ta stejná data. Dále je zde rozšířeno dialogové okno s informací o intervalu mezi jednotlivými měřeními a zbývajícím čase confirmace teplotního bodu. Tento čas se vypočítá z parametrů zvolených uživatelem - počet měření a právě interval mezi měřeními, přičemž se aktualizuje po každém provedeném odměru.

6.2.4 Předzpracování

Zde se provádí předzpracování naměřených, ale i zadaných hodnot tak, že výsledkem je vždy kvantifikovaný odhad nejistoty v jednotkách °C nebo Ω. Princip rozpoznávání, při kterém se stav použitím „case“ struktury primárně dělí na zpracování měřených („case“ *True*) a neměřených („case“ *False*) dat, je stejný jako u předchozího stavu 6.2.3. Zde uvedu pár vlastností, které mají všechny další vnořené „casy“, příslušející jednotlivým nejistotám, společné. Stejně jako ve stavu 6.2.1, jsou i zde dva způsoby na výpočet celkové nejistoty, mezi kterými si může uživatel vybrat pomocí přepínače v ovládacím panelu (stejný přepínač jako ve stavu 6.2.1). U prvního způsobu („case“ *False*) se bere maximální hodnota nejistoty (z devíti) a při druhém („case“ *True*) se provede geometrický součet všech devíti nejistot. Dalším společným rysem je zobrazování kvantifikovaných zdrojů na ovládací panel. Aby mělo smysl hodnoty vůbec zobrazovat, musely být všechny převedeny na stejné jednotky (pomocí koeficientu citlivosti podle vztahu 9.2), tedy °C. Při výpočtech v dalších stavech se ale počítá s původními hodnotami tak, aby byla celá metodika pospolu v jednom stavu. U metody Monte Carlo by to dokonce ani nebylo možné, protože

tato metodika ani citlivostní koeficienty nezná (byl vypočítán podle metody GUM) a celý výpočet by to tak znehodnotilo. Malou nevýhodu to však přináší. V současném stavu je totiž možné vytvořit unikátní koeficient citlivosti z naměřených dat přímo pro danou nejistotu. Vhodné je to především u prvního způsobu výpočtu celkové nejistoty, kdy je možno vzít naměřenou hodnotu právě od toho snímače, u kterého vyšla největší nejistota (princip aplikování nejistot je vysvětlen v kapitole 8. Jak je uvedeno v *Koeficient citlivosti*, rozdíly jsou naprosto minimální a zanedbatelné, takže tento fakt nepředstavuje další potenciální zdroj nejistoty.

V tomto stavu jsou hojně využívány „subVI“ na přepočítání jednotek $^{\circ}\text{C}$ a Ω podle vztahu 4.2. Existují celkem čtyři varianty: *SubVI_RT.vi*, *SubVI_RTpole.vi* a *SubVI_TRpole.vi*. První písmeno v názvu znamená počáteční a druhé konečnou (přepočítanou) jednotku a naopak. Pokud je v názvu „pole“, probíhá výpočet s celým polem hodnot. Další „subVI“ slouží k výpočtu citlivostního koeficientu: *SubVI_KoeficientCitlivostiRT.vi* a *SubVI_KoeficientCitlivostiRTpole.vi*. I zde platí stejná pravidla jako v předchozím případě.

Na výstupu tohoto stavu jsou vždy dvě hodnoty jednotlivých nejistot a jejich příslušné jednotky, přičemž jedna odpovídá „přímému“ měření teploty a druhá měření odporu. Ostatní údaje obsažené v „clusteru“ se pouze přenášejí do dalšího stavu.

6.2.5 „Case“ True

Pokud se nejistota měřila nebo načetla ze souboru, vykoná se „case“ True a vezmou se měřená data z dílčího „clusteru“. Pomocí dalšího „subVI“ *SubVI_VyberDat.vi* se potom z „clusteru“ vybírají jednotky, které je potřeba v daném případě použít. Od každé jednotky lze vytáhnout původní naměřená data ve 2D-poli, průměrnou hodnotu a výběrovou směrodatnou odchylku z každého sloupce, tzn. každého snímače. Jako poslední je zde průměrná hodnota ze všech naměřených dat. Následují různé výpočty pro jednotlivé nejistoty, které jsou všechny zdvojeny (modifikovány vždy pro „přímé“ a nepřímé měření teploty) a popsány v dalších kapitolách.

Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt}

Zde se provádí výpočet podle vztahu 5.9. Protože je potřeba dostat hodnotu opět do jednotek Ω , převede se napětí pomocí citlivostního koeficientu ze vztahu 9.5 na odpor. Nechal jsem zde úmyslně převrácenou hodnotu proudu s následným násobením tak, aby to přesně odpovídalo vyjádřenému vztahu, ikdyž jednodušší by bylo samozřejmě hodnoty rovnou podělit. Stejným způsobem (z napětí a proudu podle Ohmova zákona) se poté získá odpor, použitý pro převod na teplotu kvůli zobrazení na ovládací panel. Součástí zpracování je i zobrazování průměrných měřicích proudů

(průměr v čase pro každý snímač zvlášť) a celkového průměrného měřicího proudu, pro informování uživatele, na ovládací panel.

Nejistota daná opakovatelností měření - u_{Co}

Opakovatelnost se vypočítá podle vztahů 1.1, 1.2 a 1.3 uvedených v kapitole 1.2.1. Protože počet opakování je zadán uživatelem, jsou zde implementovány všechny možnosti bezpečnostních faktorů k_s , které mohou nastat. V případě této diplomové práce to bylo $k_s = 1, 4$, protože z časových důvodů se realizovalo jen pět měření.

Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}

Detailní postup výpočtu je popsán v kapitole *Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}* . Z toho důvodu tento kus kódu na výsledné nejistotě nemá žádný podíl, ale je funkční a použitelný do budoucna, např. pro jiné (s menší chybou v datasheetu) NI DAQmx měřicí karty. Výpočet se řídí vztahem 5.7. Parametry, ze kterých se chyba vypočítá, jsou ve dvojí, resp. trojí podobě. První a druhou z nich je varianta měřicích karet NI 9219, které jsou popsány v kapitole *Měřicí karty NI 9219 a šasi cDAQ-9178*. V prvním případě jsou hodnoty vyčteny z datasheetu karty [26] (Tab. 4.4) a zadány napevno do blokového diagramu při teplotě okolí 25 ± 5 °C, ve druhém je to při $-40 \div 70$ °C. Podmínky okolí si uživatel může navolit stejně tak, jako použitý typ měřicí karty (NI 9219 nebo jiné). V případě, že se použijí jiné měřicí karty, musí se parametry zadat ručně v ovládacím panelu. Varianta pro „přímé“ měření teploty není použita, protože by se teplota musela přepočítávat na odpor a poté zase zpět na teplotu - vysvětleno opět v kapitole *Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}* .

Nejistota daná časovou stabilitou (driftem) měřicí karty - u_{Md}

Platí stejné informace jako v předchozím případě s tím rozdílem, že zde není žádná závislost parametrů na podmínkách okolí. Protože vychází přijatelná (vzhledem k ostatním) hodnota nejistoty, byl tento stav použit i pro výslednou nejistotu měření.

Základní nejistota snímačů - u_{Sn}

Postup výpočtu dle vztahu 4.5.

Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}

Zde jsou použity oba způsoby, ze kterých je vybrána vždy větší hodnota nejistoty. První způsob se řídí vztahem 5.4 a druhý 5.5. Zdroj se měří pomocí napětí a proudu,

tudíž se musí přepočítat pomocí Ohmova zákona na odpor. Aby se mohlo uskutečnit porovnání obou způsobů, musí být u druhého způsobu výsledný odpor dále přepočítán ihned na teplotu a v dalším stavu se tak počítá rovnou s jednotkou °C.

Nejistota daná driftem charakteristiky (dlouhodobý drift) - u_{Sd}

Počítá se stejně jako *Základní nejistota snímačů* - u_{Sn} .

Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv}

Jak již bylo uvedeno v předchozím stavu 6.2.3, kvantifikace odvodu tepla je provedena dvojím způsobem. Každý se počítá z jiných dat, tím pádem na sobě nejsou závislé a můžou se provést oba nebo pouze jeden z nich. Záleží to na tom, jaké vstupní parametry uživatel zadá. K prvnímu způsobu je třeba zadat vstupní data, podle kterých program pozná a případně vypočítá podle vztahu 5.3, jestli se má tento způsob vykonávat (data jsou zadána) nebo ne (nejsou zadána). V tomto případě je zapotřebí pouze změřená teplota při confirmaci komory, viz *Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty* - u_{Kk} a *ostatní*. Druhý způsob se spočítá jako výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru z měření popsáném ve stavu 6.2.3. Dále je tento zdroj odlišný tím, že právě experimentální kvantifikace byla realizována pouze jedním, rezervním snímačem teploty, viz kapitola *Nejistota způsobená ponorem* - u_{Sp} . Z toho vyplývá, že musela být provedena modifikace při výpočtu výsledné nejistoty podle počtu přístrojů (2.způsob), protože nebylo k dispozici všech devět hodnot. Vyřešeno je to stejným způsobem jako ve stavu 6.2.1. V případě kvantifikování nejistoty oběma způsoby se opět vybere ta větší z nich.

Nejistota způsobená hysterezí - u_{Ch}

Zde se provádí pouhý rozdíl dvou naměřených hodnot, které se získají nejdříve po ohřátí a poté po ochlazení komory. Z něj je udělána absolutní hodnota, protože znaménko může být i záporné, což je samozřejmě nežádoucí.

Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk}

Tato nejistota je přímo spočítána pomocí „subVI“ *SubVI_VyberDat.vi*.

Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}

Protože výstupem *SubVI_VyberDat* je výběrová směrodatná odchylka z opakovaných měření, musí se pro kvantifikování tohoto zdroje vzít původní neupravená naměřená data a spočítat výběrová směrodatná odchylka z dat v každém řádku

(tzn. mezi všemi snímači (prostorově)), odečtených ve stejném čase. Součástí zpracování je opět i ukládání a zobrazování (viz *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt}*) průměrných hodnot teplot a odporů (průměr proveden v čase) a celkové průměrné hodnoty teploty a odporu. Z těchto dat se poté čerpá i v „case“ *False* a ve všech dalších stavech.

6.2.6 „Case“ *False*

Pokud se nejistota neměřila, vykoná se „case“ *False* a zpracování proběhne na zadaných datech. Celý tento „case“ je brán jako další možnost navíc. Předpokládá se, že se nejistoty takto zadávat nebudou, ale teoreticky to možné je. Aplikace tak usnadní práci uživateli, který nebude muset nic počítat.

Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt}

Termonapětí může být zadáno i v jednotkách V. Ty je samozřejmě potřeba převést na Ω . Zpracování tedy spočívá v převodu mezi veličinami pomocí citlivostního koeficientu, tzn. pomocí měřicího proudu. Zde vzniká malá komplikace (pouze v této verzi programu), protože pokud se nebude měřit tento zdroj nejistoty, nebude naměřený proud k dispozici a výpočet se nebude moci provést. Z dalšího zdroje, kde se měří napětí a proud (*Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}*), by se sice dala hodnota vzít, ale vzhledem k tomu, že se pracuje se seřazenými „clustery“ podle názvu nejistot (realizováno ve stavu 6.2.1 a vysvětleno v 6.2.3), nebude tou dobou hodnota k dispozici. Pokud by se však neměřil ani jeden z těchto zdrojů, neexistuje už žádný způsob, jak se k měřicímu proudu dostat. Proto jsem použil pevnou předem definovanou konstantu proudu, který byl získán při realizaci měřicího experimentu, jehož dokumentace je součástí této práce viz kapitola 7. Doporučený měřicí proud výrobcem je 0,5 mA. Naměřené hodnoty se pohybovaly konstantně v rozmezí $410 \div 420 \mu A$, tudíž zvolená hodnota $415 \mu A$ přibližně odpovídá aritmetickému průměru a při dalších konfirmacích se může bez uvažování dalšího potencionálního vlivu nejistoty použít. Termonapětí má však další možný způsob, jak zdroj nejistoty zadat. Ten spočívá v zadání dvou hodnot - napětí při klasickém měření a napětí při komutovaných svorkách. Pokud tomu tak bude, program to rozpozná (stejně jako jednotku V) a vypočítá požadované termonapětí dle vztahu 9.5 (samozřejmě i s následným přepočtem na Ω).

Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}

Stejně tak nejistota vlivem samoohřevu může být zadána v jednotkách A. Zde se již může použít nově naměřená hodnota teploty z *Nejistota daná prostorovou homoge-*

nitou (gradientem) teploty - u_{Kg} (vzhledem k názvům nejistot je zajištěna správná posloupnost přenosu dat) a převést na požadovaný odpor, aby se mohl provést výpočet podle vztahu 5.4.

Nejistota daná driftem charakteristiky (dlouhodobý drift) - u_{Sd}

Tato nejistota se může zadat jako dvojice hodnot při dvou po sobě jdoucích kalibracích. Z nich se pak vypočítá pouhý rozdíl.

Nejistota způsobená hysterezí - u_{Ch}

Výpočet je stejný jako v případě 6.2.5. Zde se samozřejmě provádí ale jen ze zadaných dvou hodnot.

Ve všech ostatních případech se provádí jen „defaultní“ případ a v něm se pouze přenášejí neupravená data.

6.2.7 GUM

V tomto stavu se provádí klasický výpočet podle metodiky GUM, viz kapitola 1. Nejdříve se získá standardní nejistota podělením příslušným koeficientem rozdělení χ a poté se vynásobí, pokud je to potřeba, koeficientem citlivosti. Tím se získá příspěvek k celkové nejistotě. Tento postup je přehledně znázorněn i v bilančních tabulkách, např. Tab. 9.1. Dále se provede geometrický součet, zvlášť pro nejistotu A a zvlášť pro nejistotu B, které se pro zajímavost zobrazí na ovládací panel. Nakonec se už jen sloučí do kombinované nejistoty (také se zobrazuje) a vynásobí koeficientem rozšíření k_r . Výsledkem je tedy rozšířená nejistota měření U . Celý proces se provede dvakrát, jednou pro „přímé“ měření teploty a podruhé pro měření odporu.

6.2.8 Monte Carlo

Metodika výpočtu je podrobně popsána v kapitole 9.2. Jen doplním, že algoritmus obsahuje dva způsoby generování náhodných čísel s normálním rozdělením. Prvním je bloček na generování bílého šumu, nabízený přímo programem LabView. Druhým je vlastní generování, které je převzato z [8]. Cílem dvojího řešení je porovnání vygenerovaných hodnot a jejich vliv na výslednou nejistotu měření. Ze stejného důvodu je realizován i dvojitý přepočítávací blok, s konstantou A a se dvěma konstantami A i B. Jak generování, tak i počet konstant si uživatel může sám zvolit. Na přepočítávací blok je použito „subVI“ *SubVI_MonteCarlo.vi*, které obsahuje nejprve přepočítávací blok nejistot ve °C (působících na T) a v Ω (působících

na R_0) na R_T a následný finální převod na teplotu. I tato metodika se provádí dvakrát. Stejně jako jsou u obou metod použity průměrné hodnoty teploty, resp. odporu, z předchozího stavu 6.2.4, konkrétně *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}* . Na ovládací panel se zobrazují údaje jako průměrná teplota, výběrová směrodatná odchylka, interval (horní a dolní mez) nejistoty a samozřejmě i samotná výsledná nejistota měření.

6.2.9 Grafy

Generování náhodných hodnot se střední hodnotou odpovídající vypočítané teplotě a s rozptylem daným výslednou nejistotou měření, je realizováno pomocí již zmíněného bločku v LabView pro generování bílého šumu. Pro vykreslení histogramu slouží další předpřipravený bloček, který je využit i pro vykreslení histogramu při použití způsobu s vlastním generátorem hodnot. Histogram kumulativní distribuční funkce je vytvořen manuálním přepočítáním osy y z absolutní hodnoty četnosti prvků na četnost v procentech. Zakreslené meze vypočítané metodou GUM jsou získány z výsledné nejistoty měření. Opět budou vytvořeny dva histogramy.

6.2.10 Zápis do souboru

Do .xml souboru se zapisují již zmíněná (v návrhu aplikace - kapitola 6.1) naměřená data, všechny kvantifikované odhady jednotlivých nejistot, včetně jejich rozdělení a jednotky, a výsledné nejistoty měření všemi možnými způsoby (jak obě metody, tak oba způsoby měření). Kromě těchto údajů se ukládají i průběžné výsledky obou metod. U metody GUM se průběžnými výsledky myslí nejistota A, nejistota B a kombinovaná nejistota a u metody Monte Carlo se jedná o interval (horní a dolní mez) výsledné nejistoty, střední hodnotu a výběrovou směrodatnou odchylku vygenerovaných dat. Dále se budou ukládat také výše zmíněné histogramy. Protože součástí názvu .xml souboru je i časová značka, ukládá se název po každém provedení do proměnné s cestou k souboru tak, aby při každém dalším spuštění šel soubor bez dalších úprav spustit na jedno kliknutí.

6.2.11 Ukončení

V tomto stavu se pouze vymaže vytvořený „task“, nulují se hodnoty v polích, odblokují všechny „controly“ a ukončí program.

6.3 „SubVI“ a pomocný program

„SubVI“

Veškerá použitá „subVI“ v programu byly zmíněny již v předchozí kapitole 6.2. Jednomu, resp. dvěma, se ale vyplatí věnovat o trochu více. Protože jsem chtěl, aby ze souborů na první pohled bylo jasné, jaká hodnota odpovídá kterému snímači, jaká veličina se měřila nebo o jakou jde konfirmační teplotu, je finální podoba *SubVI_ZapisDoSouboru.vi*, poměrně složitá. Nejvýstižnější popis funkce bude pomocí následujícího Obr. 6.1, který ukazuje, jakou podobu mají data ukládaná do .csv souborů. Zde se jedná o první možnost (teplota a odpor), druhou možností je měření proudu a napětí. S větší náročností zapisování do souborů jde ruku v ruce i zpětné načítání souborů, které je ještě složitější viz *SubVI_CteniZeSouboru.vi*. Svůj podíl na tom má také možnost volitelné konfirmační teploty, a především libovolného počtu měření.

Konfirmační teplota:50[°C]									
	T(1)[°C]	T(2)[°C]	T(3)[°C]	T(4)[°C]	T(5)[°C]	T(6)[°C]	T(7)[°C]	T(8)[°C]	T(9)[°C]
1.měření	49,5073	49,56941	49,7547	49,7241	50,46944	50,27382	50,911	50,42982	50,05135
2.měření	49,50208	49,55765	49,75893	49,71452	50,46619	50,24139	50,89541	50,43676	50,07472
	R(1)[Ohm]	R(2)[Ohm]	R(3)[Ohm]	R(4)[Ohm]	R(5)[Ohm]	R(6)[Ohm]	R(7)[Ohm]	R(8)[Ohm]	R(9)[Ohm]
1.měření	119,2069	119,23	119,3014	119,2885	119,5788	119,5027	119,7455	119,5571	119,4128
2.měření	119,2049	119,2254	119,3031	119,2845	119,5774	119,4907	119,739	119,56	119,4223

Obr. 6.1: Vygenerovaná tabulka s daty ukládanými do .csv souboru

Pomocný program

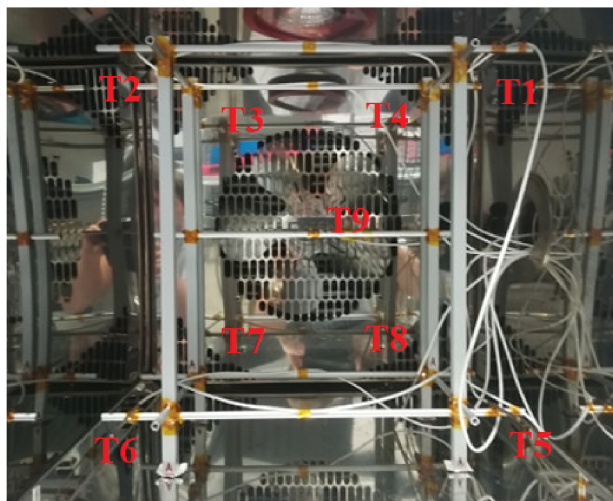
K naměření všech přechodových charakteristik bylo potřeba vytvořit ještě jednu pomocnou aplikaci *PrechodoveCharakteristiky.vi*. Požadavek byl totiž, z principu věci, kladen na nspecifikovanou dobu měření, protože vždy bylo nutné počkat na ustálení teploty v kalibrátoru. Musela se tedy použít smyčka „while“, místo smyčky „for“, která je použita v hlavním programu. Další nutností bylo automatické měření v požadovaných časových intervalech, nikoli odměry spouštěné tlačítkem. Poslední a nejdůležitější funkce pomocného programu spočívá v možnosti měření pouze na jednom vybraném kanále. To bylo potřeba při měření přechodových charakteristik snímačů, nejistoty vlivem ponoru nebo i při porovnávacím měření (vše je vysvětleno v následujících kapitolách 7 a 8). Realizovatelné je i měření se všemi devíti snímači, protože součástí aplikace je přepínač, který toto umožňuje. Součástí je i obdobné „subVI“ na zapisování do programu (*SubVI_ZapisDoSouboruPCH.vi*), jako v hlavním programu s tím rozdílem, že se nezapisuje konfirmační teplota, ale počáteční a koncová teplota.

7 Realizace měřicího experimentu

Tato kapitola se věnuje samotnému experimentu pro confirmaci teplotních komor provedenému pomocí měřicího systému navrženého v kapitole 4.1.1. Měření bylo realizováno ve zkušební laboratoři CVVOZE, v budově T12, Fakulty elektrotechnické a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně. Z časových důvodů byla provedena confirmace pouze teplotní komory CTS T-65/50.

7.1 Popis měřicího experimentu

Pro confirmaci komory byla zvolena metoda bez zátěže, jejíž princip je vysvětlen v kapitole 3.1.1. Cílem experimentu bylo naměřit data potřebná jednak k samotné confirmaci teplotní komory, ale také ke kvantifikování jednotlivých zdrojů nejistot měření. Principem každé části měření bylo automatické odečítání hodnot z devíti snímačů rozmístěných podle Obr. 4.1 pomocí softwarové aplikace, jež je popsána v předchozí kapitole 6.2. Snímače byly rozmístěny dle normy ČSN EN 60068-3-5 [10]. Požadavky na toto rozmístění jsou uvedeny v kapitole 4.1.1. Protože je komora malá, musela být použita druhá varianta rozmístění, která uvádí nejzazší vzdálenost snímačů od stěny komory, jež je 5 cm (viz Tab. 3.1). Fotografie měřicí konstrukce uložené v komoře je níže na Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Měřicí konstrukce umístěná v komoře

Je důležité hned na začátku uvést, kde se jednotlivé snímače nacházejí a jak se značí. K tomu slouží následující Tab. 7.1, která je vytvořena právě na základě Obr. 7.1.

Tab. 7.1: Umístění a popis snímačů

Přední část	Horní strana	Dolní strana	Zadní část	Horní strana	Dolní strana
Levá strana	T2	T6	Levá strana	T3	T7
Pravá strana	T1	T5	Pravá strana	T4	T8

7.1.1 Postup měření

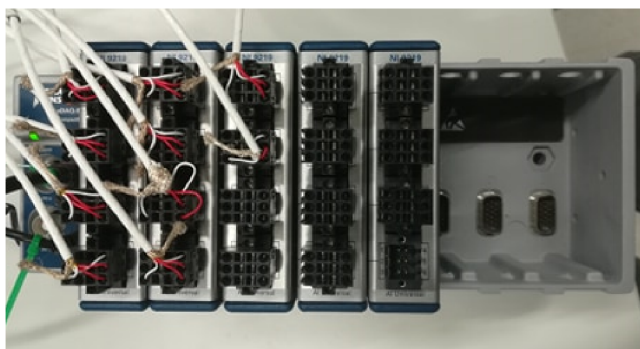
S vedením zkušební laboratoře CVVOZE jsme se domluvili na následujícím postupu experimentu. Zde jsou pouze shrnuta všechna měření, která byla v práci vykonána. Detailní popis je obsažen spíše v kapitole 8.

Ze všeho nejdříve jsem provedl „porovnávací“ měření. To proto, že klasickým výpočetním způsobem pomocí údajů z datasheetu vycházela příliš velká chyba měřicích karet, která by znehodnotila ostatní nejistoty měření. K realizaci vlastní analýzy chyby měřicích karet byly použity kalibrační pece uvedené v kapitole 7.1.3. Z technických důvodů posloužil rezervní snímač stejného typu jako všech ostatních devět, který byl připojen na třetí kartě jako desátý v pořadí (vysvětleno nejen v kapitole *Nejistota způsobená ponorem - u_{Sp}*). Součástí tohoto měření byly i teploty 0 °C a 100 °C. Odpor R_0 byl poté použit pro všechny další výpočty nejistot tak, aby právě vlivem driftu základního odporu nedošlo k zanesení dalšího zdroje nejistoty do experimentu (popsáno v kapitole *Nejistota daná driftem základního odporu (krátkodobý drift) - u_{Sk}*). Odpor R_{100} byl zase použit pro určení čistoty platiny, viz kapitola *Čistota platiny*.

Dalším z měření bylo zjišťování doby ustálení měřicí komory pomocí „přechodové charakteristiky“. Tomuto je věnována vlastní kapitola níže - *Doba ustálení (stabilizace) komory*. Bylo také potřeba zjistit, jakou dobu ustálení, tudíž časovou konstantu mají samotné snímače teploty, aby nedocházelo k dřívějším odečtům hodnot, a tak k problémům popsaným v kapitole *Nejistota daná rychlostí odezvy - u_{Sr}* . Pro tento experiment posloužily všechny tři kalibrátory, které jsem v diplomové práci používal (opět kapitola 7.1.3), do jejichž prostředí (nastavené teploty) byl snímač rychle vložen z prostředí okolního, čímž byl vytvořen jednotkový skok k určení přechodové charakteristiky snímače. Také zde byl z technických důvodů použit rezervní snímač (kapitola *Nejistota daná rychlostí odezvy - u_{Sr}*).

K měření „přechodové“ charakteristiky komory byly použity tři měřicí karty NI 9219, které četly data ze snímačů TG3-60 Pt100/3850/A. Karty jsou připojeny k šasi cDAQ-9178 (všechny přístroje jsou popsány v kapitole 4.2). Toto reálné zapojení je na následujícím Obr. 7.2.

Poté již následovalo měření všech empiricky kvantifikovaných zdrojů nejistot,



Obr. 7.2: Zapojení snímačů při klasickém měření v měřicích kartách (šasi)

pro které musel být modifikován postup nebo princip měření, přičemž jsme se rozhodli pro tři konfirmační body tak, aby dostatečně pokryly rozsah teplot, který daná komora může nastavovat. Jak je uvedeno v kapitole *Teplotní komora CTS T-65/50*, rozsah teplot je $-65 \div 180$ °C. Zvolili jsme tedy dolní a horní hranici teploty -40 °C a 150 °C, a jednu teplotu přibližně uprostřed (50 °C). Hodnoty byly určeny také samozřejmě s ohledem na to, při jakých teplotách se komora pro zkoušky používá.

Zvolené body nesplňují úplně přesně požadavky definované normou ČSN EN 60068-3-11 [12] vypsané v kapitole 4.1.3, ale se samotnou normou to v rozporu není. Zde narážíme na problém odlišnosti použitých norem, protože např. v normě ČSN EN 60068-3-5 [10] jsou za minimum považovány informace, viz kapitola 4.1.2. Odlišnost se projevila i v případě frekvence odečítání hodnot viz kapitola 4.1. V případě tohoto experimentu je ale splněna podmínka nejméně dvou teplot při zapnutém ohřívání (50 °C a 140 °C), protože teploty jsem nastavoval vždy z okolního prostředí a z podmínky nejméně dvou teplot při zapnutém chlazení je splněna jen jedna (-40 °C). Další požadavky na konfirmaci při nejvyšší a nejnižší teplotě jsou splněny díky celkové konfirmaci popsané v následujícím odstavci, ale jen částečným způsobem, kdy se experimentálně nekvantifikovaly žádné výše uvedené nejistoty a nebyla vyhodnocena ani výsledná nejistota měření. V souladu s normou je to z toho důvodu, že je zde prostor pro požadavky kladené samotným zákazníkem a konfirmace se může provádět pouze v teplotních bodech udaných právě zákazníkem, což jsou veškeré teploty, při kterých je komora používána.

Bylo tomu tak, protože dané experimenty jsou časově velmi náročné a vymezený čas nebyl dostačující. Je ale nutné dodat, že pokud není při konfirmaci kladen požadavek na velmi vysokou přesnost měření, tudíž i vyhodnocení všech potenciálních zdrojů nejistot, nemusí se tyto měření vůbec provádět a stačí postupovat pouze dle již zmíněné normy ČSN EN 60068-3-11 [12]. Protože největší pozornost diplomové práce je upřena na nejistoty měření, snažil jsem se o co největší přesnost měření, a tím pádem i o kvantifikování co nejvíce zdrojů nejistot (především právě expe-

rimentálně), aby některé z nich při budoucích konfirmacích mohly být na základě podložených výsledků uvažovány nebo naopak i zanedbány.

Doba ustálení (stabilizace) komory

Tuto dobu definuje norma ČSN EN 60068-3-5 [10] a je to vysvětleno v kapitole *Nejistota daná stabilizací ((ne)ustálením) teploty v komoře - u_{Kn}* . Zadavatel zkoušky ale tuto dobu může opět stanovit jinak, podle dané potřeby při dalším používání. Jedním z cílů konfirmací komor, a taktéž této diplomové práce, je posouzení vhodnosti dané komory pro různé typy klimatických zkoušek. Dalším z cílů je porovnání výsledků se specifikacemi komory a následné vyhodnocení jejich platnosti. Na základě toho je doba stabilizace určena odhadem na 30 minut po prvním dosažení dané konfirmační teploty, přičemž se nezohledňuje přípustný rozsah, ve kterém by se měly nacházet hodnoty teplot ze všech míst v komoře. „Přechodové“ charakteristiky popsané v následující kapitole *Nejistota daná stabilizací ((ne)ustálením) teploty v komoře - u_{Kn}* slouží jako důkaz o tom, že toto rozhodnutí nesnížilo přesnost měření. Ta se ještě zvýšila při měřeních, které se spouštěly pomocí tlačítka v softwarové aplikaci, protože jsem je prováděl vždy, když aktuální teplota zobrazovaná na displeji komory byla totožná s teplotou nastavenou. Díky tomuto postupu tak zpětně může být vydáno prohlášení typu „vyhovuje/nevyhovuje“ předložené specifikaci nebo dané zkoušce, viz závěrečná Tab. 10.2. Tento postup byl také schválen vedením zkušební laboratoře CVVOZE.

Čistota platiny

Pro zajímavost jsem ještě změřil hodnotu odporu naměřenou snímačem při nastavené teplotě 100 °C v kalibrační píčce, kde by mělo být měření nejpřesnější, viz kapitola *Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}* . Z následujícího vztahu se poté dá určit čistota platiny pomocí redukovaného odporu (kapitola 4.2.1), ze které je snímač vyroben. Měření bylo provedeno opět na rezervním snímači.

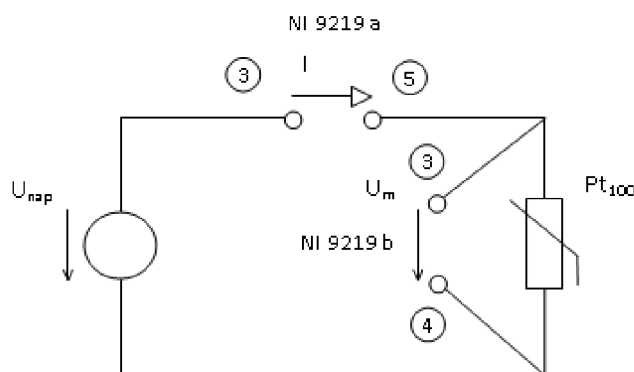
$$W_{(100)} = \frac{R_{100}}{R_0} = \frac{138,432}{100,141} = 1,383 [-] \quad (7.1)$$

Pokud výsledek srovnáme se vztahem 4.4, dojdeme k závěru, že platina není dostatečně „čistá“, a tudíž vhodná pro použití na výrobu snímačů Pt100. Tuto skutečnost je ale potřeba brát s rezervou, protože teplota, která panovala v kalibrační píčce, nemusela být úplně přesně nastavena (i přes použití právě píčky).

Měření napětí/proudu

U dvou zdrojů nejistot bylo potřeba měřit zároveň s odporem i napětí nebo proud. Jedná se o *Nejistota způsobená samoohřevem* - u_{S_s} a *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím* - u_{M_t} . To však do experimentu a samotného zapojení přineslo obrovské komplikace. Po důkladné analýze dostupných specifikací (obvodové schéma zapojení karty od výrobce není k dispozici) a experimentálním prověřením různých možností jsme s vedením ZL CVVOZE došli k závěru, že nelze změřit obě dvě veličiny bez přepojování obvodu pouze na jedné kartě. Není to možné při čtyřvodičovém zapojení (měření odporu) přímo pomocí měřicích karet NI 9219, což je u této aplikace naprosto nezbytné. Měření napětí je totiž definováno na jiných pinech než čtyřvodičové měření odporu (Obr. 4.9) a pro funkční měření napětí musí být aktivní měření odporu, protože karta při měření napětí odpojuje „nepoužité“ dva vodiče ze čtyřvodičového zapojení. Z toho důvodu se musel obvod přepojit.

Jako nejlepší (a jedno z mála) řešení, které jsem nakonec realizoval, bylo zvoleno (po domluvě s vedením ZL CVVOZE) měření napětí a proudu na různých měřicích kartách, přičemž výsledný odpor se dopočítá právě z těchto dvou veličin. Důležité je, že to musí být provedeno na opravdu jiných měřicích kartách, nestačí jen jiné kanály na jedné kartě. Pro toto řešení jsme se rozhodli také hlavně z důvodu dalšího používání aplikace při budoucích confirmacích, kdy se obvod na začátku jednou zapojí a změní se tak všechny zdroje nejistot bez dalšího nutného přepojování (výjimkou je výše zmíněná *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím* - u_{M_t}). Schéma zapojení tohoto měřicího obvodu, i s regulovatelným zdrojem napětí kvůli *Nejistota způsobená samoohřevem* - u_{S_s}), je znázorněno na Obr. 7.3.



Obr. 7.3: Schéma zapojení s regulovatelným zdrojem napětí

Nutné je upozornit, že pro správnou funkci musí být nejdříve nakonfigurován virtuální kanál pro měření proudu a poté až pro měření napětí, resp. musí se nejdříve měřit proud, potom až napětí. To vychází opět z dále a hlouběji nezkoumané

podstaty těchto měřicích karet. V použitém programu je to samozřejmě aplikované a funkční. Právě ono zapojení je zachyceno na Obr. 7.4 v kapitole 7.1.3, které představuje všechny použité přístroje.

Celková confirmace komory

Po odměření všech dílčích zdrojů nejistot se provedla celková confirmace komory dle ČSN EN 60068-3-5 [10] popsaná v kapitole 4.1.2. Zde nastal jeden poměrně velký problém. Ten spočíval ve spodním rozsahu snímačů TG3-60, který je $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bylo tedy nutné udělat rozhodnutí, jež mělo dvě varianty. Tou první z nich, je nastavit spodní bod confirmace na minimální hodnotu, udanou datasheetem snímače, tedy $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tou druhou možností, kterou jsme také (opět po domluvě s vedením ZL CVVOZE) zvolili, je nastavit rozsah teplot confirmace na stejné hodnoty jako je rozsah komory, tedy $-65\div 180\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tomto případě se předpokládá, že údaje uvedené výrobcem obsahují jistou toleranci pro překročení daného rozsahu. Další věcí, jež byla samozřejmě také konzultována, bylo potenciální poškození snímačů. Tento důsledek jsme zamítli na základě zkušenosti, a také uvážení, že pokud by k tomuto mělo dojít, tak (díky fyzikálnímu principu a technologickému provedení snímače) spíše při vyšších teplotách než naopak. Doporučením do budoucna je ale určitě pořízení (kalibrovaných) snímačů s požadovaným rozsahem teplot, což ale může být, vzhledem k nutné přesnosti třídy A, problém.

Rychlost změny teploty v komoře

Komora byla ovládána pomocí dotykového displeje na předním panelu komory. Protože dílčím cílem práce bylo zjistit (a následně udělat vyhodnocení na základě porovnání se specifikacemi) rychlost změny teploty v komoře, viz kapitola *Rychlost změny teploty*, regulovala se teplota maximální možnou rychlostí nebo-li akčním zásahem. Po celou dobu měření bylo vypnuto osvětlení uvnitř komory kvůli zvyšování teploty, především u středního snímače T9, jež je umístěn právě pod světlem.

Rychlost proudění vzduchu v komoře byla po celou dobu nastavena na 100 %.

7.1.2 Podmínky měření

Měření bylo provedeno v osmi dnech v období od 23. 4. do 6. 5. 2020. Metrologické podmínky ve zkušebně se pohybovaly v rozmezí:

teplota okolí: $22,1\text{ }^{\circ}\text{C} \div 27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$

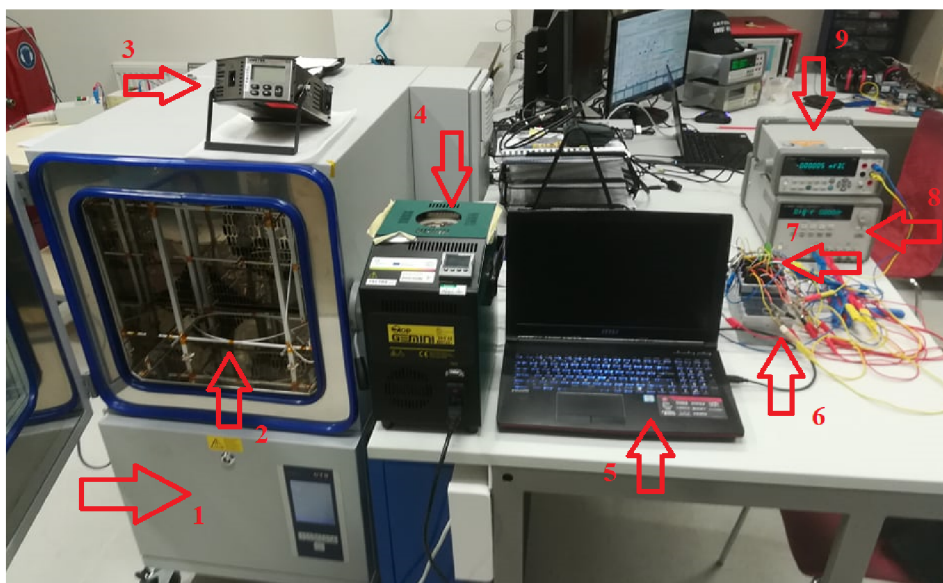
vlhkost: $23,8\text{ }\% \div 28,1\text{ }\%$

tlak: $974,6\text{ hPa} \div 983\text{ hPa}$

Z těchto údajů vyplývá, že teplota okolí byla v rozsahu 25 ± 5 °C, tudíž byly dodrženy všechny podmínky ve specifikacích přístrojů a nemusí se tedy uměle navyšovat základní nejistota přístrojů.

7.1.3 Použité přístroje

Na následujícím Obr. 7.4 je zobrazeno pracoviště, na kterém celé měření probíhalo. Na fotografii jsou vyznačeny všechny přístroje, které byly při měření použity.



Obr. 7.4: Pracoviště - Reálné zapojení experimentu

- 1 - Teplotní komora CTS T-65/50, VČ: 127003
- 2 - Měřicí konstrukce - snímače Pt100 TG3-60 Pt100/3850/A viz Tab. 7.2
- 3 - Kalibrační pícka Metek, VČ: 581461-00590
- 4 - Kalibrační pec AOIP Gemini, VČ: 32900-3
- 5 - Přenosný počítač (Notebook) MSI GP62 6QF-677CZ Leopard Pro
- 6 - Šasi cDAQ-9178 National Instruments, VČ: 1BBA20A
- 7 - Měřicí karty NI 9219, VČ: 1700122, 168F0A7, 170011D, 1700F8 a 17000F4
- 8 - Regulovatelný napájecí zdroj Agilent E3631A 0E3, VČ: MY40039449
- 9 - Multimetr Agilent 34410, VČ: MY47001096
- 10 - Meteostanice Testo, VČ: 39507568/505

Tab. 7.2: Výrobní čísla snímačů

Snímač	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	
VČ	15876	15878	15877	15882	15883	15884	15881	15875	15879	15880	/1216

8 Postup měření a výpočtu nejistot vstupujících do měřicího systému

V kapitole jsou uvedeny v první řadě ty nejistoty, které jsou součástí bilanční tabulky (např. Tab. 9.1), a tudíž přispívají do výsledné nejistoty měření. Dále jsou zde popsány nejistoty, které byly kvantifikovány, ať už experimentálně nebo i teoreticky, ale na základě provedené analýzy bylo zjištěno, že na výslednou nejistotu mají zanedbatelný vliv (vůči ostatním zdrojům nejistot), a tím pádem v bilanční tabulce zahrnutý nejsou. Poslední skupinkou jsou nejistoty, které nebyly vůbec kvantifikovány a na základě odborného odhadu byly rovnou vyloučeny. Některé z nich jsou zde ale pro zajímavost uvedeny a je vysvětlen důvod jejich zanedbání. U všech ostatních potenciálních zdrojů byly při měření zajištěny takové podmínky, uvedené v kapitole 5, aby jejich vliv byl nevýznamný. Cílem bylo, co nejvíce nejistot kvantifikovat experimentálně a ideálně je porovnat s teoretickými nebo předpokládanými hodnotami, pokud byly k dispozici. Nejistoty měření byly určeny v souladu s normou ČSN EN 60068-3-11 [12]. [21] [26] [32] [36]

Podrobný postup výpočtu, tabulky a grafy jsou uvedeny vzorově většinou jen u konfirmačního bodu 50 °C, u ostatních bodů jsou zde jen výsledky. Jak bylo řečeno v kapitole 6.2, všechna měření byla provedena dvojím způsobem („přímým“ měřením teploty a nepřímým měřením pomocí odporu). V této kapitole jsou postupy a výsledky prezentovány jen ve formě „přímého“ měření teploty tak, aby data byla přímo ve °C a lépe se tak orientovalo. Postupy jsou však pro všechny konfirmační teploty samozřejmě stejné, nehledě na jednotky měření. Ostatní tabulky a grafy při těchto teplotních bodech jsou součástí elektronické přílohy.

Existuje více přístupů, jak kvantifikovat výslednou nejistotu měření, pokud se měří vícero přístroji. V této práci aplikuji oba přístupy tak, abych je mohl v závěru porovnat (kapitola 10.3). Jeden z nich spočívá v tom, že nejistoty, které vyplývají od zdrojů, jichž je v měřicím systému více, se uvažují právě tolikrát, kolikrát daný zdroj nejistoty v systému vystupuje. V tomto případě se jedná o snímače teploty, potažmo měřicí karty, které získávají ze snímačů data. Druhý přístup tyto nejistoty uvažuje pouze jednou. Potom se ale nabízí otázka, kterou z hodnot vnést do bilanční tabulky (myšleno při kvantifikování nejistot, které vycházejí z experimentálního měření všemi snímači). Opět nastávají dva možné způsoby. Prvním je aplikování průměrných hodnot z daných výsledků (většinou směrodatných odchylek). Druhým, a tím „bezpečnějším“ způsobem, je vybrání vždy té největší hodnoty (směrodatné odchylky). Tím pádem bude výsledná nejistota měření větší, ale zároveň bude větší jistota, že skutečná hodnota náleží intervalu daném touto nejistotou. Zde jsem zvolil právě tuto variantu, abych tak dodržel principy stanovování nejistot,

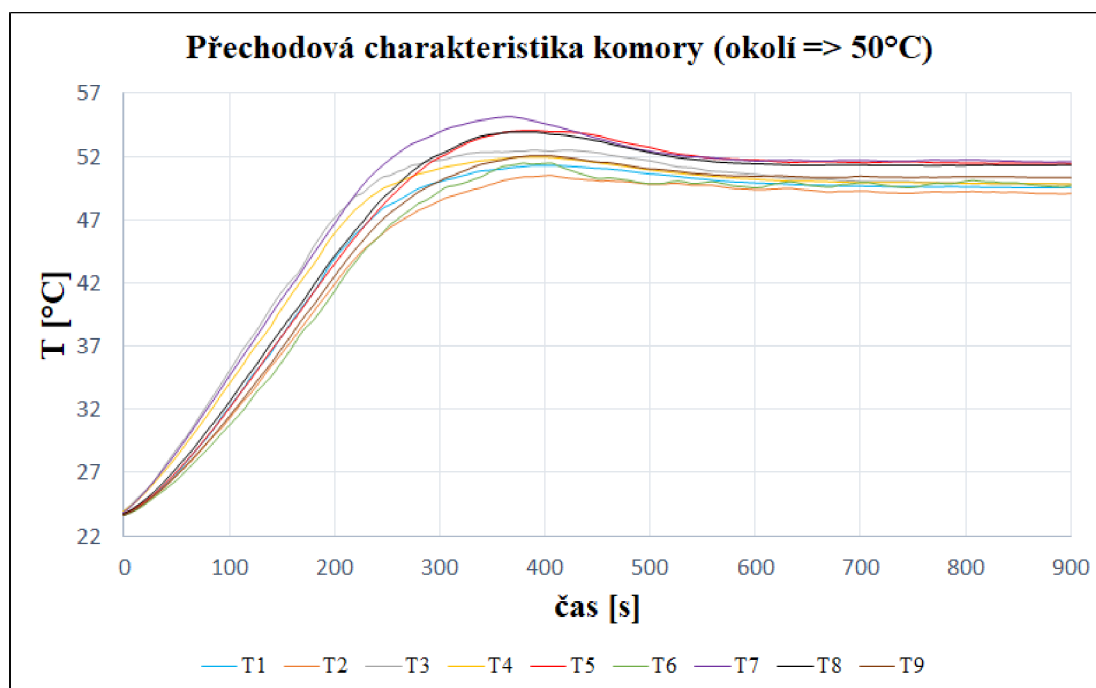
kdy se uvažuje vždy maximální hodnota vlivu daného zdroje nejistoty.

Důležité je upozornit, že všechna vypočtená data pochází ze softwarové aplikace, která je vypočítala. Zde jsou i dílčí výsledky zaokrouhleny, ale v dalších výpočtech (aplikace) se uvažovaly vždy výsledky nezaokrouhlené. Proto zde mezi některými kroky výpočtů může docházet, na první pohled, k numerické chybě, ale ve skutečnosti tomu tak není.

Veškeré obecné postupy měření a výpočtu nejistot jsou popsány v kapitole 5, proto zde budou uvedeny pouze ty, které byly modifikovány na základně konkrétního měřicího systému.

Nejistota daná stabilizací ((ne)ustálením) teploty v komoře - u_{Kn}

Na Obr. 8.1 je zobrazen přechod teploty v komoře z počáteční teploty (teploty okolí) na teplotu konfirmačního bodu. Jedná se tedy o „přechodovou“ charakteristiku komory. Uvozovky jsou zde proto, že se nejedná o typickou přechodovou charakteristiku danou jednotkovým skokem, jenž zde totiž nejde vytvořit, protože komora má samozřejmě omezený akční zásah, viz Tab. 4.1 - ohřívání, chlazení.



Obr. 8.1: Přechodová charakteristika komory (okolí->50°C)

Z průběhů je možné určit překmity naměřené jednotlivými snímači, které jsou uvedeny v následující Tab. 8.1.

Další, a daleko podstatnější věcí, kterou je možné z charakteristiky vypočítat, je doba ustálení teploty v komoře nebo-li doba stabilizace teploty.

Tab. 8.1: Překmity přechodové charakteristiky komory

	T[°C]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$překmit_{(50)}[\%]$	50	6,72	5,65	10,48	8,34	9,45	6,81	12,87	9,48	6,41
$překmit_{(-40)}[\%]$	-40	1,09	1,96	4,41	1,47	0,57	0,74	1,39	0,56	0,92
$překmit_{(140)}[\%]$	140	0,01	2,08	4,62	1,16	2,26	1,68	2,72	2,71	0,59

Z Tab. 8.1 je vidět, že největší překmit napříč všemi konfirmačními teplotami je u snímače T7 při teplotě 50 °C, a to $\pm 13\%$. Dále je zřejmé, že na výslednou hodnotu má stěžejní vliv konfirmační teplota, resp. velikost daného přechodu, protože absolutní hodnoty překmitu jsou u všech teplot podobné. Výsledky byly zjištěny na základě výpočtu (8.1), který odpovídá právě největšímu nalezenému překmitu. Zajímavostí může být, že tento vztah je potřeba modifikovat pro $překmit_{(-40)}$, protože zde je opačný nárůst, resp. pokles teploty, a proto se musí určit T_{min} , nikoliv T_{max} . Z tohoto důvodu jsem také otočil osu y s naměřenými hodnotami teploty, resp. odporu, tak, aby průběh byl rostoucí. Tento graf je však součástí pouze elektronické přílohy.

$$překmit_{(50)} = \frac{T_{max} - T_{komory}}{T_{komory} - T_{okolí}} 100 = \frac{51,245 - 49,507}{49,507 - 23,629} 100 = 12,87\% \quad (8.1)$$

Z naměřených charakteristik (nevyjímaje Obr. 8.1) se dá s určitou tolerancí prohlásit, že nárůst teploty je lineární, jak bylo podle specifikací komory předpokládáno (kapitola *Teplotní komora CTS T-65/50*). Tím pádem je jasné, že na dobu ustálení bude mít stěžejní vliv opět velikost přechodu. V tomto případě to bude ještě výraznější než u překmitů. Z Obr. 8.1 je možné stanovit minimální dobu stabilizace při konfirmační teplotě 50 °C na cca 800 s. Minimální dobu ustálení při přechodu na konfirmační teplotu -40 °C jsem stanovil na cca 2 500 s a u teploty 140 °C je to cca 3 500 s. Protože se jedná o poměrně krátké časy, výrazně jsem je ještě zvětšil a odečítal hodnoty vždy nejdříve 30 minut po prvním dosažení dané konfirmační teploty tak, aby byla zajištěna co největší přesnost měření.

Dále je z grafu zřejmé, že největší problém se stabilizací teploty byl v místě, kde měřil snímač T3, tedy levý horní roh na vzdálenější straně od dveří komory. Nejedná se o náhodu, protože toto místo bylo velmi problematické hlavně u teplotní úrovně -40 °C, kdy nebylo možno dosáhnout lepší regulace než cca -43 °C, přičemž všechny ostatní snímače ukazovaly hodnoty -40 ± 1 °C a i celková „přechodová“ charakteristika se velmi lišila od ostatních. Graf však není součástí textu diplomové práce, ale je přiložen v elektronické příloze.

8.1 Nejistoty související se snímači teploty

Základní nejistota snímačů - u_{Sn}

Protože použité snímače nejsou kalibrovány, tudíž není k dispozici kalibrační list, musí se tato nejistota vypočítat ze specifikací od výrobce, které jsou uvedeny v kapitole *Snímače teploty TG3-60 Pt100/3850/A*. Výpočet je poté jednoduchý:

$$u_{Sn(50)} = \pm(0,15 + 0,002 | T |) = 0,15 + 0,002 \cdot 50,783 = 0,252 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.2)$$

Výsledná nejistota: $u_{Sn(-40)} = 0,237 \text{ } ^\circ\text{C}$

Výsledná nejistota: $u_{Sn(140)} = 0,437 \text{ } ^\circ\text{C}$

Nejistota způsobená ponorem - u_{Sp}

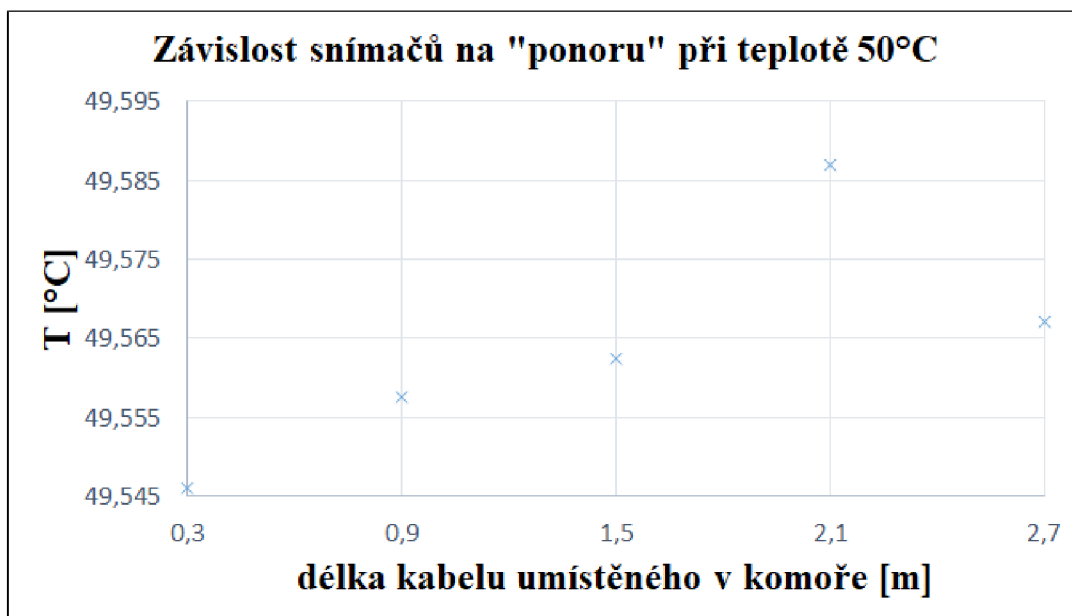
Princip měření spočíval v tom, že jsem postupně měnil délku kabelu umístěného v komoře a sledoval, jak se tato změna projeví na výstupu v podobě změny teploty. Důležité je zmínit, že jsem pokus prováděl pouze s jedním snímačem, a to s desátým, rezervním, protože nebylo možné zasunout kabely od všech devíti snímačů do komory až po největší délku tak, aby nedošlo k posunu celé měřicí konstrukce uvnitř komory. Protože kabel je dlouhý 3 m, viz Obr. 4.7, zvolil jsem pět náměrů, přičemž krajní hodnoty délky byly 0,3 m a 2,7 m. Rozdíl mezi každým měřením tedy byl 0,6 m. Tyto i další potřebné údaje jsou shrnuty níže v Tab. 8.2.

Tab. 8.2: Hodnoty „ponoru“ při teplotě 50 ° C

délka[m]	0,3	0,9	1,5	2,1	2,7	$u_{Sp(50)}[^\circ\text{C}]$
$T_{(50)}[^\circ\text{C}]$	49,546	49,558	49,562	49,587	49,567	0,015
$T_{(-40)}[^\circ\text{C}]$	-41,632	-41,297	-41,051	-41,284	-40,609	0,378
$T_{(140)}[^\circ\text{C}]$	139,533	139,370	139,407	139,789	139,658	0,175

Největší směrodatná odchylka má hodnotu 0,378 °C a náleží teplotě -40 °C. Hodnoty z tabulky jsem také vynesl do grafů, viz Obr. 8.2.

Z grafu je patrná tendence zvyšování teploty s rostoucí délkou kabelu umístěného uvnitř komory. Tento úkaz se projevuje u všech konfirmačních teplot. Na první pohled by se tedy dalo říci, že tento fakt platí vždy, ale protože je experiment (stejně jako všechny ostatní) zatížen vlivem *Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk}* a odchylky jsou velmi malé, považuji jev, resp. shodu tendence, u všech teplot spíše za náhodný, ale jeho vliv bude zahrnut do výsledné bilanční tabulky (např. Tab. 9.1). Stane se tak i přesto, že následující *Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv}* tento vliv prakticky vylučuje. Rozhodl jsem se pro tuto variantu opět z důvodu „bezpečnosti“ (vysvětleno v kapitole 8).



Obr. 8.2: Závislost snímačů na „ponoru“ při teplotě 50°C

Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv}

Na kvantifikování odvodu tepla existuje vztah 5.3, kterého jsem se i já držel. Postup výpočtu pro teplotu 50 °C je zde (u ostatních konfirmačních teplot se výsledek prakticky nezmění):

$$u_{Sv} = (T_{okolí} - T_{média})k \cdot e^{-\frac{L}{D_{eff}}} = (25 - 50) \cdot e^{-\frac{0,3}{0,003}} \doteq 0 \text{ °C} \quad (8.3)$$

Další možnou proměnnou ve vzorci je konstanta k . Její hodnota se pohybuje okolo jedné, což je údaj pro dokonale promíchané médium. Protože médium v konfirmované teplotní komoře je vzduch, u kterého je *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty* - u_{Kg} daleko závažnější než u kapalin, předpokládám, že hodnota konstanty bude o něco větší, ale přesně známa není. Nehledě na její velikost však výsledek změny ještě výrazně méně než konfirmační teploty, proto jsem ji vůbec neuvažoval. Jak jsem uvedl v předcházející kapitole *Nejistota způsobená ponorem* - u_{Sp} , tyto dva zdroje jsou na sobě velmi vázané a výsledek výpočtu by měl mluvit za oba dva. Také proto je výše uvedeno, že výsledky jsou způsobeny spíše kolísáním teploty v komoře.

Nejistota daná driftem charakteristiky (dlouhodobý drift) - u_{Sd}

Jak bylo uvedeno v *Základní nejistota snímačů* - u_{Sn} , použité snímače nejsou kalibrovány, tudíž není možné přesně zdroj nejistoty kvantifikovat. Protože je to ale jeden z hlavních zdrojů, je potřeba stanovit ho jiným způsobem. Existuje zde také

možnost odborného odhadu, ke kterému jsem použil svoji bakalářskou práci [3], kde jsem tento zdroj kvantifikoval pro odporové teploměry Pt100 na základě kalibračních listů. Výslednou hodnotu 4,8 m°C jsem ještě z bezpečnostních důvodů vynásobil dvěma, nyní je tedy hodnota nejistoty 9,6 m°C \pm 0,01 °C.

Dalším způsobem stanovení je údaj o časové stabilitě ze specifikací snímače, který ale příslušný datasheet neobsahuje. Proto zůstává už jen poslední varianta, kterou je použití hodnot z *Základní nejistota snímačů* - u_{Sn} . Odborný odhad, který vychází z bakalářské práce však může být velmi mylný, protože použitý kalibrační list obsahoval pouze kalibrační teploty 30 °C a 157 °C a jednalo se o klasické průmyslové odporové teploměry, jejichž součástí je i kovová konstrukce nebo-li pouzdro, ve kterém jsou samotné čidlo, i jeho přívodní vodiče umístěny. Dalším velkým rozdílem je použité kalibrační médium, kde se jednalo o olejovou lázeň. Možná i proto je výsledná hodnota velmi malá a její zdvojnásobení v tomto případě vůbec nemusí stačit. Na základě těchto důvodů jsem raději použil hodnoty dané chybou snímače.

Výsledná nejistota: $u_{Sd(50)} = 0,252$ °C

Výsledná nejistota: $u_{Sd(-40)} = 0,237$ °C

Výsledná nejistota: $u_{Sd(140)} = 0,437$ °C

Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}

Kvantifikovat nejistotu empiricky bylo velmi obtížné a přineslo to řadu problémů a následných nucených modifikací (vysvětleno v kapitole *Měření napětí/proudu*). Vztah (5.4) nebylo možné použít, protože nebyla k dispozici hodnota ztrátové konstanty H . K výpočtu jsem tedy použil vztah (5.5), který je založen na měření při dvou měřicích proudech a korekci na nulový proud. Z toho vyplývá, že bylo třeba do měřicího obvodu zapojit externí zdroj, což bylo dost komplikované. Další, a asi ještě větší komplikaci, představovalo samotné měření proudu (právě kapitola *Měření napětí/proudu*). Po řadě neúspěšných pokusů jsem se (po průběžných konzultacích s vedením CVVOZE) dopracoval k funkčnímu zapojení, viz Obr. 7.3, kde je ještě přidán regulovatelný zdroj napětí, což bude vysvětleno níže.

Jedním z cílů tohoto experimentu bylo zpětné stanovení ztrátové konstanty H na základě výsledné nejistoty, která tedy byla určena dle vztahu (5.5). To ale opět přineslo do experimentu značný problém, který spočíval v potřebě rovnosti měřicího proudu při nezapojeném externím napájení (klasickém čtyřvodičovém měření odporu), který do obvodu dodává pouze samotná měřicí karta a prvního nastaveného měřicího proudu I_1 . Jen takto bylo možné stanovit nejistotu vztáženou právě k výchozímu měřicímu proudu. Protože jsem se snažil o maximalizaci přesnosti a měřicí obvody pro všech devět snímačů jsem měl zapojeny již podle Obr. 7.3, zvolil jsem následující řešení.

Použil jsem rezervní snímač, u kterého jsem změřil napětí na měřicí kartě (při čtyřvodičovém měření odporu) pomocí multimetru. Následně jsem měřicí obvod přepojil podle Obr. 7.3 tak, aby byl totožný s obvodem u ostatních devíti snímačů a nastavil takové napájecí napětí, aby napětí na měřicí kartě (tyto hodnoty nyní nejsou stejné, protože vzniká úbytek napětí kvůli zapojení „ampérmetru“ do měřicího obvodu), které bylo měřené také multimetrem, bylo opět to stejné jako v předchozím případě. Tímto opatřením se zajistí přibližně stejné měřicí proudy pro obě metody. Určitá chyba zde ale vzniká a je způsobena omezenou přesností externího zdroje napětí, který umí nastavovat maximálně řády jednotek milivoltů, čímž se nedá úplně přesně nastavit stejná hodnota jako u prvního případu. Tabulka napájecích a naměřených hodnot napětí je uvedena zde:

Tab. 8.3: Tabulka napájecích a naměřených hodnot napětí

T[°C]	U_{ref} [mV]	U_{m1} [mV]	U_{m2} [mV]	U_{nap1} [mV]	U_{nap2} [mV]
-40	34,88	35,01	83,42	48,00	114,00
50	49,32	49,19	119,64	62,00	147,00
140	63,57	63,90	153,22	77,00	184,00

Další tabulka (Tab. 8.4) obsahuje již naměřené hodnoty měřicích proudů a napětí, dále výslednou nejistotu vlivem samoohřevu a zpětně vypočtený koeficient samoohřevu h . Druhý (vyšší) měřicí proud jsem nastavil na hodnotu $\pm 1\text{mA}$ tak, abych splňoval požadavky udané výrobcem (Obr. 4.7). Ty obsahují kromě maximálního měřicího proudu 1,2 mA také měřicí proud doporučený, který je 0,5 mA. Naměřené hodnoty výchozích měřicích proudů dodávaných samotným měřicím systémem se této hodnotě přibližují ($\pm 415\ \mu\text{A}$).

Tab. 8.4: Hodnoty samoohřevu při teplotě 50 °C

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$I_{1(50)}$ [mA]	0,412	0,412	0,411	0,411	0,410	0,410	0,410	0,411	0,405
$I_{2(50)}$ [mA]	1,004	1,005	1,003	1,003	1,001	1,001	1,001	1,002	0,989
$U_{1(50)}$ [mV]	49,087	49,107	49,020	49,070	49,108	49,058	49,123	49,124	48,334
$U_{2(50)}$ [mV]	119,865	119,913	119,820	119,950	119,910	119,786	119,944	119,937	118,070
$u_{Ss(50)}$ [mΩ]	49,46	25,18	38,65	40,26	2,94	2,56	2,42	35,30	8,06
$h_{(50)}$ [mW/K]	0,409	0,803	0,521	0,501	6,841	7,872	8,339	0,572	2,429

Největší, a tím pádem použitá ve výsledné bilanční tabulce, je hodnota 0,049 Ω u snímače T1, jejíž potřebná (modifikovaná) část výpočtu vycházející ze vztahu 5.5 je ukázána zde:

$$u_{Ss(50)} = I_1^2 \frac{\left| \frac{U_2}{I_2} - \frac{U_1}{I_1} \right|}{I_2^2 - I_1^2} = (0,412 \cdot 10^{-3})^2 \frac{\left| \frac{119,865 \cdot 10^{-3}}{1,004 \cdot 10^{-3}} - \frac{49,087 \cdot 10^{-3}}{0,412 \cdot 10^{-3}} \right|}{(1,004 \cdot 10^{-3})^2 - (0,412 \cdot 10^{-3})^2} = 0,049 \Omega \quad (8.4)$$

Zpětný výpočet koeficientu samoohřevu h se řídí vztahem odvozeným z 5.4:

$$h = \frac{U_t}{I_t} u_{Trs(50)} = \frac{49,087 \cdot 10^{-3} \cdot 0,412 \cdot 10^{-3}}{49,46 \cdot 10^{-3}} = 0,409 \text{ mW/K} \quad (8.5)$$

Z Tab. 8.4 je vidět, že výsledná nejistota se pro různé snímače velmi liší. Je to způsobené opět kolísáním teploty v komoře. Z tohoto důvodu není potřeba dále pracovat s chybou vlivem nepřesného nastavení napětí na zdroji, protože chyba je řádově daleko menší než vliv kolísání, který tuto chybu dostatečně pokryje (a i výrazně navýší). Tím pádem se samozřejmě liší i velikosti koeficientu samoohřevu h , které se pohybují v rozmezí $0,409 \div 8,339 \text{ mW/K}$, jež jsou současně mezními hodnotami i celkově pro všechny konfirmační teploty.

V Tab. 5.1 nejsou uvedeny hodnoty pro typ média „vzduch s prouděním“, což je případ použité teplotní komory, ale předpokládám, že rozdíly mezi typy regulace teplot „s prouděním“ a „bez proudění“ by měly být znatelně menší u vzduchu než u vody. To je možná také důvod, proč tento typ média v tabulce není. Pokud to tedy srovnáme s hodnotami typu média „vzduch bez proudění“, pohybujeme se kolem intervalu udaném tabulkou, takže výsledné hodnoty určitě vypovídající hodnotu mají, ikdyž měření bylo zatížené zmíněným kolísáním teploty. Většina koeficientů (napříč všemi teplotami) se ale pohybuje pod hranicí jedné, konkrétně v rozmezí $\pm(0,5 \div 1 \text{ mW/K})$, a vyšší hodnoty (v řádu jednotek mW/K) se objevují sporadicky, což lze přičíst právě kolísání. Z toho se dá s určitou rezervou usoudit, že hodnota koeficientu samoohřevu h komory CTS T-65/50 při rychlosti proudění vzduchu 100 %, při které byla celá konfirmace prováděna, bude někde okolo (spíše pod) hodnoty 1, což je spodní hranice udaná tabulkou pro typ média „vzduch bez proudění“. Další zajímavostí je, že měřicí proud, a tím pádem i napětí u snímače T9, jsou nižší než u ostatních.

Největší výsledná nejistota: $u_{Ss(-40)} = 0,028 \Omega$, snímač T7

Největší výsledná nejistota: $u_{Ss(140)} = 0,041 \Omega$, snímač T5

Důležité je ještě provést kontrolní výpočet, jestli se vlivem změny zapojení měřicího obvodu do experimentu nezanese příliš velká chyba. Pokud by totiž chyba byla řádově větší než nejistota získaná tímto experimentem, měření by nemělo smysl. Následuje vzorový výpočet nejistoty (potřebné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.4):

$$\delta_U = \delta_M X_M + \delta_R X_R = 0,1 \cdot 10^{-2} \cdot 34,96 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 0,17 \text{ mV} \quad (8.6)$$

Výpočet pro chybu měření proudu je identický: $\delta_I = 1,75 \mu A$

Vyjádření koeficientu citlivosti A_U se nalézá v kapitole *Koeficient citlivosti*, zde se jen počítá s jinou hodnotou měřicího proudu, proto je výsledek odlišný:

$A_U = 2398,1 A^{-1}$. Koeficient citlivosti A_I se vyjádří následovně:

$$A_I = \frac{\delta R}{\delta I} = -\frac{U}{I^2} = -\frac{34,96 \cdot 10^{-3}}{(417 \cdot 10^{-6})^2} = -201,04 kV/A^2 \quad (8.7)$$

Konečně výsledná nejistota nepřímého měření odporu je následující:

$$\begin{aligned} \delta_{R_s} &= \sqrt{A_U^2 \cdot \delta_U^2 + A_I^2 \cdot \delta_I^2} = \\ &= \sqrt{2398,1^2 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3^2} + (-20104)^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-6^2}} = 0,187 \Omega \quad (8.8) \end{aligned}$$

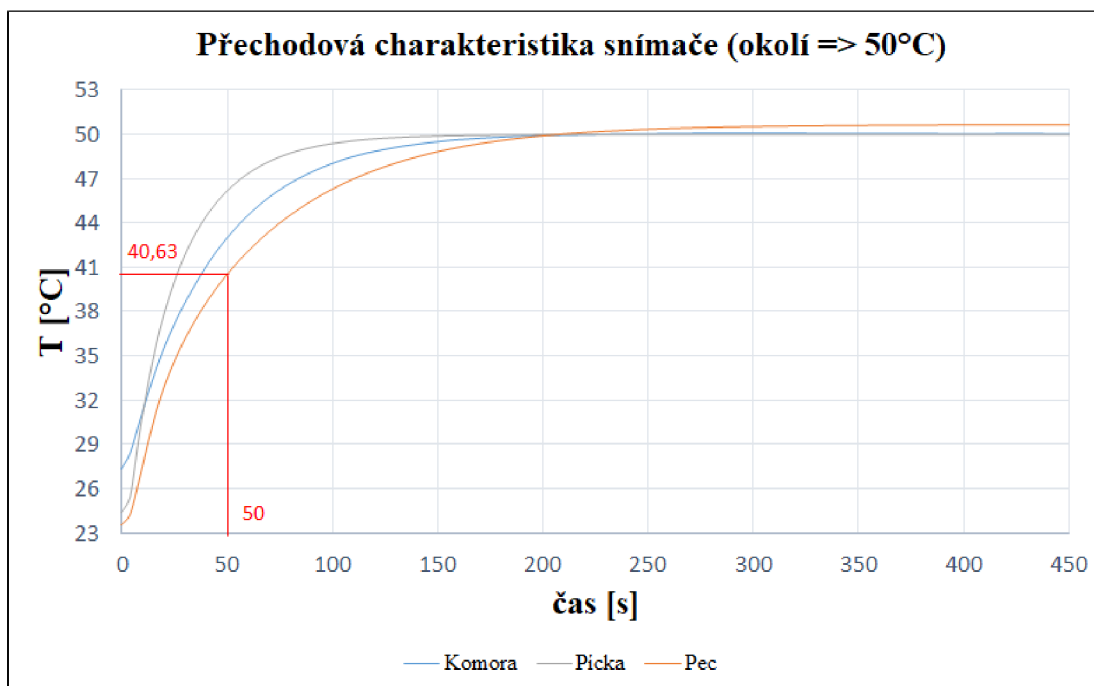
Pro teplotu 140 °C a vyšší měřicí proud ($\pm 1 mA$), kde by teoreticky měla být nejistota největší, vychází hodnota $\delta_{R_s} = 0,242 \Omega$. Pokud se provede porovnání s *Nejistota způsobená samoohřevem* - u_{S_s} , je to přibližně šestinásobek, v porovnání s následující *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím* - u_{M_t} , je výsledek jen o něco málo větší. Tudíž lze závěrem konstatovat, že zapojení tohoto experimentu „nezakryje“ kvantifikované zdroje nejistot a jejich měření má smysl.

Nejistota daná rychlostí odezvy - u_{S_r}

Vytvořit jednotkový skok s celou měřicí konstrukcí není možné, protože k tomu je zapotřebí otevřít dveře komory. Než se měřicí konstrukce stačí vložit zpět, natož na přesnou pozici definovanou normou ČSN EN 60068-3-5 [10], a zastrčí se dovnitř přívodní kabely, teplota v komoře se drasticky změní. Po zavření dveří se komora vzniklý rozdíl teplot snaží doregulovat, tudíž se teplota indikovaná snímači dále mění. Proto jsou data naměřena znovu rezervním snímačem, který bylo možné prostrčit otvorem v komoře určeným právě pro přívodní vodiče. Přechodová charakteristika při teplotě 50 °C je zobrazena na následujícím Obr. 8.3. Při této teplotě jsou pro porovnání naměřeny rovnou tři křivky. Jedna přímo v komoře, druhá v kalibrační píce a třetí v kalibrační peci. Teplotu 140 °C zvládne nastavit kromě komory také kalibrační pec, proto jsou při této hodnotě naměřeny průběhy dva. Pro -40 °C je znázorněna už jen jedna křivka naměřená v komoře. Poslední dvě zmíněné teploty jsou součástí opět pouze elektronické přílohy.

Z grafu je možné získat časovou konstantu snímače (zde pro okótovaný průběh naměřený v kalibrační peci) podle vztahu:

$$T_{\tau_0} = (T_{kon} - T_{poc}) \cdot 0,63 + T_{poc} = (50,659 - 23,565) \cdot 0,63 + 23,565 = 40,63 \text{ } ^\circ C$$



Obr. 8.3: Přechodová charakteristika snímače (okolí->50°C)

$$40,63 \text{ } ^\circ\text{C} - > 50 \text{ s} = \tau_0 \quad (8.9)$$

Přechodová charakteristika naměřená v kalibrační peci končí na vyšší teplotě, protože toto měření bylo zatíženo *Nejistota daná kontaktem mezi snímači a prostředím* - u_{Ck} . Detailněji je to vysvětleno v kapitole *Základní nejistota měřicí karty* - u_{Mn} . Stejná příčina stojí pravděpodobně i za pomalejší dynamikou. Časové konstanty zjištěné ze všech naměřených průběhů napříč všemi konfirmačními body jsou v rozsahu 19÷55 s. Tento rozptyl je hodně velký, ale je dán právě měřením v kalibrační peci, kde vycházejí obě časové konstanty kolem 50 s. Tou větší z nich je tedy 55 s naměřená při teplotě 140 °C. Časové konstanty měřené v komoře a v píce vycházejí kolem 20 s. Jedinou výjimkou je měření v komoře při teplotě 50 °C, kde konstanta vyšla 42 s. Tento úkaz si nedovedu logicky vysvětlit, je ale možné, že se do měření zanesla nějaká náhodná (dále nezkoumaná) chyba.

Jediná možnost, kdy se mohla aplikovat tato nejistota (čekalo se na ustálení hodnoty snímače), byla při měření vlastní analýzy chyby měřicích karet (probráno právě v kapitole *Základní nejistota měřicí karty* - u_{Mn}). V ostatních případech jsem měl snímač, resp. měřicí konstrukci se snímači, připraveny na dané pozici v komoře a čekal jen na vyregulování (ustálení) nastavené teploty. I při tomto měření tomu tak většinou bylo (snímač byl od začátku změny teploty zasunut v kalibrátoru), ale byly i případy, kdy teplota v kalibrátoru již byla nastavena a snímač se do něj vložil až následně. Pravidlo pro tuto nejistotu zní: *Má-li chyba být menší než 1 %, je po změně*

teploty nutné vyčkat po dobu rovnou nejméně pětinašobku časové konstanty. [30] Já jsem při odečítání hodnot čekal nejméně 10 minut. Pokud budeme brát největší časovou konstantu 55 s, která je pravděpodobně navýšena zmíněnou *Nejistota daná kontaktem mezi snímači a prostředím* - u_{Ck} , dostaneme se na více jak desetinašobek časové konstanty. Tím pádem je možné nejistotu danou rychlostí odezvy snímače zanedbat, což potvrzuje i následující výpočet dle vzorce 5.6:

$$u_{Sr} = (|T_{pocatek} - T_{konec}|)e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} = (|23,565 - 50,659|)e^{-\frac{600}{55}} = 4,94 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.10)$$

Vyšší teplotou, resp. přechodem mezi teplotami, se nejistota principem vztahu zvětší. Při maximalizaci výsledku, tedy při přechodu na konfirmační teplotu 140 °C, se dosáhne hodnoty $2,15 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$. I toto číslo je vůči ostatním zdrojům nejistot zanedbatelné, proto nejistota nebude uvažována ve výsledné bilanční tabulce.

Nejistota daná (ne)linearitou - u_{Sl}

Protože se v práci neměřil dostatečný počet teplotních bodů, nemohla být nejistota experimentálně kvantifikována. Vzhledem k tomu, že souvisí s *Základní nejistota snímačů* - u_{Sn} , je poměrně pravděpodobné, že právě zmíněný zdroj bude pokrývat i tuto nejistotu. Dalším důvodem, proč je možno vliv zanedbat, je to, že *Nejistota daná driftem charakteristiky (dlouhodobý drift)* - u_{Sd} byla pro nedostatek údajů kvantifikována právě jako *Základní nejistota snímačů* - u_{Sn} . Tím se zvýšil příspěvek k celkové nejistotě, který částečně může pokrývat i právě tento zdroj.

Nejistota interpolace snímače - u_{Si}

Protože jeden ze způsobů konfirmace, který v diplomové práci provádím, je „přímé“ měření teploty (vysvětleno v kapitole 6.2), je dobré se nad tímto zdrojem nejistoty alespoň zamyslet. Tím, že přepočítání odporu na teplotu se provádí „uvnitř“ měřících karet, nemáme kontrolu nad tím, jak se tento výpočet provádí. Program LabView poskytuje možnost navolení daného typu RTD snímače, ze kterého vychází hodnoty konstant A, B a C. Návod v programu LabView říká, že při měření teplot menších než 0 °C se při výpočtu uvažuje i konstanta C, naopak u teplot větších než 0 °C se používají jen konstanty A a B. I přesto, že tento postup je naprosto v pořádku, viz kapitola 4.2.1, chybí zde jistota, že je tomu opravdu tak, a proto může být vhodné tuto nejistotu kvantifikovat. Protože kvantifikace na základě výpočtu není moc reálná, je možné hodnotu odhadnout. Stejně je tomu tak, pokud se provádí měření odporu a při přepočtu není použit dostatečný počet konstant. Jedním z cílů této práce je ale porovnání „přímého“ a nepřímého měření teploty na základě naměřených hodnot a především výsledných nejistot měření. Z tohoto důvodu jsem nejistotu interpolace snímače neuvažoval.

8.2 Nejistoty související se získáváním hodnot

Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}

Údaje od výrobce jsou uvedeny v kapitole *Měřicí karty NI 9219 a šasi cDAQ-9178* v Tab. 4.4. U „přímého“ měření zde však nastává jeden problém, kterým je určení rozsahu měření. V datasheetu je totiž na místě rozsahu uveden údaj „Pt100“, přesně tak, jak je zobrazeno v Tab. 4.4. Po domluvě s vedením zkušební laboratoře CVVOZE, jsem základní nejistotu vypočítal pro nepřímé měření teploty (v Ω) a následně přepočítal na $^{\circ}\text{C}$. Výpočet se řídí vztahem 5.7. Při měření byly podmínky okolí v rozsahu 25 ± 5 $^{\circ}\text{C}$, tudíž stačí uvažovat nižší hodnoty chyb.

$$u_{Mn}(50) = \delta_M X_M + \delta_R X_R = 0,1 \cdot 10^{-2} \cdot 119,698 + 1200 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 1,320 \Omega \quad (8.11)$$

Výsledná hodnota 1,320 Ω je hodně vysoké číslo. Je to způsobeno velkým rozsahem (1 k Ω), který je v datasheetu uveden. V přepočtu na $^{\circ}\text{C}$ se jedná o více než 3 $^{\circ}\text{C}$. Takto vysoká hodnota by potom znehodnotila celou výslednou nejistotu měření, protože by drtivou většinu ostatních nejistot (asi až na *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}*) následným geometrickým součtem (kapitola *Celková nejistota*) znevážila. Proto jsem se rozhodl (opět po domluvě s vedením CVVOZE) vytvořit svou vlastní analýzu chyby měřicích karet, kdy jsem provedl měření po celém (v rámci možností) rozsahu snímače, které je uvedeno v následující Tab. 8.5. K získání hodnot byl opět použit rezervní snímač teploty.

Tab. 8.5: Porovnání měřicích přístrojů

$T_{nas}[^{\circ}\text{C}]$	-9	0	20	50	80	100	140	170
$R_{AgI}[\Omega]$	96,656	100,141	107,869	119,417	130,861	138,432	153,622	164,791
$R_{NI}[\Omega]$	96,651	100,137	107,867	119,411	130,851	138,424	153,599	164,763
$\Delta_R[\Omega]$	0,005	0,004	0,002	0,006	0,010	0,008	0,023	0,028
$\delta_R[\%]$	0,005	0,004	0,002	0,005	0,008	0,006	0,015	0,017

Důležité je zmínit, že teplotní body byly nastavovány dvěma různými kalibračními pecemi, protože každá z nich má omezený rozsah teplot, které může nastavit. Nižší teploty ($-9 \div 100$ $^{\circ}\text{C}$) byly měřeny v kalibrační pícece, jenž byla první volbou kvůli svým úzkým průměrům jednotlivých kovových bloků, které byly naprosto ideální pro použité typy snímačů s průměrem pouzdra 3 mm, viz Obr. 4.7. Tímto je zajištěn dostatečný tepelný kontakt mezi snímačem a kovovým blokem, což výrazně potlačuje potenciální nejistotu měření, viz kapitola *Nejistota daná kontaktem mezi snímači a prostředím - u_{Ck}* . Bohužel má tato pícka velmi omezený rozsah

($-10 \div 140 \text{ } ^\circ\text{C}$), tím pádem nebylo možné nastavit vyšší, ani nižší teploty než výše uvedené. Krajní hodnoty rozsahu se nastavit nepodařilo (viz -9°C).

Vyšší teploty ($140 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $170 \text{ } ^\circ\text{C}$) se daly pokrýt další kalibrační pecí, jež má rozsah od teploty okolí až do 700°C . U této pece již byly otvory o větším průměru a byl tak větší prostor pro nejistotu měření. Možná i z tohoto důvodu jsou výsledné chyby u těchto teplot vyšší. Toto je také vysvětlení pro nepřesně nastavený teplotní bod $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Obr. 8.3). Protože jiné kalibrační zařízení, které by dokázalo nastavit nižší teplotu než $-9 \text{ } ^\circ\text{C}$ nebylo k dispozici, je právě tato hodnota tou nejnižší. Porovnávací měření přímo v komoře nemělo smysl kvůli existenci, již několikrát zmíněného kolísání teploty. Jeden z konfirmačních bodů v diplomové práci je $-40 \text{ } ^\circ\text{C}$ a *Celková konfirmace komory* zahrnuje měření na celém rozsahu možných teplot nastavovaných komorou, tedy $-65 \div 180 \text{ } ^\circ\text{C}$. Toto je potřeba vzít v úvahu, a proto bude výsledná chyba zdvojnásobena.

Jako referenční přístroj jsem použil multimetr. Realizoval jsem měření odporu, abych do něj nezanesl další chybu vlivem přepočítávání odporu na teplotu, které nemusí mít oba přístroje totožné. Postup pro stanovení nové chyby měřicí karty je následující. V Tab. 8.5 jsou vypočítána jak absolutní, tak i relativní chyba. Protože je potřeba výslednou chybu vztáhnout k měřené hodnotě, vybral jsem opět z „bezpečnostních“ důvodů největší relativní chybu z provedených měření, která je $0,017 \%$ při měření teploty $170 \text{ } ^\circ\text{C}$. Je zde vidět, že největší chyby vznikají při měření vyšších teplot, což se předpokládalo (nehledě na jiný kalibrátor). Protože je ale samozřejmě nutné dále pracovat s absolutní chybou, vezme se právě tato chyba z daného měření, která činí $0,028 \Omega$ a vynásobí se dvěma. Výsledná uvažovaná chyba má tedy hodnotu $0,056 \Omega$. Samozřejmostí je také to, že i „referenční“ přístroj měří s určitou chybou, která je vypočítána níže.

Údaj od výrobce [36]: $\pm(0,01 \%$ of reading + $0,004 \%$ of range)

Údaj byl odečten při rozsahu $1000,000 \Omega$, T_{cal} (Teplota kalibrace) $\pm 5^\circ\text{C}$ a kalibraci naposledy před rokem.

$$\delta_{X(50)} = \frac{\delta_M X_M + \delta_R X_R}{100} = \frac{0,01 \cdot 119,698 + 0,004 \cdot 1000}{100} = 0,052 \Omega \quad (8.12)$$

Výsledná nejistota měřicí karty se poté vypočítá podle následujícího vztahu:

$$u_{Mn(50)} = \delta_X + 2\delta_R = 0,052 + 2 \cdot 0,017 = 0,086 \Omega \quad (8.13)$$

Výsledná nejistota: $u_{Mn(-40)} = 0,089 \Omega$

Výsledná nejistota: $u_{Mn(140)} = 0,082 \Omega$

Nejistota daná časovou stabilitou (driftem) měřicí karty - u_{Md}

Nejistota se počítá totožně jako *Základní nejistota měřicí karty* - u_{Mn} (myslena kvantifikace vycházející z datasheetu). Při „přímém“ měření teploty znovu nastává problém s měřicím rozsahem, který je vyřešen stejně jako u předchozí nejistoty. Potřebné údaje od výrobce jsou uvedeny opět v kapitole *Měřicí karty NI 9219 a šasi cDAQ-9178*, tentokrát ale v Tab. 4.5.

$$u_{Md(50)} = \delta_M X_M + \delta_R X_R = 15 \cdot 10^{-6} \cdot 119,698 + 30 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 = 0,032 \Omega \quad (8.14)$$

Největší výsledná nejistota: $u_{Md(-40)} = 0,031 \Omega$, snímač

Největší výsledná nejistota: $u_{Md(140)} = 0,032 \Omega$, snímač

Nejistota způsobená rozlišením - u_{Mr}

Rozlišení měřicích karet souvisí s šumem. Abychom mohli nejistotu kvantifikovat, musí se nejprve zjistit počet efektivních bitů převodníku dle vztahu 8.15. Protože v programu nebyl nastaven vzorkovací mód („high resolution“, „high speed“ atd.), ale byla ponechána „defaultní“ možnost, nelze jednoznačně říct, který z módů se vlastně vykonává, a tudíž vybrat správnou hodnotu šumu. Proto je nejlepším řešením dosadit největší možnou hodnotu šumu (7,1) z [26], jež odpovídá módu „high speed“.

$$effresolution = \log_2 \frac{inputrange}{noise} = \log_2 \frac{1000}{7,1} = 7,14 \text{ bitu} \quad (8.15)$$

Pro získání odhadu nejistoty se nyní musí aplikovat vztah 8.16, kde je počet efektivních bitů dosazen za n . Vztahy jsou čerpány z [37].

$$u_{Mr(50)} = \frac{1}{2^n - 1} = \frac{1}{2^{7,14} - 1} = 7,141 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (8.16)$$

Výsledná hodnota je velmi malá, navíc existuje předpoklad, že je zdroj nejistoty již pokryt - *Základní nejistota měřicí karty* - u_{Mn} , potažmo *Nejistota daná časovou stabilitou (driftem) měřicí karty* - u_{Md} , proto tento vliv nebyl dále uvažován.

Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt}

Tato nejistota byla kvantifikována experimentálním měřením, které bylo provedeno v zapojení podle Obr. 7.3. Přestože na základě principu termoelektrického jevu bylo předpokládáno, že hodnota konfirmační teploty nebude mít na výsledek vliv, provedl jsem tato měření pro kontrolu při všech teplotách. Naměřené hodnoty při teplotě 50 °C jsou uvedeny v Tab. 8.6.

Postup výpočtu termonapětí, dle vztahu 5.9, bude prezentován stejně jako obvykle u snímače s největší hodnotou nejistoty, kterým je snímač T9, u něhož

Tab. 8.6: Hodnoty termoelektrického napětí

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$U_{A(50)} [mV]$	49,097	49,119	49,020	49,040	49,115	49,067	49,130	49,131	49,219
$U_{B(50)} [mV]$	-49,011	-49,014	-48,910	-48,950	-49,016	-48,963	-48,998	-48,993	-49,043
$u_{UMt(50)} [mV]$	0,043	0,053	0,055	0,045	0,050	0,052	0,066	0,069	0,088

zároveň byly naměřeny nejvyšší hodnoty napětí. Tento jev je v rozporu s informací získanou při měření *Nejistota způsobená samoohřevem* - u_{Ss} , kde byly hodnoty naopak výrazně nejmenší.

$$u_{UMt(50)} = \frac{U_A + U_B}{2} = \frac{49,219 - 49,043}{2} = 0,088 \text{ mV} \quad (8.17)$$

Výsledek je ve voltech, tudíž se samozřejmě musí převést pomocí citlivostního koeficientu na jednotky Ω a následně (již v bilanční tabulce např. Tab. 9.1) na $^{\circ}\text{C}$. Postup získání citlivostního koeficientu je vysvětlen v kapitole *Koeficient citlivosti*, zde bude použita pouze výsledná vypočtená hodnota, která je $2392,3 \text{ A}^{-1}$. Požadované jednotky, tedy Ω , se dosáhne již jen snadným vynásobením:

$$u_{Mt(50)} = A_U \cdot u_{UMt(50)} = 2439,024 \cdot 0,088 \cdot 10^{-3} = 0,215 \text{ } \Omega \quad (8.18)$$

Největší výsledné nejistoty: $u_{Mt(-40)} = 0,146 \text{ } \Omega$, snímač T9

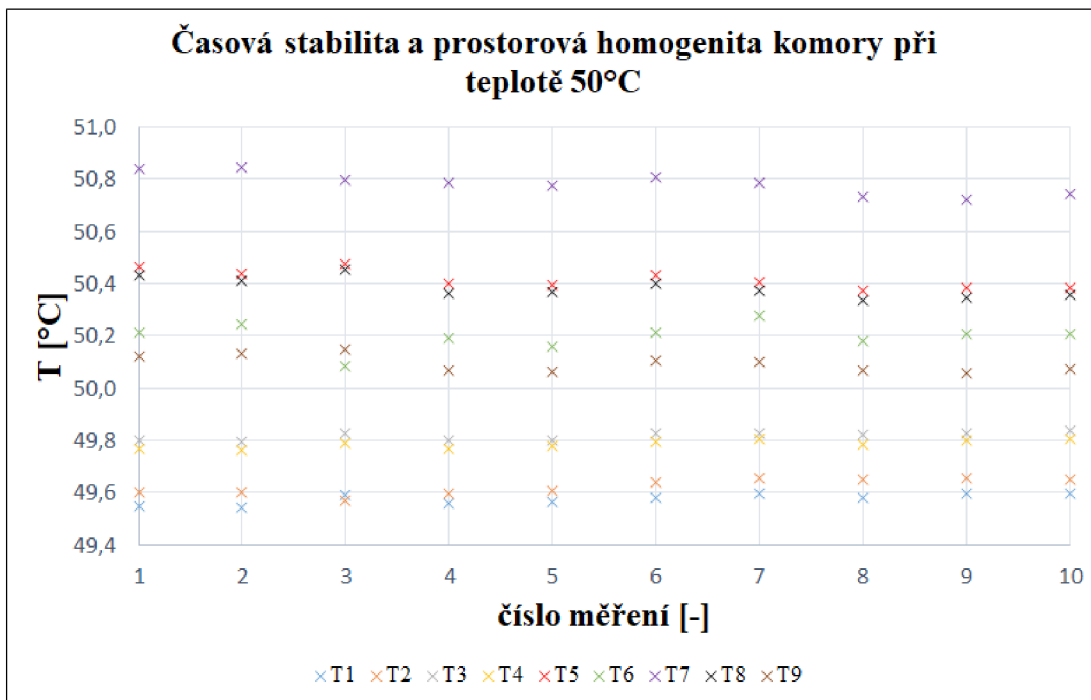
Největší výsledné nejistoty: $u_{Mt(140)} = 0,228 \text{ } \Omega$, snímač T8

Nejistota vlivem zapojení - u_{Mz}

Jelikož je zapojení ve čtyřvodičovém provedení, nejistota vlivem elektrického zapojení se zde neuplatní. Propojení měřicího systému s PC je realizováno pomocí komunikačního rozhraní USB, viz kapitola 4.3. Jedná se pouze o přenos již digitalizovaných dat, proto na této straně měřicího řetězce žádnou potenciální nejistotu nepředpokládám. Stejně je tomu tak i u připojení měřicích karet v šasi.

8.3 Nejistoty související s teplotní komorou

Naměřená data při konfirmační teplotě $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou demonstrována na Obr. 8.4. Bylo provedeno deset odměrů po dobu 30 minut, tedy jeden odměr za tři minuty, což je v souladu s normou ČSN EN 60068-3-11 [12], která uvádí nejkratší dobu monitorování právě 30 minut a 5 až 20 odměrů. Pokud by se prováděla konfirmace za účelem vyhodnocení vhodnosti komory pro konkrétní zkoušky (A a B), popsána normou



Obr. 8.4: Časová stabilita a prostorová homogenita komory při teplotě 50° C

ČSN EN 60068-3-7 [16], je nutné pořizovat záznamy každou minutu. Detailnější informace jsou k nalezení v kapitole 4.1.

Z Obr. 8.4 je vidět hned několik důležitých věcí. První z nich je *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty* - u_{Kg} . Druhým údajem je *Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty* - u_{Kk} . Třetím pak *Nejistota daná prostorovou homogenitou (odchylkou) teploty* - u_{Ko} a čtvrtou informací odchylka od nastavené hodnoty. Poslední dvě zmíněné se aplikují spíše při vyhodnocení konfirmace jako takové, a proto jsou rozebrány až v kapitole 10 - *Odchylka teploty v prostoru a Odchylka od nastavené teploty*.

Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty - u_{Kk}

Tento vliv je jedním z hlavních předmětů a cílů samotné konfirmace teplotních komor. Udává se také ve výsledném protokolu o konfirmaci, včetně všech naměřených dat, ze kterých se kvantifikuje nejistota daná tímto vlivem. Důležitost kolísání je patrná také z předchozího textu diplomové práce, kdy většina experimentálních měření s cílem stanovit velikost nejistoty dané určitým zdrojem, podléhá právě vlivu kolísání teploty v komoře, a tím se vypočtené výsledky do jisté míry znehodnocují. Jejich hodnoty jsou totiž potom nadhodnoceny.

Kolísání teploty v čase je možné zaznamenat i z Obr. 8.4, ale přesný údaj o velikosti tohoto vlivu z něj nezískáme. Proto je zde následující Tab. 8.7, kde jsou

uvedeny výsledné směrodatné odchytky (nejistoty měření) pro všechny konfirmační body. Největší nejistota vlivem kolísání teploty vůbec, vznikla při teplotě $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ u snímače T2 a její hodnota je $0,213\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tab. 8.7: Hodnoty nejistot vlivem kolísání teploty

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$u_{Kk(50)}[^{\circ}\text{C}]$	0,021	0,031	0,016	0,016	0,036	0,052	0,042	0,039	0,032
$u_{Kk(-40)}[^{\circ}\text{C}]$	0,129	0,213	0,126	0,079	0,045	0,098	0,070	0,075	0,055
$u_{Kk(140)}[^{\circ}\text{C}]$	0,023	0,022	0,019	0,040	0,043	0,084	0,072	0,056	0,072

Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}

Gradient teploty je největší složkou výsledné nejistoty měření při konfirmaci teplotních komor. Vzhledem k tomu, že typem média je vzduch, je tento vliv ještě daleko výraznější než u kapalných lázní. Na rozdíl od předešlé nejistoty, je tento vliv možné poměrně přesně odečíst z Obr. 8.4. Tabulka gradientů teploty je zde (Tab. 8.8):

Tab. 8.8: Hodnoty nejistot vlivem gradientu teploty

číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
čas [min]	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$u_{Kg(50)}[^{\circ}\text{C}]$	0,441	0,442	0,427	0,414	0,407	0,414	0,399	0,383	0,378	0,384
$u_{Kg(-40)}[^{\circ}\text{C}]$	1,208	1,164	1,151	1,148	1,137	1,143	1,168	1,168	1,135	1,140
$u_{Kg(140)}[^{\circ}\text{C}]$	2,164	2,175	2,183	2,166	2,171	2,167	2,194	2,111	2,176	2,154

Největší nejistota způsobená gradientem teploty odpovídá (podle předpokladů) teplotě $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ a má hodnotu $2,194\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Nejistota daná prostorovou homogenitou (odchytkou) teploty - u_{Ko}

Nejistota daná odchytkou teploty je spíše orientační a dodatečná, protože zdroj, ze kterého vychází, je společný i pro výše uvedenou *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty - u_{Kg}* . Její aplikování je vhodné spíše pro měření, u kterých nebylo uvažováno dostatečné množství zdrojů nejistot nebo bylo provedeno málo měření, stejně jako u následující *Celková průměrná nejistota - u_{Kc}* . Odchytky teploty se tak používá spíše k vyhodnocení samotné konfirmace, protože je to jeden z údajů, který je nutné uvést v protokolu o zkoušce výkonnosti daném normou ČSN EN 60068-3-11 [12], viz kapitola 4.1.4.

Nejistota způsobená rozlišením - u_{Kr}

Na displeji čelní strany komory, jenž jsem pro nastavování teplot používal, lze nastavit hodnoty s přesností dvou desetinných míst, tedy např. 100,00 °C. Poslední desetinné místo jsou setiny °C a nejistota daná nejméně významným digitem má tedy hodnotu 0,01 °C. Tato velikost je ale v porovnání s jinými nejistotami zanedbatelná, a proto se ve výsledné bilanční tabulce nebude aplikovat.

Celková průměrná nejistota - u_{Kc}

Nejistota ve výsledné bilanční tabulce uvedena nebude, protože bylo provedeno dostatečné množství měření - 10, jak je uvedeno v požadavcích normy ČSN EN 60068-3-11 [12] a popsáno v kapitole 4.1. Nejistota tak může být považována za zanedbatelnou.

Další nejistoty

Konstrukce je vyrobena z hliníkových trubiček o vnějším průměru 6 mm a síle 1 mm, tudíž nemá velkou tepelnou kapacitu a neovlivňuje tak přesnost měření do takové míry, aby se tento zdroj musel uvažovat v dalších výpočtech. Důvodem pro zanedbání je i prozatímní verze konstrukce, která se bude nadále vyvíjet. Kvantifikování tohoto vlivu tak bude mít větší smysl až po ujasnění finální verze konstrukce.

Dalším potenciálním zdrojem nejistoty je otvor v boku komory, jenž je určen pro průvod přírodních kabelů od snímačů. Právě kabely poté způsobují nedokonalé utěsnění otvoru, a kvůli tomu může vznikat další potenciální odvod tepla. I u tohoto zdroje ale předpokládám, že nebude mít tak velký vliv na výslednou teplotu v komoře. Obě tyto nejistoty jsou velmi těžko kvantifikovatelné (i pouhým odhadem) a i z toho důvodu jsem se rozhodl je zanedbat.

8.4 Nejistoty související s celým měřicím řetězcem

Nejistota způsobená hysterezí - u_{Ch}

Tuto nejistotu jsem určil také empiricky, viz Tab. 8.9. Protože jsem měření provedl tak, že jsem měřicí konstrukci nechal v komoře a měnil teplotu komory, nelze přesně říci, do jaké míry se jedná o hysterezi snímače a do jaké míry o hysterezi komory. Z toho důvodu lze nejistotu chápat jako „společnou“ hysterezi pro oba přístroje, a proto je uvedena právě v této části, narozdíl od kapitoly *Nejistota způsobená hysterezí - u_{Sh}* , která je obecnějšího rázu a výchozím řešením je vždy hystereze samotného snímače, popř. komory. Odhad se vypočítá jednoduše jako rozdíl hodnot po ochlazení a po oteplení teploty v komoře.

Tab. 8.9: Hodnoty hystereze při teplotě 50 °C

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$T_{ote(50)} [^{\circ}\text{C}]$	49,507	49,569	49,755	49,724	50,469	50,274	50,911	50,430	50,051
$T_{och(50)} [^{\circ}\text{C}]$	49,502	49,558	49,759	49,715	50,466	50,241	50,895	50,437	50,074
$u_{Ch(50)} [^{\circ}\text{C}]$	0,005	0,011	0,004	0,009	0,003	0,033	0,014	0,007	0,023

Výpočet pro největší nejistotu měření, která se týká snímače T6:

$$u_{Ch(50)} = |T_{ote(50)} - T_{och(50)}| = |49,724 - 49,715| = 0,032 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (8.19)$$

Největší výsledná nejistota: $u_{Ch(-40)} = 0,236 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, snímač T2

Největší výsledná nejistota: $u_{Ch(140)} = 0,022 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, snímač T9

Nejistota daná opakovatelností měření - u_{Co}

I zde se jedná o opakovatelnost celého měřicího experimentu, nikoli každé části měřicího systému jednotlivě. Všechny použité přístroje tedy byly mezi jednotlivými měřeními vráceny do původního stavu a celý experiment se tak po zapojení zopakoval. Protože proces je časově velmi náročný (cyklus při teplotě 50 °C trvá více než hodinu, při ostatních teplotách ještě více), provedl jsem jen pět měření a následně vynásobil bezpečnostním faktorem k_s , viz Tab. 1.1. V Tab. 8.10 jsou uvedeny naměřené hodnoty pouze pro snímače, u kterých vyšla největší nejistota měření.

Tab. 8.10: Hodnoty opakovatelnosti měření s největší nejistotou

číslo měření	1	2	3	4	5	$u_{Co(50)}$	snímač
$T_{(50)} [^{\circ}\text{C}]$	50,284	50,281	50,289	50,253	50,211	0,020	T6
$T_{(-40)} [^{\circ}\text{C}]$	-43,079	-41,227	-42,976	-42,929	-42,988	0,496	T2
$T_{(140)} [^{\circ}\text{C}]$	143,805	142,835	143,664	143,300	142,961	0,265	T8

Z těchto hodnot je pak vypočtena výběrová směrodatná odchylka výběrového aritmetického průměru s využitím vztahů 1.1 a 1.2, která odpovídá nejistotě měření.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 x_i = 50,264 \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad (8.20)$$

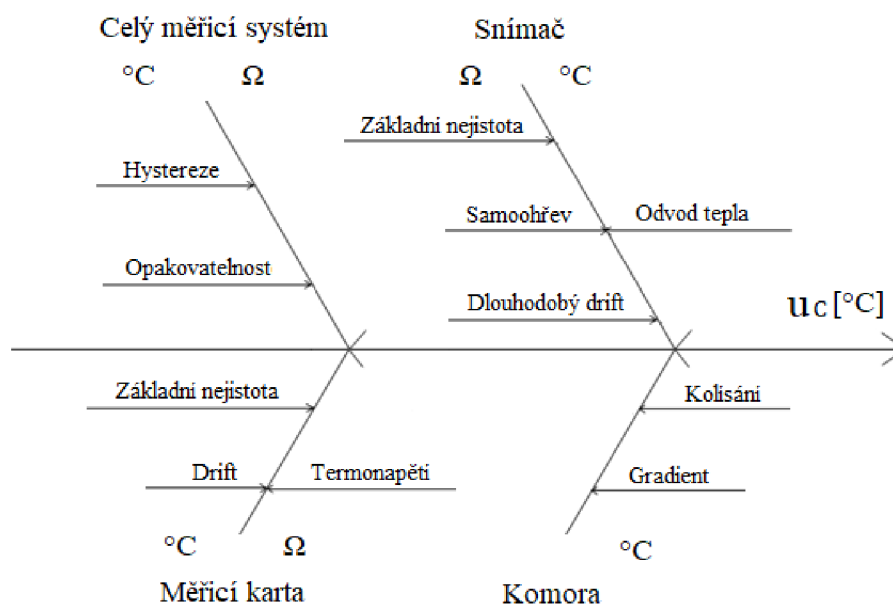
$$u_{Co(50)} = k_s \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 1,4 \cdot \sqrt{\frac{1}{5(5-1)} \sum_{i=1}^5 (x_i - 50,264)^2} = 20 \text{ } m^{\circ}\text{C} \quad (8.21)$$

Největší výsledná nejistota: $u_{Co(-40)} = 0,496 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, snímač T2

Největší výsledná nejistota: $u_{Co(140)} = 0,265 \text{ } ^{\circ}\text{C}$, snímač T8

8.5 Schéma nejistot vstupujících do měřicího systému

Na následujícím Obr. 8.5 je grafické znázornění nejistot vstupujících do měřicího systému. Jsou zde uvedeny pouze ty zdroje nejistot, které se uvažují ve výsledné bilanční tabulce.



Obr. 8.5: Schéma nejistot vstupujících do měřicího systému

9 Výsledná nejistota měření

Tato kapitola se věnuje výpočtu výsledné nejistoty měření. Je zde uveden postup výpočtu u metody GUM i u metody Monte Carlo. Druhá zmíněná metoda je popisována pro prostředí programu Matlab, ve kterém byla pro porovnání s výsledky zpracovanými v programu LabView také napsána a postup výpočtu je samozřejmě totožný. Nakonec budou srovnány všechny dosažené výsledky všemi možnými metodami a způsoby vyhodnocení výsledné nejistoty měření.

9.1 Metoda GUM

V následujících kapitolách lze nalézt postupy výpočtu koeficientu citlivosti A_i (kapitola *Nekorelované vstupní odhady*), jednotlivých příspěvků k celkové nejistotě a nakonec také postup výpočtu celkové nejistoty měření.

9.1.1 Postup výpočtu celkové nejistoty

Koeficient citlivosti

Koeficient citlivosti se v tomto případě může získat dvěma způsoby. Tím jednodušším je parciální derivace modelu měření podle teploty a následné převrácení hodnoty. Za konstanty A a B jsou dosazeny hodnoty uvedené v ČSN EN 60751 [17]. U teploty existuje více variant k získání dosazené hodnoty. Jednou, ale tou nejméně přesnou, je dosazení přímo konfirmační teploty nastavené na komoře. Toto řešení není vhodné kvůli velké *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty* - u_{Kg} . Druhou možností je průměrná hodnota ze všech naměřených dat všemi snímači při každé konfirmační teplotě. Ten nejpřesnější možný způsob spočívá v průměrné hodnotě teploty od toho snímače, u kterého vyšla největší nejistota, která se tudíž aplikuje do výsledné bilanční tabulky. Toto řešení by byla ideální volba už jen s ohledem na to, že i v dílčích zdrojích nejistot uvažují maximální nejistotu, nikoliv průměrnou, viz kapitola 8.

Z důvodu, popsaného v kapitole 6.2.4, jsem ale zvolil druhou metodu, tedy celkovou průměrnou hodnotu. Důležité je uvést, že jsem si to mohl dovolit a prakticky tak přesnost měření nesnížil, protože vlivem násobení teploty konstantou B, což je velmi malé číslo, se tento vliv vůbec neprojeví. Dokázáno je to níže na vypočtených výsledcích, kde jsou minimální rozdíly i při rozdílných konfirmačních teplotách. Zde je příklad uveden opět pro 50 °C. Aby bylo možné zanedbat *Nejistota daná driftem základního odporu (krátkodobý drift)* - u_{Sk} , použil jsem do všech výpočtů hodnotu základního odporu při 0 °C naměřenou před celým experimentem (uvedeno v kapitole 7.1.1). Výpočet prvním způsobem je uveden zde:

Model měření vychází ze vztahu 4.2. Při použití dvou konstant (A a B) je tvar následující:

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad [\Omega] \quad (9.1)$$

$$\begin{aligned} A_R = \frac{\delta R_T}{\delta T} &= R_0(A + 2BT) = 100,141(3,9083 \cdot 10^{-3} + 2(-5,775 \cdot 10^{-7} \cdot 50,074)) = \\ &= 0,386 \text{ } \Omega/^\circ\text{C} - > 2,593 \text{ } ^\circ\text{C}/\Omega = A_T \end{aligned} \quad (9.2)$$

Koeficient citlivosti: $A_T(-40) = 2,525 \text{ } ^\circ\text{C}$

Koeficient citlivosti: $A_T(140) = 2,666 \text{ } ^\circ\text{C}$

Podle normy ČSN EN 60751 [17] by se u záporných teplot měla používat i konstanta C. Výsledek se při jejím použití mění až v řádu tisícín $^\circ\text{C}$ (při teplotě 50°C konkrétně o $4 \text{ m}^\circ\text{C}$), proto jsem jí kvůli složitosti výpočtů neuvažoval (při vyjádření teploty ze vztahu 4.2 by se musela řešit kubická rovnice). Minimální rozdíl vychází i u klasického přepočtu odporu na teplotu, který je v programu také hojně využíván, rovněž ale jen s konstantami A a B. V případě, že by se uvažovala pouze konstanta A (nebrala se tedy vůbec v úvahu měřená teplota), vyšel by koeficient $A_T = 2,555 \text{ } ^\circ\text{C}/\Omega$, což je také malý rozdíl.

Druhý způsob je z matematického hlediska znatelně složitější. Zde se jedná o klasické řešení citlivostních koeficientů, kdy se parciálně derivuje výsledná přepočítaná veličina podle veličiny přímo měřené. V tomto případě je to tedy parciální derivace teploty podle měřeného odporu. Kvůli tomuto způsobu je ale potřeba vyjádřit si ze vztahu 4.2 potřebnou teplotu T .

Vyjádřený model měření vypadá takto:

$$T = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right)}}{2B} \quad [^\circ\text{C}] \quad (9.3)$$

Protože se hledají jen kladné kořeny kvadratické rovnice, stačí použít tento zjednodušený vzorec pouze s přičtením diskriminantu. Následuje jeho derivace, ze které vyjde požadovaný koeficient citlivosti:

$$\begin{aligned} A_T &= \frac{\delta T}{\delta R_T} = \frac{1}{R_0 \sqrt{A^2 - 4B \left(1 - \frac{R_T}{R_0}\right)}} = \\ &= \frac{1}{100,141 \sqrt{(3,9083 \cdot 10^{-3})^2 - 4(-5,775 \cdot 10^{-7}) \left(1 - \frac{119,425}{100,141}\right)}} = 2,593 \text{ } ^\circ\text{C}/\Omega \end{aligned} \quad (9.4)$$

Koeficient citlivosti: $A_T(-40) = 2,524 \text{ } ^\circ\text{C}$

Koeficient citlivosti: $A_T(140) = 2,665 \text{ } ^\circ\text{C}$

Z dosažených výsledků se dá říci, že oba dva způsoby vedou k naprosto stejnému cíli tak, jak bylo předpokládáno.

O něco složitější bylo vypočítání koeficientu citlivosti pro *Nejistota způsobená parazitním termoelektrickým napětím - u_{Mt}* . To se musí provádět ve dvou krocích. Protože je nejistota vypočítána v jednotkách V , musí se samozřejmě nejdříve přepočítat na Ω . K tomu slouží zase jiný koeficient citlivosti, který je dán vztahem 9.5. Protože tento koeficient (na rozdíl od předchozího) se aplikoval již ve stavu 6.2.4, nenastával problém s koncepcí programu. Proto bylo možné k dosažení měřicího proudu použít, při zvoleném způsobu v diplomové práci, naměřené hodnoty od snímače T9 (při vzorové teplotě $50 \text{ } ^\circ\text{C}$), u kterého bylo vypočítáno největší termonapětí. Pokud by tomu bylo jinak, jiný (nepřesný) měřicí proud by měl poměrně velký nežádoucí vliv na výsledek. Aplikuje se samozřejmě při „klasickém“ měření s kladným znaménkem, tedy při nekomutovaných vstupních svorkách.

$$A_U = \frac{\delta R}{\delta U} = \frac{1}{I} = \frac{1}{418 \cdot 10^{-6}} = 2439,024 \text{ } A^{-1} \quad (9.5)$$

Příspěvek k celkové nejistotě

Jednotlivé příspěvky k celkové nejistotě se vypočítají podle následujícího vztahu:

$$\text{příspěvek nejistoty} = \frac{\text{odhad}}{\text{koeficient rozložení}} \text{koeficient citlivosti } [^\circ\text{C}] \quad (9.6)$$

Příklad pro nejistotu danou samoohřevem při $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ (z Tab. 9.1):

$$u_{Ss} = \frac{0,049}{\sqrt{3}} 2,593 = 0,073 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.7)$$

Hodnoty ostatních zdrojů nejistot jsou uvedeny v bilančních tabulkách, pro konfirmační bod $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Tab. 9.1 a Tab. 9.2) a pro ostatní body příloha A.

Celková nejistota

Celková nejistota měření se počítá jako geometrický součet nejistot typu A a B, který je vynásobený koeficientem rozšíření k_r . Aby bylo zachováno rozdělení v principu metody GUM, je nejdříve zvlášť vypočítána výsledná nejistota typu A a zvlášť typu B. Tímto způsobem je řešena i samotná měřicí aplikace. Výpočet je znovu ukázán na teplotě $50 \text{ } ^\circ\text{C}$.

$$u_{A(50)}(T) = \sqrt{u_{Co(50)}^2 + u_{Kg(50)}^2 + u_{Kk(50)}^2} = \sqrt{0,020^2 + 0,442^2 + 0,052^2} = 0,445 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.8)$$

$$u_{B(50)}(T)^2 = u_{Sn(50)}^2 + u_{Sv(50)}^2 + u_{Sd(50)}^2 + u_{Ss(50)}^2 + u_{Mn(50)}^2 + u_{Md(50)}^2 + \\ + u_{Mt(50)}^2 + u_{Ch(50)}^2 = 0,126^2 + 0,009^2 + 0,145^2 + 0,073^2 + 0,111^2 + 0,048^2 + \\ + 0,322^2 + 0,018^2 = 0,176 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.9)$$

$$u_{B(50)}(T) = \sqrt{u_{B(50)}(T)^2} = \sqrt{0,176} = 0,420 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.10)$$

$$u_{C(50)}(T) = \sqrt{u_{A(50)}(T)^2 + u_{B(50)}(T)^2} = \sqrt{0,445^2 + 0,420^2} = 0,612 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.11)$$

$$U_{(50)}(T) = u_C(T_{(50)}) \cdot k_r = 0,612 \cdot 2 = 1,224 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.12)$$

Výsledky pro ostatní konfirmační body jsou opět uvedeny v bilančních tabulkách.

9.1.2 Bilanční tabulka

Bilančních tabulek je celkem 12 a jsou umístěny v příloze A. Jedna trojice je vždy pro jednotlivé konfirmační teploty při „přímém“ měření a druhá trojice pro nepřímé měření teploty. Těchto celkem šest výsledných bilančních tabulek je ještě zdvojeno, protože pro porovnání jsem vypočetl výslednou nejistotu měření také druhým způsobem. Ten spočívá v uvažování každého zdroje nejistoty tolikrát, kolik je v měřícím systému zapojeno přístrojů, které jsou příčinou právě daného zdroje nejistoty. Všechny tabulky jsou identické a obsahují vždy značení, stručný popis, odhad a rozdělení zdroje nejistoty, včetně koeficientu tohoto rozdělení. Dále je zde také standardní nejistota, koeficient citlivosti dané nejistoty a výsledná část, tedy příspěvek k celkové nejistotě. Uvedeny jsou také geometrickým součtem získané celkové nejistoty typu A, typu B a kombinovaná nejistota. Finální, a tím pádem nejdůležitější částí je rozšířená nejistota měření s koeficientem rozšíření $k_r = 2$ pro 95 % pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty nejistoty v intervalu definovaném touto nejistotou. Zde jsou uvedeny bilanční tabulky pouze dvě, obě pro teplotu 50 °C, ovšem vypočítané jiným způsobem. Tab. 9.1 odpovídá „přímému“ měření teploty při uvažování každé nejistoty jednou a Tab. 9.2 odráží také „přímé“ měření, ovšem při uvažování nejistot podle počtu přístrojů.

Místo kvantifikovaného zdroje nejistoty, viz kapitola Nejistota způsobená ponorem - u_{Sp} , je zde uveden zdroj Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv} . Již v těchto kapitolách bylo vysvětleno, že tyto nejistoty jsou způsobeny jedním a tím samým zdrojem.

Tab. 9.1: Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 50 °C - 1.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(50)}$	Základní nejistota	0,252°C	Normální	2	0,126°C	1	0,126°C
$u_{Sv(50)}$	Odvod tepla	0,015°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,009°C	1	0,009°C
$u_{Sd(50)}$	Dlouhodobý drift	0,252°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,145°C	1	0,145°C
$u_{Ss(50)}$	Samooohřev	0,049Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,028/Ω	2,593°C/Ω	0,073°C
$u_{Mn(50)}$	Základní nejistota	0,086Ω	Normální	2	0,043/Ω	2,593°C/Ω	0,111°C
$u_{Md(50)}$	Drift	0,032Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018/Ω	2,593°C/Ω	0,048°C
$u_{Mt(50)}$	Termonapětí	0,215Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,124/Ω	2,593°C/Ω	0,322°C
$u_{Kk(50)}$	Kolísání	0,052°C	Normální	1	0,052°C	1	0,052°C
$u_{Kg(50)}$	Gradient	0,442°C	Normální	1	0,442°C	1	0,442°C
$u_{Ch(50)}$	Hystereze	0,032°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018°C	1	0,018°C
$u_{Co(50)}$	Opakovatelnost	0,020°C	Normální	1	0,020°C	1	0,020°C

Nejistota A $u_{A(50)}(T)$: 0,445 °C

Nejistota B $u_{B(50)}(T)$: 0,401 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(50)}(T)$: 0,599 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(50)}(T)$: 1,198 °C

Tab. 9.2: Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 50 °C - 2.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(50)}$	Základní nejistota	0,750°C	Normální	2	0,375°C	1	0,375°C
$u_{Sv(50)}$	Odvod tepla	0,045°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,026°C	1	0,026°C
$u_{Sd(50)}$	Dlouhodobý drift	0,750°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,433°C	1	0,433°C
$u_{Ss(50)}$	Samooohřev	0,087Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,050/Ω	2,593°C/Ω	0,130°C
$u_{Mn(50)}$	Základní nejistota	0,258Ω	Normální	2	0,129/Ω	2,593°C/Ω	0,334°C
$u_{Md(50)}$	Drift	0,095Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,055/Ω	2,593°C/Ω	0,142°C
$u_{Mt(50)}$	Termonapětí	0,433Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,250/Ω	2,593°C/Ω	0,648°C
$u_{Kk(50)}$	Kolísání	0,052°C	Normální	1	0,052°C	1	0,052°C
$u_{Kg(50)}$	Gradient	0,442°C	Normální	1	0,442°C	1	0,442°C
$u_{Ch(50)}$	Hystereze	0,047°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,027°C	1	0,027°C
$u_{Co(50)}$	Opakovatelnost	0,027°C	Normální	1	0,027°C	1	0,027°C

Nejistota A $u_{A(50)}(T)$: 0,445 °C

Nejistota B $u_{B(50)}(T)$: 0,949 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(50)}(T)$: 1,048 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(50)}(T)$: 2,096 °C

9.2 Metoda Monte Carlo

K výpočtu výsledné nejistoty pomocí metody Monte Carlo jsem použil jak program LabView, tak pro porovnání výsledků i program Matlab, jak bylo uvedeno výše v kapitole. Popis je převzat z mé bakalářské práce [3].

U této metody byl největší problém s různorodostí rozměrů jednotlivých zdrojů nejistot. Část z nich je v °C a část v Ω. Problém tedy nastává při sjednocení nejistot od všech dílčích zdrojů. Řešení pomohla přinést [38]. Nyní bude krok po kroku vysvětleno. Zde přiložené histogramy odpovídají konfirmační teplotě 50 °C. Pro porovnání jsem zkusil výpočet provést s modelem měření jak s konstantou A, tak i se dvěma konstantami A i B.

1. V programu je nutné nejdříve nadefinovat všechny zdroje nejistot vstupující do systému a hodnoty jim příslušející, včetně konstanty pro počet opakování a dalších konstant potřebných k modelu měření.
2. Model měření opět vychází ze vztahu 4.2. Při použití konstant A i B (vztah 9.1) a při uvažování pouze konstanty A:

$$R_T = R_0(1 + AT) [\Omega] \quad (9.13)$$

V této fázi je potřeba získat odpor R_T , který v sobě bude zahrnovat všechny nejistoty vstupující do měření. Jak jsem již zmínil, k dispozici jsou odhady nejistot se dvěma jednotkami, °C a Ω. Nejistoty v Ω působí na R_0 a nejistoty ve °C na teplotu. Matematický vztah vypadá takto:

$$R_0 = u_{Ss} + u_{Md} + u_{Mn} + u_{Mt} [\Omega] \quad (9.14)$$

$$T = u_{Co} + u_{Kk} + u_{Sv} + u_{Kg} + u_{Sd} + u_{Sn} + u_{Ch} [^{\circ}C] \quad (9.15)$$

Značení nejistot (v programu Matlab) je v souladu s kapitolami 5 a 8). Názvy nejistot jsou uvedeny také v bilančních tabulkách.

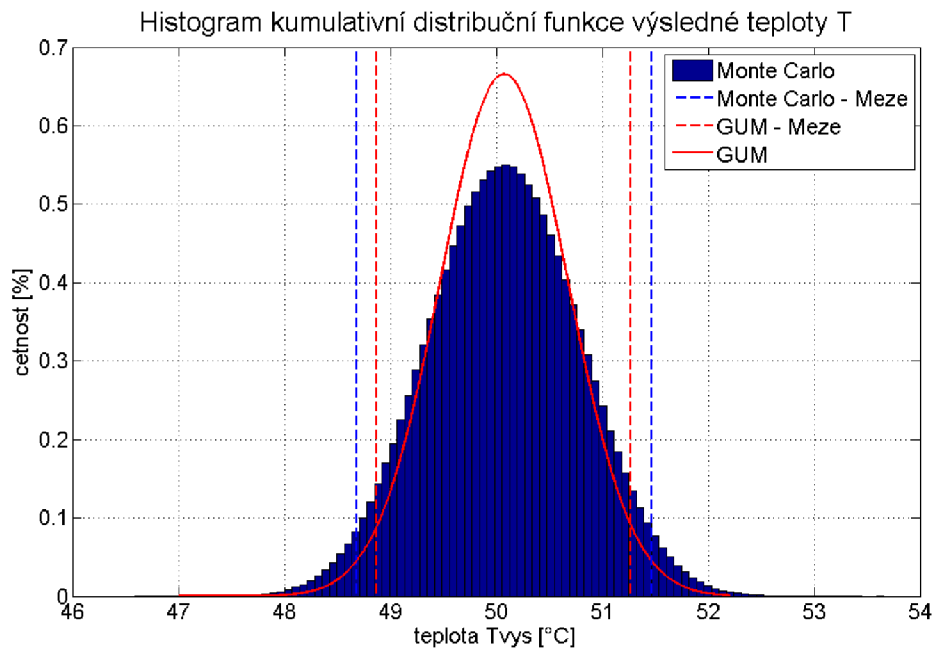
3. Vygenerují se tedy náhodné hodnoty nejdříve pro nejistoty měření v Ω. Protože je zapotřebí výsledný R_T ve formě *velikost+nejistota*, musí se vygenerovat hodnoty (vždy s daným počtem opakování) pro jeden zdroj nejistoty se střední hodnotou R_0 . Pro ostatní nejistoty bude střední hodnotou 0.
4. Následně se všechny vygenerované náhodné hodnoty sečtou. Výsledkem je vektor (v Matlabu *soucetR0*) o milionu hodnot, v každém poli obsahující součet střední hodnoty R_0 a celkové sečtené nejistoty ($R_0 + u_{celk}(\Omega)$).
5. Body 3, 4 a 5 se opakují, jen s tím rozdílem, že se jedná o druhou polovinu nejistot, tedy nejistoty ve °C působící na teplotu.

6. Nyní se použije model měření, ze kterého vyjde výsledný vektor hodnot R_T , obsahující vygenerované náhodné hodnoty reprezentující všechny nejistoty.
7. Následuje přepočítání výsledného odporu (vektoru R_T) podle upraveného modelu měření zpět na výslednou teplotu (vektor T_{vys}). Varianta s uvažováním konstant A i B se řídí vztahem 9.3 a varianta pouze s konstantou A vede na tento jednodušší upravený model měření:

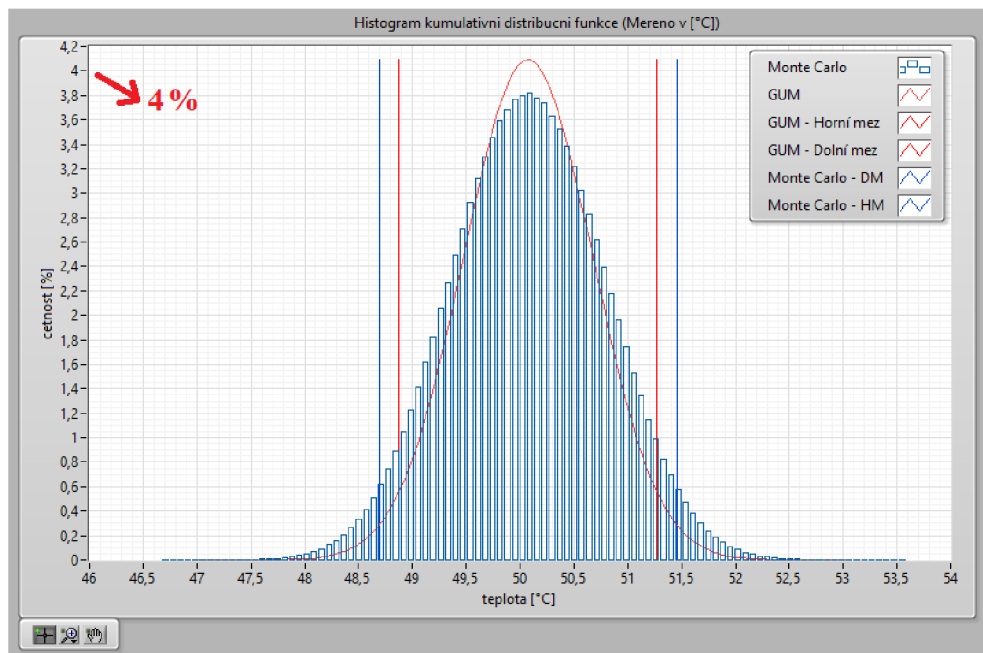
$$T = \frac{R_T - R_0}{R_0 A} [^{\circ}C] \quad (9.16)$$

8. Vypočítá se průměrná hodnota výsledné teploty z důvodu další potřeby.
9. Vektor T_{vys} se seřadí do neklesajícího pořadí kvůli získání diskrétní distribuční funkce.
10. Diskrétní distribuční funkce je potřeba z důvodu nalezení minimální a maximální hodnoty teploty T_{min} a T_{max} pro zajištění 95 % pravděpodobnosti výskytu skutečné hodnoty teploty v intervalu daném průměrnou hodnotou teploty a jednou z krajních hodnot intervalu.
11. Vypočte se tedy výsledná nejistota daná rozdílem výše zmíněných hodnot.
12. V tomto kroku jsou vypočteny meze pro získání hodnot $T_{min\,gum}$ a $T_{max\,gum}$ a generování náhodných hodnot výsledné rozšířené nejistoty vypočtené metodou GUM se střední hodnotou T tak, aby bylo možné porovnání výsledků obou metod v grafu.
13. Jako poslední se provede vykreslení histogramu (Obr. 9.1 a Obr. 9.2) pro vektor T_{vys} i s vyznačením intervalů daných nejistotami vypočítanými dle metody GUM a Monte Carlo. Histogram také obsahuje již zmíněnou Gaussovou křivku vygenerovanou pomocí rozšířené nejistoty stanovené metodou GUM. Všechny vykreslené průběhy dle metody GUM samozřejmě slouží pro porovnání metod přímo v grafickém zobrazení.

V programu Matlab jsou hodnoty zadány vždy pomocí přímo kvantifikovaného odhadu zdroje nejistoty. Ke změně konfirmační teploty, způsobu měření nebo výpočtu nejistot slouží vytvořený „přepínač“, kde je možno (na začátku kódu, viz příloha C) zadat potřebné údaje.



Obr. 9.1: Histogram KDF „přímého“ měření při 50 °C - Matlab



Obr. 9.2: Histogram KDF „přímého“ měření při 50 °C - LabView

9.3 Porovnání nejistot měření

Protože se jedná o metodu postavenou na generování náhodných hodnot, výsledná hodnota nejistoty měření se nepatrně liší. Aplikaci jsem v obou programech spustil vždy 5× a na základě vypočtených výsledků, které se lišili maximálně pouze

o 3 m°C, jsem stanovil střední hodnotu. Tu jsem použil jako výsledek nejistot, které jsou uvedeny v následující kapitole v Tab. 9.3, jež shrnuje všechny dosažené výsledky.

Pokud se porovnají výsledky při použití různých generátorů (viz kapitola 6.2.8), mění se hodnoty opět pouze v tisícinách °C. To může být způsobené právě i diferencí při opakování, tudíž není možné poznat rozdíl. Stejně je tomu tak i při použití různých konstant (A a A i B). Toto slouží i jako důkaz pro nevyužití konstanty C při záporných teplotách. Závěrem je možné říci, že zmíněné možnosti nemají na výsledek žádný vliv, což platí pro všechny potvrzené teploty. Bylo to vyzkoušeno jak v programu LabView, tak v programu Matlab.

Tab. 9.3: Porovnání všech vypočtených nejistot

T[°C]	Gpj	Gnj	Gps	Gns	MCpjL	MCnjL	MCpsL	MCnsL	MCpjM	MCnjM
50	1,198	1,199	2,096	2,094	1,382	1,485	2,888	2,934	1,390	1,508
-40	2,763	2,770	3,583	3,581	2,743	2,377	3,760	3,428		
140	4,542	4,535	5,357	5,349	4,618	6,608	6,299	7,940		

**G* - metoda GUM, *MC* - metoda Monte Carlo

**p* - „přímé“ měření teploty, *n* - nepřímé měření teploty

**j* - každá nejistoty jednou (1.způsob), *s* - podle počtu přístrojů (2. způsob)

**L* - program LabView, *M* - program Matlab

Podle předpokladů je největší nejistota u nejvyšší teploty 140 °C. Nejistoty podle počtu přístrojů jsou samozřejmě větší než uvažované jen jednou, ale není zde tak drastický rozdíl, což je způsobené geometrickým součtem (u metody GUM). U metody Monte Carlo je rozdíl jen o trochu větší než u GUM. U vyšších teplot, tzn. nejistot, se tento úkaz poměrově dále zmenšuje.

Při porovnání metod (GUM a Monte Carlo) je podle předpokladů vyšší nejistota vždy u Monte Carla (při kladných teplotách). Je to způsobeno tím, že tato metoda vlivem nejistot s rovnoměrným rozdělením deformuje výsledný histogram, tím snižuje maximální četnost vzorků kolem střední hodnoty a rozšiřuje tak interval daný výslednou nejistotou. U záporných teplot jsou výsledky přibližně stejné.

Vliv způsobu měření u metody GUM nehraje žádnou roli. U Monte Carla jsou nejistoty nepřímého měření teploty navýšeny, přičemž u teploty 140 °C je to velmi výrazné. Platí to znovu jen pro kladné teploty, u záporné jsou výsledky nepřímého měření naopak menší. Rozdíl se s rostoucí teplotou opět (i absolutně) zmenšují.

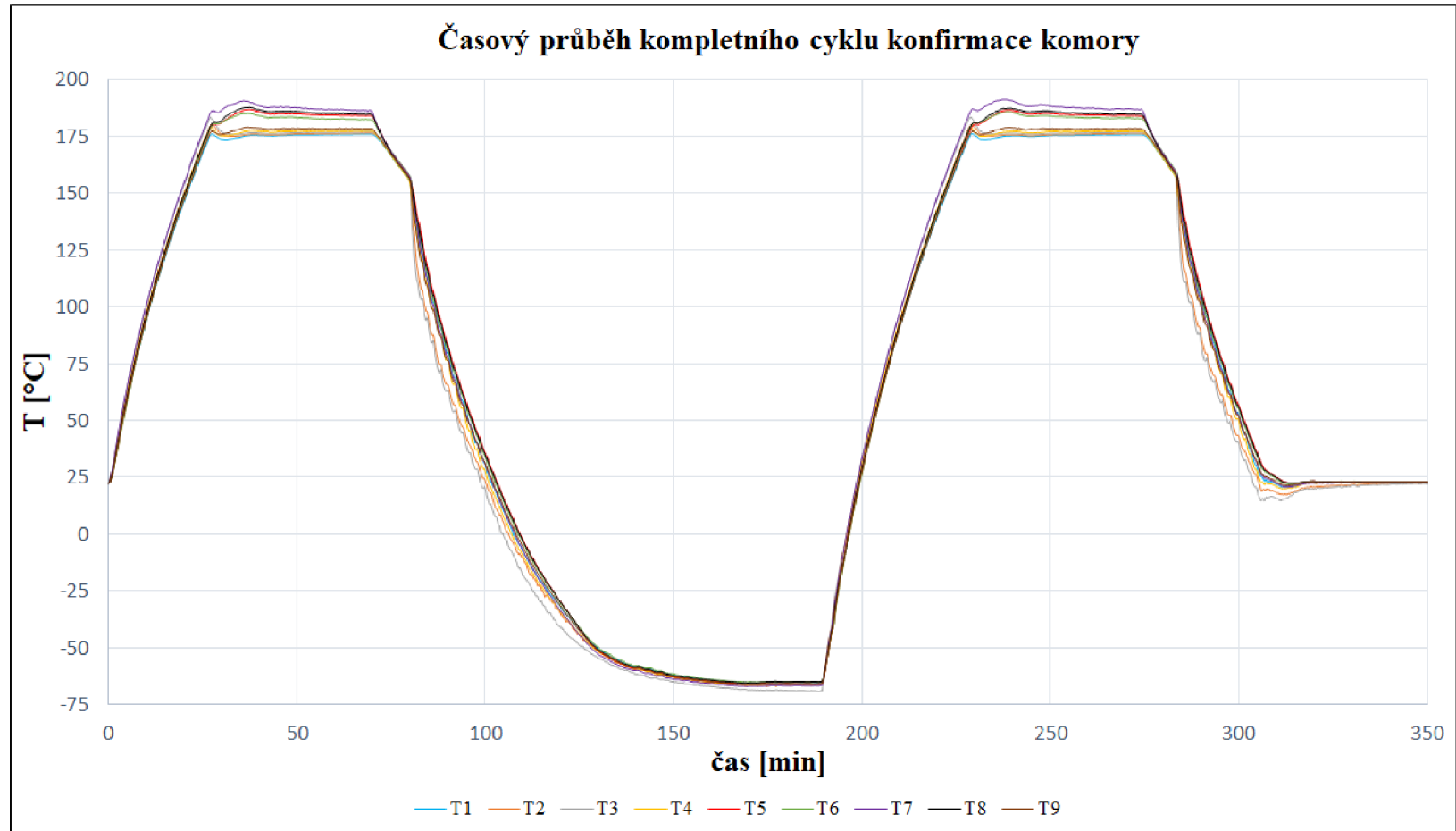
Mezi výsledky dosaženými různými výpočetními programy prakticky žádné rozdíly ve výsledné nejistotě nejsou. Liší se jen četnost (osa *y*), což je způsobené rozdílným generátorem. Z toho důvodu byly v Matlabu vypočítány pouze dvě nejistoty.

10 Vyhodnocení konfirmace

Tato kapitola shrnuje všechny dosažené výsledky při konfirmaci teplotní komory, které vycházejí z kapitoly 8, kde byl podrobně popsán postup kvantifikování jednotlivých zdrojů nejistot a uvedeny tabulky s naměřenými hodnotami, ze kterých kapitola také vychází.

Existuje více způsobů na vyhodnocení konfirmace teplotních komor. Jako výchozí (referenční) hodnotu, která se poté bude porovnávat s nastavenou hodnotou a na základě toho se provede právě vyhodnocení konfirmace, může být zvolena teplota změřená snímačem ve středu komory. Toto řešení ale nevystihuje, jaká teplota je v jiných místech. Další možností je brát v úvahu průměrnou hodnotu, jenž po dobu experimentu v teplotní komoře panuje. Právě tuto variantu jsem zvolil v diplomové práci. Postup dává nejpřesnější obrázek o daných podmínkách, přesto však není bezchybný a vnáší do vyhodnocení také určitou nejistotu. Ta spočívá ve zjištění, že komora nespĺňuje požadované vlastnosti, protože jí může velmi negativně ovlivnit třeba pouze jedna, byť velká odchylka. V takovém případě alespoň metoda odkrývá zdroje, které mají největší podíl na výsledné nejistotě měření, a také to, jak se mění v průběhu času (ať už při ustálené teplotě na daném konfirmačním bodě nebo i při změnách teplot). Jedná se hlavně o *Nejistota daná prostorovou homogenitou (gradientem) teploty* - u_{Kg} a *Nejistota daná časovou stabilitou (kolísáním) teploty* - u_{Kk} . Tyto poznatky je možno potom použít při vykonávání samotných zkoušek a minimalizovat je pomocí různých opatření, např. vhodným umístěním zkoušeného předmětu v komoře nebo vhodnou volbou zkoušené teploty (pokud je to požadavky na zkoušku dovoleno).

Zobrazení časového průběhu celého cyklu konfirmace, jak jej definuje norma ČSN EN 60068-3-11 [12] popsána v kapitole 4.1.2, naměřeného experimentem, je na Obr. 10.1 na následující straně.



Obr. 10.1: Celková konfirmace teplotní komory

10.1 Rychlost změny teploty

Jak je uvedeno v kapitole *Rychlost změny teploty*, která vychází z normy ČSN EN 60068-3-5 [10], monitoruje se teplota mezi 10÷90 % teplotního rozsahu. Protože byla provedena konfirmace podle postupu, na který je odkázáno výše, musel být modifikován i postup měření rychlosti změny teploty. Úkony tedy nebyly provedeny přesně podle postupu v kapitole, ale byly zpřeházeny podle postupu, viz kapitola 4.1.2. Výpočet se nicméně provádí stejně a na výsledku to nemůže nic změnit. Postupuje se podle vztahu 4.1:

$$Rychlost\ při\ ohřívání = \frac{\Delta t}{T_1} = \frac{|155,5 - (-40,5)|}{223,45 - 192,35} = 6,30\ K/min$$

$$Rychlost\ při\ chladnutí = \frac{\Delta t}{T_2} = \frac{|-40,5 - 155,5|}{124,07 - 80,03} = 4,45\ K/min \quad (10.1)$$

Datasheet komory udává maximální hodnotu rychlosti změny teploty při ohřívání 6 K/min a při chlazení 4 K/min (viz Tab. 4.1). Z těchto čísel je patrné, že údaje ve specifikaci komory jsou lehce podhodnocené, což je ale běžné. Bývá to zvykem i u údajů chyb měření u měřicích přístrojů, kde výrobci zase uvádějí větší potenciální chybu měření, viz kapitola *Základní nejistota měřicí karty - u_{Mn}* .

10.2 Výsledné údaje

V této kapitole budou rozebrány statistické údaje, které jsou výsledkem konfirmace teplotní komory CTS T-65/50. Všechny potřebné údaje jsou obsaženy v následující Tab. 10.1, která zobrazuje vždy průměrnou naměřenou teplotu při 50 °C jednotlivými snímači, odchylku teploty v prostoru, odchylku od nastavené teploty, kolísání teploty a hodnotu gradientu teploty. Většina pojmů vystupovala už u nejistot měření (kapitoly 5 a 8), ale v následujícím textu budou vysvětleny ještě jednou.

Tab. 10.1: Výsledné údaje konfirmace komory

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
$\bar{T}_{(50)}[^\circ C]$	49,575	49,621	49,816	49,785	50,414	50,195	50,783	50,383	50,093
$\Delta T_{kol(50)}[^\circ C]$	0,055	0,090	0,047	0,044	0,104	0,194	0,123	0,117	0,088
$\Delta T_{ref(50)}[^\circ C]$	0,425	0,379	0,184	0,215	0,415	0,195	0,783	0,383	x
$\Delta T_{T9(50)}[^\circ C]$	0,519	0,472	0,277	0,308	0,321	0,103	0,689	0,290	x

Gradient teploty: $\Delta T_{grad(50)} = 1,208\ ^\circ C$

Kolísání teploty

Kolísání teploty je definováno jako rozdíl maximální a minimální teploty ve specifikovaném bodě v pracovním prostoru během specifikovaného časového intervalu po stabilizaci [10]. Nejvyšší kolísání teploty má na svědomí snímač T6 - 0,194 °C.

Největší kolísání teploty: $\Delta T_{Tkol(-40)} = 0,701 \text{ } ^\circ\text{C}$, snímač T2

$\Delta T_{Tkol(140)} = 0,276 \text{ } ^\circ\text{C}$, snímač T7

U teplotního bodu -40 °C vyšly, oproti ostatním teplotám, daleko větší nejistoty. Ta největší z nich ovšem nepochází od snímače T3 (vysvětleno níže), ale od T2.

Odchylka od nastavené teploty

Odchylku od nastavené teploty není třeba vysvětlovat. Jak je vidět z Tab. 10.1, největší odchylka při teplotě 50°C byla zaznamenána u snímače T7 - 0,783°C.

Největší odchylka teploty: $\Delta T_{Tref(-40)} = 3,355 \text{ } ^\circ\text{C}$, snímač T3

$\Delta T_{Tref(140)} = 3,320 \text{ } ^\circ\text{C}$, snímač T7

Při teplotě -40 °C je jeden ze snímačů (T3) dokonce s velkým rozdílem od všech ostatních snímačů. Ke stejnému poznatku, tedy že největší odchylky reprezentují stejný snímač (což není pravidlem) se došlo i u teploty 140 °C, kde je ale odchylka od nastavené teploty menší než odchylka teploty v prostoru, na rozdíl od předchozích dvou teplot. Tato skutečnost jen ukazuje fakt, že tyto dvě odchylky na sobě nejsou přímo závislé. Stěžejní jsou ale hodnoty od snímače ve středu komory T9, jenž udává referenci pro odchylku teploty v prostoru.

Odchylka teploty v prostoru

Odchylka teploty v prostoru ΔT_{T9} se definuje jako rozdíl střední hodnoty teploty ve středu pracovního prostoru a střední hodnoty teploty v kterémkoli jiném měřicím bodě [10]. Tomuto údaji odpovídá poslední řádek Tab. 10.1 a jeho největší hodnota je 0,689 °C, opět u snímače T7. Podle předpokladů je u vyšších teplot zároveň vyšší i odchylka, a to velmi výrazně:

Největší odchylka teploty: $\Delta T_{T9(-40)} = 2,949 \text{ } ^\circ\text{C}$, snímač T3

$\Delta T_{T9(140)} = 4,277 \text{ } ^\circ\text{C}$, snímač T7

U konfirmačního bodu -40 °C nepřekvapí, že je odchylka největší znovu u snímače T3, viz výše, ikdyž ne o tolik. Při teplotě 140 °C se najdou odchylky na podobné úrovni jako je snímač T3 u předešlé teplotního bodu, rozdíl je ale v tom, že teploty od všech snímačů jsou, dá se říci, rovnoměrně rozloženy. Tyto grafy, jak již bylo uvedeno, jsou přiloženy v elektronické příloze, ale údaje je možné vidět i na Obr. 8.4.

Gradient teploty

Gradient teploty je maximální rozdíl střední hodnoty teploty ve všech měřicích bodech pracovního prostoru [10]. Jak již víme, tento údaj se vyhodnocuje při kvantifikaci nejistoty měření a má na ní největší podíl. U nejistot se ale kvantifikuje pomocí směrodatné odchylky, zatímco v tomto případě se uvažuje pouze jako jednoduchý rozdíl naměřených hodnot. Z principu definice je jasné, že možností, jak dojít k výslednému gradientu, je celá řada, protože se porovnává každá naměřená hodnota s každou. Z tohoto důvodu je u Tab. 10.1 vypsán pouze ten největší rozdíl hodnot - gradient, který při 50 °C odpovídá hodnotě 1,208 °C. Další vyplývající věci z definice je i to, že gradient nemůže být menší než odchylky, naopak v drtivé většině případů bude vždy větší.

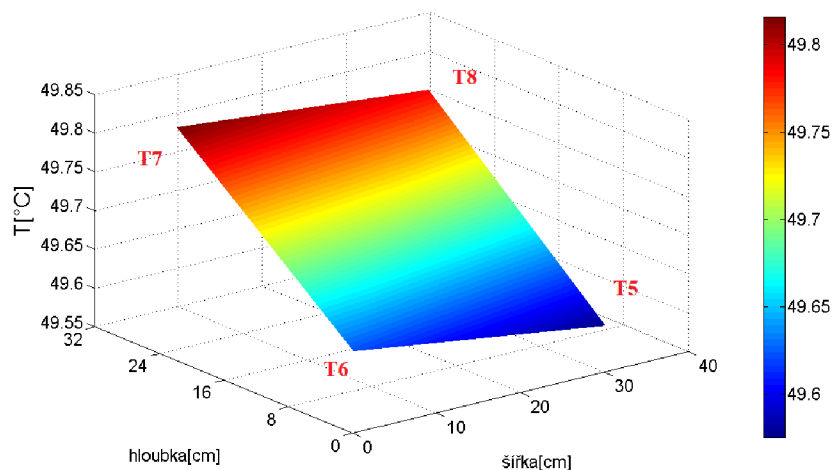
$$\begin{aligned} \text{Gradient teploty: } \Delta T_{Tgrad(-40)} &= 3,613 \text{ } ^\circ\text{C, snímač T3 a T6} \\ \Delta T_{Tgrad(140)} &= 5,626 \text{ } ^\circ\text{C, snímače T1 a T7} \end{aligned}$$

Velmi pravděpodobnou variantou je také ta, že mezi výslednými dvěma snímači, mezi kterými je největší rozdíl hodnot, bude vystupovat stejný snímač, u kterého byla nalezena aspoň jedna ze dvou největších odchylek.

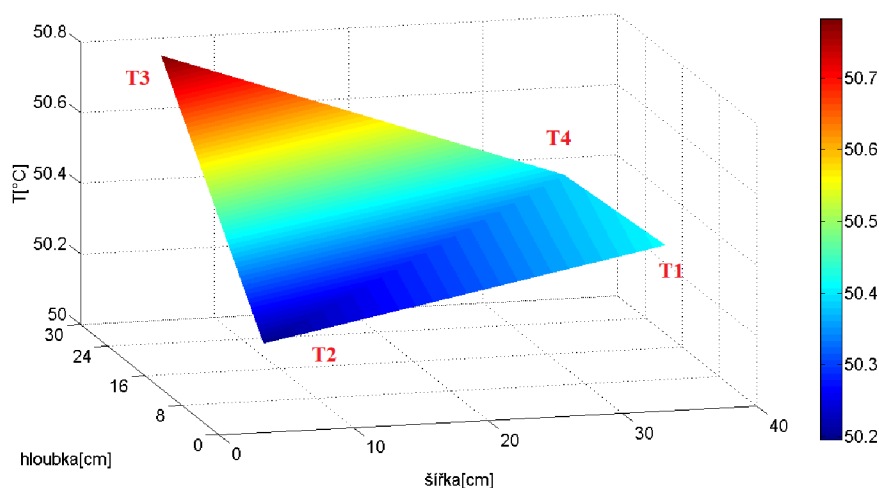
Pro zajímavost jsou níže vykresleny 3D grafy s rozložením teplot v komoře. Na Obr. 10.2 je rozložení v horní části komory a na Obr. 10.3 dolní část komory. Při porovnání obou grafů je zřetelné, že teplota v dolní části komory je vyšší než ta v horní části. Je to možné rozeznat i z Obr. 8.4. Při dalších dvou teplotách je tento fakt ještě výraznější, především u teploty 140 °C, kde jsou obě tyto části od sebe úplně oddělené, přičemž horní část je výrazně pod nastavenou teplotní úroveň a dolní část naopak výrazně nad ní. Graf je ale opět součástí pouze elektronické přílohy a 3D grafy jsou generovatelné z kódu v Matlabu, jenž je také její součástí, viz příloha D.

10.3 Závěrečné vyhodnocení

Finálním výsledkem celé práce je tabulka s nejdůležitějšími údaji, které jsou při dokumentování konfirmací teplot potřeba. Všechny potřebné údaje definované normou ČSN EN 60068-3-5 [10] jsou uvedeny v kapitole 4.1.4. Diplomová práce veškeré tyto požadavky splňuje, jednotlivé údaje jsou ale rozděleny do různých pasáží tak, aby to vyhovovalo zvolené struktuře práce. Tab. 10.2 obsahuje na vstupní (levé) straně nastavenou konfirmační teplotu, průměrnou naměřenou teplotu všemi snímači, výslednou nejistotu měření, odchylku teploty v prostoru, odchylku od nastavené teploty, gradient a kolísání teploty. V pravé části jsou poté uvedené jednotlivé tolerance teplot, zleva: udaná specifikacemi teplotní komory CTS T-65/50,



Obr. 10.2: Prostorová homogenita horní části komory při 50 °C



Obr. 10.3: Prostorová homogenita dolní části komory při 50 °C

přísnější varianta a méně přísná varianta udaná normami ČSN EN 60068-2-1 [15] a ČSN EN 60068-2-2 [14]. Tabulka je dále rozdělena na dvě poloviny, které se liší pouze ve výsledné nejistotě měření. První z nich reprezentuje výslednou nejistotu, pro kterou se každý zdroj uvažoval pouze jednou a druhá polovina je pro nejistotu při uvažování každého zdroje podle počtu měřicích přístrojů, viz kapitola 8. Každá polovina se dělí na dvě sekce (tři řádky), přičemž první z nich odpovídají „přímému“ měření teploty, které sloužilo k prezentaci celé práce a druhá sekce ukazuje výsledky nepřímého měření. Všechny parametry jsou v jednotkách °C.

Tab. 10.2: Souhrn dosažených výsledků a vyhodnocení konfirmace

Konfirmační teplota	Průměrná teplota	GUM	Monte Carlo	Odchylka teploty v prostoru	Odchylka od nastavené teploty	Gradient teploty	Kolísání teploty	Tolerance komory* ($\pm 0,3^\circ \text{C}$)	Tolerance zkoušky ($\pm 2^\circ \text{C}$)	Tolerance zkoušky ($\pm 5^\circ \text{C}$)
50	50,074	1,198	1,382	0,689	0,783	1,208	0,194	ano	ano	ano
-40	-40,880	2,753	2,743	2,949	3,355	3,613	0,701	ne	ne	ano
140	140,073	4,542	4,618	4,277	3,320	5,626	0,098	ano	ne	ano
50	49,637	1,199	1,485	0,691	0,781	1,205	0,174	ano	ano	ano
-40	-41,189	2,770	2,377	2,946	3,352	3,624	0,695	ne	ne	ano
140	139,495	4,535	6,608	4,259	3,322	5,608	0,260	ano	ne	ne
50	50,074	2,096	2,888	0,689	0,783	1,208	0,194	ano	ne	ano
-40	-40,880	3,583	3,760	2,949	3,355	3,613	0,701	ne	ne	ano
140	140,073	5,357	6,299	4,277	3,320	5,626	0,098	ano	ne	ne
50	49,637	2,094	2,934	0,691	0,781	1,205	0,174	ano	ne	ano
-40	-41,189	3,581	3,428	2,946	3,352	3,624	0,695	ne	ne	ano
140	139,495	5,349	7,940	4,259	3,322	5,608	0,260	ano	ne	ne

* - V datasheetu je uvedena tato hodnota, protože je ale velmi malá a blíže nespecifikovaná, rozhodl jsem se ji pochopit jako odchylku v čase, tudíž je porovnávána pouze s kolísáním, nikoliv s gradientem teplot. Tolerance jsou pak srovnávány s průměrnou teplotou a její příslušnou nejistotou měření.

Závěr

V teoretické části jsou rozebrány obecně nejistoty měření. Jsou zde uvedeny zdroje těchto nejistot a typy měření (přímé a nepřímé), podle kterých se k nejistotám přistupuje. V obou přístupech jsou poté popsány způsoby nebo-li metody, jak nejistoty vyhodnocovat, a také správně zapsat spolu s výsledkem měření. Kapitola o konfirmaci uvádí teplotní komory, a především popisuje metody k jejich konfirmaci.

Návrh automatizovaného měřicího systému začíná stručně uvedeným seznamem potřebných přístrojů, které jsou dále podrobněji popisovány a zobrazeny v blokovém schématu měřicího řetězce. Jsou zde vypsány i požadavky na systém nebo postup měření. Nedílnou součástí je pak rozbor nejistot vstupujících do systému, který je rozdělen podle míst (zdrojů), kde v měřicím řetězci působí.

Praktická část začíná popisem celé měřicí aplikace vytvořené pro automatizovaný sběr a zpracování dat při konfirmaci teplotní komory. Výstupem aplikace je .xml soubor, do kterého jsou ukládány výsledné nejistoty měření určené metodou GUM i Monte Carlo, které jsou následně porovnány v histogramu kumulativní distribuční funkce, jež je rovněž součástí souboru. Ukládají se i všechna naměřená data. Program disponuje několika variantami, jak kvantifikovat jednotlivé zdroje nejistot, a také jak určit výslednou nejistotu. Mezi druhé zmíněné varianty patří způsob měření („přímý“ a nepřímý), uvažování zdrojů nejistot (jednou nebo podle počtu přístrojů) a u Monte Carla např. generátor náhodných čísel („defaultní“, „vlastní“) nebo počet použitých konstant (A nebo A i B). Aplikace také disponuje funkcí pro „rozdělenou“ konfirmaci (nebo testování), kdy může provést výpočet na načtených datech z .csv souboru, do nichž se ukládají všechna naměřená data. Načítat lze zpětně i výstupní .xml soubor s již kvantifikovanými zdroji nejistot (funkce pro budoucí konfirmace). Řešení programu má i svoje nevýhody, mezi které patří nutnost unikátního tlačítka pro měření každé skupiny nejistot nebo omezená funkce tlačítka stop.

Následující kapitoly obsahují popis realizace měřicího experimentu a postup měření a výpočtu nejistot vstupujících do systému. V závěrečné části je porovnání výsledných nejistot dosažených všemi uvedenými způsoby. Výsledkem celé práce je Tab. 10.2, kde jsou zobrazeny kromě nejistot, i další parametry potřebné k vyhodnocení konfirmace. Výsledek (a nejistota) je potom porovnán s udanými tolerancemi a na základě toho je vyřčen verdikt vyhovuje/nevyhovuje daným specifikacím. Analýza, s jakou pravděpodobností leží skutečná hodnota v dané toleranci, ikdyž nejistota tuto hodnotu překračuje, lze nalézt v [23]. Zde je pouze závěr - nevyhovuje.

Omezenou funkci tlačítek lze chápat jako podněty k vylepšení, stejně jako pořízení snímačů s větším (záporným) rozsahem nebo i přesnějších měřicích karet (minimálně co se údajů v datasheetu týče). Nejdůležitějším podnětem je však automatizované řízení samotné teplotní komory ve spolupráci s měřicím systémem.

Literatura

- [1] *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* [online]. GUM 1995 with minor corrections, 2008, 134s [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
- [2] *Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" — Propagation of distributions using a Monte Carlo method* [online]. 2008, 90s [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf
- [3] BENÍŠEK, O. *Stanovení standardní nejistoty měření teploty* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=171763. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
- [4] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M. Nejistoty v měření I až V, soubor článků v časopise Automa, 7-8/2001, 10/2001, 12/2001, 4/2002
- [5] JIRMÁSEK, J. *Chyby a nejistoty při měření teploty* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/25322360-Chyby-a-nejistoty-pri-mereni-teploty.html>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. František Vdoleček, CSc.
- [6] NĚMECĚK, P. *Nejistoty měření*. Praha 2008. 98 s. ISBN 978-80-02-02089-9
- [7] ČEJKA, M. *Stručný úvod do problematiky nejistot měření*. 7 s.
- [8] NOVOTNÝ, M. *Programy pro výpočet nejistoty měření metodou Monte Carlo*. Brno, 2015 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/22392176-Programy-pro-vypocet-nejistoty-mereni-metodou-monte-carlo.html>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
- [9] ŠÍRA, M. Jak na nejistoty metodou Monte Carlo jednoduše a bez drahých programů. *Elektrorevue* [online]. Český Metrologický institut, Brno, 2014, 16(2), 11s [cit. 2020-01-04]. ISSN 1213-1539.
- [10] ČSN EN 60068-3-5 (34 5791). Zkoušení vlivů prostředí: Část 3-5: Doprovodná dokumentace a návod - Konfirmace výkonnosti teplotních komor. ed.2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, září 2018.

- [11] ČSN EN 60068-3-6 (34 5791). Zkoušení vlivů prostředí: Část 3-6: Doprovodná dokumentace a návod - Konfirmace výkonnosti klimatických (teplotně vlhkostních) komor. ed.2. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, září 2018.
- [12] ČSN EN 60068-3-11 (34 5791). Zkoušení vlivů prostředí: Část 3-11: Doprovodná dokumentace a návod - Výpočet nejistoty podmínek v klimatických zkušebních komorách. Český normalizační institut, březen 2008.
- [13] DUVERNOY, J. Guidance on the computation of calibration uncertainties: Instruments and Observing Methods. *World Meteorological Organization*,. Switzerland, 2015, (119), 34s.
- [14] ČSN EN 60068-2-2 (34 5791). Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-2: Zkoušky - Zkouška B: Suché teplo. Český normalizační institut, květen 2008.
- [15] ČSN EN 60068-2-1 (34 5791). Zkoušení vlivů prostředí: Část 2-1: Zkoušky - Zkouška A: Chlad. ed.2. Český normalizační institut, leden 2008.
- [16] ČSN EN 60068-3-7 (34 5791). Zkoušení vlivů prostředí: Část 3-7: Doprovodná dokumentace a návod - Měření v teplotních komorách pro zkoušky A a B (se zátěží). Český normalizační institut, říjen 2002.
- [17] ČSN EN 60751 (25 8340). *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, září 2014.
- [18] FRK, M., ROZSÍVALOVÁ, Z. Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi. *Elektrorevue*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 2012, 14(4), 9s. ISSN 1213-1539.
- [19] RIPKA, P., ĎAĎO S., KREIDL M., NOVÁK J. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [20] *Měření teploty – kovové odporové senzory teploty*. Vyvoj [online] 20.05.2004 [cit. 2020-01-04] Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [21] *Návod na použití: Snímače teploty TG3 Pt100/3850*. 15878/1216. Rožnov pod Radhoštěm: SENSIT, 21.12.2016.
- [22] *Translation of the original instruction manual: Temperature test cabinet*. T-65/50, 127003. Hechingen: CTS Clima Temperatur Systeme, 15.2.2012.

- [23] DOJAVA, V. *Stanovení standardní nejistoty při confirmaci teplotní komory* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=170867. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.
- [24] *Translation of the original instruction manual: Climate test chamber. T-60/50, 063010*. Hechingen: CTS Clima Temperatur Systeme, 2.10.2012.
- [25] *Návod k instalaci a obsluze: Teplotní a klimatizační zkušební skříň s vibrací s řízením SIMPAC. VCV³ 7060-15, 64637813*. Balingen-Frommern: Vötsch Industrietechnik, 7.2011.
- [26] *DATASHEET NI 9219: 4 AI, 100 S/s/ch Simultaneous, Universal Measurements*. 374473A-02. National Instruments, 16.4.2016.
- [27] CompactDAQ Chassis - National Instruments: Model: cDAQ-9178. *Automated Test and Automated Measurement Systems - National Instruments* [online]. National instruments, 2020 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/shop/select/compactdaq-chassis>
- [28] *GETTING STARTED GUIDE NI 9219: 4 AI, 100 S/s/ch Simultaneous, Universal Measurements*. 374473F-01. National Instruments, 16.4.2016.
- [29] *SPECIFICATIONS NI cDAQTM-9178: NI CompactDAQ Eight-Slot USB Chassis*. 374046A-01. National Instruments, 13.5.2013.
- [30] STRNAD, R. Měření teploty – porozumění vlastnostem měřicího přístroje. *Automa* [online]. 6/2009, 5s [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/39158.pdf
- [31] VOLDÁN, M. *Jednotlivé složky CMC pro OT: Výpočet nejistoty - důležitá součást každé kalibrace a měření!*. Praha: Český metrologický institut, 15.03.2018.
- [32] EA - 4/02 M:2013. *Vyjádření nejistoty měření při kalibraci*. Praha: Český institut pro akreditaci, duben 2014.
- [33] *Chyby digitálních měřicích přístrojů. ElektriKa* [online] 26.02.2010 [cit. 2020-01-04] Dostupné z: <http://elektriKa.cz/data/clanky/chyby-digitalnich-mericich-pristroju>
- [34] ČSN 25 8010. *Směrnice pro měření teplot v průmyslu*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1988.
- [35] UHER, Miroslav. 2019_MEMS_cv02_resene_priklady. *Elektronické měřicí systémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019, 21.

- [36] Datasheet: 34410A and 34411A Multimeters Agilent. USA: Keysight technologies [online] 2015. [cit. 2020-01-04] Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=34410a>
- [37] HAVLIKOVA Marie, UHER, Miroslav. MEMS - 3.přednáška - 18.2.2019: Měřicí řetězec, jeho součásti a problematika vzorkování. Elektronické měřicí systémy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019, 21.
- [38] SHAHANAGHI, K. a P. NAKHJIRI. Measurement: A new optimized uncertainty evaluation applied to the Monte-Carlo simulation in platinum resistance thermometer calibration [online]. 2010,11s [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: www.elsevier.com/locate/elsevier

A Bilanční tabulky

Tab. A.1: Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 50 °C - 1.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(50)}$	Základní nejistota	0,251°C	Normální	2	0,126°C	1	0,126°C
$u_{Sv(50)}$	Odvod tepla	0,006Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,003°C	2,593°C/Ω	0,008°C
$u_{Sd(50)}$	Dlouhodobý drift	0,251°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,145°C	1	0,145°C
$u_{Ss(50)}$	Samooohřev	0,049Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,028/Ω	2,593°C/Ω	0,073°C
$u_{Mn(50)}$	Základní nejistota	0,086Ω	Normální	2	0,043/Ω	2,593°C/Ω	0,111°C
$u_{Md(50)}$	Drift	0,032Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018/Ω	2,593°C/Ω	0,048°C
$u_{Mt(50)}$	Termonapětí	0,215Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,124/Ω	2,593°C/Ω	0,322°C
$u_{Kk(50)}$	Kolísání	0,019Ω	Normální	1	0,019Ω	2,593°C/Ω	0,049°C
$u_{Kg(50)}$	Gradient	0,171Ω	Normální	1	0,171Ω	2,593°C/Ω	0,443°C
$u_{Ch(50)}$	Hystereze	0,012Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,007Ω	2,593°C/Ω	0,018°C
$u_{Co(50)}$	Opakovatelnost	0,007Ω	Normální	1	0,007Ω	2,593°C/Ω	0,019°C

Nejistota A $u_{A(50)}(T)$: 0,446 °C

Nejistota B $u_{B(50)}(T)$: 0,401 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(50)}(T)$: 0,599 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(50)}(T)$: 1,199 °C

Tab. A.2: Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 50 °C - 2.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(50)}$	Základní nejistota	0,748°C	Normální	2	0,376°C	1	0,376°C
$u_{Sv(50)}$	Odvod tepla	0,016Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,009°C	2,593°C/Ω	0,024°C
$u_{Sd(50)}$	Dlouhodobý drift	0,748°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,432°C	1	0,432°C
$u_{Ss(50)}$	Samooohřev	0,087Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,050/Ω	2,593°C/Ω	0,130°C
$u_{Mn(50)}$	Základní nejistota	0,258Ω	Normální	2	0,129/Ω	2,593°C/Ω	0,334°C
$u_{Md(50)}$	Drift	0,095Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,055/Ω	2,593°C/Ω	0,142°C
$u_{Mt(50)}$	Termonapětí	0,433Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,250/Ω	2,593°C/Ω	0,648°C
$u_{Kk(50)}$	Kolísání	0,019Ω	Normální	1	0,019Ω	2,593°C/Ω	0,049°C
$u_{Kg(50)}$	Gradient	0,171Ω	Normální	1	0,171Ω	2,593°C/Ω	0,443°C
$u_{Ch(50)}$	Hystereze	0,018Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,010Ω	2,593°C/Ω	0,027°C
$u_{Co(50)}$	Opakovatelnost	0,010Ω	Normální	1	0,010Ω	2,593°C/Ω	0,026°C

Nejistota A $u_{A(50)}(T)$: 0,446 °C

Nejistota B $u_{B(50)}(T)$: 0,947 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(50)}(T)$: 1,047 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(50)}(T)$: 2,094 °C

Tab. A.3: Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 140 °C - 1.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(140)}$	Základní nejistota	0,437°C	Normální	2	0,218°C	1	0,218°C
$u_{Sv(140)}$	Odvod tepla	0,175°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,101°C	1	0,101°C
$u_{Sd(140)}$	Dlouhodobý drift	0,437°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,252°C	1	0,252°C
$u_{Ss(140)}$	Samooohřev	0,041Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,024/Ω	2,666°C/Ω	0,064°C
$u_{Mn(140)}$	Základní nejistota	0,089Ω	Normální	2	0,045/Ω	2,666°C/Ω	0,120°C
$u_{Md(140)}$	Drift	0,032Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018/Ω	2,666°C/Ω	0,048°C
$u_{Mt(140)}$	Termonapětí	0,228Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,132/Ω	2,666°C/Ω	0,352°C
$u_{Kk(140)}$	Kolísání	0,084°C	Normální	1	0,084°C	1	0,084°C
$u_{Kg(140)}$	Gradient	2,194°C	Normální	1	2,194°C	1	2,194°C
$u_{Ch(140)}$	Hystereze	0,022°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,013°C	1	0,013°C
$u_{Co(140)}$	Opakovatelnost	0,265°C	Normální	1	0,265°C	1	0,265°C

Nejistota A $u_{A(140)}(T)$: 2,212 °C

Nejistota B $u_{B(140)}(T)$: 0,515 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(140)}(T)$: 2,271 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(140)}(T)$: 4,542 °C

Tab. A.4: Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 140 °C - 1.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(140)}$	Základní nejistota	0,435°C	Normální	2	0,218°C	1	0,218°C
$u_{Sv(140)}$	Odvod tepla	0,066Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,038°C	2,666°C/Ω	0,102°C
$u_{Sd(140)}$	Dlouhodobý drift	0,435°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,251°C	1	0,251°C
$u_{Ss(140)}$	Samooohřev	0,041Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,024/Ω	2,666°C/Ω	0,064°C
$u_{Mn(140)}$	Základní nejistota	0,089Ω	Normální	2	0,045/Ω	2,666°C/Ω	0,120°C
$u_{Md(140)}$	Drift	0,032Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018/Ω	2,666°C/Ω	0,048°C
$u_{Mt(140)}$	Termonapětí	0,228Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,132/Ω	2,666°C/Ω	0,352°C
$u_{Kk(140)}$	Kolísání	0,031Ω	Normální	1	0,031Ω	2,666°C/Ω	0,083°C
$u_{Kg(140)}$	Gradient	0,822Ω	Normální	1	0,822Ω	2,666°C/Ω	2,191°C
$u_{Ch(140)}$	Hystereze	0,022Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,013Ω	2,666°C/Ω	0,035°C
$u_{Co(140)}$	Opakovatelnost	0,099Ω	Normální	1	0,099Ω	2,666°C/Ω	0,264°C

Nejistota A $u_{A(140)}(T)$: 2,208 °C

Nejistota B $u_{B(140)}(T)$: 0,514 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(140)}(T)$: 2,268 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(140)}(T)$: 4,535 °C

Tab. A.5: Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu 140 °C - 2.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(140)}$	Základní nejistota	1,291°C	Normální	2	0,646°C	1	0,646°C
$u_{Sv(140)}$	Odvod tepla	0,524°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,303°C	1	0,303°C
$u_{Sd(140)}$	Dlouhodobý drift	1,291°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,745°C	1	0,745°C
$u_{Ss(140)}$	Samooohřev	0,101Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,058/Ω	2,666°C/Ω	0,155°C
$u_{Mn(140)}$	Základní nejistota	0,267Ω	Normální	2	0,134/Ω	2,666°C/Ω	0,357°C
$u_{Md(140)}$	Drift	0,097Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,056/Ω	2,666°C/Ω	0,145°C
$u_{Mt(140)}$	Termonapětí	0,587Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,339/Ω	2,666°C/Ω	0,904°C
$u_{Kk(140)}$	Kolísání	0,084°C	Normální	1	0,084°C	1	0,084°C
$u_{Kg(140)}$	Gradient	2,194°C	Normální	1	2,194°C	1	2,194°C
$u_{Ch(140)}$	Hystereze	0,033°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,019°C	1	0,019°C
$u_{Co(140)}$	Opakovatelnost	0,549°C	Normální	1	0,549°C	1	0,549°C

Nejistota A $u_{A(140)}(T)$: 2,263 °C

Nejistota B $u_{B(140)}(T)$: 1,433 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(140)}(T)$: 2,679 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(140)}(T)$: 5,357 °C

Tab. A.6: Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu 140 °C - 2.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(140)}$	Základní nejistota	1,287°C	Normální	2	0,644°C	1	0,644°C
$u_{Sv(140)}$	Odvod tepla	0,198Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,114°C	2,666°C/Ω	0,305°C
$u_{Sd(140)}$	Dlouhodobý drift	1,287°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,743°C	1	0,743°C
$u_{Ss(140)}$	Samooohřev	0,101Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,058/Ω	2,666°C/Ω	0,155°C
$u_{Mn(140)}$	Základní nejistota	0,267Ω	Normální	2	0,134/Ω	2,666°C/Ω	0,357°C
$u_{Md(140)}$	Drift	0,097Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,056/Ω	2,666°C/Ω	0,145°C
$u_{Mt(140)}$	Termonapětí	0,587Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,339/Ω	2,666°C/Ω	0,904°C
$u_{Kk(140)}$	Kolísání	0,031Ω	Normální	1	0,031Ω	2,666°C/Ω	0,083°C
$u_{Kg(140)}$	Gradient	0,822Ω	Normální	1	0,822Ω	2,666°C/Ω	2,191°C
$u_{Ch(140)}$	Hystereze	0,013Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,008Ω	2,666°C/Ω	0,020°C
$u_{Co(140)}$	Opakovatelnost	0,205Ω	Normální	1	0,205Ω	2,666°C/Ω	0,547°C

Nejistota A $u_{A(140)}(T)$: 2,260 °C

Nejistota B $u_{B(140)}(T)$: 1,431 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(140)}(T)$: 2,675 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(140)}(T)$: 5,349 °C

Tab. A.7: Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu -40 °C - 1.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(-40)}$	Základní nejistota	0,237°C	Normální	2	0,119°C	1	0,119°C
$u_{Sv(-40)}$	Odvod tepla	0,378°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,218°C	1	0,218°C
$u_{Sd(-40)}$	Dlouhodobý drift	0,237°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,137°C	1	0,137°C
$u_{Ss(-40)}$	Samooohřev	0,028Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,016/Ω	2,525°C/Ω	0,040°C
$u_{Mn(-40)}$	Základní nejistota	0,082Ω	Normální	2	0,041/Ω	2,525°C/Ω	0,104°C
$u_{Md(-40)}$	Drift	0,031Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018/Ω	2,525°C/Ω	0,045°C
$u_{Mt(-40)}$	Termonapětí	0,146Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,084/Ω	2,525°C/Ω	0,212°C
$u_{Kk(-40)}$	Kolísání	0,213°C	Normální	1	0,213°C	1	0,213°C
$u_{Kg(-40)}$	Gradient	1,208°C	Normální	1	1,208°C	1	1,208°C
$u_{Ch(-40)}$	Hystereze	0,236°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,136°C	1	0,136°C
$u_{Co(-40)}$	Opakovatelnost	0,496°C	Normální	1	0,496°C	1	0,496°C

Nejistota A $u_{A(-40)}(T)$: 1,323 °C

Nejistota B $u_{B(-40)}(T)$: 0,398 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(-40)}(T)$: 1,382 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(-40)}(T)$: 2,763 °C

Tab. A.8: Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu -40 °C - 1.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(-40)}$	Základní nejistota	0,237°C	Normální	2	0,119°C	1	0,119°C
$u_{Sv(-40)}$	Odvod tepla	0,149Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,086°C	2,525°C/Ω	0,217°C
$u_{Sd(-40)}$	Dlouhodobý drift	0,237°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,137°C	1	0,137°C
$u_{Ss(-40)}$	Samooohřev	0,028Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,016/Ω	2,525°C/Ω	0,040°C
$u_{Mn(-40)}$	Základní nejistota	0,082Ω	Normální	2	0,041/Ω	2,525°C/Ω	0,104°C
$u_{Md(-40)}$	Drift	0,031Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,018/Ω	2,525°C/Ω	0,045°C
$u_{Mt(-40)}$	Termonapětí	0,146Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,084/Ω	2,525°C/Ω	0,212°C
$u_{Kk(-40)}$	Kolísání	0,082Ω	Normální	1	0,082Ω	2,525°C/Ω	0,207°C
$u_{Kg(-40)}$	Gradient	0,480Ω	Normální	1	0,480Ω	2,525°C/Ω	1,212°C
$u_{Ch(-40)}$	Hystereze	0,078Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,045Ω	2,525°C/Ω	0,114°C
$u_{Co(-40)}$	Opakovatelnost	0,199Ω	Normální	1	0,199Ω	2,525°C/Ω	0,502°C

Nejistota A $u_{A(-40)}(T)$: 1,329 °C

Nejistota B $u_{B(-40)}(T)$: 0,390 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(-40)}(T)$: 1,385 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(-40)}(T)$: 2,770 °C

Tab. A.9: Bilanční tabulka pro „přímo“ měřenou teplotu -40 °C - 2.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(-40)}$	Základní nejistota	$0,695\text{°C}$	Normální	2	$0,348\text{°C}$	1	$0,348\text{°C}$
$u_{Sv(-40)}$	Odvod tepla	$1,134\text{°C}$	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$0,655\text{°C}$	1	$0,655\text{°C}$
$u_{Sd(-40)}$	Dlouhodobý drift	$0,695\text{°C}$	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$0,401\text{°C}$	1	$0,401\text{°C}$
$u_{Ss(-40)}$	Samooohřev	$0,061\Omega$	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$0,035/\Omega$	$2,525\text{°C}/\Omega$	$0,089\text{°C}$
$u_{Mn(-40)}$	Základní nejistota	$0,246\Omega$	Normální	2	$0,123/\Omega$	$2,525\text{°C}/\Omega$	$0,311\text{°C}$
$u_{Md(-40)}$	Drift	$0,094\Omega$	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$0,054/\Omega$	$2,525\text{°C}/\Omega$	$0,137\text{°C}$
$u_{Mt(-40)}$	Termonapětí	$0,301\Omega$	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$0,174/\Omega$	$2,525\text{°C}/\Omega$	$0,439\text{°C}$
$u_{Kk(-40)}$	Kolísání	$0,213\text{°C}$	Normální	1	$0,213\text{°C}$	1	$0,213\text{°C}$
$u_{Kg(-40)}$	Gradient	$1,208\text{°C}$	Normální	1	$1,208\text{°C}$	1	$1,208\text{°C}$
$u_{Ch(-40)}$	Hystereze	$0,471\text{°C}$	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	$0,272\text{°C}$	1	$0,272\text{°C}$
$u_{Co(-40)}$	Opakovatelnost	$0,777\text{°C}$	Normální	1	$0,777\text{°C}$	1	$0,777\text{°C}$

Nejistota A $u_{A(-40)}(T)$: $1,452\text{ °C}$

Nejistota B $u_{B(-40)}(T)$: $1,049\text{ °C}$

Kombinovaná nejistota $u_{C(-40)}(T)$: $1,791\text{ °C}$

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(-40)}(T)$: $3,583\text{ °C}$

Tab. A.10: Bilanční tabulka pro nepřímou měřenou teplotu -40 °C - 2.způsob

Značení	Stručný popis	Odhad	Rozdělení	Koeficient rozložení	Standardní nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek nejistoty
$u_{Sn(-40)}$	Základní nejistota	0,697°C	Normální	2	0,349°C	1	0,349°C
$u_{Sv(-40)}$	Odvod tepla	0,447Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,258°C	2,525°C/Ω	0,652°C
$u_{Sd(-40)}$	Dlouhodobý drift	0,697°C	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,402°C	1	0,402°C
$u_{Ss(-40)}$	Samooohřev	0,061Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,035/Ω	2,525°C/Ω	0,089°C
$u_{Mn(-40)}$	Základní nejistota	0,246Ω	Normální	2	0,123/Ω	2,525°C/Ω	0,311°C
$u_{Md(-40)}$	Drift	0,094Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,054/Ω	2,525°C/Ω	0,137°C
$u_{Mt(-40)}$	Termonapětí	0,301Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,174/Ω	2,525°C/Ω	0,439°C
$u_{Kk(-40)}$	Kolísání	0,082Ω	Normální	1	0,082Ω	2,525°C/Ω	0,207°C
$u_{Kg(-40)}$	Gradient	0,480Ω	Normální	1	0,480Ω	2,525°C/Ω	1,212°C
$u_{Ch(-40)}$	Hystereze	0,173Ω	Rovnoměrné	$\sqrt{3}$	0,100Ω	2,525°C/Ω	0,252°C
$u_{Co(-40)}$	Opakovatelnost	0,308Ω	Normální	1	0,308Ω	2,593°C/Ω	0,778°C

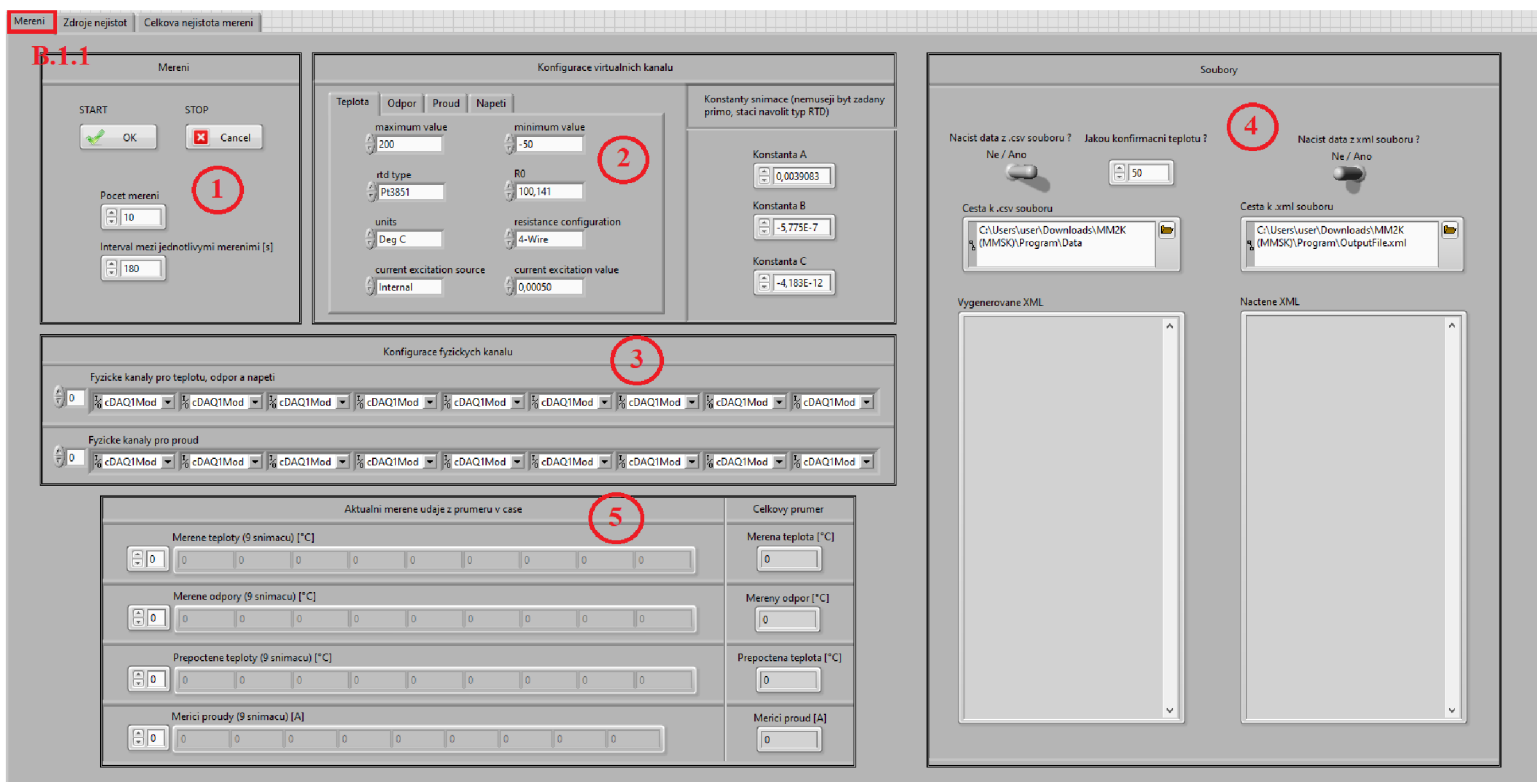
Nejistota A $u_{A(-40)}(T)$: 1,456 °C

Nejistota B $u_{B(-40)}(T)$: 1,042 °C

Kombinovaná nejistota $u_{C(-40)}(T)$: 1,790 °C

Rozšířená nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) $U_{(-40)}(T)$: 3,581 °C

B Ovládací panel v prostředí LabView



Obr. B.1: Ovládací panel v prostředí Labview - záložka „Měření“

Měření: **Zdroje nejistot** Celková nejistota měření

Snímace | Měřicí přístroje | Komora | Celý měřicí systém

B.1.2

Název zdroje nejistoty	Základní nejistota	Odvod tepla	Samoohřev	Dlouhodobý drift
Vstupní (zadávací část) Výsledek (vlevo) nebo dvě hodnoty 1	<input type="text" value="0"/> Ohm	<input type="text" value="0"/> Ohm	<input type="text" value="0"/> Ohm	<input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/> °C
Vstupní (zadávací část) Údaje potřebné pro kvantifikaci 2		Experimentální měření Ne / Ano <input type="radio"/> <input type="radio"/> Počet měření <input type="text" value="0"/>	Ztrátová konstanta [W/°C] <input type="text" value="5"/>	
Je potřeba zadat údaje pouze v jedné sekci (rovnou kvantifikovaný odhad zdroje nejistoty nebo údaje potřebné k výpočtu - pokud bude vyplněna sekce rovnou s výsledkem, výpočet (měření) zdroje nejistoty proběhne		Teoretická kvantifikace "Ponor" snímače [m] <input type="text" value="0"/> Efektivní průměr snímače [m] <input type="text" value="0"/> Konstanta daná typem média (±1) [-] <input type="text" value="0"/> Teplota okolí [°C] <input type="text" value="0"/>		
Výsledková část 3 Jednotky měřené veličiny: °C Ohm (A, V)	<input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/>	1.způsob (experiment) 2.způsob <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/>	1.způsob 2.způsob (dva proudy) <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/> <input type="text" value="0"/>

Uvažovat každý zdroj nejistoty jen jednou?

Ne / Ano

Měřit - Hysterze, Opakovatelnost OK

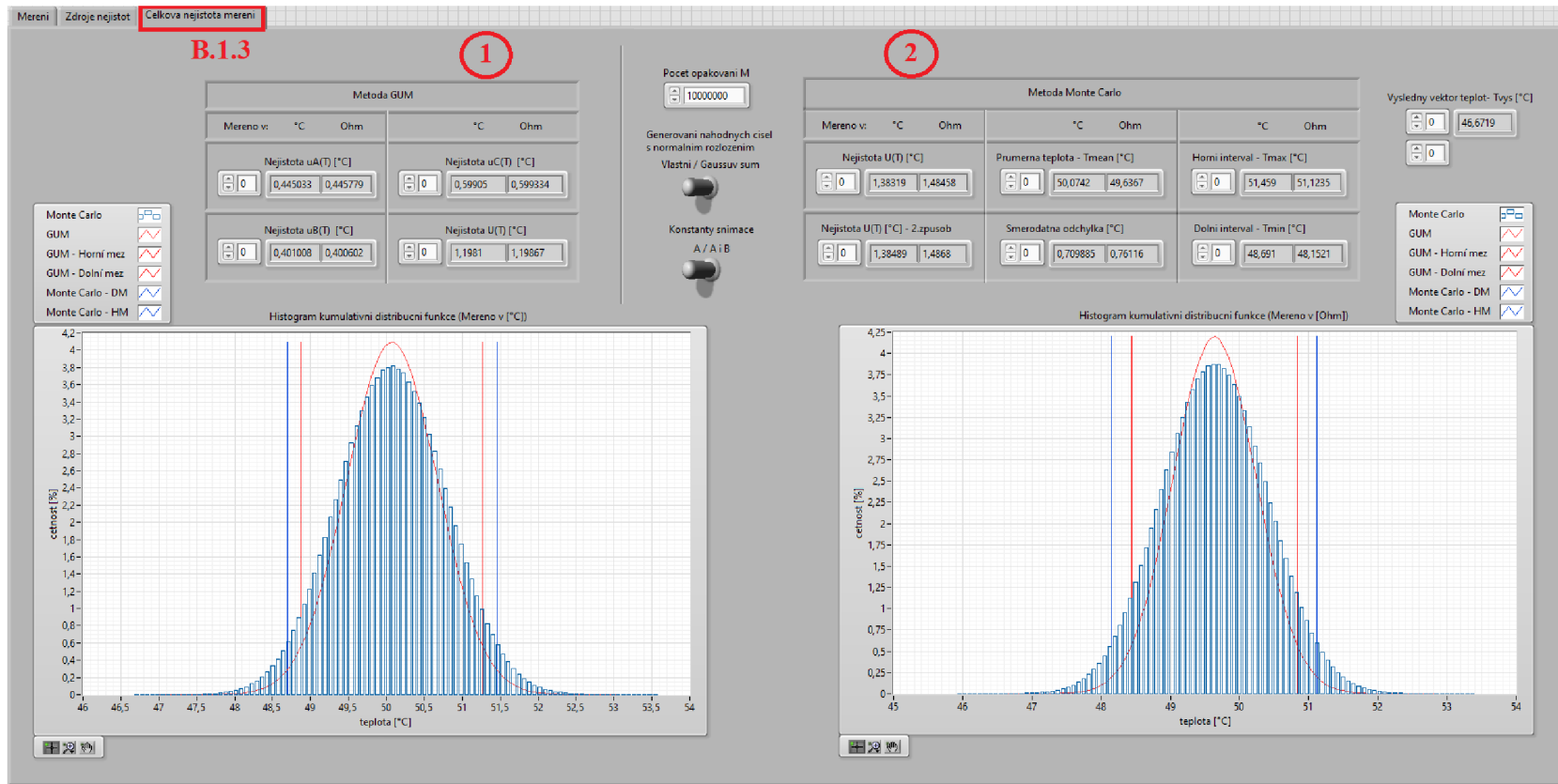
Měřit - Odvod tepla OK **4**

Měřit - Samoohřev, Termopapení OK

Aktuální nejistota

Opakovatelnost
 3.měření - Rozpojte měřicí řetězec a vyndějte měřicí konstrukci z komory, následně řetězec znovu zapojte a konstrukci vraťte do komory
 Celkový počet měření 3

Obr. B.2: Ovládací panel v prostředí Labview - záložka „Zdroje nejistot“



Obr. B.3: Ovládací panel v prostředí Labview - záložka „Celková nejistota měření“

B.1 Manuál k použití

Ovládací panel je rozdělen na tři sekce - záložky *Měření* (Obr. B.1), *Zdroje nejistot* (Obr. B.2) a *Celková nejistota měření* (Obr. B.3). Všechny jednotlivé funkce v záložkách budou nyní postupně popisovány.

B.1.1 Měření

Záložka *Měření* se dělí na dalších pět částí, jenž jsou tematicky rozděleny a mají své přiřazené číslo (Obr. B.1):

1 - *Měření*: Pomocí tlačítka *START* se aplikace spustí. Stisknutím tlačítka *STOP* se naopak ukončí. *Počet měření* udává číslo odměřů na dané konfirmační úrovni při ustálené teplotě. *Interval mezi jednotlivými měřeními* potom čas, který od sebe jednotlivé vzorky dělí. Tím se vlastně zvolí celková doba měření na daném teplotním bodě.

2 - *Konfigurace virtuálních kanálů*: Zde se volí (záložka v levé části) parametry potřebné pro vytvoření virtuálních kanálů. Konfigurují se samozřejmě všechny čtyři kanály - teplota, odpor, proud a napětí. Parametry, které obsahuje každá z veličin, jsou minimální a maximální rozsah a jednotky veličiny. Každá z nich má potom své další speciální údaje, které je potřeba navolit. Např. u teploty je to způsob zapojení (i u odporu) a typ RTD snímače, ze kterého se poté automaticky získají konstanty v pravé části sekce. Tyto konstanty si může uživatel navolit také sám. Pokud se navolí pomocí typu RTD (program je již spuštěný), zablokují se jejich příslušná pole, aby je dále nebylo možno modifikovat a konfirmace proběhla za stejných podmínek.

3 - *Konfigurace fyzických kanálů*: V této sekci je potřeba navolit fyzické kanály, ke kterým jsou snímače připojeny.

4 - *Soubory* - Část se soubory obsahuje dvě možnosti načítání (.csv a .xml soubory). Načítání .csv souborů slouží spíše k testování, protože obsahuje pouze uložená naměřená data. U tohoto způsobu se také musí vybrat *Konfirmační teplota*, jejíž příslušející data budou načítány. Soubory .xml se budou používat pro zpětné načítání, většinou již kvantifikovaných zdrojů nejistot, při budoucích konfirmacích. Pokud nebude vybrána ani jedna z možností čtení, budou se jednotlivé zdroje měřit (pokud nebude zadán rovnou odhad nejistoty viz následující kapitola B.1.2). Je samozřejmostí, že první konfirmace musí proběhnout klasickým způsobem, protože data v souborech ještě nejsou k dispozici, za to se ale zapisují při každé konfirmaci komory. Oba způsoby načítání nemohou být vybrány! Při načítání .csv souborů se musí vybrat pouze cesta, název samotného souboru si program vybere sám, přičemž

musí být dodrženy názvy viz příloha D. U čtení .xml souborů se musí zadat i samotný název. Z důvodu zápisu s časovými značkami se ale po prvním dokončení programu cesta k souboru, resp. název, zaktualizuje pro další automatické spuštění. Pro zajímavost se ještě vypisuje na čelní panel .xml kód jak při zapisování, tak při čtení.

5 - *Aktuální měřené údaje z průměru v čase*: Tato část je poprvé čistě výstupní, tudíž do ní uživatel nemůže nijak zasahovat. Zobrazují se „přímo“ a nepřímě naměřené hodnoty teploty, a také měřicí proudy, které jsou průměrnou hodnotou od každého snímače po dobu odečítání (ustálení na teplotním bodě). Dále jsou zde také celkové průměrné hodnoty stejných veličin ze všech naměřených dat.

B.1.2 Zdroje nejistot

Záložka je opět rozdělena, tentokrát do dalších dílčích záložek příslušejících jednotlivým přístrojům jako zdrojům nejistot (Obr. B.2). Ty jsou podrobně vysvětleny v kapitole 8 popř. v Tab. 9.1. Vstupní (zadávací) část je rozdělena na dvě sekce:

1 - *Výsledek (vlevo) nebo dvě hodnoty* - Zde se zadává přímo kvantifikovaný odhad zdroje nejistoty s příslušnou jednotkou. U vybraných případů (viz kapitola „Case“ False je možné zadat nejistotu pomocí dvou čísel. Nejistota těchto případů, reprezentovaná pouze jedním číslem, se musí zadat vždy doleva!

2 - *Údaje potřebné pro konfirmaci* se zadávají v případě, že se neví přesná hodnota odhadu nejistoty a je potřeba nejistotu kvantifikovat (na základně teoretických vztahů, ale i nového měření). Speciálním případem je *Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv}* v záložce *Snímače*. Jak již bylo řečeno ve zmíněné kapitole, zde existuje dvojí způsob kvantifikace. Prvním je čistě experimentální způsob, pro který je přidán dotazovací přepínač právě k volbě provádění experimentu, a také pole *Počet měření*. Zajímavá je volba také u *Základní nejistota přístroje získávajícího hodnoty - u_{Mn}* . Zde se může navolit navržená měřicí karta NI 9219 (viz kapitola *Měřicí karty NI 9219 a šasi cDAQ-9178*), pro kterou jsou údaje pevně definovány, přičemž je zde i dvojí možnost hodnot parametrů odpovídajícím okolním podmínkám prostředí. Zabudována je i volba jiného zařízení, v tomto případě ovšem musí uživatel zadat údaje sám.

3 - *Výsledková část*: Zobrazovány jsou vždy (minimálně) dva výsledky. První odpovídá „přímému“ měření teploty a druhý měření odporu. Výše zmíněná *Nejistota způsobená odvodem/přívodem tepla - u_{Sv}* a *Nejistota způsobená samoohřevem - u_{Ss}* zahrnují dva různé způsoby výpočtu nejistoty, proto jsou u nich rovnou čtyři kolonky.

Opět je potřeba zadat vstupní data pouze jedním způsobem, resp. pokud se zadá přímo odhad, nebude se provádět měření. Po zadání a spuštění aplikace se zablokují pole vždy z jedné či druhé části, která zůstala prázdná.

4 - Čtvrtá (volná) část umožňuje výběr postupu výpočtu výsledné nejistoty měření. První způsob spočívá v uvažování každého zdroje nejistoty pouze jednou a druhý aplikuje způsob odpovídající počtu přístrojů. Dále následují tlačítka, která spouští daná měření jednotlivých zdrojů nejistot. Pro správnou funkčnost musejí být tři - pro každou „event“ strukturu unikátní (vysvětleno v kapitole 6.2.3). Jako poslední je zde dialogové okno, které navádí uživatele k potřebným hardwarovým úpravám a informuje o současném stavu měření.

B.1.3 Celková nejistota měření

Zde se jedná už jen o čistě výsledkovou část (Obr. B.3), která se dá opět rozdělit do dvou částí:

1 - *Metoda GUM*: U metody GUM jsou zobrazovány nejistota typu A, B, kombinovaná a nakonec rozšířená nejistota měření.

2 - *Metoda Monte Carlo*: Metoda Monte Carlo je z tohoto pohledu zajímavější. Zaprvé, musí se navolit *Počet opakování*. Zadruhé, je zde opět možnost volby, která spočívá nejen ve volbě generátoru náhodných čísel, kde je jeden generátor vlastní a druhý je vytvořen přímo pomocí bločku v programu LabView pro generování bílého šumu. Druhý přepínač umožňuje volbu počtu konstant snímače, které jsou uvažovány při výpočtech, jenž jsou součástí metody.

Výsledková tabulka obsahuje samozřejmě nejistotu měření, která je pro porovnání vypočtena oběma způsoby (horní mez minus průměrná hodnota a průměrná hodnota minus dolní mez). Všechny zmíněné údaje jsou také součástí tabulky. Jako poslední jsou zde, opět jen pro zajímavost, směrodatná odchylka vektoru vygenerovaných hodnot a z čistě praktických důvodů (použití v dalším stavu) i samotný vektor vygenerovaných hodnot. Ve spodní části jsou vykresleny histogramy, které znázorňují histogram kumulativní distribuční funkce vypočítaný oběma metodami (pro porovnání), a také jejich příslušné intervaly dané výslednou nejistotou měření.

C Zdrojový kód pro výpočet nejistoty metodou Monte Carlo v programu Matlab

```
clc;
clear all;
close all;

Teplota = 50; %Konfirmacni teplota: 50°C (Teplota=50); 140°C (Teplota=140)
%a -40°C (Teplota=-40)
Mereni = 1; %Mereni: prime mereni teploty (Mereni=1); neprime mereni
%teploty (Mereni=2)
Zpusob = 1; %Zpusob vyhodnoceni nejistoty: kazdy zdroj pouze jednou
%(Zpusob=1); podle poctu pristroju (Zpusob=2)
PocetKonstant = 1; %Pocet pouzitych konstant: pouze konstanta A
%(PocetKonstant=1); konstanta A i B (PocetKonstant=2)

if Teplota == 50 && Mereni == 1 && Zpusob == 1
%definice hodnot
M=1e7; %pocet opakovani
R0=100.141;%ohm %hodnota odporu pri 0°C
UCo=20e-3;%°C %opakovatelnost (Cely merici system)
UKk=52e-3;%°C %kolisani teploty (Komora)
UKg=442e-3;%°C %gradient teploty (Komora)
USn=252e-3;%°C %zakladni nejistota (Snimac)
USv=15e-3;%°C %odvod tepla (Snimac)
USd=252e-3;%°C %dlouhodoby drift (Snimac)
USs=49e-3;%ohm %samoohrev (Snimac)
UMn=86e-3;%ohm %zakladni nejistota (Merici karta)
UMd=32e-3;%ohm %drift (Merici karta)
UMt=215e-3;%ohm %termonapeti (Merici karta)
UCh=32e-3;%°C %hystereze (Cely merici system)
A=3.9083e-3;%°C-1 %koeficient A
B=-5.775e-7;%°C-2 %koeficient B
T = 50.074;%°C %konfirmacni teplota

%generovani nahodnych hodnot pro zdroje nejistoty pusobici na R0[Ohm]
rUMn = random('norm',R0,UMn,1,M); %zakladni nejistota (Merici karta),
%normalni rozdeleni, stredni hodnota R0
rUSs = 0 - USs + (2*USs).*rand(1,M); %samoohrev (Snimac), rovnomerne
%rozdeleni, stredni hodnota 0
rUMd = 0 - UMd + (2*UMd).*rand(1,M); %drift (Merici karta)
rUMt = 0 - UMt + (2*UMt).*rand(1,M); %termonapeti (Merici karta)

%soucet vygenerovanych nahodnych hodnot R0[Ohm]
soucetR0 = rUSs + rUMd + rUMn + rUMt;

%vykresleni histogramu pro R0
figure(1);
hist(soucetR0,100);
xlabel('odpor R0 [Ohm]');
ylabel('cetnost [-]');
title('Histogram odporu R0');
grid on;

%generovani nahodnych hodnot pro zdroje nejistoty pusobici na T[°C]
```

```

rUCo = random('norm',0,UCo,1,M);           %opakovatelnost (Cely merici system),
                                           %normalni rozdeleni, stredni hodnota 0
rUKk = random('norm',0,UKk,1,M);           %kolisani teploty (Komora)
rUSv = 0 - USv + (2*USv).*rand(1,M);       %odvod tepla (Snimac)
rUKg = random('norm',0,UKg,1,M);           %gradient teploty (Komora)
rUSd = 0 - USd + (2*USd).*rand(1,M);       %dlouhodobý drift (Snimac)
rUSn = random('norm',0,USn,1,M);           %zakladni nejistota (Snimac)
rUCh = 0 - UCh + (2*UCh).*rand(1,M);       %hystereze (Cely merici system)

%soucet vygenerovanych nahodnych hodnot T[°C]
soucetT = T + rUCo + rUKk + rUSv + rUKg + rUSd + rUSn + rUCh;

%vykreslení histogramu pro T
figure(2);
hist(soucetT,100);
xlabel('teplota T[°C]');
ylabel('cetnost [-]');
title('Histogram teploty T');
grid on;

    if PocetKonstant == 2
        %model mereni
        RT = soucetR0.*(1+A*soucetT+B*(soucetT.^2));

        %prepocet na teplotu
        D = A^2-4*B*(1-(RT./R0));
        Tvys = (-A+D.^0.5)/(2*B);

    elseif PocetKonstant == 1
        %model mereni
        RT = soucetR0.*(1+A*soucetT);

        %prepocet na teplotu
        Tvys = (RT - R0)/(R0*A);
    end

%vykreslení histogramu pro RT
figure(3);
hist(RT,100);
xlabel('odpor RT [Ohm]');
ylabel('cetnost [-]');
title('Histogram výsledného odporu RT');
grid on;

%prumerna hodnota potrebna k vypoctu vysledne nejistoty
prumTvys = mean(Tvys);

%vykreslení histogramu pro Tvys
figure(4);
hist(Tvys,100);
xlabel('teplota Tvys [°C]');
ylabel('cetnost [-]');
title('Histogram výsledné teploty T');
grid on;

%serazeni do neklesajiciho poradi
Tvys = sort(Tvys);

%vypocet smerodatne odchylky

```

```

uA=std(Tvys);

%vypocet intervalu pokryti 95% pro Tvys
p = 0.95;
q = p*M;
r = (M-q)/2;
f=r+q;
Tmin = Tvys(r);
Tmax = Tvys(r+q);

%vypocet vysledne nejistoty
U = Tmax - prumTvys;

%vypocet mezi a Gaussova krivka z GUMu
Ugum = 0.612; %hodnota kombinovane nejistoty
%vypocitana GUMen

Uso=Ugum/2;
Tmingum = T - Ugum;
Tmaxgum = T + Ugum;
GUM = random('norm',T,Us,1,M); %generovani Gaussovy krivky

%histogram kumulativni distribucni funkce
figure(5);
[F,X]=ecdf(Tvys);
ecdfhist(F,X,100);
title('Histogram kumulativní distribuční funkce výsledné teploty T');
xlabel('teplota Tvys [°C]');
ylabel('cetnost [%]');
grid on;

%vykresleni minimalnich mezi
line([Tmin Tmin],[0 0.7],'LineWidth',2,'Color','b','LineStyle','--');
hold on;
line([Tmingum Tmingum],[0 0.7],'LineWidth',2,'Color','r','LineStyle','--');
hold on;

% vykresleni prubehu Gaussovy krivky z GUMu do grafu
[F,X]=ecdf(GUM);
[N,C]=ecdfhist(F,X,100);
[mu,var]=normfit(GUM);
T=47:0.001:52.2;
y=normpdf(T,mu,var);
plot(T,y,'r','LineWidth',2);
hold on;

%vykresleni maximalnich mezi
line([Tmax Tmax],[0 0.7],'LineWidth',2,'Color','b','LineStyle','--');
hold on;
line([Tmaxgum Tmaxgum],[0 0.7],'LineWidth',2,'Color','r','LineStyle','--');
hold on;
legend('Monte Carlo','Monte Carlo - Meze','GUM - Meze','GUM');

.
.
.

end

```

D Obsah příloženého CD

```
/ ..... kořenový adresář příloženého CD
├── DataNacitani ..... soubory s naměřenými/vstupními daty
│   ├── Gradient,Kolisani_a_Ostatni.csv
│   ├── Hystereze.csv
│   ├── Odvod.csv
│   ├── Opakovatelnost.csv
│   ├── Samoohrev.csv
│   ├── Termonapeti.csv
│   └── OutputFile.xml
├── Datasheety
│   ├── CTS T-60-50
│   ├── CTS T-65-50
│   ├── NI
│   ├── TG3
│   └── Vötsch VCV3-7060-15
├── DataZpracovani ..... soubory se zpracovanými daty
│   ├── Hystereze.xlsx
│   ├── Kolisani.xlsx
│   ├── Konfirmace.xlsx
│   ├── Odvod.xlsx
│   ├── Opakovatelnost.xlsx
│   ├── PorovnaniPristroju.xlsx
│   ├── PrechodoveCharKomory.xlsx
│   ├── PrechodoveCharSnimace.xlsx
│   ├── Samoohrev.xlsx
│   └── Termonapeti.xlsx
├── LabView
│   ├── HlavniProgram
│   │   ├── MMSK_RTverze.vi
│   │   ├── MMSK_RTverze_Nacitani.vi modifikovaná demoverze pro rychlé spuštění s
│   │   │   již naměřenými daty
│   │   ├── MMSK_UIverze.vi
│   │   ├── SubVI_CteniZeSouboru.vi
│   │   ├── :
│   │   └── SubVI_ZapisDoSouboru.vi
│   └── PomocnyProgram
│       ├── PrechodoveCharakteristiky.vi
│       └── SubVI_ZapisDoSouboruPCH.vi
├── Matlab
│   ├── Gradient3Dgrafy.m
│   └── MonteCarlo.m
```