

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

KALIBRACE ZÁVAŽÍ A VAH CALIBRATION OF WEIGHTS AND BALANCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

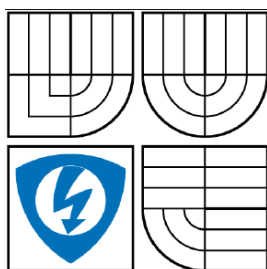
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KLÁRA VOJTOVÁ

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Martin FRK, Ph.D.

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský studijní obor

Elektrotechnická výroba a management

Studentka: Bc. Klára Vojtová

ID: 119343

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Kalibrace závaží a vah

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte zákon o metrologii upravující jednotnost, a správnost a návaznost měřidel a měření. Osvojte si problematiku statistického zpracování naměřených hodnot s ohledem na stanovení nejistoty měření. Seznamte se s náležitostmi doprovázejícími proces kalibrace závaží a přístrojového vybavení pro stanovení hmotnosti; zejména s metodickými postupy, vlivy činitelů a matematickými výpočty. Proveďte rozvahu finanční náročnosti potřebné k zajištění požadované přesnosti zjišťování hmotnosti.

S využitím dostupného laboratorního vybavení a podmínek ústavu elektrotechnologie demonstруйте na praktických příkladech postup kalibrace vah a závaží se všemi příslušejícími náležitostmi. Zvažte možnost realizovat identický experiment pomocí etalonů vyšší třídy přesnosti v rámci Českého metrologického institutu a proveďte porovnání dosažených výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 30.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, 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 následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona c. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku c.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

V úvodní kapitole této práce je zachycena organizační struktura národního metrologického systému České republiky a její návaznost na mezinárodní organizace. Dále je zde uvedena základní terminologie z oblasti metrologie, a to zejména v oblasti klasifikace měřidel.

Následující oddíly přibližují problematiku nejistot měření, jejich členění, zdroje nejistot stanovené metodou typu A a B, jejich specifika a výpočet.

Na výše uvedené navazuje oblast zabývající se již samotnými kalibracemi, v první řadě kalibrací závaží, klasifikací závaží dle tříd přesnosti, stanovenými postupy a konečně stanovením nejistot při kalibracích závaží. Poté bezprostředně následuje kapitola zabývající se kalibracemi vah, prováděnými zkouškami a nejistotami měření.

Hlavní část diplomové práce je samozřejmě směřována k aplikaci nabytých poznatků na praktických příkladech, tedy provedením kalibrací závaží třídy F2 pomocí závaží vyšší třídy přesnosti, a to jednak v prostorách Vysokého učení technického v Brně a jednak v laboratoři hmotnosti Českého metrologického institutu. Dále byla provedena kalibrace školních vah značky Ohaus Explorer EX224.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nejistoty přímých měření, nejistoty nepřímých měření, kalibrace závaží, kalibrace vah.

ABSTRACT

In the introductory chapter of this work is caught organizational structure of the national metrology system in the Czech Republic and its links to international organizations. There is indicated the basic terminology of metrology, particularly in the area of classification instruments.

The following sections approaching the issue of measurement uncertainties, their classification, sources of uncertainty determined by the type A and B, their specifics and calculation.

The above linked area already dealing with themselves calibrations, first of all calibration weights, classification of weights according accuracy classes, established procedures, and finally determining uncertainty in calibration weights. Then, immediately followed by a chapter dealing with calibration balances, performed tests and measurement uncertainties.

The main part is of course directed towards the application of acquired knowledge to practical examples, thus performing the calibration weight class F2 using a high-precision weights, both in the premises of the Technical University in Brno, both in the laboratory weighing the Czech Metrological Institute. Further calibration was performed school balances Ohaus Explorer EX224.

KEYWORDS

Uncertainties direct measurement, indirect measurement uncertainty, calibration weights, calibration balances.

VOJTOVÁ, K. *Kalibrace závaží a vah*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 121 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Kalibrace závaží a vah jsem vypracovala 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 tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 22. května 2013

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rovněž děkuji Českému metrologickému institutu, za zpřístupnění laboratoře, umožnění provedení měření a rovněž hodnotná doporučení při samotném měření a zpracování dat.

V Brně dne 22. května 2013

.....

podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Metrologie	2
1.1 Legální metrologie a její orgány	2
1.2 Kategorizace měřidel	5
1.2.1 Etalon	5
1.2.2 Stanovená měřidla.....	6
1.2.3 Pracovní měřidla	6
1.2.4 Certifikované referenční materiály	7
1.3 Ověřování a kalibrace	7
2 Nejistoty měření	8
2.1 Měřicí systém	8
2.1.1 Operátor	8
2.1.2 Měřidlo.....	8
2.1.3 Postup měření	9
2.1.4 Měřená veličina.....	9
2.1.5 Prostředí	9
2.2 Chyby měření	9
2.2.1 Náhodné chyby	10
2.2.2 Systematické chyby	10
2.2.3 Hrubé chyby.....	11
2.2.4 Výsledná chyba.....	11
2.3 Nejistoty měření	11
2.3.1 Zdroje nejistot měření	12
2.3.2 Měřená veličina.....	12
2.3.3 Metoda měření	13
2.3.4 Odhad hodnoty měřené veličiny	13
2.3.5 Stanovení nejistot měření pro odhady hodnot vstupních veličin	14
2.3.6 Stanovení nejistoty typu A.....	14
2.3.7 Stanovení nejistoty typu B	15
2.3.8 Výpočet standardní nejistoty odhadu hodnoty výstupní veličiny	24
2.3.9 Kombinovaná nejistota	26
2.3.10 Rozšířená nejistota.....	26
2.3.11 Vyjádření výsledku	27
3 Nejistoty přímých měření	28
3.1 Nejistoty měření stanovené metodou A	28
3.2 Nejistoty měření stanovené metodou B	29
3.3 Kombinovaná nejistota.....	30
3.4 Rozšířená nejistota	31
3.5 Vyjádření výsledku	31

4	Nejistoty nepřímých měření	32
4.1	Kovariance mezi odhady x_i a x_k	32
4.1.1	Kovariance mezi odhady x_i a x_k stanovené metodou A.....	33
4.1.2	Kovariance mezi odhady x_i a x_k stanovené metodou B.....	33
4.2	Příklady zdrojů korelací v návaznosti.....	34
4.2.1	Opakované měření jedním měřidlem.....	34
4.2.2	Opakované měření různými měřidly.....	34
4.2.3	Měření kalibrovanou sadou měřidel.....	35
4.2.4	Měření měřicím přístrojem s konstantní nejistotou.....	35
5	Kalibrace závaží	37
5.1	Třídy přesnosti závaží.....	37
5.2	Metrologické aspekty závaží.....	38
5.2.1	Maximální dovolené chyby.....	38
5.2.2	Rozšířená nejistota.....	39
5.2.3	Jmenovitá hmotnost závaží.....	39
5.2.4	Konvenční hmotnost.....	39
5.3	Podmínky kalibrace závaží.....	40
5.4	Kalibrace metodou přímého srovnání a dělením.....	41
5.5	Cykly vážení.....	41
5.6	Průměrná odchylka konvenční hmotnosti.....	42
5.7	Nejistoty měření.....	43
5.7.1	Standardní nejistota vážení stanovená metodou typu A.....	43
5.7.2	Standardní nejistota stanovená metodou typu B.....	44
5.7.3	Kombinovaná standardní nejistota a rozšířená nejistota.....	48
6	Kalibrace vah	49
6.1	Metody měření.....	49
6.1.1	Zkouška opakovatelnosti.....	49
6.1.2	Zkouška na chyby indikace.....	50
6.1.3	Zkoušky excentricity zatížení.....	51
6.1.4	Pomocná měření.....	51
6.2	Nejistoty měření.....	52
6.2.1	Standardní nejistota pro diskrétní hodnoty.....	52
6.2.2	Standardní nejistota indikace.....	52
6.2.3	Standardní nejistota referenčního závaží.....	54
6.2.4	Standardní nejistota chyby.....	58
6.2.5	Rozšířená nejistota při kalibraci.....	59
7	Praktická část	60
7.1	Kalibrace sady závaží s vybavením VUT ústavu elektrotechnologie.....	60
7.1.1	Kalibrace závaží 1g metodou ABBA.....	61
7.1.2	Kalibrace závaží 1g metodou ABA.....	66
7.1.3	Kalibrace závaží 2 g metodou ABBA.....	68
7.1.4	Kalibrace závaží 2 g metodou ABA.....	70
7.1.5	Kalibrace závaží 5 g metodou ABBA.....	71
7.1.6	Kalibrace závaží 5 g metodou ABA.....	72
7.1.7	Kalibrace závaží 10 g metodou ABBA.....	74
7.1.8	Kalibrace závaží 10 g metodou ABA.....	75
7.1.9	Kalibrace závaží 20 g metodou ABBA.....	77
7.1.10	Kalibrace závaží 20 g metodou ABA.....	78

7.1.11	Kalibrace závaží 50 g metodou ABBA.....	80
7.1.12	Kalibrace závaží 50 g metodou ABA	81
7.1.13	Kalibrace závaží 100 g metodou ABBA.....	83
7.1.14	Kalibrace závaží 100 g metodou ABA	84
7.2	Kalibrace sady závaží s vybavením Českého metrologického institutu .	85
7.2.1	Kalibrace závaží 1 g metodou ABA - BAB.....	87
7.2.2	Kalibrace závaží 2 g metodou ABA - BAB.....	88
7.2.3	Kalibrace závaží 5 g metodou ABA - BAB.....	89
7.2.4	Kalibrace závaží 20 g metodou ABA - BAB.....	91
7.2.5	Kalibrace závaží 50 g metodou ABA - BAB.....	92
7.2.6	Kalibrace závaží 100 g metodou ABA - BAB.....	94
7.2.7	Kalibrace závaží 1 g třídy E2 metodou ABA - BAB.....	95
7.2.8	Kalibrace závaží 5 g třídy E2 metodou ABA - BAB.....	97
7.2.9	Kalibrace závaží 100 g třídy E2 metodou ABA - BAB.....	98
7.3	Srovnání kalibrací závaží provedených na půdě VUT a ČMI	99
7.4	Kalibrace vah Ohaus Explorer EX 224 s vybavením VUT ústavu elektrotechnologie	100
7.4.1	Zkouška opakovatelnosti	100
7.4.2	Standardní nejistota indikace	101
7.4.3	Standardní nejistota referenčního závaží	102
7.4.4	Standardní nejistota chyby.....	104
7.4.5	Rozšířená nejistota při kalibraci	105
7.5	Kalibrace vah Sartorius CP225D s vybavením VUT ústavu elektrotechnologie	107
7.6	Srovnání provedených kalibrací vah.....	108
8	Rozvaha finanční náročnosti	110
8.1	Ceny závaží	110
8.2	Ceny vah a komparátoru	112
8.3	Další vybavení laboratoře	113
8.4	Ceny kalibrací	114
	Závěr	115
	seznam zkratk	116
	Literatura	120

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Národní metrologický systém České republiky	3
Obrázek 2.1 Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti.....	17
Obrázek 2.2 Rovnoměrné (pravoúhlé, obdélníkové) rozdělení pravděpodobnosti	18
Obrázek 2.3 Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení pravděpodobnosti	18
Obrázek 2.4 Trojúhelníkové (Bimodální) rozdělení pravděpodobnosti	19
Obrázek 2.5 Lichoběžníkové rozdělení pravděpodobnosti.....	19
Obrázek 2.6 U - rozdělení pravděpodobnosti	20
Obrázek 2.7 Bimodální (Dirackovo) rozdělení pravděpodobnosti	20
Obrázek 2.8 Kvadratické rozdělení pravděpodobnosti.....	21
Obrázek 2.9 Kosinové rozdělení pravděpodobnosti	21
Obrázek 2.10 Poloviční kosinové rozdělení pravděpodobnosti.....	22
Obrázek 5.1 Maximální dovolené chyby v mg	39
Obrázek 6.1 Pozice zatížení pro zkoušky excentricity	51
Obrázek 7.1 Příslušenství k vahám Ohaus Explorer EX224 [16].....	60
Obrázek 8.1 Sada závaží Radwag třídy přesnosti E2	110
Obrázek 8.2 Ceny závaží podle jejich nominální hodnoty a třídy přesnosti	111
Obrázek 8.3 Státní etalon hmotnosti č. 67 a dvě etalonová závaží 1kg z austenitické oceli.....	112
Obrázek 8.4 Váhy značky Ohaus Explorer 224 a Sartorius CP225D na půdě VUT	112
Obrázek 8.5 Mikrováhy Mettler Toledo UMT5 a komparátor Mettler Toledo AT1006	113

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Bezpečnostní faktor pro stanovení nejistoty měření typu A při $n < 10$	15
Tabulka 2.2 Koeficienty normálního rozdělení odpovídající příslušné směrodatné odchylce s	18
Tabulka 2.3 Koeficienty rovnoměrného rozdělení	18
Tabulka 2.4 Koeficienty trojúhelníkového Simpsonova rozdělení	19
Tabulka 2.5 Koeficienty trojúhelníkového (Bimodálního) rozdělení.....	19
Tabulka 2.6 Koeficienty lichoběžníkového rozdělení	20
Tabulka 2.7 Koeficienty U - rozdělení	20
Tabulka 2.8 Koeficienty bimodálního Dirackova rozdělení.....	21
Tabulka 2.9 Koeficienty kvadratického rozdělení	21
Tabulka 2.10 Koeficienty kosinového rozdělení	22
Tabulka 2.11 Koeficienty polovičního rozdělení	22
Tabulka 2.12 Bilanční tabulka	26
Tabulka 5.1 Maximální dovolené chyby jednotlivých tříd závaží.....	38
Tabulka 5.2 Maximální doporučená změna teploty během kalibrace	40
Tabulka 5.3 Meze relativní vlhkosti vzduchu.....	40
Tabulka 5.4. Typický způsob vážení	41
Tabulka 5.5 Minimální počet cyklů vážení	42
Tabulka 5.6 koeficient, k , pro různé efektivní stupně volnosti, $veff$	48
Tabulka 6.1 kvocient $cclass = mpe/mN$ pro standardní závaží $mN \geq 100 g$ podle R 111 [1].....	55
Tabulka 6.2 Změna zdánlivé hmotnosti Δm_{conv}	57
Tabulka 7.1 Výpočet hustoty testovacích závaží.....	61
Tabulka 7.2 Údaje z kalibračního listu referenčního závaží.....	61
Tabulka 7.3 Podmínky prostředí v laboratoři	61
Tabulka 7.4 Hodnoty získané při kalibraci závaží 1g metodou ABBA.....	62
Tabulka 7.5 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1g metodou ABBA	65
Tabulka 7.6 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1g metodou ABA	67
Tabulka 7.7 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 2 g metodou ABBA	68
Tabulka 7.8 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 2 g metodou ABA.....	70
Tabulka 7.9 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g metodou ABBA	71
Tabulka 7.10 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g metodou ABA	72

Tabulka 7.11 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 10 g metodou ABBA	74
Tabulka 7.12 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 10 g metodou ABA	75
Tabulka 7.13 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 20 g metodou ABBA	77
Tabulka 7.14 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 20 g metodou ABA	78
Tabulka 7.15 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 50 g metodou ABBA	80
Tabulka 7.16 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 50 g metodou ABA	81
Tabulka 7.17 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g metodou ABBA	83
Tabulka 7.18 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g metodou ABA	84
Tabulka 7.19 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1 g metodou ABA – BAB na ČMI	87
Tabulka 7.20 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 2g metodou ABA – BAB na ČMI	88
Tabulka 7.21 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g metodou ABA – BAB na ČMI	89
Tabulka 7.22 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 20 g metodou ABA – BAB na ČMI	91
Tabulka 7.23 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 50 g metodou ABA – BAB na ČMI	92
Tabulka 7.24 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g metodou ABA – BAB na ČMI	94
Tabulka 7.25 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1 g třídy E2 metodou ABA – BAB na ČMI	95
Tabulka 7.26 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g třídy E2 metodou ABA – BAB na ČMI	97
Tabulka 7.27 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g třídy E2 metodou ABA–BAB na ČMI	98
Tabulka 7.28 Závěrečné shrnutí dosažených výsledků při kalibraci závaží.....	100
Tabulka 7.29 Použité váhy pro kalibraci	100
Tabulka 7.30 Indikace vah při zkoušce opakovatelnosti	101
Tabulka 7.31 Indikace vah při testu excentricity	102
Tabulka 7.32 Chyby indikace a odchylka od jmenovité hodnoty.....	103
Tabulka 7.33 Maximální dovolené chyby a odpovídající nejistoty dané testovací zátěže	103
Tabulka 7.34 Nejistoty na vztlak vzduchu odpovídající testovacím zátěžím.....	103
Tabulka 7.35 Nejistoty na drift konvenční hodnoty hmotnosti od poslední kalibrace .	104
Tabulka 7.36 Výsledné standardní nejistota referenčních závaží.....	104
Tabulka 7.37 Standardní nejistoty chyb daných testovacích zátěžím.....	105
Tabulka 7.38 Rozšířené nejistoty odpovídající testovacím zátěžím.....	105
Tabulka 7.39 Bilanční tabulka kalibrace vah Ohaus Explorer EX224	105

Tabulka 7.40 Bilanční tabulka kalibrace vah Sartorius CP 225D	107
Tabulka 7.41 Závěrečné shrnutí dosažených výsledků při kalibraci vah	109
Tabulka 8.1 Ceny závaží podle jejich nominální hodnoty a třídy přesnosti.....	110
Tabulka 8.2 Ceny vah Ohaus Explorer pro různé stupně rozlišitelnosti a maximální kapacitu	113

ÚVOD

Od doby, kdy se objevily první zmínky o samotném měření, se datuje i nejistota, zdali naměřená hodnota odpovídá hodnotě skutečné. Ani při současné vysoké úrovni měřidel není možné měřit bez chyb. Můžeme pouze stanovit interval, v němž se s předpokládanou pravděpodobností skutečná hodnota měřeného znaku nachází.

Nejistoty měření jsou způsob, jak objektivně posoudit kvalitu výsledku daného měření a jak chápat variabilitu měřicího systému.

Úkolem této diplomové práce je seznámit se se zákonem o metrologii upravujícím jednotnost, a správnost a návaznost měřidel a měření, a to zejména v oblasti kategorizace měřidel a organizační struktury národního metrologického systému České republiky a její návaznost na mezinárodní organizace. Dále je práce zaměřena na přiblížení problematiky statistického zpracování naměřených hodnot s ohledem na stanovení nejistoty měření, členění nejistot měření, zdroje nejistot stanovené metodou typu A a B, jejich specifik a výpočet.

Jak již sám název napovídá hlavním cílem je osvojit si postupy prováděné při procesu kalibrace, v první řadě kalibrace závaží, klasifikací závaží dle tříd přesnosti, stanovenými postupy a konečně stanovením nejistot při kalibracích závaží jednak vyplývající ze zdrojů nejistot typu A, jednak ze zdrojů nejistot typu B, jejich kombinované a rozšířené nejistoty kalibrace závaží.

Stejně tak jsou rozpracovány i postupy v oblasti kalibrace vah, a to zejména prováděné zkoušky opakovatelnosti, zkoušky na chyby indikace, zkoušky excentricity zatížení a výsledné kombinované a rozšířené nejistoty kalibrace vah.

Stěžejní část diplomové práce je samozřejmě aplikace zmíněných postupů a procesů na praktických aplikacích. Jsou zde tedy představeny postupy a výsledky provedených kalibrací závaží třídy F2 pomocí závaží vyšší třídy přesnosti, a to jednak v prostorách Vysokého učení technického v Brně pomocí závaží třídy přesnosti E2 a jednak v laboratoři hmotnosti Českého metrologického institutu s využitím etalonových závaží třídy přesnosti E1, které jsou přímo navázány na státní etalon hmotnosti číslo 67. V této části jsou rovněž představeny postupy a výsledky uskutečněné kalibrace školních vah značky Ohaus Explorer EX224 a Sartorius CP225D.

Dalším z úkolů diplomové práce bylo provedení rozvahy finanční náročnosti potřebné k zajištění požadované přesnosti zjišťování hmotnosti. Zde byly prezentovány cenové relace jednak jednotlivých tříd závaží s ohledem na jejich jmenovitou hodnotu hmotnosti, včetně závaží použitých, ale i ceny zakoupených vah s ohledem na jejich rozlišitelnost.

Chyby a nejistoty jsou významnou součástí všedního života. Vědět, jak velké jsou a jak významný podíl na výsledku nesou, je důvod, proč se touto oblastí zabývat.

1 METROLOGIE

1.1 Legální metrologie a její orgány

Legální metrologie, někdy nazývaná též zákonná metrologie je částí metrologie, která se zabývá jednotkami, metodami a měřidly s ohledem na předepsané technické a právní náležitosti, čímž zaručuje bezpečnost a vhodnou přesnost měření. Legální metrologie je vykonávána řadou veřejných, ale i soukromých orgánů, které jsou zodpovědné za dodržování právních předpisů v daných oblastech.

Základním kamenem legální metrologie byla Úmluva o soustavě metrické, též zkráceně Metrická konvence. Jedná se o mezinárodní smlouvu na vládní úrovni, k níž v roce 1922 přistoupilo i Československo.

V roce 1955 byla zřízena Mezinárodní organizace pro legální metrologii, neboli Organisation Internationale de Métrologie Légale, zkráceně OIML. Téhož roku k ní přistoupilo i Československo. Jedním z nejdůležitějších úkolů této mezinárodní organizace je sladit předpisy a metrologické kontroly prováděné podle národního metrologického institutu, nebo příslušných organizací, jejich členských států. Pro tvorbu předpisů na národní a regionální úrovni, týkající se technických požadavků na měřidla, poskytuje OIML členským státům různé směrnice a mezinárodní doporučení označovaná OIML R. Takovéto předpisy stanovují metrologické vlastnosti vyžadované u určitých měřicích přístrojů a specifikují metody a zařízení pro kontrolu jejich shody. Tyto publikace jsou pro členské státy závazné. Dva z nich, a to Mezinárodní doporučení OIML R 111-1 pro závaží třídy přesnosti E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 a M3 o nominálních hodnotách hmotností od 1 mg do 5 000 kg [1] a OIML R76 [2], resp. jeho analogická česká norma ČSN EN 45501 metrologické aspekty vah s neautomatickou činností [3], jsou významnou literaturou pro zpracování následující diplomové práce.

Mezinárodní úřad pro legální metrologii (BIML) je stálým výkonným orgánem této organizace a jeho sídlo je v Sévres u Paříže.

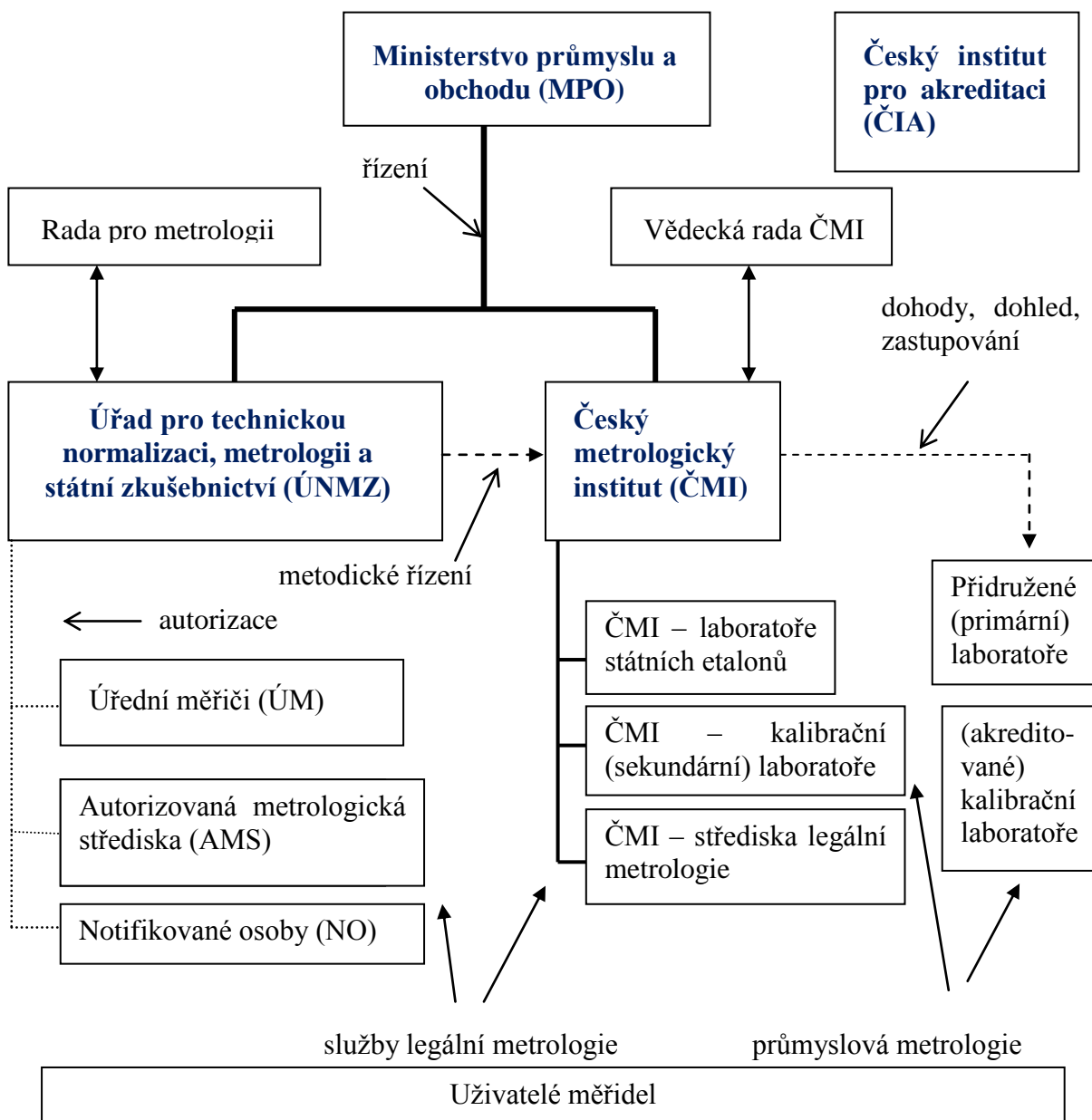
Na evropské úrovni se legální metrologií zabývá Evropská spolupráce v legální metrologii WELMEC, jejímž členem se Česká republika stala v roce 2004.

European Association of National Metrology Institutes, zkráceně též EURAMET, byla založena v roce 2007. Česká republika je jejím členem od počátku a je zastoupena Českým metrologickým institutem, Českým hydrometeorologickým institutem, Institutem chemické technologie Vysoké školy chemicko-technologické v Praze, Institutem fotoniky a elektroniky Akademie věd a Výzkumným ústavem geodetickým, topografickým a kartografickým.

V České republice je pak organizace národního metrologického systému upravena přímo zákonem č. 505/1990 Sb. o metrologii [4]. Struktura Národního metrologického systému České republiky je zachycena na následujícím obrázku.

Ústředním orgánem zajišťujícím výkon státní správy v oblasti technické normalizace, metrologie a státního zkušebnictví je Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, které řídí jak Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, zkráceně ÚNMZ, tak i Český metrologický institut, též ČMI.

Český institut pro akreditaci provádí v souladu s požadavky mezinárodních norem a dokumentů nestranné, objektivní a nezávislé posouzení způsobilosti, neboli akreditaci a dohled, zda jednotlivé orgány národního metrologického systému splňují požadavky normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří.



Obrázek 1.1 Národní metrologický systém České republiky

Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) tak, jak je popsán v zákoně č. 505/1990 Sb. o metrologii [4] má následující náplň činností:

- a) stanoví program státní metrologie a zabezpečuje jeho realizaci;
- b) zastupuje Českou republiku v mezinárodních metrologických orgánech a organizacích, zajišťuje úkoly vyplývající z tohoto členství a koordinuje účast orgánů a organizací na plnění těchto úkolů i úkolů vyplývajících z mezinárodních smluv;
- c) autorizuje subjekty k výkonům v oblasti státní metrologické kontroly měřidel a úředního měření, pověřuje oprávněné subjekty k uchovávání státních etalonů a kontroluje plnění stanovených povinností u všech těchto subjektů; při zjištění nedostatků v plnění stanovených povinností může autorizaci odebrat;
- d) provádí kontrolu činnosti Českého metrologického institutu;
- e) kontroluje dodržování povinností stanovených tímto zákonem; při výkonu

kontroly postupuje podle zvláštního právního předpisu;

f) poskytuje metrologické expertizy, vydává osvědčení o odborné způsobilosti metrologických zaměstnanců a stanoví podmínky za účelem zajištění jednotného postupu subjektů pověřených uchováváním státních etalonů, autorizovaných metrologických středisek a subjektů pověřených výkonem úředního měření;

g) zveřejňuje ve Věstníku Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví zejména subjekty pověřené k uchovávání státních etalonů, autorizovaná metrologická střediska, subjekty autorizované pro úřední měření, státní etalony, seznamy certifikovaných referenčních materiálů a schválené typy měřidel;

h) plní úkoly podle zvláštních předpisů.

Český metrologický institut (ČMI) v souladu s ust. § 14 zákona č. 505/1990 Sb. [4]

a) provádí metrologický výzkum a uchovávání státních etalonů včetně přenosu hodnot měřicích jednotek na měřidla nižších přesností,

b) provádí certifikaci referenčních materiálů,

c) vykonává státní metrologickou kontrolu měřidel,

d) registruje subjekty, které opravují stanovená měřidla, popřípadě provádějí jejich montáž,

e) vykonává státní metrologický dozor u autorizovaných metrologických středisek, u subjektů autorizovaných pro výkon úředního měření, u subjektů, které vyrábějí nebo opravují stanovená měřidla, popřípadě provádějí jejich montáž, u uživatelů měřidel,

f) provádí výzkum a vývoj v oblasti elektronické komunikace a podílí se na mezinárodní spolupráci v této oblasti,

g) provádí metrologickou kontrolu hotově baleného zboží a lahví,

h) posuzuje shodu a provádí zkoušení výrobků v rozsahu udělených autorizací či akreditace podle právního předpisu upravujícího oblast technických požadavků na výrobky,

i) posuzuje technickou způsobilost měřicích zařízení a technických zařízení pro využití v elektronických komunikacích,

j) vydává opatření obecné povahy podle § 24c a 24d,

k) poskytuje odborné služby v oblasti metrologie.

Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB) provádí ve smyslu ust. § 14a zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii [4] u uživatelů měřidel, kteří jsou držiteli povolení podle zvláštního právního předpisu, v rámci státního dozoru nad radiační ochranou a havarijní připraveností prověřování plnění povinností stanovených tímto zákonem u měřidel určených nebo používaných pro měření ionizujícího záření a radioaktivních látek.

Autorizovanými metrologickými středisky (AMS) jsou ve smyslu ust. § 16 zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii [4] subjekty, které ÚNMZ na základě jejich žádosti autorizoval k ověřování stanovených měřidel nebo certifikaci referenčních materiálů po prověření úrovně jejich metrologického a technického vybavení ČMI a po prověření kvalifikace odpovědných zaměstnanců, která je doložena certifikátem způsobilosti vydaným akreditovanou osobou nebo osvědčením o odborné způsobilosti vydaným ÚNMZ. Pro účely autorizace může být využito zjištění prokázaných při akreditaci.

Středisko kalibrační služby (SKS) je subjekt, pověřený ÚNMZ na základě žádosti k výkonu kalibrace měřidel pro jiné subjekty a k přidělení kalibrační značky. Žadatel musí prokázat způsobilost pro provádění kalibrace měřidel osvědčením vydaným podle ust. § 14 a násl. zákona č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky [5].

Subjekty uvedené v § 18 zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii [4] vedou evidenci

používaných stanovených měřidel podléhajících novému ověření s datem posledního ověření a předkládají tato měřidla k ověření a zajišťují jednotnost a správnost měřidel a měření.

ÚNMZ může ve smyslu ust. § 21 zákona č. 505/1990 Sb. o metrologii [4] autorizovat subjekt k výkonu **úředního měření** ve stanoveném oboru měření. Podmínkami výkonu je používání měřidel, u nichž je zajištěna metrologická návaznost, certifikát odborné způsobilosti úředního měřiče vydaný akreditovanou osobou nebo osvědčení o odborné způsobilosti vydané ÚNMZ a dohled prováděný ČMI. Úředním měřením se rozumí metrologický výkon, o jehož výsledku vydává autorizovaný subjekt doklad, který má charakter veřejné listiny.

1.2 Kategorizace měřidel

Zákon č. 505/1990 Sb. o metrologii [4] ve svém ust. § 3 stanoví, že měřidla slouží k určení hodnoty měřené veličiny a člení se na:

- a) etalony;
- b) pracovní měřidla stanovená (dále jen "stanovená měřidla");
- c) pracovní měřidla nestanovená (dále jen "pracovní měřidla");
- d) certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály, pokud jsou určeny k funkci etalonu nebo stanoveného nebo pracovního měřidla.

1.2.1 Etalon

Etalon měřicí jednotky anebo stupnice určité veličiny je měřidlo sloužící k realizaci a uchování této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti.

Podle Mezinárodního metrologického slovníku VIM [6] je etalon realizací definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používanou jako reference. Realizace může být poskytována měřicím systémem, ztělesněnou mírou nebo referenčním materiálem. Etalon je obvykle využíván jako reference ke stanovení naměřených hodnot veličin a přidružených nejistot měření pro jiné veličiny stejného druhu, tím stanovuje metrologickou návaznost kalibracemi jiných etalonů, měřidel nebo měřicích systémů. Etalon by proto neměl být používán k rutinnímu měření.

Etalony rozdělujeme na primární a sekundární.

Primárním etalonem jsou mezinárodní etalony, které jsou uznané signatáři mezinárodní dohody a jsou určeny k celosvětovému využití. Mezinárodní etalony jsou uchovávány Mezinárodním úřadem pro legální metrologii (BIML) v Sévres u Paříže.

Od mezinárodních etalonů jsou pak odvozeny státní etalony členských států metrické konvence, tyto státní etalony jsou uznané národním orgánem pro využití v dané zemi [6] a v České republice je většina z nich uložena v Českém metrologickém institutu v Brně. Tyto hlavní etalony podléhají povinné kalibraci.

Na státní etalony navazují etalony sekundární, též odvozené, které dále dělíme na svědecké, které slouží k občasné kontrole hlavního etalonu, navazovací, téměř totožný s hlavním etalonem, a konečně etalon pracovní.

Navazování etalonů v České republice provádí Český metrologický institut případně Středisko kalibrační služby jejich kalibrací.

Etalony hmotnosti

Mezinárodní etalon hmotnosti 1 kg je uložen pod trojitým skleněným zvonem

v BIMP – Bureau International des Poids et Mesures - Mezinárodním úřadu pro váhy a míry v Sévres u Paříže. Jedná se o rovnostranný válec s výškou a průměrem 39 mm, který je vyroben ze slitiny obsahující 90 % platiny a 10 % iridia. Relativní nejistota prototypu kilogramu se pohybuje v rozmezí 10^{-8} až 10^{-10} .

Shodným způsobem jako mezinárodní etalon jsou pak zhotoveny i jeho kopie, národní etalony hmotnosti pro jednotlivé státy.

Odvozené etalony, tedy svědecké, navazovací a pracovní, jsou pak vyrobeny z nerezavějící oceli, mosazi nebo niklového bronzu. Konečně malá závaží bývají zhotovena z platiny nebo hliníku a velká závaží z litiny.

Etalony a závaží se vyrábí technikou vakuového lití a bývají pozlaceny nebo pochromovány z důvodu prevence před korozi.

Prvním ještě československým etalonem 1 kg byl prototyp č. 41, později doplněný o etalon č. 65. Oba jsou dnes uloženy v Bratislavě. Po osamostatnění však zůstala Česká republika bez etalonu, neboť podle územního principu byly oba etalony č. 41 i 65 uloženy ve Slovenském metrologickém ústavu. V roce 1999 získala Česká republika po mnoha náročných vyjednáváních konečně vlastní platino-iridiový prototyp etalonu č. 67, který byl vyroben již novou technologií a nahradil dosavadní závaží z austenitické oceli. Etalon je uložen pod dvojitým zvonem v Českém metrologickém institutu v Brně.

Parametry prototypu etalonu č. 67 jsou:

Hmotnost 1 kg + 0,164 mg.

Standardní nejistota $U_C = 0,004$ mg , pro $k = 1$.

Objem při 0 °C: 46,4352 cm³ se standardní nejistotou 0,0003 cm³.

Hustota při 0 °C: 21535,4 kg.m⁻³.

1.2.2 Stanovená měřidla

Stanovená měřidla jsou dle ust. § 3 odst. 3 zákona č. 505/1990 Sb. [4] měřidla, která Ministerstvo průmyslu a obchodu stanoví vyhláškou k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam

- a) v závazkových vztazích, například při prodeji, nájmu nebo darování věci, při poskytování služeb nebo při určení výše náhrady škody, popřípadě jiné majetkové újmy,
- b) pro stanovení sankcí, poplatků, tarifů a daní,
- c) pro ochranu zdraví,
- d) pro ochranu životního prostředí,
- e) pro bezpečnost při práci, nebo
- f) při ochraně jiných veřejných zájmů chráněných zvláštními právními předpisy.

Stanovená měřidla tedy nejsou určena ke každodennímu používání, jako tomu je u měřidel pracovních.

Navazování stanovených měřidel provádí jednak Český metrologický institut a jednak autorizovaná metrologická střediska ověřováním.

1.2.3 Pracovní měřidla

Pracovní měřidla jsou měřidla, která nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem [4]. Sám uživatel s ohledem na vlastní požadavky na přesnost a jakost měření pro ně stanoví lhůty, v nichž musí být měřidla kalibrována.

Navazování pracovních měřitel provádí Český metrologický institut případně Středisko kalibrační služby kalibrací.

1.2.4 Certifikované referenční materiály

Podle Mezinárodního metrologického slovníku VIM [6] je referenční materiál dostatečně homogenní a stabilní, s referencí ke specifikovaným vlastnostem, které byly stanoveny tak, že se hodí pro jejich zamýšlené použití při měření nebo zkoumání jmenovitých vlastností.

Certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály jsou materiály nebo látky přesně stanoveného složení nebo vlastností, používané zejména pro ověřování nebo kalibraci přístrojů, vyhodnocování měřících metod a kvantitativní určování vlastností materiálů [4].

Navazování certifikovaných referenčních materiálů a ostatních referenčních materiálů provádí Český metrologický institut a Autorizovaná metrologická střediska certifikací.

1.3 Ověřování a kalibrace

Dle ust. § 9 odst. 1 zákona č. 505/1990 Sb. [4] se ověřením stanoveného měřidla potvrzuje, že má požadované metrologické vlastnosti. Tento požadavek se považuje za splněný, pokud je měřidlo v souladu s požadavkem stanoveným opatřením obecné povahy. Přesný postup při ověřování stanovených měřidel stanoví ministerstvo vyhláškou.

Kalibrací se podle Mezinárodního metrologického slovníku - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM) [6] myslí činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony (standardy) a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření. Není-li etalon k dispozici, lze použít certifikovaný nebo ostatní referenční materiál za předpokladu dodržení zásad návaznosti měřidel.

2 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Podle metrologické terminologie je nejistota měření označována jako parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně prisuzovány k měřené veličině s určitou pravděpodobností.

Nejistoty výsledků měření jsou považovány za kvantitativní indikátor jejich kvality. Uplatňují se při prokazování věrohodnosti výsledků zkoušek nových výrobků a umožňují srovnání výsledků jednak s jinými laboratořemi, v rámci jedné laboratoře i porovnání s referenčními hodnotami, umožňují rovněž jejich uznání i na zahraničních trzích.

Vzhledem k velkému počtu součástek užitých v zapojení elektronických zařízení je nezbytné, aby měřicí přístroje byly pravidelně kalibrovány. Pro vyhodnocení nejistot měření kalibrovaným měřidlem je pak nezbytné, aby součástí každého protokolu o kalibraci byl údaj o nejistotě výsledku kalibrace. Ovšem důvěryhodných a kvalitních výsledků měření dosáhneme pouze, budeme-li brát na zřetel veškeré možné příspěvky k nejistotě měření.

2.1 Měřicí systém

Měřicí systém neboli systém zdrojů variability a vzájemných vazeb, ve kterých naměřená hodnota vzniká, tvoří především:

2.1.1 Operátor

Operátor je člověk provádějící měření, který jej často i vyhodnocuje. Zároveň je možné říci, že právě člověk je nejslabším z článků celého řetězce systému měření.

Člověk může figurovat ve funkci zadavatele, který definuje cíl a objekt měření, ovlivňuje výběr měřidla, měřicí metody, a tím i výsledky měření. Zpravidla vybírá vlastnosti, parametry nastavení, kvalitu hardware a možnosti software u počítačových systémů měření a zpracování. Po zadavateli se tedy vyžaduje, aby přesně popsal cíle měření, řádně zvážil volbu parametrů, dodavatele, způsob aplikace počítačových systémů, konzultoval případné nedostatky a problémy s řešiteli.

Člověk ve funkci řešitele pak přímo provádí zadané měření. Zásadní vliv má na kvalitu nastavení měřidel, samotné měření a zpracování signálu a vyhodnocení počítačovými systémy. Je proto nezbytné, aby řešitelé byli řádně vzděláváni a proškoleni v problematice měření, správně ovládali měřidlo a navazující počítačové systémy, vytvořili vhodné podmínky pro měření a rovněž naslouchali požadavkům objednatele.

2.1.2 Měřidlo

V případě měřidla jsou nejlépe popsány možné příspěvky k variabilitě měřicího systému. Jednotlivé vlivy měřidla jsou definovány zejména

- Přesností – součtem všech náhodných a systematických vlivů působících na měřidlo, tím i na velikost měřené hodnoty
- Správností – vyčíslený odhad velikosti systematické chyby, její velikost se stanoví kalibrací a vhodným nastavením, z výsledku se potom odstraní

- Citlivostí – v závislosti na konstrukci měřidla, použitých materiálech, kvalitě provedení
- Rozlišitelností měřidla – limit, kdy lze ještě odečíst naměřenou hodnotu, závisí rovněž, zda používáme analogové nebo digitální měřidlo
- Stabilitou měřidla – důležité pro dlouhodobá měření, v případě měřidel vykazujících krátkodobou nestabilitu
- Linearitou měřidla – u něhož je mezi hodnotou rozsahu měřidla a odchylkou měřidla přímková závislost.

2.1.3 Postup měření

Největší vliv na variabilitu měřicího systému má zejména nastavení měřidla a samotná tvorba měřicího řetězce, řádné a pravidelné kalibrování a údržba měřidla. Měřidlo musí nastaveno v souladu s cílem měření, musí být vhodně sestaven a správně napájen měřicí řetězec, kontaktní body musí být řádně udržovány, podmínky měření musí odpovídat zvolenému měření, postup musí být smysluplně sestaven, jasně a úplně definován. Jak vidno, opět jsou všechny citované zásady plně závislé na lidském faktoru.

2.1.4 Měřená veličina

Jde o měřený objekt se všemi vlastnostmi, zejména časovou stálostí, tvarovými materiálovými a chemickými vlastnostmi, ovlivnitelností měřené veličiny snímačem atd.. I měřený objekt může ovlivnit změřenou hodnotu svým zpětným působením, jako jsou extrémní tepelné a elektrické působení. Z tohoto důvodu je nutné před započítím měření zjistit veškeré vlastnosti a stav objektu.

2.1.5 Prostředí

Jedná se o klimatický prostor, v němž se provádí měření se stěžejními veličinami jako je teplota, barometrický tlak a vlhkost, vliv však mají i faktory jako hluk, vibrace, stres a další neklimatické vlivy. Tyto podmínky mají zcela jasný a teoreticky popsáný vliv na měřenou veličinu, proto je nutné užívat měřicí soustavy v souladu s návodem k použití, dodržovat přípustné rozsahy teplot, bránit vlivu případných extrémních podmínek, kontrolovat citlivost měřidla.

2.2 Chyby měření

Je zcela zřejmé, že měření jsou ovlivňována mnoha zdroji chyb, ať už chyb měření, měřicí metody, nepřesností měřicího přístroje. Všechny tyto zdroje mohou naměřenou hodnotu buď zmenšit, nebo naopak zvětšit, čímž způsobují odchylku od skutečné hodnoty sledované veličiny.

Záměrem je samozřejmě minimalizace vzniklého „tolerančního pole“, v němž se odchylka od skutečné hodnoty vyskytuje. Problém, jenž toto zúžení způsobuje, je pak ale realizace příslušného etalonu. Nezbytné je proto zjistit všechny faktory, které mají na vznik chyby vliv, od nich také odvozujeme i samotné druhy chyb.

2.2.1 Náhodné chyby

Jak již sám název napovídá, vznikají nahodile z neznámých příčin a nelze je tedy vyloučit. Mají různé velikosti i různá znaménka. Je možné je identifikovat jen opakováním měření ve stabilním prostředí za neměnného nastavení měřicích přístrojů.

Pomocí statistických metod odpovídajících příslušnému rozdělení pravděpodobnosti je možné určit velikost této chyby. Nejčastěji se používá Gaussovo, tedy normální rozdělení a výsledek měření je pak představován aritmetickým průměrem hodnot x_1, x_2, \dots, x_n , získaných při n opakováních, což vyjádříme

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad 2.1$$

Chování samotné náhodné chyby charakterizuje směrodatná odchylka výběrového souboru s , případně směrodatná odchylka aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad 2.2$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}}. \quad 2.3$$

Náhodná složka chyby je pak vyjádřena jako $\varepsilon = s$, popř. $\varepsilon = 2s$, což souvisí s koeficientem rozšíření směrodatné odchylky, tedy s typem rozdělení pravděpodobnosti. Normálnímu rozdělení odpovídá koeficient $k_r = 2$, tedy interval obsahující měřenou hodnotu s pravděpodobností 95 %.

2.2.2 Systematické chyby

Systematické, neboli stálé chyby se týkají zařízení použitých při měření, event. vnějších vlivů zatěžujících zařízení jako jsou opotřebení, nedostatky měřicích přístrojů vzniklé výrobou či montáží, jejich nevhodná instalace. Jejich příčina je tedy známa. Systematické chyby jsou při stálých podmínkách stále stejné co do velikosti a znaménka.

Zpravidla jejich velikost lze popsat jednoduše jako absolutní chybu e , tedy jako rozdíl mezi naměřenou \bar{x} a skutečností x_s hodnotou:

$$e = \bar{x} - x_s. \quad 2.4$$

Vzhledem ke skutečnosti, že příčiny systematických chyb jsou nám známy, existují jednoznačné možnosti k jejich odstranění a lze velmi často potlačit tak, že kompenzujeme jejich vliv, případně jej zmenšíme korekcí. I přesto zůstává část, označovaná jako nevyhnutelná systematická chyba, jejíž velikost je závislá na zkušenostech operátora a kterou snadněji vyjádříme pomocí koncepce nejistot měření.

2.2.3 Hrubé chyby

Hrubé chyby jsou natolik významné, že mohou znehodnotit celé provedené měření. Jsou to jednak chyby systémové, které lze vyloučit správným navržením, pravidelným kalibrováním apod., dále jsou to chyby způsobené lidmi, a proto jsou naprosto nevyzpytatelné.

Hrubé chyby je možné odhalit podle jejich nápadné velikosti, mohou je doprovázet další nepříznivé stavy, jako přehříváním, samovolné vypínání, apod.. V případě jejich výskytu je vhodné bezodkladně přerušit proces měření, zjistit příčiny hrubé chyby, tyto odstranit, provést analýzu provedeného měření a hrubé chyby vyloučit.

Mezi příčiny vzniku hrubých chyb náleží:

- chyby výkladu výsledků
- nesprávné úpravy
- špatný přístroj použitý pro dané měření, případně jeho chybné nastavení
- chyby záznamu údajů
- výpočetní chyby
- nezpůsobilý operátor
- nevhodné podmínky měření....

Takovýmto hrubým chybám je nutné předcházet přísným dodržováním měřicích postupů, podmínek měření, odpovídajícím školením zaměstnanců či pozorností obsluhy zařízení.

2.2.4 Výsledná chyba

Součtem systematických a náhodných chyb získáme výslednou chybu, což vyjádříme vztahem

$$\Delta_x = e + \varepsilon = (\bar{x} - x_s) + 2s. \quad 2.5$$

2.3 Nejistoty měření

Dosud nejsme schopni určit pravou hodnotu měřené veličiny ani za použití současných technických prostředků, vzhledem k tomu musí být stanoven interval, ve kterém se pravá hodnota nachází s definovanou pravděpodobností.

Nejistotou měření je podle GUM [7] myšlen "Parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje míru rozptýlení hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány měřené veličině." Pokud bychom výklad rozebrali, tak

- přidružený k výsledku měření – interval má význam pouze tehdy, je-li stanoven v okolí výsledku měření
- rozptyl hodnot – naznačuje, že se jedná o statistickou veličinu
- důvodné přisouzení – nás nabádá, abychom stanovili veškeré možné zdroje nejistot, jejich vliv na celkovou nejistotu

Podle poznámky 1 může být parametrem např. směrodatná odchylka označovaná též jako standardní nejistota měření, nebo polovina šířky intervalu, který má stanovenou pravděpodobnost pokrytí.

Stejně jako tomu bylo u chyb měření, tak i nejistoty ovlivňuje mnoho faktorů, zejména nejistoty kalibrace referenčních etalonů a měřicích zařízení, jejich dlouhodobý drift, rozlišení, citlivost ke změnám, nastavení parametrů měření, postup měření či podmínky prostředí.

Dle poznámky 2 existují dva typy hodnocení nejistoty měření:

- metodou hodnocení nejistoty typu A je statistické zpracování naměřených údajů, jako je např. určení standardní odchylky série měření,
- metodou hodnocení nejistoty typu B je jiné než statistické zpracování naměřených hodnot, získají se z pravděpodobnostních funkcí vycházejících ze zkušeností nebo jiných informací.

Výslednou neboli kombinovanou nejistotu získáme součtem čtverců nejistot typu A a typu B.

Výsledek měření lze považovat za úplně vyjádřený, pokud se skládá jednak z vlastní hodnoty měřené veličiny, ale také z nejistoty patřící k této hodnotě. Nejistota výsledku měření reflektuje neúplnou znalost hodnoty měřené veličiny a odráží neomezené množství jevů, které ovlivňují výsledek měření tak, že jej nelze vyjádřit pouze jediným číslem.

2.3.1 Zdroje nejistot měření

Mezi možné zdroje nejistot náleží [8]:

- a) nekompletní definice měřené veličiny
- b) nedokonalá realizace definice měřené veličiny
- c) nereprezentativní vzorkování – naměřené hodnoty nemusí reprezentovat definovanou měřenou veličinu
- d) nedostatečná znalost vlivů okolního prostředí nebo jejich nedokonalé měření
- e) vliv lidského faktoru při odečítání analogových měřidel
- f) omezené rozlišení měřicího přístroje nebo práh rozlišení
- g) nepřesné hodnoty měřicích etalonů a referenčních materiálů
- h) nepřesné hodnoty konstant a dalších parametrů získaných z externích zdrojů a použitých při výpočtu
- i) aproximace a zjednodušení obsažené v měřicí metodě a postupu
- j) změny v opakovaných pozorováních měřené veličiny, která jsou prováděna za zjevně shodných podmínek.

Dále je nutné podotknout, že shora uvedené zdroje se mohou navzájem ovlivňovat.

2.3.2 Měřená veličina

Jako měřená veličina je označována předmětná výstupní veličina měření Y závislá na daném počtu veličin vstupních X_i ($i=1,2,3 \dots, N$). Zpravidla se jedná o jedinou výstupní veličinu definovanou funkční závislostí

$$Y = f(X_1, X_2, X_3 \dots X_N). \quad 2.6$$

Funkce f představuje postup měření a metodu stanovení a vystihuje postup stanovení výstupní hodnoty Y ze vstupních hodnot X_i . Funkce f může být:

- analytickou funkcí
- skupinou funkcí obsahující rovněž korekce, korekční faktory systematických vlivů
- určena experimentálně
- existovat pouze v podobě numericky vyhodnocovaného počítačového algoritmu
- kombinací všech výše uvedených případů.

2.3.3 Metoda měření

Metody měření, neboli jak říká slovník generický popis logického organizování činností použitých při měření, mohou být rozděleny různými způsoby:

- **přímá metoda měření** – kdy hodnota měřené veličiny je získána přímo, tedy aniž bychom museli měřit nějakou další veličinu, na níž je měřená veličina funkčně závislá. Jako příklad je možno uvést měření délky metrem, stanovení hmotnosti na mechanické váze
- **nepřímá metoda měření** – naproti tomu vyžaduje nejprve změření jiných veličin a následný výpočet měřené veličiny pomocí jejich funkční závislosti, příkladem může být nepřímé měření proudu pomocí měření úbytku napětí při nominálním odporu 1Ω .

2.3.4 Odhad hodnoty měřené veličiny

Odhad hodnoty měřené veličiny Y neboli odhad hodnoty výstupní veličiny je označován y a je funkcí několika vstupních parametrů, tj. odhadů x_i hodnot vstupních veličin X_i ($i=1,2,3 \dots, N$), což můžeme zapsat

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad 2.7$$

Předpokládá se, že výsledek měření je nejlepším odhadem hodnoty měřené veličiny a že všechny složky nejistoty – včetně těch, které vznikají systematickými vlivy, jako jsou složky spojené s korekcemi a referenčními standardy – přispívají k rozptýlení.

Rozptyl, respektive směrodatná odchylka, která je jeho kladnou druhou odmocninou, vyjadřuje míru rozptýlení hodnot náhodné veličiny. A tím už se dostáváme k samotné definici nejistoty měření.

Za **standardní nejistotu měření $u(y)$** odhadu hodnoty výsledné veličiny y označujeme směrodatnou odchylku měřené veličiny Y . Standardní nejistota měření se vypočte z odhadů x_i hodnot vstupních veličin X_i a jim příslušejících nejistot $u(x_i)$. Obecně tedy můžeme psát [9]

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 \cdot u_{x_i}^2}, \quad 2.8$$

kde A_i je koeficient citlivosti daného zdroje nejistoty, který je buď znám, nebo je nutné jej vypočítat [9]

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_i}. \quad 2.9$$

Shora uvedený postup je rovněž nazýván jako **zákon šíření nejistot**, který předpokládá, že nejistoty odhadů $u(x_i)$ hodnot vstupních veličin jsou nekorelované, tedy vzájemně nezávislé.

2.3.5 Stanovení nejistot měření pro odhady hodnot vstupních veličin

Jak výše uvedeno lze nejistotu měření stanovit metodou typu A, která je založena na stanovení nejistoty statistickou analýzou série pozorování a popisuje se jako výběrová směrodatná odchylka průměru vycházející z výpočtu, nebo regresní analýzy.

Postup pro stanovení standardní nejistoty metodou typu B nevychází ze statistického vyhodnocení série pozorování, ale z nějaké jiné odborné znalosti.

2.3.6 Stanovení nejistoty typu A

Tento typ metody je možné použít jedině v případě, že bylo uskutečněno několik nezávislých pozorování vstupních veličin za stejných podmínek. Aby bylo rozptýlení měřených hodnot pozorovatelné, je navíc nezbytné provádět měření s dostatečným rozlišením. Pokud bychom použili nevhodné hrubé rozlišení, naměřili bychom opakovaně shodné hodnoty, standardní nejistota by byla nulová a my bychom mohli dospět k závěru, že měření bylo provedeno s vynikajícími výsledky.

Odhad x_i hodnoty měřené vstupní veličiny X_i , provedený na základě n statisticky nezávislých pozorování pro $n > 1$, je dán aritmetickým průměrem jednotlivých pozorovaných hodnot x_i ($i=1, 2, \dots, n$)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad 2.10$$

S odhadem x_i hodnoty měřené vstupní veličiny je spojena nejistota měření, kterou lze stanovit jedním z níže uvedených postupů, a to:

a) U prvního z nich nejprve musíme stanovit výběrový rozptyl $s^2(x)$ hodnot x_i , který charakterizuje odhad rozptylu pravděpodobnostního rozdělení hodnot pomocí vzorce [8]

$$s^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \bar{x})^2. \quad 2.11$$

- Výběrovou směrodatnou odchylkou označujeme kladnou odmocninu takto vypočteného výběrového rozptylu.
- Nejlepším odhadem rozptylu aritmetického průměru x je pak výběrový rozptyl aritmetického průměru, který můžeme vypočíst dle

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s^2(x)}{n}. \quad 2.12$$

- a konečně standardní nejistotu $u(x)$ stanovíme jako odmocninu tohoto výběrového rozptylu aritmetického průměru, kterou nazýváme výběrová směrodatná odchylka průměru,

$$u(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2}. \quad 2.13$$

Je zde nutné podotknout, že pro počet pozorování menší než 10 je takto stanovená hodnota nejistoty měření málo spolehlivá.

b) Druhou možností jak stanovit nejistotu měření spojenou s odhadem x_i hodnoty vstupní veličiny u měření, jež jsou dobře popsána a statisticky dobře vyhodnocována, je použití známého odhadu rozptylu s_p^2 z velkého počtu měření, tzv. průřezového rozptylu, namísto odhadu standardní odchylky z omezeného počtu pozorování. Je-li pak hodnota vstupní veličiny X_i stanovena jako aritmetický průměr x malého počtu n nezávislých pozorování, můžeme odhad rozptylu aritmetického průměru vypočítat následovně

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s_p^2}{n} \quad 2.14$$

a standardní nejistotu z ní pak analogicky dle vzorce (2.13).

c) Rovněž v případě, kdy máme počet opakování menší $n < 10$, není odhad rozptylu dostatečně spolehlivý. Je-li zřejmé, že data pochází z normálního rozdělení, je možné psát

$$u(\bar{x}) = k_{U_A} \frac{s(x)}{\sqrt{n}}, \quad 2.15$$

kde k_{U_A} - bezpečnostní faktor, který je zárukou, že málo četné výběry měřených hodnot reprezentují normální rozdělení. Jeho velikost pro daný počet opakování odečteme z tabulky

Tabulka 2.1 Bezpečnostní faktor pro stanovení nejistoty měření typu A při $n < 10$.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	>10
k_{U_A}	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

Především se ale nedoporučuje provádět méně než pět měření, například dokument EA 4/02 počet nižší než 10 nepřipouští vůbec.

2.3.7 Stanovení nejistoty typu B

Stejně jako jsme mohli u nejistot typu A pozorovat podobnost s náhodnými chybami, bude i u nejistot typu B možné spatřit jistou analogii se systematickými chybami. Výhodou stanovení nejistot typu B je však i možnost odhadnout částečně i vliv náhodných chyb.

Standardní nejistota $u(x_i)$ vztahující se k odhadu x_i vstupní veličiny X_i se stanoví odborným úsudkem na základě veškerých dosažitelných informací o možné variabilitě veličiny X_i .

Nejistoty spadající do kategorie nejistot typu B mohou vyvozeny ze:

- zkušeností s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a zařízení
- údajů z dříve provedených měření
- údajů výrobce
- nejistot referenčních údajů převzatých z příruček
- údajů uváděných v kalibračních listech nebo jiných certifikátech.

Vhodné použití veškerých relevantních informací závisí zejména na zkušenostech a praxi pozorovatele. Správným použitím postupu pro stanovení standardní nejistoty typu B tedy dosáhneme podobně spolehlivé hodnoty nejistot jako tomu je u nejistot typu A.

Zdroje nejistot typu B můžeme rozdělit na:

- variabilní systematické vlivy – mají stálou a nestálou složku, jejichž velikosti jsou známé, stálou složku lze odstranit, kompenzovat, jako příklad je možné jmenovat vliv teploty na měřenou délku v řízených podmínkách, vlivy povětrnostních podmínek, kalibrace, měřicích kabelů, uložení snímače
- náhodné zdroje se známou variabilitou – lze je popsat na základě pravděpodobnostního intervalu a statistického rozdělení, např. můžeme na základě zkušeností určit možnou nejistotu v případě, že máme jediné měření, ale lze předpokládat, že v případě opakovaných měření se bude hodnota pohybovat zanedbatelně
- ostatní známé zdroje – představují známou a stabilní vlastnost měřicího systému, vliv konstant při výpočtu nepřímo měřitelné veličiny, může se jednat o vliv rozlišitelnosti měřidla.

Otázkou je, jaký počet zdrojů nejistot je dostatečný, resp. optimální. Obecně můžeme konstatovat, že zdroj nejistoty je nutné považovat za významný, je-li jeho standardní nejistota typu B větší než šestina největšího zdroje z celé skupiny zdrojů. Zdroj je tedy možné zanedbat v případě, kdy [9]

$$u(\bar{x}) = \frac{u_{max}(\bar{x})}{6}. \quad 2.16$$

V případě, že je nám známa pouze jediná hodnota vstupní veličiny X_i , použijeme ji zároveň jako odhad x_i . Standardní nejistotu $u(x_i)$ převezmeme z téhož zdroje, což není vždy možné a proto musí být buď vypočtena z důvěryhodných údajů, nebo odhadnuta na základě zkušeností.

Je-li pro vstupní veličinu X_i známo určité rozdělení pravděpodobnosti a koeficient k_r popisuje příslušné rozdělení, jedná se ze statistického pohledu o moment 2. řádu, čili rozptyl, tohoto statistického rozdělení.

Máme-li rovnici pro rozptyl

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - E(x)]^2 \cdot f(x) dx. \quad 2.17$$

Střední hodnota statistického rozdělení je určena vztahem

$$E(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx. \quad 2.18$$

Můžeme standardní nejistotu $u(x_i)$ stanovit z maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{imax} jako směrodatnou odchylku, čili odmocninu rozptylu pomocí vztahu

$$u_{xi} = s(x) = \sqrt{D(x)} = \frac{z_{imax}}{k_r}. \quad 2.19$$

Koeficienty k_r jsou odvozeny od jednotlivých statistických rozdělení standardní nejistoty typu B, koeficient k_r je pojátkem mezi zdroji nejistot naprosto rozličných původů, vlastností a rozdělení, který je všechny sjednotí na bázi normálního rozdělení.

Opět je na příslušném řešiteli, aby stanovil, o jaký zdroj nejistoty a jaký typ rozdělení se jedná, závisí tak na jeho znalostech, zkušenostech a přesnosti, jak kvalitní bude odhad nejistoty měření.

V případě, že lze odhadnout pouze horní a dolní limit a_+ a a_- hodnot vstupní veličiny X_i , je nutné použít rovnoměrné rozdělení a pro odhad vstupní veličiny pak vztah

$$x_i = \frac{1}{2} \cdot (a_+ + a_-). \quad 2.20$$

Pro standardní nejistotu $u(x_i)$ platí

$$u_{xi}^2 = \frac{1}{12} \cdot (a_+ + a_-)^2 \quad 2.21$$

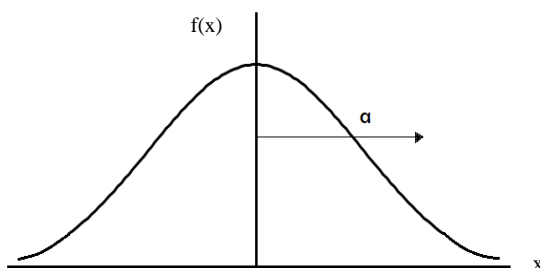
a označíme-li rozdíl mezi hodnotami a_+ a a_- jako $2a$, můžeme psát

$$u_{xi}^2 = \frac{1}{3} \cdot a^2. \quad 2.22$$

Typy statistických rozdělení

V této podkapitole se blíže seznámíme s jednotlivými typy statistických rozdělení nejistot typu B, pro něž jsou typické různé koeficienty rozdělení k_r . Maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max} jsou zde vyjádřeny výrazem a . [9]

Normální (Gaussovo) rozdělení



Obrázek 2.1 Normální (Gaussovo) rozdělení pravděpodobnosti

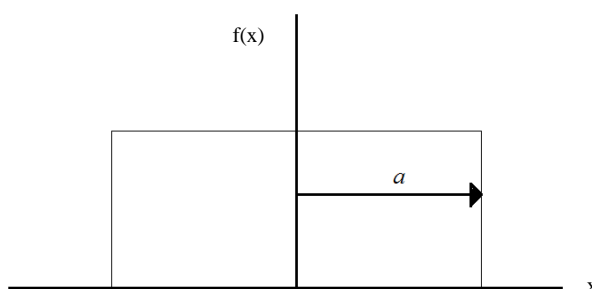
Normální rozdělení lze považovat za primární rozdělení, k němuž jsou vztažena všechna další rozdělení. Toto rozdělení není ohraničené a používá se v případě, kdy víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu je mnohem vyšší než v krajních mezích intervalu.

Tabulka 2.2 Koeficienty normálního rozdělení odpovídající příslušné směrodatné odchylce s

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
$a = 2 s$	2 (P = 95 %)
$a = 3 s$	3
$a = h.s$	h

Příkladem normálního rozdělení pravděpodobnosti jsou třeba vlivy měřicího přístroje, povětrnostní podmínky, subjektivní vlastnosti operátora.

Rovnoměrné rozdělení



Obrázek 2.2 Rovnoměrné (pravoúhlé, obdélníkové) rozdělení pravděpodobnosti

Vyjadřuje, že pravděpodobnost malých i velkých odchylek od zdroje nejistot je stejně velká. Rozdělení je však ohraničeno v rozsahu $\pm a$. Jedná se o limitní případ lichoběžníkového rozdělení, pro něj platí $a/b = 1$.

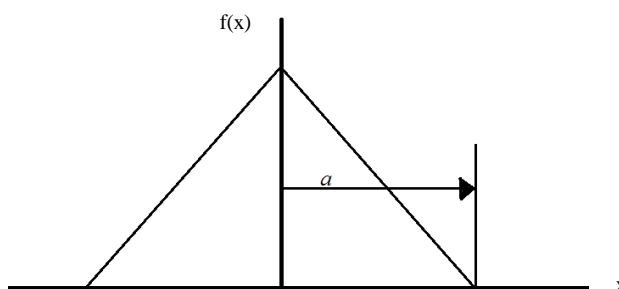
Tabulka 2.3 Koeficienty rovnoměrného rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{3} \cong 1,73$ (P = 100 %)

Pokud bychom chtěli uvést příklady rovnoměrného rozdělení, jsou to rozlišitelnost spojitého měřidla, regulovaná teplota kalibračních laboratoří.

Pakliže neznáme bližší informace ohledně vstupní veličiny, zejména její přesné rozložení, používá rovnoměrného rozdělení, které umožňuje uvést nejistotu větší, než je ta skutečná. Obdélníkové rozložení se používá též v případě, kdy je rovná pravděpodobnost měření vyskytující se v závazných limitech specifikací.

Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení



Obrázek 2.3 Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení pravděpodobnosti

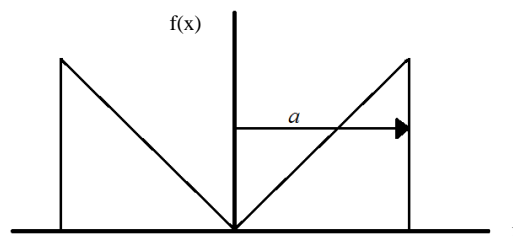
Rozdělení je opět ohraničeno v rozsahu $\pm a$. Využívá se v případech, kdy víme, že pravděpodobnost výskytu hodnot v okolí středu je mnohem vyšší než v krajních mezích intervalu, tj. chování obdobné normálnímu rozdělení s tím rozdílem, že je omezeno.

Tabulka 2.4 Koeficienty trojúhelníkového Simpsonova rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{6} \cong 2,45$ (P = 100 %)

Příkladem trojúhelníkového Simpsonova rozdělení je stabilita v době mezi kalibracemi.

Trojúhelníkové (Bimodální) rozdělení



Obrázek 2.4 Trojúhelníkové (Bimodální) rozdělení pravděpodobnosti

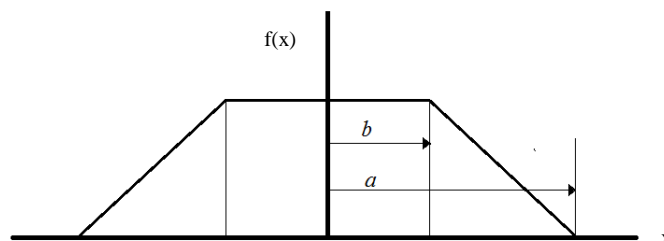
Stejně jako v předchozích dvou případech je rozdělení opět ohraničeno v rozsahu $\pm a$. Oproti Simpsonovu rozdělení však pravděpodobnost směrem k vyšším odchylkám lineárně stoupá až k mezím.

Tabulka 2.5 Koeficienty trojúhelníkového (Bimodálního) rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{2} \cong 1,41$ (P = 100 %)

Příkladem trojúhelníkového bimodálního rozdělení je pravděpodobnost chybného odečtu z nonia.

Lichoběžníkové rozdělení



Obrázek 2.5 Lichoběžníkové rozdělení pravděpodobnosti

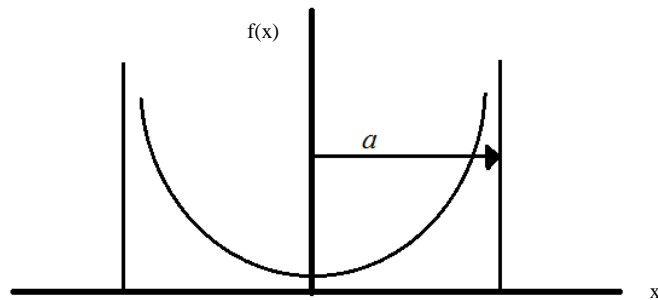
Rozdělení je ohraničeno v rozsahu $\pm a$. V rozsahu $\pm b$ je pravděpodobnost shodná jako v případě rovnoměrného rozdělení, následně klesá lineárně až k mezím $\pm a$.

Tabulka 2.6 Koeficienty lichoběžníkového rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r	
a	$\sqrt{\frac{6 \cdot \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 - 1 \right]}{\left(\frac{a}{b} \right)^2 - \left(\frac{b}{a} \right)^2}} \text{ (P = 100 \%)}$	1,96 ($b = a/1,33$)
		2,19 ($b = a/2$)
		2,32 ($b = a/3$)

Mezi lichoběžníkové rozdělení lze zařadit náhodné výkyvy teplot mimo meze regulované klimatizací či rovnoměrné rozdělení zdroje s definovanými mezemi.

U - rozdělení



Obrázek 2.6 U - rozdělení pravděpodobnosti

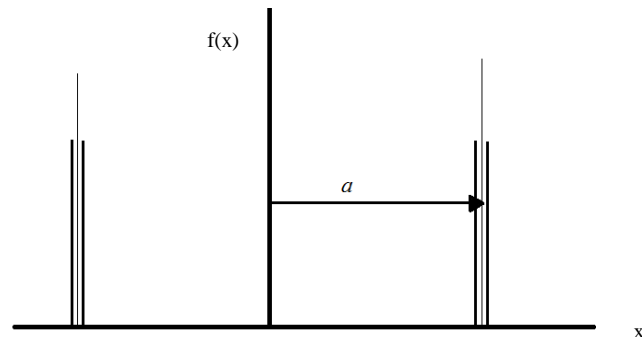
Směrem k mezím, jimiž je rozdělení ohraničeno v rozsahu $\pm a$, pravděpodobnost stoupá.

Tabulka 2.7 Koeficienty U - rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{2} \cong 1,41 \text{ (P = 100 \%)}$

Vliv přirozeného osvětlení lze označit jako jeden z možných zdrojů nejistoty daného U- rozdělení. Ve středu intervalu je výskyt hodnot méně pravděpodobný než v krajích intervalu.

Bimodální (Dirackovo) rozdělení



Obrázek 2.7 Bimodální (Dirackovo) rozdělení pravděpodobnosti

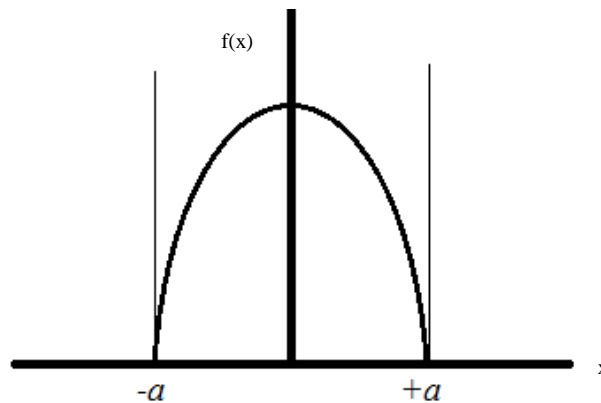
Vyskytují se hodnoty pouze v krajních mezích rozdělení pravděpodobnosti $\pm a$ a tyto jsou stejně pravděpodobné.

Tabulka 2.8 Koeficienty bimodálního Dirackova rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	1 (P = 100 %)

Příkladem Bimodálního Dirackova rozdělení je vliv hystereze měřidla či vliv umělého osvětlení (je buď světlo nebo tma).

Kvadratické rozdělení



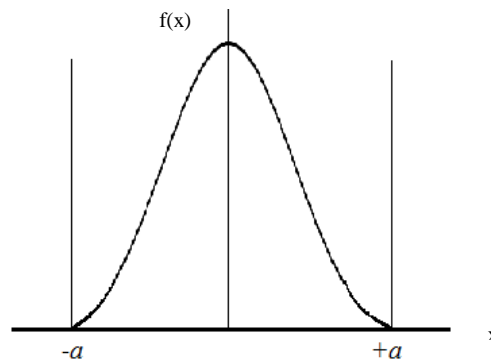
Obrázek 2.8 Kvadratické rozdělení pravděpodobnosti

Rozdělení velmi připomíná normální rozdělení, avšak je ohraničeno mezemi $\pm a$. Směrem k vyšším odchylkám velmi klesá pravděpodobnost, největší je výskyt malých odchylek.

Tabulka 2.9 Koeficienty kvadratického rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{5} \cong 2,24$ (P = 100 %)

Kosinové rozdělení



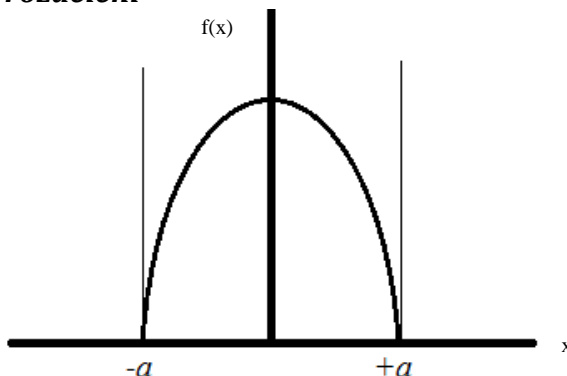
Obrázek 2.9 Kosinové rozdělení pravděpodobnosti

Rozdělení výrazně připomíná normální rozdělení, je však ohraničeno mezemi $\pm a$.

Tabulka 2.10 Koeficienty kosinového rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{\frac{3 \cdot \pi^2}{\pi^2 - 6}} \cong 2,77$ (P = 100 %)

Poloviční kosinové rozdělení



Obrázek 2.10 Poloviční kosinové rozdělení pravděpodobnosti

Je zde velká pravděpodobnost malých odchylek a směrem k vyšším odchylkám velmi klesá pravděpodobnost.

Tabulka 2.11 Koeficienty polovičního rozdělení

maximální odchylky daného zdroje nejistoty z_{max}	koeficient rozdělení k_r
a	$\sqrt{\frac{\pi^2}{\pi^2 - 8}} \cong 2,3$ (P = 100 %)

Z výše uvedených rozdělení pravděpodobností je zřejmé, že čím větší bude příslušná hodnota k_r , tím bude nižší standardní nejistota typu B. Abychom zajistili minimalizaci rizika nesprávného rozhodnutí o shodě, je třeba nejistotu nepodcenit, proto je lepší, pokud je nejistota odhadnuta vyšší než skutečná. Použitím kosinového rozdělení pravděpodobnosti bychom získali nejnižší standardní nejistotu.

Typické příklady standardních nejistot typu B

Nejistota kalibrace

Nejistota kalibrace je samostatně zpracovávaným zdrojem nejistot. Hodnotu rozšířené nejistoty kalibrace U_{KAL} je možné vyčíst z příslušného kalibračního listu, kde je možné rovněž dohledat i jí odpovídající koeficient rozšíření k_r .

Stanovení standardní nejistoty jako podílu rozšířené nejistoty kalibrace U_{KAL} a příslušného koeficientu rozdělení k_r , je pak nezbytnou součástí při stanovení zdrojů nejistot typu B.

Nejistota z rozlišitelnosti měřidla

Stav, kdy již nelze více zpřesnit naměřenou hodnotu je uváděna jako rozlišitelnost příslušného měřidla Res . Tato nejistota má rovnoměrné rozdělení, když uvnitř intervalu rozlišitelnosti může naměřená hodnota nabýt jakékoliv hodnoty. Zdroj

rozlišitelnosti leží uprostřed rozlišitelnosti.

V případě rozlišitelnosti se mohou vyskytnout dvě možné situace:

- pokud v případě opakovaných měření odečítáme stále tytéž hodnoty, může být měřidlo mylně považováno za ideální a rozlišitelnost v tomto případě lze považovat za významný zdroj nejistoty převyšující standardní nejistotu typu A
- pakliže odečítáme rozdílné hodnoty v případě opakovaných měření, můžeme rozlišitelnost pokládat za prolomenou a jsme schopni ji částečně identifikovat i v naměřených hodnotách, není proto tak významným zdrojem nejistoty, jako tomu bylo v předchozím případě.

Rozlišitelnost je nutné považovat za významný zdroj nejistoty měření typu B, pokud podíl se směrodatnou odchylkou s opakovaných měření

$$\frac{Res}{s} > 2. \quad 2.23$$

Standardní nejistotu z rozlišitelnosti měřidla pak vypočteme podle vztahu

$$u_{res} = \frac{Res}{2\sqrt{3}} = 0,289 \cdot Res. \quad 2.24$$

Při platnosti vztahu (2.23) je rozlišitelnost doprovázena nízkou či zanedbatelnou hodnotou u_A .

Důležitým úkolem obsluhy měřidla je řádně zvolit rozlišitelnost vzhledem k variabilitě měřeného signálu a v případě, že nejistotu kromě u_A ovlivňuje i u_{Res} , určit poměr dle vztahu (2.23) a stanovit hodnotu nejistoty za pomoci vzorce (2.24). Pokud není možné provést opakovaná měření a stanovit nejistotu u_A uvést vždy jako zdroj nejistoty typu B u_{Res} .

Nejistota způsobená teplotní roztažností

Nejvýznamnějším zdrojem nejistoty typu B v případě měření délky je nejistota způsobená teplotní roztažností. Je ideálním příkladem pro ilustraci výpočtu nejistot. V úvahu musíme brát dvě samostatné složky, teplotní roztažnost měřidla a teplotní roztažnosti měřené látky.

Při respektování teplotních roztažností lze určit skutečnou délku měřeného znaku l_0 za referenčních podmínek podle základního vztahu [9]

$$l_0 = l_M \cdot \left(\frac{1 + \alpha_M \cdot \Delta t_M}{1 + \alpha_P \cdot \Delta t_P} \right), \quad 2.25$$

kde l_M je údaj, který odečteme z měřidla po změně teploty, α_P a α_M jsou koeficienty teplotní roztažnosti materiálu měřeného znaku a měřidla, Δt_P a Δt_M jsou rozdíly mezi skutečnou a referenční teplotou znaku a měřidla.

Hodnotu korekce lze pak vyjádřit podle vzorce

$$\Delta_\tau = l_M - l_0 = l_M \cdot \frac{\alpha_P \cdot \Delta t_P - \alpha_M \cdot \Delta t_M}{1 + \alpha_P \cdot \Delta t_P}. \quad 2.26$$

Pro ideální měřidlo platí, že $\alpha_M = 0$, korekci určíme dle vztahu

$$\Delta_{\tau} = l_M \cdot \frac{\alpha_P \cdot \Delta t_P}{1 + \alpha_P \cdot \Delta t_P}, \quad 2.27$$

z čehož odvozujeme, že systematickou chybu tvoří pouze teplotní roztažnost měřeného znaku.

Je-li naopak ideální materiál měřeného dílu a $\alpha_P = 0$, odpovídá tomu korekce

$$\Delta_{\tau} = -l_M \cdot \alpha_M \cdot \Delta t_M, \quad 2.28$$

čili můžeme konstatovat, že systematickou chybu tvoří pouze teplotní dilatace měřidla.

Jsou-li materiál měřidla i znaku shodné $\alpha_M = \alpha_P = \alpha$, vyjádříme korekci

$$\Delta_{\tau} = l_M \cdot \frac{\alpha \cdot (\Delta t_P - \Delta t_M)}{1 + \alpha \cdot \Delta t_P} \quad 2.29$$

a pokud se oba předměty roztahují stejně čili $\Delta t_P = \Delta t_M = \Delta t$, bude výsledná systematická chyba nulová $\Delta_{\tau} = 0$.

Při referenčních podmínkách měření $\Delta t_P = \Delta t_M = 0$ a tedy i $\Delta_{\tau} = 0$. Jedná se tedy o ideální, referenční, podmínky, kdy je systematická chyba nulová.

Nejistotu měření u_{l0} při uvažování zdrojů nejistot $\alpha_M, \alpha_P, \Delta t_P$ a Δt_M a zanedbání korekcí vyjádříme dle vztahu

$$u_{l0} = l_M \cdot \sqrt{(\alpha_M \cdot u_{tM})^2 + [(t_M - 20) \cdot u_{\alpha M}]^2 + (\alpha_P \cdot u_{tP})^2 + [(t_P - 20) \cdot u_{\alpha P}]^2}, \quad 2.30$$

kde číslice 20 je hodnota definiční teploty 20 °C.

Nejistota zdrojů, které není možné jednoznačně fyzikálně popsat

Nejistotami zdrojů, které není možné jednoznačně fyzikálně popsat, mohou být zejména nekorigovatelné systematické chyby, fyzické, psychické a kvalifikační vlastnosti operátora, odolnost operátora vůči nepříznivým vlivům, neidentifikovatelné zbytkové zdroje.

Stanovení takovýchto nejistot je možné pouze kvalifikovaným odhadem či experimentem. V případě kvalifikovaného odhadu je největší váha přikládána právě „kvalifikovanosti“ operátora, jeho znalostem a zkušenostem, na nichž staví svůj odhad. Není-li takového kvalifikovaného odborníka, nebo neexistují-li předchozí zkušenosti s podobnými měřeními, přichází na řadu experiment. Podmínkou však je, aby byl snadno proveditelný, zdroj musí vykazovat viditelné matematicky či fyzikálně popsatelné tendence, odhad nejistoty je vyžadován rovněž ve vysoké kvalitě.

2.3.8 Výpočet standardní nejistoty odhadu hodnoty výstupní veličiny

Výstupní veličinu je možné určit různými způsoby pro nekorelované vstupní veličiny a pro vstupní veličiny korelované, neboli na sobě určitým způsobem závislé.

V případě nekorelovaných funkcí je možné definovat vztah pro výpočet standardní nejistoty odhadu y hodnoty výstupní veličiny [9]:

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N u_{yi}^2, \quad 2.31$$

kde $u(y_i)$ je příspěvek ke standardní nejistotě odhadu y výstupní veličiny vyplývající ze standardní nejistoty odhadu x_i vstupní veličiny a vypočte se jako

$$u_{yi} = A_i \cdot u_{xi}, \quad 2.32$$

kde A_i je koeficient citlivosti daného zdroje nejistoty, který je buď znám, nebo je nutné jej vypočítat [9]

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_i}. \quad 2.33$$

Koeficient citlivosti specifikuje, jakou měrou je odhad výstupní veličiny y ovlivněn změnami odhadu x_i vstupní veličiny X_i .

V případě, že vstupní veličiny X_i a X_k jsou na sobě závislé, jsou tedy korelované, je nezbytné respektovat vzájemný vztah mezi vstupními veličinami, jehož zanedbání může vést k chybnému stanovení standardní nejistoty měření. Kovarianci vztahující se k odhadům x_i a x_k vstupních veličin považujeme za další příspěvek k nejistotě

$$u_{xi, xk} = u_{xi} \cdot u_{xk} \cdot r_{xi, xk}, \quad 2.34$$

kde $r(x_i, x_k)$ je korelační koeficient udávající míru korelace, přičemž $|r| \leq 1$. Standardní nejistotu odhadu y výstupní veličiny pak lze psát

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^N u_{yi}^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N u_{xi} \cdot u_{xk} \cdot r_{xi, xk}. \quad 2.35$$

Druhý člen ve vztahu (2.35) může být i kladný i záporný.

Analýza nejistot a bilanční tabulka

Nejistoty nedělíme podle jejich původu a zdroje, ale podle možnosti popisu za užití standardní nejistoty. Metodou A určujeme zdroje nejistot, které způsobují kolísání naměřených hodnot, máme-li k dispozici alespoň 10 opakovaných měření. Pokud tato nemáme, postupujeme metodou typu B.

Přehled nejistot měření musí zahrnovat nejen seznam všech zdrojů nejistot spolu s jejich standardními nejistotami měření, ale i způsoby jejich výpočtu nebo odhadu, musí zachycovat i počet pozorování n v případě opakovaných měření. Vzhledem k rozsahu takového zápisu je vhodné zachytit tyto údaje v bilanční tabulce.

Bilanční tabulka obsahuje vstupní i výstupní veličiny označené buď fyzikálním symbolem veličiny X_i nebo krátkým identifikátorem, uvádí se dále odhad x_i hodnoty takové veličiny, jemu odpovídající nejistota měření $u(x_i)$, koeficient citlivosti A_i a příspěvek k nejistotě $u_i(y)$. Nezbytnou součástí každé hodnoty je samozřejmě i její rozměr.

Příklad tabulky [10]:

Tabulka 2.12 Bilanční tabulka

Veličina X_i	Odhad x_i	Nejistota $u(x_i)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek k nejistotě $u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	<i>dle situace</i>	A_1	$u_1(y)$
:	:	:	:	:	:
X_N	x_N	$u(x_N)$		A_N	$u_N(y)$
Y	y				$u(y)$

2.3.9 Kombinovaná nejistota

Jakmile máme vypočteny standardní nejistoty typu A i B, zbývá nám již jen poslední krok, jímž je stanovení kombinované nejistoty. Každá ze složek se umocní na druhou a následně se spolu sečtou. Výslednou standardní nejistotou je pak dle zákona o šíření nejistot odmocnina ze součtu čtverců obou typů nejistot, které k ní přispívají

$$u_{Cy}^2 = u_{Ay}^2 + u_{By}^2, \quad 2.36$$

neboli

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2}. \quad 2.37$$

Z uvedených vztahů je zřejmé, že zdroj typu A i veškeré dílčí zdroje typu B jsou stejně statisticky významné.

Je-li u_{Ay} řádově vyšší nežli u_{By} , pak je zřejmé, že bychom se měli zaměřit na zjištění náhodných jevů, které zde převažují. Naopak převažují-li výrazněji u_{By} , může být chyba v nevhodné volbě rozlišitelnosti, nevhodném návržení měřicího systému, event. převládají zdroje nejistot typu B, které můžeme určit.

2.3.10 Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota měření je U je stavena vynásobením, neboli rozšířením standardní nejistoty u_{Cy} odhadu y koeficientem rozšíření k_r

$$U = k_r \cdot u_y. \quad 2.38$$

Jak již bylo dříve řečeno, dané pravděpodobnosti pokrytí vždy odpovídá příslušná hodnota koeficientu rozšíření k_r . Při odhadu tohoto koeficientu je nutno brát na zřetel spolehlivost stanovení standardní nejistoty u_y .

Pro nejčastěji používané normální (Gaussovo) rozdělení, kde interval rozdělení obsahuje měřenou hodnotu s pravděpodobností 95 %, se použije koeficient rozšíření $k_r=2$. Vychází se z efektivního počtu stupňů volnosti, který závisí na počtu provedených pozorování n , z něhož je stanovena směrodatná odchylka.

Kritérium spolehlivosti normálního rozdělení je splněno vždy, když jsou dodrženy podmínky centrální limitní věty a příspěvky nejistot určených metodou A nejsou vypočteny z počtu pozorování menšího než 10. V případě, že tomu tak není, nezbude než s ohledem na skutečný tvar rozdělení odhadů hodnot výstupní veličiny určit příslušnou hodnotu rozšíření.

2.3.11 Vyjádření výsledku

Jak bylo výše uvedeno, používá se pro vyhodnocení měření podrobný zápis do bilanční tabulky.

Samotný zápis výsledků může mít dvě podoby, jednak za použití standardní kombinované nejistoty, a nebo pomocí rozšířené nejistoty.

Vyjádřujeme-li výsledek měření pomocí standardní kombinované nejistoty u_{cy} , musíme nejprve uvést přesnou definici měřené veličiny, dále odhad y měřené veličiny Y spolu s kombinovanou nejistotou u_{cy} a jim příslušnou jednotkou. V některých případech je uváděna i relativní standardní nejistota $\frac{u_{cy}}{|y|}$, kde $|y| \neq 0$.

S využitím standardní kombinované nejistoty u_{cy} jsou tedy možné následující způsoby zápisů (jako příklad bylo vzato vyjádření hmotnosti) [10]:

- $m = 205,023\ 71\ \text{g}$ s $u_{cy}=0,68\ \text{mg}$
- $m = 205,023\ 71\ (68)\ \text{g}$ – v případě tohoto zápisu číslice v závorce vyjadřuje kombinovanou standardní nejistotu, kdy řád číslic je shodný s dekadickým řádem posledních dvou číslic měřeného výsledku
- $m = 205,023\ 71\ (0,000\ 68)\ \text{g}$ – zde je číslice v závorce vyjádřena ve shodných jednotkách jako měřený výsledek
- $m = (205,023\ 71 \pm 0,000\ 68)\ \text{g}$ – tento zápis není doporučován s ohledem na skutečnost, že se využívá k zápisu nejistoty pomocí rozšířené nejistoty měření.

Do kalibračních listů se pak uvádí zápis výsledku měření za použití rozšířené nejistoty měření ve tvaru $(y \pm U)$, opět včetně příslušných jednotek, obsahující odhad y měřené veličiny Y a jemu příslušnou rozšířenou nejistotu U . Nezbytné jsou rovněž doplňující informace obsahující přesnou definici měřené veličiny, jakým koeficientem rozšíření byla standardní nejistota rozšířena, a tedy jaké pravděpodobnost pokrytí odpovídá příslušné rozdělení.

Jak již bylo předesláno, zápis takového výsledku se uvádí ve tvaru $m = (205,023\ 71 \pm 0,001\ 36)\ \text{g}$ – druhé číslo značí právě hodnotu rozšířené nejistoty U vypočtené ze vztahu $U = k_r \cdot u_{cy}$, pro něj byl stanoven koeficient rozšíření $k_r=2$.

Za pomoci výpočetní techniky získáváme často výsledky obsahující dlouhé řetězce číslic, zejména při statistickém vyhodnocování pak lze několikanásobným opakováním měření zpřesnit odhad měřené veličiny o jeden i dva řády. Pro praktické využití však rozhodně nelze použít celý vykazovaný výsledek.

Číselná hodnota nejistoty měření je vždy uvedena na nejvýše dvě platné číslice. Výsledek měření pak musí být standardně zaokrouhlen tak, aby obsahoval nejméně pozice platných číslic vyjadřujících nejistotu tohoto výsledku.

Zaokrouhlování by se mělo provádět maximálně jednou, a to na závěr po dokončení všech výpočtů. I zaokrouhlování má svá pravidla, při vyjádření výsledku se vybere vždy ten celistvý násobek, který je k danému číslu nejbližší. Jsou-li celistvé násobky vzdáleny od čísla stejně, nastávají dvě varianty řešení. Buď dáme přednost sudému celistvému násobku, případně můžeme zvolit větší ze dvou čísel. Vždy však bereme zřetel na to, že zaokrouhlením dochází k záměně čísla původního jiným zaokrouhleným číslem a tedy k jistému zkreslení výsledku.

3 NEJISTOTY PŘÍMÝCH MĚŘENÍ

Tato část je věnována jednodušším přímým měřením, u nichž neuvažujeme vliv dalších kovariančních faktorů, a stejně jako tomu bylo v předchozí kapitole, bude opět rozdělena na nejistoty vyhodnocované statistickou analýzou, čili metodou A, a nejistoty vnášené do měření jiným způsobem neboli metodou B. Z velké části tak bude navazovat na výše uvedené postupy obecné části týkající se nejistot měření.

3.1 Nejistoty měření stanovené metodou A

Jak bylo řečeno v obecné části o nejistotách, je standardní nejistota typu a vyšetřována statistickou analýzou měřených údajů, kdy počet provedených měření by měl být větší než 10.

Pro řádné vyhodnocení výsledku je nezbytné, aby měření probíhala za stejných podmínek a byla na sobě navzájem nezávislá, čímž jsou zároveň vyloučeny vzájemné kovariance vstupních veličin.

Pokud jsme realizovali n nezávislých měření a výsledkem jsou vzájemně nezávislé vstupní veličiny x_1, x_2, \dots, x_N , můžeme vypočítat odhad \bar{x} hodnoty měřené vstupní veličiny, který je dán aritmetickým průměrem jednotlivých pozorovaných hodnot dle vzorce [10]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i. \quad 3.1$$

Standardní nejistota $u_A(x)$ typu A stanovená postupem pod písmenem a) dle obecné části 2.3.6 pro počet měření větší než deset, je rovna výběrové směrodatné odchylce aritmetického průměru $s(\bar{x})$

$$u_A(\bar{x}) = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum (x_i - \bar{x})^2}. \quad 3.2$$

Máme-li k dispozici počet provedených měření menší než deset, musíme použít postup uvedený pod písmenem b) a tedy využít namísto odhadu standardní odchylky z omezeného počtu pozorování, tzv. známého průřezového rozptylu s_p^2 z měření, jež jsou dobře popsána a statisticky dobře vyhodnocována. Standardní nejistota typu A takového řízeného měřicího procesu odpovídá druhé odmocnině z odhadu rozptylu aritmetického průměru

$$s^2(\bar{x}) = \frac{s_p^2}{n} \quad 3.3$$

a můžeme pro standardní nejistotu typu A psát

$$u_A(\bar{x}) = \frac{s_p(x)}{\sqrt{n}}. \quad 3.4$$

3.2 Nejistoty měření stanovené metodou B

Nejistoty měření typu B jsou závislé na praxi a zkušenostech pozorovatele, na jeho znalostech i pozornosti, od toho se dále odvíjí, do jaké míry budou informace k určení této nejistoty zváženy a využity. Je nutné vyčerpat všechny dostupné zdroje o měřené veličině a její možné variabilitě [9].

Informace nezbytné k vyhodnocení nejistoty typu B lze čerpat ze:

- zkušeností s chováním a vlastnostmi příslušných materiálů a zařízení
- údajů z dříve provedených měření
- údajů výrobce
- nejistot referenčních údajů převzatých z příruček
- údajů uváděných v kalibračních listech nebo jiných certifikátech

Postup pro stanovení nejistoty typu B může být následovný:

- 1) Sestaví se seznam všech možných zdrojů nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p$.
- 2) Stanoví se standardní nejistoty $u(q)$ každého zdroje ať již z technické dokumentace, technických norem, certifikátů, tabulek, pro opakovaně měřené veličiny.
- 3) Pokud se zdroje nějakým způsobem ovlivňují, je nutné rozhodnout o jejich vzájemné korelaci
- 4) Mezi jednotlivými zdroji nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p$ a vstupní veličinou X se stanoví jejich vzájemný vztah

$$X = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p). \quad 3.5$$

- 5) A konečně se vypočte standardní nejistota typu B v souladu se zákonem o šíření nejistot podle vztahu

$$u_B^2 = \sum_{i=1}^N A_i^2 \cdot u_{Bzj}^2, \quad 3.6$$

Pro některé zdroje nejistot jsou v dokumentacích či certifikátech uvedeny rozšířené nejistoty U a zároveň koeficient jejich rozšíření k_r , potom standardní nejistotu takového zdroje můžeme vypočítat dle vzorce

$$u_{Bzj} = \frac{U}{k_r}. \quad 3.7$$

U jiných zdrojů nejistot nám může být např. známa délka intervalu $2U$, v němž se se zadanou pravděpodobností nachází převážná část naměřených hodnot. Bylo-li použito normované normální rozdělení, můžeme pro tuto pravděpodobnost určit koeficient rozšíření k_p , např. pro $P = 99,73\%$ je $k_p = 3$, pro $P = 99\%$ je $k_p = 2,58$, či $P = 95\%$ je $k_p = 2$. Koeficientem rozšíření podělíme polovinu známé délky intervalu a získáme tak standardní nejistotu typu B vlivem daného zdroje

$$u_{Bzj} = \frac{U}{k_p}. \quad 3.8$$

Pokud lze odhadnout pouze horní a dolní limity a_+ a a_- hodnot vstupní veličiny X_i , jejichž překročení je téměř nemožné, je nutné stanovit způsob rozdělení

pravděpodobnosti odchylek a z něj pak vyjádřit jeho aproximaci. Příslušné aproximaci pak také odpovídá hodnota koeficientu k . Koeficientem k opět podělíme známý odhad $\pm z_{imax}$ horní či dolní limity vstupní veličiny a získáme tak standardní nejistotu typu B vlivem daného zdroje

$$u_{Bzj} = \frac{z_{imax}}{k}. \quad 3.9$$

Typy rozdělení hustoty pravděpodobnosti, jim odpovídající horní a dolní limity a_+ a a_- hodnot vstupní veličiny X_i a příslušné hodnoty koeficientů zachycuje přehledně kapitola 2.3.7.

Převážná část spolehlivých měřicích přístrojů vykazuje pouze malé chyby a větší odchylky se vyskytují pouze zřídka, čemuž odpovídá aproximace normálního, event. trojúhelníkového rozdělení hustoty pravděpodobnosti.

V běžné praxi se však nejhojněji využívá rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti výskytu, kdy jakákoliv odchylka se může u přístroje vyskytnout v celém intervalu hodnot se stejnou pravděpodobností.

Pakliže výrobce měřicích přístrojů rozděluje výrobky do různých tříd přesnosti, bude takovému rozdělení odpovídat bimodální rozdělení pravděpodobnosti, když malé odchylky se budou vyskytovat u přístrojů vyšší (přesnější) třídy a velké odchylky naopak u přístrojů nižší (méně přesné) třídy přístrojů.

V případě použití číslicového měřicího přístroje je nutné uvažovat rovněž nejistotu vzniklou nepřesným rozlišením posledních platných číslic při odečítání. Odhad standardní nejistoty typu B pak stanovíme za použití rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti v intervalu vymezeném rozlišovací schopností příslušného přístroje, pro nějž platí [10]

$$u_{Bzj} = \frac{\delta_{zj}}{2 \cdot \sqrt{3}} = 0,29 \cdot \delta_{zj}. \quad 3.10$$

Pokud tady máme u číslicového voltmetru definováno, že rozlišovací schopnost přístroje je $\delta_{zj} = 10mV = 0,01V$, odpovídá tomu nejistota $u_{Bzj} = 0,29 \cdot 0,01 = 0,003V$. Další způsob vyjádření nejistoty v technické dokumentaci může být pro týž číslicový voltmetr s rozsahem 20V a rozlišovací schopností jednoho digitu $\delta_{zj} = 10mV = 0,01V$, uvedena jako přesnost 0,3 % naměřené hodnoty + 1 digit.

Používáme-li k vyhodnocení měřené veličiny analogového přístroje se stupnicí, je odečítací schopnost dána zejména hodnotou dílku stupnice δ_z , standardní nejistota se pak vypočte shodně jako v případě číslicového měřicího přístroje dle vzorce (4.10).

U analogových přístrojů je nutno brát na zřetel rozlišovací schopnost lidského oka, proto byla délka dílku měřicích přístrojů stanovena přibližně na 1mm. Na schopnost odečítání má rovněž velký vliv praxe, neboť u laiků je přesnost čtení $\pm 0,5$ dílku, kdežto pro kvalifikovaného experimentátora $\pm 0,3$ až $\pm 0,25$ dílku.

3.3 Kombinovaná nejistota

Nyní již máme vypočteny standardní nejistoty typu A i B a zbývá nám vyjádřit je společně jako jedinou hodnotu, kombinovanou nejistotu. Vypočteme ji podle již v obecné části zmíněného vzorce, tedy jako odmocninu ze součtu čtverců obou typů nejistot, které k ní přispívají,

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2}. \quad 3.11$$

Výsledek bychom mohli vyjádřit ve tvaru $y \pm u_{Cy}$, avšak pravděpodobnost, že skutečná hodnota měřené veličiny by se vyskytovala ve výše popsaném intervalu, je pouhých 60 %.

3.4 Rozšířená nejistota

Abychom zvýšili pravděpodobnost, že skutečná naměřená hodnota se bude vyskytovat v námi vyjádřeném intervalu, nezbývá než ji vyjádřit pomocí rozšířené nejistoty U vzniklé vynásobením, neboli rozšířením standardní nejistoty u_{Cy} odhadu y koeficientem rozšíření k_r . [10]

$$U = k_r \cdot u_{Cy}. \quad 3.12$$

Zde se opět dostáváme k typům rozdělení pravděpodobnosti, na nichž hodnota koeficientu k_r přímo závisí a již několikrát bylo zmíněno nejčastěji používané normální (Gaussovo) rozdělení, kde interval rozdělení obsahuje měřenou hodnotu s pravděpodobností 95 %, se použije koeficient rozšíření $k_r=2$. Vychází se z efektivního počtu stupňů volnosti, který závisí na počtu provedených pozorování n , z něhož je stanovena směrodatná odchylka.

3.5 Vyjádření výsledku

Na závěr již zbývá vytvořit z použitých hodnot přehlednou bilanční tabulku a vyjádřit výsledek v jedné ze dvou forem navržených v části (2.3.11) buď pomocí standardní kombinované nejistoty, nebo rozšířené nejistoty.

4 NEJISTOTY NEPŘÍMÝCH MĚŘENÍ

Následující kapitola bude věnována složitějším případům měření, měřením nepřímým, v nichž hrají významnou roli vzájemné korelace vstupních veličin, a je tedy nutné brát v potaz kovariance ovlivňující celkovou nejistotu měření.

Výstupní veličina Y , kterou chceme měřením zjistit, je shodně jako v případě přímého měření funkcí f vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_N . Vstupní veličiny mohou být buď přímo změřené hodnoty, ale stejně tak to mohou být i veličiny, jejichž odhady, nejistoty a kovariance jsou známy, jako jsou různé korekce, fyzikální konstanty apod. Výstupní veličinu lze tedy opět vyjádřit [11]

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad 4.1$$

a odhad y hodnoty výstupní veličiny Y je funkcí odhadů x_i hodnot vstupních veličin X_i ($i=1, 2, 3, \dots, N$), což můžeme zapsat

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad 4.2$$

Nyní nastávají dvě situace, v případě, že jsou vstupní veličiny vzájemně nezávislé, nekorelované, postupujeme shodně jako v případě přímého měření a standardní nejistotu měření vypočteme v souladu se zákonem šíření nejistot ze vztahu

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^N A_i^2 \cdot u_{x_i}^2}, \quad 4.3$$

kde A_i je koeficient citlivosti daného zdroje nejistoty, který je buď znám, nebo je nutné jej vypočítat [12]

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_N)}{\partial x_i}. \quad 4.4$$

Druhý případ, kdy odhady x_i vstupních veličin jsou vzájemně závislé, jsou korelované, je nutné vzít v úvahu vzájemné kovariance mezi uvedenými odhady. Kovariance jsou totiž dalším příspěvkem k výsledné nejistotě měření.

4.1 Kovariance mezi odhady x_i a x_k

Dle metrologické terminologie je kovariancí nazývána míra vzájemné závislosti dvou náhodných veličin, která je rovná očekávané hodnotě součinu odchylek dvou náhodných veličin od jejich očekávaných hodnot. Vyjadřuje tedy, jak jsou odhady vlivů jednotlivých zdrojů nejistot vzájemně ovlivněny společnými zdroji nejistot. Problematika stanovení kovariancí mezi vzájemně závislými zdroji je značně složitá, můžeme se s ní setkat v místech, kde bychom ji běžně nečekali.

Kovariance mohou ve výsledku hodnotu nejistoty nejen zvětšit, ale i zmenšit, závisí to na tom, zda jednotlivé faktory působí na příslušné odhady souhlasně nebo protichůdně a jak jsou svázány s funkcí výstupní veličiny.

Shodně jako je tomu u nejistot měření i na kovariance se uplatní výpočetní metody typu A, vycházející ze statistické analýzy, či typu B, stanovené jinou metodou.

4.1.1 Kovariance mezi odhady x_i a x_k stanovené metodou A

Chceme-li použít metodu A pro stanovení kovariancí mezi odhady x_i a x_k , potřebujeme k tomu dva soubory obsahující n naměřených hodnot obou vstupních veličin $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ a $x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}$. Odhady x_i a x_k hodnot měřených vstupních veličin, jsou dány aritmetickými průměry jednotlivých pozorovaných hodnot dle vzorců [11]

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad 4.5$$

a

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n x_{kj}. \quad 4.6$$

Výsledná kovariance mezi odhady x_i a x_k se pak vypočítá dle vzorce

$$u_A(x_i, x_k) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum (x_{ij} - \bar{x}_i) \cdot (x_{kj} - \bar{x}_k)}. \quad 4.7$$

4.1.2 Kovariance mezi odhady x_i a x_k stanovené metodou B

Určení kovariancí mezi odhady x_i a x_k metodou B možné jednak výpočtem nebo odečtením z příslušné literatury či certifikátů.

Shodně jako u stanovení nejistot typu B z přímého měření sestává postup z pěti kroků.

- 1) Sestaví se seznam všech možných zdrojů závislostí, korelací.
- 2) Odhadne se korelační koeficient $r(x_i, x_k)$ udávající míru korelace mezi každou dvojicí odhadů každého zdroje korelací. $|r| \leq 1$, hodnoty $r \rightarrow \pm 1$ značí silnou korelaci veličin. Pro $r > 0$ označujeme závislost jako rostoucí, pro $r < 0$ jako klesající. Velikost korelačního koeficientu odhadne operátor dle svých zkušeností s oběma zdroji korelací po provedeném rozboru.

Kovarianci vztahující se k odhadům x_i a x_k pak určíme ze vztahu

$$u_B(x_i, x_k) = u_{x_i} \cdot u_{x_k} \cdot r_{x_i, x_k}. \quad 4.8$$

- 3) Jsou-li vstupní veličiny X_1 a X_2 funkcemi vzájemně nezávislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , vyjádřenými

$$X_1 = g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m) \quad 4.9$$

a

$$X_2 = g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m). \quad 4.10$$

Lze vzájemnou kovarianci mezi odhady x_i a x_k stanovit

$$u_B(x_i, x_k) = \sum_{i=1}^m A_{1i} \cdot A_{2i} \cdot u_B^2(z_i), \quad 4.11$$

kde A_{1i} a A_{2i} jsou koeficienty citlivosti funkcí g_1 a g_2 . Tento postup je vlastně obcházením nezbytného odhadu koeficientu korelace $r(x_i, x_k)$ a odstraněním závislosti vstupních veličin X_1 a X_2 .

- 4) Jsou-li vstupní veličiny X_1 a X_2 funkcemi vzájemně závislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , je nutné určit vzájemnou kovarianci pomocí vzorce

$$\begin{aligned} u_B(x_1, x_2) &= \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m A_{1i} \cdot A_{2k} \cdot u_B(z_i, z_k) \\ &= \sum_{i=1}^m A_{1i} \cdot A_{2i} \cdot u_B^2(z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1, k \neq i}^m A_{1i} \cdot A_{2k} \cdot u_B(z_i, z_k), \end{aligned} \quad 4.12$$

kde hodnota $u_B(z_i, z_k)$ udává známou hodnotu kovariance mezi odhady z_i, z_k .

- 5) Nemáme-li k dispozici potřebný odhad korelačního koeficientu ani jej nelze obejít postupem v bodě 3), uvádí se maximální vliv korelace na výslednou nejistotu prostřednictvím horní hranice, kdy

$$u_B^2(y) = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m A_i^2 \cdot u_B^2(x_i) + 2|A_1 \cdot A_2| A_{2k} \cdot u_B(x_1) \cdot u_B(x_2). \quad 4.13$$

4.2 Příklady zdrojů korelací v návaznosti

4.2.1 Opakované měření jedním měřidlem

Odhadem hodnoty veličiny měřené opakovaně jediným měřidlem za stále stejných podmínek bude aritmetický průměr změřených hodnot a standardní nejistotu typu A pak vypočteme jako výběrovou směrodatnou odchylku aritmetického průměru. Kovarianci stanovenou metodou A lze v uvedeném případě pominout.

Nejistoty typu B zachycují odchylky použitého měřidla a podmínek měření. Kovariance mezi měřeními bude rovna čtverci nejistoty měřidla, když je stanovena ze společné chyby použitého měřidla při jednotlivých měřeních. Korelační koeficient je v tomto případě roven jedné.

4.2.2 Opakované měření různými měřidly

Je-li pro každé měření užito jiné měřidlo, lze říci, že mezi odchylkami není žádná souvislost a kovariance mezi měřeními nebudou existovat až na výjimky, jež mohou být způsobeny shodnými podmínkami měření. Nelze-li tedy stanovit, že nějaká část chyby užitých měřidel je závislá, použije se korelační koeficient $k_r = 1$.

Je-li měření prováděno měřidly, jež jsou vyrobena tímto výrobcem a mají stejnou třídu přesnosti, lze konstatovat, že je měření uskutečněno s jediným měřidlem.

4.2.3 Měření kalibrovanou sadou měřidel

Máme-li k dispozici sadu měřidel, reprezentuje každé z nich jednu hodnotu měřené veličiny, přičemž známe odhad x_i jeho hodnoty i nejistotu $u(x_i)$. V případě kalibrované sady měřidel se může jednat jak o odhady navzájem nekorelující, tak i korelované, u nichž musí být známa i vzájemná kovariance.

Jako příklad je možné uvést n krát opakované vážení hmotnosti tělesa o hmotnosti 400g kalibrovanou sadou závaží ve složení $m_{200} + m_{100} + m_{100^*}$. [11]

$$m = m_{200} + m_{100} + m_{100^*} + x + K, \quad 4.14$$

kde odhad rozdílu hmotností tělesa s celkovou hmotností závaží označíme x a korekci vlivů podmínek měření K . Nejistotu odhadu hmotnosti tělesa pak vypočteme

$$u^2(m) = u^2(m_{200}) + u^2(m_{100}) + u^2(m_{100^*}) + u^2(x) + u^2(K) + 2u(m_{200}, m_{100}) + 2 \cdot u(m_{200}, m_{100^*}) + 2 \cdot u(m_{100}, m_{100^*}). \quad 4.15$$

Hodnoty odhadů m_{200} , m_{100} , m_{100^*} , jejich nejistoty $u(m_{200})$, $u(m_{100})$, $u(m_{100^*})$ i jejich vzájemné kovariance $u(m_{200}, m_{100})$, $u(m_{200}, m_{100^*})$, $u(m_{100}, m_{100^*})$ bychom měli vyčíst z kalibračních listů. U posledně zmíněných kovariancí tomu tak zpravidla ale není. Co se týká hodnoty odhadu x , ten stanovíme obligátně aritmetickým průměrem naměřených rozdílů a nejistotu pak jako výběrovou směrodatnou odchylku aritmetického průměru. Nejistotu $u(K)$ korekce vlivů podmínek měření určíme metodou typu B.

4.2.4 Měření měřicím přístrojem s konstantní nejistotou

V tomto případě využíváme k měření měřicí přístroj, u něhož je nejistota konstantní v celém měřicím rozsahu. Jestliže nám jsou při takovém měření známy odhady hodnot měřených veličin x a nejistoty $u(x) = c$ všech hodnot x měřicího rozsahu přístroje, platí, že musí být také známy i kovariance $u(x_i, x_j) \in [0, c^2]$ pro všechny dvojice x_i, x_j měřicího přístroje. V případě, že kovarianci odečítáme od výsledné hodnoty, bereme spodní mez intervalu, kovariance je tak nulová. Pokud naopak hodnotu kovariance k výsledku přičítáme k výsledné nejistotě, je kovariance rovna c^2 .

Když například pomocí tlakoměru určíme rozdíl tlaků $\Delta p = p_1 - p_2$, výsledná nejistota včetně kovariance mezi těmito dvěma naměřenými hodnotami je [11]

$$u^2(\Delta p) = u^2(p_1) + u^2(p_2) - 2 \cdot u(p_1, p_2). \quad 4.16$$

Hodnotu kovariance v daném případě je nutno zvolit nulovou, aby nejistota nebyla v žádném případě zmenšena.

Naproti tomu, potřebujeme-li stanovit součet tlaků $\Delta p = p_1 + p_2$, výsledná nejistota včetně kovariance mezi těmito dvěma naměřenými hodnotami bude

$$u^2(\Delta p) = u^2(p_1) + u^2(p_2) + 2 \cdot u(p_1, p_2). \quad 4.17$$

Zde naopak musíme uvažovat maximální hodnotu intervalu kovariancí, aby opět nedošlo k nepřipustnému zmenšení nejistoty.

Analogicky bychom řešili i součin dvou tlaků $p = p_1 \cdot p_2$, výsledná nejistota včetně kovariance mezi těmito dvěma naměřenými hodnotami bude v tomto případě

$$u^2(p) = p_2^2 \cdot u^2(p_1) + p_1^2 \cdot u^2(p_2) + 2p_1 \cdot p_2 \cdot u(p_1, p_2). \quad 4.18$$

5 KALIBRACE ZÁVAŽÍ

Nutnou podmínkou k dosažení co nejpřesnějších výsledků při měření hmotnosti s co nejmenší nejistotou měření je kalibrace závaží.

Jak již bylo řečeno, Mezinárodní organizace pro legální metrologii OIML poskytuje členským státům různé směrnice a mezinárodní doporučení označovaná OIML R, které stanovují metrologické vlastnosti vyžadované u určitých měřicích přístrojů a specifikují metody a zařízení pro kontrolu jejich shody.

Mezi výše zmíněná doporučení patří i Mezinárodní doporučení OIML R 111-1 pro závaží třídy přesnosti E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 a M3 o nominálních hodnotách hmotností od 1 mg do 5 000 kg. Doporučení obsahující technické a metrologické požadavky na závaží používaná jako standard pro ověřování vah či ověřování nebo kalibraci závaží nižší třídy přesnosti.

5.1 Třídy přesnosti závaží

V průběhu měření na závaží působí řada vnitřních rušivých vlivů, které jsou způsobeny zejména nedokonalostí závaží. Každý takový rušivý vliv má samozřejmě dopad na výslednou nejistotu měření, která je pak souhrnem všech účinků působících na měřený objekt i měřicí přístroj. Vzhledem k tomu jsou doporučením OIML předepsány třídy přesnosti závaží definované následovně [1]:

Třída E₁ jsou závaží určená k zajištění návaznosti mezi národními hmotnostními etalony, jejichž hodnoty jsou odvozeny od mezinárodního prototypu kilogramu, a závažími třídy přesnosti E₂ a nižší. Tato závaží musí být opatřena osvědčením o kalibraci.

Třída E₂ jsou závaží určená pro použití při ověřování nebo kalibraci závaží třídy přesnosti F₁ a pro použití s vahami zvláštní třídy přesnosti I. Závaží musí být opatřena osvědčením o kalibraci.

Třída F₁ jsou závaží určená pro použití při ověřování nebo kalibraci závaží třídy přesnosti F₂ a pro použití s vahami zvláštní třídy přesnosti I a vysoké třídy přesnosti II.

Třída F₂ jsou závaží určená pro použití při ověřování nebo kalibraci závaží třídy přesnosti M₁ a případně závaží přesnosti třídy M₂. Rovněž jsou používána při důležitých obchodních transakcích, jako je např. obchod s drahými kovy či kameny, na vahách vysoké třídy přesnosti II.

Třída M₁ jsou závaží určená pro použití při ověřování nebo kalibraci závaží třídy přesnosti M₂, a pro použití s vahami střední třídy přesnosti III.

Třída M₂ jsou závaží určená pro použití při ověřování nebo kalibraci závaží třídy přesnosti M₃ a pro použití v obecných obchodních transakcích a s vahami střední třídy přesnosti III.

Třída M₃ jsou závaží určená pro použití s vahami střední třídy přesnosti III a běžné třídy přesnosti III.

Třídy M₁₋₂ a M₂₋₃ jsou závaží mezi 50 kg a 5.000 kg nižší přesnosti určené pro použití s vahami střední třídy přesnosti III.

5.2 Metrologické aspekty závaží

5.2.1 Maximální dovolené chyby

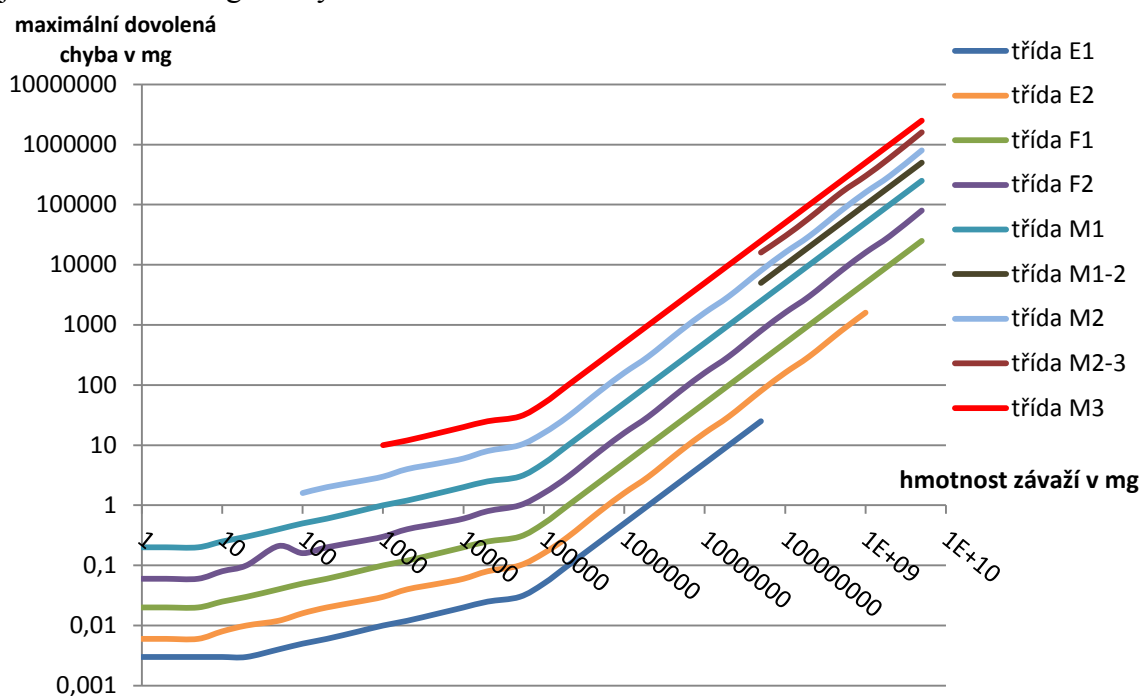
Maximální dovolené chyby δ_m pro prvotní ověření jednotlivých závaží jsou uvedeny v mg v následující tabulce a týkají se konvenční hmotnosti.

Pokud se týká maximálních dovolených chyb pro následné ověření nebo v ověřování provozu, pak tyto jsou ponechány na uvážení jednotlivých států. Je-li však povolená maximální dovolená chyba větší než ta uvedená v tabulce níže, nemůže být závaží prohlášeno jako závaží příslušné třídy OIML.

Tabulka 5.1 Maximální dovolené chyby jednotlivých tříd závaží

jmenovitá hodnota	třída E ₁	třída E ₂	třída F ₁	třída F ₂	třída M ₁	třída M _{1,2}	třída M ₂	třída M _{2,3}	třída M ₃
5000 kg			25000	80000	250000	500000	800000	1600000	2500000
2000 kg			10000	30000	100000	200000	300000	600000	1000000
1000 kg		1600	5000	16000	50000	100000	160000	300000	500000
500 kg		800	2500	8000	25000	50000	80000	160000	250000
200 kg		300	1000	3000	10000	20000	30000	60000	100000
100 kg		160	500	1600	5000	10000	16000	30000	500000
50 kg	25	80	250	800	2500	5000	8000	16000	25000
20 kg	10	30	100	300	1000		3000		10000
10 kg	5	16	50	160	500		1600		5000
5 kg	2,5	8	25	80	250		800		2500
2 kg	1	3	10	30	100		300		1000
1 kg	0,5	1,6	5	16	50		160		500
500 g	0,25	0,8	2,5	8	25		80		250
200 g	0,1	0,3	1	3	10		30		100
100 g	0,05	0,16	0,5	1,6	5		16		50
50 g	0,03	0,1	0,3	1	3		10		30
20 g	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5		8		25
10 g	0,02	0,06	0,2	0,6	2		6		20
5 g	0,016	0,05	0,16	0,5	1,6		5		16
2 g	0,012	0,04	0,12	0,4	1,2		4		12
1 g	0,01	0,03	0,1	0,3	1		3		10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8		2,5		
200 mg	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6		2		
100 mg	0,005	0,016	0,05	0,16	0,5		1,6		
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,21	0,4				
20 mg	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3				
10 mg	0,003	0,008	0,025	0,08	0,25				
5 mg	0,003	0,006	0,02	0,06	0,2				
2 mg	0,003	0,006	0,02	0,06	0,2				
1 mg	0,003	0,006	0,02	0,06	0,2				

Následující obrázek pak zachycuje maximální dovolené chyby v mg pro jednotlivá závaží graficky.



Obrázek 5.1 Maximální dovolené chyby v mg

5.2.2 Rozšířená nejistota

Pro každé závaží, musí být rozšířená nejistota, U , pro $k = 2$, konvenční hmotnosti menší nebo rovna jedné třetině maximální dovolené chyby uvedené v tabulce výše.

$$U \leq \delta_m/3. \quad 5.1$$

5.2.3 Jmenovitá hmotnost závaží

Jmenovité hodnoty hmotnosti pro závaží nebo soupravy závaží musí být rovny $1 \cdot 10^n$ kg, $2 \cdot 10^n$ kg nebo $5 \cdot 10^n$ kg, kde "n" představuje kladné nebo záporné celé číslo nebo nula.

Sady závaží se mohou skládat z různých sledů jmenovitých hodnot. Pokud je v sadě závaží použita posloupnost závaží, používají se následující posloupnosti:

- $(1,1,2,5) \cdot 10^n$ kg;
- $(1,1,1,2,5) \cdot 10^n$ kg;
- $(1,2,2,5) \cdot 10^n$ kg nebo
- $(1,1,2,2,5) \cdot 10^n$ kg.

5.2.4 Konvenční hmotnost

Konvenční hmotnost je podle [13] hmotnost závaží, která je ve vzduchu o hustotě $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$, při referenční teplotě $t_{ref} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a za normálního

barometrického tlaku vyvážena referenčním závažím o hustotě $\rho_{ref} = 8000 \text{ kg/m}^3$.

Konvenční hmotnost, m_c (stanovená s rozšířenou nejistotou, U , podle výše uvedeného vzorce) se nesmí u žádného závaží lišit od jmenovité hodnoty hmotnosti, m_0 , o více než je maximální dovolená chyba, δ_m , ponížena o rozšířenou nejistotu [1]:

$$m_0 - (\delta_m - U) \leq m_c \leq m_0 + (\delta_m - U). \quad 5.2$$

Pro třídy závaží E1 a E2, která jsou vždy opatřena osvědčením poskytujícím příslušné údaje, musí vzít uživatel v úvahu odchylku od nominální hodnoty, $m_c - m_0$.

Pokud lze předpokládat, že jeho konvenční hmotnost je v souladu s příslušnou maximální dovolenou chybou uvedenou v Tabulka 5.1, může být při následujících výpočtech za nominální hodnotu považována hmotnost nebo konvenční hmotnost závaží.

5.3 Podmínky kalibrace závaží

Před určením hmotnosti, musí být s dostatečnou přesností známa hustota závaží, podmínky prostředí a metrologické charakteristiky nástrojů vážení používaných k určení hmotnosti.

Kalibrace závaží by měla být prováděna za stabilních okolních podmínek za atmosférického tlaku při teplotě blízké pokojové teplotě. Předpokládaná stabilita pro získání kvalitních výsledků je zachycena v tabulce.

Tabulka 5.2 Maximální doporučená změna teploty během kalibrace

Třída závaží	Změna teploty během kalibrace
E ₁	± 0,3 °C za hodinu s maximem ± 0,5 °C během 12 hodin
E ₂	± 0,7 °C za hodinu s maximem ± 1 °C během 12 hodin
F ₁	± 1,5 °C za hodinu s maximem ± 2 °C během 12 hodin
F ₂	± 2 °C za hodinu s maximem ± 3,5 °C během 12 hodin
M ₁	± 3 °C za hodinu s maximem ± 5 °C během 12 hodin

Tabulka 5.3 Meze relativní vlhkosti vzduchu

Třída závaží	Meze relativní vlhkosti vzduchu (hodinové)
E ₁	40 % až 60 % s maximem ± 5 % během 4 hodin
E ₂	40 % až 60 % s maximem ± 10 % během 4 hodin
F	40 % až 60 % s maximem ± 15 % během 4 hodin

Je důležité minimalizovat rovněž rozdíl teplot mezi závažím a vzduchem uvnitř hmotnostního komparátoru, proto se doporučuje umístit referenční a zkušební závaží do hmotnostního komparátoru před kalibrací, čímž se dosáhne snížení tohoto rozdílu teplot.

Nezanedbatelný vliv má rovněž změna teplot laboratoře, proto je nutné alespoň po dobu 24 hodin před kalibrací teplotu laboratoře stabilizovat.

Pro kalibrace závaží tříd přesnosti E1 a E2 by měla být teplota v rozmezí 18 °C až 27 °C.

Dalšími důležitými aspekty vzhledem k dosažení požadované nejistoty měření jsou metrologické vlastnosti používaných nástrojů vážení. Ty by měly být známy z dřívějších měření, a to zejména jejich rozlišení, linearita, opakovatelnost a excentricita.

V případě porovnávání zkušebního závaží s referenčním, by toto mělo být obecně vyšší třídy přesnosti, než kalibrované závaží.

5.4 Kalibrace metodou přímého srovnání a dělením

V případě, že budeme kalibrovat pouze jednotlivé kusy závaží, přichází v úvahu metoda přímého porovnání zkušebního závaží s jedním nebo více referenčními závažími.

V každém srovnání by měla být nominální hmotnost zkušebního závaží a referenčního závaží stejná.

Metoda dělení je používána pro celé sady závaží, které tak lze kalibrovat jedním nebo více referenčními závažími. Provádí se několik vážení pro každou dekádu v sadě a porovnávají se různé kombinace závaží o stejné celkové jmenovité hmotnosti. Vzhledem k vyšší přesnosti se tato metoda používá především pro kalibraci sad závaží třídy E1. Vyšší přesnost je dána zejména tím, že metoda v sobě zahrnuje určitou redundanci (nadbytečnost), která vzbuzuje větší důvěru k výsledkům. Negativem však zůstává vyšší náročnost výpočtu. Příklad takového vážení zachycuje následující tabulka.

Tabulka 5.4. Typický způsob vážení

Referenční závaží	vs	5+2+2*+1
Referenční závaží	vs	5+2+2*+1*
5	vs	2+2*+1
5	vs	2+2*+1*
2+1	vs	2*+1*
2+1	vs	2*+1*
2+1*	vs	2*+1
2+1*	vs	2*+1
2	vs	1+1*
2	vs	1+1*
2*	vs	1+1*
2*	vs	1+1*

Výraz 2* znamená, že může být použita libovolná kombinace hmotností k dosažení jmenovité hodnoty $2 \cdot (10^n)$ g.

5.5 Cykly vážení

Níže budou podrobněji rozvedeny metody porovnání testovacího závaží s jedním referenčním závažím, tedy metody označované jako cykly ABBA a ABA. Tyto jsou zpravidla používány pro kalibrace závaží tříd přesnosti E a F.

V těchto cyklech vážení, představuje "A" vážení referenčního závaží a "B" vážení testovacího závaží.

V případě, že bylo použito více než jedno referenční závaží, může být cyklus vážení aplikován pro každé referenční závaží samostatně. Referenční závaží pak mohou být mezi sebou srovnávána.

Máme-li k dispozici dvě závaží, můžeme volit z výše zmíněných dvou cyklů známých jako ABBA a ABA. Tyto cykly eliminují lineární drift.

Pro cyklus $ABBA(r_1 t_1 t_2 r_2)$: $I_{r_1 1}, I_{t_1 1}, I_{t_2 1}, I_{r_2 1}, \dots, I_{r_1 n}, I_{t_1 n}, I_{t_2 n}, I_{r_2 n}$ je indikace odchylky při i -tém měření ΔI_i [1]:

$$\Delta I_i = (I_{r_1 i} - I_{t_1 i} - I_{t_2 i} + I_{r_2 i})/2, \quad 5.3$$

kde $i = 1, \dots, n$ je číslo v pořadí.

Pro cyklus $ABA(r_1 t_1 r_2)$: $I_{r_1 1}, I_{t_1 1}, I_{r_2 1}, \dots, I_{r_1 n}, I_{t_1 n}, I_{r_2 n}$ je indikace odchylky při i -tém měření ΔI_i [1]

$$\Delta I_i = I_{t_1 1} - (I_{r_1 i} + I_{r_2 i})/2, \quad 5.4$$

kde $i = 1, \dots, n$ je číslo v pořadí

Hodnoty i jsou uvedeny v pořadí, v jakém by mělo být závaží umístěné na miskou vah a indexy "r" a "t" značí referenční závaží a testovací závaží.

Při kalibraci závaží třídy přesnosti M se často pak používá cyklus $AB_1 \dots B_n A$. Tento cyklus se obecně se nedoporučuje pro závaží třídy přesnosti E a F. Jedná se o cyklus, v němž se porovnává několik kontrolních závaží stejné nominální hmotnosti s jedním referenčním závažím. Pokud je několik testovaných závaží $t(j)$ ($j = 1, \dots, J$) se stejnou jmenovitou hmotností kalibrováno současně, může být cyklus vážení ABA modifikován do podoby $AB_1 \dots B_n A$ takto:

Pro cyklus

$AB_1 \dots B_n A$: $I_{r_1 1}, I_{t(1) 1}, I_{t(2) 1}, \dots, I_{t(J) 1}, I_{r_2 1}, I_{r_1 2}, I_{t(J) 2}, I_{t(J-1) 2}, \dots, I_{t(1) 2}, \dots$
 $\{I_{r_1 i-1}, I_{t(1) i-1}, I_{t(2) i-1}, \dots, I_{t(J) i-1}, I_{r_2 i-1}, I_{r_1 i}, I_{t(J) i}, I_{t(J-1) i}, \dots, I_{t(1) i}\}$ je indikace odchylky při i -tém měření ΔI_i [1]

$$\Delta I_{i(j)} = I_{t_1 i} - (I_{r_1 i} + I_{r_2 i})/2. \quad 5.5$$

Pokud je odchylka indikace vážení zanedbatelná, tj. menší než nebo rovna jedné třetině požadované nejistoty, není nutné obrácení pořadí zkušebních závaží v $AB_1 \dots B_n A$ při opakování postupu.

Počet závaží by neměl být vyšší než 5 ($J \leq 5$).

Počet cyklů vážení, n , by měl být založen na požadované nejistotě a na opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření. Minimální počet měření pro závaží třídy E1 až M3 je uveden v následující tabulce.

Tabulka 5.5 Minimální počet cyklů vážení

třída	E1	E2	F1	F2	M1, M2, M3
Minimální počet cyklů ABBA	3	2	1	1	1
Minimální počet cyklů ABA	5	3	2	1	1
Minimální počet cyklů $AB_1 \dots B_n A$	5	3	2	1	1

5.6 Průměrná odchylka konveční hmotnosti

Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_c , mezi testovacím a referenčním závažím v i -tém cyklu ABBA nebo ABA, je [1]:

$$\Delta m_c = m_{ct} - m_{cr}, \quad 5.6$$

$$\Delta m_{ci} = \Delta I_i - m_{cr} \cdot C_i, \quad 5.7$$

kde

$$C_i = (\rho_{ai} - \rho_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_r} \right). \quad 5.8$$

Pokud není známa hustota závaží, ρ_t nebo ρ_r , ale je znám materiál, lze přiměřeně použít předpokládanou hustotu. Pokud je pouze známo, že je hustota závaží v rozsahu povolených mezí, potom se použije hodnota $8\,000\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Pro n cyklů je pak průměrná odchylka konvenční hmotnosti

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta m_{ci}. \quad 5.9$$

Kalibrujeme-li několik zkušebních závaží podle vážicího cyklu $AB_1 \dots B_nA$, získá se průměrná odchylka hmotností závaží j tak, že se ΔI_i v rovnici (5.7) nahradí $\Delta I_{i(j)}$.

Pokud existuje několik (J) identických sérií měření s průměrnou hodnotou $\overline{\Delta m_{cj}}$ a přibližně stejnou směrodatnou odchylkou, čehož je využíváno při kalibraci závaží třídy přesnosti E s ohledem na jeho reprodukovatelnost, je průměrná hodnota všech měření

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \overline{\Delta m_{cj}}. \quad 5.10$$

Konvenční hmotnost zkušebního hmotnosti pak vypočteme podle vzorce

$$m_{ct} = m_{cr} + \overline{\Delta m_c}. \quad 5.11$$

5.7 Nejistoty měření

Jak již bylo uvedeno v předcházejících kapitolách, jsou nejistoty hodnoceny buď metodou typu A nebo typu B. Metoda vyhodnocení typu A je založena na statistické analýze série měření, kdežto metoda hodnocení typu B je založena na jiných znalostech.

5.7.1 Standardní nejistota vážení stanovená metodou typu A

Standardní nejistota procesu vážení stanovená metodou typu A, $u_w(\overline{\Delta m_c})$, je směrodatná odchylka rozdílu hmotností. Pro n cyklů měření [1]

$$u_w(\overline{\Delta m_c}) = \frac{s(\Delta m_{ci})}{\sqrt{n}}. \quad 5.12$$

$s(\Delta m_{ci})$ je definována odlišně pro různé třídy závaží.

Pro závaží třídy F_2 , M_1 , M_2 a M_3 , jsou často aplikovány cykly ABBA, ABA nebo

AB₁ ... B_nA. Pro tyto třídy závaží lze $s(\Delta m_{ci})$ vyjádřit

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{\max(\Delta m_{ci}) - \min(\Delta m_{ci})}{2\sqrt{3}}. \quad 5.13$$

Pro $n \geq 3$ cyklů měření.

Pro závaží třídy E₁, E₂ a F₁, se rozptyl rozdílu hmotností, Δm_c , z procesu vážení, $s^2(\Delta m_c)$, odhaduje z n cyklů měření jako

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\Delta m_{ci} - \overline{\Delta m_{ci}})^2 \quad 5.14$$

s $n - 1$ stupni volnosti.

Je-li proveden pouze malý počet měření, může být odhad $s(\Delta m_c)$ nespolehlivý. Měl by být použit sdružený odhad, získaný z předchozích měření provedených za stejných podmínek. Není-li to možné, nemělo by n být menší než 5.

Je-li provedeno J sérií měření (kde $J > 1$), je rozptyl Δm_c vypočten sdružováním přes J sérií

$$s^2(\Delta m_c) = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J s_j^2(\Delta m_{ci}) \quad 5.15$$

s $J(n - 1)$ stupni volnosti.

5.7.2 Standardní nejistota stanovená metodou typu B

Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$

Standardní nejistota hmotnosti referenčního závaží, $u(m_{cr})$, se vypočte z údajů uvedených kalibračním listu, a to dělením zde uvedené rozšířené nejistoty, U , koeficientem rozdělení, k (obvykle $k = 2$). Tato hodnota by měla být kombinována s nejistotou vzhledem k nestabilitě hmotnosti referenčních závaží, $u_{inst}(m_{cr})$,

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{U}{k}\right)^2 + u_{inst}^2(m_{cr})}. \quad 5.16$$

Nejistotu vzhledem k nestabilitě referenčního závaží, $u_{inst}(m_{cr})$, lze odhadnout z pozorování hromadných změn referenčního závaží během opakovaných kalibrací. Pokud však nejsou k dispozici předchozí kalibrační hodnoty, musí být odhad nejistoty proveden na základě zkušeností.

Pokud se jako referenční závaží používá ověřené závaží F₁ nebo nižší třídy přesnosti, a to má osvědčení o shodě OIML R 111, které neuvádí jeho hmotnost a nejistotu, může se nejistota odhadnout z maximální dovolené chyby, δ_m této konkrétní třídy:

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\frac{\delta_m^2}{3} + u_{inst}^2(m_{cr})}. \quad 5.17$$

Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b (typ B)

Nejistotu korekce na vztlak vzduchu lze vypočítat z rovnice [1]

$$u_b^2 = \left[m_{cr} \cdot \frac{(\rho_r - \rho_t)}{\rho_r \cdot \rho_t} \cdot u(\rho_a) \right]^2 + [m_{cr} \cdot (\rho_a - \rho_0)]^2 \cdot \frac{u^2(\rho_r)}{\rho_r^4} + m_{cr}^2 \cdot (\rho_a - \rho_0) \cdot [(\rho_a - \rho_0) - 2 \cdot (\rho_{al} - \rho_0)] \cdot \frac{u^2(\rho_r)}{\rho_r^4}, \quad 5.18$$

kde ρ_{al} je hustota vzduchu během (předchozí) kalibrace referenčního závaží při použití vyššího řádu referenčního závaží. Přičemž je nutné pro nejistoty hustoty referenčního závaží, $u(\rho_r)$ použít stejné hodnoty, které byly použity při výpočtu nejistoty při předchozí kalibraci, není možné zvolit libovolně větší nejistotu.

Hustota referenčního závaží, ρ_r , a její nejistota by měla být známa z jeho kalibračního listu.

Pro třídy závaží E_2 není vždy hustota ρ_t známa, proto musí být buď změřena, nebo vzata z tabulky.

Přestože je samotná korekce na vztlak vzduchu zanedbatelná, může být nejistota příspěvku účinku vztlaku nezanedbatelná. Je nutno ji vzít v úvahu, pokud $u_b \geq \frac{u_c}{3}$.

Kalibrujeme-li závaží tříd přesnosti M_1 , M_2 a M_3 , je nejistota kvůli korekci na vztlak vzduchu zanedbatelná a obvykle může být vynechána.

Pro závaží třídy přesnosti F_1 a F_2 , musí být s dostatečnou přesností známa hustota závaží.

V případě, že není hustota vzduchu měřena a používá se průměrná hustota vzduchu pracoviště, stanoví se nejistota hustoty vzduchu dle vzorce [1]

$$u(\rho_a) = \frac{0,12}{\sqrt{3}} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]. \quad 5.19$$

Hodnota hustoty vzduchu $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ je hodnota na úrovni hladiny moře.

Pro závaží třídy přesnosti E je nutné určit hustotu vzduchu. Jeho nejistota je obvykle odhadovaná z nejistot pro regulaci teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu. Pro třídy E_1 lze použít vzorce CIPM (1981/91) [14]

$$\rho_a = \frac{p \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} \left[1 - x_v \cdot \left(1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right], \quad 5.20$$

p = tlak;

M_a = molární hmotnost suchého vzduchu;

Z = stlačitelnost;

R = molární plynová konstanta;

T = termodynamická teplota;

x_v = molární zlomek vodní páry, a

M_v = molární hmotnost vody.

Obecně se však používá jeho přibližná hodnota pro výpočet hustoty vzduchu

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot p - 0,009 \cdot (hr) \cdot \exp(0,0061 \cdot t)}{273,15 + t}, \quad 5.21$$

kde se hustota vzduchu ρ_a získá v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,
tlak p je uveden v mbar nebo hPa,
relativní vlhkost hr je vyjádřena v procentech, a
teplota t ve $^{\circ}\text{C}$.

Rovnice (5.21) má relativní nejistotu $2 \cdot 10^{-4}$ v rozmezí $900 \text{ hPa} < p < 1100 \text{ hPa}$, $10 \text{ }^{\circ}\text{C} < t < 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $hr < 80 \%$.

Jak již bylo výše uvedeno, měla by být pro závaží třídy E_1 vždy stanovena hustota vzduchu na základě odpovídajících měření. Nicméně, následující rovnice aproximace je způsobem, jak odhadnout hustotu vzduchu v laboratořích, které nemají prostředky k určení hustoty vzduchu na pracovišti. Nadmořská výška je vždy známa, proto, pokud není měřena hustota vzduchu, musí být vypočtena jako střední hodnota pro laboratorní pracoviště takto [1]

$$\rho_a = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0}{p_0} \cdot g \cdot h\right), \quad 5.22$$

kde: $p_0 = 101\,325 \text{ Pa}$;
 $\rho_0 = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$, a
 h = výška nad hladinou moře v metrech.

V případě výpočtu hustoty vzduchu dle vzorců (5.20), (5.21) nebo (5.22), je nejistota hustoty vzduchu vypočtena dle vzorce [1]

$$u^2(\rho_a) = u_F^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} \cdot u_p\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} \cdot u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} \cdot u_{hr}\right)^2, \quad 5.23$$

kde u_F je nejistota použitého vzorce.

Při relativní vlhkosti $hr = 0,5$ (50 %), teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a za tlaku $101\,325 \text{ Pa}$, se přibližně použijí následující číselné hodnoty:

$$u_F = 10^{-4} \cdot \rho_a \quad 5.24$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial p} = 10^{-5} \cdot \rho_a \text{ Pa}^{-1} \quad 5.25$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \rho_a \quad 5.26$$

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} = -10^{-2} \cdot \rho_a \quad 5.27$$

kde hr = relativní vlhkost, jako zlomek.

Nejistota vah u_{ba} (typ B)

Nejistota vzhledem k citlivosti vah

Pokud jsou váhy kalibrovány citlivostním závažím (nebo závažími) o hmotnosti m_s , je standardní nejistota $u(m_s)$ příspěvkem této citlivosti [1]

$$u_s^2 = (\overline{\Delta m_c})^2 \cdot \left(\frac{u^2(m_s)}{m_s^2} + \frac{u^2(\Delta I_s)}{\Delta I_s^2} \right), \quad 5.28$$

kde ΔI_s je změna v indikaci vah vzhledem k citlivostnímu závaží;

$u(\Delta I_s)$ je nejistota ΔI_s a

$\overline{\Delta m_c}$ je průměrná odchylka hmotnosti mezi zkušebními závažími a referenčním závažím.

Pokud není citlivost konstantní s časem, teplotou a zatížením, musí být jeho odchylky zahrnuty v nejistotě.

Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy

Pro digitální váhy s dílkem stupnice, d , je nejistota v důsledku rozlišení [1]

$$u_d = \left(\frac{d/2}{\sqrt{3}} \right) \cdot \sqrt{2}. \quad 5.29$$

Násobek $\sqrt{2}$ pochází ze dvou čtení, z nichž první je s referenčním závažím a druhé se závažím testovacím.

Nejistota vzhledem k excentricitě zatížení

Pokud je známo, že je příspěvek nejistoty vzhledem k excentricitě zatížení významný, musí být odhadnuta jeho velikost, a pokud je to nutné, musí být příspěvek zahrnut do nejistoty.

Nejistota vzhledem k excentricitě se vypočte dle vzorce [1]

$$u_E = \frac{\frac{d_1}{d_2} \cdot D}{2\sqrt{3}}, \quad 5.30$$

kde D je rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou při zkoušce excentricity provedené podle OIML R 76-2;

d_1 je odhadovaná vzdálenost mezi středy závaží a

d_2 vzdálenost od středu čidla zátěže k jednomu z rohů.

Ve většině případů, je příspěvek k nejistotě u_E již zahrnut do nejistoty u_W vážícího procesu (5.12) a lze zanedbat.

Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}

Pokud má závaží velkou magnetickou susceptibilitu a/nebo je magnetizované, může být vzájemné magnetické působení často sníženo umístěním nemagnetického prostředí mezi závaží a snímač zatížení. Pokud závaží splňuje požadavky tohoto doporučení, může být nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma} , považována za nulovou.

Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}

Kvadráty všech výše popsaných složek nejistoty vah se pod odmocninou sečtou, čímž se získá kombinovaná standardní nejistota vah [1]

$$u_{ba} = \sqrt{u_s^2 + u_d^2 + u_E^2 + u_{ma}^2}. \quad 5.31$$

5.7.3 Kombinovaná standardní nejistota a rozšířená nejistota

Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti zkušebního závaží je dána vztahem [1]

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\overline{\Delta m_c}) + u^2(m_{cr}) + u_b^2 + u_{ba}^2}. \quad 5.32$$

Pokud není použita korekce na vztlak $m_{cr}C$ (5.7), musí být navíc do kombinované nejistoty přidán odpovídající příspěvek na vztlak

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{u_w^2(\overline{\Delta m_c}) + u^2(m_{cr}) + (m_{cr} \cdot C)^2 + u_b^2 + u_{ba}^2}. \quad 5.33$$

Rozšířená nejistota konvenční hmotnosti zkušebního závaží U je pak následující [1]

$$U(m_{ct}) = k \cdot u_c(m_{ct}). \quad 5.34$$

Obvykle se používá koeficient $k = 2$. Nicméně jestliže není souhrnná směrodatná odchylka procesu vážení známa a počet měření nelze rozumně zvýšit až na 10 (jako u velmi velkých závaží a dlouhého vážení), a nejistota, $u_w(\overline{\Delta m_c})$, je dominantní součástí analýzy nejistot, tzn. $u_w(\overline{\Delta m_c}) > u_c(m_{ct})/2$, pak se koeficient k vypočítá z t-rozdělení za předpokladu 95,5 % úrovně spolehlivosti a efektivních stupňů volnosti, v_{eff} vypočtených z Welch-Satterthwaitova vzorce. Koeficient k pro různé efektivní stupně volnosti, v_{eff} , je uveden v tabulce níže. Pokud lze předpokládat, že odhad nejistoty typu B je konzervativní s nekonečným stupněm volnosti, má vzorec tvar

$$v_{eff} = (n - 1) \cdot \frac{u_c^4(m_{ct})}{u_w^4(\overline{\Delta m_c})}. \quad 5.35$$

Tabulka 5.6 koeficient, k , pro různé efektivní stupně volnosti, v_{eff}

v_{eff}	1	2	3	4	5	6	8	10	20	∞
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,37	2,28	2,13	2

6 KALIBRACE VAH

Dalším nezbytným krokem k dosažení kvalitních výsledků při měření hmotnosti s co nejnižší nejistotou měření je kalibrace vah.

Předmětem kalibrace je údaj poskytnutý přístrojem v reakci na aplikovanou zátěž, jehož výsledky jsou vyjádřeny v jednotkách hmotnosti. Hodnota zatížení indikovaná přístrojem je ovlivňována mnoha vnějšími vlivy jako místní gravitací, teplotou a hustotou zátěže, teplotou a hustotou okolního vzduchu.

Samotná nejistota měření významně závisí na vlastnostech daného kalibrovaného přístroje, ale může být do jisté míry snížena zvýšením počtu měření provedených pro kalibraci.

Zejména s ohledem na nákladnost kalibrace a následné využívání přístroje je pak na dohodě mezi kalibrační laboratoří a klientem, aby se stanovili požadovanou nejistotu měření. Je nutné mít na mysli, že větší počet měření sice sníží nejistotu měření, ale zároveň zvýší náklady.

Mezi dokumenty, které jsou zásadní pro kalibraci vah, patří již zmíněné Mezinárodní doporučení OIML R 111-1 pro závaží třídy přesnosti E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 a M3 o nominálních hodnotách hmotností od 1 mg do 5 000 kg [1] a OIML R76 [2], resp. jeho analogická česká norma ČSN EN 45501 metrologické aspekty vah s neautomatickou činností [3], která obsahuje termíny spojené s fungováním, stavbou a metrologickou charakteristikou vah s neautomatickou činností. Samotný postup měření a výpočet s tím spojených nejistot je rozebrán v Guidelines on the calibration of non-automatic weighing instruments [15], shrnujícím pokyny pro kalibraci vah s neautomatickou činností.

6.1 Metody měření

Při kalibraci se vychází ze tří nejvýznamnějších měření, a to z opakovatelnosti indikace, chyby indikace a z účinků excentricity zatížení na indikaci [15].

6.1.1 Zkouška opakovatelnosti

Jedná se o opakované vážení stejné zátěže, za stejných podmínek manipulace se zatížením a přístrojem, a za stálých zkušebních podmínek.

Testovací závaží nemusí být kalibrované ani ověřené, ale mělo by být pokud možno složeno z jednoho kusu.

Testovací závaží L_T by mělo být vybráno v přiměřeném poměru k maximální hodnotě Max a řešení přístroje, aby bylo možné zhodnocení chování přístroje. Pokud mají váhy konstantní dílek stupnice d , je běžné použít zatížení $0,5Max \leq L_T \leq Max$, klient se však může s kalibrační laboratoří dohodnout na jiné, speciální hodnotě L_T , pokud je to odůvodněno s ohledem na specifické použití přístroje.

Zkouška může být provedena jak v jednom zkušebním bodě za užití jednoho zatížení, tak i ve více zkušebních bodech, se zkušebními zatíženími L_{Tj} , $1 \leq j \leq k_L$, kde k_L je počet zkušebních bodů.

Před samotnou zkouškou se musí váhy vytárovat, nastavit na nulu, poté se nejméně pětkrát aplikuje zátěž, v případě, že $L_T \geq 100 \text{ kg}$, sníží se počet vážení na alespoň tři.

Pro každé uložení zátěže se zaznamenávají jednotlivé indikace I_{Li} , přičemž je nutné po každém odstranění zátěže zkontrolovat, zda přístroj vykazuje nulu, a v případě, že tomu tak není, musí být přístroj vytárován. Nevykazuje-li přístroj nulovou hodnotu, je rovněž vhodné provést záznam indikace bez zatížení I_{0i} .

Z n indikací I_{ji} pro dané testovací zatížení L_{Tj} , se vypočte směrodatná odchylka dle vzorce [15]

$$s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (I_{ji} - \bar{I}_j)^2}, \quad 6.1$$

kde

$$\bar{I}_j = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{ji}. \quad 6.2$$

V případě, že bylo použito pouze jedno zkušební zatížení, lze index j vynechat.

6.1.2 Zkouška na chyby indikace

Aby bylo možné posoudit chování přístroje v celém jeho rozsahu vážení, provádí se zkouška na chyby indikace. Pro zjištění této chyby se používá $k_L \geq 5$ různých zkušebních závaží L_{Tj} , $1 \leq j \leq k_L$. Hodnoty těchto zatížení by měly být rovnoměrně rozděleny po celém vázicím rozsahu, případně by na základě dohody mezi klientem a kalibrační laboratoří, měly odpovídat hodnotám, které jsou uživatelem nejčastěji využívány.

Zkušební závaží by měla představována standardním závažím odpovídajícím Mezinárodnímu doporučení OIML R 111 [1].

Před započítáním vlastní zkoušky je opět nutné provést vytárování přístroje. Samotná zkouška pak může probíhat buď tak, že je testovací zátěž po krocích zvyšována s vykládkou mezi jednotlivými kroky, případně bez vykládky, event. může být zátěž rovněž po krocích snižována s vykládkou či bez ní.

Pro každou zátěž jsou zaznamenávány indikace I_{Lj} , přičemž po každém vyjmutí zatížení je nutné zkontrolovat indikaci zobrazení nuly. V případě, že přístroj nulu nevykazuje, je nutné hodnotu indikace bez zatížení I_{L0} zaznamenat a přístroj vytárovat.

Pro každé testovací zatížení L_{Tj} se potom chyba indikace vypočítá dle vzorce [15]

$$E_j = I_j - m_{refj}, \quad 6.3$$

kde údaj I_j je průměrem více než jednoho čtení a je tedy chápán jako průměrná hodnota podle (6.2) a m_{refj} je referenční závaží nebo "skutečná hodnota" zátěže.

Referenční hmotnost je buď jmenovitá hodnota zatížení m_N , pak

$$m_{refj} = m_N, \quad 6.4$$

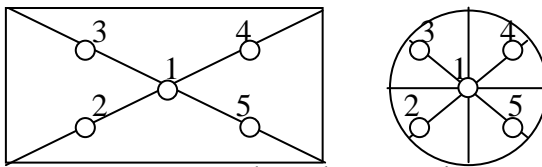
nebo jeho skutečná hodnota m_c

$$m_{refj} = m_{cj} = (m_{Nj} - \delta m_{cj}). \quad 6.5$$

V případě, že se zkušební zátěž se skládá z více než jednoho závaží, nahradí se ve vzorcích výše m_{Nj} výrazem $\sum(m_N)_j$ a δm_{cj} výrazem $\sum(\delta m_c)_j$.

6.1.3 Zkoušky excentricity zatížení

Zkouška excentricity zatížení spočívá v umístění testovací zátěže L_{ECC} , jejíž hodnota by měla být alespoň $Max/3$, na různé pozice na nosiči zatížení tak, že těžiště zátěže je umístěno na pozice uvedené na následujícím obrázku [15].



Obrázek 6.1 Pozice zatížení pro zkoušky excentricity

1. Střed
2. Vpředu vlevo
3. Vzadu vlevo
4. Vzadu vpravo
5. Vpředu vpravo

Shodně, jako tomu bylo u zkoušky opakovatelnosti, nemusí být zkušební zátěž kalibrována ani ověřena.

Před vlastní zkouškou se opět indikace vah nastaví na nulu, následuje kladení testovací zátěže nejprve na pozici 1 a pak do jiné ze 4 poloh v libovolném pořadí, nakonec může být opět položena na pozici 1.

Pro každou pozici zatížení jsou zaznamenány indikace I_{Lj} , přičemž by se měla opět po každém odstranění zátěže zkontrolovat indikace nuly, případně s následovaným vynulováním vah a záznamem indikace bez zatížení I_{L0} .

Z hodnot I_i získaných v různých polohách zatížení lze vypočítat odchylku ΔI_{ecc} dle vzorce [15]

$$\Delta I_{ecc} = I_i - I_1. \quad 6.6$$

V případě, že testovací zatížení sestává ze standardního(ch) závaží, mohou být místo toho chyby indikace vypočteny dle vzorce

$$\Delta I_{ecc} = I_i - m_N. \quad 6.7$$

6.1.4 Pomocná měření

Pokud požadujeme co nejnižší hodnoty nejistot měření, je nezbytné provést ještě pomocná měření, zejména se jedná o účinky vztlaku, teploty, barometrického tlaku, konvekčních účinků či vlivů magnetické interakce.

Teplota vzduchu by měla být alespoň jednou během kalibrace změřena v blízkosti přístroje.

Zvláštní pozornost by měla být věnována opatřením zabráňujícím nadměrným konvekčním účinkům sledováním mezní hodnoty teplotního rozdílu mezi standardním závažím a přístrojem. Proto se doporučuje aklimatizace jak závaží, tak i přístroje v kalibrační laboratoři po stanovenou dobu před zahájením samotné kalibrace.

U přístrojů s vysokým rozlišením se dále doporučuje zjistit, zda jsou pozorovatelné účinky magnetické interakce. Standardní závaží se zvaží s podložkou vyrobenou z nekovového materiálu (např. dřevo, plast), přičemž je podložka umístěna na horní nebo spodní straně závaží pro získání dvou různých indikací. Pokud je rozdíl těchto dvou údajů různý od nuly, mělo by to být uvedeno v kalibračním listu jako varování.

6.2 Nejistoty měření

K hodnotě hmotnosti nebo indikace kalibrovaného přístroje bezesporu náleží i hodnoty s tím souvisejících nejistot, které jsou způsobeny vlivem různých faktorů. Pokud je hodnota nejistoty dělena hodnotou hmotnosti, případně indikací, je pro ni dále užíván zápis \hat{w} , tedy obecně

$$\hat{w} = \frac{u(\delta)}{m} \quad 6.8$$

a související rozšířená nejistota \hat{W} .

6.2.1 Standardní nejistota pro diskrétní hodnoty

Základní vzorec kalibraci je [15]

$$E = I - m_{ref}, \quad 6.9$$

spolu se související nejistotou

$$u^2(E) = u^2(I) + u^2(m_{ref}). \quad 6.10$$

6.2.2 Standardní nejistota indikace

Při zohlednění veškerých zdrojů odchylek indikace korekčními členy δI_{xx} lze hodnotu indikace vyjádřit následovně [15]

$$I = I_L + \delta I_{digL} + \delta I_{rep} + \delta I_{ecc} - I_0 - \delta I_{dig0}. \quad 6.11$$

Veškeré korekce indikace mají očekávanou hodnotu nula. Jejich standardní nejistoty jsou pak rozebrány níže

Standardní nejistota zaokrouhlení bez zatížení

Standardní nejistota zaokrouhlení bez zatížení bere v úvahu zaokrouhlovací chybu indikace vah bez zatížení δI_{dig0} . Příslušný limit je $\pm d_0/2$ nebo, v případě, že byly

váhy přepruty do režimu, pro něj je hodnota dílku menší než d ($d_T < d$), $\pm d_T/2$. Předpokládá se zde rovnoměrné rozdělení. Hodnota této nejistoty je vyjádřena

$$u(\delta I_{dig0}) = d_0/(2\sqrt{3}) \quad 6.12$$

nebo

$$u(\delta I_{dig0}) = \frac{d_T}{(2\sqrt{3})}. \quad 6.13$$

Standardní nejistota zaokrouhlení při zatížení

Standardní nejistota zaokrouhlení při zatížení bere v úvahu zaokrouhlovací chyby indikace při zatížení δI_{digL} . Shodně jako tomu bylo v předchozím případě, jsou příslušné limity $\pm d_I/2$ nebo $\pm d_T/2$; a předpokládá se rovnoměrné rozdělení, proto

$$u(\delta I_{digL}) = d_I/(2\sqrt{3}) \quad 6.14$$

nebo

$$u(\delta I_{digL}) = \frac{d_T}{(2\sqrt{3})}. \quad 6.15$$

Standardní nejistota z opakovatelnosti

Standardní nejistota z opakovatelnosti měření bere v úvahu chyby vlivem nedokonalé opakovatelnosti δI_{rep} . V tomto případě se předpokládá normální rozdělení, proto

$$u(\delta I_{rep}) = s(I_j), \quad 6.16$$

kde se $s(I_j)$ vypočte podle 6.1.

Pokud byl údaj I_j stanoven jako průměr hodnot z n čtení, je odpovídající standardní nejistota rovna

$$u(\delta I_{rep}) = \frac{s(I_j)}{\sqrt{n}}. \quad 6.17$$

Pokud byl proveden pouze jeden test opakovatelnosti, lze tuto směrodatnou odchylku považovat za reprezentativní pro všechny indikace přístroje v posuzovaném rozsahu vážení. Kde bylo stanoveno několik směrodatných odchylek s_j ($s_j = s(I_j)$) pomocí různých zkušebních zatížení, měla by být použita vyšší hodnota ze dvou hodnot směrodatné odchylky s_j .

Je-li standardní odchylka zaznamenána v kalibračním listu, mělo by z ní být jasné, zda je spojena s jednou indikací nebo s průměrem n indikací.

Standardní nejistota vzhledem k excentricitě zatížení

Standardní nejistota vzhledem k excentricitě zatížení zahrnuje chyby vzniklé v

důsledku polohy testovací zátěže L_{ecc} mimo střed těžiště δI_{ecc} . Nejčastější důvod vzniku takové chyby je, pokud se zkušební zátěž skládá z více než jednoho kusu. Tam, kde není možné efekt excentricity zanedbat, je možné postavit odhad jeho velikosti na následujících předpokladech:

- rozdíly uvedené v rovnici 6.6 jsou úměrné vzdálenosti zátěže od centra nosiče zatížení a hodnotě zátěže;
- excentricita účinného těžiště testovací zátěže není větší než $\frac{1}{2}$ hodnoty získané v testu excentricity.

Nejistota vzhledem k excentricitě se s ohledem na maximální rozdíl excentricity $\Delta I_{ecc,i}|_{max}$ odhaduje na [15]

$$\delta I_{ecc} \leq \left\{ \Delta I_{ecc,i}|_{max} / (2 \cdot L_{ecc}) \right\} I. \quad 6.18$$

Vzhledem k předpokládanému rovnoměrnému rozdělení je standardní nejistota

$$u(\delta I_{ecc}) = I |\Delta I_{ecc,i}|_{max} / (2 \cdot L_{ecc} \cdot \sqrt{3}). \quad 6.19$$

nebo v relativním zápisu

$$\hat{w}(\delta I_{ecc}) = |\Delta I_{ecc,i}|_{max} / (2 \cdot L_{ecc} \cdot \sqrt{3}). \quad 6.20$$

Výsledná standardní nejistota indikace

Výsledná standardní nejistota indikace je pak získána ze vztahu [15]

$$u^2(I) = \frac{d_0^2}{12} + \frac{d_I^2}{12} + s^2(I) + \hat{w}^2(\delta I_{ecc}) I^2. \quad 6.21$$

Nejistota $u(I)$ může být konstantní pouze tehdy, pokud je s konstanta a není třeba uvážit žádnou chybu excentricity.

6.2.3 Standardní nejistota referenčního závaží

Hodnota referenčního závaží se vypočte dle vzorce

$$m_{ref} = m_N + \delta m_c + \delta m_B + \delta m_D + \delta m_{conv} + \delta m \dots, \quad 6.22$$

kde pravý krajní termín znamená případné další korekce, které se mohou ve zvláštních podmínkách vyskytovat. Tyto již dále nejsou rozvedeny.

Standardní nejistota konvenční hmotnosti

Standardní nejistota konvenční hmotnosti je korekcí δm_c na jmenovitou hodnotu zátěže m_N k získání skutečné konvenční hodnoty hmotnosti m_c , uvedené v kalibračním listu pro standardní závaží spolu s nejistotou kalibrace U a koeficientem rozšíření k . Standardní nejistota se vypočte ze vzorce

$$u(\delta m_c) = \frac{U}{k}. \quad 6.23$$

V případě, že standardní závaží bylo kalibrováno v rozsahu speciální tolerance Tol , např. na $mpe = \delta_m$ uvedené v Mezinárodním doporučení R 111 [1], Tabulka 5.1, a pokud je použita jeho nominální hodnota m_N , pak $\delta m_c = 0$. V tomto případě se předpokládá rovnoměrné rozdělení, a proto

$$u(\delta m_c) = \frac{Tol}{\sqrt{3}}. \quad 6.24$$

Pokud se testovací zátěž skládá z více než jednoho standardního závaží, je standardní nejistota dána aritmetickým součtem. Není tedy součtem čtverců.

V případě použití standardního závaží v souladu s Mezinárodním doporučením R 111 [1], může být v rovnici 6.24 nahrazeno Tol hodnotou mpe . Pro závaží $m_N \geq 0,1 \text{ kg}$ je kvocient mpe/m_N konstantní pro všechna závaží, která patří do stejné třídy přesnosti, $mpe = c_{class}m_N$. Hodnoty c_{class} jsou uvedeny v Tabulka 6.1 [15]

Tabulka 6.1 kvocient $c_{class} = mpe/m_N$ pro standardní závaží $m_N \geq 100 \text{ g}$ podle R 111 [1]

Třída	$c_{class} \cdot 10^6$
E ₁	0,5
E ₂	1,6
F ₁	5
F ₂	16
M ₁	50
M ₂	160
M ₃	500

V případě použití závaží o jmenovité hodnotě $2 \cdot 10^n$ z tříd přesnosti E₂, F₂ a M₂, by měla být hodnota $c_{class} \cdot 10^6$ nahrazena hodnotami 1,5, 15 a 150.

Rovnice 6.24 pak je modifikována na

$$u(\delta m_c) = \frac{c_{class} \cdot m_N}{\sqrt{3}} \quad 6.25$$

nebo jako relativní standardní nejistota

$$\hat{w}(\delta m_c) = \frac{c_{class}}{\sqrt{3}}. \quad 6.26$$

Korekce na vztlak vzduchu

Korekce na vztlaku vzduchu δm_B je ovlivněna hodnotami skutečné hustoty závaží ρ_s , a skutečné hustoty vzduchu ρ_{as} , která platí pro justování. Tyto hodnoty obvykle nejsou známy. Předpokládá se však, že bylo použito závaží o referenční hustotě, a tedy $\rho_s = \rho_c$. Celkový výraz pro korekci na vztlak vzduchu je [15]

$$\delta m_B = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{(\rho_a - \rho_{as})}{\rho_c} \right]. \quad 6.27$$

Pro hodnotu hustoty vzduchu ρ_{as} jsou pak uvažovány za dvě situace:

A Přístroj je justován bezprostředně před kalibrací, aby $\rho_{as} = \rho_a$. To zjednodušují rovnici 6.27 na

$$\delta m_B = -m_N \cdot (\rho_a - \rho_0) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right). \quad 6.28$$

Relativní standardní nejistota je tedy vyjádřena

$$\hat{w}(m_B) = u^2(\rho_a) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + \frac{(\rho_a - \rho_0)^2 \cdot u^2(\rho)}{\rho^4}. \quad 6.29$$

B Přístroj byl justován nezávisle na kalibraci při neznámé hustotě vzduchu ρ_{as} , pro niž je možné uvažovat z následujících variant:

B1 Pro kalibrace na místě lze pro ρ_{as} očekávat podobné hodnoty jako ρ_a , s možnou odchylkou jako $\delta\rho_{as} = \rho_a - \rho_{as}$. 6.27 se pak zjednoduší na

$$\delta m_B = -m_N \left[(\rho_a - \rho_0) \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right) + \frac{\delta\rho_{as}}{\rho_c} \right], \quad 6.30$$

s relativní standardní nejistotou

$$\hat{w}(m_B) = u^2(\rho_a) \cdot \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_c} \right)^2 + \frac{(\rho_a - \rho_0)^2 \cdot u^2(\rho)}{\rho^4} + \frac{u^2(\delta\rho_{as})}{\rho_c^2}. \quad 6.31$$

B2 Jednoduše předpokládáme, že $\rho_{as} = \rho_0$, pak

$$\delta m_B = -m_N \cdot \frac{(\rho_a - \rho_0)}{\rho}, \quad 6.32$$

s relativní standardní nejistotou

$$\hat{w}(m_B) = \frac{u^2(\rho_a)}{\rho^2} + \frac{(\rho_a - \rho_0)^2 \cdot u^2(\rho)}{\rho^4}. \quad 6.33$$

Hodnoty ρ , $u(\rho)$, ρ_a a $u(\rho_a)$ použité pro určení relativní standardní nejistoty mohou být známy z kalibračních listů.

Hustotu vzduchu ρ_a a její standardní nejistotu lze vypočítat z hodnot teploty a barometrického tlaku, nebo mohou být odhadnuty z výšky nad mořem.

Pro případ B1 lze rozdíl $\delta\rho_{as}$ považovat za nulový s vhodnou nejistotou $u(\delta\rho_{as})$, pro kterou by měl být stanoven limit $\Delta\rho_{as}$ s ohledem na proměnlivost atmosférického tlaku a teploty v místě, po delší časové období.

V případě, že bylo použito standardní závaží odpovídající mezinárodnímu doporučení R 111 [1], a nejsou známy žádné informace o ρ a ρ_a , a hustota materiálu použitého pro závaží je taková, aby 10% odchylka od zadané hustoty vzduchu ($1,2 \text{ kg/m}^3$) nevytvořila chybu přesahující jednu čtvrtinu maximální dovolené chyby, nepoužije se žádná korekce a relativní nejistota je

pro případ A

$$\hat{w}(m_B) = \frac{mpe}{4m_N\sqrt{3}} \quad 6.34$$

a pro případy B1 a B2

$$\hat{w}(m_B) = \frac{0,1 \rho_0 + \frac{mpe}{4m_N}}{\rho_c \sqrt{3}} \quad 6.35$$

Vzhledem k tomu, že hustota materiálů použitých pro standardní závaží je obvykle blíže k ρ_c než limity uvedené v mezinárodním doporučení R111 [1], mohou být poslední dva vzorce považovány za horní hranice pro $\hat{w}(m_B)$.

Korekce na drift konvenční hodnoty hmotnosti od poslední kalibrace

Korekce na možný drift konvenční hodnoty hmotnosti m_c od poslední kalibrace δm_D je vyjádřena mezní hodnotou D_r založenou na rozdílu hodnot konvenční hmotnosti m_c zjevného z po sobě následujících kalibračních certifikátů standardních závaží.

Pokud nám tato mezní hodnota D_r není známa, lze ji odhadnout s ohledem na kvalitu závaží, a frekvenci a péči o jejich použití, jako násobek jejich rozšířené nejistoty $U(m_c)$:

$$D_r = k_D \cdot U(m_c), \quad 6.36$$

kde k_D může být vybráno od 1 do 3.

U této korekce se předpokládá nulová hodnota a rovnoměrné rozložení v rámci $\pm D_r$. Standardní nejistota je pak vyjádřena

$$u(\delta m_D) = \frac{D_r}{\sqrt{3}} \quad 6.37$$

Pro závaží, která odpovídají R111 [1], může být hodnota D_r odhadnuta z $D_r \leq mpe$.

Korekce na konvekční účinky

Korekce na konvekční účinky δm_{conv} je opět charakterizována mezní hodnotou Δm_{conv} a může být určena v závislosti na známém rozdílu teplot ΔT a na hmotnosti standardního závaží.

Následující tabulka uvádí hodnoty pro Δm_{conv} pro standardní závaží, pro teplotní rozdíly ΔT . Podmínky panující při kalibraci "normálních" závaží jsou odlišné, hodnoty v tabulce by se tedy měly považovat za odhady účinků, které lze očekávat při skutečné kalibraci. Zmíněné limity vzhledem k vlivu konvekce jsou relevantní pouze pro závaží třídy přesnosti E₂ a F₁ dle R111.

Tabulka 6.2 Změna zdánlivé hmotnosti Δm_{conv}

Změna Δm_{conv} v mg standardního závaží, pro vybrané teplotní rozdíly ΔT								
	ΔT (K)							
m (kg)	20	15	10	7	5	3	2	1
50	113,23	87,6	60,23	43,65	32,27	20,47	14,3	7,79
20	49,23	38	23,43	19,25	14,3	9,14	6,42	3,53

10	23,43	20,47	14,3	10,45	7,79	5,14	3,53	1,96
5	14,3	11,1	7,79	5,72	4,28	2,76	1,96	1,09
2	6,42	5,01	3,53	2,61	1,96	1,27	0,91	0,51
1	3,53	2,76	1,96	1,45	1,09	0,72	0,51	0,29
0,5	1,96	1,54	1,09	0,81	0,61	0,40	0,29	0,17
0,2	0,91	0,72	0,51	0,38	0,29	0,19	0,14	0,08
0,1	0,51	0,40	0,29	0,2	0,17	0,11	0,08	0,05
0,05	0,29	0,23	0,17	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03
0,02	0,14	0,11	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01
0,01	0,08	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01

Korekce se však běžně neuvádí. Předpokládá se u ní rovnoměrné rozložení v rámci $\pm\Delta m_{conv}$ a standardní nejistota je vyjádřena vzorcem

$$u(\delta m_{conv}) = \frac{\Delta m_{conv}}{\sqrt{3}}. \quad 6.38$$

Výsledná standardní nejistota referenční hmotnosti

Standardní nejistota referenční hmotnosti se vypočte dle vztahu

$$u^2(m_{ref}) = u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv}). \quad 6.39$$

6.2.4 Standardní nejistota chyby

Standardní nejistota chyby se vypočte ze vzorce

$$u^2(E) = \frac{d_0^2}{12} + \frac{d_I^2}{12} + s^2(I) + u^2(\delta I_{ecc}) + u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_{conv}) \quad 6.40$$

nebo v případě relativní nejistoty ze vzorce

$$u^2(E) = \frac{d_0^2}{12} + \frac{d_I^2}{12} + s^2(I) + \hat{w}^2(\delta I_{ecc})I^2 + \{\hat{w}^2(m_c) + \hat{w}^2(m_B) + \hat{w}^2(m_D)\}m_{ref}^2 + u^2(\delta m_{conv}). \quad 6.41$$

Všechny vstupní veličiny jsou považovány za nekorelované a kovariance tedy nejsou brány v úvahu.

V případě, že poslední členy ve vzorcích 6.40 a 6.41 jsou malé ve srovnání s prvními třemi členy, nejistota všech chyb stanovených v celém rozsahu vážení se pravděpodobně příliš nezmění. V opačném případě musí být nejistota vypočtena pro každou indikaci.

Výrazy použité ve vzorcích 6.40 a 6.41 pak mohou být seskupeny do jednoduchého vzorce, který lépe odráží skutečnost, že některé z výrazů mají absolutní povahu, zatímco jiné jsou úměrné indikaci:

$$u^2(E) = \alpha^2 + \beta^2 \cdot I^2. \quad 6.42$$

6.2.5 Rozšířená nejistota při kalibraci

Rozšířená nejistota chyby je

$$U(E) = k \cdot u(E). \quad 6.43$$

Koeficient rozšíření k , by měl být zvolen tak, aby rozšířená nejistota odpovídala pravděpodobnosti pokrytí přibližně 95 %.

Hodnota $k = 2$, což odpovídá 95,5 % pravděpodobnosti, platí, pokud:

- a) lze chybě indikace přičíst normální (Gaussovo) rozdělení, a
- b) standardní nejistota $u(E)$ je dostatečně spolehlivá, tj. má dostatečný počet stupňů volnosti.

To znamená, že žádný z příspěvků s jiným než normálním rozdělením, nemá dominantní hodnoty.

Koeficient rozšíření se volí podle tvaru rozdělení dominantní složky nejistoty, pro normální rozdělení již byl zmíněn koeficient rozšíření $k = 2$, pro další typy rozdělení je přibližně:

- pro rovnoměrné rozdělení: $k = 1,65$,
- pro trojúhelníkové rozdělení: $k = 1,9$,
- pro U-typ distribuce: $k = 1,41$.

Dostatečná spolehlivost závisí na efektivních stupních volnosti. Toto kritérium je splněno, pokud je příspěvek nejistoty metodou typu A $u(y)$ stanoven na základě méně než 10 pozorování.

Nemá-li standardní nejistota potřebný počet stupňů volnosti, pak se koeficient, k , vypočítá z t -rozdělení za předpokladu 95,5 % úrovně spolehlivosti a efektivních stupňů volnosti, v_{eff} vypočtených z Welch-Satterthwaitova vzorce. Koeficient, k , pro různé efektivní stupně volnosti, v_{eff} , je uveden v

Tabulka 5.6. Pokud lze předpokládat, že odhad nejistoty typu B je konzervativní s nekonečným stupněm volnosti, má vzorec tvar

$$v_{eff} = (n - 1) \cdot \frac{u^4(E)}{u^4(\delta I_{rep})}. \quad 6.44$$

Je přípustné určit pouze jednu hodnotu k pro "nejhorší" situaci stanovenou podle zkušeností. Tato hodnota pak může být použita pro standardní nejistoty všech chyb stejného rozsahu vážení.

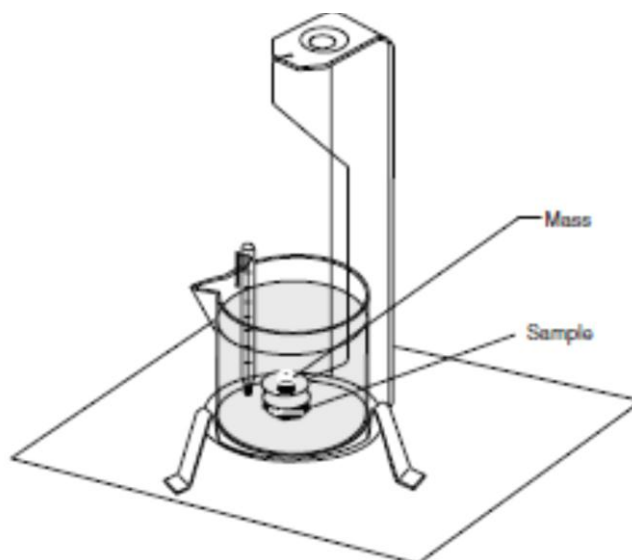
7 PRAKTICKÁ ČÁST

7.1 Kalibrace sady závaží s vybavením VUT ústavu elektrotechnologie

Kalibrace sady závaží byla prováděna přímou metodou srovnání s referenčním závažím, využitím cyklů ABBA, tedy postupným vážením referenčního závaží, testovacího závaží, druhého vážení testovacího závaží a opět referenčního závaží.

Testovací závaží je neznámé značky, jedná se o třídu přesnosti F2, bližší údaje o hustotě materiálu, případné kalibraci a jejich podmínkách či nejistotách nejsou známy. Bylo tedy nutné nejprve provést měření hustoty jednotlivých závaží.

Za pomoci speciální soupravy pro měření hustoty příslušející k digitálním vahám Ohaus Explorer EX244, která je zobrazena na Obrázek 7.1, bylo závaží nejprve zváženo na vzduchu a následně v kapalině známé hustoty.



Obrázek 7.1 Příslušenství k vahám Ohaus Explorer EX244 [16]

Z kalibračního listu vah Ohaus Explorer EX244 byla vyčtena standardní odchylka vážení 0,0001 g a rozlišitelnost 0,0001 g [16].

Pro účely zjištění hustoty závaží byla využita lázeň s deionizovanou vodou, u níž byla odečtena teplota 27,1 °C, čemuž odpovídá hustota vody 0,9965 g/cm³. Tato hodnota byla zadána jako výchozí hodnota hustoty kapaliny v nastavení vah Ohaus Explorer EX244.

Jak již bylo řečeno, vychází váhy z dvou měření hmotností, a to z vážení závaží na vzduchu a následného vážení závaží v kapalině, v našem případě v neionizované vodě. Následně stanoví hustotu závaží podle vzorce

$$\rho = \frac{A}{A - B} \cdot \rho_v, \quad 7.1$$

kde A je hmotnost tělesa na vzduchu,

B je hmotnost tělesa v kapalině

ρ_v je hustota vody a

ρ je měřená hustota tělesa.

Provedenými měřeními byly zjištěny následující hodnoty:

Tabulka 7.1 Výpočet hustoty testovacích závaží

Jmenovitá hodnota závaží (g)	Hmotnost závaží na vzduchu (g)	Hmotnost závaží v kapalině (g)	Hustota závaží (g/cm ³)
1	1,0012	0,877	8,032977
2	2,0006	1,7561	8,153775
5	4,9956	4,3981	8,331574
10	9,9972	8,8051	8,356857
20	20,0006	17,5747	8,215754
50	49,9953	44,0702	8,40835
100	99,9889	88,1452	8,412822

7.1.1 Kalibrace závaží 1g metodou ABBA

Jak již bylo výše uvedeno, bylo postupováno přímou metodou srovnání s referenčním závažím, a to metodou ABBA.

Nejprve bylo provedeno čtení z kalibračního listu kalibrovaného referenčního závaží výrobce Radwag třídy přesnosti E2, z něhož byly zjištěny následující informace:

Tabulka 7.2 Údaje z kalibračního listu referenčního závaží

Nástroj:	Referenční závaží – popis a identifikace
Hmotnost - m_{cr}	1,000004 g
Rozšířená nejistota - U	0,01 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³

Testovací závaží je rovněž jmenovité hodnoty 1g a jeho změřená hustota je 8032,2 kg/m³.

Následně bylo nezbytné zjistit okolní podmínky na pracovišti, tedy zejména teplotu, tlak a vlhkost prostředí. K tomu bylo využito přístrojů:

- Teploměr s vlhkoměrem značky TPCAL 100/25 DKD, Prema 3040, General Eastern, u něhož byly z kalibračního listu odečteny přesnosti měření vlhkosti $\pm 1,5\%$ a pro měření teploty $\pm 0,03\text{ }^\circ\text{C}$.
- Digitální barometr GFTB 100, u něhož byla z kalibračního listu odečtena přesnost měření $\pm 1,5\text{ hPa}$.

Z nich byly odečteny následující hodnoty:

Tabulka 7.3 Podmínky prostředí v laboratoři

Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	15,4 %
Teplota - t [°C]	24,22 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,155 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,71 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³

Hustota vzduchu během kalibrace ρ_a byla stanovena dle vztahu 5.21 a jí odpovídající nejistota hustoty vzduchu během kalibrace $u(\rho_a)$ ze vztahu 5.23.

V daném případě byl tedy výpočet hustoty vzduchu následovný

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot 990,2 - 0,009 \cdot 15,4 \cdot \exp(0,0061 \cdot 24,22)}{273,15 + 24,22} = 1,155 \text{ kg/m}^3$$

a v případě odpovídají nejistoty

$$u^2(\rho_a) = (10^{-4})^2 + \left(10^{-5} \cdot 1,155 \cdot \frac{1,5}{2}\right)^2 + \left(3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,155 \cdot \frac{1,5}{2}\right)^2 + \left(-10^{-2} \cdot 1,155 \cdot \frac{0,03}{2}\right)^2 = 8,71 \cdot 10^{-6}.$$

Jelikož se z kalibračního listu vah Ohaus Explorer EX244 nepodařilo zjistit, zda byly váhy kalibrovány citlivostním závažím, byl učiněn dotaz přímo u výrobce, který e-mailovou korespondencí sdělil, že citlivostního závaží použito nebylo.

Nejistota vzhledem k excentricitě zatížení je zahrnuta v nejistotě samotného vážení stanovené metodou typu A, $u_w(\overline{\Delta m_c})$.

Vzhledem ke skutečnosti, že při vážení bylo použito hliníkové misky vah, lze hodnotu nejistoty vzhledem k magnetizmu považovat za zanedbatelnou.

Standardní nejistota vážení stanovená metodou typu A

Konečně bylo přistoupeno k samotnému vážení závaží. Následující tabulka shrnuje údaje odečtené z vah při provedených váženích. Před započítáním vážení a mezi jednotlivými umístěními závaží bylo nezbytné sledovat, zda váhy vykazují nulovou hodnotu, a v případě, že tomu tak nebylo, bylo nezbytné váhy vytárovat.

Pro úplnost nutno dodat, že hodnota $I_{r1\ 1}$ značí první vážení referenčního závaží v prvním cyklu ABBA, hodnota $I_{t1\ 1}$ první vážení testovacího závaží v prvním cyklu ABBA, atd..

Tabulka 7.4 Hodnoty získané při kalibraci závaží 1g metodou ABBA

Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 1}$	1,0009
Testovací - $I_{t2\ 1}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 1}$	0,9998
ΔI_1	-0,00105
Referenční - $I_{r1\ 2}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 2}$	1,0008
Testovací - $I_{t2\ 2}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 2}$	1,0000
ΔI_2	-0,0009
Referenční - $I_{r1\ 3}$	1,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	1,0009
Testovací - $I_{t2\ 3}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 3}$	0,9999
ΔI_3	-0,00095

Referenční - $I_{r1\ 4}$	1,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	1,0010
Testovací - $I_{t2\ 4}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 4}$	1,0001
ΔI_4	-0,0009
Referenční - $I_{r1\ 5}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 5}$	1,0009
Testovací - $I_{t2\ 5}$	1,0008
Referenční - $I_{r2\ 5}$	1,0000
ΔI_5	-0,0009

Hodnoty ΔI_1 až ΔI_5 byly stanoveny dle vzorce 5.3, např. tedy pro první cyklus ABBA byl výpočet následující

$$\Delta I_1 = \frac{(0,9999 - 1,0009 - 1,0009 + 0,9998)}{2} = -0,00105 \text{ g.}$$

Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci} , mezi testovacím a referenčním závažím v i -tém cyklu ABBA byl stanoven dle vzorců 5.7 a 5.8, tedy opět pro případ prvního cyklu následovně

$$C_i = (1,155 - 1,2) \cdot \left(\frac{1}{8032,2} - \frac{1}{8000} \right) = 2,269 \cdot 10^{-8},$$

pak

$$\Delta m_{ci} = -0,00105 - 1,000004 \cdot 2,269 \cdot 10^{-8} = -0,00105 \text{ g.}$$

Pro našich $n = 5$ cyklů je pak průměrná odchylka konvenční hmotnosti

$$\overline{\Delta m_c} = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 (-0,00105 - 0,0009 - 0,00095 - 0,0009 - 0,0009) = -0,00094 \text{ g.}$$

Rozptyl rozdílu hmotností, Δm_c , z procesu vážení, $s^2(\Delta m_c)$, byl odhadnut z $n = 5$ cyklů měření v souladu se vztahem 5.14 jako

$$\begin{aligned} s^2(\Delta m_c) &= \frac{1}{5-1} \sum_{i=1}^5 (-0,00105 + 0,00094)^2 + (-0,0009 + 0,00094)^2 \\ &\quad + (-0,00095 + 0,00094)^2 + (-0,0009 + 0,00094)^2 \\ &\quad + (-0,0009 + 0,00094)^2 = 4,25 \cdot 10^{-9} \text{ g} \end{aligned}$$

a konečně nejistota vážení stanovená metodou typu A byla vypočtena dle vzorce 5.12 jako

$$u_w(\overline{\Delta m_c}) = \frac{4,25 \cdot 10^{-9}}{\sqrt{5}} = 2,915 \cdot 10^{-5} \text{ g.}$$

Standardní nejistota stanovená metodou typu B

Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$

Standardní nejistota hmotnosti referenčního závaží, $u(m_{cr})$ vypočtená z údajů uvedených kalibračním listu ve smyslu vzorce 5.16 a při předpokládané nejistotě $u_{inst}(m_{cr}) = 0$ činí

$$u(m_{cr}) = \sqrt{\left(\frac{0,00001}{2}\right)^2} = 0,000005 \text{ g.}$$

Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b (typ B)

Nejistotu korekce na vztlak vzduchu vypočteme z rovnice 5.18 následovně

$$u_b^2 = \left[1,000004 \cdot \frac{(8000 - 8032,2)}{8000 \cdot 8032,2} \cdot 8,71 \cdot 10^{-6} \right]^2 + [1,000004 \cdot (8000 - 8032,2)]^2 \cdot \frac{70^2}{8000^4} + 1,000004^2 \cdot (8000 - 8032,2) \cdot [(8000 - 8032,2) - 2 \cdot (1,2 - 1,2)] \cdot \frac{70^2}{8000^4} = 4,906 \cdot 10^{-15} \text{ g.}$$

Nejistota vah u_{ba} (typ B)

Nejistota vzhledem k citlivosti vah je $u_s^2 = 0$, když předmětné váhy nebyly kalibrovány citlivostním závažím.

Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy

Jak již bylo řečeno, byla z kalibračního listu vah Ohaus Explorer EX244 vyčtena rozlišitelnost 0,0001 g [16]. Nejistota vzhledem k rozlišení displeje je vypočtena dle vztahu 5.29 tedy

$$u_d = \left(\frac{0,0001/2}{\sqrt{3}}\right) \cdot \sqrt{2} = 4,082 \cdot 10^{-5} \text{ g.}$$

Příspěvek k nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E je již zahrnut do nejistoty u_W vážicího procesu (5.12) a lze zanedbat.

Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma} , je s ohledem na požití hliníkové vážicí misky, považována za nulovou.

Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}

V našem případě tedy kombinovaná standardní nejistota vah vycházející ze vztahu 5.31 odpovídá vztahu

$$u_{ba} = u_d = 4,082 \cdot 10^{-5} \text{ g.}$$

Kombinovaná standardní nejistota

Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží 1 g je pak v souladu se vztahem 5.32 vypočtena

$$u_c(m_{ct}) = \sqrt{(2,915 \cdot 10^{-5})^2 + (5 \cdot 10^{-5})^2 + 4,906 \cdot 10^{-15} + (4,082 \cdot 10^{-5})^2} \\ = 5,0415 \cdot 10^{-5} \text{ g.}$$

Rozšířená nejistota

Rozšířená nejistota konvenční hmotnosti zkušební závaží U se vypočte dle vzorce 5.34, vzhledem ke skutečnosti, že bylo provedeno pouze pět měření, byl použit odhad stupňů volnosti dle vzorce 5.35,

$$v_{eff} = (5 - 1) \cdot \frac{(5,0415 \cdot 10^{-5})^4}{(2,915 \cdot 10^{-5})^4} = 35,76$$

podle Tabulka 5.6 koeficient, k , pro různé efektivní stupně volnosti, v_{eff} Tabulka 5.6 byl stanoven koeficient $k = 2$.

Konečně rozšířená nejistota vypočtena

$$U(m_{ct}) = 2 \cdot 5,0415 \cdot 10^{-5} = 0,000101 \text{ g.}$$

Shrme tedy veškerá data do bilanční tabulky.

Tabulka 7.5 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	1,000 004 g
Rozšířená nejistota - U	0,01 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	1 g
Hustota závaží - ρ_t	8032,2 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	15,4 %
Teplota - t [°C]	24,22 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,155 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,71 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1 1}$	0,9999
Testovací - $I_{t1 1}$	1,0009
Testovací - $I_{t2 1}$	1,0009
Referenční - $I_{r2 1}$	0,9998
ΔI_1	-0,00105
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00105
Referenční - $I_{r1 2}$	0,9999
Testovací - $I_{t1 2}$	1,0008
Testovací - $I_{t2 2}$	1,0009
Referenční - $I_{r2 2}$	1,0000

ΔI_2	-0,0009
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0009
Referenční - $I_{r1\ 3}$	1,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	1,0009
Testovací - $I_{t2\ 3}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 3}$	0,9999
ΔI_3	-0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00095
Referenční - $I_{r1\ 4}$	1,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	1,0010
Testovací - $I_{t2\ 4}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 4}$	1,0001
ΔI_4	-0,0009
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0009
Referenční - $I_{r1\ 5}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 5}$	1,0009
Testovací - $I_{t2\ 5}$	1,0008
Referenční - $I_{r2\ 5}$	1,0000
ΔI_5	-0,0009
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0009
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,00094 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$4,25 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\Delta m_c)$	$2,915 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000005 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,906 \cdot 10^{-15}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$5,0415 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	35,765
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000101

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 1g tedy činí $1,00094 \pm 0,00010$ g.

7.1.2 Kalibrace závaží 1g metodou ABA

Pro porovnání je vhodné ukázat, jakých výsledků by bylo dosaženo, pokud by bylo postupováno přímým srovnáním v souladu s metodou ABA, tedy, pokud bychom měřili referenční závaží, testovací závaží pouze jedenkrát a poté opět referenční závaží. Při výpočtech by bylo postupováno dle shodných vzorců, pouze s výjimkou vzorce

(5.3), který je nahrazen vzorcem (5.4).

Závěrečná bilanční tabulka by pak vypadala následovně:

Tabulka 7.6 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	1,000 004 g
Rozšířená nejistota - U	0,01 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	1 g
Hustota závaží - ρ_t	8032,2 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	15,4 %
Teplota - t [°C]	24,22 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,155 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,71 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 1}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 1}$	0,9998
ΔI_1	0,00105
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00105
Referenční - $I_{r1\ 2}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 2}$	1,0008
Referenční - $I_{r2\ 2}$	1,0000
ΔI_2	0,00085
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00085
Referenční - $I_{r1\ 3}$	1,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 3}$	0,9999
ΔI_3	0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00095
Referenční - $I_{r1\ 4}$	1,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	1,0010
Referenční - $I_{r2\ 4}$	1,0001
ΔI_4	0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00095
Referenční - $I_{r1\ 5}$	0,9999
Testovací - $I_{t1\ 5}$	1,0009
Referenční - $I_{r2\ 5}$	1,0000
ΔI_5	0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00095

Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,00095 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$5 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\Delta m_c)$	$3,16 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000005 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,906 \cdot 10^{-15}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$5,188 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	28,98
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000104

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 1g tedy činí $1,00094 \pm 0,00010$ g.

Analogicky bylo postupováno i při kalibracích ostatních závaží jmenovitých hodnot 2 g, 5 g, 10 g, 50 g a 100 g.

Zde již budou pro přehlednost uvedeny pouze závěrečné bilanční tabulky s uvedením veškerých měřených hodnot i výsledků získaných výpočty dle vzorců jako v případě kalibrace závaží jmenovité hodnoty 1 g výše.

7.1.3 Kalibrace závaží 2 g metodou ABBA

Tabulka 7.7 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 2 g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	2,000 018 g
Rozšířená nejistota - U	0,013 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	2 g
Hustota závaží - ρ_t	8153 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	14,8 %
Teplota - t [°C]	24,18 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,155 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,716 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - I_{r1}	2,0001

Testovací - $I_{t1\ 1}$	2,0008
Testovací - $I_{t2\ 1}$	2,0007
Referenční - $I_{r2\ 1}$	2,0000
ΔI_1	-0,0007
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0007
Referenční - $I_{r1\ 2}$	2,0000
Testovací - $I_{t1\ 2}$	2,0007
Testovací - $I_{t2\ 2}$	2,0007
Referenční - $I_{r2\ 2}$	2,0000
ΔI_2	-0,0007
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0007
Referenční - $I_{r1\ 3}$	1,9999
Testovací - $I_{t1\ 3}$	2,0008
Testovací - $I_{t2\ 3}$	2,0007
Referenční - $I_{r2\ 3}$	2,0000
ΔI_3	-0,0008
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0008
Referenční - $I_{r1\ 4}$	2,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	2,0008
Testovací - $I_{t2\ 4}$	2,0007
Referenční - $I_{r2\ 4}$	2,0001
ΔI_4	-0,0007
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0007
Referenční - $I_{r1\ 5}$	1,9999
Testovací - $I_{t1\ 5}$	2,0007
Testovací - $I_{t2\ 5}$	2,0007
Referenční - $I_{r2\ 5}$	1,9999
ΔI_5	-0,0008
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0008
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,00074 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$3 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$2,449 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,0000065 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,931 \cdot 10^{-14}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$4,805 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	59,234
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000096

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 2 g tedy činí $2,00076 \pm 0,00009$ g.

7.1.4 Kalibrace závaží 2 g metodou ABA

Tabulka 7.8 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 2 g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	2,000 018 g
Rozšířená nejistota - U	0,013 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	2 g
Hustota závaží - ρ_t	8153 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	14,8 %
Teplota - t [°C]	24,18 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,155 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	8,716 · 10 ⁻⁶ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1 1}$	2,0001
Testovací - $I_{t1 1}$	2,0008
Referenční - $I_{r2 1}$	2,0000
ΔI_1	0,00075
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00075
Referenční - $I_{r1 2}$	2,0000
Testovací - $I_{t1 2}$	2,0007
Referenční - $I_{r2 2}$	2,0000
ΔI_2	0,0007
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0007
Referenční - $I_{r1 3}$	1,9999
Testovací - $I_{t1 3}$	2,0008
Referenční - $I_{r2 3}$	2,0000
ΔI_3	0,00085
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00085
Referenční - $I_{r1 4}$	2,0000
Testovací - $I_{t1 4}$	2,0008
Referenční - $I_{r2 4}$	2,0001
ΔI_4	0,00075
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00075
Referenční - $I_{r1 5}$	1,9999
Testovací - $I_{t2 5}$	2,0007
Referenční - $I_{r2 5}$	1,9999
ΔI_5	0,0008
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0008
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,00077 g

Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$3,25 \cdot 10^{-9} \text{g}$
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$2,549 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,0000065 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,931 \cdot 10^{-15} \text{g}$
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$4,857 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	52,68
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000097

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 2 g tedy činí $2,00076 \pm 0,0001 \text{g}$.

7.1.5 Kalibrace závaží 5 g metodou ABBA

Tabulka 7.9 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	5,000 016 g
Rozšířená nejistota - U	0,016 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží- $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,2 \text{kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	5 g
Hustota závaží - ρ_t	$8329,4 \text{kg/m}^3$
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	14 %
Teplota - t [°C]	24,03 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	$1,156 \text{kg/m}^3$
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,73 \cdot 10^{-6} \text{kg/m}^3$
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	4,9999
Testovací - $I_{t1\ 1}$	4,9959
Testovací - $I_{t2\ 1}$	4,9958
Referenční - $I_{r2\ 1}$	5,0000
ΔI_1	0,0041
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0041
Referenční - $I_{r1\ 2}$	4,9998
Testovací - $I_{t1\ 2}$	4,9964

Testovací - $I_{t2\ 2}$	4,9961
Referenční - $I_{r2\ 2}$	5,0001
ΔI_2	0,0037
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0037
Referenční - $I_{r1\ 3}$	5,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	4,9960
Testovací - $I_{t2\ 3}$	4,9961
Referenční - $I_{r2\ 3}$	5,0001
ΔI_3	0,004
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,004
Referenční - $I_{r1\ 4}$	5,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	4,9959
Testovací - $I_{t2\ 4}$	4,9960
Referenční - $I_{r2\ 4}$	5,0000
ΔI_4	0,00405
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00405
Referenční - $I_{r1\ 5}$	5,0000
Testovací - $I_{t1\ 5}$	4,9962
Testovací - $I_{t2\ 5}$	4,9961
Referenční - $I_{r2\ 5}$	5,0002
ΔI_5	0,00395
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00395
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,00396 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$2,43 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$6,964 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000008 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,16 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$8,112 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	7,364
Koeficient rozšíření - k	2,4
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000195

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 5 g tedy činí $4,99606 \pm 0,0002$ g.

7.1.6 Kalibrace závaží 5 g metodou ABA

Tabulka 7.10 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	5,000 016 g

Rozšířená nejistota - U	0,016 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	5 g
Hustota závaží - ρ_t	8329,4 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,2 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	14 %
Teplota - t [°C]	24,03 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,156 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,73 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	4,9999
Testovací - $I_{t1\ 1}$	4,9959
Referenční - $I_{r2\ 1}$	5,0000
ΔI_1	-0,0040
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00405
Referenční - $I_{r1\ 2}$	4,9998
Testovací - $I_{t1\ 2}$	4,9964
Referenční - $I_{r2\ 2}$	5,0001
ΔI_2	-0,00355
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00355
Referenční - $I_{r1\ 3}$	5,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	4,9960
Referenční - $I_{r2\ 3}$	5,0001
ΔI_3	-0,00405
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00405
Referenční - $I_{r1\ 4}$	5,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	4,9959
Referenční - $I_{r2\ 4}$	5,0000
ΔI_4	-0,0041
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0041
Referenční - $I_{r1\ 5}$	5,0000
Testovací - $I_{t1\ 5}$	4,9962
Referenční - $I_{r2\ 5}$	5,0002
ΔI_5	-0,0039
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0039
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,00393 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$5,08 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$10,07 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000008 g
Nejistota opravy vzlaku vzduchu, u_b^2	$1,16 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána

Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$10,9 \cdot 10^{-5} \text{g}$
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	5,48
Koeficient rozšíření - k	2,6
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000283

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 5 g tedy činí $4,99606 \pm 0,00028 \text{g}$.

7.1.7 Kalibrace závaží 10 g metodou ABBA

Tabulka 7.11 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 10 g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	10,000 01 g
Rozšířená nejistota - U	0,02 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží- $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,2 \text{kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	10 g
Hustota závaží - ρ_t	$8356,8 \text{kg/m}^3$
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,4 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	12,85 %
Teplota - t [°C]	23,52 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	$1,159 \text{kg/m}^3$
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,769 \cdot 10^{-6} \text{kg/m}^3$
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	10,0000
Testovací - $I_{t1\ 1}$	9,9991
Testovací - $I_{t2\ 1}$	9,9993
Referenční - $I_{r2\ 1}$	10,0001
ΔI_1	0,00085
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00085
Referenční - $I_{r1\ 2}$	10,0002
Testovací - $I_{t1\ 2}$	9,9993
Testovací - $I_{t2\ 2}$	9,9991
Referenční - $I_{r2\ 2}$	10,0000
ΔI_2	0,0009
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0009
Referenční - $I_{r1\ 3}$	10,0000

Testovací - $I_{t1\ 3}$	9,9991
Testovací - $I_{t2\ 3}$	9,9991
Referenční - $I_{r2\ 3}$	10,0001
ΔI_3	0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00095
Referenční - $I_{r1\ 4}$	10,0000
Testovací - $I_{t1\ 4}$	9,9990
Testovací - $I_{t2\ 4}$	9,9990
Referenční - $I_{r2\ 4}$	9,9999
ΔI_4	0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00095
Referenční - $I_{r1\ 5}$	10,0001
Testovací - $I_{t1\ 5}$	9,9990
Testovací - $I_{t2\ 5}$	9,9990
Referenční - $I_{r2\ 5}$	10,0000
ΔI_5	0,000105
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,000105
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,00094 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$5,5 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$3,317 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,00001 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,102 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$5,354 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	27,166
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000107

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 10 g tedy činí $9,99907 \pm 0,00011$ g.

7.1.8 Kalibrace závaží 10 g metodou ABA

Tabulka 7.12 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 10 g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	10,000 01 g
Rozšířená nejistota - U	0,02 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³

Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	10 g
Hustota závaží - ρ_t	8356,8 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,4 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	12,85 %
Teplota - t [°C]	23,52 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,159 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,769 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - I_{r11}	10,0000
Testovací - I_{t11}	9,9991
Referenční - I_{r21}	10,0001
ΔI_1	-0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00095
Referenční - I_{r12}	10,0002
Testovací - I_{t12}	9,9993
Referenční - I_{r22}	10,0000
ΔI_2	-0,0008
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0008
Referenční - I_{r13}	10,0000
Testovací - I_{t13}	9,9991
Referenční - I_{r23}	10,0001
ΔI_3	-0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00095
Referenční - I_{r14}	10,0000
Testovací - I_{t14}	9,9990
Referenční - I_{r24}	9,9999
ΔI_4	-0,00095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00095
Referenční - I_{r15}	10,0001
Testovací - I_{t15}	9,9990
Referenční - I_{r25}	10,0000
ΔI_5	-0,000105
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,000105
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,00094 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$8 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$4 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,00001 g
Nejistota opravy vzlaku vzduchu, u_b^2	$4,101 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g

Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$5,802 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	17,71
Koeficient rozšíření - k	2,2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000116

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 10 g tedy činí $9,99907 \pm 0,00012$ g.

7.1.9 Kalibrace závaží 20 g metodou ABBA

Tabulka 7.13 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 20 g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	20,000 006 g
Rozšířená nejistota - U	0,02 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	20 g
Hustota závaží - ρ_t	8215 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,6 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	12,3 %
Teplota - t [°C]	23,33 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,16 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,786 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	20,0001
Testovací - $I_{t1\ 1}$	19,9994
Testovací - $I_{t2\ 1}$	19,9993
Referenční - $I_{r2\ 1}$	19,9999
ΔI_1	0,00065
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00065
Referenční - $I_{r1\ 2}$	20,0001
Testovací - $I_{t1\ 2}$	19,9995
Testovací - $I_{t2\ 2}$	19,9995
Referenční - $I_{r2\ 2}$	20,0001
ΔI_2	0,0006
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0006
Referenční - $I_{r1\ 3}$	20,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	19,9995
Testovací - $I_{t2\ 3}$	19,9994
Referenční - $I_{r2\ 3}$	20,0001
ΔI_3	0,0006
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0006

Referenční - I_{r14}	20,0001
Testovací - I_{t14}	19,9993
Testovací - I_{t24}	19,9994
Referenční - I_{r24}	20,0000
ΔI_4	0,0007
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0007
Referenční - I_{r15}	20,0001
Testovací - I_{t15}	19,9995
Testovací - I_{t25}	19,9994
Referenční - I_{r25}	19,9999
ΔI_5	0,00055
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00055
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,00062 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$3,25 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$2,55 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,00001 g
Nejistota opravy vzlaku vzduchu, u_b^2	$1,553 \cdot 10^{-12}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$4,916 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	55,294
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000098

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 20 g tedy činí $19,99939 \pm 0,0001$ g.

7.1.10 Kalibrace závaží 20 g metodou ABA

Tabulka 7.14 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 20 g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	20,000 006 g
Rozšířená nejistota - U	0,02 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží- $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	20 g
Hustota závaží - ρ_t	8215 kg/m ³

Tlak vzduchu – p [hPa]	990,6 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	12,3 %
Teplota – t [°C]	23,33 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,16 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,786 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	20,0001
Testovací - $I_{t1\ 1}$	19,9994
Referenční - $I_{r2\ 1}$	19,9999
ΔI_1	-0,0006
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0006
Referenční - $I_{r1\ 2}$	20,0001
Testovací - $I_{t1\ 2}$	19,9995
Referenční - $I_{r2\ 2}$	20,0001
ΔI_2	-0,0006
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0006
Referenční - $I_{r1\ 3}$	20,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	19,9995
Referenční - $I_{r2\ 3}$	20,0001
ΔI_3	-0,00055
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00055
Referenční - $I_{r1\ 4}$	20,0001
Testovací - $I_{t1\ 4}$	19,9993
Referenční - $I_{r2\ 4}$	20,0000
ΔI_4	-0,00075
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00075
Referenční - $I_{r1\ 5}$	20,0001
Testovací - $I_{t1\ 5}$	19,9995
Referenční - $I_{r2\ 5}$	19,9999
ΔI_5	-0,0005
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0005
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,0006 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$8,75 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$4,18 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,00001 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,553 \cdot 10^{-12}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$5,93 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - v_{eff}	16,15
Koeficient rozšíření - k	2,2

Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,00013
-----------------------------------	---------

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 20 g tedy činí $19,99939 \pm 0,00013$ g.

7.1.11 Kalibrace závaží 50 g metodou ABBA

Tabulka 7.15 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 50 g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	50 g
Rozšířená nejistota - U	0,03 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	50 g
Hustota závaží - ρ_t	8407,7 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,5 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	13,35 %
Teplota - t [°C]	23,61 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,158 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,762 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	50,0006
Testovací - $I_{t1\ 1}$	49,9905
Testovací - $I_{t2\ 1}$	49,9905
Referenční - $I_{r2\ 1}$	50,0003
ΔI_1	0,00995
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00995
Referenční - $I_{r1\ 2}$	50,0000
Testovací - $I_{t1\ 2}$	49,9905
Testovací - $I_{t2\ 2}$	49,9904
Referenční - $I_{r2\ 2}$	50,0003
ΔI_2	0,0097
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0097
Referenční - $I_{r1\ 3}$	50,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	49,9906
Testovací - $I_{t2\ 3}$	49,9904
Referenční - $I_{r2\ 3}$	50,0000
ΔI_3	0,0095
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0095
Referenční - $I_{r1\ 4}$	50,0001
Testovací - $I_{t1\ 4}$	49,9905
Testovací - $I_{t2\ 4}$	49,9903
Referenční - $I_{r2\ 4}$	50,0002

ΔI_4	0,00975
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00975
Referenční - I_{r15}	50,0002
Testovací - I_{t15}	49,9905
Testovací - I_{t25}	49,9903
Referenční - I_{r25}	49,9999
ΔI_5	0,00965
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00965
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,009708 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$2,68 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$7,314 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000015 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,049 \cdot 10^{-11}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$8,516 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	7,349
Koeficient rozšíření - k	2,4
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000204

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 50 g tedy činí $49,99029 \pm 0,00020$ g.

7.1.12 Kalibrace závaží 50 g metodou ABA

Tabulka 7.16 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 50 g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	50 g
Rozšířená nejistota - U	0,03 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží- $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,2 \text{ kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	50 g
Hustota závaží - ρ_t	$8407,7 \text{ kg/m}^3$
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,5 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	13,35 %
Teplota - t [°C]	23,61 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	$1,158 \text{ kg/m}^3$

Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,762 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	50,0006
Testovací - $I_{t1\ 1}$	49,9905
Referenční - $I_{r2\ 1}$	50,0003
ΔI_1	-0,00995
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00995
Referenční - $I_{r1\ 2}$	50,0000
Testovací - $I_{t1\ 2}$	49,9905
Referenční - $I_{r2\ 2}$	50,0003
ΔI_2	-0,00965
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00965
Referenční - $I_{r1\ 3}$	50,0000
Testovací - $I_{t1\ 3}$	49,9906
Referenční - $I_{r2\ 3}$	50,0000
ΔI_3	-0,0094
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0094
Referenční - $I_{r1\ 4}$	50,0001
Testovací - $I_{t1\ 4}$	49,9905
Referenční - $I_{r2\ 4}$	50,0002
ΔI_4	-0,00965
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00965
Referenční - $I_{r1\ 5}$	50,0002
Testovací - $I_{t1\ 5}$	49,9905
Referenční - $I_{r2\ 5}$	49,9999
ΔI_5	-0,00955
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00955
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,00964 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$4,05 \cdot 10^{-9} \text{ g}$
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$9 \cdot 10^{-5} \text{ g}$
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000015 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,049 \cdot 10^{-11} \text{ g}$
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5} \text{ g}$
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5} \text{ g}$
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$10,001 \cdot 10^{-5} \text{ g}$
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	6,1
Koeficient rozšíření - k	2,52
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,000252

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 50 g tedy činí $49,99029 \pm 0,00025 \text{ g}$.

7.1.13 Kalibrace závaží 100 g metodou ABBA

Tabulka 7.17 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g metodou ABBA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	99,999905 g
Rozšířená nejistota - U	0,05 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	100 g
Hustota závaží - ρ_t	8405,8 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,7 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	15,6 %
Teplota - t [°C]	23,56 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,158 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	8,756 · 10 ⁻⁶ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1 1}$	100,0003
Testovací - $I_{t1 1}$	100,0009
Testovací - $I_{t2 1}$	100,0008
Referenční - $I_{r2 1}$	100,0005
ΔI_1	-0,00045
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00045
Referenční - $I_{r1 2}$	100,0000
Testovací - $I_{t1 2}$	100,0012
Testovací - $I_{t2 2}$	100,0005
Referenční - $I_{r2 2}$	100,0000
ΔI_2	-0,0007
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0007
Referenční - $I_{r1 3}$	100,0002
Testovací - $I_{t1 3}$	100,0012
Testovací - $I_{t2 3}$	100,0017
Referenční - $I_{r2 3}$	100,0006
ΔI_3	-0,00105
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,00105
Referenční - $I_{r1 4}$	100,0002
Testovací - $I_{t1 4}$	100,0006
Testovací - $I_{t2 4}$	100,0006
Referenční - $I_{r2 4}$	100,0002
ΔI_4	-0,0004
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0004
Referenční - $I_{r1 5}$	100,0001
Testovací - $I_{t1 5}$	100,0012
Testovací - $I_{t2 5}$	100,0011

Referenční - I_{r25}	100,0006
ΔI_5	-0,0008
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0008
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,00068 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$7,07 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	0,000119 g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000025 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,267 \cdot 10^{-11}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	0,000128 g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	5,4
Koeficient rozšíření - k	2,65
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,00034

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 100 g tedy činí $100,00059 \pm 0,00034$ g.

7.1.14 Kalibrace závaží 100 g metodou ABA

Tabulka 7.18 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g metodou ABA

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	99,999905 g
Rozšířená nejistota - U	0,05 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	
Hustota závaží - ρ_r	8000 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	70 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,2 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	100 g
Hustota závaží - ρ_t	8405,8 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	990,7 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	15,6 %
Teplota - t [°C]	23,56 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,158 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,756 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - I_{r11}	100,0003
Testovací - I_{t11}	100,0009
Referenční - I_{r21}	100,0005

ΔI_1	0,0005
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0005
Referenční - $I_{r1\ 2}$	100,0000
Testovací - $I_{t1\ 2}$	100,0012
Referenční - $I_{r2\ 2}$	100,000
ΔI_2	0,00105
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00105
Referenční - $I_{r1\ 3}$	100,0002
Testovací - $I_{t1\ 3}$	100,0012
Referenční - $I_{r2\ 3}$	100,0006
ΔI_3	0,0008
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0008
Referenční - $I_{r1\ 4}$	100,0002
Testovací - $I_{t1\ 4}$	100,0006
Referenční - $I_{r2\ 4}$	100,0002
ΔI_4	0,0004
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0004
Referenční - $I_{r1\ 5}$	100,0001
Testovací - $I_{t1\ 5}$	100,0012
Referenční - $I_{r2\ 5}$	100,0006
ΔI_5	0,00085
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,00085
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,000715 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$7,08 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	0,000119 g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000025 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,267 \cdot 10^{-11}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-5}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	0,000128 g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	5,4
Koeficient rozšíření - k	2,65
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	0,00034

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 100 g tedy činí $100,00059 \pm 0,00034$ g.

7.2 Kalibrace sady závaží s vybavením Českého metrologického institutu

Po bližším seznámení s laboratoří Českého metrologického institutu bylo

přistoupeno k samotnému vážení, kdy pro závaží jmenovitých hodnot 1 g, 2 g a 5 g bylo použito mikrováhy značky Mettler Toledo UMT5 s dílkem 0,1 µg a pro závaží jmenovitých hodnot 20 g, 50 g a 100 g vah Mettler Toledo AT1006 s odečitatelností 1 µg.

V daném případě byl postup kalibrace upraven do souladu s postupem prováděným v kalibrační laboratoři ČMI, kdy metoda přímého srovnání s referenčním závažím využitím cyklů ABA je pozměně do podoby, kdy se střídá cyklus ABA s cyklem BAB. Tímto postupem je možné odstranit možnou lidskou chybu, která může nastat při opakovaném použití cyklů ABA, kdy dochází k opakovanému nanášení referenčního závaží na misku vah, může dojít například k záměně závaží případně vynechání některého z vážení. Střídáním cyklů ABA a BAB je nastolen rytmus výměny závaží, kdy po vyndání referenčního závaží z misky vah následuje uložení testovaného závaží, poté opět referenčního závaží atd.. Na tomto principu pracuje i komparátor Mettler Toledo AT1006, do něhož jsou na předem stanovené pozice uložena obě závaží, tedy jak referenční tak i testované. Komparátor poté sám provádí srovnání závaží cykly vážení střídavě ABA a BAB.

Vzhledem k výše uvedené úpravě postupu došlo také k úpravě rovnice 5.4, která pro cyklus BAB musí znít

$$\Delta I_i = -I_{r1\ 1} + (I_{t1\ i} + I_{t2\ i})/2. \quad 7.2$$

Další odchylkou při prováděném měření byla skutečnost, že na počátku samotného vážení bylo na mikrováhy umístěno referenční závaží, hodnota byla zaznamenána a následně byly váhy vytárovány. Poté bylo prováděno samotné měření s tím, že mezi jednotlivými váženími nebyly váhy tárovány a zapisovány byly pouze hodnoty rozdílu od prvního vážení referenčního závaží. V následujících tabulkách budou uvedeny hodnoty, k nimž byla hodnota referenčního závaží připočtena.

Komparátor Mettler Toledo AT1006 pak vychází z konvenční hmotnosti referenčního závaží uváděné v kalibračním listu, která je přednastavena v programu k vahám. Zaznamenávané odchylky jsou pak rozdílem od takto nastavené hodnoty. Hodnoty naměřené komparátorem Mettler Toledo AT1006 jsou přílohou této práce.

Nutno podotknout, že obě váhy, tedy jak mikrováhy Mettler Toledo UMT5, tak i komparátor Mettler Toledo AT1006 mají zabudovaný citlivý vyvažovací systém, který vyvažuje nepřesnosti případné excentricity zatížení misky vah. Proto je v daném případě vždy příspěvek k nejistotě vyplývající ze zdroje – excentricity zatížení, považován za nulový.

Dále v případě etalonových závaží nebyla v kalibračním listu uvedena přímo hustota vzduchu, při níž byla kalibrace prováděna, ale pouze hodnoty tlaku, teploty a vlhkosti vzduchu dané laboratoře. Proto bylo použito vzorce 5.21 a hodnota hustoty pro referenční závaží byla vypočtena.

Pro tlak 987 hPa, vlhkost 52 % a teplotu 20,3 °C je tedy výpočet následující

$$\rho_a = \frac{0,34848 \cdot 987 - 0,009 \cdot 52 \cdot \exp(0,0061 \cdot 20,3)}{273,15 + 20,3} = 1,154 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

Pokud se týká nejistoty vzhledem ke kalibraci citlivostním závažím, tak vzhledem ke skutečnosti, že váhy byly kalibrovány citlivostním závažím před samotnou kalibrací závaží a hodnota nejistoty natolik malá, že je možné ji zanedbat, nebude při výpočtech dále zohledňována.

Podobně je tomu s nejistotou vzhledem k nestabilitě referenčního závaží, když

její hodnoty jsou řádově nižší, nežli hodnoty výsledných nejistot, je opět považována za zanedbatelnou a při dalších výpočtech nebude brána v potaz.

Ve zbývající části byl postup výpočtu nejistot při kalibracích závaží shodný. Proto následují opět jen souhrnné bilanční tabulky zobrazující podstatné údaje.

7.2.1 Kalibrace závaží 1 g metodou ABA - BAB

Tabulka 7.19 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1 g metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	1 g
Rozšířená nejistota - U	0,003 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,154 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	1 g
Hustota závaží - ρ_t	8032,2 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	20,7 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,139 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	8,469 · 10 ⁻⁶ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	1,0000082
Testovací - $I_{t1\ 1}$	1,000963
Referenční - $I_{r2\ 1}$	1,0000083
ΔI_1	0,0009548
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0009548
Referenční - $I_{r1\ 2}$	1,0009621
Testovací - $I_{r1\ 2}$	1,0000087
Referenční - $I_{t2\ 2}$	1,0009618
ΔI_2	0,0009533
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0009533
Referenční - $I_{r1\ 3}$	1,0000085
Testovací - $I_{t1\ 3}$	1,0009619
Referenční - $I_{r2\ 3}$	1,0000091
ΔI_3	0,0009531
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0009531
Referenční - $I_{t1\ 4}$	1,0009609
Testovací - $I_{r1\ 4}$	1,0000092
Referenční - $I_{t2\ 4}$	1,0009598
ΔI_4	0,0009512
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0009512
Referenční - $I_{r1\ 5}$	1,0000091
Testovací - $I_{t1\ 5}$	1,0009597

Referenční - $I_{r2.5}$	1,0000094
ΔI_5	0,0009505
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0009505
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,0009525 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$3,0005 \cdot 10^{-12}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$7,747 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,0000015 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,608 \cdot 10^{-17}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-8}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	0,000128 g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	90,3
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$3,38 \cdot 10^{-6}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 1 g tedy činí $1,0009525 \pm 0,0000034$ g.

7.2.2 Kalibrace závaží 2 g metodou ABA - BAB

Tabulka 7.20 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 2g metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	2,00001 g
Rozšířená nejistota - U	0,000004 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,154 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	2 g
Hustota závaží - ρ_t	8153 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	20,8 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,138 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,464 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1.1}$	2,0000301
Testovací - $I_{t1.1}$	2,0008022
Referenční - $I_{r2.1}$	2,0000292

ΔI_1	0,0007726
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0007726
Referenční - $I_{t1\ 2}$	2,0008026
Testovací - $I_{r1\ 2}$	2,00003
Referenční - $I_{t2\ 2}$	2,0008027
ΔI_2	0,0007727
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0007727
Referenční - $I_{r1\ 3}$	2,0000295
Testovací - $I_{t1\ 3}$	2,0008012
Referenční - $I_{r2\ 3}$	2,0002278
ΔI_3	0,0006726
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0006726
Referenční - $I_{t1\ 4}$	2,0008009
Testovací - $I_{r1\ 4}$	2,0000301
Referenční - $I_{t2\ 4}$	2,0008016
ΔI_4	0,0007712
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0007712
Referenční - $I_{r1\ 5}$	2,0000301
Testovací - $I_{t1\ 5}$	2,000802
Referenční - $I_{r2\ 5}$	2,0000308
ΔI_5	0,0007712
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0007712
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,000752 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$1,977 \cdot 10^{-9}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$1,989 \cdot 10^{-5}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000002 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,904 \cdot 10^{-16}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-8}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$1,999 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	4,08
Koeficient rozšíření - k	2,87
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$5,74 \cdot 10^{-5}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 2 g tedy činí $2,000752 \pm 0,0000574$ g.

7.2.3 Kalibrace závaží 5 g metodou ABA - BAB

Tabulka 7.21 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	5,000006 g

Rozšířená nejistota - U	0,000005 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,154 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	5 g
Hustota závaží - ρ_t	8329,4 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	20,6 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,139 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	8,475 · 10 ⁻⁶ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	5,0000515
Testovací - $I_{t1\ 1}$	4,9960147
Referenční - $I_{r2\ 1}$	5,0000527
ΔI_1	-0,0040374
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0040374
Referenční - $I_{t1\ 2}$	4,9960161
Testovací - $I_{r1\ 2}$	5,000052
Referenční - $I_{t2\ 2}$	4,9960159
ΔI_2	-0,004036
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,004036
Referenční - $I_{r1\ 3}$	5,000544
Testovací - $I_{t1\ 3}$	4,996015
Referenční - $I_{r2\ 3}$	5,0000536
ΔI_3	-0,004039
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,004039
Referenční - $I_{t1\ 4}$	4,9960156
Testovací - $I_{r1\ 4}$	5,0000516
Referenční - $I_{t2\ 4}$	4,9960152
ΔI_4	-0,0040362
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0040362
Referenční - $I_{r1\ 5}$	5,0000512
Testovací - $I_{t1\ 5}$	4,9960169
Referenční - $I_{r2\ 5}$	5,0000516
ΔI_5	-0,0040345
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0040345
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,0040383 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	2,832 · 10 ⁻¹² g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	7,526 · 10 ⁻⁷ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,0000025 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	1,115 · 10 ⁻¹⁵ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána

Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-8} \text{g}$
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-8} \text{g}$
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$2,611 \cdot 10^{-6} \text{g}$
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	579,8
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$5,22 \cdot 10^{-6} \text{g}$

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 5 g tedy činí $4,9959617 \pm 0,0000052 \text{g}$.

7.2.4 Kalibrace závaží 20 g metodou ABA - BAB

Tabulka 7.22 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 20 g metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	20,000006 g
Rozšířená nejistota - U	0,000008 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,154 \text{kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	20 g
Hustota závaží - ρ_t	8215kg/m^3
Tlak vzduchu - p [hPa]	974 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	21,4 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	$1,135 \text{kg/m}^3$
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,411 \cdot 10^{-6} \text{kg/m}^3$
Indikace	g
Referenční - $I_{r1 1}$	19,9787872
Testovací - $I_{t1 1}$	19,9782413
Referenční - $I_{r2 1}$	19,9787742
ΔI_1	-0,0005394
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0005394
Referenční - $I_{t1 2}$	19,9782295
Testovací - $I_{r1 2}$	19,9787621
Referenční - $I_{t2 2}$	19,978218
ΔI_2	-0,0005383
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0005383
Referenční - $I_{r1 3}$	19,978752
Testovací - $I_{t1 3}$	19,9782087
Referenční - $I_{r2 3}$	19,978744

ΔI_3	-0,0005393
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0005393
Referenční - $I_{t1\ 4}$	19,9782023
Testovací - $I_{r1\ 4}$	19,978736
Referenční - $I_{t2\ 4}$	19,9781952
ΔI_4	-0,0005373
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0005373
Referenční - $I_{r1\ 5}$	19,9787304
Testovací - $I_{t1\ 5}$	19,9781895
Referenční - $I_{r2\ 5}$	19,9787237
ΔI_5	-0,0005373
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0005373
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,0005433 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$9,633 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$4,389 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000004 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$2,476 \cdot 10^{-14}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$4,048 \cdot 10^{-6}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	28931
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$8,1 \cdot 10^{-6}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 20 g tedy činí $19,9994567 \pm 0,0000081$ g.

7.2.5 Kalibrace závaží 50 g metodou ABA - BAB

Tabulka 7.23 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 50 g metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	50,000006 g
Rozšířená nejistota - U	0,00001 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží- $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,154 \text{ kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	50 g

Hustota závaží - ρ_t	8407,7 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	21,4 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,135 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,428 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	49,990142
Testovací - $I_{t1\ 1}$	49,9806128
Referenční - $I_{r2\ 1}$	49,9901251
ΔI_1	-0,0095208
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0095208
Referenční - $I_{t1\ 2}$	49,9805983
Testovací - $I_{r1\ 2}$	49,9901088
Referenční - $I_{t2\ 2}$	49,980585
ΔI_2	-0,0095172
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0095172
Referenční - $I_{r1\ 3}$	49,9900915
Testovací - $I_{t1\ 3}$	49,980571
Referenční - $I_{r2\ 3}$	49,9900742
ΔI_3	-0,0095119
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0095119
Referenční - $I_{t1\ 4}$	49,9805555
Testovací - $I_{r1\ 4}$	49,990057
Referenční - $I_{t2\ 4}$	49,980541
ΔI_4	-0,0095088
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0095088
Referenční - $I_{r1\ 5}$	49,99004
Testovací - $I_{t1\ 5}$	49,9805238
Referenční - $I_{r2\ 5}$	49,9900219
ΔI_5	-0,0095072
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	-0,0095072
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	-0,0095341 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$3,27 \cdot 10^{-11}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$2,557 \cdot 10^{-6}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,000005 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$1,425 \cdot 10^{-14}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$5,644 \cdot 10^{-6}$ g
Efektivní stupně volnosti - v_{eff}	94,9

Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$1,13 \cdot 10^{-5}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 50 g tedy činí $49,990466 \pm 0,0000113$ g.

7.2.6 Kalibrace závaží 100 g metodou ABA - BAB

Tabulka 7.24 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	100,00001 g
Rozšířená nejistota - U	0,00002 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,154 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	100 g
Hustota závaží - ρ_t	8405,8 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	21,3 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,136 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,434 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	100,000262
Testovací - $I_{t1\ 1}$	100,0007043
Referenční - $I_{r2\ 1}$	100,0002575
ΔI_1	0,0004446
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0004446
Referenční - $I_{t1\ 2}$	100,0007023
Testovací - $I_{r1\ 2}$	100,0002494
Referenční - $I_{t2\ 2}$	100,0006967
ΔI_2	0,0004501
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0004501
Referenční - $I_{r1\ 3}$	100,0002332
Testovací - $I_{t1\ 3}$	100,0006935
Referenční - $I_{r2\ 3}$	100,0002284
ΔI_3	0,0004927
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0004927
Referenční - $I_{t1\ 4}$	100,0006902
Testovací - $I_{r1\ 4}$	100,0002222
Referenční - $I_{t2\ 4}$	100,0006868
ΔI_4	0,0004663
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0004663
Referenční - $I_{r1\ 5}$	100,0002188

Testovací - I_{t15}	100,0006853
Referenční - I_{r25}	100,0002161
ΔI_5	0,0004679
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	0,0004979
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	0,0004168 g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$1,077 \cdot 10^{-10}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\Delta m_c)$	$4,641 \cdot 10^{-6}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,00001 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$5,541 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$1,106 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	128,9
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$2,21 \cdot 10^{-5}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 100 g tedy činí $100,0004168 \pm 0,0000221$ g.

Dále byla provedena

7.2.7 Kalibrace závaží 1 g třídy E2 metodou ABA - BAB

Tabulka 7.25 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 1 g třídy E2 metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	1 g
Rozšířená nejistota - U	0,000003 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,154 \text{ kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	1,000004 g
Hustota závaží - ρ_t	8000 kg/m^3
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	20,8 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	$1,138 \text{ kg/m}^3$
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,464 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$

Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	1,0000092
Testovací - $I_{t1\ 1}$	1,0000166
Referenční - $I_{r2\ 1}$	1,0000096
ΔI_1	$7,2 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$7,2 \cdot 10^{-6}$
Referenční - $I_{t1\ 2}$	1,0000169
Testovací - $I_{r1\ 2}$	1,0000093
Referenční - $I_{t2\ 2}$	1,0000172
ΔI_2	$7,75 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$7,75 \cdot 10^{-6}$
Referenční - $I_{r1\ 3}$	1,0000095
Testovací - $I_{t1\ 3}$	1,0000171
Referenční - $I_{r2\ 3}$	1,0000126
ΔI_3	$6,05 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$6,05 \cdot 10^{-6}$
Referenční - $I_{t1\ 4}$	1,0000166
Testovací - $I_{r1\ 4}$	1,0000091
Referenční - $I_{t2\ 4}$	1,000017
ΔI_4	$7,7 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$7,7 \cdot 10^{-6}$
Referenční - $I_{r1\ 5}$	1,0000098
Testovací - $I_{t1\ 5}$	1,0000171
Referenční - $I_{r2\ 5}$	1,0000094
ΔI_5	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	$7,211 \cdot 10^{-6}$ g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$4,893 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$3,128 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,0000015 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$4,76 \cdot 10^{-17}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-8}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-8}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$1,533 \cdot 10^{-6}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	2306,3
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$3,07 \cdot 10^{-6}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 1 g tedy činí $1,0000072 \pm 0,0000031$ g.

7.2.8 Kalibrace závaží 5 g třídy E2 metodou ABA - BAB

Tabulka 7.26 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 5 g třídy E2 metodou ABA – BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	5,000006 g
Rozšířená nejistota - U	0,000005 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží - $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m ³
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m ³
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	1,154 kg/m ³
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	5,000016 g
Hustota závaží - ρ_t	8000 kg/m ³
Tlak vzduchu - p [hPa]	975 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	20,8 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	1,138 kg/m ³
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,458 \cdot 10^{-6}$ kg/m ³
Indikace	g
Referenční - I_{r11}	5,0000531
Testovací - I_{t11}	5,0000658
Referenční - I_{r21}	5,0000557
ΔI_1	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$1,14 \cdot 10^{-5}$
Referenční - I_{r12}	5,0000649
Testovací - I_{t12}	5,0000571
Referenční - I_{r22}	5,0000686
ΔI_2	$9,65 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$9,65 \cdot 10^{-6}$
Referenční - I_{r13}	5,000059
Testovací - I_{t13}	5,0000695
Referenční - I_{r23}	5,0000593
ΔI_3	$1,035 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$1,035 \cdot 10^{-5}$
Referenční - I_{r14}	5,0000703
Testovací - I_{t14}	5,000059
Referenční - I_{r24}	5,0000676
ΔI_4	$9,95 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$9,95 \cdot 10^{-6}$
Referenční - I_{r15}	5,0000591
Testovací - I_{t15}	5,0000686
Referenční - I_{r25}	5,0000583
ΔI_5	$9,9 \cdot 10^{-6}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$9,9 \cdot 10^{-6}$
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	$1,0104 \cdot 10^{-5}$ g

Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$4,763 \cdot 10^{-13} \text{ g}$
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\overline{\Delta m_c})$	$3,086 \cdot 10^{-7} \text{ g}$
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,0000025 g
Nejistota opravy vztlačku vzduchu, u_b^2	$1,228 \cdot 10^{-15} \text{ g}$
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-8} \text{ g}$
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-8} \text{ g}$
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$2,519 \cdot 10^{-6} \text{ g}$
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	17767,4
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$5,04 \cdot 10^{-6} \text{ g}$

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 5 g tedy činí $5,0000101 \pm 0,000005 \text{ g}$.

7.2.9 Kalibrace závaží 100 g třídy E2 metodou ABA - BAB

Tabulka 7.27 Bilanční tabulka pro kalibraci závaží 100 g třídy E2 metodou ABA–BAB na ČMI

Závaží:	Referenční závaží
Hmotnost - m_{cr}	100,00001 g
Rozšířená nejistota - U	0,00002 mg
Koeficient rozšíření - k	2
Nestabilita referenčního závaží- $u_{inst}(m_{cr})$	Neuvádí se
Hustota závaží - ρ_r	7970 kg/m^3
Nejistota hustoty závaží - $u(\rho_r)$	20 kg/m^3
Hustota vzduchu během kalibrace referenčního závaží - ρ_{al}	$1,154 \text{ kg/m}^3$
Závaží:	Testované závaží
Hmotnost - m_{ct} [g]	99,999905 g
Hustota závaží - ρ_t	8000 kg/m^3
Tlak vzduchu - p [hPa]	974 hPa
Relativní vlhkost - hr [%]	50 %
Teplota - t [°C]	21,4 °C
Hustota vzduchu během kalibrace - ρ_a	$1,135 \text{ kg/m}^3$
Nejistota hustoty vzduchu během kalibrace - $u(\rho_a)$	$8,411 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$
Indikace	g
Referenční - $I_{r1\ 1}$	100,0000635
Testovací - $I_{t1\ 1}$	100,0000292
Referenční - $I_{r2\ 1}$	100,0000568
ΔI_1	$-3,095 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$-3,095 \cdot 10^{-5}$
Referenční - $I_{t1\ 2}$	100,0000227
Testovací - $I_{r1\ 2}$	100,0000512
Referenční - $I_{t2\ 2}$	100,0000175

ΔI_2	$-3,11 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$-3,11 \cdot 10^{-5}$
Referenční - $I_{r1\ 3}$	100,0000445
Testovací - $I_{t1\ 3}$	100,0000126
Referenční - $I_{r2\ 3}$	100,0000386
ΔI_3	$-2,895 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$-2,895 \cdot 10^{-5}$
Referenční - $I_{t1\ 4}$	100,0000089
Testovací - $I_{r1\ 4}$	100,0000335
Referenční - $I_{t2\ 4}$	100,0000059
ΔI_4	$-2,61 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$-2,61 \cdot 10^{-5}$
Referenční - $I_{r1\ 5}$	100,0000316
Testovací - $I_{t1\ 5}$	100,00001
Referenční - $I_{r2\ 5}$	100,0000381
ΔI_5	$-2,485 \cdot 10^{-5}$
Rozdíl konvenční hmotnosti Δm_{ci}	$-2,485 \cdot 10^{-5}$
Průměrná odchylka konvenční hmotnosti $\overline{\Delta m_c}$	$-3,156 \cdot 10^{-5}$ g
Rozptyl rozdílu hmotností $s^2(\Delta m_c)$	$7,997 \cdot 10^{-12}$ g
Nejistota vážení metodou typu A $u_w(\Delta m_c)$	$1,265 \cdot 10^{-6}$ g
Nejistota referenčních závaží, $u(m_{cr})$	0,00001 g
Nejistota opravy vztlaku vzduchu, u_b^2	$6,189 \cdot 10^{-13}$ g
Nejistota vzhledem k citlivosti vah je u_s^2	zanedbána
Nejistota vzhledem k rozlišení displeje digitální váhy u_d	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Nejistotě vzhledem k excentricitě zatížení u_E	zanedbána
Nejistota vzhledem k magnetismu, u_{ma}	zanedbána
Kombinovaná standardní nejistota vah, u_{ba}	$4,082 \cdot 10^{-7}$ g
Kombinovaná standardní nejistota konvenční hmotnosti testovaného závaží $u_c(m_{ct})$	$1,012 \cdot 10^{-5}$ g
Efektivní stupně volnosti - ν_{eff}	16392,5
Koeficient rozšíření - k	2
Rozšířená nejistota - $U(m_{ct})$	$2,9 \cdot 10^{-5}$ g

Konvenční hodnota testovaného závaží jmenovité hodnoty 100 g tedy činí $99,999968 \pm 0,000029$ g.

7.3 Srovnání kalibrací závaží provedených na půdě VUT a ČMI

Provedené kalibrace závaží je vhodné uzavřít celkovým srovnáním dosažených výsledků s ohledem vypočtené nejistoty. Tyto jsou přehledně uvedeny v následující Tabulka 7.28.

Tabulka 7.28 Závěrečné shrnutí dosažených výsledků při kalibraci závaží

Nominální hodnota závaží (g)	Nejistoty zjištěné danou metodou (g)		
	ABBA VUT (g)	ABA VUT (g)	ABA-BAB ČMI (g)
1	$1,00094 \pm 0,00010$	$1,00094 \pm 0,00010$	$1,0009525 \pm 0,0000034$
2	$2,00076 \pm 0,00009$	$2,00076 \pm 0,0001$	$2,000752 \pm 0,0000574$
5	$4,99606 \pm 0,0002$	$4,99606 \pm 0,00028$	$4,9959617 \pm 0,0000052$
10	$9,99907 \pm 0,00011$	$9,99907 \pm 0,00012$	
20	$19,99939 \pm 0,0001$	$19,99939 \pm 0,00013$	$19,9994567 \pm 0,0000081$
50	$49,99029 \pm 0,00020$	$49,99029 \pm 0,00025$	$49,990466 \pm 0,0000113$
100	$100,00059 \pm 0,00034$	$100,00059 \pm 0,00034$	$100,0004268 \pm 0,0000221$

7.4 Kalibrace vah Ohaus Explorer EX 224 s vybavením VUT ústavu elektrotechnologie

Při kalibraci vah Ohaus Explorer EX224 bylo postupováno v souladu s kapitolou 7 této diplomové práce, tedy bylo vycházeno ze tří základních měření, z měření opakovatelnosti indikace, chyb indikace a z účinků excentricity zatížení na indikaci a z chyb jim odpovídajících.

Nejprve bylo provedeno čtení z manuálu k vahám Ohaus Explorer EX224 a měření okolních podmínek laboratoře. Změřené a vyčtené hodnoty zachycuje Tabulka 7.29. Tabulka 7.29 Použité váhy pro kalibraci

Tabulka 7.29 Použité váhy pro kalibraci

Nástroj:	elektronické váhy, popis a identifikace
Max/d	220 g / 0,1 mg
vestavěné justovací zařízení	Interní/externí kalibrace vybrána automatická kalibrace po zapnutí
justování kalibrátoru	provedeno před kalibrací
teplota při kalibraci	24,25-24,31 °C
podmínky pracoviště	teplota stabilizována na $24,1 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$, tlak $p = 1006,9 \text{ hPa}$, vlhkost $hr = 27,9 - 28,1 \%$
receptor zatížení	průměr 90 mm
testovací zátěž	standardní závaží, třída E2

7.4.1 Zkouška opakovatelnosti

Druhou částí kalibrace vah je opakované vážení stejné zátěže, za stejných podmínek manipulace se zatížením a přístrojem, a za stálých zkušebních podmínek.

Jako testovací závaží L_T bylo vybráno referenční závaží třídy přesnosti E2 o jmenovité hodnotě 100 g.

Před samotným započítáním zkoušky byly váhy vytárovány, načež byla 5 krát aplikována zátěž. Po každém jednotlivém vážení byla zaznamenána indikace a v případě, že váhy nevykazovaly nulovou hodnotu, byly opět vytárovány. Zaznamenané hodnoty jsou uvedeny v Tabulka 7.30.

Tabulka 7.30 Indikace vah při zkoušce opakovatelnosti

Pořadí měření n	zaznamenané údaje I_{ji} v g
1	99,9996
2	99,9994
3	99,9995
4	99,9995
5	99,9996
6	99,9995
7	99,9995
8	99,9994
9	99,9993
10	99,9994

Z výše uvedených indikací I_{ji} byla následně vypočtena průměrná hodnota \bar{I}_j dle vzorce 6.2

$$\bar{I}_j = \frac{1}{10} \cdot (99,9996 + 99,9994 + 99,9995 + 99,9995 + 99,9996 + 99,9995 + 99,9995 + 99,9994 + 99,9993 + 99,9994) = 99,99947\text{g.}$$

Následně byla dle vzorce 6.1 vypočtena směrodatná odchylka

$$s(I_j) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \cdot [(99,9996 - 99,99947)^2 + (99,9994 - 99,99947)^2 + (99,9995 - 99,99947)^2 + (99,9995 - 99,99947)^2 + (99,9996 - 99,99947)^2 + (99,9995 - 99,99947)^2 + (99,9995 - 99,99947)^2 + (99,9994 - 99,99947)^2 + (99,9993 - 99,99947)^2 + (99,9994 - 99,99947)^2] = 9,49 \cdot 10^{-5}.$$

7.4.2 Standardní nejistota indikace

Jak již bylo uvedeno výše, zohledňuje standardní nejistota indikace několik nejistot z různých zdrojů. Patří mezi ně standardní nejistota zaokrouhlení bez zatížení, standardní nejistota zaokrouhlení se zatížením, standardní nejistota z opakovatelnosti a standardní nejistota vzhledem k excentricitě zatížení.

Standardní nejistota zaokrouhlení bez zatížení

Standardní nejistota zaokrouhlení bez zatížení při hodnotě dílku $d_0 = 0,0001 \text{ g}$ byla vypočtena dle vzorce 6.12 jako

$$u(\delta I_{di g_0}) = \frac{0,0001}{\sqrt{12}} = 2,887 \cdot 10^{-5}.$$

Standardní nejistota zaokrouhlení při zatížení

Standardní nejistota zaokrouhlení při zatížení při hodnotě dílku $d_l = 0,0001 \text{ g}$ byla vypočtena dle vzorce 6.14 jako

$$u(\delta I_{di g_L}) = \frac{0,0001}{\sqrt{12}} = 2,887 \cdot 10^{-5}.$$

Standardní nejistota z opakovatelnosti

Standardní nejistota z opakovatelnosti měření byla vypočtena v souladu se vztahem uvedeným pod 6.16 jako

$$u(\delta I_{rep}) = s(I_j) = 9,49 \cdot 10^{-5}.$$

Standardní nejistota vzhledem k excentricitě zatížení

Vzhledem ke skutečnosti, že jako testovací závaží budou použity zátěže skládající se z více než jednoho kusu závaží, bylo přistoupeno i k výpočtu standardní nejistoty vzhledem k excentricitě zatížení. Pro výpočet standardní nejistoty bylo jako testovací zátěže L_{ecc} využito referenční závaží třídy přesnosti E2 jmenovité hodnoty 100 g.

Závaží bylo postupně ukládáno na pozice 1, 2, 3, 4 a 5 dle Obrázek 6.1. Opět byly po každém vážení zaznamenány hodnoty indikované vahami a po odstranění zátěže bylo v případě, že váhy nevykazovaly nulu opět použito funkce tárování. Indikace a odchylky v indikacích jsou zachyceny v Tabulka 7.31.

Tabulka 7.31 Indikace vah při testu excentricity

pozice	indikace (g)	Odchylky od indikace na pozici 1 ΔI (g)
1	99,9996	
2	99,9994	-0,0002
3	99,9993	-0,0003
4	99,9996	0
5	99,9998	0,0002

Nejistota vzhledem k excentricitě se s ohledem na maximální rozdíl excentricity $|\Delta I_{ecc,i}|_{max} = 0,0003 \text{ g}$ byla vypočtena dle vzorce 6.20 následovně

$$\hat{w}(\delta I_{ecc}) = \frac{0,0003}{2 \cdot 100 \cdot \sqrt{3}} = 8,66 \cdot 10^{-7}.$$

Výsledná standardní nejistota indikace

Výsledná standardní nejistota indikace byla získána ze vztahu 6.21

$$u^2(I) = \frac{0,0001^2}{12} + \frac{0,0001^2}{12} + (9,49 \cdot 10^{-5})^2 + (8,66 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 100^2 = 0,000135 \text{ g}.$$

7.4.3 Standardní nejistota referenčního závaží

Pro zjištění chyby indikace a s tím souvisejících nejistot bylo použito závaží, jejich hodnoty byly rovnoměrně rozděleny po celém vážícím rozsahu, a to zátěž 30 g, 60 g, 100 g, 150 g a 200 g. Jako zkušební závaží byla opět použita standardní závaží odpovídajícím Mezinárodnímu doporučení OIML R 111 [1], a to jmenovitých hodnot 10 g, 20 g, 50 g a 100 g.

Při každém jednom vážení byla odečítána indikace vah, vypočtena odchylka od jmenovité hodnoty, následně po odstranění zátěže bylo nutné vždy zkontrolovat, zda přístroj vykazuje nulu, a v případě, že tomu tak nebylo, bylo nutné provést tárování.

Indikace a odchylky zachycuje

Tabulka 7.32.

Tabulka 7.32 Chyby indikace a odchylka od jmenovité hodnoty

testovací zátěž (g)	indikace (g)	chyba indikace (g)
30	30	0
60	59,9997	-0,0003
100	99,9995	-0,0005
150	149,9996	-0,0004
200	199,9992	-0,0008

Standardní nejistota referenčního závaží je opět složena z několika součástí.

Standardní nejistota konvenční hmotnosti

Vzhledem k použití standardního závaží v souladu s Mezinárodním doporučením R 111 [1], bylo využito vzorce 6.24, kde bylo nahrazeno Tol hodnotou mpe , tyto byly odečteny z Tabulka 5.1. Pokud se testovací zátěž skládala z více než jednoho standardního závaží, byla standardní nejistota vypočtena jejich aritmetickým součtem.

Výpočet např. pro zátěž 30 g tedy vypadá následovně

$$u(\delta m_c) = \frac{0,00014}{\sqrt{3}} = 8,0829 \cdot 10^{-5} \text{ g.}$$

Tabulka 7.33 Maximální dovolené chyby a odpovídající nejistoty dané testovací zátěže

Testovací zátěž (g)	mpe (g)	$u(\delta m_c)$
10+20	0,00014	$8,0829 \cdot 10^{-5}$
10+60	0,00016	$9,2376 \cdot 10^{-5}$
100	0,00016	$9,2376 \cdot 10^{-5}$
50+10	0,00026	0,000150111
100+50+20+20+10	0,00048	0,000277128

Korekce na vztlak vzduchu

S ohledem na skutečnost, že bylo použito standardní závaží odpovídající mezinárodnímu doporučení R 111 [1], a tedy hustota materiálu použitého pro závaží je taková, že 10% odchylka od zadané hustoty vzduchu ($1,2 \text{ kg/m}^3$) nevytvoří chybu přesahující jednu čtvrtinu maximální dovolené chyby, byla relativní nejistota vypočtena dle vzorce 6.34. Výpočet např. pro zátěž 30 g tedy vypadá následovně

$$\hat{w}(m_B)m_N = \frac{0,00014}{4\sqrt{3}} = 2,0207 \cdot 10^{-5}.$$

Hodnoty je opět možné shrnout do následující tabulky.

Tabulka 7.34 Nejistoty na vztlak vzduchu odpovídající testovacím zátěžím

Testovací zátěž (g)	$u(\delta m_B)$
10+20	$2,0207 \cdot 10^{-5}$
10+60	$2,3094 \cdot 10^{-5}$
100	$2,3094 \cdot 10^{-5}$
50+10	$3,7528 \cdot 10^{-5}$

100+50+20+20+10	$6,9282 \cdot 10^{-5}$
-----------------	------------------------

Korekce na drift konvenční hodnoty hmotnosti od poslední kalibrace

Mezní hodnota D_r pro výpočet korekce na možný drift konvenční hodnoty hmotnosti m_c od poslední kalibrace δm_D , není bohužel z kalibračních certifikátů standardních závaží známa, proto byla její hodnota odhadnuta jako $D_r = \frac{1}{3} mpe$.

Standardní nejistota pak byla vypočtena dle vzorce 6.376.34. Výpočet např. pro zátěž 30 g pak je vyjádřen

$$u(\delta m_D) = \frac{0,00014}{3\sqrt{3}} = 2,69 \cdot 10^{-5}.$$

Tabulka 7.35 Nejistoty na drift konvenční hodnoty hmotnosti od poslední kalibrace

Testovací zátěž (g)	$u(\delta m_D)$
10+20	$2,6943 \cdot 10^{-5}$
10+60	$3,0792 \cdot 10^{-5}$
100	$3,0792 \cdot 10^{-5}$
50+10	$5,0037 \cdot 10^{-5}$
100+50+20+20+10	$9,2376 \cdot 10^{-5}$

Korekce na konvekční účinky

Korekce na konvekční účinky δm_{conv} v daném případě není pro výpočet nejistot relevantní, když teplota naměřená v laboratoři se v průběhu měření změnila z hodnoty 24,25 °C na 24,31 °C, tedy o 0,06 °C. Tato změna teploty ΔT způsobí tak nepatrnou změnu hmotnosti standardního závaží Δm_{conv} (viz. Tabulka 6.2), že pro další výpočet není významnou a tato nejistota nebude dále zohledňována.

Výsledná standardní nejistota referenčních závaží

Standardní nejistota referenčních závaží jsou vypočteny dle vztahu 6.39 **Chyba! enalezen zdroj odkazů.** např. pro zátěž 30 g takto

$$u(m_{ref}) = \sqrt{(8,0829 \cdot 10^{-5})^2 + (2,0207 \cdot 10^{-5})^2 + (2,69 \cdot 10^{-5})^2 + 0^2} = 8,76 \cdot 10^{-5}.$$

Tabulka 7.36 Výsledné standardní nejistota referenčních závaží

Testovací zátěž (g)	$u(m_{ref})$
10+20	$8,75648 \cdot 10^{-5}$
10+60	0,000100074
100	0,000100074
50+10	0,00016262
100+50+20+20+10	0,000300222

7.4.4 Standardní nejistota chyby

Standardní nejistota chyby byla pak vypočtena ze vzorce 6.40, opět znázorněno pouze pro případ 30 g zátěže

$$u(E) = \sqrt{\frac{0,0001^2}{12} + \frac{0,0001^2}{12} + (9,49 \cdot 10^{-5})^2 + (8,66 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 100^2} \\ + (8,0829 \cdot 10^{-5})^2 + (2,0207 \cdot 10^{-5})^2 + (2,69 \cdot 10^{-5})^2 + 0^2 = 0,00016073.$$

Tabulka 7.37 Standardní nejistoty chyb daných testovacích zátěží

Testovací zátěž (g)	u(E)
10+20	0,00016073
10+60	0,000167873
100	0,000167873
50+10	0,000211216
100+50+20+20+10	0,00032909

Všechny vstupní veličiny jsou považovány za nekorelované a kovariance tedy nejsou brány v úvahu.

7.4.5 Rozšířená nejistota při kalibraci

Konečně bylo přistoupeno k výpočtu rozšířené nejistoty, kdy bylo nejprve nutné vypočítat počet stupňů volnosti v_{eff} dle vzorce 6.44 a na jejich základě pak stanovit hodnotu koeficientu rozšíření k dle Tabulka 5.6 Tabulka 5.6 koeficient, k , pro různé efektivní stupně volnosti, v_{eff} .

Pro případ zátěže 30 g vypadá výpočet následovně

$$v_{eff} = (10 - 1) \times \frac{0,00016073^4}{(9,49 \cdot 10^{-5})^4} = 74,16.$$

Pro hodnoty $v_{eff} > 30$ je odpovídající hodnota koeficientu rozšíření $k = 2$.

A konečně rozšířená nejistota dle vzorce 6.43

$$U(E) = 2 \cdot 0,00016073 = 0,000321.$$

Tabulka 7.38 Rozšířené nejistoty odpovídající testovacím zátěžím

Testovací zátěž (g)	u(E) (g)	v_{eff}	k	U(E) (g)
10+20	0,00016073	74,15655	2	0,000321
10+60	0,000167873	88,24399	2	0,000336
100	0,000167873	88,24399	2	0,000336
50+10	0,000211216	221,1371	2	0,000422
100+50+20+20+10	0,00032909	1303,21	2	0,000658

Pro úplnost jsou veškeré údaje na závěr uvedeny v údaje do přehledné bilanční tabulky.

Tabulka 7.39 Bilanční tabulka kalibrace vah Ohaus Explorer EX224

Nástroj:	elektronické váhy, popis a identifikace
-----------------	--

Max/d	220 g / 0,1 mg				
vestavěné justovací zařízení	Interní/externí kalibrace vybrána automatická kalibrace po zapnutí				
justování kalibrátoru	provedeno před kalibrací				
teplota při kalibraci	24,25-24,31 °C				
podmínky pracoviště	teplota stabilizována na 24,1 °C ± 1 °C, tlak $p = 1006,9$ hPa, vlhkost $hr = 27,9 - 28,1$ %				
receptor zatížení	průměr 90 mm				
testovací zátěž	standardní závaží, třída E2				
Pořadí měření n	zaznamenané údaje I_{ji} v g				
1	99,9996				
2	99,9994				
3	99,9995				
4	99,9995				
5	99,9996				
6	99,9995				
7	99,9995				
8	99,9994				
9	99,9993				
10	99,9994				
Chyby indikace	Zaznamenané indikace:				
	testovací zátěž (g)	indikace (g)	chyba indikace (g)		
	30	30	0		
	60	59,9997	-0,0003		
	100	99,9995	-0,0005		
	150	149,9996	-0,0004		
	200	199,9992	-0,0008		
Zkoušky excentricity	testovací zátěž $L_{ecc} = 100$ g				
Pozice	Indikace (g)	Odchylky od indikace na pozici 1 ΔI (g)			
1	99,9996				
2	99,9994	-0,0002			
3	99,9993	-0,0003			
4	99,9996	0			
5	99,9998	0,0002			
$ \Delta I_{ecc} _{max} =$	0,0003 g				
Chyby a relativní nejistoty					
Množství nebo vliv	Zátěž, indikace v g Standardní nejistota v g				
Indikace $I \approx m_N/g$	30	60	100	150	200
Chyba E_{cal}/g	0	-0,0003	-0,0005	-0,0004	-0,0008
Opakovatelnost	$9,49 \cdot 10^{-5}$ g				
Čtení dílku $d_0/\sqrt{12}$	$2,887 \cdot 10^{-5}$ g				
Čtení dílku $d_I/\sqrt{12}$	$2,887 \cdot 10^{-5}$ g				
Excentricita $\hat{w}_{ecc}(I)$	$8,66 \cdot 10^{-7}$ g				
$u(I)$	0,000135 g				

Test. zátěže m_N/g	10+20	10+50	100	50+100	10+20+20+ 50+100
$u(\delta m_c) = \frac{mpe}{\sqrt{3}}/g$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$28 \cdot 10^{-5}$
$u(\delta m_D) = \frac{mpe}{3\sqrt{3}}/g$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
$\hat{w}(m_B)m_N = \frac{mpe}{4\sqrt{3}}/g$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
$u(\delta m_{conv})/mg$	$\Delta T < 1K$; v daném případě není relevantní				
Nejistota chyby $u(E)/g$	$16,1 \cdot 10^{-5}$	$16,8 \cdot 10^{-5}$	$16,8 \cdot 10^{-5}$	$21,1 \cdot 10^{-5}$	$32,9 \cdot 10^{-5}$
v_{eff} $v_{eff} = (n-1) \frac{u^4(E)}{u^4(\delta I_{rep})}$	74,15	88,24	88,24	221,14	1303,21
$k(95,45 \%)$	2	2	2	2	2
$U(E) = ku(E)/g$	0,000321	0,000336	0,000336	0,000422	0,000658

7.5 Kalibrace vah Sartorius CP225D s vybavením VUT ústavu elektrotechnologie

Analogicky jako v případě kalibrace vah Ohaus Explorer EX224 bylo postupováno i při kalibraci vah Sartorius CP 225D. Opět bylo postupně prováděno měření opakovatelnosti, chyby indikace a excentricity.

Tabulka 7.40 Bilanční tabulka kalibrace vah Sartorius CP 225D

Nástroj:	elektronické váhy, popis a identifikace
Max/d	220 g / 0,1 mg
vestavěné justovací zařízení	Interní/externí kalibrace vybrána automatická kalibrace po zapnutí
justování kalibrátoru	provedeno před kalibrací
teplota při kalibraci	24,25-24,31 °C
podmínky pracoviště	teplota stabilizována na $24,1 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$, tlak $p = 1006,9 \text{ hPa}$, vlhkost $hr = 27,9 - 28,1 \%$
receptor zatížení	průměr 90 mm
testovací zátěž	standardní závaží, třída E2
Pořadí měření n	zaznamenané údaje I_{ji} v g
1	100,0001
2	99,9999
3	99,9999
4	99,9998
5	100,0000
6	99,9997
7	99,9999
8	99,9999

9	99,9999				
10	99,9999				
Chyby indikace	Zaznamenané indikace:				
	testovací zátěž (g)	indikace (g)		chyba indikace (g)	
	30	29,99999		-0,00001	
	60	59,99992		-0,00008	
	100	99,9998		-0,0002	
	150	149,9997		-0,0003	
	200	199,9998		-0,0002	
Zkoušky excentricity	testovací zátěž $L_{ecc} = 100$ g				
Pozice	Indikace (g)	Odchytky od indikace na pozici 1 ΔI (g)			
1	99,9998	0			
2	99,9998	0,0001			
3	99,9999	-0,0001			
4	99,9997	0,0001 g			
$ \Delta I_{ecc} _{max} =$	0,0001 g				
Chyby a relativní nejistoty					
Množství nebo vliv	Zátěž, indikace v g Standardní nejistota v g				
Indikace $I \approx m_N/g$	30	60	100	150	200
Chyba E_{cal}/g	-0,00001	-0,00008	-0,0002	-0,0003	-0,0002
Opakovatelnost	$10,5 \cdot 10^{-5}$ g				
Čtení dílku $d_0/\sqrt{12}$	$2,887 \cdot 10^{-6}$ g		$2,887 \cdot 10^{-5}$ g		
Čtení dílku $d_I/\sqrt{12}$	$2,887 \cdot 10^{-6}$ g		$2,887 \cdot 10^{-5}$ g		
Excentricita $\hat{w}_{ecc}(I)$	$2,887 \cdot 10^{-7}$ g				
$u(I)$	$10,9 \cdot 10^{-5}$ g		$11,7 \cdot 10^{-5}$ g		
Test. zátěže m_N/g	10+20	10+50	100	50+100	10+20+20 +50+100
$u(\delta m_c) = \frac{mpe}{\sqrt{3}}/g$	$8 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$28 \cdot 10^{-5}$
$u(\delta m_D) = \frac{mpe}{3\sqrt{3}}/g$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
$\hat{w}(m_B)m_N = \frac{mpe}{4\sqrt{3}}/g$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-5}$
$u(\delta m_{conv})/mg$	$\Delta T < 1K$; v daném případě není relevantní				
Nejistota chyby $u(E)/g$	$14 \cdot 10^{-5}$	$14,8 \cdot 10^{-5}$	$15,4 \cdot 10^{-5}$	$20 \cdot 10^{-5}$	$32,2 \cdot 10^{-5}$
$v_{eff} = (n-1) \frac{u^4(E)}{u^4(\delta I_{rep})}$	28,08	35,21	40,69	116,97	784,61
$k(95,45 \%)$	2	2	2	2	2
$U(E) = ku(E)/g$	0,00028	0,000296	0,000307	0,0004	0,00064

7.6 Srovnání provedených kalibrací vah

Provedené kalibrace závaží je vhodné uzavřít celkovým srovnáním dosažených

výsledků s ohledem vypočtené nejistoty. Tyto jsou přehledně uvedeny v následující Tabulka 7.41.

Tabulka 7.41 Závěrečné shrnutí dosažených výsledků při kalibraci vah

	Nejistoty zjištěné pro dané váhy (g)	
V oblasti (g)	Ohaus Explorer 224	Sartorius CP225D
30	$30 \pm 0,000321 \text{ g}$	$30 \pm 0,00028 \text{ g}$
60	$60 \pm 0,000336 \text{ g}$	$60 \pm 0,000296 \text{ g}$
100	$100 \pm 0,000336 \text{ g}$	$100 \pm 0,000307 \text{ g}$
150	$150 \pm 0,000422 \text{ g}$	$150 \pm 0,0004 \text{ g}$
200	$200 \pm 0,000658 \text{ g}$	$200 \pm 0,000644 \text{ g}$

8 ROZVAHA FINANČNÍ NÁROČNOSTI

8.1 Ceny závaží

První nabíledni při posouzení finanční náročnosti za účelem dosažení požadované přesnosti měření je samozřejmě cena referenčního závaží použitého pro kalibraci závaží s nižší třídou přesnosti. Pokud v našem případě byla do laboratoře VUT zakoupena sada závaží Radwag třídy přesnosti E2, která obsahovala závaží nominálních hodnot 1g, 2g, 2g*, 5g, 10g, 20g, 20g*, 50g a 100g. Tato sada v roce 2012 stála 20.940,- Kč bez DPH.



Obrázek 8.1 Sada závaží Radwag třídy přesnosti E2

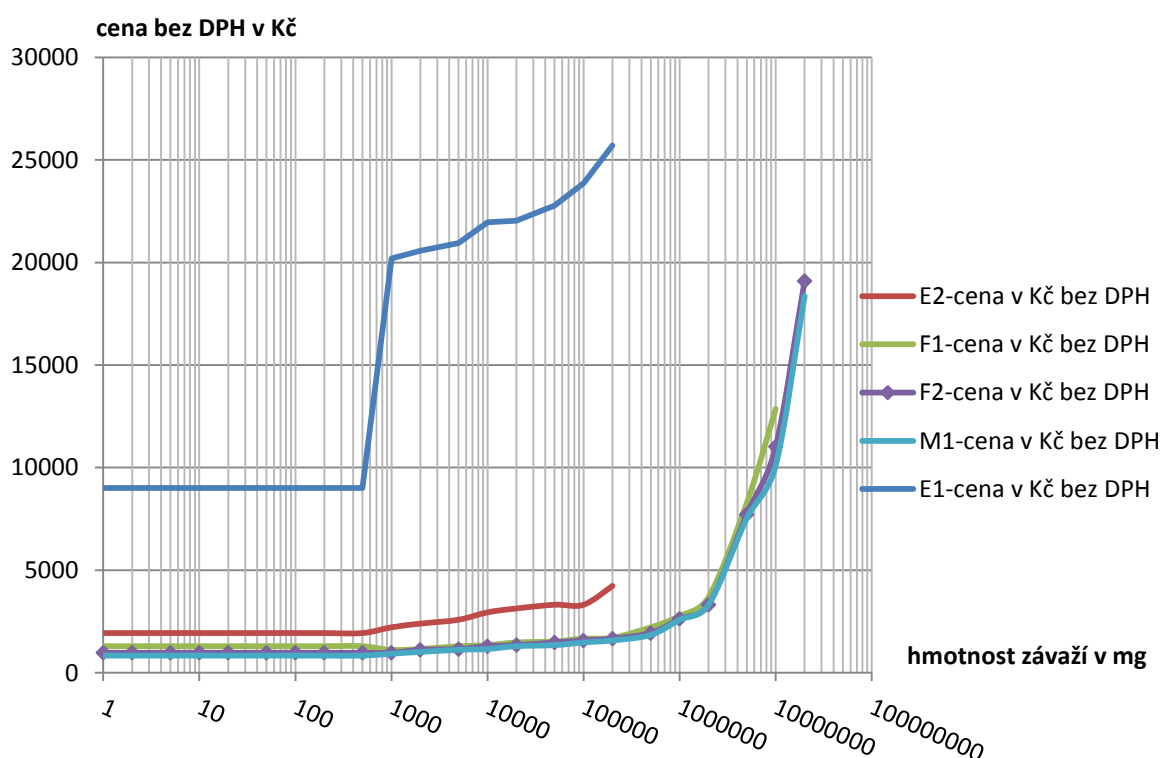
Pro srovnání byla z ceníku společnosti Radwag vypracována přehledná tabulka zachycující ceny závaží podle jejich nominální hodnoty a třídy přesnosti, kde je možné pro jednotlivé jmenovité hodnoty porovnat ceny závaží různých tříd přesnosti. Nárůst cen pro nejpřesnější třídu E1 je zcela evidentní.

Tabulka 8.1 Ceny závaží podle jejich nominální hodnoty a třídy přesnosti

hmotnost mg/třída	v	E1-cena Kč bez DPH	v	E2-cena Kč bez DPH	v	F1-cena Kč bez DPH	v	F2-cena Kč bez DPH	v	M1-cena Kč bez DPH
1		9000		1930		1290		970		830
2		9000		1930		1290		970		830
5		9000		1930		1290		970		830
10		9000		1930		1290		970		830
20		9000		1930		1290		970		830
50		9000		1930		1290		970		830
100		9000		1930		1290		970		830
200		9000		1930		1290		970		830
500		9000		1930		1290		970		830
1000		20200		2210		1110		970		920
2000		20570		2390		1150		1110		1010
5000		20940		2580		1290		1150		1110
10000		21970		2940		1340		1290		1150
20000		22040		3130		1470		1340		1290

50000	22770	3310	1520	1470	1340
100000	23870	3310	1660	1570	1470
200000	25710	4230	1700	1660	1570
500000			2210	1930	1840
1000000			2760	2620	2580
2000000			3680	3310	3310
5000000			8270	7720	7530
10000000			12860	11020	10100
20000000				19100	18360

Na následující straně je pak tabulka převedena do grafické podoby a Obrázek 8.2 výstižně prezentuje již zmíněný výrazný rozptyl cen pro třídy přesnosti E1 a nižší třídy přesnosti.



Obrázek 8.2 Ceny závaží podle jejich nominální hodnoty a třídy přesnosti

Závaží použitá v laboratoři ČMI byla od společnosti Mettler Toledo a jednalo se o třídu přesnosti E1, cena celé sady závaží obsahující vždy dvě závaží v rozsahu od 1mg do 1kg, byla zakoupena již v roce 1996. Dle inventáře laboratoře pořizovací cena této sady v roce 1996 činila 146.000,-- Kč.

Kromě výše uvedené sady se v laboratoři hmotnosti nachází i státní etalon hmotnosti České republiky, platino-iridiový prototyp 1 kg, číslo 67, jehož konvenční hmotnost je $1 \text{ kg} + 0.165 \text{ mg}$, s nejistotou $U = 0.004 \text{ mg}$ (pro $k = 1$), objemem při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $46,4352 \text{ cm}^3$ s nejistotou 0.0003 cm^3 a hustotou při $0 \text{ }^\circ\text{C}$ $21535,4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Cena tohoto státního etalonu činila v 1999 částku 1.220.204,-- Kč. ČMI rovněž uchovává dvě etalonová závaží z austenitické oceli o jmenovité hmotnosti 1 kg s nejistotou $U = 0.05 \text{ mg}$ v hodnotě každé 15.498,-- Kč z roku 1996.



Obrázek 8.3 Státní etalon hmotnosti č. 67 a dvě etalonová závaží 1kg z austenitické oceli

8.2 Ceny vah a komparátoru

Další důležitou položkou rozpočtu, při pořizování vybavení pro dosažení co nejnižších nejistot měření hmotnosti materiálů, je zcela jistě pořizovací cena vah, případně komparátorů.

Laboratoř VUT je vybavena vahami značky Ohaus Explorer 224 s maximální kapacitou 220g, rozlišitelností 0,1 mg a opakovatelností ± 0.0001 . Tabulka zachycuje ceny vah Ohaus Explorer pro různé stupně rozlišitelnosti a maximální kapacity vah.



Obrázek 8.4 Váhy značky Ohaus Explorer 224 a Sartorius CP225D na půdě VUT

Tabulka 8.2 Ceny vah Ohaus Explorer pro různé stupně rozlišitelnosti a maximální kapacitu

Model	EX 124	EX 224	EX 324	EX 223	EX 423	EX 623	EX 1103	EX 2202	EX 4202	EX 6202	EX 10202
Max. kapacita(g)	120	220	320	220	420	620	1100	2200	4200	6200	10200
Rozlišitel - nost (g)	0.0001			0.001			0.01				
Opakova- telnost (g)	±0.0001			±0.001			±0.01				
Cena (Kč)	67050	76500	89100	58050	64050	73050	94950	56400	64500	73950	87300

V rámci Českého metrologického institutu bylo vážení závaží v rozsahu 1 – 5 g prováděno za použití mikrováhy Mettler Toledo UMT5, jejíž rozlišitelnost je 0,1 µg, tyto mikrováhy byly zakoupeny v roce 1996 za pořizovací cenu 531.000,-- Kč, v současnosti je možné ji zakoupit za 686.120,-- Kč. Závaží do 100g byla poté vážena komparátorem Mettler Toledo AT1006 s rozlišitelností 0,1 µg, komparátor byl pořízen rovněž v roce 1996, a to za 2,2 milionu korun. V dnešní době je možné jej zakoupit za cenu 4.912.510,-- Kč.



Obrázek 8.5 Mikrováhy Mettler Toledo UMT5 a komparátor Mettler Toledo AT1006

Je zcela evidentní, že rozlišitelnost vah, které jsou vybavením Českého metrologického institutu s ohledem na rozlišitelnost výše zmíněných vah, je o tři řády přesnější nežli je tomu u vah, které má k dispozici pro svá měření škola. Tomu bezesporu odpovídá i pořizovací cena těchto velmi přesných přístrojů.

8.3 Další vybavení laboratoře

Vahami a závažím však samotná cenová rozvaha nekončí. K přesnému vážení je nezbytné, aby byla v laboratoři udržována konstantní teplota a vlhkost, je proto potřeba, aby laboratoře byly vybaveny kvalitní klimatizací. Pro měření tlaku vzduchu, teploty a vlhkosti jsou nutná i další přesná měřidla jako barometry, teploměry a vlhkoměry. V neposlední řadě je nezbytný stabilní stůl s nekovovou podložkou a ochranou proti

statickému výboji umístěný v prostoru bez průvanu a vibrací.

Samozřejmostí je vybavení pracoviště počítačem se softwarem propojeným s vahami či komparátorem, který provádí vyhodnocení jednotlivých měření.

Pro manipulaci se samotným závažím je pak nutno použít pinzet, rukavic, štětečků na očištění povrchu závaží a dalších prostředků pro udržení čistoty. Toto již jsou v poměru s ostatními položkami zanedbatelné částky. Vezmeme-li například celkové vybavení laboratoře ČMI, pak toto přišlo na bezmála 20 milionů korun.

8.4 Ceny kalibrací

Pokud bychom nepožadovali hodnotná vybavení laboratoří a nechali si svá závaží kalibrovat pomocí, zaplatili bychom za kalibraci řádově miligramových závaží částku 800,-- Kč, za kalibraci řádově gramových závaží částku 1.000,-- Kč a za kalibraci řádově kilogramových závaží částku 1.200,-- Kč.

Je tedy na jednotlivých pracovištích, aby zvážili, zda budou provádět interní kalibraci, k níž je zapotřebí pořídit drahé vybavení jako váhy, vyšší třídy přesností závaží, klimatizované místnosti, další pomocná měřidla a pomůcky, či zda si svá závaží nechá kalibrovat certifikovanou laboratoří. Jinak se k tomu samozřejmě postaví firma s tisíci zaměstnanci, která je na přesném vážení závislá, pro niž bude výhodnější s ohledem na časté kalibrace vybavení laboratoře zakoupit a zaměstnat vyškoleného a certifikovaného pracovníka. Opakem je firma, jež využívá vážení pouze okrajově a svá měřidla přenechá ke kalibraci externí certifikované laboratoří.

Dalším důležitým měřítkem je bezesporu požadovaná nejistota měření, požadavky zákazníků na certifikaci měřících přístrojů, pokud jsou vykonávány služby v jejich prospěch. V takových případech firma povětšinou vyhledá odborníky příslušných institucí.

ZÁVĚR

Diplomová práce měla zejména shrnout problematiku kalibrací závaží a vah s ohledem na nejistoty měření. Její úvodní část byla zaměřena na statistické zpracování naměřených dat, seznámení se s výpočtem nejistot měření vyplývajících ze zdrojů nejistot stanovených metodou typu A a B. Dále zde byly specifikovány možné zdroje nejistot.

Následuje představení rozsáhlé oblasti kalibrací závaží, jejich specifik, a to zejména seznámení se s klasifikací závaží dle tříd přesnosti, jejich maximálními dovolenými chybami, s postupy stanovenými pro příslušná měření jako jsou volba metody porovnání testovacích závaží s referenčním, nezbytný počet cyklů vážení a konečně stanovení nejistot při kalibracích závaží, zdroje nejistot stanovených metodou typu A a výčet možných zdrojů nejistot stanovených metodou typu B.

Obdobně byla prezentována i oblast zabývající se kalibrací vah. Byly uvedeny postupy při měřeních, zejména při prováděných zkouškách opakovatelnosti, excentricity a chyb indikace. Poté byla zmíněna i skladba s kalibrací souvisejících nejistot a samozřejmě jejich konkrétní výpočty.

Nejdůležitějším celkem této práce je bezpochyby část praktická, tedy provedení vlastní kalibrací závaží jednak s využitím laboratorního vybavení a podmínek ústavu elektrotechnologie, tedy za použití vah Ohaus Explorer EX244, sady závaží neznámé značky třídy přesnosti F2, o níž nebyly známy bližší údaje o hustotě materiálu, případné kalibraci, jejich podmínkách či nejistotách, a konečně sady kalibrovaných referenčních závaží výrobce Radwag třídy přesnosti E2. Výpočty byly demonstrovány na jednom vzorovém měření a výsledky všech provedených kalibrací s ohledem na rozsáhlost prováděných výpočtů vždy shrnuje pouze závěrečná bilanční tabulka.

Významným úspěchem byla z mého pohledu zejména možnost provést samostatně shodná měření na půdě Českého metrologického institutu s prvotřídními mikrovahami značky Mettler Toledo UMT5 s dílkem 0,1 µg, komparátorem Mettler Toledo AT1006 s odečitatelností 1 µg a etalonovými závažími rovněž výrobce Mettler Toledo třídy přesnosti E1. Navázání etalonových závaží přímo na platino-iridiový státní etalon hmotnosti České republiky č. 67, který jsem rovněž měla tu čest vidět, trvalo více než tři měsíce. Pracovníkům ČMI tedy bezpochyby patří můj velký dík.

Kapitola 7.3 obsahuje konečné srovnání dosažených výsledků při kalibracích závaží jednak na půdě Vysokého učení technického a jednak na půdě Českého metrologického institutu, z něhož jsou patrné významné rozdíly ve vypočtených nejistotách měření. Výsledky získané kalibrací závaží provedenou v laboratoři hmotnosti ČMI vykazují samozřejmě mnohem menší nejistoty.

Kalibrace vah byla provedena s vahami Ohaus Explorer EX244 a s vahami Sartorius CP225D za použití sady kalibrovaných referenčních závaží výrobce Radwag třídy přesnosti E2. Výsledky obou kalibrací jsou opět porovnány v samostatné kapitole 7.6, z níž je patrné, že v oblasti, kde váhy Sartorius CP225D mají rozlišitelnost o jedno desetinné místo přesnější, tyto opět vykazují menší výsledné nejistoty měření.

Závěrečná kapitola obsahuje rozvahu finanční náročnosti nezbytnou k zajištění požadované přesnosti zjištění hmotnosti. Především obsahuje srovnání cen závaží dle tříd přesnosti, cen vah a komparátorů, dalšího vybavení laboratoře a rovněž cen kalibrací prováděných Českým metrologickým institutem a stručně shrnuje důvody pro volbu konkrétních řešení.

Zadání této diplomové práce mne pohltilo do té míry, že mi bylo rovněž koníčkem a ukázalo mi možnou cestu budoucího uplatnění, např. na pozici metrologa ať již ve sféře soukromoprávní či v rámci národního metrologického systému.

SEZNAM ZKRATEK

a_+ a a_-		horní a dolní limit hodnot vstupní veličiny X_i
A_i		koeficient citlivosti daného zdroje nejistoty
b		horní a dolní limit hodnot vstupní veličiny X_i , kdy je pravděpodobnost lichoběžníkového rozdělení shodná jako u rovnoměrného rozdělení
c_{class}		kvocient konstantní pro všechna závaží, která patří do stejné třídy
C_i		koeficient vzhledem ke korekci na vztlak vzduchu
d		délka stupnice vah
d_0		hodnota dílku stupnice v základním režimu
d_1		je odhadovaná vzdálenost mezi středy závaží
d_2		vzdálenost od středu čidla zátěže k jednomu z rohů
d_T		hodnota dílku menší než d ($d_T < d$)
D		rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou při zkoušce excentricity
D_r		drift konvenční hodnoty hmotnosti m_c od poslední kalibrace
$D(x)$		moment 2. řádu, rozptyl
e		absolutní chyba měření
$E(x)$		střední hodnota statistického rozdělení
E_j		chyba dané indikace
$E_1, E_2, F_1, F_2,$ $M_1, M_{1-2},$ M_2, M_{2-3}, M_3		třídy přesnosti závaží
$f(x)$		hustota rozdělení pravděpodobnosti
g	m/s ²	gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$
h	m	výška nad hladinou moře v metrech
hr	%	relativní vlhkost
i, j		číslo v pořadí $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, J$
I_r		indikace hmotnosti referenčního závaží
I_L		indikace při zátěži
I_t		indikace hmotnosti testovacího závaží
J		počet provedených sérií měření
k		koeficient rozšíření
k_L		je počet zkušebních bodů
k_r		koeficient rozšíření směrodatné odchylky
k_{UA}		bezpečnostní faktor
l_M		délku měřeného znaku po změně teploty
l_0		délku měřeného znaku za referenčních podmínek
L_{ECC}		testovací zátěž v testu excentricity
L_T		testovací závaží
m	kg	hmotnost
m_0	kg	jmenovité hodnoty hmotnosti
m_c	kg	konvenční hmotnost, skutečná
$\overline{\Delta m_c}$	kg	průměrná odchylka hmotnosti mezi zkušebním závažím a referenčním závažím
m_N		jmenovitá hodnota zatížení

m_{ref}		hmotnost referenčního závaží
$m_{pe} = \delta_m$		maximální dovolená chyba
M_a	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	molární hmotnost suchého vzduchu;
Max		maximální hodnota indikace vah
M_v	$\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$	molární hmotnost vody
n		počet opakování
p	Pa	tlak
p_0	Pa	normální tlak, kdy $p_0 = 101\,325\text{ Pa}$
$r_{xi,xk}$		korelační koeficient udávající míru korelace
R	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$	molární plynová konstanta
Res		rozlišitelnost příslušného měřidla
s		směrodatná výběrového souboru odchylka
$s(\Delta m_{ci})$		směrodatná odchylka rozdílu hmotností
$s^2(x)$		výběrový rozptyl hodnot x_i
$s_{\bar{x}}$		případně směrodatná odchylka aritmetického průměru
$s^2(\bar{x})$		výběrový rozptyl aritmetického průměru
s_p^2		známý odhadu rozptylu z velkého počtu měření, tzv. průřezový rozptyl
t	$^{\circ}\text{C}, \text{K}$	teplota
t_{ref}	K	referenční teplota $t_{ref} = 20^{\circ}\text{C}$
T		termodynamická teplota
Tol		speciální rozsahu tolerance
$u(\bar{x})$		standardní nejistota měření odhadu hodnoty vstupní veličiny x
u_A		nejistota typu A
u_B		nejistota typu B
u_{ba}		nejistota vah
u_C		kombinovaná nejistota
u_E		nejistota vzhledem k excentricitě
$u^2(E)$		nejistota chyby
u_F		nejistota použitého vzorce
$u_{inst}(m_{cr})$		nejistotou vzhledem k nestabilitě hmotnosti referenčních závaží
u_{l0}		nejistotu měření u_{l0} při uvažování zdrojů nejistot $\alpha_M, \alpha_P, \Delta t_P$ a Δt_M
u_{ma}		nejistota vzhledem k magnetismu
$u(m_s)$		standardní nejistota příspěvku citlivosti vah
u_{res}		standardní nejistota z rozlišitelnosti měřidla
u_s		nejistota vzhledem k citlivosti vah
$u_w(\overline{\Delta m_c})$		standardní nejistota vážení stanovená metodou typu A
u_y		standardní nejistota měření odhadu hodnoty výsledné veličiny y
$u(\delta I_{digo})$		standardní nejistota zaokrouhlení bez zatížení
$u(\delta I_{rep})$		standardní nejistota zaokrouhlení při zatížení
$u(\delta I_{rep})$		standardní nejistota z opakovatelnosti
$u(\delta I_{ecc})$		standardní nejistota vzhledem k excentricitě zatížení
$u(\delta m_c)$		standardní nejistota konvenční hmotnosti
$u(\delta m_{conv})$		nejistota vlivem konvekčních účinků
$u(\rho_a)$		nejistota hustoty vzduchu

$u(\Delta I_s)$		nejistota vzhledem k ΔI_s
U		rozšířená nejistota
v_{eff}		efektivní stupně volnosti
V	m^3	objem tělesa
\hat{w}		hodnota nejistoty dělená hodnotou hmotnosti
$\hat{w}(m_B)$		relativní standardní nejistota vzhledem ke korekci na vztlak vzduchu
$\hat{w}(\delta I_{ecc})$		relativní zápis standardní nejistoty vzhledem k excentricitě zatížení
\bar{x}		aritmetický průměr ze změřených hodnot x_1, x_2, \dots, x_n
x_1, x_2, \dots, x_n		změřené hodnoty
x_i		odhady hodnoty vstupních veličin
x_s		skutečná, naměřená hodnota
x_v		molární zlomek vodní páry
X_i		vstupní veličina měření
y		odhad hodnoty měřené veličiny
Y		výstupní veličina měření
z_{imax}		maximální odchylka daného zdroje nejistoty
Z	$1/\text{Pa}$	stlačitelnost
$Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p$		zdroje nejistot
α_p a α_M		koefficienty teplotní roztažnosti materiálu měřeného znaku a měřidla
δI_{dig0}		zaokrouhlovací chybu indikace vah bez zatížení
δI_{digL}		zaokrouhlovací chybu indikace vah se zatížením
δI_{ecc}		chyby vzniklé v důsledku polohy testovací zátěže L_{ecc} mimo střed těžiště
δI_{rep}		chyby vlivem nedokonalé opakovatelnosti
$\delta_m = m_{pe}$		maximální dovolená chyba
δm_B		korekce na vztlaku vzduchu
δm_c		korekci na jmenovitou hodnotu zátěže m_N k získání skutečné konvenční hodnoty hmotnosti m_c
δm_{conv}		korekce na konvekční účinky
δ_{zj}		rozlišovací schopnost přístroje
$\delta \rho_{as}$		odchylka skutečné hustoty vzduchu od hodnoty při kalibraci
ε		náhodná složka chyby měření
ρ	$\text{kg/m}^3, \text{g/cm}^3, \text{kg/l}$	hustota látky
ρ_0	kg/m^3	hustota vzduchu $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$
ρ_a	kg/m^3	hustoty vzduchu při kalibraci
ρ_{as}		skutečná hustoty vzduchu
ρ_r	kg/m^3	hustota referenčního závaží
$\rho_{ref} = \rho_c$	kg/m^3	hustotě referenčního závaží pro $\rho_{ref} = 8000 \text{ kg/m}^3$
ρ_s		skutečná hustoty závaží
ρ_t	kg/m^3	hustota testovacího závaží
ρ_v	kg/m^3	hustota deionizované vody
ΔI_{ecc}		odchylka indikace od základní polohy v testu excentricity
ΔI_i		indikace odchylky při i -tém měření

ΔI_s	změna v indikaci vah vzhledem k citlivostnímu závaží
Δm_c	rozdíl konvenční hmotnosti mezi testovacím a referenčním závažím v i -tém cyklu
Δm_{conv}	mezní hodnota změna hmotnosti vlivem konvekčních účinků
$\Delta \tau$	korekce teplotní roztažnosti
Δt_p a Δt_M	rozdíly mezi skutečnou a referenční teplotou znaku a měřidla
Δ_x	výsledná chyba měření

LITERATURA

1. International recommendation OIML R 111-1 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 a M3. Part I. Metrological and technical requirements. <http://www.oiml.org>. [Online] 2004. [Citace: 16. února 2013.] <http://www.oiml.org/publications/R/R111-1-e04.pdf>.
2. International recommendation OIML R 76-1 Non-automatic weighing instruments. <http://www.oiml.org/>. [Online] 2006. [Citace: 16. února 2013.] <http://www.oiml.org/publications/R/R076-1-e06.pdf>.
3. **institut, Český normalizační.** ČSN EN 45501 metrologické aspekty vah s neautomatickou činností. Praha : Český normalizační institut, 1995.
4. Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů. Praha : Sbírka zákonů, 1990.
5. zákon č. 22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky. Praha : Sbírka zákonů, 1997.
6. TNI 01 0115:2009. Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). 2009.
7. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. <http://www.bipm.org>. [Online] srpen 2008. [Citace: 16. únor 2013.] http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf.
8. EA 4/02 Vyjadřování nejistot měření při kalibracích. <http://www.cia.cz/>. [Online] leden 2001. [Citace: 16. únor 2013.] http://www.cia.cz/files/01_08-P001%20EA%2004_02_20061023.pdf.
9. **Němeček, Pavel.** *Nejistoty měření*. Praha : Česká společnost pro jakost, o.s., 2008. ISBN 978-80-02-02089-9.
10. **Vdoleček, František a Halaj, Martin.** Nejistoty v měření II.: nejistoty přímých měření. *Automa*. 7, 2001, Sv. 10, 52 až 56 s.
11. **Palenčár, Rudolf, Vdoleček, František a Halaj, Martin.** Nejistoty v měření III.: nejistoty nepřímých měření. *Autom.* 7, 2001, Sv. 12, 28 až 33 s.
12. —. Nejistoty v měření I.: vyjadřování nejistot. *Automa*. 7, 2001, Sv. 7-8, 50 až 54 s.
13. **Klenovský, Pavel.** Opatření obecné povahy č. 0111-OOP-C012-10, čj. 0313/005/10/Pos., kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na stanovení měřidla, včetně metod zkoušení pro schvalování typu a ověřování stanovených měřidel. „laboratorní hustoměry s hodnotou dílku menší než 1kg•m-3 s výjimkou hustoměrů na měření zrnitosti zemin (Casagrade)“. [Online] 12. července 2011. [Citace: 16. února 2013.] <http://bit.ly/10lt2vp>.
14. OIML D 28 Conventional value of the result of weighing in air. <http://www.oiml.org>. [Online] 2004. [Citace: 19. února 2013.] <http://www.oiml.org/publications/D/D028-e04.pdf>.
15. <http://www.euramet.org>. *Guidelines on the Calibration on the Non-Automatic Weighing Instruments*. [Online] Leden 2009. [Citace: 3. března 2013.] http://www.euramet.org/fileadmin/docs/Publications/calguides/EURAMET_cg-

18__v_3.0_Non-Automatic_Weighing_Instruments_01.pdf.

16. Manuál vah Ohaus Explorer EX224. www.ohaus-vahy.cz. [Online] 2012. [Citace: 16. února 2013.] <http://www.ohaus-vahy.cz/analyticka-vaha-explorer-pro>.