



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta Dopravní

Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství

**Mobilní zařízení pro kalibraci plynových čidel  
pro velmi nízké koncentrace**

**Mobile Gas Sensor Calibration  
Device for Low Concentration**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích

Studijní obor: Bezpečnost dopravních prostředků a cest

Vedoucí práce: Doc. Ing. Václav Jirovský, CSc.

**Bc. Jiří Bittner**

---

Praha 2016



**K623 .....Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství**

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Jiří Bittner**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – BD – Bezpečnost dopravních prostředků a cest**

Název tématu (česky): **Mobilní zařízení pro kalibraci plynových čidel pro velmi nízké koncentrace**

Název tématu (anglicky): Mobile Gas Sensor Calibration Device for Low Concentration

**Zásady pro vypracování**

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Rešerše stávajících metod
- Návrh metody a způsob ředění plynů
- Teorie a výpočtová část míchání plynů v zařízení
- Návrh celkové koncepce zařízení
- Návrh hlavních komponentů a základní výkresová dokumentace
- Předpoklady využití

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Vodák, F. Kapičková, O.: Fyzika 20 - Termodynamika, skriptum ČVUT  
Matoušek, D.: C pro mikrokontroléry PIC, BEN 2011  
Vybiral, B.: Mechanika ideálních plynů,  
[http://www.jaroska.cz/fo/\\_media/archiv/knihovna/plyny\\_boklet.pdt](http://www.jaroska.cz/fo/_media/archiv/knihovna/plyny_boklet.pdt)

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Václav Jirovský, CSc.**

Datum zadání diplomové práce: **14. července 2016**  
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2016**  
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

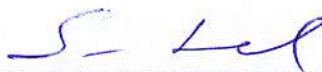
L. S.



doc. Ing. Václav Jirovský, CSc.

vedoucí

Ústavu bezpečnostních technologií a inženýrství



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.

děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.



Bc. Jiří Bittner

jméno a podpis studenta

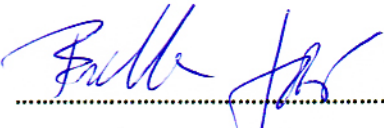
V Praze dne..... 14. července 2016

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Mobilní zařízení pro kalibraci plynových čidel pro velmi nízké koncentrace vypracoval samostatně a veškeré použité informační zdroje, ze kterých jsem při tom čerpal, jsem uvedl na konci této práce v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském, právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne ..... 30.11.2016

  
.....  
Podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Václavu Jirovskému, CSc. za vedení mé diplomové práce.

ABSTRAKT

Jméno a příjmení autora: Bc. Jiří Bittner

Název: Mobilní zařízení pro kalibraci plynových čidel pro velmi nízké koncentrace

Škola: České vysoké učení technické v Praze

Fakulta: Fakulta dopravní

Datum: 30. 11. 2016

Klíčová slova: kalibrace, míchání plynů, výpočty pro míchání plynů, chyby při míchání plynů, hmotnostní průtokoměry

Diplomová práce se zabývá mobilním zařízením pro kalibraci plynových čidel. Stručně popisuje metody kalibrace a míchání plynů na koncentrace ppm – ppb. Byl vytvořen návrh přístroje doplněný o vizualizaci návrhu zařízení, základní výkresová dokumentace pro výrobu zařízení, dále pak výpočty použité pro řízení kalibrace a použití těchto vzorců. V části měření se nachází odhad nejistot při měření, které předpokládám a odhad předpokládaného průběhu měření s tímto zařízením při měření závislosti napětí na čase u plynových čidel při určité koncentraci.

ABSTRACT

Name of Author: Bc. Jiří Bittner

Title: Mobile Gas Sensor Calibration Device for Low Concentration

University: Czech Technical University in Prague

Faculty: Faculty of Transportation Sciences

Date: 30. 11. 2016

Key words: calibration, gas mixing, gas mixing calculations, gas mixing errors, mass flow controllers

This thesis deals with the mobile calibration device for low concentration gas sensors. The mobile calibration device was visualized by digital 3D modeling methods and 2D completely designed. Calibration methods and gas mixing methods for ppm-ppb are briefly described. This thesis also includes calculations for gas mixing and calibration itself with its usage. An approximate measurement uncertainties are described in the "kalibrace čidel" part of thesis. I estimate this uncertainties of anticipated measurement with the device, which measures the current versus time for gas sensors at a certain concentration.

1	<b><u>OBSAH</u></b>	
2	Úvod .....	9
3	Kalibrace senzorů plynů - řešerše stávajících metod .....	9
3.1	Stanovení „nuly“ .....	9
3.1.1	Kalibrační metody .....	10
3.2	Kalibrace pracovního rozsahu senzoru .....	11
3.2.1	Předmíchaný kalibrační plyn. ....	11
3.2.2	Propouštěcí zařízení. ....	12
3.2.3	Křížová kalibrace .....	13
3.2.4	Mísení plynů .....	14
3.3	Metody pro vytvoření směsi kalibračních plynů a jejich srovnání.....	15
3.3.1	Plynové lahve .....	15
3.3.2	Propustné trubice.....	15
3.3.3	Vstříkovací metody.....	16
3.3.4	Difúzní metody .....	16
3.3.5	Metody odpařování.....	16
3.3.6	Srovnání přesnosti kalibračního plynu vzniklého pomocí uvedených metod .....	16
4	Vývoj zařízení - úvaha a postup řešení .....	17
4.1	Výsledné teoretické řešení a uspořádání .....	18
5	Výpočty - teorie .....	20
6	Uspořádání zařízení .....	22
7	Základní úvaha - stanovení základních komponent zařízení .....	24
7.1	Plyn NO <sub>2</sub> :.....	25
7.2	Plyn SO <sub>2</sub> : .....	26
7.3	Plyn CO: .....	26
8	Odvození vzorců a výpočet pro regulaci.....	29
8.1	Zadávané vstupní hodnoty: .....	29
8.2	Neznámé (požadované) hodnoty pro regulaci jsou průtoky průtokoměrů:.....	30
8.2.1	Tlaková láhev.....	30
8.2.2	směšovací stupeň .....	30
9	Regulace průtoku .....	31
10	Grafy způsobu řízení zařízení.....	33
11	Korekce nastavení průtokoměru plynu .....	36
12	Výpočet tlakového spádu směšovače .....	38
13	Popis konstrukce a komponent prototypu.....	41
13.1	Tlakové láhve a redukční ventily.....	41



13.2	Mísící díl .....	42
13.3	Manipulační vozík .....	48
13.4	Stolek .....	52
13.5	Celkové uspořádání vozíku .....	53
14	Kalibrace čidel .....	54
14.1.1	Chyba koncentrace v láhvi .....	54
14.1.2	Chyba průtokoměrů .....	54
14.1.3	Kalibrační křivky .....	59
15	Předpoklady využití zařízení .....	62
16	Závěr .....	63
17	Seznam použité literatury .....	65
18	Seznam obrázků .....	67
19	Seznam tabulek .....	68
20	Seznam grafů .....	68
21	Seznam příloh .....	69

## 2 ÚVOD

Úkolem této diplomové práce je navrhnout mobilní, tedy menší, zařízení, kterým by bylo možné provádět kalibrace a zkoušení senzorů (čidel) znečišťujících plynů v ovzduší. Podmínkou je mobilita tohoto zařízení, aby jej bylo možné snadno bez větších problémů převézt a použít v praxi na místě, kde je potřeba měřit, kontrolovat nebo kalibrovat senzory, např. u zákazníka. V praxi existuje již řada metod a také zařízení pro tyto kalibrace. Úkolem této mé práce je navrhnout mobilní zařízení pro kalibraci pro extra malé koncentrace těchto znečišťujících plynů ve vzduchu, řádově desítky až jednotky ppb. Při řešení zařízení jsem vycházel z mého návrhu tohoto podobného zařízení z minulé diplomové práce, přičemž jsem použil zejména stejný, dle mého názoru nejlepší, osvědčený princip způsobu míchání kalibrační směsi.

Aby byla zajištěna přesnost a spolehlivost systémů, které mají detekovat přítomnost různých plynů v prostředí, je nutné provádět pravidelné kalibrace senzorů (čidel) těchto plynů. Tyto senzory (čidla) by měly být umístěny na místech, kde lze také i pohodlně a rychle provádět jejich zkoušení a kalibraci. Je proto důležité, aby projektant či konstruktér při návrhu umístění senzorů pamatoval nejen na to, že je nutné senzory umístit v místech, kde je požadováno měření či detekce výskytu plynů, ale i na to, že je třeba tyto detekční senzory pravidelně kontrolovat a kalibrovat. Z hlediska projektování, je tedy vhodné zajistit přístup k těmto senzorům, tj. jejich správným umístěním zajistit i možnost jejich snadné kontroly a kalibrace. Samotná kalibrace se zpravidla provádí ve dvou krocích. Prvním krokem bývá stanovení „nuly“ a druhým krokem je pak kalibrace samotného rozsahu senzoru.

## 3 KALIBRACE SENZORŮ PLYNŮ - REŠERŠE STÁVAJÍCÍCH METOD

Po instalaci nových senzorů plynů se provádí kontrola těchto senzorů pro jistotu několikrát během prvních 30 dnů po spuštění. Během těchto dní se totiž mohou projevit různé problémy spojené s jejich instalací, s jejich adaptací v novém prostředí atd. V této tzv. zkušební době se senzor kontroluje zpravidla jednou týdně. Pokud v této době tento senzor funguje správně, pak se dále kontroluje zpravidla již jednou měsíčně. Samotná kalibrace se provádí ve dvou krocích. Prvním krokem je stanovení „nuly“ a druhý krok je pak kalibrace rozsahu senzoru. [2]

### 3.1 STANOVENÍ „NULY“

Neexistují žádné standardy ani normy, které by určovaly plyn pro stanovení nuly. Mnoho analytických postupů a metod, včetně některých specifických analytických postupů, používají čistý dusík nebo čistý syntetický vzduch pro toto stanovení nuly. Tyto plyny se používají především pro jejich snadnou dostupnost. Bohužel použití těchto plynů není ve všech případech vždycky

nejvhodnější. Normální vzduch obsahuje ještě kromě dusíku a kyslíku další různé plyny a také i malé procento vodních par. Proto je mnohem vhodnější, praktičtější a přesnější vynulovat senzor použitím normálního okolního vzduchu, který považujeme za čistý (kde se nevyskytuje znečišťující plyn). To přináší reálnější nulový bod, který odpovídá okolnímu vzduchu a reálnému prostředí. Tento referenční bod může být ale těžké stanovit při umístění senzoru v prostředí, kde tento čistý vzduch není k dispozici. Musíme pak hledat místo, kde se tento vzduch dá považovat za čistý. Takovým dobrým referenčním bodem pak může být místo uvnitř budovy, například v kanceláři apod. To nám věrněji stanoví nulový bod než například použití syntetického vzduchu, protože to pak reprezentuje místní podmínky okolního prostředí (vzduchu). V čistém syntetickém vzduchu, popř. v dusíku, způsobuje nedostatek vodních par to, že nastavený nulový bod je o něco nižší než při použití okolního vzduchu, nula se jeví tedy jako posunutá. [2]

### 3.1.1 KALIBRAČNÍ METODY

Bereme-li v úvahu všechny potřebné faktory, jakými jsou především druh senzoru a podmínky aplikace, existují dvě metody.

1) V aplikacích, kde je okolní vzduch normálně čistý, je na operátorově úvaze, zda se v okolí nevyskytují nějaké abnormální jevy a přístroj ukazuje hodnoty blízko nule, zda lze tento bod považovat za nulový. Potom je možné postup pro vynulování senzoru bez problému přeskočit. Jestliže jsou ale pochyby, používá se plastový vak, do něj se získá vzorek vzduchu, který předpokládáme, že je čistý a ofukuje se jím senzor po dobu několika minut. Je to velmi rychlá a jednoduchá metoda a také velmi efektivní způsob, jak lze odlišit skutečný od falešného alarmu. [2]

2) Druhou metodou je použití stlačeného syntetického vzduchu. Metoda je vhodná pro použití zejména v prostorech, kde není k dispozici čistý normální vzduch a není dostupné jej v okolí získat. Syntetický vzduch je dodáván v tlakových lahvích, což má výhodu, že se snadno reguluje a je možné jej mít vždy s sebou. Nevýhodou ale je to, že většina tohoto syntetického vzduchu obsahuje malé procento uhlovodíků, CO, CO<sub>2</sub> a další interferenční plyny. Také má velmi nízkou vlhkost. Řešením v tomto případě je pak následné použití filtru a filtrování tohoto vzduchu přes aktivní dřevěné uhlí, které odstraní většinu nežádoucích plynů. Vodní pára se pak může přidat dodatečně použitím zvlhčovače. Po této úpravě se pak tento vzduch používá pro kalibraci většiny senzorů. Dřevěným uhlím se ale neodstraní CO. Při použití syntetického vzduchu je proto nezbytné, aby koncentrace CO v tomto vzduchu byla stejná jako v okolním vzduchu. Dále je vhodné použít filtr s kalcinovanou sodou, aby se odstranil oxid uhličitý. To je také velmi dobrý způsob, jak nulovat senzory na detekci CO<sub>2</sub>. [2]

Jak je uvedeno výše, ačkoliv je syntetický vzduch čistý, neobsahuje zpravidla téměř žádné vodní páry. Nemůže se proto používat pro senzory vyžadující vodní páry v systému. Řešením tohoto problému je zpravidla například přidání vlhkého hedvábného papíru do hlavní linie. Toto použití potom působí jako zvlhčovač v proudu vzduchu, kterým se ofukuje senzor a poskytuje tím dostatek vodní páry pro tento senzor. [2]

## 3.2 KALIBRACE PRACOVNÍHO ROZSAHU SENZORU

Kalibrace v rozsahu (pracovní oblasti senzoru) může být docela jednoduchá ale i také velmi komplikovaná a drahá. Záleží to především na druhu plynu a rozsahu koncentrací. Nejvyšší přesnosti se dosáhne při použití směsi cílového plynu a přírodního vzduchu. Takovéto použití směsi je tím nejlepším kalibračním plynem. Avšak ačkoliv lze toto zajistit, obvykle je zde třeba ještě zajistit zkušenější a kvalifikovanější pracovníky než je v praxi obvykle běžné a tak aby se co možná vyloučily možné nepřesnosti, tak se proto většina kalibračních plynů kupuje již hotova od dodavatelů (výrobců) plynů a plyných směsí. Dodavatelé ale samozřejmě nenamíchají úplně všechny konkrétní koncentrace, zejména je-li třeba extrémně malé koncentrace, řeší se to pak pomocí kalibračního zařízení. Tento případ, tj. návrh takového zařízení je právě předmětem této mé diplomové práce. [2]

*Popiši nyní stručně alespoň několik metod, jak se v praxi provádí této kalibrace.*

### 3.2.1 PŘEDMÍCHANÝ KALIBRAČNÍ PLYN.

Tato metoda je nejvíce preferovaná a také nejvíce populární. Předmíchaný plyn je stlačen a uchován pod tlakem v láhvi. Láhve jsou dostupné v několika velikostech, ale pro jejich mobilitu se většinou používají menší a lehčí tlakové láhve. Dělí se do dvou kategorií: nízkotlaké a vysokotlaké. Nízkotlaké láhve mají tenčí stěnu láhve, jsou lehčí a jsou většinou určeny pouze na jedno použití. Vysokotlaké láhve jsou pro opakované použití a jsou určeny také i pro nebezpečné plyny. [2]

Aby bylo možné dostat plyn z láhve a pomocí něho kalibrovat, musí být láhev vybavena redukční sestavou. Tato sestava se skládá z regulátoru tlaku, manometru a omezovače průtoku (škrťacího ventilu). Tento omezovač průtoku je spojen s otvorem velmi malého průměru tak, že umožňuje konstantní průtok při daném rozdílu tlaků. V provozu je tak vysoký tlak z láhve redukován na nižší tlak (jen několik desetin až jednotek bar) a umožňuje konstantní průtok otvorem. Rozmezí průtoků se většinou případů pohybuje kolem 600-1000 cm<sup>3</sup>/min. K zařízení může být ještě namontován nastavitelný regulátor tlaku pro možnost regulace dle potřeby. [2]

Mnoho plynů může být smícháno se vzduchem a skladováno pod tlakem, ale některé plyny se mohou míchat pouze s inertním plynem, např. dusíkem. Některé plyny zase potřebují klimatizaci.

Také každá směs kalibračního plynu má jinou expirační dobu. Volba způsobu kalibrace a použití plynů v praxi tedy záleží na každém konkrétním případě.[2]

Podrobnější informace o skladování a životnosti plynu poskytuje většinou jejich výrobce. Obecně plyny s nízkou reaktivitou jako je metan, CO, CO<sub>2</sub> mohou být smíchány se vzduchem a skladovány ve vysokotlakých lahvích. Naopak například tekutá uhlovodíková rozpouštědla mohou být skladována jen pod nízkým tlakem. Většina vysoce reaktivních chemikálií je smíchána s dusíkem. U určitých senzorů hodně záleží na tom, s čím je plyn smíchán, protože i to ovlivňuje činnost senzoru. Při kalibraci mohou některé senzory pro dosažení potřebného výsledku potřebovat ke své činnosti i vodní páry. Tuto vlhkost lze dodat podle postupu, který je popsán výše v kroku 1 pro nulování senzoru. [2]

Pro odhad objemu plynu v tlakové láhvi poslouží následující vzorec pro objem směsi při atmosférickém tlaku:

$$V_{mix} = V * (P/P_a) \quad (3.1)$$

kde  $V_{mix}$  je objem směsi,  $V$  je objem nádoby s plynem,  $P$  je tlak v nádobě s plynem a  $P_a$  je atmosférický tlak. Výpočtem stanovíme objem plynu při atmosférickém tlaku. Při potřebném známém průtoku plynu a době kalibrace (zpravidla řádově kolem 1 min.) se může tak například stanovit, na kolik měření bude nádoba s plynem stačit. [2]

### 3.2.2 PROPOUŠTĚCÍ ZAŘÍZENÍ.

Propouštěcím zařízením je uzavřená nádoba s obsahem chemikálie v tekutém a plynném stavu v rovnováze. Molekuly plynu prostupují buď skrz stěny nádoby, nebo koncovým uzávěrem. Rychlost prostupu je dána permeabilitou materiálu stěny a teplotou. Rychlost prostupu je stejná po dlouhou dobu. Konstantní tok kalibračního plynu je tak tvořen, při známé hodnotě prostupu a dané teploty, konstantním průtokem směsi vzduchu s prostupující chemikálií. Je tedy zapotřebí používat kalibrátor s konstantní teplotou a regulací průtoku. Prostupující trubička plynule emituje molekuly chemikálie stále konstantní rychlostí, což způsobuje problémy se skladováním a s bezpečností. To je jedna z nevýhod této metody. Také rychlost prostupu pro daný plyn může být příliš vysoká nebo zase příliš nízká pro danou aplikaci. Např. páry plynu při vysokém tlaku prostupují moc rychle, přičemž zase páry za nízkého tlaku prostupují při svém použití moc pomalu. Propouštěcí zařízení našly svoje uplatnění v laboratořích a v aplikacích používajících analytické analyzátory. Pro aplikace monitorování plynů je použití omezené, protože koncentrace potřebné ke kalibraci senzorů jsou typicky moc vysoké pro propouštěcí zařízení. Proto mají tato zařízení pro kalibrace jen omezené využití. [2] [1]

### 3.2.3 KŘÍŽOVÁ KALIBRACE

Při křížové kalibraci se využívá skutečnosti, že každý senzor reaguje i na jiné plyny než pro který je vyroben. Například pro snímač kalibrovaný na 100%-ní hexan je obvykle mnohem snazší použít pro kalibraci 50%-ního metanu místo využití přímo směsi hexanu. Je to proto, že hexan je při pokojové teplotě kapalina a má nízký tlak výparů. Proto je hodně obtížné vyrobit přesnou směs a udržet ji pod vysokým tlakem. Na druhou stranu metan má velmi vysoký tlak výparů a je velmi stabilní. Může být bez problémů smíchán se vzduchem a přitom být stále udržen pod vysokým tlakem. Tím se může použít pro více kalibrací než směs hexanu o stejném objemu. Má také dlouhou životnost a tak například směs 50%-ního metanu se tak může okamžitě použít pro kalibraci. Z tohoto důvodu se v běžné praxi doporučuje metan jako kalibrační plyn pro čidla i ostatních plynů. [2]

*Používají se dva způsoby této křížové kalibrace.*

První metodou je kalibrace senzoru metanem a hodnoty pro ostatní plyny se vypočítají násobením hodnot metanu s hodnotami uvedenými v návodu pro daný plyn. To se běžně používá u katalytických senzorů. Tyto katalytické senzory vykazují lineární závislost a proto použití této metody přepočtu je možné v celém rozsahu. Například pentan má na výstupu jen poloviční hodnoty než metan, byl-li tento senzor kalibrován na metan při stejné koncentraci. Proto je koeficient 0,5. Jestli se použije tedy senzor kalibrovaný metanem a je pak používán na měření pentanu je tedy potřebné výslednou hodnotu vynásobit 0,5 k získání správné hodnoty pentanu. [2]

Druhou metodou je použití metanu jako kalibračního plynu, ale v polovičním množství. Například je třeba použít 50%-ní metan pro stejnou kalibraci, jako by byl použit 100%-ní pentan. Při kalibraci senzor přímo indikuje koncentraci pentanu i přes to, že jsme použili jako kalibračního plynu metan. Použitím této tzv. křížové kalibrace může být kalibrováno mnoho malorozsahových toxických plynových senzorů, rovněž také pomocí infračervených měřidel jakýkoliv plyn o stejné absorpční vlnové délce. Hlavní výhodou křížové kalibrace je, že umožňuje, aby senzory byly kalibrovány takovým plynem a v takovém rozsahu, který je jednodušší získat a bezproblémově s ním i manipulovat. Navzdory tomu jsou u křížové kalibrace problémy. Jedním z nich je, že hodnota odpovědi každého senzoru může být jiná, protože je všeobecně nemožné vyrobit dva úplně stejné senzory. Např. u katalytických senzorů musí být napětí ohřevu specifikováno v manuálu. Jinak by nebyla správná hodnota odpovědi senzoru. Odpovědní charakteristika tedy kolísá s různým nastavením topného napětí. Doporučuje se proto pravidelně ještě kontrolovat kalibraci tohoto druhu senzorů přímo cílovým kalibračním plynem. [2] [1]

### 3.2.4 MÍSENÍ PLYNŮ

Pro kalibraci nejsou vždy dostupné všechny potřebné kalibrační plyny. I když bude daný plyn dostupný, je velmi pravděpodobné, že nebude ve správné potřebné koncentraci nebo ve směsi se správným nosným plynem. Je dostupných mnoho kalibračních směsí, které se mohou použít např. zředěné v kalibračních systémech na nižší koncentrace.

Ukážeme na příkladu, jak se v praxi provádí stanovení potřebného objemu plynů. Například tedy 50%-ní metan má mít koncentraci 20% a má být zředěn na výsledný objem 2000 cm<sup>3</sup>. [2]

Pro mísení plynů se použijí následující vztahy:

$$V_b = \frac{C}{C_b} \cdot V, V_a = \frac{C - C_b}{C} \cdot V \quad (3.2)$$

$$V_a = V - V_b \quad (3.3)$$

$C_b$  = koncentrace v láhvi, v našem případě 50%

$V_b$  = objem směsi

$C$  = nová výsledná koncentrace, v našem případě 20%

$V_a$  = objem vzduchu (nosného plynu) nebo jiného

$V$  = celkový výsledný objem, v našem případě 2000 cm<sup>3</sup>

„ředidla“

$$V_b = \frac{20}{50} \cdot 2000 = 800 \text{ cm}^3 \quad (3.4)$$

$$V_a = 2000 - 800 = 1200 \text{ cm}^3 \quad (3.5)$$

Konečná směs by byla tedy namíchána z 800cm<sup>3</sup> kalibračního plynu smísením s 1200cm<sup>3</sup> nosného plynu (vzduchu).

Jiný příklad by bylo třeba naředění 2,5% (25000 ppm) metanu na 100 ppm směsi.

$$V_b = \frac{100}{25000} \cdot 2000 = 8 \text{ cm}^3 \quad (3.6)$$

$$V_a = 2000 - 8 = 1992 \text{ cm}^3 \quad (3.7)$$

Smícháním 8 cm<sup>3</sup> kalibračního metanu s 1992 cm<sup>3</sup> vzduchu vznikne 2000 cm<sup>3</sup> kalibrační směsi o koncentraci 100 ppm.

Pro mísení plynů se v praxi používají některé kalibrační nástroje. Pro uskutečnění předchozího příkladu jsou potřebné tyto nástroje:

#### 3.2.4.1 INJEKČNÍ STŘÍKAČKY A JEHLY.

Je to nejlevnější cesta pro měření množství plynu. Jednorázové injekční stříkačky s velkým průměrem jehly jsou sice nejvíce praktické, ale je jen málo stříkaček, které mají větší objem než 100 cm<sup>3</sup>. Z toho důvodu měření velkých objemů může být problémové. Tento postup mísení poskytuje jednoduché a pro některé případy vhodné řešení, jak udělat směs. Sporná může být jen přesnost naměřeného objemu plynu. [2] [1]

#### 3.2.4.2 KALIBRAČNÍ PYTLÍK.

Nejlevnějším a používaným řešením je použití potravinářských sáčků, protože je mnoho materiálů používaných v potravinářství, které jsou poměrně inertní, neboť jídlo nesmí být kontaminováno zápachem. Proto potravinové sáčky mohou být používány ke skladování většiny chemikálií, pokud jsou použity na krátkou dobu. Je důležité s tímto počítat, neboť molekuly plynu začnou postupně difundovat skrz mnoho tenkých vrstev plastového sáčku. Za tímto účelem se vyrábějí i speciální pytlíky s ventilem a s otvorem na injekční stříkačku. [2] [1]

### 3.3 METODY PRO VYTVOŘENÍ SMĚSI KALIBRAČNÍCH PLYNŮ A JEJICH SROVNÁNÍ

Kalibrační plyny pro testování chemických senzorů mohou být generovány různými způsoby. Zde uvedeme pět hlavních dynamických metod:

#### 3.3.1 PLYNOVÉ LAHVE

Průtokoměry jsou připojené k plynovým lahvím k určení průtoku plynů, které jsou pak smíchány. Plynové lahve jsou nejpoužívanější způsob, jak vytvořit směsi plynů.

**Výhody:** Plyny mohou být vyrobeny v širokém rozmezí koncentrací (od 50% do 0,01%, spojeny s velkoobjemovými průtokoměry a tím i bez použití vícestupňového ředění plynů).

**Nevýhody:** Velikost a cena lahví může být příliš vysoká. Musejí se brát v úvahu bezpečnostní otázky týkající se ukládání velkých objemů plynu (při vysokém tlaku). [1]

#### 3.3.2 PROPUSTNÉ TRUBICE

Zkapalněná forma plynu protéká vnitřkem propustné trubice, prostupuje stěnami trubice. Rychlost prostupu se řídí teplotou.



**Výhody:** Umí vyrobit velmi nízké koncentrace směsi – od ppm do ppb. Propustné trubky jsou malé, přenosné a snadno skladovatelné. Malé množství plynu zvyšuje bezpečnost při nakládání s nebezpečnými plyny (koroze, nebezpečí výbuchu, atd.)

**Nevýhody:** Moc se nehodí pro vysoké koncentrace, sporná je i přesnost.

### 3.3.3 VSTŘIKOVACÍ METODY

Plyn se pomalu vpouští do proudění za použití injekční stříkačky, čerpadla nebo podobného zařízení.

**Výhody:** Koncentrace od několika procent až k ppm.

**Nevýhody:** Je-li vstříknuta kapalina, je třeba, aby se odpařila. Systémy s motorovým pohonem kontroly vstřikování bývají drahé. [1]

### 3.3.4 DIFÚZNÍ METODY

Plyn se odpařuje ze zásobníku kapaliny a šíří se podél trubice rychlostí, která je závislá na teplotě, tlaku a geometrii trubky a pak přejde do průtoku nosného plynu v horní části trubky a produkuje tak požadovanou směs.

**Výhody:** Jednoduchý způsob k výrobě koncentrace od ppm do ppb. Hodí se pro mnoho kapalin s dostatečně vysokým tlakem par.

**Nevýhody:** Vysoce ovlivněno výkyvem teplot. Změna 1 °C může způsobit 5-10% změnu v difúzní rychlosti. Teoretické a experimentální odhady difúzního koeficientu se mohou značně lišit a proto může být nutné, aby byl celý systém ještě nezávisle zkalibrován. [1]

### 3.3.5 METODY ODPAŘOVÁNÍ

Nosný plyn je vpouštěn spolu s tekutou formou kalibračního plynu, což způsobuje odpařování kapaliny a připojení se k proudu nosného plynu, který kapalinou prošel.

**Výhody:** Velmi vhodné pro přidávání jediné (těkavé) kapaliny do proudu plynu.

**Nevýhody:** Složení výsledné směsi musí být stanoveno s použitím některých nezávislých analytických technik.

### 3.3.6 SROVNÁNÍ PŘESNOSTI KALIBRAČNÍHO PLYNU VZNIKLÉHO POMOCÍ UVEDENÝCH METOD

Autoři Li, Täffner, Bischoff a Niemeyer (International Journal of Chemical Engineering 2012), uvedli následující srovnání přesností na čtyři z těchto metod.

### 3.3.6.1 PŘESNOST METODY:

- Vstřikování 5-9%
- Přesnost silně závisí na přesnosti vstřikovacích zařízení.
  - Při mnohokomponentním testovacím plynu není přesnost taková jako při jednosložkovém zkušebním plynu. [1] [14]
- Propustné trubice 2-5%
- Hlavním zdrojem nejistoty je propustnost, která je ovlivněna termodynamickým a fyzikálním stavem proměnných, jako je teplota, tlak a průtok plynu. [1] [14]
  - Propustné metody mohou být použity ke generování velmi nízké koncentrace (na úrovni ppb), samotná nejistota kalibrace má také silný vliv na celkovou přesnost. [1] [14]
- Difúze 3-5%
- Nejdůležitější nejistotou je difúzní rychlost. Změna závisí na samotné sloučenině, konstrukci difúzního zařízení a na termodynamických stavových veličinách.
  - Analogicky k propustné metodě, kalibrace sama přispívá k celkové nejistotě. [1] [14]
- Odpařování 5-15%
- Výsledky mají značnou odchylku ředicího systému a velký vliv změny teploty.
  - Tlak par sloučeniny je také jeden značný faktor. Chyba může být minimalizována pro sloučeniny s nízkým tlakem par. [1] [14]

## 4 VÝVOJ ZAŘÍZENÍ - ÚVAHA A POSTUP ŘEŠENÍ

Přesné ředění plynů na extrémně malé koncentrací za účelem kalibrace senzorů plynu je poměrně obtížnou záležitostí. Při tomto ředění plynů je velkým problémem nejen přesnost ale i problém dosažení těchto extrémně malých koncentrací. Při úvahách o vývoji zařízení pro kalibraci plynových čidel jsem prošel několika stadii řešení, které jsem popsal již v minulé diplomové práci.

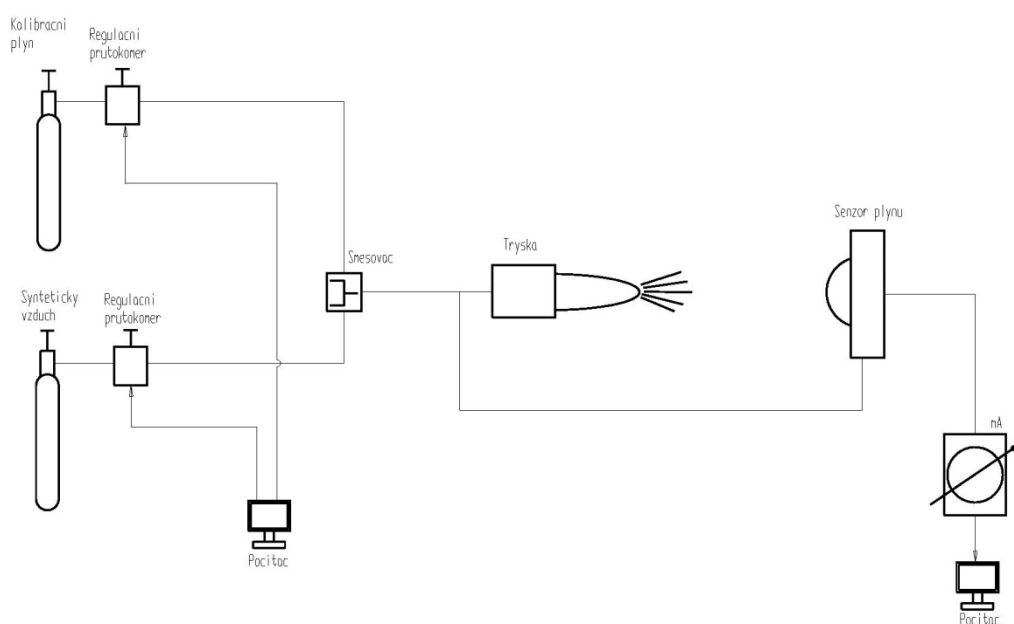
Nejlepším a nejschůdnějším řešením se mi jeví metoda přesného průběžného míchání (ředění) plynů se syntetickým vzduchem pomocí přesných hmotnostních průtokoměrů. Tuto metodu jsem použil nakonec rovněž ve své minulé diplomové práci, kde jsem navrhoval zařízení pro kalibraci plynových čidel pro malé koncentrace. Toto minulé zařízení bylo navrženo pro čtyři kalibrační plyny a bylo velké, nemobilní a poměrně složité jak po mechanické stránce, tak i po softwarové. V řešení pro

tuto diplomovou práci vycházím z osvědčených principů řešení tohoto zařízení z mé minulé práce, přičemž jsem jej navrhl zcela odlišně, především jednoduché, lehké a mobilní. To považuji za podstatné. Dále jsem dle minulých zkušeností vylepšil i vnitřní uspořádání zařízení, zejména materiál a průměry trubiček vedení kalibrační směsi plynů a také jsem použil směšovač o malém objemu, což se mi za dobu vývoje a po všech konzultacích rovněž jeví jako velice důležité a podstatné. Proti minulému zařízení jsem zvolil i jiné hmotnostní průtokoměry, abych se s potřebnými koncentracemi směsi plynu pro kalibraci mohl dostat až k řádu jednotek ppb. V zařízení jsem použil pouze jeden plyn, což jednak pro mobilní zařízení postačuje a dále kdybych použil více tlakových lahví s plyny, bylo by zařízení těžké, velké a tedy nemobilní.

#### 4.1 VÝSLEDNÉ TEORETICKÉ ŘEŠENÍ A USPOŘÁDÁNÍ

Měřený kalibrovaný senzor je volně ofukován přesně namíchanou směsí kalibrovaného plynu s čistým (syntetickým) vzduchem. Ofukování samozřejmě musí trvat určitou minimální dobu, aby se ustálily hodnoty a aby se tedy zajistila potřebná přesnost. Dle zkušeností jednoho z výrobců čidel bylo v praxi odzkoušeno, že pro ředění plynů se musí jednat o čistý syntetický vzduch z tlakové lahve, protože i normální vzduch není čistý a prostý od molekul patřičného kalibračního plynu (zejména  $\text{NO}_2$ ). Konkrétně jsem celkově jako řešení zvolil jednoduchý mobilní mechanický stojan se dvěma kolečky a nohou, podobný rudlíku, na kterém je umístěno veškeré potřebné zařízení k mísení plynu se vzduchem včetně dvou tlakových lahví s redukčními ventily. Nahoře je opatřeno stolečkem na umístění řídicího notebooku. Stolek zároveň slouží i z bezpečnostního hlediska jako kryt redukčních ventilů před poškozením např. při převozu nebo při nechtěném pádu zařízení. Umístění kalibrovaného senzoru či více senzorů ponechám na obsluze či zákazníkovi, zda budou čidla vymontována při měření a umístěna a ofukována směsí plynu se vzduchem na stolku vedle řídicího notebooku, nebo pomocí např. teflonové hadičky ofukována a měřena přímo v zařízení. Ofukování plynem jsem vyřešil tak, že se k tlakovým lahvím se syntetickým vzduchem a kalibračním plynem připojí přes regulační ventily, spojovací prvky a nerezové trubičky hmotnostní průtokoměry s elektrickým ovládním přes PC (notebook). Směšovač jsem provedl pouze jako T-kus spolu se dvěma redukcemi z velkého průměru na malý a naopak (aby se ve směšovači vytvořilo turbulentní proudění). Je řešen rovněž jako celonerezový. Průtokoměry jsem se přitom snažil umístit co nejbližší tomuto směšovači, aby byl zajištěn co nejmenší objem (v tomto případě cca  $4 \text{ cm}^3$ ). V tomto směšovači se plyn směšuje se syntetickým vzduchem a odtud se pak teflonovou trubičkou přivádí ke kalibrovanému čidlu, přičemž se trubička, popř. tryska nastaví tak, aby co nejlépe ofukovala kalibrované čidlo plynu. Zařízení jsem navrhl tak, aby byly zajištěny co nejmenší průměry nerezových trubiček i směšovače. Aby tak byl objem uvnitř zařízení co nejmenší a byla zajištěna co největší rychlost proudění směsi. Tím by mělo být zajištěno, že by se směs uvnitř zařízení neměla zastavit,

popřípadě aby v trubičkách vedení nevznikalo turbulentní proudění a tím i nežádoucí zachytávání molekul plynu na stěnách trubiček. Zvolení průměrů trubiček jsem pak ještě ověřil výpočtem, aby nebyl průměr trubiček, respektive vnitřní průměry ve směšovači příliš malé, aby nemohlo při největším průtoku směsi dojít k nežádoucímu natlakování zařízení. Směšování a stanovení potřebné koncentrace by se pak mělo řešit softwarově jako ovládací program pro PC, kde se zadá vstupní koncentrace kalibračního plynu (uvedeno na tlakové láhvi) a potřebná výstupní koncentrace pro kalibrování. Počítač (ovládací program) sám by pak patřičně otevřel elektrické hmotnostní průtokoměry, a předřazené elektro-ventily, které automaticky dostatečně přesně namíchají potřebnou směs. V zařízení jsem pamatoval i na potřebný průplach vzduchem (vyčištění) po měření. Proto bylo nutné do zařízení dát mezi hmotnostní průtokoměry a redukční ventily ještě elektro-ventily, pomocí kterých se zajistí, aby bylo možné zařízení profouknout (vypláchnout) vzduchem. Tyto ventily slouží pouze k tomuto účelu a při samotné kalibraci se nejprve otevřou a poté se teprve začínají otevírat průtokoměry, a tedy celý proces se řídí hmotnostními průtokoměry. V žádném případě nebude řízení navrženo a uděláno tak, že by se nastavily průtokoměry a poté teprve sepnuly elektro-ventily. Tam by mohly pak vzniknout všelijaké rázy či přechodové jevy a to by nebylo žádoucí. Elektrické zapojení ani řídicí program není předmětem této diplomové práce. V práci jsem provedl pouze výpočty a vzorce pro řízení, které programátor naprogramuje do řídicího programu PC (notebooku) a pomocí nichž bude prováděno ovládání hmotnostních průtokoměrů k zajištění přesné koncentrace kalibrační směsi. Zjednodušené schéma pro takové základní uspořádání (bez elektro-ventilů) je na obr. 2.



OBRÁZEK 1 – SCHÉMA ZÁKLADNÍHO USPOŘÁDÁNÍ [AUTOR]

## 5 VÝPOČTY - TEORIE

Před provedením všech výpočtů pro mé konkrétní řešení bude asi dobré zde nejprve uvést několik základních fyzikálních vzorců, z kterých jsem při svých úvahách vycházel. Jelikož v tomto případě budou použity plyny s velmi malými koncentracemi, je s nimi možno počítat jako s ideálním plynem. Základním vzorcem, od kterého se odvíjí vždy většina výpočtů ideálního plynu, je

### 5.1.1.1 STAVOVÁ ROVNICE IDEÁLNÍHO PLYNU

Tvoří-li jednoduchou homogenní soustavu ideální plyn, má stavová rovnice ideálního plynu tvar

$$pV = nRT, \text{ respektive } pV = RT, \quad (5.1)$$

kde  $p$  je tlak plynu,  $V$  jeho objem,  $T$  termodynamická teplota plynu,  $n$  je látkové množství plynu,  $R$  je plynová konstanta (molární plynová konstanta). [13] [15] [5]

### 5.1.1.2 RŮZNÁ VYJÁDŘENÍ STAVOVÉ ROVNICE PRO IDEÁLNÍ PLYN:

- pro 1 mol:  $pV_m = RT$ , kde  $V_m$  je molární objem plynu,
- pro látkové množství  $n$ :  $pV = nRT$ , kde  $n = m/M_m$ ,  $m$  je hmotnost ideálního plynu a  $M_m$  je jeho molární hmotnost,
- pro hmotnost  $m$ :  $pV = (m/M_m).RT$ , kde  $M_m$  je molární hmotnost plynu. Tato rovnice platí s dostatečnou přesností také pro reálné plyny za nízkého tlaku, tj. při malé hustotě plynu a to je i tento případ. Není-li tato podmínka splněna, neřídí se již stavy reálných plynů uvedenou stavovou rovnicí, což se týká zvláště stavů v okolí kritického stavu a stavů blízkých zkapalnění. [13] [15] [5]

### 5.1.1.3 STAVOVÁ ROVNICE REÁLNÉHO PLYNU

Pro úplnost stručně uvedu i případ, kdy je nutno počítat se stavovou rovnicí reálného plynu. Tato stavová rovnice reálného plynu je stavovou rovnicí, která platí i pro vysoké tlaky plynu. Bere v úvahu vlastní objem molekul plynu a kohezní tlak reálného plynu. Existuje velký počet semiempirických stavových rovnic reálného plynu. Některé z nich mají jednoduchý analytický tvar a jsou přesné pro malé rozsahy teplot a hustot plynů, další je možno použít pro společný popis plynné i kapalně fáze. Stavové rovnice se dvěma konstantami mají jednoduchý analytický tvar a jsou používány pro husté plyny a kapaliny. Konstanty v rovnicích jsou charakteristické pro daný plyn. Z uvedeného tvaru následujících stavových rovnic je zřejmé, že jsou uvedeny pro látkové množství 1 mol. V případě obecného látkového množství  $n$  je třeba vztahy upravit. Nejznámější z nich je Van der Waalsova stavová rovnice. [13] [15] [6]

## 5.1.1.4 VAN DER WAALSOVA ROVNICE PRO 1 MOL REÁLNÉHO PLYNU MÁ TVAR:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad (5.2)$$

kde  $a$  a  $b$  jsou empirické konstanty závislé na druhu plynu a  $V_m$  je molární objem. Konstanta  $a$  koriguje idealizaci, že molekuly ideálního plynu na sebe vzájemně nepůsobí silami, konstanta  $b$  pak zohledňuje i vlastní objem molekul, který při vysokých tlacích již nelze zanedbat vůči objemu celého plynu. [13] [15] [6] [4]

Dalším potřebným vztahem je vzorec pro výpočet látkové koncentrace:

$$C = n/V \quad (5.3)$$

kde  $n$  je látkové množství a  $V$  je celkový objem směsi.[7]

**ppm** (zkratka z angličtiny „parts per million“)

Tato jednotka se používá k vyjadřování velmi nízkých koncentrací. Stejně jako 1% je setina celku, 1ppm vyjadřuje milióntinu celku. Nejčastěji (i v tomto případě) je ppm aplikováno v hmotnostních dílech, to znamená

$$ppm_p = (m_p / m) \cdot 10^6 \quad (5.4)$$

kde  $m_p$  je hmotnost všech molekul plynu (složky  $p$ ) a  $m$  je celková hmotnost směsi (daného systému).

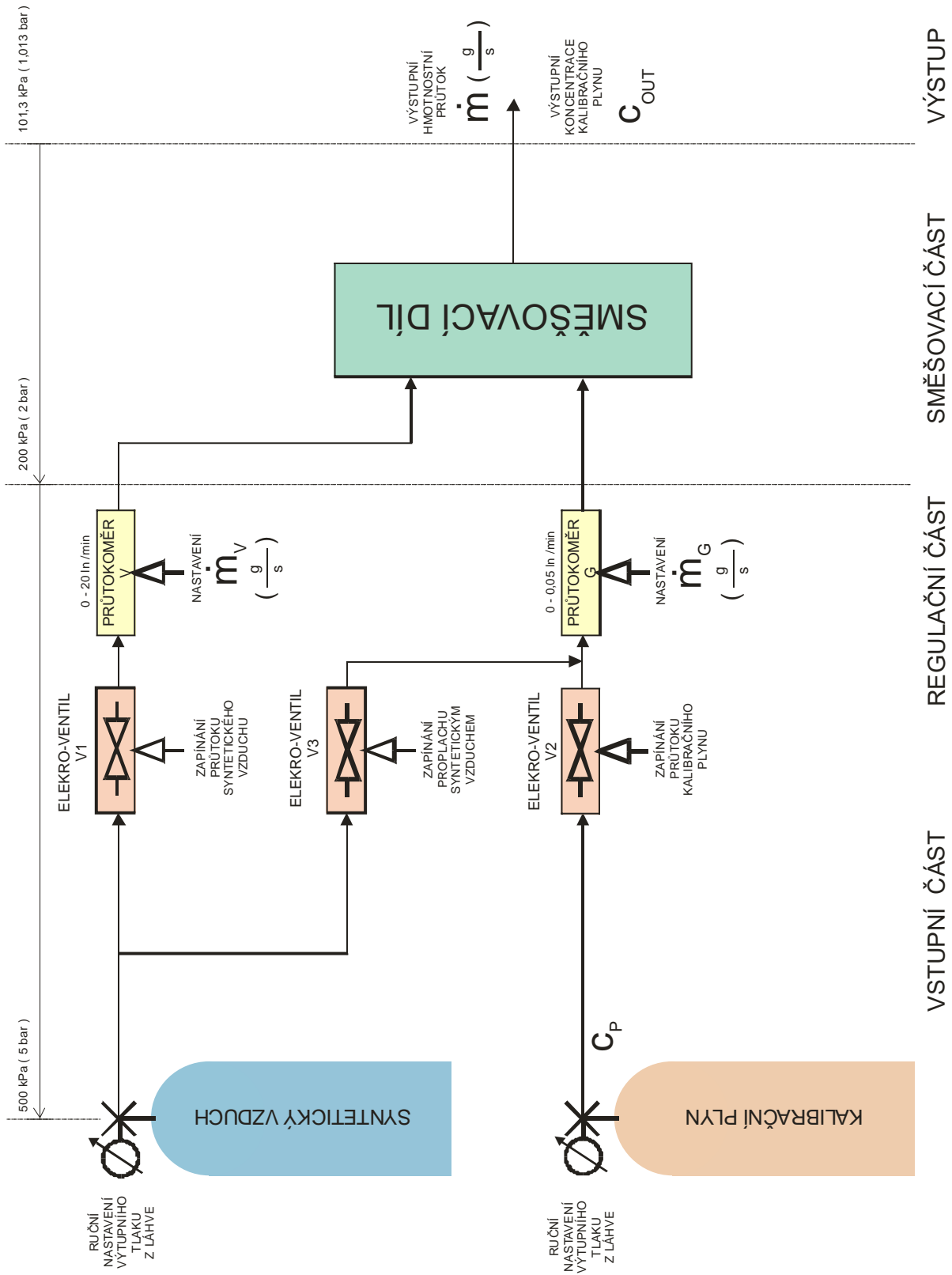
**ppb** (zkratka z angličtiny „parts per billion“)

Tato jednotka se používá k vyjadřování extrémně nízkých koncentrací. Podobně jako ppm vyjadřuje milióntinu, tak ppb vyjadřuje miliardtinu celku. ppb v hmotnostních dílech znamená

$$ppb_p = (m_p / m) \cdot 10^9 \quad (5.5)$$

V popisu zařízení je dále použita zkratka **FS** ( z anglického Full Scale), což znamená plný rozsah (v tomto případě úplné otevření průtokoměru). Dále je v popisu a výpočtech použita zkratka **ln**, což znamená normovaný litr, zkráceně normolitr. Tato jednotka objemu se používá k vyjadřování objemu plynů a znamená objem plynu v litrech při teplotě 0°C a atmosférickém tlaku 1013 mbar (0,1013 MPa) dle fyzikální normy DIN 1343.

## 6 USPOŘÁDÁNÍ ZAŘÍZENÍ



OBRÁZEK 2 – SCHÉMA USPOŘÁDÁNÍ ZAŘÍZENÍ [AUTOR]

**Legenda k obrázku 2:**

V = průtokoměr na vzduch vedoucí do směšovače

G = průtokoměr na plyn

$\dot{m}_V$  = průtok průtokoměrem V

$\dot{m}_G$  = průtok průtokoměrem G

$\dot{m}$  = výsledný průtok na výstupu zařízení

$C_{out}$  = výsledná výstupní koncentrace plynu

$C_p$  = koncentrace plynu v tlakové láhvi

Průtoky v gramech za sekundu (g/s).

Výpočty pro namísení plynu na požadovanou koncentraci pro tento konkrétní případ velice zjednodušuje to, že jsem v zařízení použil přesné hmotnostní průtokoměry, které sice udávají objemový průtok v normolitrech za sekundu, ale jsou zkalibrovány pro syntetický vzduch tak, že při výpočtech je možno počítat s hmotnostními průtoky v gramech za sekundu. Výrobci těchto průtokoměrů sami uvádějí: „Měřicí přístroje hmotnosti průtoku vycházejí vstříc uživateli, získat bez přepočtu signál na normolitr. Přístroje této kategorie měří hmotnost průtoku plynu v gramech/čas. Je-li známa hustota plynu, je možná kalibrace v normolitrech/čas“.

Podstatné proto tedy je, že průtokoměry sice navenek udávají průtok v normolitrech, který se ale převádí na hmotnost plynu, respektive na hmotnostní průtok. Průtokoměry samotné pracují na principu měření a regulace hmotnostního průtoku. Každý průtokoměr musí být a je tedy zkalibrován jen pro určitý konkrétní plyn. Průtokoměry navržené v mém zařízení jsou kalibrovány na syntetický vzduch. Tím se tedy teplotou pro základní výpočet již nemusím nijak zabývat a vše se při těchto základních výpočtech a použití velmi zjednoduší. Teplotu je možno použít pouze pro kontrolu, jestli jsou dodrženy podmínky normální teploty a tedy normální provozní podmínky. Z tohoto je také zřejmé, že přesnost ředění, resp. míchání bude záviset na přesnosti průtokoměrů. Při mých teoretických výpočtech budu ale předpokládat, že průtokoměry měří přesně.

Mé zařízení by mělo pracovat tak, aby byl zajištěn co možná maximální komfort, mobilita a jednoduchost pro uživatele. Po uživatelském zadání požadovaných hodnot pro naředění plynu do počítače se musí průtoky nastavit automaticky.

Při stanovení potřebných vzorců budu tedy vycházet z tohoto základního vstupního požadavku a výsledkem by měly být vzorce pro hodnoty nastavení průtoků jednotlivých průtokoměrů. Dále jelikož jsou ale průtokoměry od výrobce zkalibrovány na průtok pro syntetický vzduch, bude vhodné uvažovat u průtokoměru, který reguluje a měří průtok plynu, respektive směsi



plynu se syntetickým vzduchem, s určitou korekcí pro hodnotu požadovaného průtoku. Bude to sice zcela jistě minimální korekce vzhledem k uvažovaným malinkým koncentracím plynu v tlakové láhvi, ale musím stanovit, zda tuto korekci ve výpočtech uvažovat či nikoli. Už i od výrobce plynů jsou v lahvích velké odchylky koncentrace, takže je korekce průtoků těchto plynových průtokoměrů i vůči tomu asi zanedbatelná, ale korekci přesto raději spočítám a zvážím tedy, zda ji použít.

## 7 ZÁKLADNÍ ÚVAHA - STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH KOMPONENT ZAŘÍZENÍ

Pro návrh celého zařízení je klíčové nejprve navrhnout a zjistit, jaké budou pro tak malé koncentrace ppb potřeba průtoky vzduchu a plynu. Použiji také jako v minulé diplomové práci osvědčené průtokoměry Sensirion. V minulé práci jsem řešil jejich vhodnost průtokoměrů od tohoto výrobce z hlediska parametrů a příznivé ceny vůči konkurenci. Průtokoměry od tohoto výrobce se jeví jako nejpříznivější a tak bych pokud možno nerad od tohoto řešení upouštěl. Dle technického listu mám k dispozici průtokoměr SFC 4100 | FS = 0,05 l/min a 0,5 l/min (ten byl v minulé diplomové práci použit pro kalibrační zařízení). Dále průtokoměry SFC 4200 | FS = 1, 2, 5 a 20 l/min.

V prvním kroku si nejprve stanovím vhodný průtokoměr pro plyn. Z mé minulé diplomové práce je jasné, že 0,5 l/min není pro malé koncentrace příliš vhodný, přestože tam šlo dokonce o dvoustupňové směšování, protože otevírá při malých průtocích na svých hodnotách řádově desítiny % FS a tím má velkou nejistotu (chybu průtoku) a ani se přitom nedostane při směšování na koncentrace do řádu ppb. Nemohu proto zvolit stejné řešení, musím tedy navrhnout jiný, vhodnější průtokoměr. Nejlepším řešením se mi jeví průtokoměr pro plyn ještě menší (nejmenší vyráběný firmou Sensirion) SFC 4100 | 0,05 l/min. Rozsah regulace pak bude 0 – 0,05 l/min., rozsah hmotnostního průtoku bude tedy  $\dot{m}_G = 0 - 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ . Budu vycházet z toho, jak jsem již spočítal v minulé diplomové práci, pro ještě rozumnou nejistotu ho nebudu zavírat na méně než 0,5% FS. Pro otevření na 0,5% FS to bude tedy:

$$\dot{m}_G = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ g/s} \quad (7.1)$$

$$\dot{V}_G = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ l/min} \quad (7.2)$$

Vycházím z koncentrací v dodaných lahvích firmou Linde Gas a.s. použitých v minulé diplomové práci:

Cp: NO<sub>2</sub> = 32 ppm

Cp: SO<sub>2</sub> = 70 ppm

Cp: CO = 600 ppm

Zkusím spočítat potřebné průtoky vzduchu pro předpokládanou výstupní koncentraci na cca 1 ppb.

$$(7.3) \quad C_p = \frac{m_p}{m_G} \quad \begin{array}{l} m_p - \text{hmotnost molekul plynu v lahvi} \\ m_G - \text{hmotnost celkové směsi (procházející} \\ \text{průtokoměrem G)} \end{array}$$

$$(7.4) \quad m_p = C_p \cdot m_G \quad m_v - \text{hmotnost vzduchu}$$

$$(7.5) \quad m = m_G + m_v \quad m - \text{celková výstupní hmotnost}$$

$$m = \frac{m_p}{C_p} + m_v = \frac{m_p + m_v \cdot C_p}{C_p} \quad (7.6)$$

$$C = \frac{m_p}{m} = \frac{m_G \cdot C_p}{m} = \frac{m_G \cdot C_p}{m_G + m_v} \quad (7.7)$$

=>

$$C \cdot (m_G + m_v) = m_G \cdot C_p \quad (7.8)$$

$$C \cdot m_G + C \cdot m_v = m_G \cdot C_p \quad (7.9)$$

$$m_v = \frac{m_G(C_p - C)}{C} = m_G \cdot \frac{C_p - C}{C} \quad (7.10)$$

$$m_v = m_G \cdot \left( \frac{C_p}{C} - 1 \right) \quad (7.11)$$

Stejný vztah platí analogicky i pro hmotnostní průtoky.

### 7.1 PLYN NO<sub>2</sub>:

$C_p = 32 \text{ ppm}$ ; Chceme  $C = 1 \text{ ppb}$ ;  $\dot{m}_G = 0,05\% \text{ FS} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ g/s}$

$$\dot{m}_v = 5,4 \cdot 10^{-6} \cdot \left( \frac{32 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-9}} - 1 \right) = 0,1728 \text{ g/s} \quad (7.12)$$

$$tj. \quad \dot{V} = \frac{0,1728 \cdot 10^{-3}}{1,2959} = 1,333 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{8 \text{ ln/min}} \quad (7.13)$$

**vyhovuje**

## 7.2 PLYN SO<sub>2</sub>:

$$C_p = 70 \text{ ppm}$$

Stejný vztah platí i pro  $\dot{V}$ .

$$\dot{V} = \dot{V}_{G1} \left( \frac{C_p}{C} - 1 \right) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{70 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-9}} - 1 \right) = \mathbf{17,5 \text{ ln/min}} \quad (7.14)$$

**vyhovuje**

## 7.3 PLYN CO:

$$C_p = 600 \text{ ppm}$$

$$\dot{V} = \dot{V}_{G1} \left( \frac{C_p}{C} - 1 \right) = 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{600 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-9}} - 1 \right) = \mathbf{150 \text{ ln/min}} \quad (7.15)$$

**nevyhovuje**

**Takový průtok je moc velký, to není možné zajistit!** To je příliš. Pro CO (s touto koncentrací v dodané tlakové láhvi) se nebudu tedy schopen dostat až na 1ppb ani při použití největšího průtokoměru SFC 4200 | 20 ln/min. Spočítám tedy výslednou koncentraci CO pro maximální průtok vzduchu 100% FS na největším průtokoměru tj. 20 ln/min.

$$\dot{V} = \dot{V}_G \left( \frac{C_p}{C} - 1 \right) \quad (7.16)$$

$$C = \frac{\dot{V}_G \cdot C_p}{\dot{V} + \dot{V}_G} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 600 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 10^{-4} + 20} = 7,5 \cdot 10^{-9} = \mathbf{7,5 \text{ ppb}} \quad (7.17)$$

To by snad mělo postačit, nemá smysl do zařízení dávat další průtokoměr pro vzduch. Při použití druhého stupně by byl pak průtok vzduchu pouze dvojnásobný, tedy 40 ln/min a minimální koncentrace by tedy byla asi 3,75 ppb. Vzhledem k ekonomice řešení si myslím, že postačí tedy pouze jednostupňové řešení na 7,5 ppb (CO). Samozřejmě, pokud bych potřeboval méně, musel by se více zavřít G (pod 0,5% FS). Tím by vznikla ale větší nejistota, takže přestože bych zmenšil výstupní koncentraci, stejně bych vlastně nevěděl její přesnou hodnotu.

Použiji tedy pro vzduch průtokoměr **SFC 4200 | 20 ln/min**. Teoreticky můžu tedy dosáhnout při jednostupňovém směřování tyto minimální koncentrace s rozumnou přesností (kolem 5%).

$$\mathbf{CO: C_{min} = 7,5 \text{ ppb}} \quad (7.18)$$

$$\mathbf{NO_2: } C_{min} = \frac{\dot{V}_{G1} \cdot C_p}{\dot{V} + \dot{V}_{G1}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 32}{20 + 2,5 \cdot 10^{-4}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ ppm} = \mathbf{0,4 \text{ ppb}} \quad (7.19)$$

$$\mathbf{SO_2: } C_{min} = \frac{\dot{V}_{G1} \cdot C_p}{\dot{V} + \dot{V}_{G1}} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 70}{20 + 2,5 \cdot 10^{-4}} = 8,75 \cdot 10^{-4} \text{ ppm} = \mathbf{0,875 \text{ ppb}} \quad (7.20)$$

To jsou teoreticky možné dosažitelné minimální koncentrace pro plyny, jaké byly použity v mé minulé diplomové práci. Rozsah regulace při rozumné přesnosti bude tedy:

CO: 7,5 ppb – 600 ppm

NO<sub>2</sub>: 0,4 ppb – 32 ppm

SO<sub>2</sub>: 0,875 ppb – 70 ppm

Definitivně použiji průtokoměry (dle specifikace firmy SENSIRON, viz příloha diplomové práce):

**PLYN: SFC 4100 UA5 Air 0,05 l/min**

**VZDUCH: SFC 4200 UA5 Air 20 l/min**

Této volbě přizpůsobím své mechanické řešení celého zařízení.

Nyní ještě potřebuji zvolit velikost tlakových láhví s plynem a se syntetickým vzduchem a také zvážit jejich trvanlivost v zařízení. Standardní lahve dodávané firmou Linde Gas a.s. jsou tří typů:

20 l / 200 bar

40 l / 150 bar

50 l / 200 bar

Pro mé mobilní zařízení přichází do úvahy pouze nejmenší tlaková láhev, tj. 20 l / 200 bar. Přibližně orientačně by mohla být tedy výdrž při plném průtoku vzduchu, tj. 20 l/min:

$$(7.21) \quad V_1 = p_2 \cdot V_2 \quad (\text{při } T = \text{konst.}) \quad p_1 = 200 \text{ bar}$$

$$(7.22) \quad V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1}{p_2} \quad V_1 = 20 \text{ l}$$

$$(7.23) \quad V_2 = \frac{200 \cdot 20}{1} = 4000 \text{ l} \quad p_2 = \text{cca } 1 \text{ bar (náš výsledný atm. tlak)}$$

Tento objem nám tedy vydrží při průtoku  $\dot{V} = 20 \text{ l/min}$  :

$$t = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{4000}{20} = 200 \text{ min} = 3 \text{ h } 20 \text{ min} \quad (7.24)$$

Pro láhev s plynem to vůbec nemusíme počítat. Tam je průtok minimální. Směrodatný je v tomto případě syntetický vzduch. Tento čas se mi zdá sice poměrně malý, ale to je jen při extrémně malých koncentracích - jednotek až desetin ppb. Ale už při průtoku vzduchu pouze 0,5 l/min (2,5% FS) bude koncentrace přibližně (při otevření G na 0,5% FS):

CO: C = 300 ppb

NO<sub>2</sub>: C = 16 ppb

SO<sub>2</sub>: C = 35 ppb

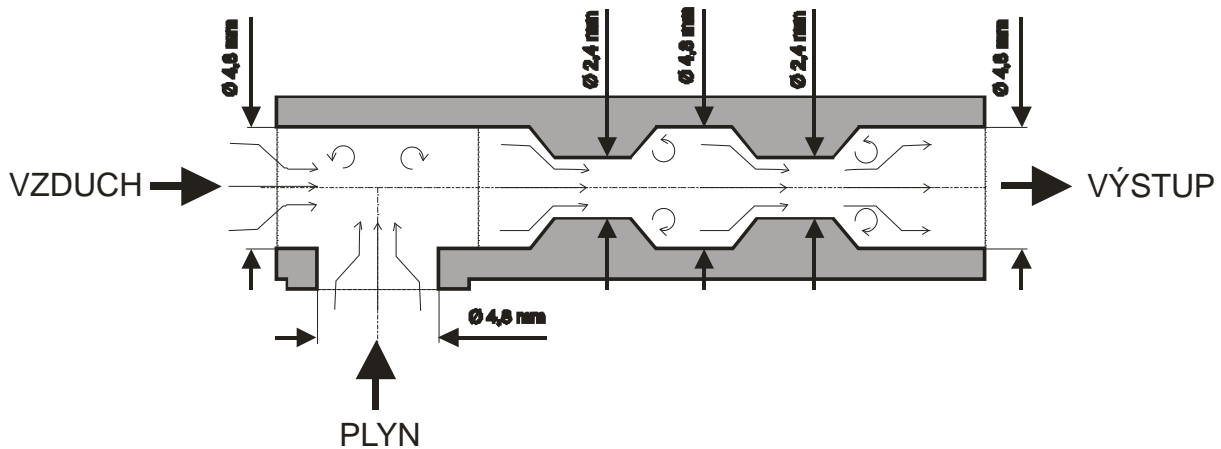
a výdrž lahve se vzduchem pak bude:

$$t = \frac{4000}{0,5} = 8000 \text{ min} = 133 \text{ h} \quad (7.25)$$

Z toho vyplývá, že pro výše uvedené koncentrace (a vyšší) bude výdrž lahví více jak 133 hodin nepřetržitého provozu. To by mělo vyhovovat. Operátor samozřejmě při obsluze musí počítat s tím, že zařízení je mobilní, tj. nemá obrovské tlakové láhve, a že tedy při potřebě menších (resp. extrémně malých) koncentrací než tyto, se bude extrémně snižovat výdrž lahve se vzduchem, až na cca 3 h. Bohužel ale nelze použít větší lahev, protože se jedná o mobilní zařízení a nebylo by možné to pak jednoduše stěhovat a převážet. Ani nelze už snížit průtok plynu (je použit nejmenší průtokoměr), aby se tak mohl snížit i průtok vzduchu. Domnívám se tedy, že by takové provedení mělo být vyhovující, jeví se mi, že je to pro mobilní zařízení nejlepší varianta.

Nakonec ještě uvedu malou úvahu o směšovači. Z parametrů vybraných průtokoměrů je vidět, že k vytvoření potřebné směsi plynu se syntetickým vzduchem bude postačovat jednostupňové směšování. Je třeba, aby směšovač měl co nejmenší vnitřní objem, aby tam bylo kontinuální proudění a přitom aby došlo ke spolehlivému rovnoměrnému mísení. Rozhodl jsem se proto vytvořit jednoduchý směšovač pomocí trubiček a fitinek tak, že jsou zařazeny za sebou, aby se vytvořilo zeslabování a zase zesilování průřezu – viz následující obrázek 3. Tím se uvnitř automaticky vytvoří turbulentní proudění a to zabezpečí spolehlivé smíchání směsi.

## PRINCIP SMĚŠOVACÍHO DÍLU



OBRÁZEK 3 – PRINCIP SMĚŠOVACÍHO DÍLU [AUTOR]

## 8 ODVOZENÍ VZORCŮ A VÝPOČET PRO REGULACI

Na počátku odvozování vzorců a výpočtů si musím stanovit počáteční podmínky výpočtu, z kterých budu vycházet a které nebudu smět porušit. Jedná se zejména o to, aby všechny regulační prvky (průtokoměry) regulovaly správně a ve svých výrobcem stanovených rozsazích, aby se za žádných okolností nemohl žádný z nich dostat mimo svůj regulační rozsah. Dále si stanovím podmínku, že žádný z regulačních prvků nebude regulovat pulsně (tj. periodicky otevírat a zavírat), to znamená, že oba průtokoměry budou regulovat plynule. Další a hlavní podmínkou bude konstantní požadovaná výstupní koncentrace plynu, přičemž přitom nebude vadit různý hmotnostní výstupní průtok. Na základě těchto základních požadavků a podmínek provedu odvození jednotlivých vzorců pro výpočet a následně pro vložení do ovládacího programu. Velkým přínosem a zjednodušením všech výpočtů je použití navržených hmotnostních průtokoměrů, což maximálně zjednodušuje výpočty z termodynamických vzorců na hmotnostní průtoky, kde nás při výpočtu nezajímá ani teplota ani objemové průtoky. Výpočty se omezují pouze na zákon zachování hmoty.

### 8.1 ZADÁVANÉ VSTUPNÍ HODNOTY:

$C_{OUT}$  – výstupní koncentrace

$\dot{m}$  – výstupní hmotnostní průtok

$C_p$  – koncentrace plynu v láhvi

## 8.2 NEZNÁMÉ (POŽADOVANÉ) HODNOTY PRO REGULACI JSOU PRŮTOKY PRŮTOKOMĚŘŮ:

$\dot{m}_G, \dot{m}_V$

### 8.2.1 TĚLAKOVÁ LÁHEV

Pro koncentraci plynu v lahvi platí:

$$C_p = \frac{m_p}{m_s} \quad (8.1)$$

kde  $m_p$  je hmotnost molekul plynu v gramech a  $m_s$  je hmotnost molekul směsi v gramech.

Dále platí v láhvi:

$$m_s = m_p + m_v \quad (8.2)$$

kde  $m_v$  je hmotnost molekul vzduchu v láhvi v gramech.

Analogicky tyto vzorce platí i pro hmotnostní průtoky:

$$C_p = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} \quad (8.3)$$

kde  $\dot{m}_p$  je hmotnostní průtok pouze molekul plynu v gramech za sekundu,  $\dot{m}_s$  je celkový hmotnostní průtok celé směsi v gramech za sekundu – označíme jej v našem případě  $\dot{m}_G$  a bude to tedy průtok směsi plynu a syntetického vzduchu, který vychází z tlakové láhve a protéká průtokoměrem G.

### 8.2.2 SMĚŠOVACÍ STUPEŇ

Výstupní hmotnostní průtok  $\dot{m}$  a výstupní koncentrace  $C_{OUT}$  za směšovačem:

$$\dot{m} = \dot{m}_V + \dot{m}_G = \dot{m}_V + \frac{\dot{m}_p}{C_p} \quad (8.4)$$

$$C_{OUT} = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_G \cdot C_p}{\dot{m}_V + \dot{m}_G} \quad (8.5)$$

$$\text{Nastavení průtoku průtokoměrem G} \quad \dot{m}_G = \dot{m} \cdot \frac{C_{OUT}}{C_p} \quad (8.6)$$

$$\text{Nastavení průtoku průtokoměrem V} \quad \dot{m}_V = \dot{m}_G \cdot \left( \frac{C_p}{C_{OUT}} - 1 \right) \quad (8.7)$$

$$\dot{m}_V = \dot{m} - \dot{m}_G \quad (8.8)$$

## 9 REGULACE PRŮTOKU

Nejprve si stanovím počáteční podmínky:

Rozsah regulace průtokoměru plynu G :  $0,5\% FS \leq \dot{m}_G \leq 100\% FS$

Rozsah regulace průtokoměru syntetického vzduchu V :  $0\% FS \leq \dot{m}_V \leq 100\% FS$

To jsou možné rozsahy regulace obou průtokoměrů. Při regulaci průtokoměry při jejich otevření na 0,5% jmenovitého rozsahu je relativní nejistota průtoku cca 5,3 % ( viz kap. Chyba průtokoměrů) což budu považovat ještě za vyhovující. Při menším otevření pod 0,5% roste tato relativní nejistota až na desítky procent a to je již nevhodné. Pro průtokoměr vzduchu potřebujeme ale regulovat již od nuly, což se ukázalo nakonec možné při ještě únosné nejistotě výstupní koncentrace (viz kap. Chyba průtokoměrů – tabulka nejistoty výstupní koncentrace). Stanovím si nyní způsob a intervaly, v jakých bude řízen způsob regulace průtoků a tím i výstupní koncentrace směsi:

- Interval při  $\dot{m}_G = 100\% FS$  a přitom  $\dot{m}_V = 0 - 0,5\% FS$  umožní rozsah výstupních koncentrací

$$C_{OUT} = C_P \text{ až } 0,33 C_P \quad (9.1)$$

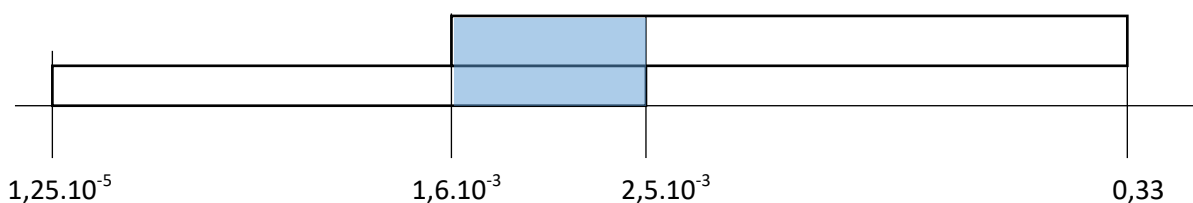
- Interval kdy se průtok průtokoměrem G bude snižovat od 100%FS až k 0,5%FS, tedy  $\dot{m}_G = 100 - 0,5\% FS$  při konstantním výstupním průtoku  $\dot{m} = konst.$  Aby byl konstantní výstupní průtok, musí se tedy přitom mírně zvyšovat průtok průtokoměrem V, tedy  $\dot{m}_V = 0,5 - 0,75\% FS$ . To umožňuje dosažení rozsahu výstupních koncentrací

$$C_{OUT} = 0,33 C_P \text{ až } 1,66 \cdot 10^{-3} C_P \quad (9.2)$$

- Interval kdy se průtok průtokoměrem G nechá na nejnižší možné hodnotě, tj.  $\dot{m}_G = 0,5\% FS$  a bude se zvyšovat průtok průtokoměrem V až na 100%FS, tedy  $\dot{m}_V = 0,5 - 100\% FS$ . To umožňuje dosažení rozsahu výstupních koncentrací až k minimálním hodnotám

$$C_{OUT} = 2,5 \cdot 10^{-3} C_P \text{ až } 1,25 \cdot 10^{-5} C_P \quad (9.3)$$

Jak je možné vidět, intervaly 2 a 3 se překrývají (mají průnik). Sloučením obou intervalů dle bodů 2 a 3 dostáváme:



OBRÁZEK 4 – INTERVALY [AUTOR]



V průniku obou intervalů dáme přednost regulaci na konstantní výstupní průtok  $\dot{m} = konst.$  dle bodu 2.

Následně podrobněji popíši jednotlivé intervaly regulace:

1. Stanovím největší možnou dosažitelnou koncentraci. Je jasné, že to bude koncentrace plynové láhve  $C_P$ . Tento případ nastane, když  $\dot{m}_G = max$ , tj.  $\dot{m}_G = 100\% FS$  a  $\dot{m}_v = 0$  tj.  $\dot{m}_v = 0\% FS$ . Pro snížení koncentrace se ponechá průtokoměr G stále ještě otevřen na  $\dot{m}_G = 100\% FS$  a začne se otevírat průtokoměr V od nuly do  $\dot{m}_v = 0,5\% FS$ . Tento bod odpovídá výstupní koncentraci:

$$C_{OUT} = \frac{1,08 \cdot 10^{-3} C_P}{2,16 \cdot 10^{-3} + 1,08 \cdot 10^{-3}} = 0,3333 C_P \quad \left( = \frac{1}{3} C_P \right) \quad (9.4)$$

$$0,333 C_P \leq C_{OUT} \leq C_P \quad (9.5)$$

2. V dalším rozsahu se pak bude regulovat tak, že se zachová konstantní výstupní průtok  $\dot{m}$ .

Vycházím z hodnot  $\dot{m}_v = 0,5\% FS = 2,16 \cdot 10^{-3} g/s$  (9.6)

a zároveň  $\dot{m}_G = 100\% FS = 1,08 \cdot 10^{-3} g/s$  (9.7)

$$\dot{m} = \dot{m}_v + \dot{m}_G = 3,24 \cdot 10^{-3} g/s \quad (0,15 ln/min) \quad (9.8)$$

Tento průtok nechám tedy konstantní a budu regulovat pomocí  $\dot{m}_v$  a  $\dot{m}_G$ .

$$0,5\% FS \leq \dot{m}_G \leq 100\% FS \quad (9.9)$$

$$\dot{m} = konst.$$

To odpovídá požadované výstupní koncentraci  $C_{OUT}$ :

$$1,66 \cdot 10^{-3} C_P \leq C_{OUT} \leq 0,333 C_P \quad (9.10)$$

$$0,15 ln/min \geq \dot{V}_v \geq 0,1 ln/min \quad (9.11)$$

$$3,24 \cdot 10^{-3} g/s \geq \dot{m}_v \geq 2,16 \cdot 10^{-3} g/s \quad (9.12)$$

$$0,75\% FS \geq \dot{m}_v \geq 0,5\% FS \quad (9.13)$$

3. Nejprve se zvolí  $\dot{m}_{G(v)} = 0,5\% FS \rightarrow$  v našem případě je  $\dot{V}_G = 2,5 \cdot 10^{-4} ln/min$ .

$$hustota vzduchu \rho = 1,2959 kg/m^3$$

obecně  $m = \rho \cdot V$ , tedy  $\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$

$$\dot{V}_G = 2,5 \cdot 10^{-4} ln/min = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{60} dm^3/s = 4,167 \cdot 10^{-6} dm^3/s \quad (9.14)$$

$$\dot{m}_G = \rho \cdot \dot{V}_G = 1,2959 \cdot 4,167 \cdot 10^{-6} = 5,4 \cdot 10^{-6} g/s \quad (9.15)$$

Bude se regulovat průtok vzduchu v intervalu:

$$0,75\% FS \leq \dot{m}_v \leq 100\% FS \quad (9.16)$$

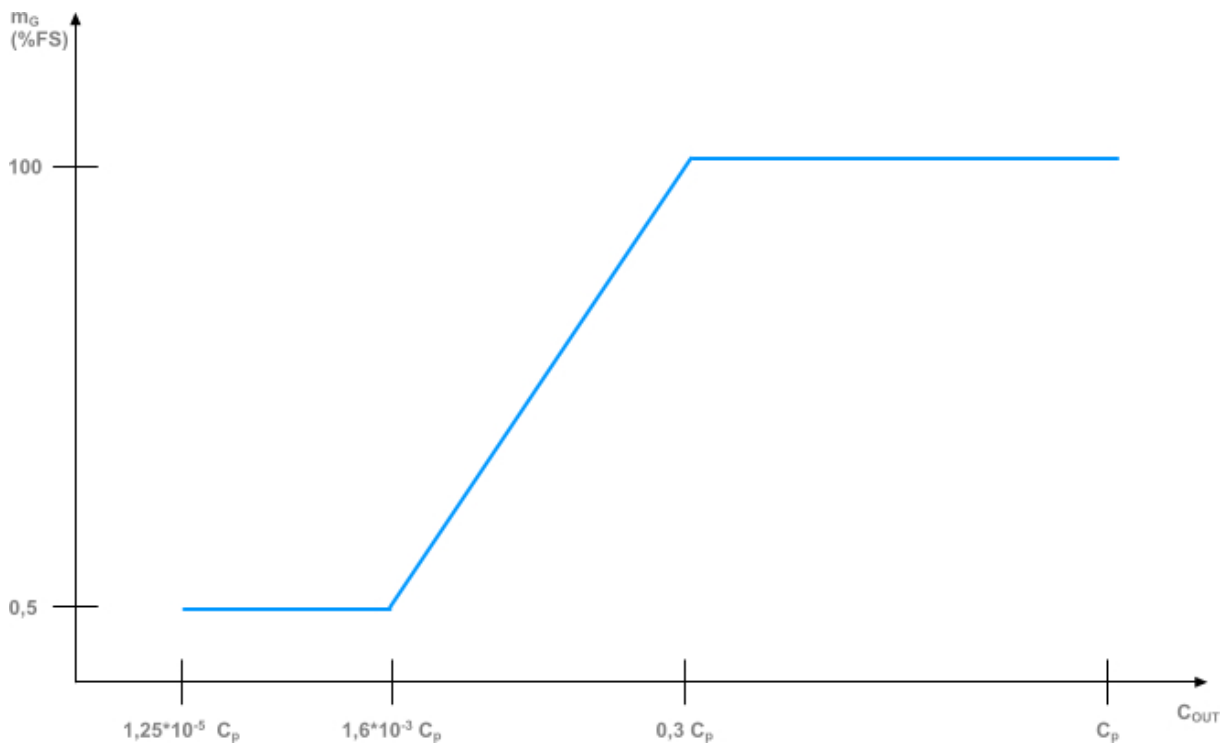
$$0,15 \text{ ln/min} \leq \dot{V}_v \leq 20 \text{ ln/min} \quad (9.17)$$

$$3,24 \cdot 10^{-3} \text{ g/s} \leq \dot{m}_v \leq 0,432 \text{ g/s} \quad (9.18)$$

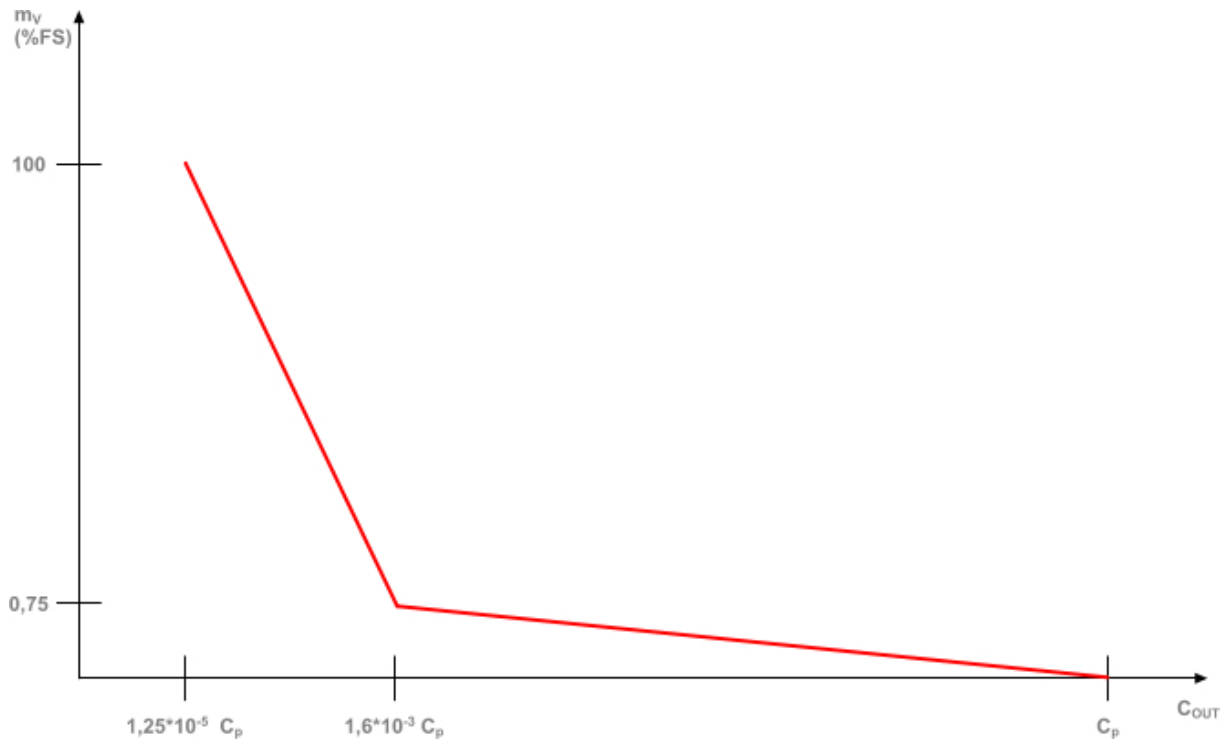
To odpovídá požadované výstupní koncentraci  $C_{OUT}$ :

$$1,66 \cdot 10^{-3} C_P > C_{OUT} > 1,2 \cdot 10^{-5} C_P \quad (9.19)$$

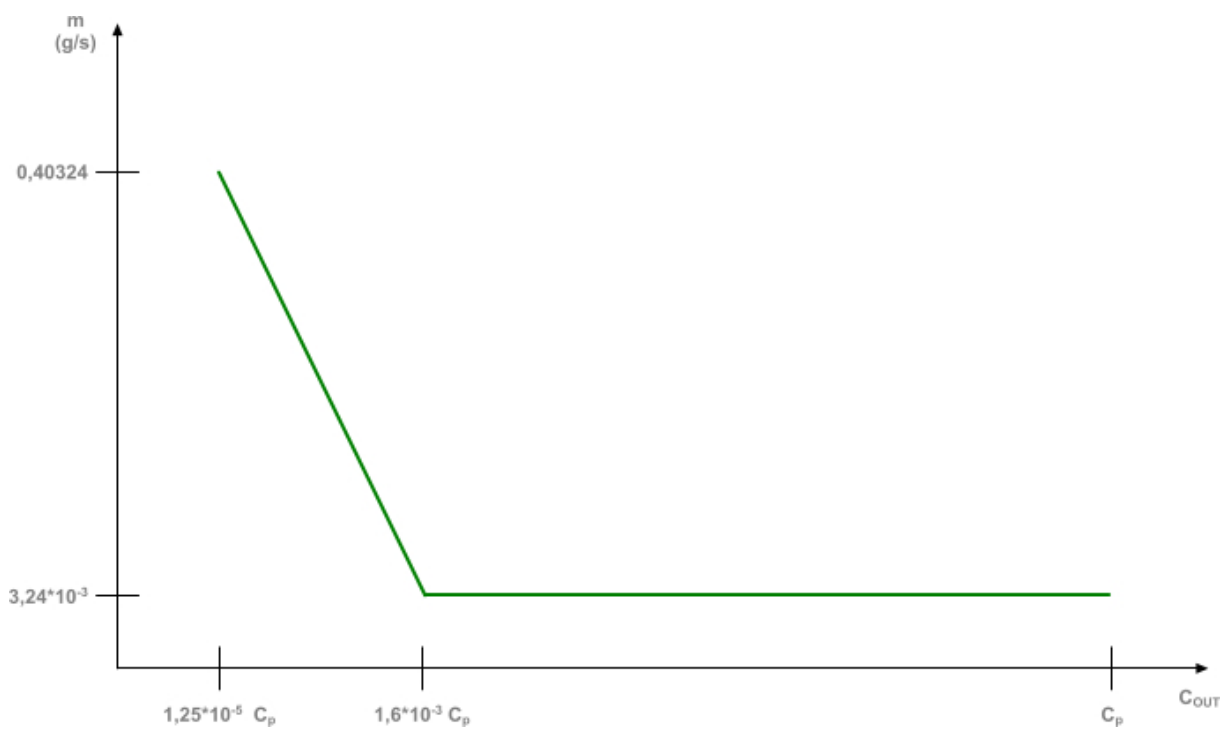
## 10 GRAFY ZPŮSOBU ŘÍZENÍ ZAŘÍZENÍ



GRAF 1 – ZÁVISLOST PRŮTOKU PLYNU (OTEVŘENÍ PRŮTOKOMĚRU G) NA VÝSTUPNÍ KONCENTRACI [AUTOR]



GRAF 2 – ZÁVISLOST PRŮTOKU VZDUCHU (OTEVŘENÍ PRŮTOKOMĚRU V) NA VÝSTUPNÍ KONCENTRACI [AUTOR]



GRAF 3 – ZÁVISLOST VÝSTUPNÍHO PRŮTOKU (SOUČET PRŮTOKŮ V A G) NA VÝSTUPNÍ KONCENTRACI [AUTOR]

Všechny tyto hodnoty a rozsahy regulace platí v ustáleném stavu. Při zapnutí zařízení a tedy obou průtokoměrů bude nutné chvíli čekat na ustálení hodnot, které bude dáno zejména plněním zařízení z průtokoměrů plynu G a vzduchu V při jejich malém otevření. Z grafů je patrné, že nejhorší případ pro otevírání průtokoměrů (nejmenší otevření) je zhruba při hodnotách výstupní koncentrace kolem  $1,6 \cdot 10^{-3} C_p$ . Objem navrženého směšovače je asi  $4 \text{ cm}^3$ . Při tomto otevření průtokoměrů na 0,5% FS u G a 0,75% FS u V, dojde teoreticky k plnému naplnění prostoru zařízení do řádově několika sekund. Při větším otevření se doba zkracuje. Bude proto ale stejně vhodné počítat po zapnutí zařízení s ustálením průtoku a tedy i výstupní koncentrace. Pro jistotu bych doporučoval dobu alespoň 30s až 1min. To by bylo dobré vyřešit v řídicím programu pro PC, aby uživatel tuto dobu nemusel sám hlídat a stopovat. Nebylo by také dobré při zapnutí otevírat průtokoměr plynu více a naplňovat tak zařízení plynem rychleji a pak jej opět přivírat a pokoušet se tak o jakýsi regulátor. Domnívám se, že by to nebylo ku prospěchu věci, že bude lépe od začátku do konce neměnit průtoky a raději počkat na ustálení hodnot. V opačném případě by mohlo dojít k tomu, že by nakonec nebylo jasné, jaká je v zařízení koncentrace kalibračního plynu. Vlastní řídicí program pro PC (notebook) není předmětem této mé diplomové práce.

TABULKA 1 – TABULKA ROZSAHU TEORETICKY DOSAŽITELNÝCH KONCENTRČÍ [AUTOR]

Kalibrační plyn	Koncentrace v lahvi $C_p$ (ppm)	Největší dosažitelná koncentrace $C_{OUT}$ (ppm)	Nejnižší dosažitelná koncentrace $C_{OUT}$ (ppb)	Řízení směšovače $C_{OUT}$ (ppb)		
				$\dot{m}_G = \text{konst. (g/s)}$ 0,5% FS	$\dot{m} = \text{konst. (g/s)}$	$\dot{m}_G = \text{konst. (g/s)}$ 100% FS
NO <sub>2</sub>	32	32	0,4	0,4 - 51,2	51,2 - 1,067.10 <sup>4</sup>	1,067.10 <sup>4</sup> - 3,2.10 <sup>4</sup>
CO	600	600	7,5	7,5 - 960	960 - 2.10 <sup>5</sup>	2.10 <sup>5</sup> - 6.10 <sup>5</sup>
SO <sub>2</sub>	70	70	0,875	0,875 - 112	112 - 2,333.10 <sup>4</sup>	2,333.10 <sup>4</sup> - 7.10 <sup>4</sup>

## 11 KOREKCE NASTAVENÍ PRŮTOKOMĚRU PLYNU

Tyto předchozí výsledné vztahy by platily, kdyby byl průtokoměr kalibrován na plyn, který jím protéká. Vzhledem k tomu, že je průtokoměr kalibrován pro syntetický vzduch, je třeba u tohoto průtokoměru uvažovat a provést korekci ovládání. V počáteční úvaze je jasné, že tato korekce bude zcela minimální při použití tlakové láhve s minimální koncentrací plynu (v tomto případě řádově desítky až stovky ppm). Jelikož navrhuji zařízení univerzálně, bude samozřejmě záležet na tom, jakou použije uživatel koncentraci plynu v tlakové láhvi. Při použití vyšší koncentrace (řádově procenta) nebude již tato korekce zanedbatelná a bude nutné ji zahrnout a počítat s ní při řízení průtokoměru.

Tyto korigované hodnoty označím čárkou (apostrofem). Tlaková láhev je naplněna nikoli čistým plynem, ale směsí plynu se vzduchem o koncentraci  $C_p$ . V následujících vzorcích si proto označím průtok plynu z láhve jako  $\dot{m}'_s$  (tj. průtok směsi), který je tedy dán součtem průtoku čistého vzduchu z láhve  $\dot{m}_v$  a průtoku čistého plynu  $\dot{m}_p$ .

$$\dot{V}'_s = \dot{V}_v + \dot{V}_p = \frac{\dot{m}_v}{\rho_{vz}} + \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \quad (11.1)$$

$$\frac{\dot{m}'_s}{\rho_{vz}} = \frac{\dot{m}_v}{\rho_{vz}} + \frac{\dot{m}_p}{\rho_p} \quad (11.2)$$

$$\dot{m}'_s = \dot{m}_v + \frac{\rho_{vz}}{\rho_p} \cdot \dot{m}_p \quad (11.3)$$

$V'_s$  – objem směsi po korekci ze vzduchu na směs plynu

$\dot{m}'_s$  – nastavení průtoku po korekci ze vzduchu na směs plynu

$\dot{m}_s$  – nastavení původní, bez korekce

$\rho_p$  – hustota plynu

$\rho_{vz}$  – hustota vzduchu

$$\dot{m}_s = \dot{m}_p + \dot{m}_v \Rightarrow \dot{m}_v = \dot{m}_s - \dot{m}_p \quad (11.4)$$

$$C_p = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_s} \Rightarrow \dot{m}_p = C_p \cdot \dot{m}_s \quad (11.5)$$

$$\dot{m}'_s = \dot{m}_s - C_p \cdot \dot{m}_s + \frac{\rho_{vz}}{\rho_p} \cdot C_p \cdot \dot{m}_s \quad (11.6)$$

$$\dot{m}'_s = \dot{m}_s \left[ 1 - C_p \left( 1 - \frac{\rho_{vz}}{\rho_p} \right) \right] \quad (11.7)$$

$$\dot{m}'_s = \dot{m}_s \left[ 1 + C_p \left( \frac{\rho_{vz}}{\rho_p} - 1 \right) \right] \quad (11.8)$$

Vztah udává korekci pro vstupní hodnotu průtokoměru plynu z důvodu použití směsi plynu místo čistého vzduchu. Průtok průtokoměrem G je označen výše jako  $\dot{m}_G$ , upravím označení průtoku ve vzorci, tedy

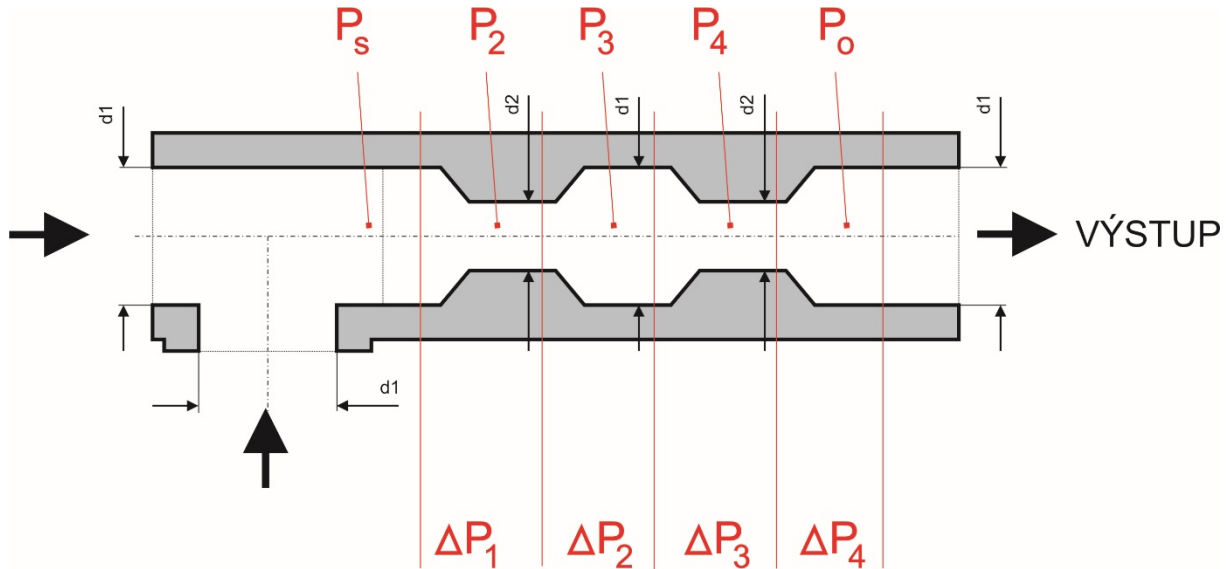
$$\dot{m}'_G = \dot{m}_G \left[ 1 + C_p \left( \frac{\rho_{vz}}{\rho_p} - 1 \right) \right] \quad (a) \quad (11.9)$$

S tímto vztahem (a), který udává korekci nastavení průtokoměru G, bude vhodné počítat a zahrnout jej při programování řízení směšovače do řídicího programu. V tomto případě, při použití výše uvedených koncentrací v tlakových láhvích (jako v mé minulé diplomové práci), se korekce téměř vůbec neuplatní, protože vychází až v pátém řádu (řádově tisíce procenta), čímž nezpůsobuje vzhledem ke všem ostatním nejistotám žádnou podstatnou chybu míchání směsi. Ale jelikož je zařízení navrženo univerzálně, použije-li uživatel tlakovou láhev s plynem o koncentraci vyšší, nebude již korekce zanedbatelná a bude mít vliv na přesnost namíchané směsi.

TABULKA 2 – KONCENTRACE PLYNŮ V LÁHVÍCH [ŠTÍTEK NA TL. LÁHVÍCH]

Plyn	Koncentrace v láhvi (ppm)
NO <sub>2</sub>	32
SO <sub>2</sub>	70
CO	600
IZOBUTYLEN	68,2

## 12 VÝPOČET TLAKOVÉHO SPÁDU SMĚŠOVAČE

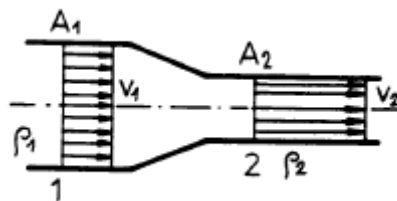


OBRÁZEK 5 – SCHÉMA SMĚŠOVACÍHO DÍLU

Pro správnou funkci zařízení bude vhodné zkontrolovat, zda zvolené vnitřní průměry směšovače plynu a syntetického vzduchu, jsou v pořádku a nebude docházet k velkému tlakovému spádu na směšovači (velkému „natlakování“ na vstupu). Bylo by třeba, aby byl tlakový spád od vstupu po výstup byl nejlépe zhruba kolem 1 baru ( $10^5 \text{Pa}$ ) tak, aby mohlo zařízení správně pracovat, jak bylo navrženo. Provedu proto kontrolu a výpočet tlakového spádu na tomto směšovači.

Nejprve bude třeba provést odvození potřebných vztahů pro výpočet. Odvodím tedy nejdříve vzorce pro výpočet rychlosti proudění za zúžením.

Vycházím z obecné rovnice kontinuity, kde platí:



OBRÁZEK 6 – SCHÉMA PRO ROVNICI KONTINUITY [3]

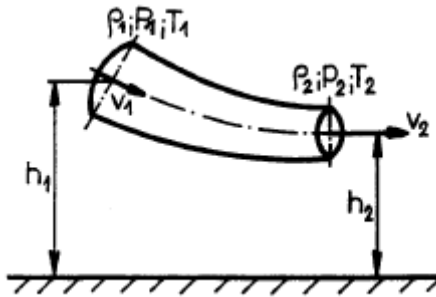
$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = \dot{V} = \text{konst.} \quad (\text{objemový průtok je konstantní}) \quad (12.1)$$

a tedy platí také, že:

$$v_1 = v_2 \cdot \frac{A_2}{A_1} = v_2 \cdot \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (12.2)$$

$$v_2 = \frac{\dot{V}}{A_2} = v_2 \cdot \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_2} = \frac{\dot{m} \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot d_2^2} \quad (12.3)$$

Dále budu vycházet ze zákona zachování energie a sestavím tedy Bernoulliho rovnici pro zúžující se potrubí:



OBRÁZEK 7 – SCHÉMA PRO BERNOULLIHO ROVNICI [3]

$$gh_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = gh_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (12.4)$$

Tato obecná Bernoulliho rovnice se upraví pro tento konkrétní případ tak, že se do ní dosadí stejné výšky konců potrubí, jelikož toto navrhované směšovací zařízení je ve stejné výšce. Tedy  $h_1 = h_2$ . Pak se členy s výškami a gravitačním zrychlením odečtou a po úpravě dostávám:

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \quad (12.5)$$

$$\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho} = v_2^2 - v_2^2 \frac{d_2^4}{d_1^4} \quad (12.6)$$

$$\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho} = v_2^2 \left( 1 - \frac{d_2^4}{d_1^4} \right) \quad (12.7)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho \cdot \left( 1 - \frac{d_2^4}{d_1^4} \right)}} \quad (12.8)$$



Pro tento případ platí

$$\frac{\dot{m} \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot d_2^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_1}{\rho \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right)}} \quad (12.9)$$

$$\frac{\dot{m} \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot d_2^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_S - P_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right)}} \quad (12.10)$$

$$P_2 = P_S - \frac{\left(\frac{\dot{m} \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot d_2^2}\right)^2 \cdot \rho \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right)}{2} \quad (12.11)$$

Analogicky platí tedy postupně pro všechny tlaky ve směšovači

$$P_3 = P_2 - \frac{\left(\frac{\dot{m} \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot d_1^2}\right)^2 \cdot \rho \left(1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4\right)}{2} \quad (12.12)$$

$$P_4 = P_3 - \frac{\left(\frac{\dot{m} \cdot 4}{\rho \cdot \pi \cdot d_2^2}\right)^2 \cdot \rho \left(1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4\right)}{2} \quad (12.13)$$

Nakonec musí platit podmínka  $\Delta P_4 = P_4 - P_0 > 0$ , kde  $P_0$  je tlak okolí (atmosférický tlak)

$$\text{hustota vzduchu } \rho = 1,2959 \text{ kg/m}^3$$

Hmotnostní průtok zvolím maximální, tj. 100% FS průtokoměru vzduchu, abych zvolil nejhorší případ, tj. maximální tlakový spád, tedy  $\dot{m} = 0,432 \text{ g/s}$ , což odpovídá objemovému průtoku  $20 \text{ l/min}$ .

Zvolíme tlak na počátku (startu), na vstupu směšovače  $P_S = 200\,000 \text{ Pa}$

Po číselném dosazení vychází:

$$P_2 = 196\,498,35 \text{ Pa}$$

$$P_3 = 196\,279,50 \text{ Pa}$$

$$P_4 = 196\,777,85 \text{ Pa}$$

$$\Delta P_4 = P_4 - P_0 = 91\,452,84 \text{ Pa} > 0 \quad (12.14)$$

Z výpočtu je tedy vidět, že vychází výstupní přetlak téměř 1 bar (více jak 0,091 MPa), což je pro zařízení plně vyhovující a odpovídá to navrženému uspořádání.

## 13 POPIS KONSTRUKCE A KOMPONENT PROTOTYPU

Při popisování konstrukce se nejprve zabývám vlastním směšovacím zařízením pro mísení kalibrační směsi a poté převodem celého zařízení do mobilní podoby. Jelikož se tato diplomová práce nezabývá vlastní fyzickou výrobou prototypu ani jeho následným odladěním, které by následovalo, pokud by se toto směšovací zařízení mělo začít prakticky vyrábět, tak jsem zvolil vizualizaci konstrukce pomocí 3D modelu. K tvorbě 3D modelu jsem využil program SolidWorks od společnosti Dassault Systems. Při konstruování zařízení jsem se snažil dodržovat základní požadavky na ekonomičnost a technologičnost konstrukcí. Ze zadání vyplývá pouze jeden hlavní požadavek na konstrukci a tím je mobilita zařízení. Avšak na tuto počáteční podmínku se váže hned několik dalších podmínek:

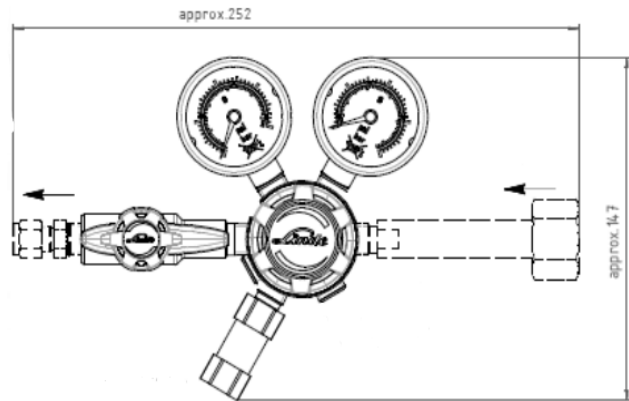
- ✓ Šířka pro průjezd dveřmi 80cm
- ✓ Stabilita při stacionárním stavu
- ✓ Ergonomie ovládání vozíku
- ✓ Jednoduchá montáž a manipulace s lahvemi a manometry
- ✓ Bezpečnostní krytí manometrů
- ✓ Upoutání lahví

### 13.1 TLAKOVÉ LÁHVE A REDUKČNÍ VENTILY

Redukční ventily i tlakové láhve jsem vybral od společnosti Linde Gas a.s. a to díky kladným zkušenostem z minulé diplomové práce. Pro mnou navrhované mobilní kalibrační zařízení využiji dvě tlakové láhve o objemu 20l. Jedná se o láhev s technickým vzduchem a láhev s kalibračním plynem. Láhve o objemu 20l mají průměr 140 mm a výšku s ventilem 970 mm. Obě láhve jsou opatřeny dvoustupňovým redukčním ventilem C200/2 s manometrem. Tyto ventily jsou dle výrobce vhodné pro speciální plyny, splňují požadavky na vysokou čistotu, těsnost a bezpečnost. Zvolil jsem dvoustupňový redukční ventil, protože je nutné zajistit konstantní výstupní tlak při proměnlivém vstupním tlaku. K tomuto účelu právě slouží dvoustupňové redukční ventily. Ventil C200/2 bude také vybaven klasickým uzavíracím ventilem.



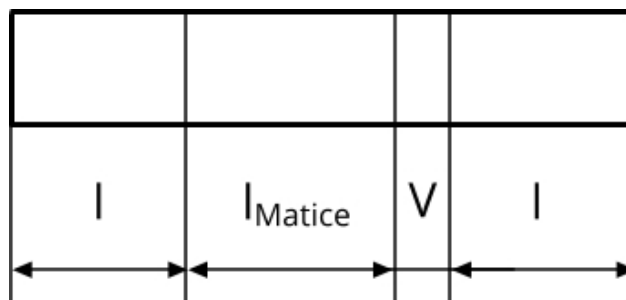
OBRÁZEK 8 – REDUKČNÍ VENTIL C200/2 [8]



OBRÁZEK 9 – REDUKČNÍ VENTIL C200/2 – NÁKRES [8]

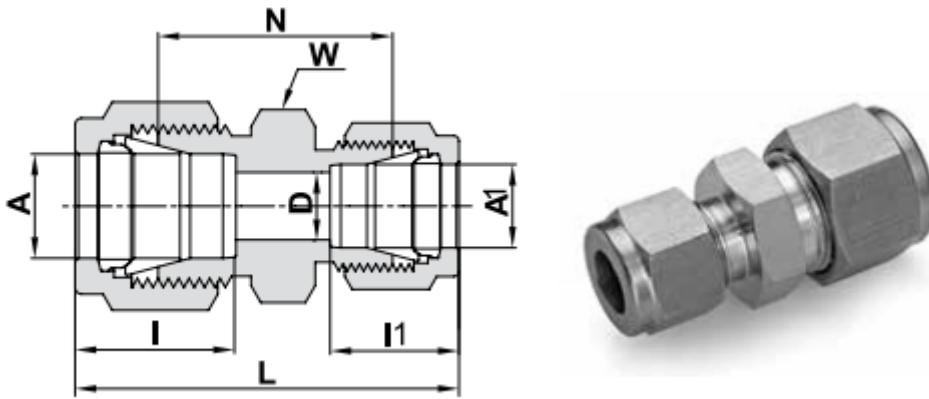
### 13.2 Mísící díl

Pro tvorbu vlastního mísícího dílu jsem využil schématu z kapitoly 6, ze kterého vychází vlastní provedení. Vlastní promíchávání směsi je zajištěné velmi jednoduchou soustavou fitinek a trubiček z korozi-vzdorné oceli o vnitřních průměrech 2,4 mm a 4,8 mm. Délky trubiček bylo nutné stanovit výpočtem, protože je nutné zajistit co nejmenší délku a zároveň jednoduchou montáž. Výpočet vychází z obrázku 10, kde výsledná délka je dána součtem dvou hloubek zasunutí s výškou zašroubované matice „l“ a výšky jedné matice s montážní vůlí 5 mm.



OBRÁZEK 10 – SCHÉMA PRO VÝPOČET DÉLKY TRUBKY [AUTOR]

Po sestavení tedy vzniká vzorec:  $L_{Tr} = 2 \cdot l + l_{Matice} + V = 2 \cdot 15,3 + 12,7 + 5 = 48,3 \text{ mm}$ . Z výpočtu vyplývá, že délka trubičky o vnitřním průměru 4,8 mm je 50 mm. Obdobně vychází i délka trubičky s vnitřním průměrem 2,4 mm a to 45 mm. Napojení trubiček s různými průměry je provedeno pomocí šroubení „Reducing Union“ 763L SS 6mmX3mm.

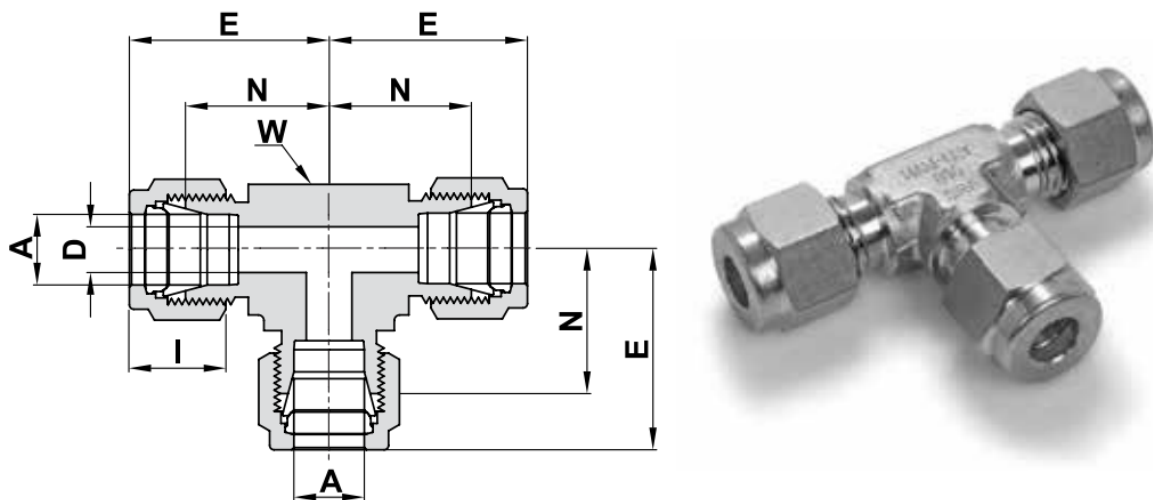


OBRÁZEK 11 – REDUCING UNION [9]

TABULKA 3 – PARAMETRY 763L SS [9]

A	A1	I	I1	L	D	N	W
6 mm	3 mm	15,3 mm	12,9 mm	38,6 mm	2,4 mm	24,6 mm	14 mm

Změny průměrů ve směšovači zajišťují vířivé proudění a tím tedy správné promíchání směsi plynu a technického vzduchu z tlakových lahví. Pro správné promíchání směsi bude použito čtyř šroubení „Reducing Union“. Jde tedy o dvojí zúžení a dvojí zpětné rozšíření průměrů trubiček. Vlastní směšování začíná již před promíchávací soustavou šroubení „Reducing Union“ a to ve šroubení ve tvaru písmene T. Pomocí tohoto šroubení se do proudu technického vzduchu vmíchává zvolený plyn. Takto připravená směs pokračuje do promíchávací soustavy. Šroubení ve tvaru písmene T, zvaný „Union Tee“ 764L\_6 má vnitřní průměr 4,8 mm, který používám pro všechny trubičky v soustavě kromě zúžených v promíchávací části.



OBRÁZEK 12 – UNION TEE [9]

TABULKA 4 – PARAMETRY 764L\_6 [9]

A	D	W	N	E	I
6 mm	4,8 mm	12,7 mm	19,6 mm	27 mm	15,3 mm

Na obrázku 12 si lze představit, že na pravý konec „Union Tee“ je připojena promíchávací soustava šroubení „Reducing Union“. Na levý konec je připojen vstup od tlakové lahve s technickým vzduchem přes průtokoměr. Do proudu vzduchu zleva doprava je z kolmého směru přimícháván plyn.

Vstupy plynu a syntetického vzduchu nelze napojit přímo, ale je potřeba zajistit jejich řízení, tedy je třeba zajistit kontrolu nad průtokem plynů. Samotné otevírání a uzavírání lahví je zajištěné dvěma ventily. První z nich je na lahvi, který se musí ručně otevřít a druhý elektrický je umístěn ve směšovací soustavě právě před směšovacími šroubením „Union Tee“. Tyto elektro-ventily jsem vytypoval tak, aby zajišťovaly pouze úplné otevření a uzavření. Díky tomuto základnímu požadavku je možné použít velmi levnou variantu elektricky řízených ventilů. Vybral jsem nerezový elektromagnetický ventil s těsněním z Vitonu od společnosti Festo VZWD-L-M22C-M-G14-10-V-1P4-90-R1. Ventil je sedlový a přímo řízený napětím 24V stejnosměrného proudu.



OBRÁZEK 13 – ELEKTROMAGNETICKÝ VENTIL [4]



OBRÁZEK 14 – PRŮTOKOMĚR SENSIRION [11]

Pro napojení elektromagnetického ventilu na soustavu nerezových trubiček směšovače se použije šroubovací vložka. Ventil však pouze otevírá a uzavírá proudění vzduchu a plynu. Ovládání a nastavování přesného průtoku je provedeno průtokoměry od firmy Sensirion. Pro syntetický vzduch je použit hmotnostní průtokoměr SFC 4200 a pro kalibrační plyn SFC 4100.

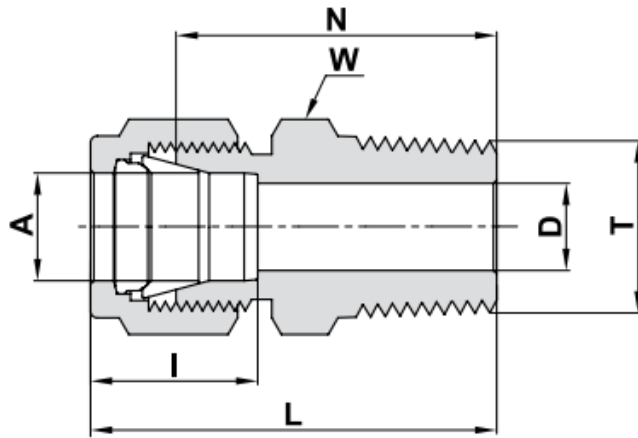
TABULKA 5 – PARAMETRY PRŮTOKOMĚRŮ [11]

Průtokoměr	SFC 4100	SFC 4200
<b>Průtok</b>	0,05 l <sub>n</sub> /min	20 l <sub>n</sub> /min
<b>Poměr Flow-min/Flow-max</b>	1:1000	1:1000
<b>rozsah teplot</b>	0-50 °C	0-50 °C
<b>tlaková ztráta na plný průtok</b>	max. 2 bar	max. 3 bar
<b>maximální vstupní tlak</b>	10 bar	10 bar
<b>maximální rozdíl tlaku</b>	5 bar	4 bar

Důvodem mého výběru průtokoměru SFC 4100 byla zejména cena a možnost regulace průtoku v rozmezí 0 až 0,05 l<sub>n</sub>/s. To je pro toto zařízení nezbytné, protože je potřeba namíchat co možná nejmenší koncentrace až k jednotkám ppb. Průtokoměr měří a nastavuje průtok potřebného plynu. Tento druh průtokoměrů byl volen jak tedy z důvodu příznivé ceny, tak především z důvodu příznivého poměru, který činí 1:1000. Pro syntetický vzduch využiji hmotnostní průtokoměr SFC 4200, který má rozsah průtoku od 0 do 20 l<sub>n</sub>/min.

Směšovací soustava obsahuje také další větev s třetím elektromagnetickým ventilem, která propojuje přívod syntetického vzduchu se vstupním ústrojím pro kalibrační plyn. Toto propojení bude zajišťovat proplach celého směšovacího zařízení syntetickým vzduchem a tím dojde k čištění soustavy a přípravě pro další použití.

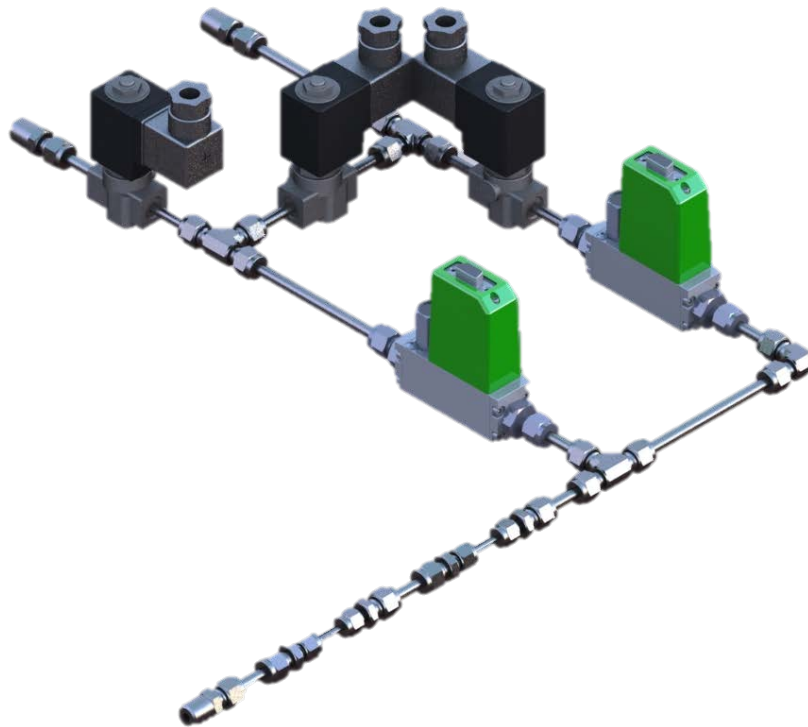
Oba vstupy a výstup jsem opatřil konektory „Male connector“ 768L\_6x1/4. Zvolil jsem tyto konektory jako vhodné řešení pro jednoduché připojení hadic od tlakových lahví, tak i hadice pro ofukování kalibrovaného plynového čidla. Všechny použité fitinky jsou značky Ham-Let v českém zastoupení společností D-Ex Instruments.



OBRÁZEK 15 – MALE CONNECTOR [9]

TABULKA 6 – PARAMETRY 768L [9]

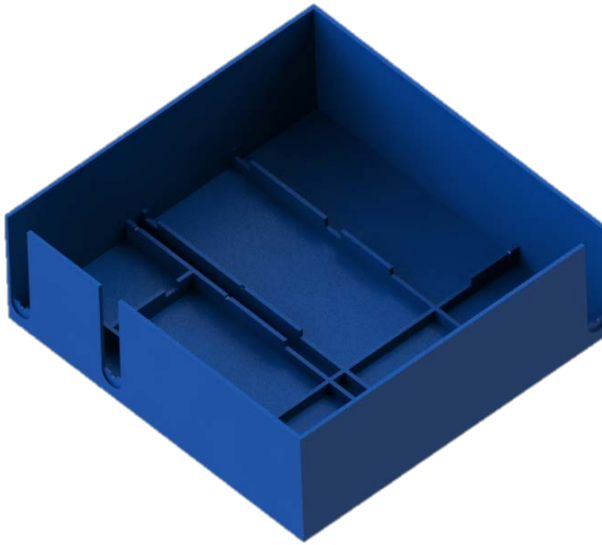
A	T	D	W	N	L	I
6 mm	¼ inch	4,8 mm	14 mm	30,5 mm	37,9 mm	15,3 mm



OBRÁZEK 16 – SMĚŠOVACÍ SOUSTAVA [AUTOR]

Ovládání elektromagnetických ventilů a průtokoměrů bude zajišťovat softwarové řízení pomocí převodníku signálu na ovládací desce, ke které budou průtokoměry i ventily připojené.

Směšovací zařízení sestavené podle obrázku 16 jsem umístil do krabice vyrobené z plastu pomocí svařování. Metoda výroby krabičky je principiálně obdobná jako při výrobě bazénů. Zvolil jsem pro výrobu krabičky polymerní materiál, protože zachovává poměrně vysokou pevnost při velmi malé hmotnosti. Této vlastnosti se velmi často využívá při konstruování různých obalů. Na dno krabičky budou navařeny tvarovaná žebra, která budou zajišťovat polohu směšovacího zařízení v krabičce. Je nutné, aby byl směšovač pevně ukotven na zařízení, aby nemohlo dojít k jeho poškození nebo ztrátě během převozu.



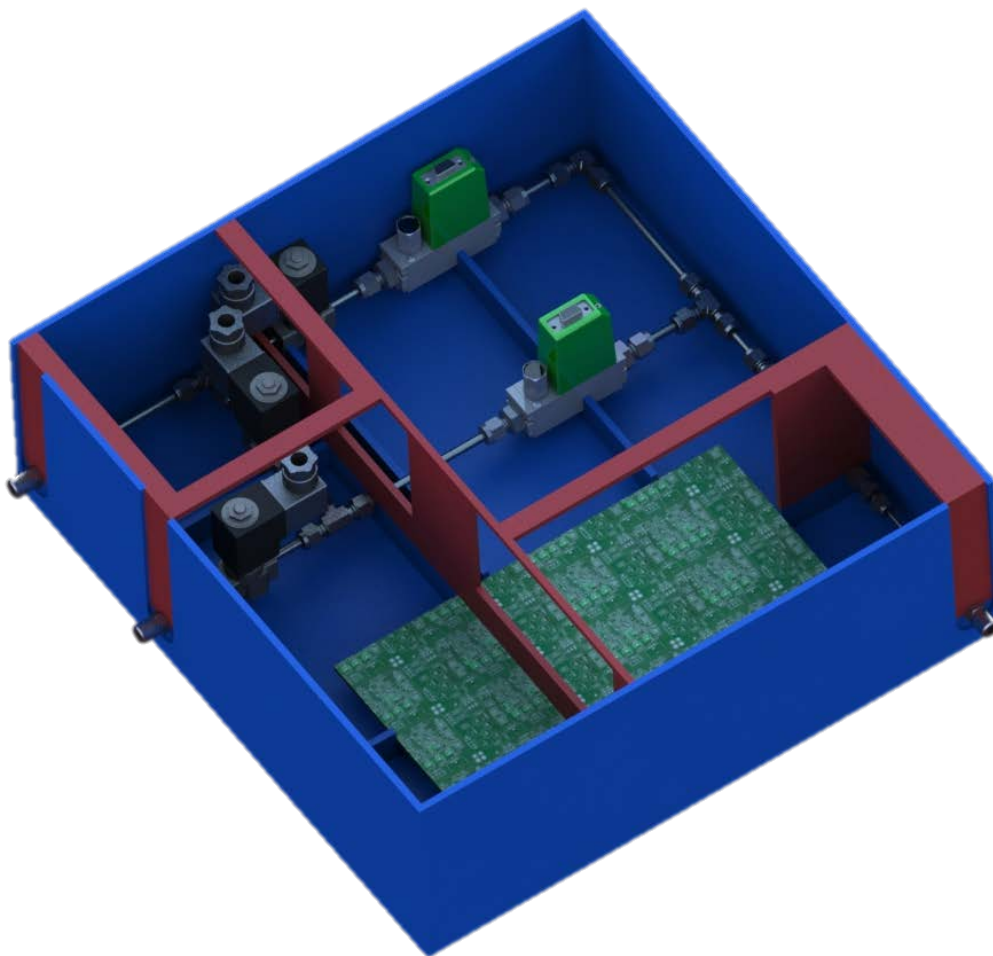
OBRÁZEK 17 – KRABICE SMĚŠOVAČE [AUTOR]



OBRÁZEK 18 – VÝSTUHA(PROTIKUS) [AUTOR]

Ovládací desku a celé směšovací zařízení upevňuje do žeber krabičky plastový protikus. Tento protikus je zobrazen na obrázku 18 a v 3D modelu byl pro názornost vymodelován z červeného plastu. Jelikož směšovací soustava i protikus jsou volně ložené v krabici, kvůli jednoduché manipulaci a montáži, tak bude polohu všech součástí zajišťovat víko, které obejmě celou krabici. Víko navrhuji přišroubovat skrz dvě protilehlé bočnice čtyřmi vruty s podložkou. Směšovací zařízení má konečné rozměry 455 mm X 470 mm.





OBRÁZEK 19 – SMĚŠOVAČ [AUTOR]

### 13.3 MANIPULAČNÍ VOZÍK

Ze zadání vyplývá požadavek na mobilitu mnou navrhovaného kalibračního zařízení. Na základě tohoto požadavku jsem se rozhodl umístit směšovač, popsáný výše, na manipulační vozík. V úvodu této kapitoly jsem uvedl několik počátečních kritérií, které je nutné vzít do úvahy při návrhu vozíku. Nejdůležitější je dbát na bezpečnost práce a manipulace s vozíkem. S tím přímo souvisí úvaha o stabilitě a ergonomii.

Při konstruování rudlů v praxi výrobci vycházejí z vlastních dlouholetých zkušeností a složitých ergonomických studií na základě ergonomických norem. Přehled všech ergonomických norem při konstrukci strojního zařízení obsahuje norma ČSN EN 13861:2003. Já jsem při konstruování vycházel pouze z jednoduché ergonomické úvahy, kdy jsem odečetl od výšky těla, výšku hlavy s krkem a délku paže.

$$h_{rudlu} = h_{tělo} + h_{boty} - h_{hlava} - h_{paže} - V_{ůle} = 1881 + 40 - 280 - 340 - 25 = 1276 \text{ mm} \quad (13.1)$$

Norma ČSN EN 547-3 udává doporučené antropometrické údaje, ze kterých jsem při výpočtu vycházel. Vypočtenou hodnotu jsem porovnal s výškami manipulačních vozíků různých výrobců. Vypočtená hodnota se od různých jiných výšek manipulačních vozíků lišila o desítky milimetrů.

Dalším důležitým aspektem pro stabilitu, po výšce, je také šířka vozíku, respektive rozchod kol. Tento rozměr vychází zejména z rozměrů láhví. Na vozík je třeba umístit dvě tlakové láhve o průměru 140 mm. U většiny klasických manipulačních vozíků pro tlakové láhve jsou láhve zesponu podpírané plechem, který ve stacionárním stavu vozíku leží na zemi. Já jsem zvolil kvůli stabilitě variantu, kdy plech pod láhvemi neleží na zemi při stacionárním stavu, ale kousek nad zemí. Celý manipulační vozík se tedy opírá na třech místech a to na obou kolech, jejichž osa leží až za rovinou rudlu, a na přední opěrné trubce.

Řešením otázky stability se eliminuje bezpečnostní riziko při stacionárním stavu manipulačního vozíku. Avšak při převozu láhví je potřeba také myslet na správné upoutání a tím znemožnění vypadnutí láhví z vozíku při převozu. Láhve jsem umístil na pevný plech o tloušťce 5 mm s plechovým lemováním proti vodorovnému posunutí, které je vysoké 45mm. Tato „vana“ zajistí udržení spodní části láhví ve vozíku i při velkém náklonu vozíku. Horní část láhví jsem upoutal držákem umístěným nad těžištěm láhví. Tento držák je nasazený na šroubu od kostry vozíku a utažený křídlovou maticí.

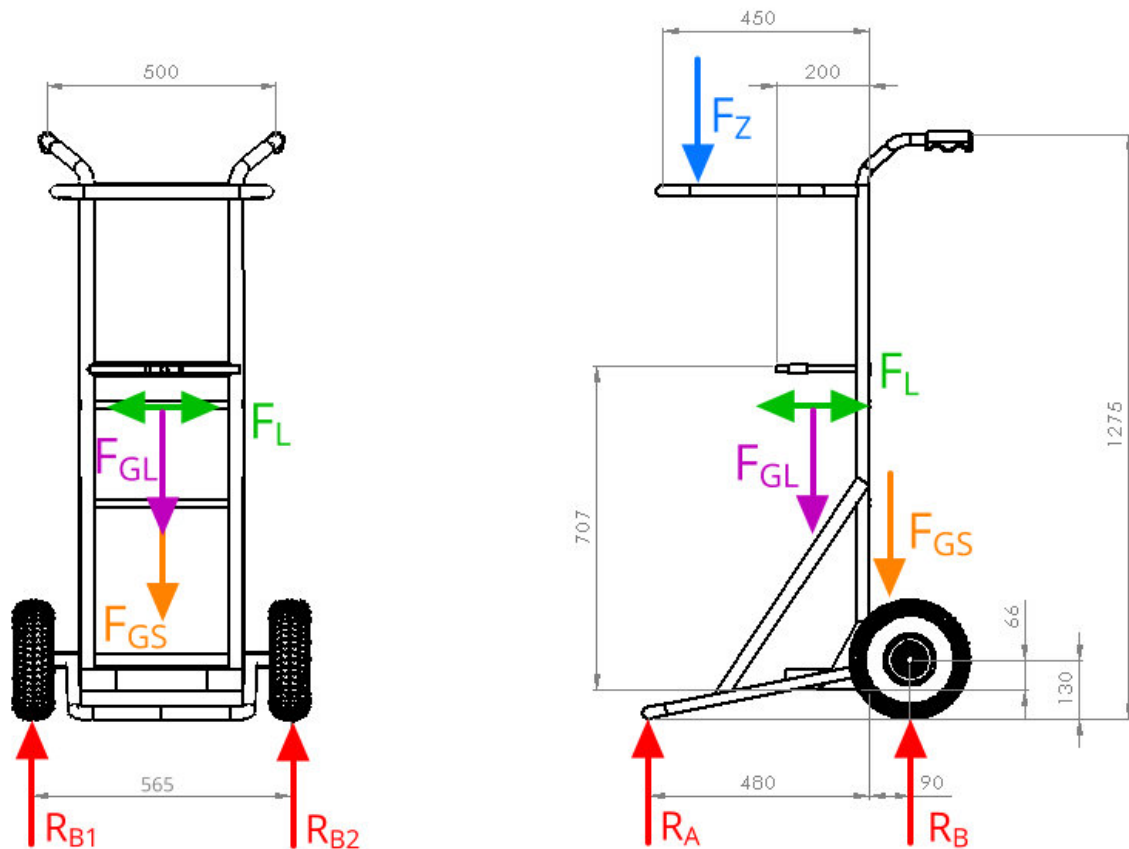


OBRÁZEK 20 – DRŽÁK [AUTOR]

Láhve se budou převážet i s manometry a ty je třeba chránit před uražením v případě pádu vozíku. Proto navrhuji v horní části vozíku vyrobit ochranný rám pro manometry. Ten by měl při neopatrné manipulaci obsluhy a následném pádu vozíku ochránit redukční ventily s manometry před

poškozením. Je nutné, aby obsluha vozíku dbala na správné natočení láhví tak, aby byly redukční ventily vždy skryty pod tímto ochranným rámem. Tento ochranný rám bude také sloužit pro umístění stolku, který bude popsán podrobněji níže.

Na základě úvah o stabilitě a bezpečnosti při převozu kalibračního zařízení lze sestavit jednoduchou představu o rozložení sil působících na vozík při stacionárním stavu.



OBRÁZEK 21 – ROZLOŽENÍ SIL [AUTOR]

$F_Z$  – Síla od zatížení stolku ovládacím zařízením a obsluhou

$F_L$  – Vodorovná síla působící od lahví

$F_{GL}$  – Gravitační síla tlakových lahví

$F_{GS}$  – Gravitační síla směšovače

$R_A$  – Reakční zatížení přední opěrné trubky

$R_B$  – Reakční síly působící na kola

Z obrázku 21 s vyobrazením působení sil lze vyvodit závěr, který uspokojivě a objektivně zaručuje bezpečnost a stabilitu vozíku, kdy působíště reakčních účinků jsou vždy vzdálenější od pomyslné osy manipulačního vozíku, než jsou působíště zatěžujících sil. Vodorovná síla  $F_L$  od tlakových lahví by měla být ve vodorovném postavení nulová, avšak je třeba si uvědomit její existenci v případě, že by vozík nestál na vodorovném povrchu.

Kostru vozíku jsem navrhl jako svařenec z ocelových bezešvých trubek válcovaných za tepla o průměru 25 mm a tloušťce 4 mm podle normy ČSN 42 5715. Na podpěry přední opěrné trubky jsem zvolil plochou tyč 30mm x 3 mm válcovanou za tepla podle ČSN EN 10058. Další ploché části jako je vana pro tlakové lahve jsou vyrobeny z plechu o tloušťce 5mm. Vozík se bude vyrábět svařováním koutových svarů pomocí metody MIG.



OBRÁZEK 22 – KOLO VOZÍKU [12]

Kola vozíku jsem vytipoval od české firmy Erba a to typ ER – 14100. Kola jsou na hřídeli pojištěna podložkou a závlačkou proti axiálnímu vysunutí. Celou kostru manipulačního vozíku bych navrhoval protikorozně pokovit nebo natřít a na rukojeti navléci gumové návleky pro lepší držení.



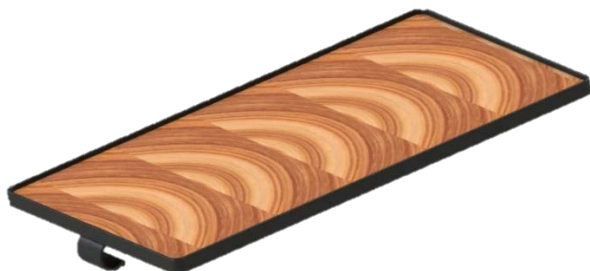
OBRÁZEK 23 – MANIPULAČNÍ VOZÍK [AUTOR]



OBRÁZEK 24 – KOSTRA VOZÍKU [AUTOR]

### 13.4 STOLEK

V horní části manipulačního vozíku jsem umístil, na ochranný rám redukčních ventilů, stolek, který bude sloužit pro umístění ovládacího notebooku nebo jiných věcí, které bude obsluha používat při kalibraci plynových čidel. Kvůli dobrému přístupu k montáži redukčních ventilů a tlakových lahví jsem navrhl stolek tak, aby se dal odklopit a stáhnout mezi řídítka do vertikální polohy. Tím vznikne maximální prostor pro obsluhu lahví bez omezení.



OBRÁZEK 25 – STOLEK POHLED SHORA [AUTOR]



OBRÁZEK 26 – STOLEK POHLED SDOLA [AUTOR]

Deska stolku je vyrobena z laminované desky a boky jsou olemovány plastovou lištou, která bude chránit obsluhu kalibračního zařízení před poraněním o roh stolku a taky bude zamezovat pádu věcí položených na stolku, tím, že je plastová lišta vyšší než tloušťka stěny desky.

Vlastní sklápění desky stolku zajišťuje jezdec. Jezdec je kovový díl ve tvaru drážky, který je zobrazen na obrázku 28. Skrz tuto drážku se třeba vést trubku kostry manipulačního vozíku. Proto je nutné na jezdec myslet již při svařování kostry vozíku. Následně se jezdec přišroubuje k spodní části desky stolku. Nakonec se ke stolku přišroubuje plastový háček, který bude upevňovat stolek na ochranném rámu. Po upevnění tlakových lahví a redukčních ventilů do manipulačního vozíku se stolek ze svislé polohy překlápí zpět do vodorovné a položí na ochranný rám. Vodorovným tahem zpět mezi řídítka se zacvakne plastový háček o trubku a zajistí tak stolek proti pohybu při převozu.



OBRÁZEK 27 – HÁČEK [AUTOR]



OBRÁZEK 28 – JEZDEC [AUTOR]

### 13.5 CELKOVÉ USPOŘÁDÁNÍ VOZÍKU

Výroba mobilního kalibračního zařízení bude začínat svařováním kostry manipulačního vozíku. Ke kostře se namontují kola na hřídeli a pojistí závlačkami. Dále se na zadní straně vozíku přišroubuje sestavené směšovací zařízení. Do vany se umístí postupně obě tlakové láhve a upevní se držákem s křídlovou maticí. Na láhve se namontují redukční ventily s manometry a natočí se tak, aby byly chráněny ochranným rámem. Ventily se připojí k směšovacímu zařízení teflonovými hadicemi. Na jezdec se přišroubuje připravený stolek s háčkem a vodorovným tahem zaaretuje. Dalším krokem bude připojení ovládacího notebooku k směšovacímu zařízení. Posledním krokem bude otevření tlakových láhví a spuštění kontrolního směšování.



OBRÁZEK 29 – KONEČNÉ USPOŘÁDÁNÍ KALIBRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ [AUTOR]

## 14 KALIBRACE ČIDEL

V této kapitole jsou uvedeny zváženy možné chyby při měření a kalibraci čidel s tímto zařízením, které se mohou vyskytnout v průběhu tohoto měření a kalibrace čidel. Vycházejí z principů proudění plynů a chování plynů při nízkých koncentracích (ppb - ppm).

Jako každý přístroj na světě, podléhá i tento všem fyzikálním zákonům, musí se tedy brát do úvahy vlivy, které snižují účinnost přístroje. V tomto případě se hned na začátku projeví nejprve nejistota koncentrace v tlakové láhvi. Jelikož se jedná o kalibrační přístroj, je pro zařízení velice důležitá, protože má zásadní vliv i na výslednou koncentraci. Další chybou, se kterou se musí také počítat, je nepřesnost průtokoměrů při různém otevření. Další věcí, kterou je třeba brát na zřetel, je materiál, druh a velikost potrubí v mísícím zařízení. Tato chyba se jen těžko určuje. Eliminace této chyby vlastního provedení a konstrukce zařízení se dá provést pouze na základě zkušeností pracovníků popř. firem, kteří již s podobným zařízením pracovali, popřípadě jen konstruovali. Snažil jsem se konstrukci uzpůsobit tak, aby mnou získané poznatky v ní byly zahrnuty. Stručně nyní popíši jednotlivé chyby a nejistoty měření.

### 14.1.1 CHYBA KONCENTRACE V LÁHVI

V tomto případě chybu koncentrace nelze ovlivnit. Je dána od dodavatele tlakových láhví, zde od firmy Linde Gas a.s. Z jejich podkladů jsem zjistil, že relativní nejistoty dodávaných kalibračních plynů se pohybují v rozmezí 0,5-0,8% a nepřesahují 1%.

Tato chyba koncentrace se samozřejmě projeví ve výsledné koncentraci následovně: Pokud se bude míchat plyn o relativní nejistotě koncentrace v lahvi 1%, pak i výsledná koncentrace bude mít relativní nejistotu 1%, pokud by se nevyskytly další ztráty či chyby v zařízení. Pokud ano, relativní nejistota se zvýší.

### 14.1.2 CHYBA PRŮTOKOMĚRŮ

Chyba průtokoměrů ovlivňuje průtok a tedy i výslednou koncentraci. Na základě použitých výpočtů a uspořádání je samozřejmě nejistota výsledné koncentrace závislá na nejistotě průtoku obou průtokoměrů. Je tedy spojitosť koncentrace a průtoku plynu. Velikost nejistoty průtoku těchto průtokoměrů je především závislá na velikosti tohoto průtoku. Pokud se bude tedy míchat plyn se vzduchem, tak pro velmi malé koncentrace je průtokoměr plynu vždy otevřen pouze na několik desetin nebo jednotek procent z maximálního otevření průtokoměru. Chyba takového průtokoměru plynu bude o mnoho vyšší než u průtokoměru vzduchu, který je otevřen na desítky procent a bude proto zásadně ovlivňovat přesnost celého procesu. Do budoucího řídicího programu

jsem proto zvolil kompromis takový, že se průtokoměr G nesmí zavírat méně než na 0,5%, přičemž už bude poměrně vysoká relativní nejistota (cca 5,3%). Aby byla situace únosná, bylo by třeba průtokoměry při regulaci nezavírat více než zhruba na 5%. Nebylo by ale dosaženo pak co možná nejmenších koncentrací. Přesnost průtokoměrů dle technické specifikace výrobce je uvedena v následující tabulce. Je vidět, že při otevření průtokoměru pod 10% vzrůstá relativní nejistota strměji.

TABULKA 7 – PŘESNOSTI PŘI OTEVŘENÍ PRŮTOKOMĚRŮ [11]

Otevření průtokoměrů (% FS)	Přesnost
10%-100%	0,8% z nastavené hodnoty
<10%	0,08% z plně otevřeného průtokoměru

Pro demonstraci si zvolím příklad:

Vezmu například koncentraci plynu  $1,6 \cdot 10^{-3} C_p$ . Průtokoměr plynu G bude otevřen pouze na 0,5% FS (jmenovitého rozsahu). Průtokoměr vzduchu bude otevřen na 0,75% FS. Nepřesnost průtoku plynu tedy dle výše uvedené tabulky bude  $8,64 \cdot 10^{-7} \text{ g/s}$ .

Plný průtok (100% FS) průtokoměrem G je přibližně  $10,8 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ . Plný průtok (100% FS) průtokoměrem V je přibližně  $0,432 \text{ g/s}$ . Při ustáleném průtoku budou tedy oba průtokoměry otevřeny takto:

G : 0,5% FS, tj. průtok  $5,409 \cdot 10^{-6} \text{ g/s}$  jeho přesnost bude  $8,639 \cdot 10^{-7} \text{ g/s}$

V : 0,75% FS, tj. průtok  $3,24 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$  jeho přesnost bude  $3,456 \cdot 10^{-4} \text{ g/s}$

Výsledný průtok je  $\dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_V = 3,2454 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$  (14.1)

Stanovím nejistotu výsledného průtoku:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{u_{\dot{m}G}^2 + u_{\dot{m}V}^2} \quad (14.2)$$

Pro nejistoty při normálním rozdělení bude platit:

$$u_{\dot{m}G} = \frac{8,639 \cdot 10^{-7}}{3} = 2,88 \cdot 10^{-7} \text{ g/s} \quad (14.3)$$

$$u_{\dot{m}V} = \frac{3,456 \cdot 10^{-4}}{3} = 1,152 \cdot 10^{-4} \text{ g/s} \quad (14.4)$$



Dosadím a vypočítám nejistotu výsledného průtoku:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{(2,88 \cdot 10^{-7})^2 + (1,152 \cdot 10^{-4})^2} \quad (14.5)$$

$$u_{\dot{m}} = 1,1520036 \cdot 10^{-4} \text{ g/s}$$

Vypočítám relativní nejistotu výsledného průtoku:

$$u_{r\dot{m}} = \frac{1,1520036 \cdot 10^{-4}}{3,2454 \cdot 10^{-3}} = 0,0355 ; \text{ tj. } 3,55\% \quad (14.6)$$

Relativní nejistota průtoku průtokoměru G (plyn):

$$u_{r\dot{m}G} = \frac{2,88 \cdot 10^{-7}}{5,409 \cdot 10^{-6}} = 0,053 ; \text{ tj. } 5,3\% \quad (14.7)$$

Výstupní koncentrace je dána vztahem:

$$C_{OUT} = \frac{\dot{m}_G \cdot C_p}{\dot{m}} \quad (14.8)$$

Relativní nejistota výstupní koncentrace bude pak tedy dána vztahem:

$$u_{rCout} = \sqrt{u_{r\dot{m}G}^2 + u_{r\dot{m}}^2 + u_{rCp}^2} \quad (14.9)$$

Za nejistotu koncentrace v láhvi budu dle údajů výrobce počítat 0,8%

$$u_{rCp1} = 0,008$$

Po dosazení do vzorce dostanu

$$u_{rCout} = \sqrt{(0,053)^2 + (0,0355)^2 + (0,008)^2} \quad (14.10)$$

$$u_{rCout} = 0,0643 ; \text{ tj. } 6,43\%$$

Zvolím ještě druhý případ, jak se změní nejistota výsledné koncentrace při otevírání průtokoměru vzduchu V na hodnoty pod 0,5% FS, tj. při potřebě rozsahu koncentrací  $0,333 C_p - C_p$ .

Vezmu tedy například koncentraci plynu  $0,5 C_p$ . Průtokoměr plynu G bude tedy otevřen na 100% FS (plný rozsah). Průtokoměr vzduchu bude tak otevřen pouze na 0,25% FS. Nepřesnost průtoku plynu tedy dle výše uvedené tabulky (0,8% z nastavené hodnoty) bude tedy  $8,64 \cdot 10^{-6} \text{ g/s}$ .

Plný průtok (100% FS) průtokoměrem G je přibližně  $10,8 \cdot 10^{-3} \text{ g/s}$ . Plný průtok (100% FS) průtokoměrem V je přibližně  $0,432 \text{ g/s}$ . Při ustáleném průtoku budou tyto průtokoměry otevřeny následně:

$$\begin{aligned} G : 100\% \text{ FS, tj. průtok } 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ g/s} & \quad \text{jeho přesnost bude } 8,64 \cdot 10^{-6} \text{ g/s} \\ V : 0,25\% \text{ FS, tj. průtok } 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ g/s} & \quad \text{jeho přesnost bude } 3,456 \cdot 10^{-4} \text{ g/s} \\ \text{Výsledný průtok je } \dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_V = 2,16 \cdot 10^{-3} \text{ g/s} & \quad (14.10) \end{aligned}$$

Stanovím nejistotu výsledného průtoku:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{u_{\dot{m}G}^2 + u_{\dot{m}V}^2} \quad (14.11)$$

Pro nejistoty při normálním rozdělení bude platit:

$$u_{\dot{m}G} = \frac{8,64 \cdot 10^{-6}}{3} = 2,88 \cdot 10^{-6} \text{ g/s} \quad (14.12)$$

$$u_{\dot{m}V} = \frac{3,456 \cdot 10^{-4}}{3} = 1,152 \cdot 10^{-4} \text{ g/s} \quad (14.13)$$

Dosadím a vypočtu nejistotu výsledného průtoku:

$$u_{\dot{m}} = \sqrt{(2,88 \cdot 10^{-6})^2 + (1,152 \cdot 10^{-4})^2} \quad (14.14)$$

$$u_{\dot{m}} = 1,1523599 \cdot 10^{-4} \text{ g/s}$$

Vypočítám relativní nejistotu výsledného průtoku:

$$u_{r\dot{m}} = \frac{1,1523599 \cdot 10^{-4}}{2,16 \cdot 10^{-3}} = 0,0533 ; \text{ tj. } 5,33\% \quad (14.15)$$

Relativní nejistota průtoku průtokoměru G (plyn):

$$u_{r\dot{m}_G} = \frac{2,88 \cdot 10^{-6}}{1,08 \cdot 10^{-3}} = 2,66 \cdot 10^{-3} ; tj. 0,266\% \quad (14.16)$$

Výstupní koncentrace je dána vztahem:

$$C_{OUT} = \frac{\dot{m}_G \cdot C_p}{\dot{m}} \quad (14.17)$$

Relativní nejistota výstupní koncentrace bude pak tedy dána vztahem:

$$u_{rCout} = \sqrt{u_{r\dot{m}_G}^2 + u_{r\dot{m}}^2 + u_{rCp}^2} \quad (14.18)$$

Za nejistotu koncentrace v láhvi budu dle údajů výrobce počítat 0,8%

$$u_{rCp1} = 0,008$$

Po dosazení do vzorce dostávám

$$u_{rCout} = \sqrt{(0,00266)^2 + (0,0533)^2 + (0,008)^2} \quad (14.19)$$

$$u_{rCout} = 0,054 ; tj. 5,4\%$$

Jak je patrné z těchto dvou příkladů, je výsledná nejistota výstupní koncentrace při malém otevření průtokoměru vzduchu pod 0,5% FS ještě příznivější než v prvním příkladu. Ze vzorců, z tohoto názorného příkladu a z přiložené tabulky je tedy možno vidět, že nepřesnost průtoku plynovým průtokoměrem G má zásadní a klíčový vliv na přesnost celého směšovacího zařízení. Nejistota průtoku vzduchu v tomto případě není tedy tolik rozhodující. Je to dáno vzorcem pro výpočet výsledné koncentrace. Jít tedy ještě na menší průtoky průtokoměrem plynu než 0,5% FS již není rozumné vzhledem k následné vysoké chybě měření. Naštěstí v mém případě pro průtokoměry, které jsem zvolil, s těmito parametry, se dostávám teoreticky na koncentrace řádově ppb i při tom, kdy nemusím zavírat průtokoměr plynu na méně než 0,5% FS.

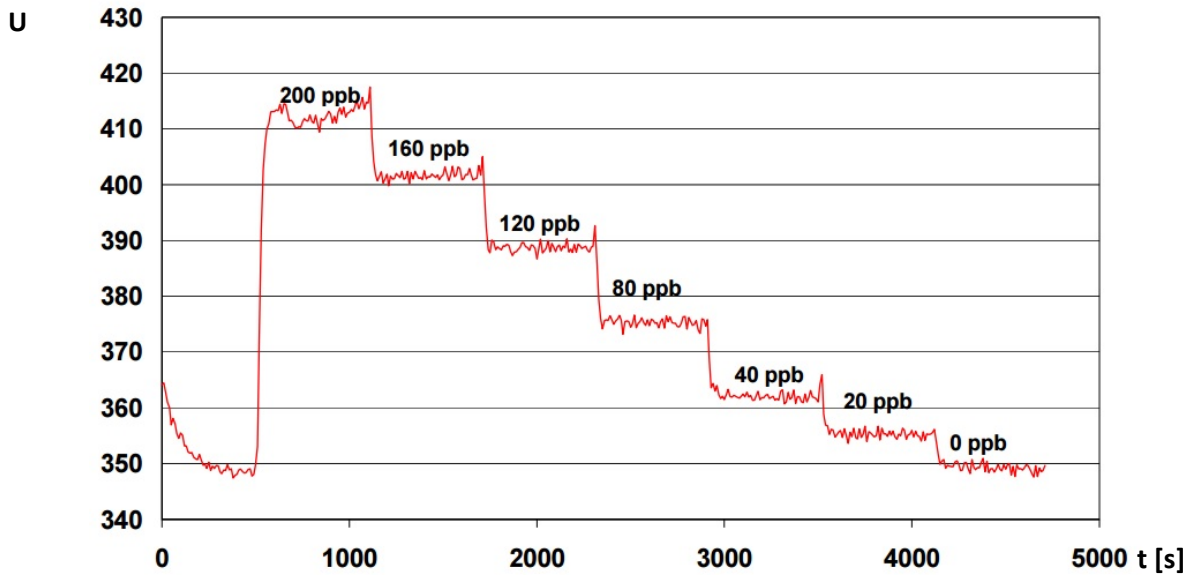
TABULKA 8 – RELATIVNÍ NEJISTOTY VÝSTUPNÍ KONCENTRACE [AUTOR]

Výstupní koncentrace	Otevření průtokoměrů		$u_{rInG}$ [%]	$u_{rCout}$ [%]
	G [%FS]	V [%FS]		
$C_p$	100	0	0,266	0,8
$0,5 C_p$	100	0,25	0,266	5,4
$0,33 C_p$	100	0,5	0,266	3,7
$1,66 \cdot 10^{-3} C_p$	0,5	0,75	5,32	6,43
$1,2 \cdot 10^{-5} C_p$	0,5	100	5,32	5,38
Nepovolený rozsah koncentrací	0,4	100	6,66	6,7
	0,3	100	8,8	8,9
	0,2	100	13,3	13,4
	0,1	100	26,6	26,7

#### 14.1.3 KALIBRAČNÍ KŘIVKY

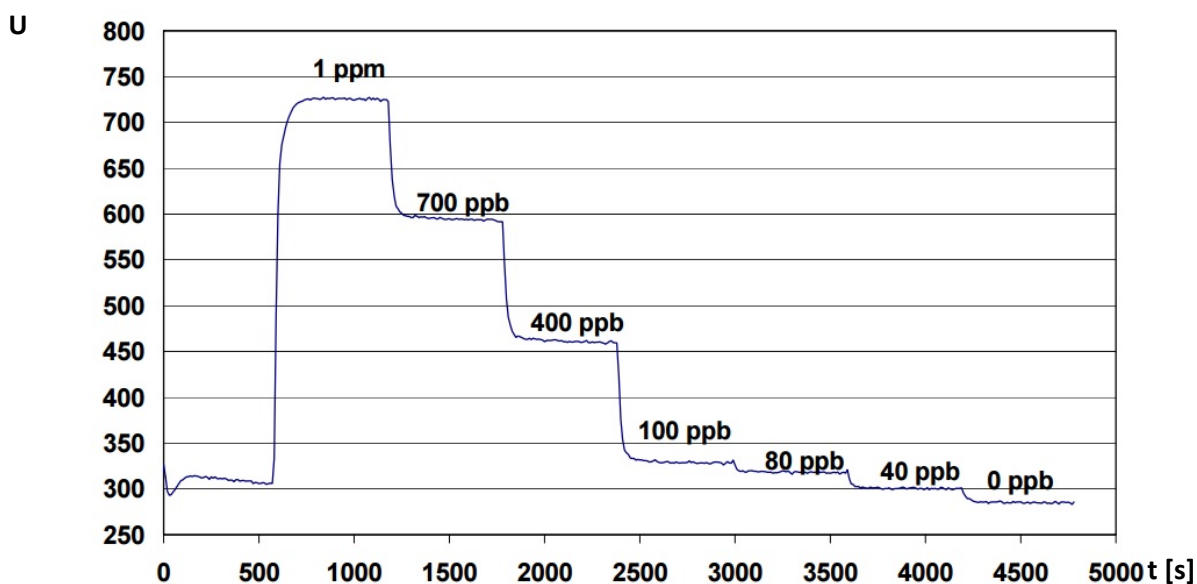
Zde jsou uvedeny závislosti napětí na čase při určité koncentraci. Jsou uvedeny pouze pro ilustraci, tedy jsou to pouze orientační závislosti naměřené od výrobce čidel. Takto asi by měly grafy vypadat po reálném měření.

Čidla jsou závislá také na teplotě, při které se proměřují. V našem případě by se teplota neměla měnit, protože celý přístroj je umístěn v místě umístění čidel a pro stanovení spolehlivého a správného měření bude nutné zajistit, aby se pracovní podmínky neměnily. Za tímto účelem se také na zařízení provádí měření teploty a vlhkosti, aby bylo možné stanovit podmínky, za kterých bylo měřeno. V této místnosti, kde bude kalibrování čidel probíhat, bychom měli být schopni zajistit poměrně stálou teplotu. Neměl by být problém rozmezí  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Toto rozmezí, s ohledem na grafy uváděné výrobcem, by mělo být postačující. [10]

GRAF 4 – ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA ČASE PRO PLYN SO<sub>2</sub> [10]

Na tomto grafu je vyobrazena závislost napětí v milivoltech na čase v sekundách pro čidlo s měřeným plynem SO<sub>2</sub>. Napětí je na ose y (mV), čas na ose x (s). Na grafu je vyobrazeno kolísání napětí při koncentracích od 200 ppb po 0 ppb. Podle přesného kolísání lze z grafu usuzovat, že přístroj, na kterém byla čidla proměřována, byl velmi přesný. Tím je myšlen kontinuální proud a přesné dávkování měřeného plynu na proměřované koncentrace. [10]

Na dalším grafu je vyobrazena stejná závislost pro stejné čidlo s tím rozdílem, že byl použit plyn CO.



GRAF 5 – ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA ČASE PRO PLYN CO [10]

Cílem měření je zkontrolovat funkčnost a reakci čidla na různé koncentrace měřeného plynu, proměřit křivku napětí na čase při určité koncentraci a sledovat změny napětí. Samozřejmě vždy bude napětí kolísat. Je to z důvodu malé koncentrace a citlivých čidel. V koncentracích, o kterých se mluví, se jedná prakticky o vzduch s několika molekulami měřeného plynu. Čidlo reaguje pouze, když zjistí přítomnost tohoto plynu a ten se někdy objeví a někdy ne, proto napětí stále kolísá. V jednu sekundu může třeba na čidle být 20 molekul plynu na miliardu molekul vzduchu a následující sekundu už to může být třeba 30 molekul plynu na miliardu molekul vzduchu při stejném proudění a nastavené koncentraci v přístroji. Napětí by v ideálním případě pokud možno mělo kolísat pouze v rozmezí nejistoty koncentrace kalibračního zařízení.

Skutečné naměřené hodnoty bohužel není možné v této chvíli posoudit, protože zařízení není reálně postaveno. Předpokládám vzhledem k tomu, že jde o vylepšený systém velkého kalibračního zařízení z mé minulé diplomové práce, že výsledky měření a kalibrace čidel by mohly být podobné. V současné době je bohužel nemám k dispozici a ani měření není předmětem této diplomové práce. Samotná praxe samozřejmě sama ukáže, zda se budou předpokládané teoretické hodnoty shodovat s prakticky naměřenými.

## 15 PŘEDPOKLADY VYUŽITÍ ZAŘÍZENÍ

Předpokládám, že by zařízení mohlo najít širší uplatnění v provozech, kde je potřeba častěji kontrolovat plynová čidla, kde musí být zaručena velká spolehlivost zařízení v provozu proti výskytu nežádoucích plynů a to i v extra malých koncentracích. Zařízení je navrženo, aby nebylo drahé, takže by mohlo být dostupné pro zákazníky, kteří by si mohli tak kontrolovat na místě v provozu všechny čidla průběžně a nebyli odkázáni na to, že plynová čidla musí z provozu vymontovávat a posílat na přeměrování do laboratoří na velké (nemobilní) kalibrační zařízení. Domnívám se, že nemalou výhodou této konstrukce je, že je zařízení navrženo prakticky univerzálně, tedy nejen na extra malé koncentrace, a záleží na uživateli, jaký druh plynu a jakou koncentraci tlakové láhve zvolí. Podle toho bude zařízení schopno namíchat požadovanou směs. Nevýhodou samozřejmě je, že navržené mobilní zařízení je postavené na míchání pouze jednoho kalibračního plynu se vzduchem, ale zákazník si do něj zase může zakoupit tlakovou láhev s plynem o koncentraci, kterou bude potřebovat a používat ke kontrolám a kalibraci plynových čidel (senzorů). Zákazník bude akorát omezen ve výběru plynu tím, aby plyn nereagoval na vodní páry, jelikož zařízení je mobilní a není v něm tedy počítáno s žádným odvlhčovačem.

## 16 ZÁVĚR

Úkolem a cílem projektu, kterým se zabývá tato diplomová práce, bylo navrhnout a vytvořit zařízení, které bude schopno „v terénu“ kalibrovat a kontrolovat plynová čidla. Zásadní věcí celého kalibrovacího přístroje bylo vymyslet, jak nejefektivněji namíchat potřebnou směs plynu pro kalibrování v co nejmenších koncentracích. Cílem této práce bylo tedy nejprve shrnout stávající existující metody míchání a kalibrování plynových čidel na malé koncentrace, navrhnout způsob a princip takového zařízení a dále pak navrhnout výpočet a způsob řízení, podle jakého se bude řídit míchání plynu se vzduchem a umožnit tak programátorovi vytvořit jednoduchý řídicí program. Předmětem této diplomové práce nebylo navržení elektrického zapojení (zdroj, interface mezi PC, průtokoměry a elektro-ventily, měření teploty a vlhkosti, atd.) ani naprogramování řídicího programu do PC.

Přístroj od začátku jeho vzniku prošel několika vývojovými stádii. První návrh byla pouhá uzavřená nádoba s čidly a pomocí elektricky ovládané stříkačky se vstříkla směs plynu. Inspiroval jsem se u kolegů v Anglii, kteří postavili uzavřený přístroj pro kalibraci, ale jeho výsledky byly pro tento případ nedostačující. Důvodem přehodnocení tohoto nápadu bylo špatné nebo vůbec žádné proudění. Při takovém řešení by plynová čidla nenaměřila vůbec nic při požadovaných velmi malých koncentracích. Z těchto důvodů byl navržen jiný způsob řešení a to uspořádání pomocí hmotnostních průtokoměrů, které umožní relativně přesné a stálé proudění. Tak bylo zkonstruováno velké stacionární kalibrační zařízení pro kalibrování současně dvou ze čtyř různých kalibračních plynů najednou (viz minulá diplomová práce). Z této minulé diplomové práce jsem pro tuto svoji diplomovou práci použil základní myšlenku míchání plynů pomocí hmotnostních průtokoměrů, která se mi v současnosti jeví jako nejlepší způsob míchání a nebylo nutné od tohoto způsobu tedy v žádném případě upouštět. Dle mých poznatků při minulém řešení jsem ale upravil řešení průměrů a materiálu propojovacích trubiček a zejména zjednodušení a zmenšení směšovače, v neposlední řadě i použití vhodnějších průtokoměrů, kterými se směs naředí na teoretickou koncentraci pouze v jednom směšovači. To by samozřejmě mělo vylepšit chování zařízení při měření a zmenšit pravděpodobnost zachytávání molekul plynu v zařízení a následném utržení a vypuštění shluku molekul najednou. Jak se tento záměr podařilo vyřešit, to by asi ukázala teprve praxe. Ale tím, že jsem využil při řešení poznatků pana Ing. Siarhei Skobli, PhD., VŠCHT Praha, který se podobným zařízením na míchání plynů zabývá a má bohaté zkušenosti, věřím, že by zařízení po realizaci pracovalo správně. Tyto zkušenosti jsem se všechny pokusil do řešení zahrnout, tak si myslím, že se podařilo tyto problémy co nejvíce vyeliminovat.



Přínosem této práce je zkonstruovat zařízení pro kalibraci a zkoušení čidel na místě u zákazníka a s tím související stanovení řešení způsobu míchání plynů na malé koncentrace, vymyšlení a stanovení základních podpůrných výpočtů pro řídicí program a tedy základní návrh možné konstrukce malého mobilního zařízení pro toto míchání a následně tedy pro kalibrování čidel včetně základní výkresové dokumentace. Nakonec pak také odhad možných výsledků měření a odhad nejistot měření, které přitom nastávají. V práci je pak také navržení, shrnutí a popsání některých jednotlivých důležitých komponent, které jsou na zařízení použity.

Zvolil jsem ve výpočtech pro řídicí program, že limitní minimální průtok průtokoměru plynu bude omezen na 0,5% FS, čímž je pak relativní nejistota výstupní koncentrace okolo 5%. Hodnoty kolem těchto několika procent jsou snad ještě pro toto zařízení přípustné, pokud bych ale povolil menší procentuální otevírání průtokoměru plynu, dostal bych se do velmi vysokých procentuálních chyb, řádově okolo desítek procent. To by příliš ovlivnilo chybu výsledné koncentrace. Naštěstí se ale podařilo najít vhodnou kombinaci průtokoměrů, takže není nutno zavírat průtokoměr plynu na tak malé hodnoty i při udržení teoreticky extrémně malých koncentrací. Problémem je, že není k dispozici žádný přístroj na přesné měření výsledné koncentrace a tak se je nutné spolehnout na to, co toto zařízení umožní namíchat za směs a snažit se co nejvíce eliminovat či zmenšit nejistoty měření a míchání plynů. Zařízení je navrženo obecně, to znamená, že bude pracovat s tlakovými láhvemi o prakticky libovolných koncentracích. Při větších koncentracích v láhvi s plynem se samozřejmě nedá pak už ale dostat na extrémně malé výstupní koncentrace. Jako příklad řešení jsem použil stejné plyny, jaké byly dodány firmou Linde Gas a.s. pro minulé velké kalibrační zařízení. V zařízení není řešena otázka plynů, které jsou náchylné na vlhkost, tam by se pak musel řešit ještě odvlhčovač. Ale to je spíše otázka pro větší nemobilní zařízení. Toto zařízení je třeba, aby bylo co nejjednodušší a tedy i nejlépeší pro převoz a přitom v rámci možností spolehlivě přesné a relativně levné.

Uvedl jsem také i dva výsledné grafy závislosti napětí na čase při určité koncentraci, jak by měly při měření asi vypadat. Předpokládám asi mírné kolísání z důvodu použitého materiálu a nejistot průtoků, zejména plynového průtokoměru G a tedy nejistoty výsledné koncentrace. Pokud by šlo o veliké koncentrace, nebyl by to asi tak veliký problém. V tomto případě se ale koncentrace pohybuje v rozmezí ppb – ppm. U takovéto koncentrace každá zachycená molekula je potenciální nepřesnost. Molekula či shluk molekul se uchytí na stěně buď směšovače, nebo přívodního vedení, chvíli tam zůstane a po nějakém čase se vlivem proudění může stát, že se odlepí a přidá se do proudu. Tomuto jevu jsem se tedy snažil, při mísení plynů na malé koncentrace, předejít. Do jaké míry se mi to podařilo, to by ukázala praxe, věřím ale tomu, že jsem použil do tohoto zařízení všech svých nejnovějších poznatků a nabytých informací, takže by zařízení mělo správně pracovat k plné spokojenosti uživatele.

## 17 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Top 5 Methods for Generating Calibration Gas Standards. *Owlstone nanotech* [online]. 2015 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://www.owlstonenanotech.com/calibration-gas-generator/methods>
- [2] Gas Sensor Calibration. *Permapure* [online]. 2013, č. 11 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://www.permapure.com/wp-content/uploads/2013/01/calibration.pdf>
- [3] Prof. Ing. JEŽEK csc., Jan, Ing. Blanka VARÁDIOVÁ csc. a Ing. Josef ADAMEC csc.. *Mechanika tekutin*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2000.
- [4] *Elektromagnetické ventily VZWD, přímo řízené: FESTO* [online]. **2016**, 18 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: [https://www.festo.com/cat/cs\\_cz/data/doc\\_cs/PDF/CZ/VZWD\\_CZ.PDF](https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/VZWD_CZ.PDF)
- [5] Stavová rovnice reálného plynu. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2014 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/599-stavova-rovnice-realneho-plynu>
- [6] Stavová rovnice. *Artemis* [online]. 2014 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: [http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199\\_4\\_1%20Stavova%20rovnice.pdf](http://artemis.osu.cz:8080/artemis/uploaded/199_4_1%20Stavova%20rovnice.pdf)
- [7] Chemické veličiny. *Test.gymnizidlo* [online]. 2014 [cit. 2015-01-09]. Dostupné z: <http://test.gymnizidlo.cz/supl/1422.pdf>
- [8] *C200/2 Dvoustupňový redukční ventil: Linde* [online]. **2016**, 2 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: [http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/C200\\_2\\_179\\_15344.pdf?v=2.0](http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/C200_2_179_15344.pdf?v=2.0)
- [9] Compression tube fittings Let-Lok: katalog. *Ham-Let* [online]. , 90 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: [http://dex.cz/dokumenty/hamlet/letlok\\_tube\\_fittings.pdf](http://dex.cz/dokumenty/hamlet/letlok_tube_fittings.pdf)
- [10] Alphasense [online]. Great Notley Essex CM77 7AA United Kingdom: Alphasense, 2016 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/products/miniatures/>
- [11] SFC4100 Data Sheet. In: Sensirion [online]. Staefa ZH, Švýcarsko: Sensirion, 2016 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: [https://www.sensirion.com/fileadmin/user\\_upload/customers/sensirion/Dokumente/Mass\\_Flow\\_Controller/Sensirion\\_Mass\\_Flow\\_Controllers\\_SFC4000\\_Datasheet\\_V2.6.pdf](https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/Mass_Flow_Controller/Sensirion_Mass_Flow_Controllers_SFC4000_Datasheet_V2.6.pdf)
- [12] Náhradní kolo pro rudl. *Náradí Erba* [online]. Jeseník: Erba, 2016 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://www.naradi-erba.cz/rudliky/1317-nahradni-kolo-pro-rudl-9003324140996.html>
- [13] Fyzika 20: (termodynamika). 2., přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 9788001017289.

[14] Maximální přesnost pro měřitelný úspěch. LindeGas [online]. Praha: LindeGas, 2016 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: [http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/1%20max%20presn%20C79\\_86192.pdf](http://www.linde-gas.cz/internet.lg.lg.cze/cs/images/1%20max%20presn%20C79_86192.pdf)

[15] Základy chemické termodynamiky [online]. Praha, 2007 [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: <http://ufch.vscht.cz/files/uzel/0013864/ZaklChemTermodynamiky.pdf>. Skriptum. VŠCHT.

## 18 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – schéma základního uspořádání [autor].....	19
Obrázek 2 – schéma uspořádání zařízení [autor].....	22
Obrázek 3 – princip směšovacího dílu [autor].....	29
Obrázek 4 – intervaly [autor] .....	31
Obrázek 5 – schéma směšovacího dílu.....	38
Obrázek 6 – schéma pro rovnici kontinuity [3] .....	38
Obrázek 7 – schéma pro bernoulliho rovnici [3].....	39
Obrázek 8 – redukční ventil c200/2 [8] .....	42
Obrázek 9 – redukční ventil c200/2 – náčrt [8].....	42
Obrázek 10 – schéma pro výpočet délky trubky [autor] .....	42
Obrázek 11 – reducing union [9] .....	43
Obrázek 12 – union tee [9].....	43
Obrázek 13 – elektromagnetický ventil [10] .....	44
Obrázek 14 – průtokoměr sensirion [11] .....	44
Obrázek 15 – male connector [9].....	46
Obrázek 16 – směšovací soustava [autor].....	46
Obrázek 17 – krabice směšovače [autor] .....	47
Obrázek 18 – výstuha (protikus) [autor] .....	47
Obrázek 19 – směšovač [autor].....	48
Obrázek 20 – držák [autor].....	49
Obrázek 21 – rozložení sil [autor].....	50
Obrázek 22 – kolo vozíku [12] .....	51
Obrázek 23 – manipulační vozík [autor].....	51
Obrázek 24 – kostra vozíku [autor] .....	51
Obrázek 25 – stůl pohled shora [autor].....	52
Obrázek 26 – stůl pohled zdola [autor] .....	52
Obrázek 27 – háček [autor] .....	52
Obrázek 28 – jezdec [autor] .....	52
Obrázek 29 – konečné uspořádání kalibračního zařízení [autor].....	53

## 19 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – tabulka rozsahu teoreticky dosažitelných koncentrací.....	35
Tabulka 2 – koncentrace plynů v láhvích [štítek na tl. láhvích] .....	37
Tabulka 3 – parametry 763I ss [9] .....	43
Tabulka 4 – parametry 764I_6 [9] .....	44
Tabulka 5 – parametry průtokoměrů [11].....	45
Tabulka 6 – parametry 768I [9] .....	46
Tabulka 7 – přesnosti při otevření průtokoměrů [11].....	55
Tabulka 8 - .....	59

## 20 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – závislost průtoku plynu (otevření průtokoměru G) na výstupní koncentraci .....	33
Graf 2 – závislost průtoku vzduchu (otevření průtokoměru V) na výstupní koncentraci .....	34
Graf 3 – závislost výstupního průtoku (součet průtoků V a G) na výstupní koncentraci .....	34
Graf 4 – závislost napětí na čase pro plyn $\text{SO}_2$ [10] .....	60
Graf 5 – závislost napětí na čase pro plyn $\text{CO}$ [10].....	61

## 21 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	02-2016-001-01
Příloha 2	02-2016-001-01-K
Příloha 3	02-2016-001-02
Příloha 4	02-2016-001-03
Příloha 5	02-2016-001-04
Příloha 6	02-2016-002-01
Příloha 7	02-2016-002-01-K
Příloha 8	02-2016-003-01
Příloha 9	02-2016-003-02
Příloha 10	02-2016-003-03
Příloha 11	02-2016-004-01
Příloha 12	02-2016-004-01-K
Příloha 13	02-2016-004-02
Příloha 14	02-2016-004-03
Příloha 15	02-2016-004-04
Příloha 16	02-2016-004-05
Příloha 17	02-2016-004-06
Příloha 18	02-2016-004-07
Příloha 19	02-2016-004-08
Příloha 20	Data Sheet Sensirion SFC 4200