

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

METODIKA PRO KALIBRACI OBJEMU NÁDOB A NÁDRŽÍ

METODOLOGY FOR CALIBRATION OF CONTAINERS AND TANKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. ŠIMON VRÁTIL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSC.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Šimon Vrátil

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

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

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metodika pro kalibraci objemu nádob a nádrží

v anglickém jazyce:

Methodology for calibration of containers and tanks

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V praxi je třeba kalibrovat také nádrže a nádoby různých objemů. V současnosti se k tomu používá nejednotných postupů a ne vždy platných norem, což vede k nejasnostem a sporům, zejména při stanovení výsledné nejistoty. Většina měření se realizuje přímo u uživatele, nikoli v laboratoři. Práce bude řešena v úzké součinnosti s kalibrační laboratoří Volume dm3 s.r.o. Brno.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je důsledný rozbor problému a návrh univerzálního postupu pro kalibrace či ověřování nádob různých velikostí. Preferovány jsou objemové metody za použití odměrných nádob nebo průtočných měřidel. Součástí práce bude důsledná analýza nejistot měření i metodika stanovení výsledné nejistoty kalibrace.

Doporučená osnova práce:

1. Měření objemu nádob
2. Analýza předpisů z oboru kalibrace nádob
3. Výběr vhodných metod a prostředků kalibrace objemu
4. Důsledná analýza nejistot měření použité metody

Příloha práce: Pracovní postup kalibrace

Seznam odborné literatury:

CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M.; Meranie technických veličín : 1.vydání
Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.
ĎAĎO, S.; BEJČEK, L.; PLATIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny . 1. vyd. Praha : BEN -
technická literatura, 2005. 447 s. ISBN 80-7300-156-X.
Normy a předpisy z oboru kalibrace a nejistot měření
Firemní literatura a internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 21.11.2012




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o návrhu metrologického postupu kalibrace objemu nádob a nádrží pomocí objemové metody. Jsou zde analyzovány stávající předpisy a posuzovány vlivy na výpočet nejistot měření. Stěžejní částí práce je odvození výpočtů nejistot a popis tvorby samotného metrologického postupu, který je přílohou.

ABSTRACT

This diplomathesis work is dealing with a concept of volumetric calibration of vessels using the volumetric method. The analysis considers current regulations together with influence of uncertainties in measurements. The principal part of the thesis is analysis of metrological uncertainties resulting from application of various volumetric methods during the calibration process. A practical outcome from this research is development of metrological process for calibration of vessels that could be used by the accredited laboratories.

KLÍČOVÁ SLOVA

kalibrace, objemová metoda, metrologický postup, nejistoty měření

KEY WORDS

calibration, volumetric method, metrological process, metrological uncertainties, measurement methods

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího a s použitím podkladů uvedených v příloženém seznamu.

V Brně dne

.....

Podpis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRÁTIL, Š. *Metodika pro kalibraci objemu nádob a nádrží*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 107s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Vdoleček, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za odborné vedení, podnětné připomínky a čas, který mi věnoval v průběhu vypracovávání této práce. Velké díky také patří panu Milanovi Zemanovi z firmy Volume dm3, s. r. o., Brno, který mi poskytl potřebné dokumenty, praktické informace z oboru kalibrace a své cenné zkušenosti. Dále děkuji své rodině za podporu v dosavadním studiu i při tvorbě této práce.

OBSAH

1.	Úvod.....	13
2.	Metodika měření objemu	15
2.1.	Ověřování	15
2.2.	Kalibrace	15
2.2.1.	Hmotnostní metoda	15
2.2.2.	Matematická metoda	15
2.2.3.	Objemová metoda	15
2.3.	Měřidlo	15
2.3.1.	Stacionární sudy a nádrže	15
2.3.2.	Přepavní sudy a nádrže	15
2.4.	Indikační zařízení měřidla pro měření objemu	16
2.4.1.	Stavoznak	16
2.4.2.	Hladinoměř.....	16
3.	Analýza předpisů z oboru kalibrace.....	17
3.1.	Technologický předpis metrologický.....	17
3.2.	Opatření obecné povahy.....	17
3.3.	Podniková norma ÚNM	17
3.4.	International organization of legal metrology	18
3.5.	European co-operation for Accreditation.....	18
4.	Kalibrace objemu objemovou metodou	19
4.1.	Etalon	19
4.1.1.	Odměrná nádoba	19
4.1.2.	Krychloměr	19
4.1.3.	Objemové průtočné měřidlo.....	19
4.2.	Postup kalibrace	19
5.	Chyba měření	21
5.1.	Zdroje chyb při měření.....	21
5.2.	Rozdělení chyb měření.....	21
5.2.1.	Systematická chyba.....	21
5.2.2.	Hrubá chyba	22
5.2.3.	Náhodná chyba.....	22
5.2.4.	Celková chyba.....	22
5.2.5.	Grafické znázornění druhů chyb	23

6.	Nejistota měření	25
6.1.	Kombinovaná standardní nejistota	25
6.2.	Standardní nejistoty- vyhodnocení typu A	25
6.3.	Standardní nejistoty- Vyhodnocení typu B	26
6.3.1.	Koeficient citlivosti	26
6.4.	Rozšířená nejistota	26
6.5.	Základní pojmy a definice pro určení nejistot	27
6.6.	Rozdělení nejistot podle vyhodnocení typu B	28
6.6.1.	Základní rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny	28
6.7.	Vlivy na nejistotu měření objemu objemovou metodou	31
6.8.	Nejistoty na kalibraci lze také rozdělit podle použitého etalonu	31
6.9.	Určení nejistot a odvození vzorců pro výpočet	32
6.9.1.	Nejistota kalibrace etalonu	32
6.9.2.	Rozdíl teplot měřicí kapaliny v průběhu měření	34
6.9.3.	Teplotní roztažnost materiálu etalonu	35
6.9.4.	Rozdíl tlaku kapaliny v průběhu měření	36
6.9.5.	Nejistota vyplývající z čtení indikačního zařízení etalonu	37
6.9.6.	Nejistota odečítání z kalibrovaného měřidla	42
6.9.7.	Zanedbané nejistoty	44
7.	Tvorba metrologického postupu	45
7.1.	Osnova	45
7.2.	Text Postupu	45
7.3.	Číslování	46
7.4.	Zdroje a literatura	46
8.	Závěr	47
9.	Seznam literatury a dalších zdrojů	49
10.	Seznam symbolů a zkratk	51
11.	Seznam Příloh	53

1. ÚVOD

Tato diplomová práce se, na podnět akreditované laboratoře Volume dm3, s. r. o, zabývá návrhem jednotného metrologického postupu pro kalibraci objemu nádob objemovou metodou. Pomocí tohoto bude možno kalibrovat veškeré nádoby běžnými způsoby kalibrace za pomoci objemové metody a následné určení nejistoty kalibrace. Metrologický postup má být navržen obecně tak, aby podle něj mohly být kalibrovány veškeré nádoby a při nepodstatných změnách kalibrace v praxi nepřestal být platný.

Cílem práce je důsledný rozbor problému a návrh univerzálního postupu pro kalibraci či ověřování nádob různých velikostí. Preferovány jsou objemové metody za použití odměrných nádob nebo průtočných měřidel. Součástí práce bude důsledná analýza nejistot měření i metodika stanovení výsledné nejistoty kalibrace.

Metrologický postup je určen pro firmu Volume dm3, s. r. o., která jej bude užívat jako obecný postup pro kalibraci objemu objemovou metodou a k výpočtu kombinované nejistoty kalibrace. Tento metrologický postup tak nahradí současné nejednotné postupy s ne vždy platnými normami, kde dochází k nejasnostem a sporům.

2. METODIKA MĚŘENÍ OBJEMU

Tato kapitola se věnuje teorii metod měření objemu a kalibrace. Z této části vychází teoretická část metrologického postupu kalibrace objemu objemovou metodou.

2.1. Ověřování

Poskytnutí objektivního důkazu, že daná položka splňuje specifikované požadavky. [5]

2.2. Kalibrace

Činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke stanovení vztahu pro získání výsledku měření z indikace. [5]

V následujícím výčtu jsou uvedeny metody měření objemu. Jsou rozděleny do tří základních skupin.

2.2.1. Hmotnostní metoda

Měření objemu pomocí hmotnostní metody se získává výpočtem z rozdílu hmotnosti prázdného a plného měřidla. Vážení prázdného měřidla se provádí dle požadavku na vymokření – *mokrý tára*. Pro vážení měřidla se užívají váhy 3. třídy podle normy ČSN 17 7010 a hustoměry dle norem ČSN 25 7610, ČSN 25 7612 nebo ČSN 25 7616.

2.2.2. Matematická metoda

Měření objemu pomocí matematické metody je založeno na výpočtu objemu z naměřených rozměrů nádob či nádrží. V praxi se tato metoda ke kalibraci nepoužívá z důvodu malé přesnosti výpočtu u menších objemů.

2.2.3. Objemová metoda

Objem napouštěné nebo vypouštěné měřicí kapaliny do měřené nádoby či tanku je odměřován za pomoci etalonu. Během kalibrace se měří veškeré veličiny ovlivňující odměřený objem a následně se z nich vypočítá nejistota měření.

2.3. Měřidlo

Je v tomto případě objemová nádoba určená ke skladování či převážení kapaliny a jejímu odměřování pomocí indikačního zařízení. Dělí se do dvou základních skupin.

2.3.1. Stacionární sudy a nádrže

Stacionární sudy a nádrže (tanky) jsou nádoby určené pro skladování kapalných látek, např. chemickém, lékárnickém a potravinářském průmyslu.

2.3.2. Převravní sudy a nádrže

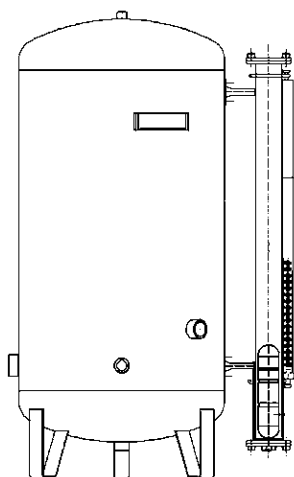
Převravní sudy a nádrže (tanky) jsou nádoby určené pro přepravu kapalných látek, např. v chemickém, lékárnickém a potravinářském průmyslu.

2.4. Indikační zařízení měřidla pro měření objemu

Toto zařízení je umístěno na měřidle a slouží k indikaci objemu kapaliny v měřidle v závislosti na výšce hladiny v měřidle. V praxi se běžně využívají indikační zařízení v podobě stavoznaku nebo automatických hladinoměů různých konstrukcí.

2.4.1. Stavoznak

Vodoznak nebo stavoznak je zařízení, kterým se sleduje výška vody v měřidle, jiné nádobě, nebo v systému potrubí. Pracuje na principu spojených nádob. Často je k němu přidružená stupnice s dílkou v jednotkách *mm* nebo *l*. [16]



Obr. (2.1): Příklad konstrukce stavoznaku [17]

2.4.2. Hladinoměr

Hladinoměři neboli snímače výšky vodní hladiny se vyskytují v nejrůznějších typech nádrží. Hladinoměr obvykle tvoří snímací hlava (s plovákem). V případě hladinoměů, které pracují na principu magnetostrikce, je základem kovový profil nebo tyč s volným nebo vedeným magnetem. Hladinoměři se dělí do několika základních typů, podle principu měření. Objevují se hladinoměři ultrazvukové, kapacitní, radarové, vztlakové, laserové atd. [18]

3. ANALÝZA PŘEDPISŮ Z OBORU KALIBRACE

Tato kapitola se věnuje analýze vybraných aktuálních předpisů z hlediska metody kalibrace objemovou metodou. U předpisů je vždy uveden popis, stručný obsah a případné zhodnocení, které se věnuje samotnému metrologickému postupu. Zvláštní pozornost je věnována určování nejistot kalibrace, jež jsou hlavním bodem této diplomové práce.

3.1. Technologický předpis metrologický

TPM 6370-95 – Nádrže na mléko. Technické požadavky

Tento předpis se primárně věnuje technickým požadavkům na nádrže na mléko a jejich ověřování.

TPM 6371-96 – Stacionární zásobní nádrže konstruované jako měřicí nádrže

Tento předpis platí pro ověřování stacionárních nádrží na potraviny (nádrže na mléko, nápoje atd.) konstruovaných jako měřicí nádrže, které se ověřují pomocí kapaliny známého objemu. Stanovuje metody zkoušení při ověřování.

Předpis obsahuje podrobně popsany postup pro ověřování, případně pro kalibraci, určité body jsou však zastaralé a v praxi dnes již nepoužitelné. Postup také neobsahuje výpočet nejistot měření.

3.2. Opatření obecné povahy

0111-OOP-C029-12 – Přepravní sudy

Opatření obecné povahy, kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na měřidla včetně metod zkoušení pro schvalování typu a ověřování měřidel: Přepravní sudy. (platné od roku 1995)

Tento předpis se věnuje ověřování a kalibraci pouze přepravních sudů. Vychází z doporučení OIML. Je obecně zpracován, proto z tohoto doporučení částečně vychází i tvorba metrologického postupu pro kalibraci. Nejsou tu však zahrnuty výpočty nejistoty měření.

0111-OOP-C001-09 – Kovové odměrné nádoby

Opatření obecné povahy, kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na měřidla včetně metod pro schvalování typu ověřování měřidel: Kovové odměrné nádoby. (platné od roku 1996)

Toto opatření vychází z OIML R138 a věnuje se ověřování kovových odměrných nádob. Neobsahuje postup kalibrace pomocí těchto nádob a výpočet nejistot při měření.

3.3. Podniková norma ÚNM¹

PNÚ 1320.2 – Prevádzkové meradlá objemu kapalin s jednou objemovou značkou

Tato norma platí pro úřední ověřování přepravních tanků, nádrží na převoz topných olejů, přepravních sudů, cisteren a nádrží na potraviny. (platné od roku 1987)

Norma obsahuje obecný postup při ověřování různých druhů nádrží. Tento postup je dobře zpracován, proto jsou některé body částečně použity pro tvorbu metrologického postupu. V normě není uveden podrobný výpočet pro určení nejistoty měření.

¹ Úřad pro normalizaci a měření

3.4. International organization of legal metrology

Mezinárodní organizace zákony metrologie

OIML R138 – Vessels for commercial transactions

(Nádoby pro obchodní transakce)

Mezinárodní doporučení, které je modelovým předpisem stanovujícím metrologické požadavky na objemové kontejnery nebo nádoby používané pro měření a obchodní transakce. (platné od roku 2007 v anglickém jazyce)

Toto doporučení obecně zahrnuje schvalování nádob a nádrží, nevěnuje se však kalibraci těchto měřidel. Výpočet nejistot se věnuje pouze nejistotě z opakovatelnosti měření.

OIML R80 – Road and rail tankers with level gauging

(Silniční a železniční cisterny s měřením hladiny)

Toto doporučení stanovuje metrologické a technické požadavky na statické měřicí systémy objemu kapalin, které podléhají právní metrologické kontrole. Poskytuje také požadavky na schválení částí měřicích systémů. (platné od roku 2009 v anglickém jazyce)

Doporučení se věnuje obecně schvalování měřicích systémů, např. hladinoměřů, norných tyčí apod., pro tanky a nádrže, avšak vůbec neobsahuje postup pro kalibraci těchto nádob ani nejistoty při měření danými měřicími systémy.

OIML R71 – Fixed storage tanks. General requirements

(Stacionární nádrže pro skladování. Obecné požadavky)

Mezinárodní doporučení, které je modelovým předpisem stanovujícím metrologické požadavky na stacionární nádrže pro skladování a měření objemu kapalin při atmosférickém tlaku a pod tlakem. (platné od roku 2008 v anglickém jazyce)

Toto opatření se týká metrologických požadavků na nádrže a jejich měřicí systémy pod tlakem. Nevěnuje se ale kalibraci těchto nádrží a nejistotám při měření.

OIML R85 – Automatic level gauges for measuring the level of liquid in stationary storage tanks

(Automatické hladinoměry pro měření úrovně kapaliny ve stacionárních zásobnících)

Mezinárodní doporučení specifikující metrologické a technické požadavky a zkušební postupy pro automatické hladinoměry pro zásobníky. (platné od roku 2008 v anglickém jazyce)

Toto doporučení se věnuje obecně automatickým hladinoměrům, ne však výpočtu nejistot při měření.

OIML R125 - Measuring systems for the mass of liquids in tanks

(Měřicí systémy pro hmotnost kapalin v nádržích)

Mezinárodní doporučení stanovující metrologické a technické požadavky pro schválení typu a ověření u přístrojů používaných k určení hmotnosti kapaliny. (platné od roku 1998 v anglickém jazyce)

Toto doporučení se věnuje měření kapaliny hmotnostní metodou, není zde však výpočet nejistot výsledku měření.

3.5. European co-operation for Accreditation

Evropská spolupráce pro akreditaci

EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration

(Vyjádření nejistoty měření při kalibraci)

Vyjádření nejistoty měření při kalibraci stanovuje principy a požadavky na vyhodnocení nejistoty měření při kalibraci a prohlášení o těchto nejistotách v kalibračních listech. Zpracování je vedené na obecné úrovni tak, aby vyhovovalo všem oblastem kalibrace.

Tento dokument obecně určuje stanovení nejistot měření při kalibraci. Jsou zde také uvedena specifika pro různé metody kalibrací. Z tohoto důvodu vychází výpočty nejistot kalibrace objemu objemovou metodou v této diplomové práci právě z daného dokumentu.

4. KALIBRACE OBJEMU OBJEMOVOU METODOU

Tato metoda byla zmíněna již v kapitole 2.2.3. V praxi se metoda kalibrace objemu vyskytuje nejčastěji díky malé nejistotě měření při kalibraci a rozmanitosti použití. Dají se s ní kalibrovat prakticky veškeré druhy nádob všech obsahů. V následujícím výčtu jsou v praxi nejčastěji používané etalony pro měření objemu.

4.1. Etalon

Realizace definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používaná jako reference. Etalon je velice přesný měřicí prostředek, který určuje danou jednotku a uchovává ji nezávisle na času. Pro měření objemu jsou používány následující druhy úředně ověřených etalonů. [13]

4.1.1. Odměrná nádoba

Odměrná nádoba je skleněná či kovová kalibrovaná nádoba určená pro měření objemu. V praxi se nejčastěji využívají kovové odměrné nádoby dle normy ČSN 99 6311 nebo skleněné odměrné baňky a odměrné válce. [5], [13]

4.1.2. Krychloměr

Krychloměr neboli sudoměr je etalon založený na principu odměřování měřicí kapaliny kalibrovanou nádobou, opatřenou indikačním zařízením pro měření hladiny.

4.1.3. Objemové průtočné měřidlo

Průtokoměry různých konstrukcí pracují na principu měření objemu založeném na diferenci průtoku. Měří proteklé množství kapaliny nebo plynu. [20]

4.1.3.1. Druhy průtočných měřidel

Hmotnostní

Hmotnostní průtokoměr vychází ze závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolím, které tvoří proudící tekutina, na hmotnostním průtoku. [20]

Magneticko-indukční

Tyto průtokoměry fungují na principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Tedy rychlost proudění kapaliny, kterou reprezentuje pohyb vodiče, indukuje v homogenním magnetickém poli, elektrické napětí. [20]

Turbínové

Umožňuje měřit kapaliny i plyny. Vychází z principu turbíny a Eulerovy rovnice. Proud tekutiny otáčí turbínou úměrně rychlosti proudu. [20]

Komorové

Jde o metody měření s velmi vysokou třídou přesnosti. Tato kategorie má několik způsobů měření odlišujících se konstrukcí a metodikou. Objemový průtokoměr je charakterizován rozdělením toku tekutiny na dílčí objemy vytvářené rotujícími mechanickými prvky měřidla. [20]

4.2. Postup kalibrace

Před začátkem kalibrace a při jejím průběhu je nutné provést úkony, které jsou podrobně popsány v příloze této DP, proto zde nejsou podrobně uváděny. Jedná se ve své podstatě převážně o běžné administrativní úkony, prvotní vizuální kontrolu a posléze pak o samotnou kalibraci nádrže.

5. CHYBA MĚŘENÍ

Žádné měření není nikdy absolutně přesné. Na přesnost měření a výslednou hodnotu působí řada negativních vlivů. Naměřená hodnota se pouze přibližuje pravé měřené hodnotě. Rozdíl mezi těmito hodnotami vyjadřuje absolutní chyba měření. Ta je rovna rozdílu naměřené hodnoty a pravé hodnoty. Pokud tuto absolutní chybu podělíme pravou hodnotou, získáme chybu relativní. [7], [12]

Absolutní chyba Δx

- v jednotkách měřené veličiny

$$\Delta x = x - x' \quad [12] \quad (5.1)$$

Relativní chyba δ

- v jednotkách měřené veličiny

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \quad [12] \quad (5.2)$$

- bezrozměrná v %

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \quad [12] \quad (5.3)$$

5.1. Zdroje chyb při měření

Chyby měřicích přístrojů

Jsou systematické nepřesnosti měřicích prostředků způsobené jejich konstrukční nedokonalostí. Tyto chyby je možné najít v kalibračním listě nebo je udává přímo výrobce. Zjištěnou chybu je možno promítnout do výsledku měření pomocí korekce. [7], [8]

Chyby metod

Chyby vyplývající z nedokonalosti použité metody měření, tj. např. z nepřesně odpovídajících závislostí a přibližných fyzikálních konstant. [7], [8]

Chyby instalace

Tyto chyby vznikají nedokonalou instalací měřicích zařízení, tj. např. nedokonalým propojením, uložením a nastavením měřidla. [7], [8]

Chyby odečtů

Chyba způsobena nedokonalým odečítáním hodnot obsluhou, např. ze stupnice měřidla. [7], [8]

Chyby z výpočtů

Tento druh chyb je způsoben nedokonalostí výpočtových vztahů při zpracování naměřených hodnot. Vzniká např. zaokrouhlováním, přibližností vztahů atd. [7], [8]

5.2. Rozdělení chyb měření

Chyby rozdělujeme do základních tří skupin podle jejich vlivu na výsledek měření.

5.2.1. Systematická chyba

Chyba, která nabývá konstantní hodnoty za stejných podmínek měření. Její změnu v závislosti na podmínkách měření je možné zjistit a popsat závislostním vztahem. Tuto chybu není možné charakterizovat na základě opakovaných měření a je možné ji odstranit vhodnou korekcí, kompenzací nebo odstraněním příčin, které systematickou chybu vyvolávají. V případě, že

systematická chyba pochází z více zdrojů $\delta_{s1}, \delta_{s2}, \delta_{s3}, \dots, \delta_{sn}$, pak celková systematická chyba je rovna jejich součtu. [7], [8], [12]

$$\delta_s = \sum_{i=1}^n \delta_{si} \quad [12] \quad (5.4)$$

5.2.2. Hrubá chyba

Hrubá chyba je nahodilá a může znehodnotit celý proces měření. Tyto chyby se projevují výrazně odlišnými výsledky měření od normálu a dané hodnoty vylučujeme z dalšího zpracování. Předcházet hrubým chybám se dá pečlivým dodržováním metrologických postupů při měření, hlídáním podmínek pro měření a pozorností obsluhy. [7], [12]

5.2.3. Náhodná chyba

Chyba zcela nahodilá, nepředvídatelná, kterou nelze vyloučit. Její hodnoty a znaménko se mění podle zákona rozdělení pravděpodobnosti. Opakovatelným měřením veličiny X lze zjistit její pravděpodobnostní charakteristiku. Z jednotlivých měření získáme jednotlivé údaje $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, kde výsledkem měřené veličiny je aritmetický průměr. [7], [8], [12]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [12] \quad (5.5)$$

Odhad náhodné chyby z jednotlivých měření lze získat ze vztahu.

$$\delta_{ni} = x_i - \bar{x} \quad [12] \quad (5.6)$$

Náhodnou chybu lze také vyjádřit směrodatnou odchylkou výběrového souboru, nebo odchylkou aritmetického průměru. Tyto odchylky charakterizují rozptýlení náhodné odchylky.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad [12] \quad (5.7)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [12] \quad (5.8)$$

5.2.4. Celková chyba

Celkovou chybu lze po vyloučení hrubých chyb vyjádřit vzorcem

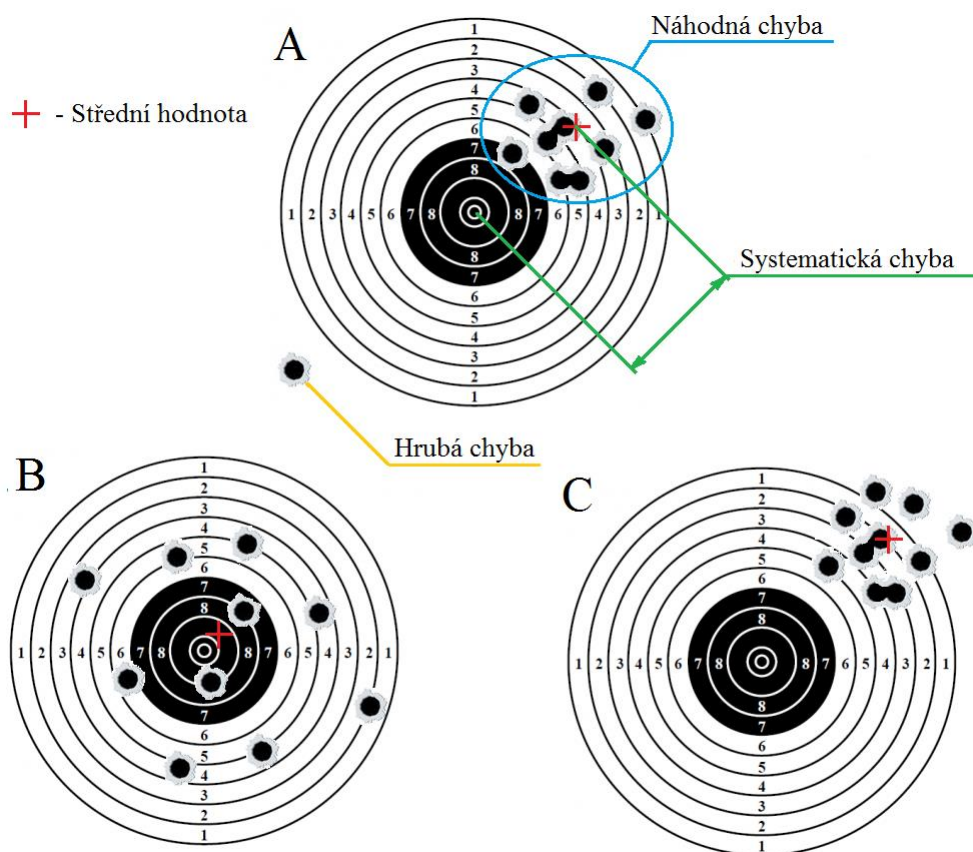
$$\Delta x = \delta_s + \delta_n \quad [12] \quad (5.9)$$

z toho plyne

$$x' = x + \delta_s + \delta_n \quad [12] \quad (5.10)$$

5.2.5. Grafické znázornění druhů chyb

Rozdělení chyb lze graficky znázornit na příkladu střelby na terč dle obrázku (5.1). Na terči A jsou vyznačeny jednotlivé druhy chyb. Na terči B je příklad kombinace malé systematické chyby a velké náhodné chyby - tedy velká přesnost a velký rozptyl. Terč C je příkladem velké systematické chyby a malé náhodné chyby - tedy malá přesnost a malý rozptyl. [12]



Obr. (5.1): Grafické znázornění chyb [11][12]

6. NEJISTOTA MĚŘENÍ

Nejistota měření je přidružený parametr charakterizující rozptýlení hodnot, které lze odůvodněně pokládat za hodnotu veličiny, která je měřena. Pojem nejistota byl zaveden do běžné praxe kolem roku 1990 dokumentem WECC 19/90, který popisoval jednotlivé vyjádření nejistot měření. Základní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota, která se běžně značí písmenem u (uncertainty - nejistota). Je to odchylka veličiny od střední hodnoty, pro kterou se nejistota udává. Standardní nejistoty dělíme podle vyhodnocení na nejistoty typu A a B. V praxi se nejčastěji setkáváme s kombinací těchto nejistot, výsledný vliv všech zdrojů nejistot získáme jejich sloučením a této výsledné nejistotě říkáme kombinovaná standardní nejistota. Výsledná měřená výstupní veličina Y je tedy závislá na vstupních veličinách X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) podle obecné funkční závislosti f . [1]

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad [19] \text{ (6.1)}$$

6.1. Kombinovaná standardní nejistota

Z každého vstupního vlivu na měření X_i je vypočtena nejistota $u(x_i)$ vztažená ke vstupní veličině. Kombinovaná standardní nejistota $u(y)$ se vypočítá z dílčích nejistot $u_i(y)$ typu A a B ovlivňujících měření následujícího vzorce. Tato nejistota $u(y)$ je určena pro pravděpodobnost 68%. [1]

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad [19] \text{ (6.2)}$$

6.2. Standardní nejistoty- vyhodnocení typu A

Standardní nejistoty s vyhodnocením typu A, se stanovují z výsledků opakovaného měření ze série naměřených hodnot, podobně jako náhodné chyby měření. Příčiny náhodné chyby měření považujeme za neznámé a jejich hodnota klesá s počtem opakovaných měření, což vyplývá z následujícího vzorce (6.3):

$$u(x_i) = k_s \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [19] \text{ (6.3)}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [19] \text{ (6.4)}$$

Pro správnost výpočtu je potřeba počet opakovaných měření n více jak 10. V případě nedostatečného počtu měření $n < 10$ je nutno provést doplňkovou korekci pomocí koeficientu k_s , která zohlední nedostatečný počet měření a závisí na jejich počtu. Koeficienty jsou uvedeny v tabulce (6.1). [7][10]

Tab.(6.1): Určení koeficientu podle počtu měření.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a více
k_s	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

6.3. Standardní nejistoty- vyhodnocení typu B

Standardní nejistoty s vyhodnocením typu B, jsou získány jiným způsobem než statistickým zpracováním výsledků opakovaných měření, jelikož na počtu měření nezávisí. Vyhodnocují se jako nejistoty vycházející z jednotlivých vlivů na měření, identifikovaných pro konkrétní měření. Jejich sloučením získáme výslednou standardní nejistotu typu B. Při známém intervalu hodnot $\pm\Delta x$, kterých nabývá vstupní veličina, lze standardní nejistotu typu B vypočítat z následujícího vztahu. [7]

$$u(x_i) = \frac{\pm\Delta x}{\chi} \quad [19] \text{ (6.5)}$$

Nejistoty $u_i(y)$ vztažené k výstupní veličině Y jsou vypočítány z nejistot $u_i(x_i)$ vztažených ke vstupní veličině a citlivosti dle vzorce:

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad [19] \text{ (6.6)}$$

6.3.1. Koeficient citlivosti

Koeficient citlivosti vyjadřující do jaké míry je odhad $u_i(y)$ závislý na $u(x_i)$. Definován je jako parciální derivace funkce f dle vstupní veličiny X_i pro její odhad hodnoty x_i :

$$c_i = \frac{\delta f}{\delta x_i} = \frac{\delta f}{\delta X_i} \quad [19] \text{ (6.7)}$$

6.4. Rozšířená nejistota

Pro zvýšení pravděpodobnosti nejistoty se používá takzvané rozšíření. Kombinovaná nejistota se vynásobí koeficientem rozšíření k dle vzorce pro získání rozšířené kombinované nejistoty.

$$U(y) = k \cdot u(y) \quad [19] \text{ (6.8)}$$

Tab. (6.2): Koeficienty rozšíření [19]

Koeficient rozšíření k	Pravděpodobnost
1	68%
2	95%
2,58	99%
3	99,70%

V rámci EA-4/02² bylo dohodnuto, že akreditované laboratoře musí uvádět rozšířenou kombinovanou nejistotu U . Rozšířená nejistota U se získá vynásobením standardní nejistoty $u(y)$ a koeficientu rozšíření k dle vzorce $U = k \cdot u(y)$. Pro určení rozšířené nejistoty se používá koeficient $k = 2$, což znamená, že skutečná hodnota veličiny se s 95% pravděpodobností nachází v intervalu vymezeném rozšířenou nejistotou měření.

² EA-4/02 – Expression of the uncertainty of measurement in calibration - Vyjádření nejistoty měření při kalibraci

6.5. Základní pojmy a definice pro určení nejistot

Zde jsou vypsány základní pojmy a definice z oboru nejistot měření. [9]

Aritmetický průměr

Součet hodnot podělen počtem hodnot.

Koeficient citlivosti související se vstupním odhadem

Změna hodnot výstupního odhadu, jako důsledek změny hodnot vstupního odhadu, podělená změnou hodnot tohoto výstupního odhadu.

Koeficient rozšíření

Číselný faktor, kterým se násobí kombinovaná standardní nejistota měření s cílem zjistit rozšířenou kombinovanou nejistotu měření.

Metoda vyhodnocení typu A

Metoda vyhodnocení nejistoty měření pomocí statistické analýzy série měření.

Metoda vyhodnocení typu B

Metoda vyhodnocení nejistoty měření jiným způsobem, než je statistická analýza série měření.

Měřená veličina

Konkrétní veličina, která je předmětem měření.

Náhodná veličina

Veličina, která může nabývat libovolné hodnoty z určité množiny hodnot a je charakterizována rozdělením pravděpodobnosti.

Nejistota měření

Parametr, který souvisí s výsledkem měření a charakterizuje rozsah hodnot, jež je možné racionálně přiřadit k měřené veličině. Často se používá také zkrácený název nejistota.

Pravá (skutečná) hodnota veličiny

Hodnota, která je ve shodě s definicí dané blíže určené veličiny. (hodnota získaná naprosto přesným měřením)

Vstupní veličiny

- a) Veličiny, jejichž hodnota a nejistota se určí přímo měřením.
- b) Veličiny, jejichž hodnota a nejistota vstupují do měření z vnějších zdrojů.

Výstupní odhad

Výsledek měření vypočítaný ze vstupních odhadů pomocí funkce modelu měření.

Výstupní veličina

Veličina, která při vyhodnocení měření představuje měřenou veličinu.

Relativní standardní nejistota měření

Standardní nejistota veličiny podělená odhadem této veličiny.

Rozptyl

Střední hodnota druhé mocniny odchylky náhodné veličiny od její střední hodnoty.

Rozšířená nejistota

Veličina definující interval okolo výsledku měření, který zahrnuje velkou část rozdělení hodnot, jež je možné přiřadit k měřené veličině.

Směrodatná odchylka

Druhá odmocnina rozptylu.

Standardní nejistota měření

Nejistota měření vyjádřená jako směrodatná odchylka.

Výběrová směrodatná odchylka

Druhá odmocnina výběrového rozptylu.

6.6. Rozdělení nejistot podle vyhodnocení typu B

Náhodné veličiny mohou být spojité nebo diskrétní, dále je dělíme podle pravděpodobnosti výskytu v intervalu. Následují základní typy rozdělení pravděpodobnosti spojitých náhodných veličin.

6.6.1. Základní rozdělení pravděpodobnosti spojitě náhodné veličiny

Spojité veličina může nabývat libovolné hodnoty.

Příklad (6.1): Teplota vody v hrnci je náhodná veličina X_i , která může nabýt hodnot x_i (0 až 100°C).

6.6.1.1. Rovnoměrné rozdělení $R(a, b)$

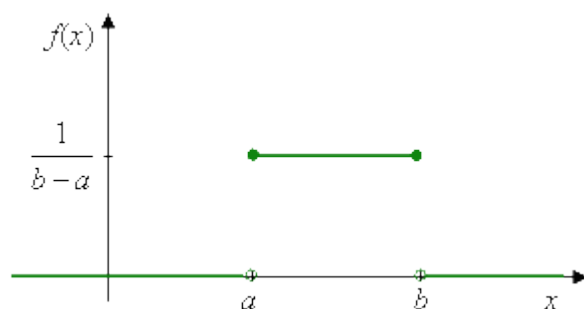
Rovnoměrné rozdělení, nebo také obdélníkové patří k nejjednodušším. Případá spojité náhodné veličině X_i , jejíž realizace vyplňují interval konečné délky a mají stejnou pravděpodobnost výskytu např. doba čekání na vlak.[2][6]

Definice

Náhodná veličina X_i má rovnoměrné rozdělení $R(a,b)$ právě tehdy, když je hustota pravděpodobnosti určena vztahem (6.9). [2]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 0 & \text{pro } x \notin \langle a, b \rangle \end{cases} \quad [2] \quad (6.9)$$

Graf hustoty pravděpodobnosti:



Obr. (6.1): Graf hustoty pravděpodobnosti pro rovnoměrné rozdělení [2]

Koeficient rozdělení pravděpodobnosti $\chi = \sqrt{3}$

6.6.1.2. Trojúhelníkové rozdělení $T(a, b, c)$

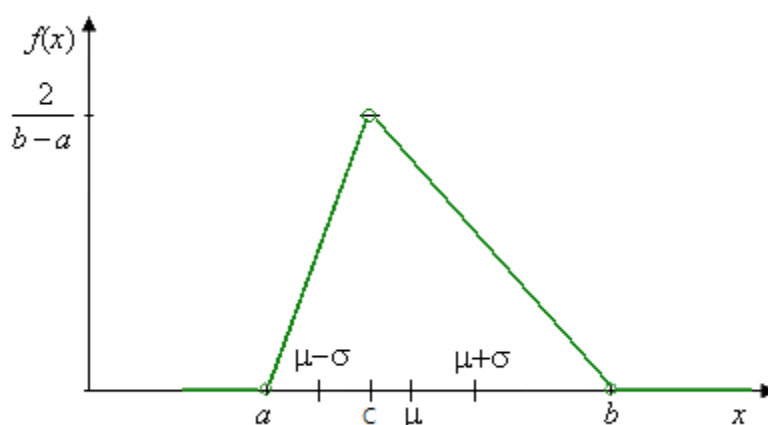
Dalším základním rozdělením je trojúhelníkové, které svou hustotou pravděpodobnosti připomíná normální rozdělení.

Definice

Náhodná veličina X_i má trojúhelníkové rozdělení $T(a, b, c)$ právě tehdy, když je hustota pravděpodobnosti určena vztahem (6.10). [3]

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq a \\ \frac{2 \cdot (x - a)}{(b - a) \cdot (c - a)} & \text{pro } a < x \leq c \\ \frac{2 \cdot (b - x)}{(b - a) \cdot (b - c)} & \text{pro } c < x \leq b \\ 0 & \text{pro } x > b \end{cases} \quad [3] \quad (6.10)$$

Graf hustoty pravděpodobnosti:



Obr. (6.2): Graf hustoty pravděpodobnosti pro trojúhelníkové rozdělení [3]

Koeficient rozdělení pravděpodobnosti $\chi = \sqrt{6}$

6.6.1.3. Normální rozdělení $N(m, s^2)$

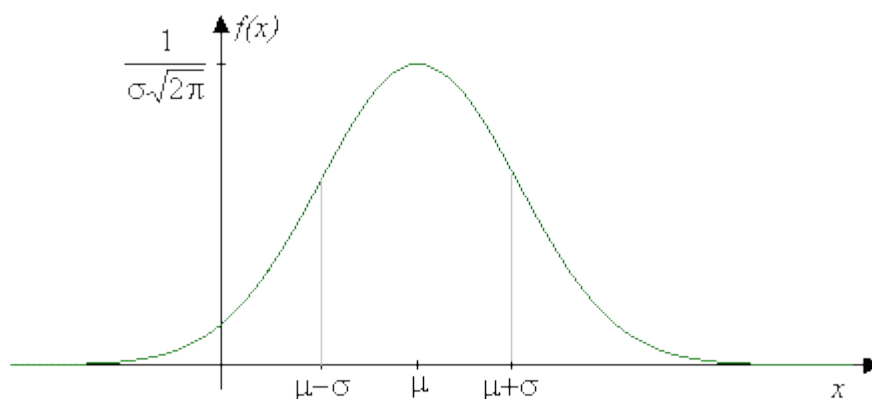
Vyskytuje se nejčastěji a je nazýváno též Gaussovo rozdělení. Mnoho jiných rozdělení se mu podobá, ale jen některé je možno tímto rozdělením nahradit. Grafem hustoty pravděpodobnosti je tzv. Gaussova křivka Obr. (6.3)[2][6]

Definice

Náhodná veličina X má normální rozdělení $N(m, s^2)$ právě tehdy, když má hustota pravděpodobnosti tvar (6.11). [2]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad \text{pro } x \in (-\infty, \infty) \quad [2] \quad (6.11)$$

Graf hustoty pravděpodobnosti:



Obr. (6.3): Graf hustoty pravděpodobnosti pro normální rozdělení [2]

Koeficient rozdělení pravděpodobnosti $\chi = 3$

6.6.1.4. Exponenciální rozdělení $E(\lambda)$

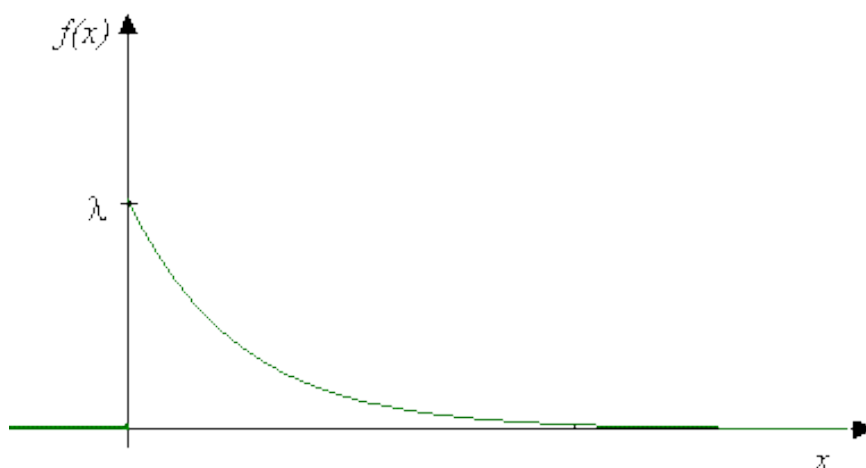
Toto rozdělení připadá spojitě náhodné veličině X_i , která představuje dobu čekání do nastoupení náhodného jevu, nebo délku intervalu mezi takovými dvěma jevy např. doba čekání na obsluhu, nebo vzdálenost díry na silnici. Toto rozdělení je závislé na parametru λ , který je převrácená hodnota střední hodnoty doby čekání do nastoupení pozorovaného jevu.[2][6]

Definice

Náhodná veličina X_i má exponenciální rozdělení $E(\lambda)$ právě tehdy, když je hustota pravděpodobnosti dána vztahem (6.12) [4]:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < 0 \\ \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x} & \text{pro } x \geq 0 \end{cases} \quad [2] \quad (6.12)$$

Graf hustoty pravděpodobnosti:



Obr. (6.4): Graf hustoty pravděpodobnosti pro exponenciální rozdělení [2]

6.7. Vlivy na nejistotu měření objemu objemovou metodou

Na nejistotu měření objemu objemovou metodou mají vliv fyzikální vlastnosti měřící kapaliny, etalonu, přesnost odečtu hodnot pracovníkem atd. V následujícím výčtu jsou uvedeny vlivy uvažované pro tuto metodu měření.

Fyzikální vlastnosti měřící kapaliny ovlivňující nejistotu měření:

- Teplotní roztažnost kapaliny
- Objemová stlačitelnost kapaliny
- Odpařování kapaliny

Vlastnosti etalonu ovlivňující nejistotu měření:

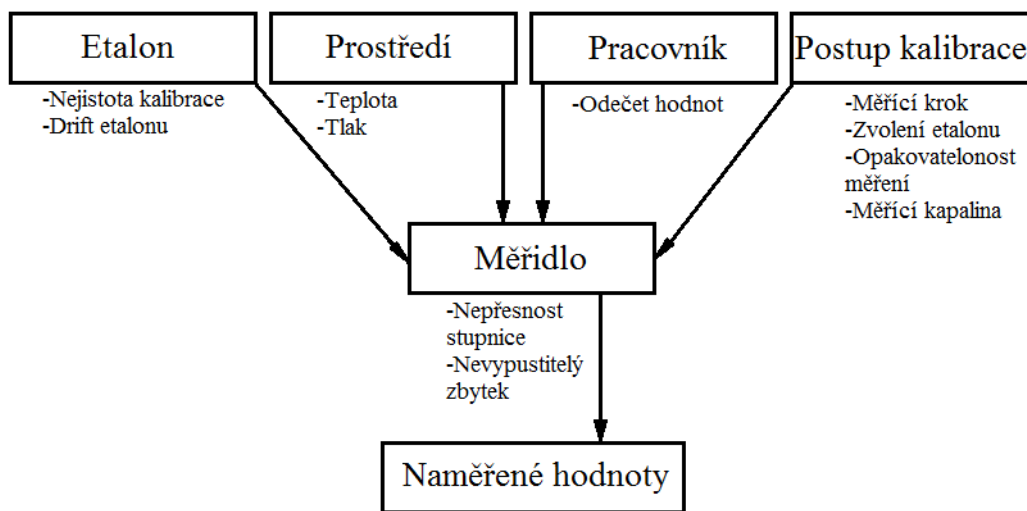
- Nejistota kalibrace etalonu
- Nejistota měření etalonem
- Teplotní roztažnost materiálu etalonu
- Drift etalonu

Odečet hodnot ovlivňující nejistotu měření:

- Odečet hodnot z etalonu
- Odečet hodnot z indikačního zařízení kalibrované nádoby/nádrže

Další vlivy ovlivňující nejistotu měření:

- Opakovatelnost měření
- Pochybení pracovníka (špatné odkapání baňky před měřením)
- Korekce měření



Obr. (6.5): Grafické rozdělení zdrojů nejistot na kalibraci objemu pomocí objemové metody

6.8. Nejistoty na kalibraci lze také rozdělit podle použitého etalonu.

Průtokoměr

- Nejistota kalibrace etalonu
- Rozdíl teplot měřící kapaliny v průběhu měření
- Nejistota vyplývající ze čtení etalonu
- Odpařování měřící kapaliny
- Teplotní roztažnost materiálu etalonu
- Nejistota driftu etalonu
- Určení nejistoty v závislosti na průtoku
- Rozdíl tlaku kapaliny v průběhu měření

- Nejistota při kolísání či změně průtoku.
- Nejistota z korekcí měření
- Nejistota z odečítání hodnot na indikačním zařízení měřidla
- Opakovatelnost měření

Odměrná nádoba – Baňka

- Nejistota kalibrace etalonu
- Rozdíl teplot měřicí kapaliny v průběhu měření
- Nejistota vyplývající z odměřování etalonu
- Odpařování měřicí kapaliny
- Teplotní roztažnost materiálu etalonu
- Nejistota z odečítání hodnot na indikačním zařízení měřidla
- Opakovatelnost měření

Krychloměr

- Nejistota kalibrace etalonu
- Rozdíl teplot měřicí kapaliny v průběhu měření
- Teplotní roztažnost materiálu etalonu
- Nejistota při odměřování z měřicího zařízení etalonu
- Odpařování měřicí kapaliny
- Nejistota driftu etalonu
- Nejistota z odečítání hodnot na indikačním zařízení měřidla
- Opakovatelnost měření

6.9. Určení nejistot a odvození vzorců pro výpočet

6.9.1. Nejistota kalibrace etalonu

Každý etalon je kalibrován s určitou přesností, která je uváděna v jeho kalibračním listě jako rozšířená nejistota etalonu. Pro výpočet celkové nejistoty je třeba určit nerozšířenou kombinovanou nejistotu etalonu. Tuto nejistotu etalonu vypočítáme z rozšířené nejistoty uvedené v kalibračním listu etalonu dle vzorce (6.13):

$$u(x_1) = \frac{U}{k} [\%] \quad (6.13)$$

$$c_1 = 1 \quad (6.14)$$

$$u_1(V) = \pm c_1 u(x_1) [\%] \quad (6.15)$$

Koeficient citlivosti

Koeficient citlivosti je roven 1, jelikož kombinovaná nejistota ovlivňuje měření přímo v procentech, v kterých se uvádí nejistota kalibrace v kalibračním listě.

6.9.1.1. Určení rozšířené nejistoty u průtokoměru

Jestliže kalibrace je prováděna etalonem v podobě průtokoměru, může nastat situace, že potřebná rozšířená nejistota etalonu není přímo uvedena v kalibračním listě, protože je proměnná s průtokem. V kalibračním listě je běžně uvedena tabulka s vybranými průtoky a k nim přiřazena rozšířená nejistota a systematická chyba. V případě, že kalibrujeme průtokem, který není uveden v kalibračním listě, je možné k němu získat rozšířenou nejistotu následujícími způsoby.

Odečtem z grafu

Z tabulky v kalibračním listě vyneseme do grafu hodnoty průtoku na osu X a hodnoty rozšířené nejistoty na osu Y. Tyto body propojíme přímkami, jelikož neznáme přesný průběh závislosti. Body lze propojit i křivkou, ale rozdíl výsledků je zanedbatelný, proto je v

metrologickém postupu použito propojení přímkami. Z grafu lze jednoduše odečíst hodnoty rozšířené nejistoty v závislosti na průtoku. Následuje příklad (6.2), na kterém je demonstrováno v metrologickém postupu určení rozšířené nejistoty na průtokoměru. Pro názornost je také do příkladu (6.2) vloženo proložení bodů křivkou. Z toho je patrné, že se proložení bodů z velké části překrývá, pouze v rozmezí průtoku 5 - 8 m³/hod se nachází skutečná hodnota mezi spojením přímkou a proložením křivkou viz Obr. (6.6).

Příklad (6.2):

Pro vypočítání rozšířené nejistoty U je použit příklad tabulky z kalibračního listu.

Tab. (6.3): Tabulka rozšířených nejistot z kalibračního listu

Průtok	Chyba	Rozšířená nejistota
[m ³ /hod]	[%]	[%]
0,4	0,1	0,2
1	0,09	0,18
2,89	-0,01	0,15
4,98	-0,03	0,15
7,79	-0,02	0,13

Určení U při průtoku 6 m³/hod, který není uveden v kalibračním listě, je možné pomocí odečtu z grafu nebo výpočtem.

Odečet z grafu

Vytvoříme graf závislosti U na průtoku a z něj odečteme potřebné hodnoty. V následujícím grafu odpovídá průtoku 6 m³/hod hodnota rozšířené nejistoty 0,143 %, kterou zaokrouhlíme na $U = 0,14$ %.

Obr. (6.6): Závislost rozšířené nejistoty na průtoku

Výpočetem

Hodnotu rozšířené nejistoty v závislosti na průtoku můžeme také vypočítat. Podle předchozího příkladu (6.2) můžeme říci, že vztah těchto veličin mezi sousedními body je lineární. Proto platí:

$$U = \frac{(P - P_j) \cdot (U_k - U_j)}{P_k - P_j} + U_j \quad [\%] \quad (6.16)$$

Pro názornost je uveden vzor výpočtu použitý v metrologickém postupu pro určení rozšířené nejistoty při průtoku $6 \text{ m}^3/\text{hod}$, stejně jako u předchozího odečítání z grafu. Z výsledku je patrné, že obě metody jsou rovnocenné.

$$U = \frac{(P - P_j) \cdot (U_k - U_j)}{P_k - P_j} + U_j = \frac{(6 - 4,98) \cdot (0,13 - 0,15)}{7,78 - 4,98} + 0,15 = 0,1427 \% \quad (6.17)$$

Po zaokrouhlení získáme $U = 0,14 \%$.

Poznámka

V případě, že ke kalibraci není požadována malá nejistota měření, používá se v praxi k určení rozšířené nejistoty nejbližší horší hodnota odpovídající pravému průtoku z tabulky (6.3).

6.9.2. Rozdíl teplot měřicí kapaliny v průběhu měření

Na kalibraci má vliv teplotní roztažnost měřicí kapaliny v závislosti na změně její teploty v průběhu kalibrace. Do metrologického postupu je jako příklad uveden vliv teploty na měřicí kapalinu při rozdílu teplot $\pm 1^\circ\text{C}$ a $\pm 3^\circ\text{C}$. Dále jsou po konzultaci s pracovníky v oboru určeny nejčastěji používané měřicí kapaliny a vliv standardní nejistoty na měření v závislosti na jejich teplotní roztažnosti viz tabulka (6.4). Standardní nejistoty jsou určeny pomocí následujících vztahů.

Model měření:

Vyjadřuje závislost objemu měřicí kapaliny na teplotě.

$$V_n = V_m [1 + \alpha_V \cdot (t_s - t_f)] \quad (6.18)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B, rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení nejistoty je zvoleno, jelikož nemůžeme obecně určit průběh změny teploty, která je závislá na prostředí kalibrace.

Výpočet pro rozdíl teplot $\pm \Delta t$ $^\circ\text{C}$:

$$u(x_2) = \pm \frac{\Delta t}{\sqrt{3}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (6.19)$$

$$c_2 = 100 \cdot \alpha_{V1} \quad [^\circ\text{C}^{-1}] \quad (6.20)$$

$$u_2(V) = \pm c_2 u(x_2) \quad [\%] \quad (6.21)$$

Koeficient citlivosti

je určen ze vztahu pro výpočet objemu v závislosti na teplotě (6.18), určení standardní nejistoty vztažené k veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_2(V) = \pm c_2 u(x_2) = \alpha \cdot V_m \cdot u(x_2) \cdot \frac{100}{V_m} \Rightarrow c_2 = \alpha \cdot 100 [^{\circ}\text{C}^{-1}] \quad (6.22)$$

V následující tabulce (6.4) jsou vypočteny hodnoty standardních nejistot v závislosti na teplotě měřicí kapaliny. Uvedeny jsou nejčastěji používané měřicí kapaliny při změně teploty $\pm 1^{\circ}\text{C}$ a $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Koeficienty α jsou převzaty z matematicko-fyzikálních tabulek. [15]

Tab. (6.4): Tabulka nejistot k vybraným měřicím kapalinám v závislosti na teplotní roztažnosti

Měřicí kapalina	α	$u_2(V)$ pro rozdíl teplot $\pm 1^{\circ}\text{C}$	$u_2(V)$ pro rozdíl teplot $\pm 3^{\circ}\text{C}$
Voda 1-10 $^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{V0} = 108 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,006 %	0,019 %
Voda 10-30 $^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{V1} = 180 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,01 %	0,031 %
Voda 30-50 $^{\circ}\text{C}$	$\alpha_{V2} = 190 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,011 %	0,033 %
Nafta	$\alpha_N = 0,001 \text{ K}^{-1}$	0,058 %	0,173 %
Láh	$\alpha_L = 0,0011 \text{ K}^{-1}$	0,064 %	0,19 %

6.9.3. Teplotní roztažnost materiálu etalonu

Teplota má také vliv na teplotní roztažnost materiálu etalonu. Tato nejistota se nejvíce dotýká etalonů v podobě odměrných nádob, jako jsou např. odměrné baňky, válce a krychloměry. Jedná se o rozdíl teploty, při které probíhá kalibrace měřidla a teploty uvedené v kalibračním listě etalonu, při které byl etalon kalibrován. V případě malých teplotních rozdílů, jako např. $\pm 1^{\circ}\text{C}$, je teplotní roztažnost etalonu zanedbatelná. Pokud ale rozdíl teplot dosáhne vyšších hodnot např. $\pm 10^{\circ}\text{C}$ je nutné tento vliv na nejistotu měření zohlednit. Po konzultaci s odbornými pracovníky byl pro výpočet určen nejběžnější tvar odměrných nádob a jejich materiál. Následně pak vypočten přírůstek standardní nejistoty pro rozdíl teplot $\pm 10^{\circ}\text{C}$, odměrných nádob válcovitého tvaru ze skla, nerezové ocele a mědi.

Model měření:

$$V_s = S_s \cdot h_s$$

$$h_s = h \cdot [1 + \beta \cdot (t_s - t_f)]$$

$$S_s = 2 \cdot \pi r_s$$

$$r_s = r \cdot [1 + \beta \cdot (t_s - t_f)] \quad (6.23)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B, rovnoměrné rozdělení

Je zvoleno rovnoměrné rozdělení nejistoty, protože nemůžeme obecně určit průběh změny teploty, která je závislá na prostředí kalibrace.

Výpočet pro rozdíl teplot $\pm \Delta t^{\circ}\text{C}$:

$$u(x_3) = \pm \frac{\pm \Delta t}{\sqrt{3}} [^{\circ}\text{C}] \quad (6.24)$$

$$c_3 [^{\circ}\text{C}^{-1}]$$

$$u_3(V) = \pm c_3 u(x_3) \text{ [%]} \quad (6.25)$$

Koeficient citlivosti

je určen ze vztahů pro výpočet objemu válce v závislosti na změně povrchu při teplotním výkyvu (6.23), standardní nejistotě vztažené k výstupní veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$\begin{aligned} u_3(V) &= \pm c_3 u(x_3) = (S_s \cdot h_s - V_m) \cdot \frac{100}{V_m} = \\ &= \left(\pi r^2 \cdot (1 + \beta \cdot u(x_3))^2 \cdot h \cdot (1 + \beta \cdot u(x_3)) - V_m \right) \cdot \frac{100}{V_m} \text{ [%]} \\ &=> \text{pro skleněnou odměrnou baňku 10 l } => \\ &=> c_3 = 0,0009 \text{ [K}^{-1}\text{]} \end{aligned} \quad (6.26)$$

V následující tabulce jsou vypočteny hodnoty standardních nejistot v závislosti na teplotě etalonu pro nejčastěji používané materiály při změně teploty $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Koeficienty citlivosti v závislosti na teplotní délkové roztažnosti se minimálně liší při změně rozměrů odměrné nádoby, proto je možné je zobecnit pro všechny etalony běžných rozměrů. Koeficienty délkové roztažnosti jsou převzaty z matematicko-fyzikálních tabulek. [15]

Tab. (6.5): Tabulka nejistot k vybraným materiálům etalonů v závislosti na teplotní roztažnosti

Měřicí kapalina	Koeficient roztažnosti β	$u_3(V)$ pro rozdíl teplot $\pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$	Koeficient citlivosti určený dle β
Měď	$\beta = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$\pm 0,03 \text{ %}$	$c_3 = 0,005 \text{ K}^{-1}$
Nerezová ocel	$\beta = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$\pm 0,026 \text{ %}$	$c_3 = 0,0045 \text{ K}^{-1}$
Sklo	$\beta = 0,85 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$\pm 0,005 \text{ %}$	$c_3 = 0,0009 \text{ K}^{-1}$

6.9.4. Rozdíl tlaku kapaliny v průběhu měření

Na kalibraci průtokoměrem má vliv objemová stlačitelnost měřicí kapaliny v závislosti na změně tlaku kapaliny při kalibraci. Následující výpočty slouží k určení míry nejistoty z rozdílu tlaku max. 100 kPa v nádobě a průtokoměru. To je běžný provozní tlak při měření průtokovým měřidlem uváděný výrobcem. Tlak v průtokoměru může být mnohem větší, v praxi se však při takovýchto tlacích nekalibruje, jelikož by nepříznivě ovlivnili nejistotu měření. Pro názornost je opět uvedena tabulka (6.7) přírůstků standardních nejistot v závislosti na tlaku pro nejběžnější měřicí kapaliny.

Model měření:

Vyjadřuje závislost objemu měřicí kapaliny na tlaku.

$$V_n = V_m \cdot (1 + \varepsilon \cdot \Delta p) \quad (6.27)$$

Určení nejistoty: Nejistota typu B, rovnoměrné rozdělení.

Rovnoměrné rozdělení nejistoty je zvoleno, jelikož nemůžeme obecně určit průběh změny tlaku, které jsou závislé na průtoku a konstrukci etalonu atd.

$$u(x_4) = \pm \frac{\Delta p}{\sqrt{3}} \text{ [Pa]} \quad (6.28)$$

$$c_4 = 100 \cdot \varepsilon \text{ [Pa}^{-1}\text{]} \quad (6.29)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) \text{ [%]} \quad (6.30)$$

Koeficient citlivosti

je určen ze vztahu pro výpočet objemu v závislosti na tlaku (6.27), standardní nejistotě vztažené k veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = \varepsilon \cdot V_m \cdot u(x_4) \cdot \frac{100}{V_m} \Rightarrow c_4 = \varepsilon \cdot 100 \text{ [Pa}^{-1}\text{]} \quad (6.31)$$

V následující tabulce jsou vypočteny hodnoty standardních nejistot v závislosti na tlaku 100 kPa měřící kapaliny v průtočném měřidle pro nejčastěji používané měřící kapaliny. Koeficienty ε jsou převzaty z matematicko-fyzikálních tabulek. [15]

Tab. (6.7): Tabulka nejistot pro vybrané materiály v závislosti na objemové stlačitelnosti

Měřící kapalina	ε	$u_4(V)$ pro Δp max. 100 kPa
Voda	$\varepsilon_v = 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$\pm 0,012 \text{ %}$
Nafta	$\varepsilon_v = 0,46 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$\pm 0,003 \text{ %}$
Lih	$\varepsilon_v = 1,11 \cdot 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$	$\pm 0,006 \text{ %}$

6.9.5. Nejistota vyplývající z čtení indikačního zařízení etalonu

Na kalibraci má vliv odečítání hodnot z indikačního zařízení etalonu. To se mění podle etalonu a druhu jeho indikačního zařízení. Výpočty nejistot jsou rozděleny podle druhu etalonu a následného určení koeficientu citlivosti podle druhu indikačního zařízení.

6.9.5.1. Průtokoměr

Na kalibraci průtokoměrem má vliv přesnost odečítání z indikačního zařízení průtokoměru, kterou musíme zohlednit podle velikosti měřicího kroku V_k . Odhadnutá chyba při zastavení a rozběhnutí průtokoměru je $\pm 0,05l$. Tato hodnota byla získána pozorováním praktického měření průtokoměry a z jejich technických údajů.

Model měření:

$$V_n = V_m \quad (6.32)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B, trojúhelníkové rozdělení

Trojúhelníkové rozdělení nejistoty je zvoleno, jelikož se hustota chyby měření nejvíce podobá této charakteristice.

$$u(x_4) = \pm \frac{\sqrt{V_x^2 + V_x^2}}{\sqrt{6}} \text{ [l]} \quad (6.33)$$

$$c_4 = \frac{100}{V_k} \text{ [l}^{-1}\text{]} \quad (6.34)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) \text{ [%]} \quad (6.35)$$

Koeficient citlivosti

je určen ze vztahu pro, určení standardní nejistoty vztažené k výstupní veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = u(x_4) \cdot \frac{100}{V_k} \Rightarrow c_4 = \frac{100}{V_k} [l^{-1}] \quad (6.36)$$

6.9.5.2. Odměrná nádoba

Při odměřování hladiny z baňky se z praxe uvádí přesnost odečtu $\pm 1,0$ mm za předpokladu zaškoleného pracovníka, což se projeví na výsledné nejistotě měření. Tato nejistota měření se liší koeficientem citlivosti pro odměrné nádoby se zúženým hrdlem (baňky) nebo bez hrdla, např. odměrné válce. Následující výpočty jsou uvedeny pro odměrné nádoby s kruhovým průřezem, který je charakteristickým tvarem těchto nádob.

Model měření:

$$V_m = h_m \cdot S$$

$$S = \pi r^2 \quad (6.37)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B, rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení nejistoty je zvoleno, jelikož nemůžeme obecně určit průběh hustoty chyby lidského faktoru.

$$u(x_4) = \pm \frac{h_x}{\sqrt{3}} = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} = \pm 0,578 \text{ mm} \quad (6.38)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) [\%] \quad (6.39)$$

Koeficient citlivosti

V koeficientu citlivosti je nutno zohlednit tvar odměrné nádoby.

Odměrné nádoby bez hrdla (odměrné válce)

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny v odměrné nádobě. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.37), pro výpočet standardní nejistoty vztažené k výsledné veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = \frac{u(x_4) \cdot S \cdot 100}{h_m \cdot S} = u(x_4) \cdot \frac{100}{h_m}$$

$$\Rightarrow c_4 = \frac{100}{h_m} [mm^{-1}] \quad (6.40)$$

Odměrné nádoby s hrdlem (odměrné baňky)

Procentuální nejistota měření je taktéž závislá na objemu měřicí kapaliny v odměrné nádobě, ale také na poměru průměru hrdla v místě objemové značky a objemu baňky. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.37), pro výpočet standardní nejistoty vztažené veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = \frac{u(x_4) \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot 100}{V_m} = u(x_4) \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot 25}{V_m} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow c_4 = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot 25}{V_m} = \frac{45,38 d^2}{V_m} [mm^{-1}] \quad (6.41)$$

U běžných kalibračních baňek, podle vzoru na obrázku (6.7), se přímo úměrně mění obsah baňky s průměrem hrdla. Velikost baňky tedy nemá vliv na velikost nejistoty z odměřování. Proto lze vypočítanou hodnotu nejistoty $u_4(V) = \pm 0,012 \%$ v následujícím příkladu (6.3) z odměřování 20l baňky, brát jako obecnou hodnotu pro baňky tohoto druhu.

Příklad (6.3):

Výpočet pro baňku o objemu 20 l s průměrem hrdla 74 mm:

$$u(x_4) = \pm \frac{h_x}{\sqrt{3}} = \pm \frac{1}{\sqrt{3}} = \pm 0,578 \text{ mm} \quad (6.42)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) [\%] \quad (6.43)$$

$$u_4(V) = \pm \frac{45,38 \cdot d^2}{V_m} = \pm \frac{45,38 \cdot 74^2}{20 \cdot 10^6} = \pm 0,012 \% \quad (6.44)$$

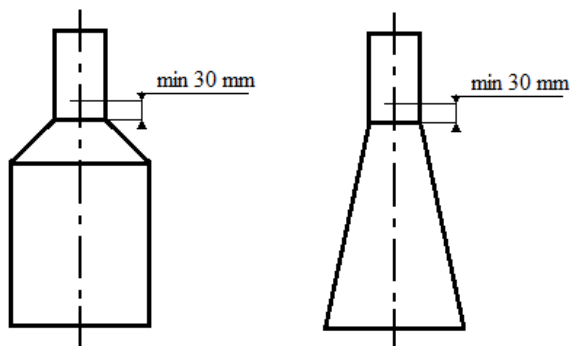
kde:

h_x – chyba při odměřování hladiny $\pm 1,0$ mm

c_i – koeficient citlivosti

V_m – objem naměřený etalonem ($20 \text{ l} = 20 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$)

d – průměr dna etalonu (pro 20l baňku = 74 mm)



Obr. (6.7): Tvar odměrných baňek s hrdlem [14]

6.9.5.3. Krychloměr

Krychloměr je druh odměrné nádoby pro odměřování objemu běžně od 10 do 250 l. Hodnota naměřeného objemu se odečítá z indikačního zařízení, kterým může být např. stavoznak se stupnicí, hladinoměr atd. Různé indikační měřidlo způsobuje různou hodnotu nejistoty odečítání objemu. Následující výpočty zohledňují nejčastěji používané indikační zařízení - stavoznak se stupnicí v mm a l, dále hladinoměr s nejistotou měření udanou v % a mm.

Stavoznak

Při odměřování hladiny ze stavoznaku krychloměru, který je používán jako etalon, se z praxe uvádí přesnost odečtu $\pm 1,0$ mm, za předpokladu zaškoleného pracovníka, což se projeví na výsledné nejistotě měření. Tato nejistota měření se liší výpočtem standardní nejistoty a koeficientu citlivosti podle jednotek na stupnici stavoznaku, ty mohou být v mm či l. Následující výpočty jsou uvedeny pro etalon s kruhovým průřezem.

Model měření:

$$V_m = h_m \cdot S$$

$$S = \pi v^2 \quad (6.45)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B, rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení nejistoty je zvoleno, jelikož nemůžeme obecně určit průběh hustoty chyby lidského faktoru

Standardní nejistota pro indikační zařízení (stavoznak) v mm

$$u(x_4) = \pm \frac{h_x}{\sqrt{3}} = \pm \frac{1,0}{\sqrt{3}} = \pm 0,578 \text{ mm} \quad (6.46)$$

$$c_4 = \frac{100}{h_m} [\text{mm}^{-1}] \quad (6.47)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = \pm \frac{57,8}{h_m} [\%] \quad (6.48)$$

Standardní nejistota pro indikační zařízení (stavoznak) v l

Při odečtu z indikačního zařízení v l získáme chybu odečtu v $\pm L_x$ [l] Nejistotu z této chyby vypočítáme podle následujících vzorců.

$$u(x_4) = \frac{\pm L_x}{\sqrt{3}} [l] \quad (6.49)$$

$$c_4 = \frac{100}{V_m} [l^{-1}] \quad (6.50)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) [\%] \quad (6.51)$$

Chyba odpočtu L_x se v případě stupnice s velikostí dílku $d_m = 1,0 \text{ mm}$ rovná přímo velikosti dílku d_l v litrech. Pokud je velikost d_m různá od $1,0 \text{ mm}$, je možné L_x dopočítat dle následujícího vzorce:

$$L_x = \frac{d_l}{d_m} [l]. \quad (6.52)$$

Koeficient citlivosti

V koeficientu citlivosti je také nutno zohlednit jednotky uvedené na stavoznaku.

Koeficient citlivosti pro indikační zařízení (stavoznak) v mm

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny měřené v krychloměru podobně jako u výpočtu koeficientu citlivosti u odměrné nádoby bez hrdla např. odměrný válec. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.45), pro výpočet standardní nejistoty vztažené veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = \frac{u(x_4) \cdot S \cdot 100}{h_m \cdot S} = u(x_4) \cdot \frac{100}{h_m}$$

$$\Rightarrow c_4 = \frac{100}{h_m} [mm^{-1}] \quad (6.53)$$

Koeficient citlivosti pro indikační zařízení (stavoznak) v l

procentuální nejistota měření je v tomto případě také závislá na objemu měřicí kapaliny měřené v krychloměru. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.45), pro výpočet standardní nejistoty vztažené veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3). Je však rozdílný od předchozího výpočtu (6.53).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = u(x_4) \cdot \frac{100}{V_m} \Rightarrow c_4 = \frac{100}{V_m} [l^{-1}] \quad (6.54)$$

Hladinoměr s nejistotou měření určenou v mm

Pokud je v krychloměru odměřována výška hladiny pomocí hladinoměru, u kterého je dána rozšířená nejistota U v jednotkách mm a není jeho nejistota započítána do kombinované nejistoty krychloměru, pak lze výpočet nejistoty z odečtu hladiny získat pomocí následujících vzorců.

Model měření:

$$V_m = h_m \cdot S \quad (6.55)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B

$$u(x_4) = \frac{U}{k} [mm] \quad (6.56)$$

$$c_4 = \frac{100}{h_m} \quad (6.57)$$

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = [\%] \quad (6.58)$$

Koeficient citlivosti

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny měřené v krychloměru podobně jako u výpočtu koeficientu citlivosti u odměrné nádoby bez hrdla např. odměrný válec. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.55), pro výpočet standardní nejistoty vztažené veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_4(V) = \pm c_4 u(x_4) = \frac{u(x_4) \cdot S \cdot 100}{h_m \cdot S} = u(x_4) \cdot \frac{100}{h_m}$$

$$\Rightarrow c_4 = \frac{100}{h_m} [mm^{-1}] \quad (6.59)$$

Hladinoměr s nejistotou měření určenou v %

V případě, že je u krychloměru odměřována výška hladiny pomocí hladinoměru, u kterého je dána rozšířená nejistota U v % a není jeho nejistota započítána do kombinované nejistoty krychloměru, pak lze výpočet nejistoty z odečtu hladiny získat pomocí následujících vzorců.

U tohoto případu není třeba určovat citlivost, jelikož nejistota hladinoměru v procentech je přímo úměrná nejistotě naměřeného objemu krychloměrem. Koeficient citlivosti je tedy roven 1.

Model měření:

$$V_m = h_m \cdot S \quad (6.60)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B

$$u_4(V) = \frac{U}{k} [\%] \quad (6.61)$$

6.9.6. Nejistota odečítání z kalibrovaného měřidla

Do kombinované nejistoty kalibrace je nutno zahrnout nejistotu při odečítání z indikačního zařízení měřidla, které kalibrujeme. Tato nejistota se vypočítá podobně jako nejistota vyplývající z čtení indikačního zařízení etalonu za použití krychloměru dle kapitoly 6.9.5.3. Pouze při odečítání ze stupnice uvažujeme chybu odečtu pracovníkem $\pm 1,5\text{mm}$. Výpočet se dále liší pouze koeficientem citlivosti u nádob s nekonstantní plochou hladiny v závislosti na hloubce kapaliny v nádrži, jako jsou např. ležaté válcové nádrže, cisterny atd. Z toho vyplývá, že nejistota u měření nádob s konstantní plochou hladiny v závislosti na hloubce kapaliny v nádobě je stejná jako v bodě 6.9.5.3. Tento bod se věnuje pouze výpočtu koeficientu citlivosti při odečítání z měřidla s nekonstantní plochou hladiny v závislosti na hloubce. Tyto výpočty koeficientu citlivosti jsou opět rozděleny podle druhu indikačního zařízení.

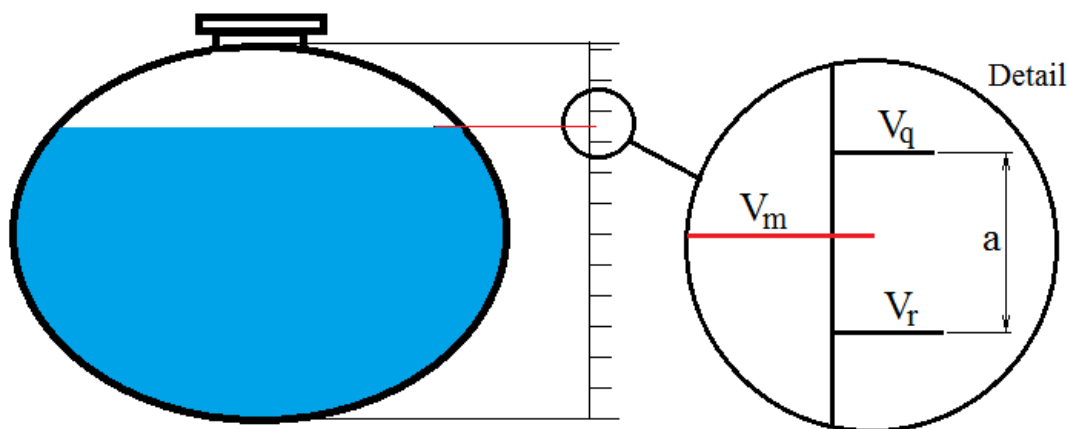
Koeficient citlivosti

Pro nejistotu při odečítání ze stavoznaku se stupnicí

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny v měřidle podobně jako u výpočtu koeficientu citlivosti u odměrné nádoby bez hrdla např. odměrný válec. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.60), pro výpočet standardní nejistoty vztažené veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_5(V) = \pm c_5 u(x_5) = u(x_5) \cdot \frac{V_q - V_r}{a \cdot V_m}$$

$$\Rightarrow c_5 = \frac{V_q - V_r}{a \cdot V_m} \cdot 100 [\text{mm}^{-1}] \quad (6.62)$$



Obr. (6.8): Znázornění objemů k výpočtu nejistoty z odměrování

Pro nejistotu při měření hladinoměrem s nejistotou měření v %

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny v měřidle podobně jako u výpočtu koeficientu citlivosti u odměrné nádoby bez hrdla např. odměrný válec. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.60), určení standardní nejistoty vztažené k veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_5(V) = \pm c_5 u(x_5) = u(x_5) \cdot \frac{h_m \cdot V_e}{V_m} \Rightarrow c_5 = \frac{h_m \cdot V_e}{V_m} [\%] \quad (6.63)$$

Hodnotu V_e lze získat z převodní tabulky měřidla dle vzorce.

$$V_e = \frac{V_q - V_r}{a} [l \cdot mm^{-1}] \quad (6.64)$$

Pro nejistotu při měření hladinoměrem s nejistotou měření v mm

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny v měřidle podobně jako u výpočtu koeficientu citlivosti u odměrné nádoby bez hrdla např. odměrný válec. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu (6.60), pro výpočet standardní nejistoty vztažené veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_5(V) = \pm c_5 u(x_5) = u(x_5) \cdot \frac{100 \cdot V_e}{V_m}$$

$$\Rightarrow c_5 = \frac{100 \cdot V_e}{V_m} 100 [mm^{-1}] \quad (6.65)$$

Hodnotu V_e lze opět získat z převodní tabulky měřidla dle vzorce.

$$V_e = \frac{V_q - V_r}{a} [l \cdot mm^{-1}] \quad (6.66)$$

6.9.6.1. Kontrola stupnice

V případě, že je u kalibrovaného měřidla stavoznak se stupnicí, je třeba provést kontrolu této stupnice a případnou chybu zohlednit v kombinované nejistotě kalibrace. Kontrolu stupnice provádíme etalonem pro měření délky, např. pravítko, posuvka atd. Naměřenou odchylku označíme h_y a vypočítáme míru nejistoty z odečtu stupnice dle následujících výpočtů.

Model měření:

$$h_{ms} = h_s \pm h_y \quad (6.67)$$

Určení nejistoty: nejistota typu B, rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení nejistoty je zvoleno, jelikož nemůžeme obecně určit průběh hustoty chyby lidského faktoru.

$$u_m(V) = \sqrt{\left(\frac{U_y}{k}\right)^2 + \left(\frac{\mp(h_y + h_x) \cdot c_m}{\sqrt{3}}\right)^2} [\%] \quad (6.68)$$

Koeficient citlivosti

Procentuální nejistota měření je závislá na objemu měřicí kapaliny v krychloměru podobně jako u výpočtu koeficientu citlivosti u odměrné nádoby bez hrdla např. odměrný válec. Koeficient citlivosti je pak určen ze vztahu pro výpočet objemu, (6.60) pro výpočet standardní nejistoty

vztažené k výsledné veličině dle vzorce (6.6) a převodu absolutní chyby na relativní dle vztahu (5.3).

$$u_m(V) = \pm c_m u(x_m) = \frac{u(x_m) \cdot S \cdot 100}{h_m \cdot S} = u(x_m) \cdot \frac{100}{h_m}$$

$$\Rightarrow c_m = \frac{100}{h_m} [mm^{-1}] \quad (6.69)$$

6.9.7. Zanedbané nejistoty

Jsou způsobeny zanedbatelnými vlivy na nejistotu měření. Jejich přírůstek ke kombinované nejistotě je tedy také zanedbatelný. Následuje výčet známých zanedbatelných vlivů na kalibraci.

Odpařování měřicí kapaliny

Jelikož se ke kalibraci používají měřicí kapaliny s nízkou tenzí par, jejich odpařování je tedy pomalé a v běžných časech kalibrace se vypařený objem měřicí kapaliny dá zanedbat.

Atmosférický tlak

Výchytky v atmosférickém tlaku mají zanedbatelný vliv na objem měřicí kapaliny vzhledem k jejímu malému koeficientu objemové stlačitelnosti v závislosti na tlaku.

Odkapání odměrné nádoby

V případě používání odměrné nádoby (např. baňky), při opětovném odměřování může dojít k zanechání zbytku měřicí kapaliny v baňce z důvodu nedostatečného odkapání baňky. Tento zbytek může ovlivnit nejistotu měření, předpokládá se však, že kalibraci provádí odborný pracovník a tedy k tomuto pochybení nedochází. Proto tento vliv na nejistotu měření je považován za zanedbatelný.

7. TVORBA METROLOGICKÉHO POSTUPU

Při tvorbě metrologického postupu je dbáno na stávající postupy a doporučení pro měření objemu, ve spolupráci s firmou Volume dm3, s. r. o. Brno.

7.1. Osnova

Nejprve byla vytvořena osnova metrologického postupu, při jejíž tvorbě bylo dbáno na přehlednost výsledného postupu. Jednotlivé výpočty nejistot jsou rozděleny do kapitol podle etalonů. Pro každý etalon je výpočet samostatný, i když se některé kroky výpočtů v různých kapitolách opakují.

Osnova metrologického postupu

1. Úvod
 - 1.1. Související normy a předpisy
 - 1.1.1. Související normy
 - 1.1.2. Související předpisy
 - 1.2. Základní pojmy a veličiny
 - 1.2.1. Objemové nádoby
 - 1.2.2. Veličiny
 - 1.2.3. Odborné pojmy
 - 1.2.4. Etalon
 - 1.3. Metody měření objemu
 - 1.3.1. Objemová metoda
 - 1.3.2. Hmotnostní metoda
 - 1.3.3. Matematická metoda
2. Úkony před kalibrací
 - 2.1. Zjištění požadavků zákazníka
 - 2.1.1. Požadavky na kalibraci
 - 2.1.2. Technické požadavky
 - 2.2. Volba etalonu a metody kalibrace
 - 2.2.1. Metoda kalibrace
 - 2.2.2. Volba etalonu
 - 2.3. Záznam o kalibraci měřidla
 - 2.4. Vizuální prohlídka
 - 2.4.1. Kontrola bezpečnosti práce
 - 2.4.2. Kontrola proveditelnosti kalibrace
 - 2.4.3. Kontrola vhodnosti etalonu a metody kalibrace
 - 2.4.4. Kontrola částí ovlivňujících objem
 - 2.4.5. Určení měřicího kroku
 - 2.4.6. Seznámení zákazníka s postupem a metodou kalibrace
 - 2.5. Zajištění kapaliny ke kalibraci
3. Kalibrace objemovou metodou
 - 3.1. Zaplavení a odvzdušnění soustavy
 - 3.1.1. Kontrola těsnosti
 - 3.1.2. Vymokření
 - 3.2. Počáteční podmínky kalibrace
 - 3.3. První hodnoty kalibrace
 - 3.4. Napouštění / vypouštění kapaliny
 - 3.4.1. Korekce
 - 3.5. Vyznačení / určení objemu na měřicí zařízení
 - 3.6. Opakování kroků
 - 3.6.1. Kritéria pro ukončení kalibrace
 - 3.7. Podmínky na konci kalibrace

- 3.8. Značení polohy objemové značky
- 3.9. Doplnění údajů
- 4. Výpočet údajů zaznamenávaných do kalibračního listu
 - 4.1. Výpočet objemu
 - 4.1.1. Korekce výpočtu objemu
 - 4.1.2. Určení chyby průtokoměru v závislosti na průtoku
 - 4.2. Výpočet nejistot
 - 4.2.1. Standardní nejistoty – vyhodnocení typu A
 - 4.2.2. Standardní nejistoty – vyhodnocení typu B
 - 4.2.3. Určení vlivů a faktorů k výpočtu nejistot
 - 4.2.4. Výpočet nejistot při použití průtočného měřidla
 - 4.2.5. Výpočet nejistot při použití odměrné nádoby – Baňka
 - 4.2.6. Výpočet nejistot při použití krychloměru
 - 4.2.7. Nejistota při odečtu z měřidla s konstantní plochou hladiny v závislosti na hloubce
 - 4.2.8. Nejistota při odečtu z měřidla s nekonstantní plochou hladiny v závislosti na hloubce
 - 4.2.9. Nejistota z opakovatelnosti měření výšky hladiny
 - 4.3. Vystavení kalibračního listu
 - 4.3.1. Plnicí tabulka

7.1.1. Text Postupu

Text postupu respektuje terminologii dle TNI³ a doporučení pro měření objemu. Je psán obecně, aby mohl být použit pro kalibraci veškerých měřidel a při nepodstatných změnách v měření nepřestal být aktuální. Při tvorbě textu byly použity výrazy tak, aby nedocházelo k nesrovnalostem a chybnému výkladu.

7.3. Číslování

V metrologickém postupu, který je přílohou této DP, je pro přehlednost použito samostatné číslování kapitol, vzorců, tabulek a obrázků. Z tohoto důvodu nesouhlasí číslování s touto DP.

7.4. Zdroje a literatura

Texty, které vycházejí z cizích zdrojů jsou samostatně označeny a je uveden seznam použité literatury, jelikož se předpokládá, že metrologický postup bude využíván samostatně bez této diplomové práce.

³ Mezinárodní metrologický slovník

8. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit metrologický postup kalibrace objemu pomocí objemové metody. Hlavní požadavek byl kladen na výpočet nejistoty měření při kalibraci.

Abych se důkladně seznámil s problematikou, navštívil jsem akreditovanou kalibrační laboratoř Volume dm3, s. r. o. a navázal tak permanentní spolupráci s touto firmou. V rámci spolupráce jsem se osobně zúčastnil kalibrace tanků pro zrání piva ve společnosti Zámecký pivovar, a.s. v Bratčicích.

Pro stanovení obecného metrologického postupu kalibrace objemu s výpočtem nejistot jsem analyzoval použití aktuálních norem a předpisů, ze kterých vychází základní požadavky na metrologický postup.

Z důvodu širšího použití jsem do metrologického postupu zahrnul kalibraci pomocí více druhů etalonů. Jedná se hlavně o průtoková měřidla, odměrné nádoby a krychloměry. V postupu jsou chronologicky seřazeny činnosti při kalibraci od seznámení s požadavky zákazníka přes přípravu měření, samotnou kalibraci až po výpočet nejistot.

Celková nejistota kalibrace se nazývá kombinovaná, a vypočítá se sloučením všech vlivů na přesnost měření, jak ze strany etalonu, tak měřidla. Výpočet nejistot etalonu je rozdělen do skupin podle použitého etalonu na nejistotu průtokového měřidla, odměrné nádoby a nejistoty krychloměru. Každá z nich zahrnuje různé vlivy na kombinovanou nejistotu jako např. teplota, čtení hodnot z etalonu, drift etalonu, tlak, atd. Výpočet nejistot měřidla je rozdělen podle indikačního zařízení a tvaru měřidla tj. nádrže s konstantní a nekonstantní plochou hladiny v závislosti na hloubce měřicí kapaliny.

Při výpočtu kombinované nejistoty jsem nebral v úvahu nejistoty způsobené odpařováním měřicí kapaliny, změnou atmosférického tlaku a odkapáním odměrné nádoby. Přírůstky těchto nejistot jsou tak malé, že jejich vliv můžeme zanedbat pro další výpočty.

Metrologický postup, který je hlavním výsledkem mé diplomové práce, jsem navrhl v úzké spolupráci s firmou Volume dm3, s. r. o. tak, aby zohlednil veškeré v praxi používané postupy kalibrace nádrží objemovou metodou. Analýzu nejistot jsem přizpůsobil potřebám a zvyklostem oboru metrologie objemů, tj. veškeré nejistoty jsem diskutoval v relativním, poměrném vyjádření. Při oceňování a samotné analýze nejistot jednotlivých metod i jejich dílčích zdrojů jsem vycházel z konzultací s pracovníky laboratoře Volume dm3, s. r. o. a jejich mnohaletých zkušeností v tomto oboru.

Tento metrologický postup je vytvořen pro užívání akreditované laboratoře Volume dm3, s. r. o. Brno z důvodu optimalizace postupu při kalibrování různých druhů měřidel a usnadnění výpočtů nejistot.

9. SEZNAM LITERATURY A DALŠÍCH ZDROJŮ

- [1] NEJISTOTY MĚŘENÍ. 1. vyd. Ostrava: Studio En Face, 2010. 106 s. ISBN 80-902-5641-4. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz:83/SberDat/navod.pdf>. Návod. VŠB - Technical University of Ostrava.
- [2] ZÁKLADNÍ TYPY ROZDĚLENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI SPOJITÉ NÁHODNÉ VELIČINY. *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/KAP05/PRAV5.HTM>
- [3] SADÍLEK, Václav, Jiří DOLEŽAL a Miroslav VOŘECHOVSKÝ. *ŘEŠENÉ ÚLOHY Z OBLASTI SPOLEHLIVOSTI STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ*. Brno, 2010. Dostupné z: <http://www.fce.vutbr.cz/STM/sadilek.v/frvs/frvs.pdf>. Soubor řešených úloh. VUT FAST.
- [4] TPM 6371 - 96. *Technologický předpis metrologický: Stacionární zásobní nádrže konstruované jako měřicí nádrže*. Praha: ČMI, 1996
- [5] *Volume dm3, s. r. o.* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.mz-volume.cz/>
- [6] RNDr. RÖSSLER, Tomáš Ph.D. *Nejistoty měření*. Olomouc, 2011. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/rcptm/nejistoty.pdf>. Studijní opora. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [7] ŠALDA, Zbyněk. *Nejistoty měření a statistické modely*. Brno, 2011. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/szz/2011/BP_Salda.pdf. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. František Vdoleček, CSc.
- [8] PALENČAŘ, Rudolf, et al. *System riadenia merania*. vyd. 1. Bratislava: STU, 2001. 208 s. ISBN 80-968449-7-0.
- [9]. PALENČAŘ, Rudolf; VDOLEČEK, František; HALAJ, Martin. Nejistoty v měření I :vyjadřování nejistot. *Automa*. 2001, 7-8, s. 50-54. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf> .
- [10]. PALENČAŘ, Rudolf; VDOLEČEK, František; HALAJ, Martin. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Automa*. 2001, 10, s. 52-56. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf> .
- [11] PIXMAX: Fotobanka. *Díry* [online]. 2012 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.pixmac.cz/fotka/d%C3%ADry+po+kulk%C3%A1ch+v+kovov%C3%A9m+pozad%C3%AD/000043580149>
- [12] Chyby měření: základní pojmy. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. Praha, 2010 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.fjfi.cvut.cz/files/k402/pers_hpgs/skoda/prime_mereni1.pdf
- [13] TNI 01 0115. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [14] 0111-OOP-C001-09. *Opatření obecné povahy: Kovové odměrné nádoby*. Brno: ČMI, 2010. Dostupné z: <http://www.cmi.cz/download.php?wdc=1650>

- [15] MIKULČÁK, Jiří, Bohdan KLIMEŠ, Jaromír ŠIROKÝ, Václav ŠŮLA a František ZEMÁNEK. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy: pro střední školy*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 1989, 206 s. ISBN Matematické fyzikální a chemické tabulky.
- [16] Vodoznak. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vodoznak>
- [17] *KOMO mark s.r.o.* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.komo.cz/armatury-hladinove-magneticke-stavoznaky.php>
- [18] *ALPHA international s.r.o.* [online]. Kaplice, 2012 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/slovník/hladinomer/>
- [19] PNÚ 1320.2. Prevádzkové meradlá objemu kvapalín s jednou objemovou značkou: Metóda skúšania pre úradné overovanie. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1986
- [20] Průtokoměr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Pr%C5%AFtokom%C4%9Br>

10. SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

- $\langle a, b \rangle$ – interval hodnot, kterých nabývá náhodná veličina
 $\pm \Delta t$ – znázorňuje rozdíl teploty např. $\pm 1^\circ \text{C}$
 $\pm \Delta x$ – interval hodnot vstupní velicíny
 $\pm \Delta p$ – rozdíl tlaku v měřidle a průtokoměru
 Δx – absolutní chyba
 μ – střední hodnota určující maximum Gaussovy křivky
 a – vzdálenost sousedních rysek r a q v mm
 c – Poloha vrcholu hustoty pravděpodobnosti
 c_i – koeficient citlivosti
 c_{im} – koeficient citlivosti
 d – průměr dna etalonu
 d_l – hodnota jednoho dílku v litrech
 d_m – vzdálenost sousedních dílků stupnice v mm
 h – jmenovitá výška hladiny etalonu
 h_{me} – výška hladiny etalonu
 h_m – výška hladiny indikačního měřidla
 h_s – pravá výška hladiny etalonu
 h_z – výška hladiny naměřená měřicím zařízením na měřidle
 h_x – chyba při odměřování hladiny $\pm 1,0 \text{ mm}$
 h_x – odchylka při odečítání hodnoty na etalonu $\pm 0,5 \text{ mm}$
 h_y – odchylka na stupnici v mm naměřená při kontrole etalonem
 k – koeficient rozšíření
 k_s – koeficient závislý na počtu měření
 L_x – chyba při odměřování hladiny v $\pm l$ odpovídající chybě odečtu ze stupnice $\pm 1,0 \text{ mm}$
 n – počet opakovaných měření
 P – pravá hodnota průtoku
 P_j – nejbližší nižší hodnota průtoku uvedená v tabulce z kalibračního listu
 P_k – nejbližší vyšší hodnota průtoku uvedená v tabulce z kalibračního listu
 r – jmenovitý poloměr dna etalonu
 r_s – pravý poloměr dna etalonu
 s – je směrodatná odchylka výběrového souboru
 S – plocha průřezu etalonu
 S_s – pravá plocha dna etalonu
 $s_{\bar{x}}$ – je odchylka aritmetického průměru
 t_f – teplota měřené kapaliny na konci měřeného kroku či kalibrace
 t_s – teplota měřené kapaliny na začátku měřeného kroku či kalibrace
 U – rozšířená nejistota
 U – velikost rozšířené nejistoty odpovídající průtoku P
 $u(y)$ – kombinovaná nejistota velicíny Y
 $U(y)$ – rozšířená kombinovaná nejistota velicíny Y
 $u_i(y)$ – Standardní nejistoty ovlivňující velicínu Y
 U_j – velikost rozšířené nejistoty odpovídající průtoku P_N dle tabulky č. 2
 U_k – velikost rozšířené nejistoty odpovídající průtoku P_V dle tabulky č. 2
 U_y – rozšířená nejistota etalonu na měření délky
 V_e – objem odpovídající změně hladiny o 1 mm ve výšce hladiny h_m
 V_k – velikost měřicího kroku
 V_m – objem naměřený etalonem
 V_n – vyměřovaný objem v měřidle
 V_q – objem odpovídající nejbližší vyšší rysce q
 V_r – objem odpovídající nejbližší nižší rysce r

V_s – pravý objem etalonu
 V_x – odhadovaná chyba při čtení měřidla $\pm 0,05l$.
 x' - naměřená hodnota
 x - pravá hodnota,
 x_i – Naměřené hodnoty z jednotlivých měření
 $\bar{x}$ – aritmetický průměr z jednotlivých měření
 $X_i (i = 1, 2, 3 \dots n)$ – vstupní veličiny ovlivňující nejistotu
 Y – měřená veličina
 α – koeficient objemové teplotní roztažnosti měřicí kapaliny
 β – délková roztažnost materiálu etalonu
 δ_n - systematická chyba
 δ_{ni} – odhadované chyby pro jednotlivá měření
 δ_s - náhodná chyba
 λ - převrácená hodnota střední hodnoty doby čekání
 σ - parametr odchylky určující strmost křivky Gaussovy křivky
 ε – kompresibilitní faktor měřicí kapaliny
 χ – koeficient rozdělení pravděpodobnosti

11. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 – Metrologický postup kalibrace objemu pomocí objemové metody

Příloha č.2 - CD, které obsahuje:

- Elektronickou podobu diplomové práce

Příloha č.1 – Metrologický postup kalibrace objemu pomocí objemové metody