



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Určování standardních nejistot měření při měření průtoku plynů

Podpůrný studijní materiál pro práci s měřicí tratí

Verze č. 1

Petr Kudrna



Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
Δ_x		Absolutní chyba
δ_x	%	Relativní chyba
\bar{x}		Aritmetický průměr
S		Směrodatná odchylka výběrového souboru
$s_{\bar{x}}$		Směrodatná odchylka aritmetického průměru
u_A		Standardní nejistota typu A
u_B		Standardní nejistota typu B
u_C		Kombinovaná standardní nejistota typu C
K		Koeficient rozšíření
Re_D		Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí
Q_v	$m^3 \cdot s^{-1}$	
Q_m	$kg^3 \cdot s^{-1}$	
L		Litr
U	mV	

Poznámka: **Označení veličiny litr velkým písmenem „L“ je z důvodu možné záměny malého „l“ s číslicí 1(jedna).**



1 Úvod

Žádné měření, žádná měřicí metoda ani přístroj nejsou absolutně přesné, každé měření je zatíženo určitou nepřesností, způsobenou nejrůznějšími negativními vlivy, které se v měřicím procesu vyskytují. Tato nepřesnost se projeví jako odchylka mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledek měření se tak vždy bude pohybovat v určitém pravděpodobnostním rozsahu (tzn. chybovém intervalu) kolem skutečné hodnoty, která se může lišit od naměřené. Chyby jsou vyjadřovány v absolutních, nebo relativních hodnotách a podle jejich působení je lze rozdělit na systematické, náhodné a hrubé.

V devadesátých letech bylo zvykem při vyhodnocování souborů naměřených hodnot pracovat s chybami. Později bylo vyhodnocování prováděno prostřednictvím vyjádření nejistot měření, což přetrvává dodnes.

Výsledný rozdíl mezi oběma hodnotami je tvořen velmi složitou kombinací dílčích faktorů, které lze v řadě případů komplexněji vyjádřit tzv. standardními nejistotami měření, které tyto dílčí faktory zohledňují. Mezi veličiny ovlivňující údaj měřicího přístroje zejména patří mechanické vlivy, vnější elektromagnetická pole, kmitočet a teplota. Jsou veličiny, které jsou z hlediska vlivu prostředí méně náchylné. V problematice s nejistotami měření se setkáváme s různou řadou veličin (měření úbytku napětí, měření rozdílu teplot, atd.).

I v biomedicině je třeba vyjadřovat standardní nejistoty měření. Zavádění konceptu nejistot souvisí jak s předpisy, tak i s mnoha mezinárodními normami, především ISO 9000. „Kontrolní, měřicí a zkušební zařízení se musí používat způsobem, který zabezpečuje, že nejistota měření je známá a je ve shodě s požadovanou schopností.“ [9]

Úlohou tohoto dokumentu je vytvořit podporu pro práci se specializovanou technikou, pro regulaci a měření průtoku plynů (tzv. měřicí trať) a podporu pro určování standardních nejistot měření.

Tento dokument není plně dokončen a v současné verzi nezahrnuje všechny aplikace a situace, které jsou součástí projektů OPVVV. Dokument bude dále aktualizován.



2 Současný stav vyjadřování výsledků měření

2.1 Chyby měření

Chyba měření je rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny a hodnotou zjištěnou měřením.

Jako chybu absolutní Δ_x označujeme rozdíl mezi hodnotou naměřenou x_m a skutečnou x_s . Relativní chybu δ_x získáme podělením absolutní chyby se skutečnou hodnotou podle následujících vztahů:

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (1)$$

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (2)$$

Systematické chyby jsou pro uživatele měřicí techniky nejpříjemnější a to z toho důvodu, že je lze z velké části snadno určit a jejich vliv je možné snížit za pomoci korekcí, kompenzací apod. Ke stanovení velikosti systematických chyb postačí vztah (1). [5]

Náhodné chyby jsou těžko předvídatelné a nelze je vyloučit. Oproti systematickým chybám, kde při stálých podmínkách je systematická chyba také stejná co do velikosti a znaménka, u chyb nahodilých se při opakování měření mění jejich velikost i znaménko. Pro určení jejich velikosti je tedy nutné vycházet z opakovaných měření za použití statistických metod odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu modelu. V praxi se nejčastěji využívá normální – Gaussovo rozdělení. Výsledkem měření, stanovený ze souboru opakovaných měření prováděný za stejných podmínek je aritmetický průměr. [5]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Chování náhodných chyb nám blíže charakterizují směrodatná odchylka výběrového souboru s a směrodatná odchylka aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$ získané ze vztahů: [5]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$



$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celý experiment. Projevují se výrazným rozdílem od naměřených hodnot. Chyby tohoto druhu se vyloučí a v dalším zpracování už se nepoužívají z důvodu možného zkreslení výsledku měření. Tyto chyby můžeme potlačit důsledným dodržováním měřicích postupů a pozorností obsluhy přístroje. Výsledná chyba měření je tedy vyjadřována jako součet systematické a náhodné složky (6). Maximální hodnotu můžeme odhadnout pomocí vztahu (7), kde systematická složka $e = \bar{x} - x_s$ a náhodná složka $\varepsilon = 2s$. [5]

$$\Delta_x = e + \varepsilon \quad (6)$$

$$\Delta_{max} = (\bar{x} - x_s) + 2s \quad (7)$$

2.2 Měření standardních nejistot

V osmdesátých letech dvacátého století byl předložen návrh k náhradě koncepce chyb měření koncepcí nejistot měření. V roce 1990 byl vydán Západoevropským kalibračním sdružením (WECC) dokument, který sloužil k jednotnému vyjádření nejistot měření. Vrcholovým dokumentem se stala směrnice GUM ("Guide to the expression of uncertainty in measurement"). [9] [10]

2.3 Zdroje nejistot

Veškeré jevy, které nějakým způsobem ovlivňují jednoznačné určení výsledku měření, můžeme označit jako zdroje nejistot. Tyto jevy nám značně vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. K nejčastěji vyskytovaným zdrojům nejistot patří:

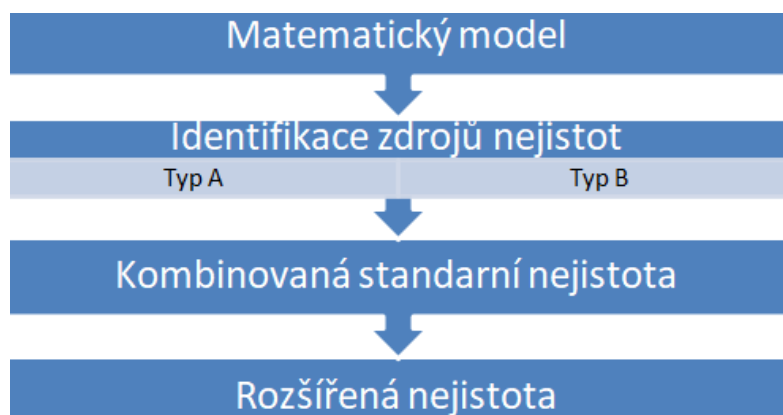
- Nevhodný výběr přístroje
- Nereprezentativní výběr vzorků měření
- Nepřesnost etalonů a referenčních materiálů
- Nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních
- Subjektivní vliv obsluhy
- Chybné zaokrouhlování
- Vliv prostředí [7]



2.4 Standardní nejistoty měření

Nejistota měření nám charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který je možný přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se týká nejen výsledku měření, ale i měřících přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na kterých nejistota výsledku měření závisí. Základem určování nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může udávaná hodnota odchylovat od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou může nacházet skutečná hodnota. [5]

Ke stanovení jejich velikostí jsou k dispozici dvě metody a to právě statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu A), jiné než statistické zpracování naměřených údajů (metoda typu B). Pomocí součtu čtverců těchto dvou metod získáme výslednou kombinovanou nejistotu. Vyhodnocování nejistot měření je nutné považovat za neustálý proces, který je samozřejmě časově i finančně určitým způsobem náročný. Souvisí to též s pečlivým zabezpečením relevantních informačních zdrojů, se sběrem dat a s jejich precizní základní vstupní analýzou. [6]
[7]



Obrázek 1: Matematický model určování standardních nejistot

2.4.1 Standardní nejistota typu A

Je způsobována náhodnými chybami, jejichž příčiny se všeobecně považují za neznámé. Předpokladem je normálního rozdělení pravděpodobnosti těchto chyb. Stanovuje se z opakovaných měření za stejných podmínek. Tyto nejistoty se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšují. Charakteristikou je výběrová směrodatná odchylka. [6]



$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

Kde n je počet měření, s je směrodatná odchylka, x_i je aktuální hodnota. Aby mohla být tato nejistota typu A počítána, tak musí být vykonaný počet n měření alespoň 10, tedy $n \geq 10$. Pokud tato podmínka není splněna, tedy $n \leq 10$, není možné určit kvalifikovaný odhad, určí se korigovaná nejistota u_{Ak} pomocí vztahu:

$$u_{Ak}(x) = k \cdot s(\bar{y}) \quad (9)$$

kde k je koeficient závislý na počtu měření, s je směrodatná odchylka aritmetického průměru. [6]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

2.4.2 Standardní nejistota typu B

Tato nejistota je způsobována známými a odhadnutelnými vlivy, proto nezávisí na počtu měření. Standardní nejistota typu B j -tého vlivu na přímo měřenou veličinu x_i se určí podle vztahu (9), kde Z_{max} je maximální možná odchylka způsobená daným vlivem j a χ_j je převodní koeficient příslušného rozdělení pravděpodobnosti. [6]

$$u_B = \frac{\Delta_{z \max}}{\chi} \quad (11)$$

Celková standardní nejistota typu B veličiny X_i je dána vztahem (10), kde n je počet vlivů na přímo měřenou veličinu X_i . [6]

$$u_{B \text{ celk}} = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} \quad (12)$$

Uvádějí-li certifikáty, dokumentace výrobců nebo jiné prameny rozšířenou nejistotu U a koeficient rozšíření k_r , stanoví se standardní nejistota $u_B(Z)$ vlivem daného zdroje Z podle vztahu:

$$u_B(Z) = \frac{U}{k_r} \quad (13)$$



Je-li známo rozpětí, v němž se může nacházet většina naměřených hodnot, a je oprávněný předpoklad, že při určování tohoto intervalu bylo uvažováno normované rozdělení, lze se standardní nejistota $u_B(Z)$ vlivem daného zdroje Z určit ze vztahu:

$$u_B(Z) = \frac{U}{k_p} \quad (14)$$

kde k_p je koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného normálního rozdělení pro pravděpodobnost P ($k_p = 1,96$ %, pro $P = 95$ %, $k_p = 2,58$ pro $P = 99$ %, $k_p = 3$, pro $P = 99,73$ %). [6]

2.4.3 Kombinovaná standardní nejistota měření typu C

Nejistota měření typu C je kvadratickým sloučením nejistot typu A a B určuje interval, ve kterém se s danou pravděpodobností dá očekávat skutečná hodnota měřené veličiny Y a odhaduje se vztahem (11). [7]

$$u_c = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (15)$$

2.4.4 Rozšířená standardní nejistota U

Zavádí v případě, že je třeba zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření. Rozšířená nejistota se snaží definovat interval, ve kterém se nachází měřená hodnota s pravděpodobností P . Při $k_r = 1$ je $P = 68$ %, při $k_r = 2$ je $P = 95$ % a při $k_r = 3$ je $P = 99,7$ %, kde k_r je koeficient rozšíření u_c .

$$u_{(x)} = k_r \cdot u_c(x) \quad (16)$$

2.5 Problematika určování nejistot měření průtoku plynu a kapalin

Kdykoli se měří průtok (průtočné množství) tekutiny, získaná hodnota se jednoduše a nejlépe odhadne, když ji lze získat měřením průtoku nebo množství tekutiny. Průtok nebo množství mohou být v praxi nepatrně větší nebo menší než získaná hodnota. Nejistota pak charakterizuje rozsah hodnot, s určitou konfidenční úrovní, uvnitř kterého se očekává, že hodnoty průtoku nebo proteklého množství tekutiny leží. V této oblasti je nutné také zohledňovat vlivy fyzikálních faktorů, jako je např. druh proudění i samotný průtok. Další ovlivňující parametry jsou např. viskozita, vlhkost vzduchu apod. Tyto vlivy jsou vysvětleny v kapitolách níže.

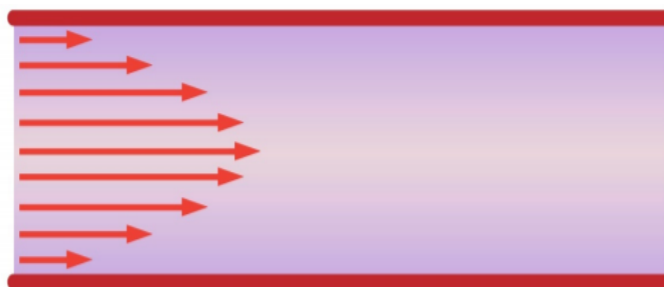


2.5.1 Druhy proudění

Při problematice proudění kapalin nebo plynu, rozlišujeme hlavně proudění laminární a turbulentní. O náležitosti k danému typu proudění se rozhoduje podle hodnoty *Reynoldsova čísla*, to vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a třecími silami. Dříve se předpokládal pozvolný přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním, ale pomocí simulací se dospělo k názoru, že mezní hranice Re_D je rovna hodnotě 2320. Tato hodnota platí pro uzavřené kanály s kruhovým průřezem. Při popisu typu proudění se používá také pojem mezní vrstva. Mezní vrstvou je nazývána nejbližší část styku kapaliny a potrubí. Je v ní velký rozdíl v rychlosti proudění. Vzniká v důsledku smykového tření a setrváním kapaliny na stěně potrubí a díky viskozitě kapaliny. [7]

2.5.1.1 Laminární proudění

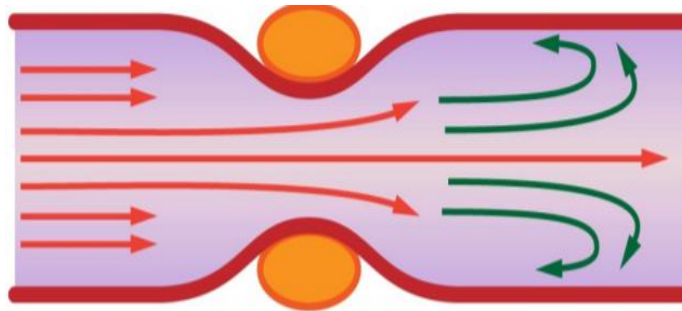
U laminárního proudění je směr pohybu částic rovnoběžný se směrem proudění tekutiny. Částice tekutiny nepřechází mezi vrstvami. Rychlostní profil proudění je parabola. Nejvyšší rychlosti částice dosahují v ose potrubí. Reynoldsovo číslo $Re < 2320$. Toto proudění se nejčastěji vyskytuje při malých rychlostech kapalin. [1]



Obrázek 2: Laminární proudění [14]

2.5.1.2 Turbulentní proudění

Při turbulentním proudění dochází k přechodu částic mezi vrstvami. Částice víří a pohybují se nejen ve směru proudění kapaliny. Obecně se udává, že toto proudění nastává od $Re > 2320$. Turbulentní proudění je dosahováno při vyšších rychlostech proudění či tlaku. [1]



Obrázek 3: Turbulentní proudění [14]

2.5.2 Reynoldsovo číslo

Bezrozměrná veličina dávající do souvislosti setrvačné síly a viskozitu. Reynoldsovo číslo nám umožňuje určit, zda se jedná o proudění turbulentní, či laminární. Vyšetřuje poměr mezi setrvačnými a třecími silami. Zjednodušeně tedy pro nízké hodnoty je proudění laminární a pro vysoké hodnoty proudění turbulentní. Vyjadřujeme vztahem (3), kde

$$Re_D = \frac{\rho v^2 D}{\eta v} = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (17)$$

ρ ... hustota tekutiny [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

v ... rychlost tekutiny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

D ... průměr potrubí [m]

η ... dynamická viskozita tekutiny [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$]

ν ... kinetická viskozita tekutiny [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]

Re_D ... Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí [-][1]

2.3.1. Průtok - veličina

Průtok je měření množství za jednotku času. Množství můžeme vyjádřit buď objemem, nebo hmotností. Z toho vyplývají dvě základní metody měření průtoku a to objemová metoda a hmotnostní metoda. [1]

2.3.1.1. Objemový průtok

Objemovým průtokem Q_v označujeme objem tekutiny, který projde potrubím za jednotku času ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Pro plyny se udává nejčastěji v $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Objemový průtok se dá zjistit přímo např. dávkovacími snímači, nebo nepřímo např. rychlostními snímači za předpokladu znalosti rozměrů měřicího kanálu. Základním předpokladem však je, že tekutina zaplňuje celé potrubí. Tato



podmínka nebývá v praxi vždy splněna a je to typický problém při měření volné hladiny v otevřených průtokových kanálech. Pro zjištění objemového průtoku se využívá měření pomocí rozdílů tlaků nebo výpočet z rychlosti proudění tekutiny v potrubí o známém průřezu. [1] [2]

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (18)$$

V ... je objem tekutiny [m^3]

t ... doba proudění [s]

2.3.1.2. Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok Q_m udává hmotnost tekutiny, která proteče potrubím za jednotku času. K přímému měření hmotnostního průtoku se používají dvě základní metody:

- Coriolisův princip
- Tepelné hmotnostní průtokoměry

Nepřímou metodou se hmotnostní průtok určuje z protečeného množství tekutiny (objemového průtoku) a z hodnoty hustoty protékajícího média ρ . [1] [2]

$$Q_v = Q_m \cdot \rho \quad (19)$$

Q_v ... objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

ρ ... hustota tekutiny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]



2.3.2. Rozdíl mezi měřením kapalin a plynů

Hlavním rozdílem mezi kapalinou a plynem je, že ideální kapalina je nestlačitelná, nemá vnitřní tření a je dokonale tekutá. Ideální plyn je dokonale stlačitelný, nemá vnitřní tření a je dokonale tekutý. Při měření průtoku kapalin je potřeba provádět korekci změřeného objemového průtoku na změny teploty a tlaku pouze výjimečně. U měření průtoku plynů se naproti tomu musejí tyto korekce provádět vždy vzhledem ke stlačitelnosti proudícího média. Další ovlivňující parametry jsou např. viskozita, vlhkost vzduchu. [15]

V technické praxi se využívá tzv. přepočítávačů množství plynu. Aby se dali dosažené výsledky za různých pracovních podmínek dobře porovnat, je zvykem, vztahovat průtok k určitým podmínkám. Nejčastěji se využívá „vztažných podmínek“ pro teplotu 0 °C a tlak 101,325 kPa. Takto přepočteným výsledkům, se pak říká „normované“. Z toho vyplývá označení NI, hodnota je vztažena k určitým vztažným podmínkám. Přepočet může být funkcí teploty, tlaku, teploty a tlaku. Využívá se i přepočítávačů hustotových, energetických či mechanických. [2] [16]

2.3.3. Stávající přístrojová technika v laboratořích FBMI

Momentálně je možné pracovat v laboratoři plicní ventilace na FBMI s těmito přístroji (viz Tabulka č. 1).

Tabulka 1: Seznam přístrojů používaných v laboratořích FBMI

Název přístroje	Rozsah průtoku [L/min]	Přesnost měření [%]	Teplotní limity [°C]
FLUKE VT MOBILE	0,01 – 2	±3,00	10 – 40
The mini-BUC	1 – 6	±0,50	0 – 40
Hans Rudolph	0,1 – 16	±0,12	10 – 40
FLUKE VT PLUS	0,1 – 150	±2,00	10 – 40
Mks MassFlow	50 – 300	±1,00	15 – 40
Sierra CallTrak XL	5 – 500	±0,15	15 – 30

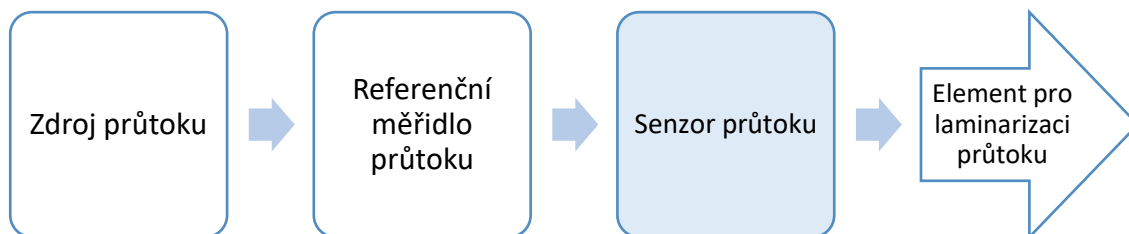


3 Zpracování výsledků z měření průtoku plynů

Text níže si klade za cíl popsat jednu z typických úloh pro Laboratoř měření a analýzy plynů v biomedicině a využít SW aplikaci pro vyjadřování standardních nejistot v souvislosti s měřením průtoku plynu.

3.1 Postup stanovení standardních nejistot

Pro vyjádření standardních nejistot měření v laboratoři plicní ventilace lze postupovat podle schématu (obr. 4). Průtokoměr je v tomto případě CallTrack XL, se kterým je porovnáváno neznámé měřidlo. Neznámým měřidlem je normalizovaná clona, která má na výstupu diferenční tlak, což je rozdíl tlaků před a za clonou. Výstupem pak budou číselné odchylky, ze kterých jsou pomocí statistické analýzy (viz Kapitola: Standardní nejistoty měření) vypočítány nejistoty měření.



Obrázek 4: Blokové schéma měřicí trati

3.2 Clona

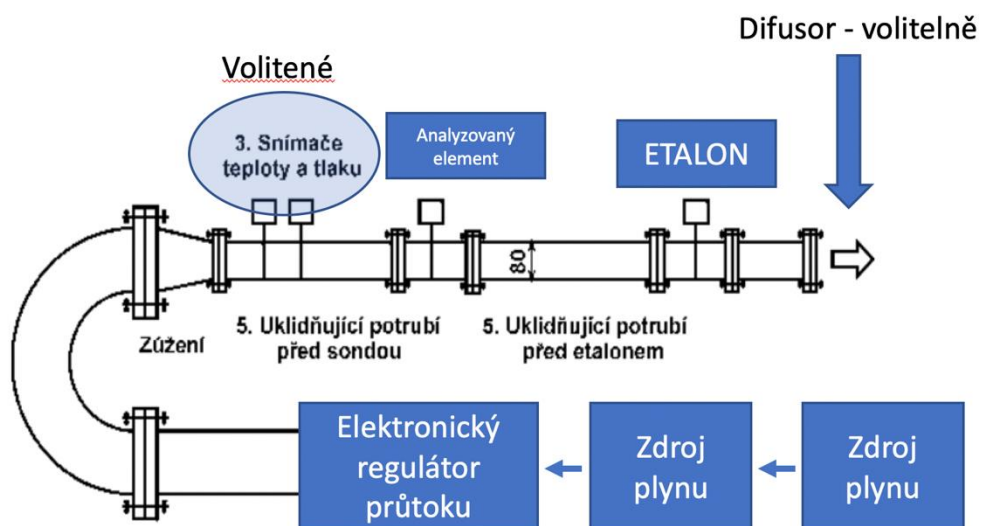
Analyzovaná clona je použitelná pro měření průtoku plynu v potrubí o průměru 3 mm a lze s její pomocí měřit průtok v obou směrech proudění (inspirium/exspirium). Clona byla vyrobena z nekorozivní oceli třídy 17, což umožňuje tepelnou ale i chemickou sterilizaci dle aktuální potřeby a sterilizačních procesů stanovených v místě použití. [12]



Obrázek 5: Diferenční tlaková clona

3.3 Měřicí trať

Pro zjištění přesnosti lze také použít měřicí (testovací) trať, kdy je hodnota zjištěná z testovaného průtokoměru porovnávána s hodnotou průtoku u etalonu. Jako etalon se většinou používá průtokoměr, který má svou přesnost alespoň o řád lepší než testovaný průtokoměr. Tato konkrétní trať (obr. 6.) je v současné době sestavena na Ústavu automatizace, měření a kybernetiky. V budoucnu bude snaha o vytvoření podobné měřicí trati kompatibilní s danými přístroji v laboratoři plicní ventilace na FBMI.



Obrázek 6: Schéma měřicí trati [volně dle 13]



4 Softwarová aplikace pro výpočet nejistot měření

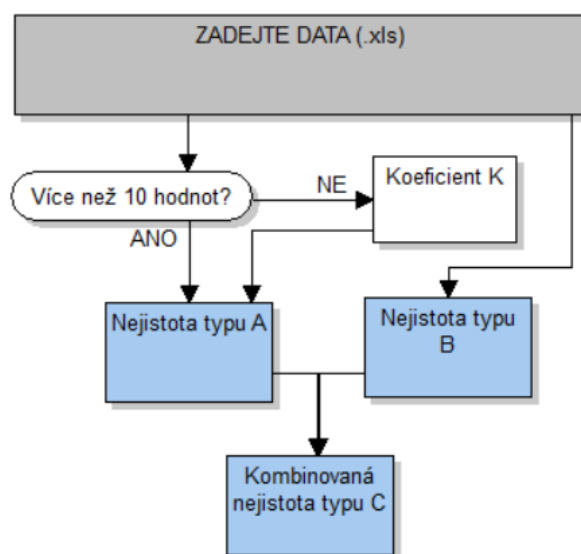
4.1 Navržená SW aplikace

Navržená aplikace byla naprogramována ve vývojovém prostředí MATLAB a dále zpracována v prostředí GUI (Graphical User Interface), které umožňuje vytvářet aplikace s grafickým rozhraním.

4.2 Blokové schéma aplikace – popis základních bloků a funkcí

Ke spuštění této aplikace je nutné mít data ve formátu s příponu .xls, které pak budou nahrávány do Matlabu. Uživatel si může upravovat jednotlivé parametry (počet digitů, počet měření) sám přímo ve vytvořených skriptech.

Uživateli se zobrazí okno (obr. 8), vybere soubor dat ve formátu .xls. Výpočet nejistoty typu A je čistě jen statistická záležitost. Variabilitu odhadujeme výpočtem ze série opakovaných měření. Odmocněním výběrového rozptylu s^2 získáme výběrový odhad směrodatné odchylky s , tedy se standardní nejistotou typu A. V případě, že máme k dispozici méně než 10 hodnot ke zpracování, je nutné hodnotu U_A korigovat koeficientem rozšíření. Odhad standardní nejistoty typu B je založen na informacích o možné variabilitě hodnot měřené veličiny. Kombinovaná standardní nejistota typu C udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny.



Obrázek 7: Blokové schéma navržené SW aplikace



1. Uživatel zadá data ve formátu .xls
2. Pokud je 2 – 9 hodnot, aplikace vypočítá korekční koeficient K
3. Aplikace vyhodnotí a zobrazí nejistoty typu A, B i C (obr. 7)

4.3 Implementace aplikace na data ze stávající přístrojové techniky

Navržená aplikace byla implementována na získaná data ze stávající přístrojové techniky laboratoře PV, konkrétně analyzátor průtoku plynu FLUKE VT MOBILE. Pro ověření správnosti výpočtů navržené aplikace byly vytvořeny skupiny dat s více než deseti hodnotami i s méně než deseti, kvůli korekčnímu koeficientu. [19]



Obrázek 8: Analyzátor průtoku plynu FLUKE VT MOBILE [19]



Obrázek 9: Analyzátor průtoku plynu zapojený v měřicí trati



5 Výsledky

Pomocí diferenčního tlakového senzoru 26PC01 (Honeywell) byla stanovena závislost výstupního napětí senzoru na velikosti průtoku plynu v obou směrech proudění (inspirium/expirium). Z celkem 11 sad měření byla stanovena převodní tabulka, včetně určených nejistot měření. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v níže v tabulce 2.

Tabulka 2: Velikost výstupního napětí senzoru.

Průtok P [L/min]	Inspirium U [mV]	Expirium U [mV]
1	29,41 ± 1,75	7,46 ± 3,06
2	38,56 ± 3,43	12,23 ± 1,95
3	72,07 ± 4,84	63,95 ± 4,18
4	103,16 ± 3,74	118,57 ± 7,52
5	124,27 ± 9,06	195,23 ± 6,21
6	196,16 ± 5,70	266,61 ± 6,95
7	258,90 ± 9,87	349,59 ± 8,57
8	347,50 ± 10,58	433,09 ± 13,49
9	432,55 ± 11,83	537,12 ± 12,18
10	535,07 ± 10,78	670,01 ± 13,73
11	660,27 ± 14,15	821,91 ± 18,19
12	780,70 ± 15,13	996,81 ± 20,03
13	944,66 ± 19,50	1194,81 ± 46,13
14	1099,73 ± 20,90	1390,00 ± 27,21
15	1256,30 ± 23,56	1641,25 ± 32,95

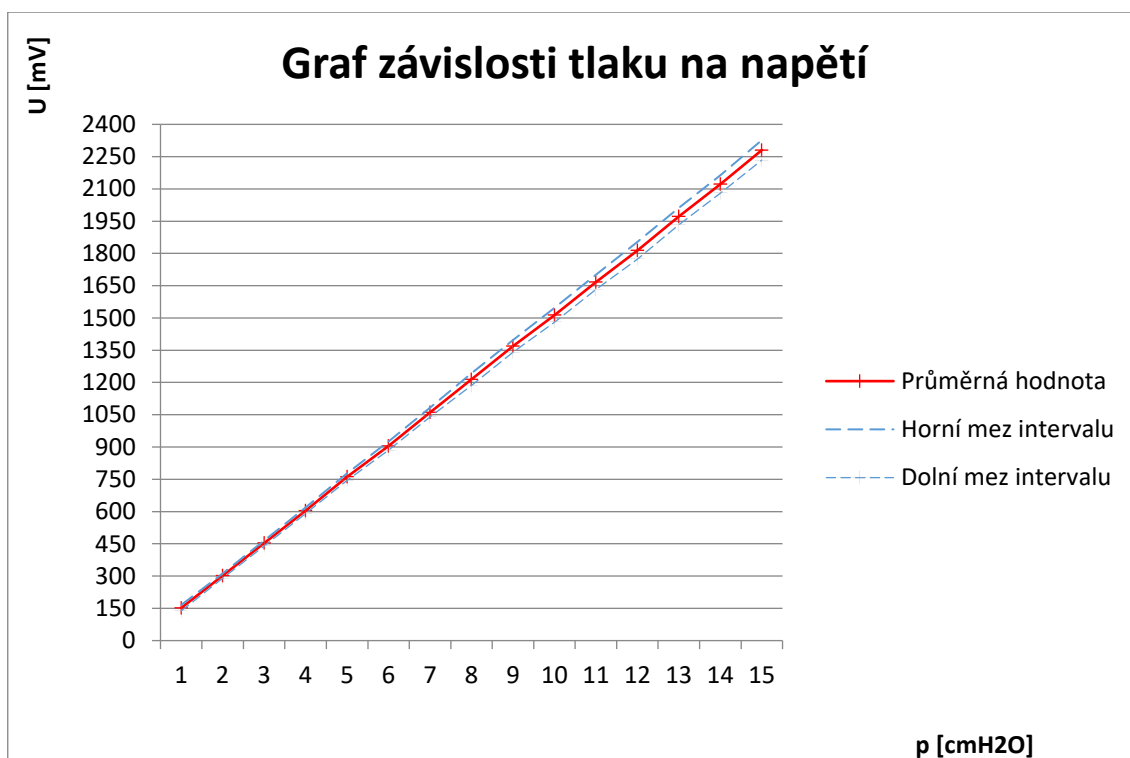


20	2364,90	±	45,33	3082,78	±	92,87
25	4081,86	±	156,82	5141,78	±	149,49
30	6167,23	±	118,95	7595,60	±	153,46
35	9458,01	±	216,54			

Ze všech 11 měření byly vypočteny průměrné hodnoty a z nich pak určené standardní nejistoty typu A, B a C. Z těchto hodnot byl vytvořen graf (obr. 7), ve kterém je vyznačený intervalový pás obsahující horní a dolní meze, kam s největší pravděpodobností spadá skutečná hodnota daného měření.

Tabulka 3: Hodnoty zaznamenané při kalibraci sond

Průměrná hodnota	Nejistota typu A	Nejistota typu B	Nejistota typu C	U(x)	Formální zápis
152.00	6.708	1.399	6.852	13.705	152.00 ± 13.70
301.27	4.735	2.772	5.487	10.973	301.27 ± 10.97
453.09	4.721	4.169	6.299	12.597	453.09 ± 12.60
604.39	4.652	5.561	7.250	14.501	604.39 ± 14.50
761.36	4.653	7.006	8.410	16.821	761.36 ± 16.82
905.26	5.714	8.330	10.101	20.203	905.26 ± 20.20
1061.45	4.569	9.767	10.783	21.565	1061.45 ± 21.57
1214.10	9.137	11.172	14.432	28.864	1214.10 ± 28.86
1368.35	6.535	12.591	14.186	28.372	1368.35 ± 28.37
1513.75	8.983	13.929	16.574	33.148	1513.75 ± 33.15
1667.10	7.457	15.340	17.056	34.112	1667.10 ± 34.11
1813.58	10.890	16.688	19.927	39.853	1813.58 ± 39.85
1971.84	7.970	18.144	19.817	39.635	1971.84 ± 39.63
2122.36	7.189	19.529	20.810	41.620	2122.36 ± 41.62
2280.32	9.843	20.982	23.176	46.353	2280.32 ± 46.35



Obrázek 10: Graf závislosti tlaku na napětí.

Červená křivka značí průměrnou hodnotu z naměřených dat a modré křivky znázorňují horní (kladnou) a spodní (zápornou) hranici pásu, ve kterém se pohybují vypočítané přesnosti



5.1 Výsledná vizualizace navržené aplikace

Celkový vzhled aplikace sestává ze tří částí:

- „Tlačítko“, kam uživatel zadává výběrová data.
- Pole s vybraným daty
- Pole s vypočítanými nejistotami typu A, B, C.

Zadajte data s príponou .xls	
Nejistota typu A	
4.63081	1 152
	2 144
	3 175
	4 135
Nejistota typu B	5 124
2.90457	6 145
	7 162
	8 142
	9 136
Kombinovaná nejistota typu C	10 155
5.46635	

Obrázek 8: Výsledný vzhled navržené aplikace



6 Závěr

V úvodní teoretické části jsou rozebrány základy určování nejistot měření a stanovení těchto nejistot. U všech typů nejistot jsou uvedeny matematické vztahy pro jejich stanovení, viz kapitola 2.

Kapitola 3 je věnována metodice stanovení nejistot při měření průtoku plynu a doporučenému postupu při zpracování těchto nejistot. Byla vytvořena SW aplikace pro výpočet standardních nejistot ve vývojovém prostředí MATLAB. K této aplikaci je zapotřebí mít pouze číselná data ve formátu .xls, které pak dále navržená aplikace statisticky zpracovává a vyhodnocuje už jednotlivé nejistoty typu A, B, C.

Bylo provedeno pilotní měření pomocí diferenčního tlakového senzoru. Z celkem 11 sad měření byla stanovena převodní tabulka, včetně určených nejistot měření. Na konkrétních hodnotách v daném měření byly vypočítány pomocí statistické analýzy a daných matematických vzorců standardní nejistoty typu A, B, C. Z těchto nejistot pak byl vytvořen graf, který znázorňuje toleranční interval hodnot, ve kterém se mohou standardní nejistoty pohybovat s největší pravděpodobností.



Seznam použité literatury

- [1] DAĎO, Stanislav. BEJČEK, Ludvík; PLATIL, Antonín. Měření průtoku a výšky hladiny. Vydání Praha: BEN, 2005. 447 s. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] MIKAN, Jaroslav. Měření plynu. 1. vyd. Říčany u Prahy: GAS, 2003. 351 s. ISBN 80-7328-053-1
- [3] Kalibrace. ČESKÝ METROLOGICKÝ INSTITUT [online]. BRNO [cit. 2018-10-23]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/kalibrace>
- [4] SCHOVÁNEK, Petr a Vítězslav Havránek. Chyby a měření nejistot (doplňující text k laboratornímu cvičení). Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. [online]. [cit. 2018-10-25]. Registrační číslo: CZ.1.07/2.2.00/07.0018. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/pext2-nejistoty.pdf>
- [5] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: Nejistoty v měření I: Vyjadřování nejistot. AUTOMA. 2001, 7-8.
- [6] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. AUTOMA. 2001, 10
- [7] PALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M.: Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. AUTOMA. 2001, 12.
- [8] Kalibrace u měřičů průtoku plynů. *ELEKTROREVUE: Techniky pro testování snímačů průtoku* [online]. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: www.elektrorevue.cz/clanky/01004
- [9] ČSN EN ISO 5167-2: Měření průtoku tekutin - Postupy pro vyhodnocení nejistot - Část 1: Úvod, Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [10] MĚŘENÍ PRŮTOKU PLYNŮ. BRNO, 2012. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. PETR BENEŠ, PhD.
- [11] JCGM. Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method [online]. [cit.2013-12-28].. Dostupné z: www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf
- [12] Měření dechových objemů při vysokofrekvenční tryskové ventilaci nezralých novorozenců. Kladno. Disertační práce. FBMI ČVUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.
- [13] ORLÍKOVÁ, Soňa. Techniky pro testování snímačů průtoku: Testování průtokoměrů. In: [Http://www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz): Testování průtokoměrů [online]. Ústav automatizace, měření a kybernetiky, VUT Brno, Božetěchova 2: VUT Brno, 2001, 2001 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01004/index.html>



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



- [14] KULAKOV, Anton. Krevní oběh: Reologické vlastnosti krve. In: Funkce buněk a lidského těla: Krevní oběh [online]. 2005 [cit. 2019-06-08]. Dostupné z: <http://fbt.cz/skripta/x-srdce-a-obeh-krve/2-krevni-obeh/>
- [15] Miller, R.W. Flow measurement Engineering Handbook, McGraw-Hill, New York, 1989
- [16] Orliková, S. Měřič průtoku - programové zajištění, diplomová práce, Brno 1999
- [17] ČSN ISO 9368-1 Měření průtoku kapalin v uzavřených profilech vážicí metodou - Postupy pro zkoušení zařízení, Část 1: Statické vážicí systémy, Český normalizační institut, Praha, 1995
- [18] ČSN EN 24185+AC Měření průtoku kapalin v uzavřených profilech - Vážicí metodou (obsahuje změnu AC), Český normalizační institut, Praha, 1995
- [19] Uživatelský manuál VT FLUKE MOBILE. FLUKE Biomedical, LANDAUER and RaySafe