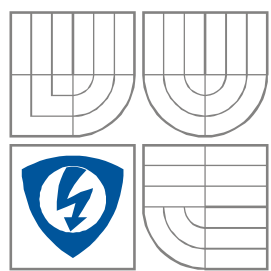


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PRŮTOKU PLYNŮ

GAS FLOW MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

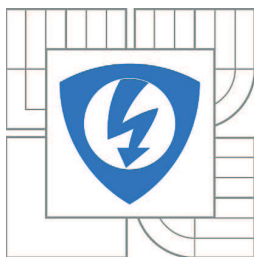
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ANTONÍN SLOVÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, PhD.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Antonín Slováček

ID: 109720

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Měření průtoku plynů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte literární rešerši v oblasti měření průtoku plynů, popište dostupné metody měření a hlavní parametry snímačů vhodných pro rozsah průtoků cca 50-250l/min. Zaměřte se především na snímače, které mohou být použity na novém laboratorním přípravku a diskutujte limity jejich nasazení.
2. Navrhněte a realizujte přípravek pro měření průtoku plynů pro využití v laboratorních cvičeních, definujte jeho parametry a proveďte výběr vhodných snímačů.
3. Navrhněte laboratorní návody pro vytvořené přípravky do předmětů BMFV a MSNV. Proveďte kontrolní měření na přípravku a zpracujte podrobnou zprávu o měření.
4. Proveďte rozbor nejistot měření pomocí přípravku, diskutujte vhodnost nasazení jednotlivých snímačů a navrhněte možnosti vylepšení přípravku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Ripka, P., Ďaďo, S., Kreidl, M., Novák, J.: Senzory a převodníky. Vydavatelství ČVUT, Praha. 2005. ISBN 80-01-03123-3
- [2] Bejček, L., Ďaďo, S., Platil, A.: Měření průtoku a výšky hladiny. BEN, Praha. 2006. ISBN 80-7300-156-X

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Miroslav Uher

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Tato diplomová práce popisuje návrh a realizaci nových laboratorních přípravků, které mají studentům v rámci laboratorních cvičení přiblížit metody měření průtoku vzduchu. Vytvořené přípravky a laboratorní úlohy umožní studentům získat praktickou zkušenost s několika principy měření, se kterými se seznamují v rámci povinných kurzů bakalářských a magisterských studijních programů. Tato práce také zahrnuje oddíl věnovaný teorii měření průtoku, jejíž znalost je nezbytná pro úspěšné zvládnutí dané problematiky. Součástí teoretické části bylo provedení literární rešerše snímačů včetně průzkumu trhu. Dále jsou prezentovány možnosti pracoviště a dosažené výsledky měření na přípravcích pomocí vzorového řešení laboratorních úloh.

Klíčová slova

Průtok vzduchu, měření průtoku, hmotnostní průtok, objemový průtok, laboratorní přípravek, nejistoty měření

Abstract

The diploma thesis brings a description and realization of new measuring devices which are designed to support student's laboratory practice of air flow measurement techniques. The new devices and laboratory exercises help students get experience of several methods of measuring which they get to know during mandatory Bachelor's and Master's study programmes. The paper also includes a theoretical background, the knowledge of which is necessary for mastering the issue. Moreover, the paper comprises a literary search of sensors and a market research. The second part of the thesis presents possibilities of the laboratory workplace, and the results of the measurements of the new laboratory devices used for sample laboratory exercises.

Keywords

Airflow, flow measurement, mass flow, volume flow, laboratory device, measurement uncertainty

Bibliografická citace:

SLOVÁČEK, A. *Měření průtoku plynů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 72s. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Petr Beneš, PhD.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření průtoku plynů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Benešovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Také bych chtěl poděkovat za rady konzultantovi Ing. Miroslavu Uhrovi.

V Brně dne: **21. května 2012**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	9
2	Měření průtoku	10
2.1	Průtok	10
2.1.1	Rychlostní průtok	10
2.1.2	Objemový průtok	10
2.1.3	Hmotnostní průtok	11
2.1.4	Reynoldsovo číslo	11
2.2	Druhy proudění	11
2.2.1	Laminární proudění	12
2.2.2	Turbulentní proudění	12
2.3	Vliv tvaru potrubí na měření	12
2.4	Rozdíl mezi měřením kapalin a plynů	13
3	Metody měření	14
3.1	Hmotnostní měřidla	14
3.1.1	Tepelné hmotnostní průtokoměry	14
3.2	Rychlostní měřidla	16
3.2.1	Turbínové průtokoměry	16
3.2.2	Vírové průtokoměry	17
3.2.3	Ultrazvukové průtokoměry	18
3.2.4	Průtokoměry s měřením rozdílů tlaků	18
3.2.5	Clony	19
3.2.6	Venturiho trubice	21
3.2.7	Dýzy	22
3.2.8	Pitotova trubice	22
3.2.9	Prandtlůva trubice	23
3.2.10	Plováčkové průtokoměry	23
3.3	Shrnutí přehledu metod měření průtoků	24
4	Praktická část	26
4.1	Sledované parametry snímačů	26
4.2	Průzkum trhu	27
4.2.1	Turbínové průtokoměry	27
4.2.2	Plováčkové průtokoměry	28
4.2.3	Anemometry s vrtulkovou sondou	28

4.2.4	Termoanemometry	29
4.2.5	Vírové průtokoměry	29
4.2.6	Clony	30
4.2.7	Průzkum trhu – zhodnocení	30
5	Návrh a realizace přípravku	32
5.1	Laboratorní trať č.1	32
5.1.1	Specifikace a možnosti trati č.1	32
5.2	Laboratorní trať č.2	34
5.2.1	Specifikace a možnosti trati č.2	34
5.3	Použitá zařízení	36
6	Návrh laboratorních úloh	42
6.1	Laboratorní úloha č. 1	42
6.1.1	Zadání	42
6.1.2	Schéma zapojení	43
6.1.3	Doporučený postup	44
6.1.4	Seznam přístrojů, přípravků a dokumentace	45
6.1.5	Teoretický popis	45
6.1.6	Katalogové listy použitých snímačů	45
6.2	Laboratorní úloha č. 2	46
6.2.1	Zadání	46
6.2.2	Schéma zapojení	47
6.2.3	Doporučený postup	47
6.2.4	Seznam přístrojů, přípravků a dokumentace	48
6.2.5	Teoretický popis	49
6.2.6	Katalogové listy použitých snímačů	49
7	Vypracování laboratorních úloh	50
7.1	Vypracování laboratorní úlohy č.1	50
7.2	Vypracování laboratorní úlohy č. 2	54
7.3	Zhodnocení výsledků, použitých snímačů a možného rozšíření měření	67
8	Závěr	68
	Seznam symbolů veličin a zkratk	70
	Seznam příloh	71
	Příloha A	72

1 ÚVOD

Setkat se s měřením průtoku plynů je možné v mnoha odvětvích lidské činnosti. Tato měření nacházejí uplatnění například v plynárenském, chemickém, či farmaceutickém průmyslu. Může se jednat o malé průtoky v laboratorních podmínkách až po velké průtoky na vysokotlakových potrubích.

Měření průtoku plynů je součástí výuky v odborných kurzech zaměřených na měření a snímače neelektrických veličin zajišťovaných Ústavem automatizace a měřicí techniky FEKT VUT v Brně. Studenti se s danou problematikou doposud měli možnost setkat pouze v teoretické rovině a v laboratorní výuce, která je vždy součástí kurzu, neměli příležitost vyzkoušet si nabyté informace v praxi.

Tato diplomová práce popisuje návrh a tvorbu nových laboratorních přípravků, které mají studentům přinést praktickou zkušenost s měřením průtoku plynu, konkrétně průtoku vzduchu. Nově vytvořené laboratorní úlohy mají za úkol studentům představit principy funkce několika metod měření, snímače, které jsou na těchto principech založeny a poukázat na vlivy, které mohou tato měření ovlivnit.

V prvních kapitolách jsou uvedeny teoretické podklady k měření průtoku. Dále práce obsahuje literární rešerši snímačů a seznamuje s provedeným průzkumem trhu, který byl proveden pro získání přehledu v nabídce snímačů před samotnou realizací měřicí trati. Praktická část práce popisuje vývoj návrhu a samotnou realizaci trati a její specifikace.

Součástí diplomové práce je také návrh úloh do laboratorních cvičení. Dle bodů zadání navržených úloh je vypracována podrobná zpráva o měření a jsou diskutovány nejistoty měření.

2 MĚŘENÍ PRŮTOKU

Tato kapitola se zabývá základními pojmy, které jsou důležité pro problematiku měření průtoku. Jsou zde popsány typy průtoků, druhy proudění a další vlastnosti tekutin.

Název *tekutina* je užíván jako pojmenování pro kapaliny, páry a plyny. Jejich společnou vlastností je tekutost. Tekutost je způsobena snadnou vzájemnou pohyblivostí částic dané látky. Díky této vlastnosti, kapaliny i plyny nezachovávají svůj tvar a přizpůsobují se okolí (tvaru nádoby / prostředí). [1]

2.1 Průtok

Slovem *průtok* lze označit v podstatě tři různé veličiny. Nemusí se jednat pouze o rychlost, ale to může být také označení pro hmotnostní nebo objemový průtok.

2.1.1 Rychlostní průtok

Rychlostní průtok se vyjadřuje v m.s^{-1} a udává střední rychlost proudění měřeného média. [4]

v střední rychlost proudění $[\text{m.s}^{-1}]$

2.1.2 Objemový průtok

Objemový průtok Q_V udává objem tekutiny V , který proteče potrubím za jednotku času t . Pro plyny se udává nejčastěji v $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. Objemový průtok se dá zjistit přímo např. dávkovacími snímači, nebo nepřímo např. rychlostními snímači za předpokladu znalosti rozměrů měřicího kanálu. Základním předpokladem však je, že tekutina zaplňuje celé potrubí. Tato podmínka nebývá v praxi vždy splněna a je to typický problém při měření volné hladiny v otevřených průtokových kanálech. [3][4]

$$Q_V = \frac{V}{t} \quad [\text{m}^3.\text{s}^{-1}] \quad (1)$$

kde

V objem tekutiny $[\text{m}^3]$
 t doba proudění $[\text{s}]$

Protečené množství lze vyjádřit jako

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V dt \quad [\text{m}^3] \quad (2)$$

Z rychlostního průtoku lze vypočítat objemový průtok Q_V jako střední rychlost proudění například v potrubí o ploše S . [4]

$$Q_V = \int_S v \cdot ds = S \cdot v \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3)$$

kde

v	střední rychlost proudění	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
S	plocha měřicího kanálu	$[\text{m}^2]$

2.1.3 Hmotnostní průtok

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

- Coriolisův princip
- Tepelné hmotnostní průtokoměry

Nepřímou metodou se hmotnostní průtok určuje z protečeného množství tekutiny (objemového průtoku) a z hodnoty hustoty protékajícího média ρ . [3]

$$Q_m = Q_V \cdot \rho \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Protečená hmotnost lze vyjádřit jako:

$$m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt \quad [\text{kg}] \quad (5)$$

2.1.4 Reynoldsovo číslo

Dle hodnoty Reynoldsova čísla Re se posuzuje druh proudění (laminární, turbulentní). Vyšetřuje poměr mezi setrvačnými a třecími silami. [1]

$$Re_D = \frac{\rho v^2 D}{\eta v} = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad [-] \quad (6)$$

kde

ρ	hustota tekutiny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
v	rychlost tekutiny	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
D	průměr potrubí	$[\text{m}]$
η	dynamická viskozita tekutiny	$[\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}]$
ν	kinetická viskozita tekutiny	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Re_D	Reynoldsovo číslo vztažené k průměru potrubí	$[-]$

2.2 Druhy proudění

Rozlišují se dva základní typy: laminární a turbulentní. O náležitosti k danému typu proudění se rozhoduje podle hodnoty Reynoldsova čísla. Dříve se předpokládal pozvolný přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pomocí simulací

se ale dospělo k názoru, že mezní hranice Re_{Dkrit} je rovna hodnotě 2320. Tato hodnota platí pro uzavřené kanály s kruhovým průřezem.

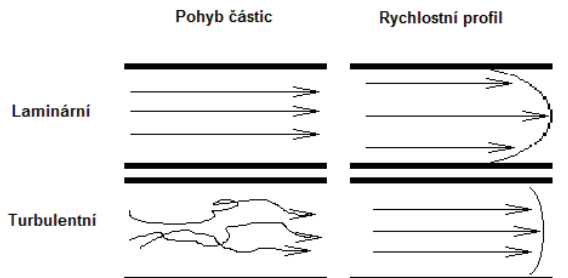
Při popisu typu proudění se používá také pojem *Mezní vrstva*. Mezní vrstvou je nazývána nejbližší část styku kapaliny a potrubí. Je v ní velký rozdíl v rychlosti proudění. Vzniká v důsledku smykového tření a ulpíváním kapaliny na stěně potrubí a díky viskozitě kapaliny. [1]

2.2.1 Laminární proudění

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

2.2.2 Turbulentní proudění

Při turbulentním proudění dochází k přechodu částic mezi vrstvami. Částice víří a pohybují se nejen ve směru proudění kapaliny. Obecně se udává, že toto proudění nastává od $Re > 2320$. Rychlost proudění v potrubí je rozložena rovnoměrněji viz obrázek (Obr. 2.1). Turbulentní proudění je dosahováno při vyšších rychlostech proudění či tlaku. [1]



Obr. 2.1: Druhy proudění [1]

2.3 Vliv tvaru potrubí na měření

Změny tvaru potrubí mají vliv na tvar (zakřivení) rychlostního profilu proudícího média. Když je v úseku deformovaného rychlostního profilu proudění umístěno měření průtoku, které není založeno právě na těchto změnách, dochází k znehodnocení výsledku měření. Rychlostní deformace se nejvíce projevuje na tratích s malou světlostí potrubí. Při kombinaci několika např. tvarovek se deformace rychlostního profilu dále zvyrazňuje. Aby se předešlo těmto nežádoucím jevům, vkládá se před i za měřicí prvek přímé (uklidňovací) potrubí, nebo tzv. laminarizační člen. Délka přímých úseků se pro různé měřicí prvky liší a je udávána v násobcích jmenovitého průměru DN.

Pojem *světlost potrubí* (jmenovitá světlost JS) udává jmenovitý průměr potrubí, v literatuře označován latinskou zkratkou DN. Hodnoty světlosti se udávají v mm. [1]

2.4 Rozdíl mezi měřením kapalin a plynů

Hlavním rozdílem mezi kapalinou a plynem je, že ideální kapalina je nestlačitelná, nemá vnitřní tření a je dokonale tekutá. Ideální plyn je dokonale stlačitelný, nemá vnitřní tření a je dokonale tekutý.

Při měření průtoku kapalin je potřeba provádět korekci změřeného objemového průtoku na změny teploty a tlaku pouze výjimečně. U měření průtoku plynů se naproti tomu musejí tyto korekce provádět vždy vzhledem ke stlačitelnosti proudícího média. Další ovlivňující parametry jsou např. viskozita, vlhkost vzduchu. [1][2]

V technické praxi se využívá tzv. přepočítávačů množství plynu. Této problematice se věnuje např. [5]. Toto zařízení zpracovává a vyhodnocuje nejen hodnotu např. objemového průtoku, ale bere v úvahu i provozní podmínky. Spolu s průtokem je snímána většinou i teplota a tlak. Aby se dali dosažené výsledky za různých pracovních podmínek dobře porovnat, je zvykem, vztahovat průtok k určitým podmínkám. Nejčastěji se využívá „vztažných podmínek“ pro teplotu 0 °C a tlak 101,325 kPa. Takto přepočteným výsledkům, se pak říká „normované“. Z toho plyne označení např. *Nl*. *Nl* je označení pro „normolitry“ a toto označení právě vypovídá, že hodnota je vztažena k určitým vztažným podmínkám.

Přepočítávače mohou být různého typu. Přepočet může být funkcí teploty, tlaku, teploty a tlaku. Využívá se i přepočítavačů hustotových, energetických či mechanických [5].

3 METODY MĚŘENÍ

Metody měření proudění tekutin lze rozdělit do rozličných kategorií. Mohou se dělit podle principu funkce, způsobu či vhodnosti použití, rozsahů atd. Asi nejobecnější rozdělení může být na objemová, rychlostní a hmotnostní měřidla. Typičtí zástupci:

- Objemová měřidla – zvonový krychloměr, bubnový plynoměr, pístové měřidlo
- Rychlostní měřidla – měřidla založená na principu měření rozdílu tlaků, rotametry, vírové průtokoměry
- Hmotnostní měřidla – Coriolisovy průtokoměry, tepelné průtokoměry

V této kapitole budou metody patřící k nejčastěji používaným. Hlavní prostor bude věnován těm metodám, které jsou zastoupeny v měřicí trati, která je dále popsána v této práci. Celá tato kapitola byla vytvořena pomocí zdrojů [3] a [4].

3.1 Hmotnostní měřidla

Při měření hmotnostního průtoku se využívá dvou základních metod. První z nich je využití Coriolisovy síly. Coriolisův průtokoměr se uplatňuje zvláště při měření složených médií, ale je drahý a má složitou elektroniku. Druhá, pro plyny již zajímavější metoda je využití tepelných hmotnostních průtokoměrů. Největší jejich výhodou je, že jsou hmotnostní, tedy měří přímo hmotnostní průtok a není potřeba zároveň měřit teplotu a tlak.

3.1.1 Tepelné hmotnostní průtokoměry

U těchto snímačů se vychází ze závislosti tepelné výměny mezi zdrojem tepla a okolím, které tvoří proudící médium, na hmotnostním průtoku. Jsou dva typy:

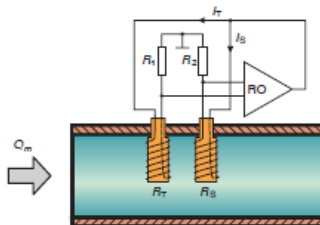
- hmotnostní termoanemometry
- kalorimetrické hmotnostní průtokoměry

Jsou vhodné pro měření malých průtoků a využití v laboratořích. Za jejich nevýhodu lze považovat nutnost znalosti složení měřeného média a nutnost kalibrace na jiné médium.

Hmotnostní termoanemometr je elektricky vyhřívaná sonda, která je vložena do potrubí. Množství tepla, které odebírá proudící kapalina kolem sondy je závislé na rychlosti proudění, hustotě, tepelné vodivosti a na teplotě proudícího média.

První typ termoanemometru má sondu vyhřívanou konstantním elektrickým proudem. Se změnou průtoku se mění teplota sondy a tato změna je vyhodnocována.

Druhým typem je sonda s konstantní teplotou. V tomto případě se reguluje velikost elektrického proudu na takovou hodnotu, aby sonda i při změně rychlosti proudění měla stále stejnou teplotu. Pak je velikost elektrického proudu úměrná hmotnostnímu průtoku.



Obr. 3.1: Hmotnostní termoanemometr [10]

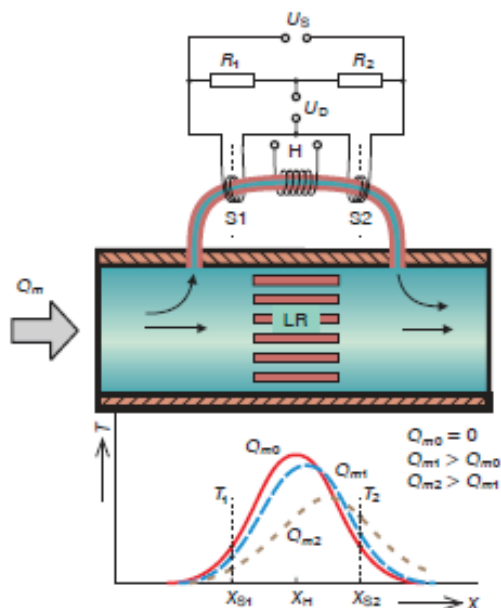
V rovnovážném stavu je množství tepla dodané ohřevem elektrickým proudem RI^2 rovné množství odvedeného tepla. Závislost proudu I na hmotnostním průtokem Q_m lze aproximovat rovnicí: [10]

$$I = a + b\sqrt{Q_m} \quad [A] \quad (7)$$

kde

- a konstanta vypovídající o přestupu tepla do okolí
- b závisí na geometrii, vlastnostech média a proudění

U **kalorimetrických hmotnostních** senzorů se na rozdíl od hmotnostního termoanemometru měří míra oteplení způsobená prouděním hmoty. Zdroj tepla je umístěn do středu kanálu. Při nulovém průtoku se teplota šíří rovnoměrně na obě strany od zdroje tepla. Při proudění měřeného média je teplo od topného tělíska unášeno ve směru proudění k jednomu ze snímačů teploty, které jsou umístěny na obou stranách od ohřivače. Tím dojde k rozvážení můstku a rozdílové napětí je zesíleno a tento výstup snímače je úměrný proudění média.



Obr. 3.2: Kalorimetrický průtokoměr [10]

Dle [10], difference naměřených teplot T_2 a T_1 , a tedy i výstupní signál závisí v omezeném rozsahu lineárně na hmotnostním průtokem Q_m .

Platí:

$$(T_2 - T_1) = A \cdot c_p \cdot P \cdot Q_m \quad (8)$$

kde

A	konstanta	$[\text{s}^2 \cdot \text{K}^2 \cdot \text{K}^{-2}]$
c_p	měrné teplo	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
P	tepelný příkon	$[\text{J} \cdot \text{s}^{-1}]$

Používají se dvě konstrukční řešení [1]

Měření v přímém potrubí je přesnější, ale má tu nevýhodu, že je nutno narušit stěny kanálu. To může být nevýhodné u některých typů aplikací. Narušené potrubí může časem vést k úniku měřeného média. Toto řešení není vhodné zvláště pro měření pod větším tlakem. Požaduje-li se ale co nejrychlejší odezva snímače, je toto vhodné konstrukční řešení.

Měření v obtoku se používá častěji. Má lepší dynamické vlastnosti. Do přímé větve se vkládá laminární člen k zaručení laminárního proudění - dosažení konstantního poměru proudění v přímé větvi a obtoku.

3.2 Rychlostní měřidla

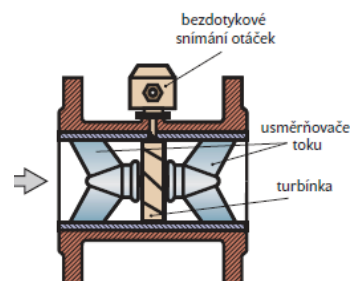
Při měření rychlostního průtoku je výstupní signál snímače typicky přímo úměrný rychlosti proudění (při měření diferenčního tlaku kvadratická závislost). Tím nenastává chyba při odmocňování jako u měření např. na cloně. Mezi tyto průtokoměry se řadí:

- turbínové průtokoměry
- vírové průtokoměry
- ultrazvukové průtokoměry
- průtokoměry s měřením rozdílu tlaků.

Ze střední rychlosti proudění, se objemový průtok dá dopočítat ze znalosti profilu kanálu, kde proudí měřené médium.

3.2.1 Turbínové průtokoměry

Průtokoměr se skládá z turbíny (rotační část) a snímače otáček. Vlivem proudění tekutiny se turbínka roztáčí a pomocí např. indukčního snímače je vyhodnocována rychlost otáčení. Výsledným signálem průtokoměru jsou nejčastěji napěťové pulzy úměrné rychlosti proudění a tyto se dále zpracovávají. Vyrábějí se v mnoha provedeních (způsoby uložení turbíny). Při bezdotykovém měření otáček se používají i pro vysoké pracovní tlaky.



Obr. 3.3: Turbínový průtokoměr [9]

Mezi otáčkami $n [\text{s}^{-1}]$ a objemovým průtokem Q_v platí přepočet [5]:

$$Q_v = \frac{n}{k} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

kde

k transformační konstanta snímače $[\text{m}^{-3}]$

Výhody

- rozsah
- reprodukovatelnost
- i pro velké DN

Nevýhody

- jen pro tekutiny s malou viskozitou
- nečistoty = opotřebení mechanických částí
- pořizovací náklady

3.2.2 Vírové průtokoměry

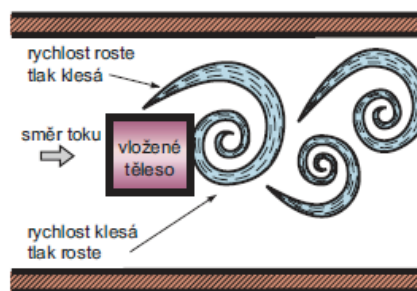
Vírové průtokoměry využívají neaerodynamického tvaru překážky, která je vložena do měřicího kanálu. Při obtékání tekutinou dochází k střídavé tvorbě vírů na stranách překážky. Víry tvoří tzv. von Kármánovu stezku. Pro daný rozsah Reynoldsova čísla je frekvence vznikajících vírů úměrná velikosti průtoku. Vlastnosti jsou popsány rovnicí:

$$\frac{Q_v}{f \cdot D^3} = \frac{\pi \cdot l \cdot b}{4 \cdot S_r \cdot D} \quad (10)$$

kde

Q_v	objemový průtok	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
f	základní frekvence vložného tělesa	$[\text{Hz}]$
D	průměr potrubí	$[\text{m}]$
b	šířka čelní plochy vložného tělesa	$[\text{m}]$
S_r	Strouhalovo číslo vyjadřující rychlost změny rychlostního pole tekutiny v závislosti na čase	$[-]$

Vložením překážky má za následek změnu tlaku a rychlosti. Vyvolaná změna je snímána např. piezoelektrickým, nebo kapacitním diferenčním snímačem a převedena na elektrický signál. Rozdíly ve vírových průtokoměrech jsou ve tvaru překážky, typu snímání a v poloze umístění.



Obr. 3.4: Vírový průtokoměr – princip [9]

Výhody

- malý vliv teploty, tlaku, hustoty
- malá tlaková ztráta
- rozsah

Nevýhody

- jen pro tekutiny s malou viskozitou

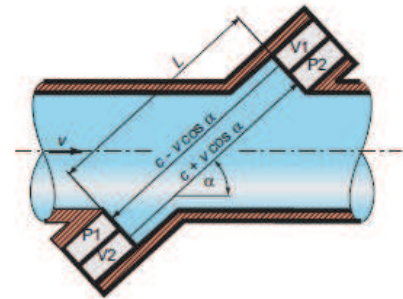
3.2.3 Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové snímače měří pomocí vysílání ultrazvukových vln. Využívá se dvou základních principů měření pomocí

- Dopplerova efektu (pouze pro kapaliny!)
- Měření doby průchodu vlny

Měření pomocí Dopplerova efektu - do tekutiny se vysílá ultrazvuková vlna s konstantní frekvencí. Přijímá se vlnění odražené od pevných částic nebo od bublin v tekutině. Jelikož nečistoty putují kanálem spolu s tekutinou, je frekvence přijatých ultrazvukových vln jiná než vysílaných. Tato difference frekvencí je úměrná rychlosti proudění.

Měření doby průchodu vlny - u této metody měření se využívá dvou párů vysílač-přijímač, které jsou umístěny za sebou. Jeden vysílač vysílá po směru proudění a druhý proti směru. Rozdíl časů potřebných k průchodu médiem je úměrný rychlosti proudění.



Obr. 3.5: Měření doby průchodu vlny [9]

Výhody

- bezkontaktní
- bez tlakové ztráty
- bez opotřebení

Nevýhody

- pro větší rychlosti

3.2.4 Průtokoměry s měřením rozdílů tlaků

V průmyslové praxi je většina aplikací měření průtoku založena na měření rozdílu tlaku. Průtokoměry využívající rozdílu tlaku jsou například takové, které pro vytvoření tlakové difference využívají škrticí členy.

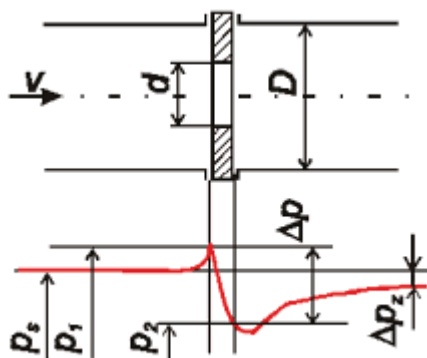
- Clona
- Dýza
- Venturiho trubice

Další průtokoměry využívající snímání difference tlaku jsou rychlostní sondy

- Pitotova trubice
- Víceotvorová rychlostní sonda
- Prandtlova trubice
- Kulová sonda
- Válcová sonda

Dále s tlakovou diferencí pracuje např.:

- Kolenový průtokoměr
- Plováчковý průtokoměr



Legenda:

v - rychlost proudění

d - průměr otvoru škrticího orgánu

D - průměr potrubí

p_s - vstupní statický tlak

p_1 - snímaný tlak před škrticím orgánem

p_2 - snímaný tlak za škrticím orgánem

Δp - diferenční tlak ($p_1 - p_2$)

Δp_z - trvalá tlaková ztráta

Obr. 3.6: Škrticí člen – centrická clona [3]

K popsání průběhu tlaku v potrubí se využívá Bernoulliho rovnice. Ta popisuje zákon zachování mechanické energie v tekutinách. Při totožných podmínkách tlak v tekutině klesá s rostoucí rychlostí jejího proudění. Tento jev nastává, když je do měřicího kanálu vložena překážka. Rychlost proudění (kinetická energie) tekutiny při průchodu překážkou roste při poklesu statického tlaku v tekutině (potenciální energie). Rozdíl tlaků před a za překážkou je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění (závisí také na tvaru překážky)

$$v = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

kde

v	rychlost proudění tekutiny	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
k	konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtokoměru [-]	
Δp	diferenční tlak	$[\text{Pa}]$
ρ	hustota tekutiny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

3.2.5 Clony

Clona je plochá, nejčastěji kovová deska s otvorem, která se navařuje nebo upíná mezi příruby do měřicího úseku potrubí. Rozměry a typ umístění otvoru se odvozují od konkrétního použití. Odběrná místa statického tlaku jsou umístěna těsně před a za clonou. U clon jsou poměrně dlouhé úseky usměrňovacích potrubí před a za clonou. Doporučené hodnoty jsou uvedeny např. v [1]. Clony se dělí dle tvaru a způsobu uložení otvoru.

Soustředná clona má kruhový otvor umístěn v ose potrubí. Na obrázku (Obr. 3.6) je znázorněn průběh tlakové ztráty na centrické cloně.

Dle [5] lze objemový průtok na cloně vyjádřit vztahem:

$$Q_V = C \cdot \varepsilon \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad [\text{m}^3 \text{h}^{-1}] \quad (12)$$

kde

C	součinitel průtoku (z tabulek nebo nomogramů)	[-]
ε	expanzní součinitel	[-]
β	poměrné zúžení průřezu $\beta = d/D$	[-]
D	světlost potrubí se zabudovanou clonou	[m]
d	průměr otvoru clony	[m]
Δp	tlakový rozdíl na cloně ($\Delta p = p_1 - p_2$)	[Pa]
p_1	tlak před clonou (na vstupu)	[Pa]
p_2	tlak za clonou (na výstupu)	[Pa]
ρ	hustota měřeného plynu	[kg.m ⁻³]

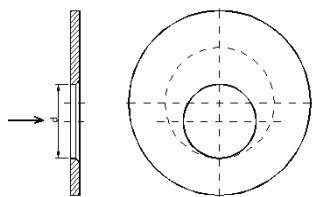
Na cloně vzniká poměrně velká tlaková ztráta (Obr. 3.6), která lze popsat vztahem [5]

$$\Delta p_z = (1 - \beta^2) \Delta p \quad [\text{Pa}] \quad (13)$$

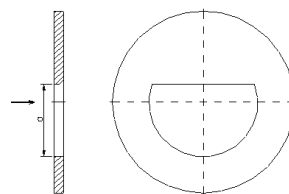
kde

Δp_z	celková (trvalá) tlaková ztráta	[Pa]
--------------	---------------------------------	------

Excentrická clona se od centrické clony liší vyosením průtočného výřezu (Obr. 3.7). Při natočení průtočného průřezu do dolní části vodorovného potrubí je umožněn průchod nečistot. Často nachází uplatnění v petrochemii, v chemickém a jaderném průmyslu. [6]



Obr. 3.7: Excentrická clona [6]

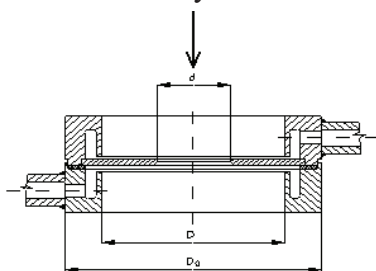


Obr. 3.8: Segmentová clona [6]

Segmentová clona je škrticí člen, u kterého se průtokový kanál omezuje otvorem ve tvaru segmentu kruhu (Obr. 3.8). Opět, jako u excentrické clony můžeme vhodným natočením dosáhnout průtoku i případné pevné složky (nečistoty) tekutiny. Odběry diferenčního tlaku jsou rovnoběžně umístěny vertikálně v horní části clony. [6]

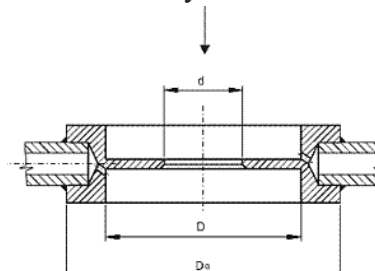
Možnosti odběrů tlakové difference

Komorový odběr



Obr. 3.9: Komorový odběr [6]

Bodový odběr



Obr. 3.10: Bodový odběr [6]

Skládá se ze dvou částí:

- dvoudílná obruba
 - clonový kotouč
 - clonový kotouč je přes těsnění sevřen mezi obruby a z komor je vyveden odběr pro diferenciální tlakový snímač. Využití pro menší hodnoty tlaků
- Pracovní poloha průtokoměru může být vodorovná i svislá. [6]

- clona je vyrobena z jednoho kusu materiálu
- odběry tvoří jednotlivé (bodové) otvory před a za clonovým kotoučem.
- vhodná pro vyšší tlaky.
- jeden kus materiálu => nevznikají netěsnosti.
- Pracovní poloha průtokoměru může být vodorovná i svislá. [6]

Výhody

- robustnost
- cena
- pro měření většiny čistých kapalin

Nevýhody

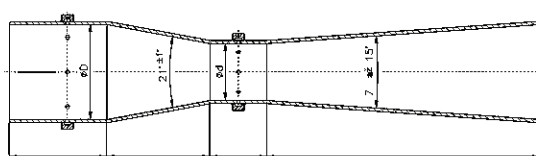
- náchylné na opotřebení – znečištěné médium může relativně snadno opotřebit přesně opracované hrany clony, které jsou nutné ke korektnímu měření
- pořizovací náklady

3.2.6 Venturiho trubice

Měřené médium je ve Venturiho trubici zrychleno v části kuželovitého tvaru, konfuzoru. Dochází k lokálnímu poklesu tlaku. Za konfuzorem se nachází difuzor, část, kde se průměr potrubí rozšiřuje zpět na původní světlost potrubí. Tlak proudící tekutiny se vrátí téměř na původní hodnotu jako před škrticím členem. Z toho plyne největší výhoda využití Venturiho trubice, kterou je malá tlaková ztráta. Uložení průtokoměru může být vodorovné i svislé. [3]

Výhody

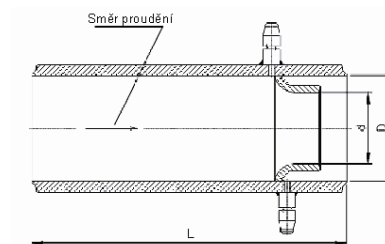
- malá tlaková ztráta (4 až 20 % z měřeného diferenčního tlaku). Má nejmenší tlakovou ztrátu ze všech primárních prvků
- vyžaduje použití znatelně kratších přímých délek oproti clonám a dýzám
- přesné měření
- malé opotřebení
- nezanášejí se sedimenty



Obr. 3.11: Venturiho trubice [3]

Nevýhody

- vysoká cena



Obr. 3.12: Dýza [3]

3.2.7 Dýzy

Zjednodušeně by se dýza dala popsat jako spojení clony a Venturiho trubice. Dýza nemá ostré hrany náchylné na opotřebení jako clona a zároveň nemá difuzor jako Venturiho trubice. Spojení těchto vlastností umožňuje pomocí dýz měřit větší průtok než u clon. Jsou také levnější než Venturiho trubice, ale na druhou stranu jsou méně přesné a způsobují větší tlakovou ztrátu.

Často nacházejí uplatnění u vysokotlakých kotelních systémů a rozvodů. [6]

Výhody

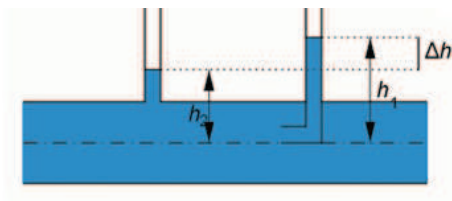
- větší průtok
- odolnost
- větší tlak a teplota než u clony
- cena

Nevýhody

- méně přesné než Venturiho trubice
- tlaková ztráta

3.2.8 Pitotova trubice

Měření pomocí Pitotovy trubice je jednou z nejstarších metod k zjištění rychlostního průtoku. Tento jednoduchý princip spočívá v umístění tenké trubičky v protisměru proudění tekutiny. Využití nacházejí při měření plynů a bezpříměsových kapalin. Jiné použití je prakticky vyloučeno z důvodů zanášení trubičky, kterou se tlak snímá.



Obr. 3.13: Pitotova trubice [7]

Výhody

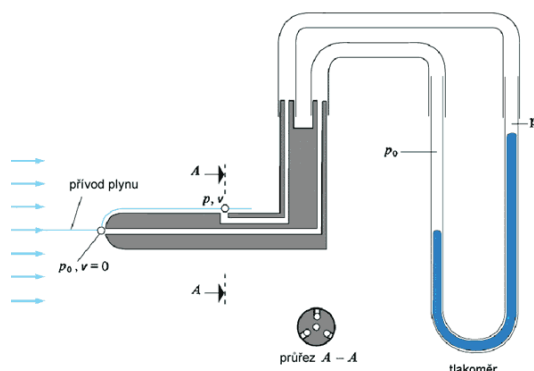
- jednoduchost
- cena

Nevýhody

- čistota tekutiny
- malý rozdíl tlaků
- závislost na rychlostním profilu

3.2.9 Prandtlůva trubice

Prandtlůva trubice je rychlostní sonda, která snímá tlaky na jednom místě. Válec s kulovitým zakončením proti proudu dělí rovinu rovnoběžného proudění a proudění od zdroje. Výsledný tlak je měřen otvorem v přední části sondy. Statický tlak je měřen v bočních částech válcové sondy.

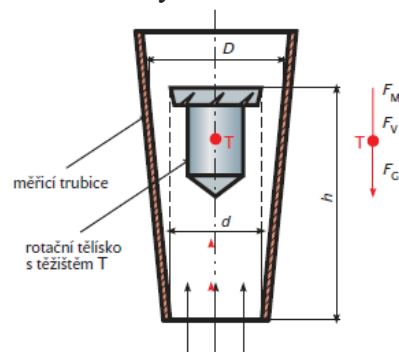


Obr. 3.14: Prandtlůva trubice [8]

3.2.10 Plováčkové průtokoměry

Plováčkový průtokoměr je složen ze svislé měřicí trubice, ve které je umístěn plováček. Plováček musí mít větší hustotu než je hustota měřené tekutiny. Proudící tekutina má za následek zvednutí plováčku. Když se plováček ustálí, vztlaková síla, která jej nadnáší je stejně velká jako gravitační síla, která na něj působí v opačném směru. Ze zdvihu plováčku se určí velikost rychlosti proudění.

Tvary plováčku se mohou lišit dle způsobu jejich použití. Poloha plováčku se odečítá buď přímo na stupnici na trubicí průtokoměru, nebo se může snímat např. fotoelektricky.



Obr. 3.15: Plováčkový průtokoměr [9]

Výhody

- rozsah
- snadná instalace
- cena
- měření malých průtoků

Nevýhody

- nutnost kalibrace

3.3 Shrnutí přehledu metod měření průtoků

Při výběru vhodné metody / průtokoměru nelze vycházet pouze ze znalosti metod a povědomí o tekutinách, které lze jimi měřit. Je nutné věnovat pozornost i dalším charakteristickým vlastnostem jednotlivých snímačů. Stručný přehled viz tabulka (Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Porovnání průtokoměrů [3]

Průtokoměr	Rozsah (Q_{\max} : Q_{\min})	Plyny, páry		Kapaliny				Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Přesnost (z měřené hodnoty)	Tlaková ztráta
		A	B	A	B	C	D				
Normalizovaná clona	4:01	x	-	x	o	-	o	do 540	do 41	1-2 %	velká
Excentrická clona	4:01	o	x	o	x	-	o	do 540	do 41	2 %	velká
Segmentová clona	4:01	o	x	o	x	-	o	do 540	do 41	2 %	velká
Venturiho trubice	4:01	x	o	x	o	o	o	do 540	do 41	1-2 %	střední
Dýza	4:01	x	o	x	o	o	o	do 540	do 41	1-2 %	velká
Pitotova trubice	3:01	x	-	x	-	o	o	do 540	do 41	5 %	malá
Plováчковý skleněný	10:01	x	-	x	-	x	o	do 120	do 3	1 %	střední
Elektromagnetický	30:01:00	-	-	x	x	x	x	do 180	do 10,5	1 %	-
Vírový	20:01	x	o	x	o	-	o	do 430	do 10,5	1,5 %	střední
Turbínkový	10:01	x	-	x	-	o	o	do 500	do 43	0,5 %	velká
Ultrazvukový (Dopplerův efekt)	30:01:00	-	x	-	x	o	x	do 300	do 10	5 %	-
Coriolisův	80:01:00	o	-	x	x	x	o	do 200	do 10	0,2 %	malá
Termoanemometr	50:01:00	x	-	o	-	-	-	do 65	do 31	1 %	malá

Vysvětlivky:

A = čistá tekutina, B = znečištěná tekutina, C = viskózní tekutina, D = korozivní tekutina

x = průtokoměr je přímo určen pro daný typ tekutiny

o = průtokoměr lze použít pro tento typ tekutiny

- = průtokoměr není určen pro tuto tekutinu.

Pozn. Hodnoty teplot, tlaků, měřicích rozsahů a přesnosti jsou typické pro dané druhy průtokoměrů. [3]

Jedním z dalších parametrů, ze kterých se vychází při volbě vhodného snímače pro danou aplikaci, je hodnota Reynoldsova čísla, respektive jeho minimální hodnoty, od které je daný průtokoměr (použitá metoda) schopen podávat správné výsledky. V literatuře je značný rozdíl v interpretacích. Závisí na mnoha dalších faktorech a v praxi není členění tak jednoznačné. Zde je uveden příklad min. hodnot Reynoldsových čísel dle [1].

Tab. 3.2: *Minimální hodnoty Reynoldsova čísla [1]*

Princip průtokoměru	Min. hodnota Reynoldsova čísla
Clona	3000
Venturiho trubice	10000
Turbina	5000
Vírový	5000
Ultrazvukový (Doppler)	5000
Ultrazvukový (klasický)	10000
Coriolisův	1000
Tepelný	5000

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Hlavním záměrem mé diplomové práce byl návrh a realizace měřicí trati průtoku vzduchu pro laboratorní výuku. Jedná se o úlohu, která má v laboratoři doplnit již hotové měření průtoku kapalin a také připravované měření průtoku pevných částic.

V nejranější části řešení této úlohy bylo nutné nastudovat problematiku měření průtoku obecně, posléze konkrétně měření průtoku plynu, používané metody, snímače, jejich možnosti a vlivy, které měření průtoku vzduchu ovlivňují. Stručné shrnutí důležitých teoretických poznatků je v předchozích kapitolách.

Po získání teoretického podkladu následoval průzkum trhu, pro zjištění, jaké snímače jsou dostupné, v jakých rozsazích, cenových relacích atd. Při průzkumu trhu už existovala hrubá idea, jaké snímače a rámcově v jakém rozsahu by se měla připravovaná trať pohybovat (cca do $300 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$).

Dále v textu jsou uvedeny parametry, které výrobci udávají (nebo by měli udávat). Podle nich, je možné snímače porovnávat, určit jejich vhodnost pro konkrétní aplikaci a poté vybrat nejvhodnější model.

4.1 Sledované parametry snímačů

V podkapitole *Sledované parametry snímačů* je uveden stručný výběr udávaných parametrů a jejich stručný popis.

Měřené médium	– pro jaké médium je vhodná konstrukce snímače
Jmenovitá světlost potrubí	– J_s [mm] (nebo DN)
Jmenovitý tlak pn	– udává se v Pascalech MPa – $P_N x$ – x dle tabulek nominální hodnota tlaku
Maximální pracovní tlak	– maximální přípustná hodnota tlaku – krátkodobě
Minimální pracovní tlak	– minimální přípustná hodnota tlaku
Jmenovitý průtok	– udává se v např. v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.
Maximální průtok	– maximální přípustný průtok
Minimální průtok	– minimální průtok
Rozsahy viskozit	– hranice přípustné viskozity média
Rozsah teploty měřené tekutiny	– přípustné hodnoty teploty média
Rozsah teploty okolí	– přípustné hodnoty teploty pracovního prostředí
Nutnost filtrace	– udává požadavek na nutnost filtrace
Směr měření	– jednosměrné / obousměrné měření
Rozměry ukladňujícího potrubí	– udává se v násobcích DN
Materiál	– výrobní materiál snímače
Rozsah	– min. / max. hodnota měřené fyzikální veličiny

Přesnost (chyby) přístroje	– přesnost z měřené hodnoty
Opakovatelnost	– shodnost měření při stejných podmínkách
Rozlišení	– udává hodnotu nejpřesnějšího odečtu hodnot
Linearita	– maximální odchylka od lineárního průběhu
Přesnost čtení	– udává maximální přesnost odečítání ze stupnice
Tlaková ztráta	– udává velikost tlakové ztráty vznikající na snímači
Výstupní signál	– typ výstupního signálu
Doba odezvy	– doba odezvy snímače
Připojení do kanálu	– svár / příruba; vsunutí atd.
Napájení	– nutnost, popř. typ napájení
Cena	– pořizovací cena, popř. cena na kalibraci, údržbu a náklady na provoz

4.2 Průzkum trhu

V následujícím průzkumu trhu jsou uvedeny snímače, které nabízelí výrobci na svých webových stránkách. V tabulkách jsou vedeni typičtí zástupci jednotlivých kategorií. Ceny jsou orientační (podzim 2011).

4.2.1 Turbínové průtokoměry

Turbínové průtokoměry jsou v praxi často využívané snímače. Pro měření v námi sledovaném rozsahu se často využívají s osazením Peltonovou turbínkou.

Tab. 4.1: Turbínové průtokoměry - nízké rozsahy

Výrobce	Typ	Rozsah [l.min ⁻¹]	Přesnost	Linearita	Opakova- telnost	Pracovní teplota	Pracovní tlak	Cena [Kč]
Omega	FLR1201	2,0 – 10	± 3 %	± 3 %	-	0 – 50 °C	0,27 MPa	10 920
Omega	FLR1202	4,0 – 20	± 3 %	± 3 %	-	0 – 50 °C	0,27 MPa	10 920
Omega	FLR1203	10 – 50	± 3 %	± 3 %	-	0 – 50 °C	0,27 MPa	10 920
Omega	FLR1204	20 – 100	± 3 %	± 3 %	-	0 – 50 °C	0,27 MPa	10 920
Omega	FLR1205	40 – 200	± 3 %	± 3 %	-	0 – 50 °C	0,27 MPa	10 920
Omega	FTB-932	22 – 141	± 1 %	-	± 0,25 %	-	34 MPa	29 680
Omega	FTB-933	28 – 283	± 1 %	-	± 0,25 %	-	34 MPa	29 680
Omega	FTB-934	56 – 566	± 1 %	-	± 0,25 %	-	34 MPa	29 680
Hontzsch	Fa Di 9,7	2 – 117	-	-	-	-25 – 100 °C	1 MPa	-
Hontzsch	Fa Di 18	5 – 524	-	-	-	-25 – 100 °C	1 MPa	-

V tabulce (Tab. 4.1) jsou uvedeny turbínové snímače s připojením na 1/4" potrubí. Při sestavování přehledu snímačů bylo problematické zjišťovat konkrétní parametry,

jelikož výrobci (prodejci) často požadují poptávku na konkrétní realizaci (uplatnění snímače).

Variant na měřicí trať bylo více, proto se sledovaly i jiné rozsahy a světlosti (Tab. 4.2).

Tab. 4.2: Turbinové průtokoměry - větší rozsahy

Výrobce	Typ	Rozsah [m ³ .h ⁻¹]	Přesnost	Opakovatelnost	Pracovní teplota	Pracovní tlak	Cena [Kč]
Vamet	TPP40	12 - 100	±1 %	±0,2 %	-35 - 80 °C	PN16	zakoupen
Hoffer	Řada HO	10:1 - 100:1	±0,25 %	-	-270 - 230 °C	35 MPa	-
Badger Meter	řada TP	13 – 130	-	±0,2 %	-30 - 150 °C	-	-
Hennlich	TM-44	10:1 - 100:1	±0,5 %	±0,1 %	- 50 - 150 °C	-	-

V tabulce (Tab. 4.2) jsou uvedeny snímače o světlosti DN 50-100. Ceny bylo možné zjistit pouze poptávkou, ale telefonickými dotazy se podařilo zjistit, že ceny se pohybují nad hranicí 30 až 35 tisíc korun bez čidla a převodníku.

Snímač Vamet TPP40 byl již součástí výbavy laboratoře.

4.2.2 Plováčkové průtokoměry

Parametry plováčkových průtokoměrů jako pracovní tlak, opakovatelnost a tlaková ztráta, ty byly při průzkumu trhu brány v potaz. Zde nejsou uváděny, jelikož s velkou rezervou přesahují naše požadavky. Obecně se dá říct, že se na trhu dají sehnat snímače ve velké škále parametrů. Plováčkové průtokoměry jsou určeny k vertikální montáži.

Tab. 4.3: Plováčkové průtokoměry

Výrobce	Typ	Rozsah	Přesnost	Pracovní teplota	Cena [Kč]
Meiseter	řada 2340	3000 – 30000 Nl.h ⁻¹	±1,6 %	0 – 80 °C	-
Honsberg	řada UK	1000 – 8000 Nl.h ⁻¹	±5 %	0 – 65 °C	-
Koniflux	UK-048	9000 – 132000 Nl.h ⁻¹	±3 %	0 – 65 °C	4 980
JsP	FAG6100	2 – 4330 Nl.h ⁻¹	-	-	-
Omega	FL-400A	20 – 630 l.min ⁻¹	±2 %	0 – 82 °C	10 000
Krohne	VA40	do 170 m ³ .h ⁻¹	±1 %	-20 – 100 °C	-
Siemens	Sitrans F VA	do 110 m ³ .h ⁻¹	±2 %	-40 – 80 °C	-

4.2.3 Anemometry s vrtulkovou sondou

Anemometry by se dali rozdělit na dvě základní skupiny. Anemometry se zásuvnou sondou (Tab. 4.5), nebo anemometry s vrtulkou přímo v těle snímače (Tab. 4.4).

Tab. 4.4: *Anemometry - vrtulkové - ruční*

Výrobce	Typ	Rozsah [m.s ⁻¹]	Přesnost	Průměr turbíny	Pracovní teplota	Cena [Kč]
Greisinger	GVA 0430	0,4 – 30	±2 %	70 mm	-10 – 50 °C	4 276
Conrad	MR 330	-	-	-	-	1 090
Extech	HD-300	0,4 – 30	±2 %	72 mm	-10 – 60 °C	6 480
-	WS9500	0,2 – 30	-	-	-30 – 59 °C	1 097
-	AM-4202	0,4 – 30	±2 %	-	-	4 740
Testo	410-1	0,4 – 20	-	40 mm	-10 – 50 °C	2 710

Tab. 4.5: *Anemometry - vrtulkové - provedení sonda*

Výrobce	Typ	Rozsah [m.s ⁻¹]	Přesnost	Průměr vrtulky	Pracovní teplota	Cena [Kč]
Testo	416	0.6 – 40	±1.7 %	16 mm	-20 – 50 °C	12 770
Kimo	LV 101S	0,8 – 25	±3 %	14 mm	0 – 50 °C	10 608
Kimo	LV 101E	0,8 – 25	± 3 %	14 mm	0 – 50 °C	12 896

Vrtulkových anemometrů je na našem trhu velké množství. S malou zásuvnou sondou se podařilo najít pouze tři zástupce, kteří ovšem poskytují všechny funkce, které se od tohoto přístroje očekávají. U obou typů anemometrů jsou srovnatelné parametry, výbava i cena. Cenový rozdíl je znatelný mezi sondami a ručními anemometry.

4.2.4 Termoanemometry

Termoanemometry se prodávají (vyrábějí) na první pohled v podstatě ve stejném provedení jako anemometry vrtulkové, až na to, že využívají k měření jinou metodu. Místo vrtulky, využívají tepelný princip měření. V literatuře jsou často nazývány jako „Hot-wire“ sondy.

Tab. 4.6: *Termoanemometry*

Výrobce	Typ	Rozsah [m.s ⁻¹]	Přesnost	Pracovní teplota	Cena [Kč]
Kimo	VT 100E	0,15 – 30	±3 %	0 – 50 °C	10 400
Testo	405	0 – 10	±5 %	0 – 50 °C	3 420
Testo	425	0 – 20	±5 %	-20 – 70 °C	13 992
Greisinger	TA 410	0 – 20	±3 %	5 – 45 °C	16 402

4.2.5 Vírové průtokoměry

Příklady typických vírových průtokoměrů s připojením na přírubu jsou uvedeny v tabulce (Tab. 4.7).

Tab. 4.7: *Vírové průtokoměry - přírubové provedení*

Výrobce	Typ	Rozsah	Přesnost	Pracovní teplota
Sitrans	FX300	2 – 80 m.s ⁻¹	±2 %	-40 – 85 °C
Rosemount	8800D	0,90 – 34,6 m.s ⁻¹	±1,35 %	-40 – 232 °C
Vortex	Serie 83	2,1 – 32 m.s ⁻¹	±2 %	-20 – 430 °C
Burkert	8060	15 – 45 l.min ⁻¹	±4 %	-20 – 50 °C

Na našem trhu je velký počet vírových průtokoměrů, ale pouze v přírubovém provedení. Se zásuvnou sondou byla objevena jedna řada od firmy Vortex.

Tab. 4.8: *Vírové průtokoměry - zásuvná sonda*

Výrobce	Typ	Rozsah	Přesnost	Pracovní teplota	Cena [Kč]
Vortex	řada VA40	0,5 – 40 m.s ⁻¹	-	- 20 – 100 °C	53 000

4.2.6 Clony

Jeden z předběžných plánů na realizaci měřicí trati obsahoval bod, ve kterém jsem se chtěl pokusit nasadit do připravované trati měření tlakové difference na cloně. S vědomím toho, že škrticí orgány nejsou zcela standardně používány v zadaném rozsahu, i tak jsem se pokusil prověřit využití této metody měření.

Na Internetu se nepodařilo objevit dostupné clony, u kterých by firmy uváděly přímo jejich parametry. Oslovil jsem tedy firmy, co clonové měření nabízejí a poptal jsem clonu na požadované parametry.

Odpovědi došly, dle očekávání. Měření na cloně je definováno normou od světlosti potrubí DN > 50 a průtoků mimo zadané požadavky (tomu odpovídající Re). Firma Mattech, i tak zaslala nabídku normalizovaných clon, s tím, že ceny jsou orientační a výpočet požadované clony se dělá až na míru zákazníka. Centrickou clonu včetně úseků +10D před clonou a -5D za clonou nabízeli za 33950 Kč. Dýzu ISA 1932 za 56230 Kč a Venturiho trubici za 80600 Kč. Tyto ceny jsou pouze za škrticí člen. Další nemalé náklady by bylo nutné vynaložit za snímače tlakové difference a na připojení těchto škrticích členů do měřicí trati.

4.2.7 Průzkum trhu – zhodnocení

Hlavní výstup z provedeného průzkumu trhu (nejen uvedení nejběžnější zástupci výše) je, že měření průtoků plynů, i průtoků obecně, je opravdu velmi rozšířené a v průmyslu hojně využívané. Vypovídá o tom dostupnost snímačů, množství produktů a společností, které se touto problematikou zabývají. Teoretické metody měření mají v praxi využití a snímače jsou k dispozici skutečně v rozsazích, o kterých se mluví v teorii. I snímače s využitím stejné metody se vyrábí v mnoha provedeních, jak co se týče rozsahů, přesností, způsobu připojení, odolnosti a pracovních podmínek.

Výrobci se své výrobky snaží odlišit hlavně dosaženou přesností, v některých případech modularitou a u snímačů, které se navrhují zákazníkovi přímo na míru, nabízí rozšířené záruky, či překalibrování po určitém časovém období zdarma. Jelikož nabídka je široká, snímače podobných parametrů a jejich vlastnosti jsou na dobré úrovni, dalším rozhodujícím parametrem a mnohdy určujícím parametrem je cena.

5 NÁVRH A REALIZACE PŘÍPRAVKU

Při tvorbě finálního návrhu měřicí trati průtoku plynu se vycházelo z teoretické přípravy a provedeného průzkumu trhu. Výsledky plynoucí z této přípravy však nebyly to jediné, co bylo nutné při tvorbě laboratorní úlohy zohlednit.

Každá laboratorní úloha se buduje s tou myšlenkou, že studentovi přiblíží ve výuce probranou látku. Umožní mu osobní zkušenost s danou problematikou a ukáže mu něco zajímavého z probírané oblasti. Bylo tedy nutné vytipovat, co z oblasti měření průtoku plynů bude možné studentům v rámci časově omezeného bloku výuky a v laboratorních podmínkách představit.

Jelikož má být úloha nasazená v laboratoři, kde v jeden čas bude paralelně probíhat měření více úloh, nesmělo se opomenout i na omezený pracovní prostor a případný hluk měřicí trati (hnací zařízení vzduchu). Nakonec, ale v neposlední řadě bylo nezbytné zvážit finanční náročnost budovaného systému.

Při zvažování všech variant a hlavně ve snaze minimalizovat pořizovací náklady, se ve škole podařilo najít doslova zapomenuté kusy snímačů vhodné pro budovanou trať. S přihlédnutím k výše uvedeným bodům, z dostupných snímačů ve škole a konzultací, vykrystaloval finální návrh. Z důvodu snahy o představení problematiky v co nejširším měřítku vznikly měřicí tratě dvě.

5.1 Laboratorní trať č.1

Vznik laboratorní trati č.1 iniciovaly dvě věci. První věcí bylo, že ve škole byl k dispozici turbínový průtokoměr Vamet TPP40. Tento snímač je určen pro připojení mezi příruby (DN40). Jeho masivní konstrukce umožňuje nasazení pro měření vysokých tlaků. Rozsah má od $12 - 100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Jeho parametry nebyly společné s ostatními snímači, které byly dostupné ve škole a které se plánovalo využít. Druhým důvodem bylo, že ve škole byl nefunkční vrtulkový anemometr s ruční sondou, který již nebylo možné opravit ani u výrobce.

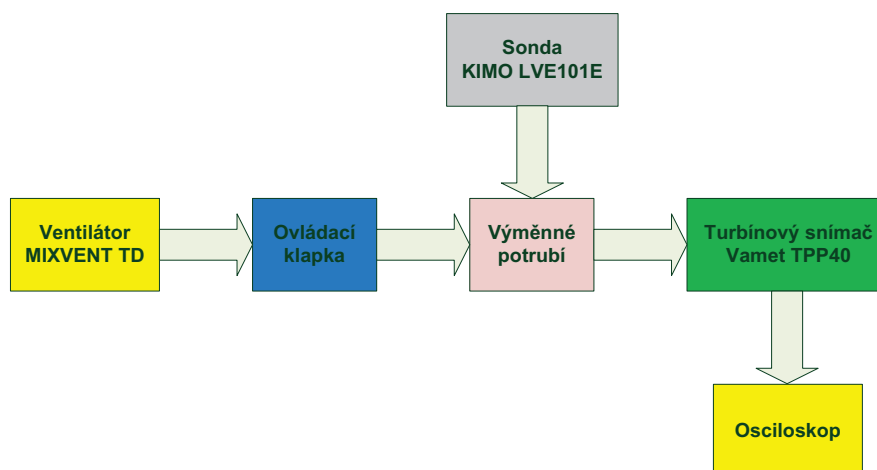
Z důvodu úspory financí, myšlenky využít turbínový snímač a možnosti zakoupení ruční anemometrické vrtulkové sondy, byla vytvořena samostatná trať pro větší průtoky, než je rozsah uvedený v zadání práce.

5.1.1 Specifikace a možnosti trati č.1

Hnacím prvkem trati č.1 je ventilátor pro vzduchotechniku. Dále trať obsahuje mechanickou klapku k regulaci průtoku, přechodku ze světlosti DN100 na DN40, přímé usměrňovací úseky a tvarovky, které zde slouží k deformaci rychlostního profilu proudění. Úseky, které jsou určeny pro vkládání sondy, jsou vyrobeny z průhledného

materiálu, aby bylo možné kontrolovat polohu sondy (správné natočení ke směru proudění). Trať je kompletně rozebíratelná a během měření laboratorní úlohy se modifikuje. K měření slouží turbínový snímač Vamet TPP40 a ruční anemometrická vrtulková sonda.

Proudění vzduchu zajišťuje ventilátor pro vzduchotechniku s nominálním průtokem $140\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ a montážní světlostí pro potrubí DN100. Ventilátor je schopen poskytnout pouze malý tlak. Výkon v členité trati rapidně klesá, ale byl zvolen s ohledem na nízkou hlučnost. Konkrétní průtok v trati je zjišťován měřením.



Obr. 5.1: *Blokové schéma trati č.1*

Trať umožňuje proměřit charakteristiku turbínového snímače, tedy závislost frekvence výstupního napětí na průtoku (polohy klapky). Vrtulkový anemometr slouží pro zjištění rychlosti proudění vzduchu. Po vložení tvarovek, lze sondou zachytit změnu rychlostního profilu proudění. Při měření sondou v potrubí o světlosti DN100 a poté v DN40 má student možnost ověřit vliv snímače na výsledky měření. Detailněji jsou parametry a možnosti měření popsány dále u popisu laboratorní úlohy.



Obr. 5.2: *Měřicí trať č.1*



Obr. 5.3: Měřicí trať č.1 - tvarovky

5.2 Laboratorní trať č.2

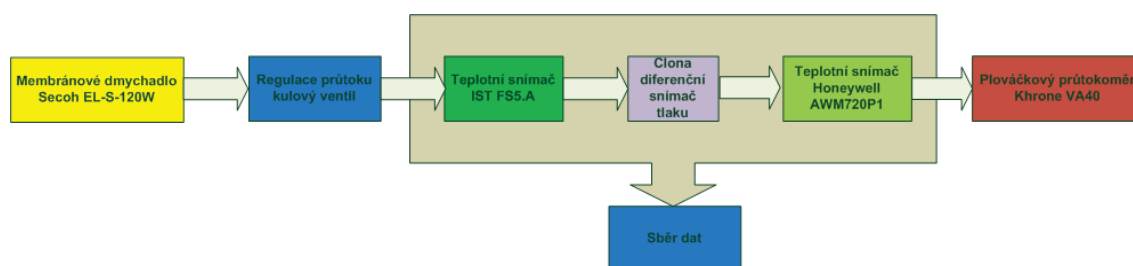
Druhá, dalo by se říci, hlavní trať byla navrhovaná již přímo na míru dle zadání. V první fázi návrhu, byl jako zdroj proudění navržen kompresor se vzdušníkem a regulací pomocí tlakového ventilu. Z důvodu hlučnosti, nutnosti revizí pro tlakovou nádobu a plánovanému centrálnímu vzduchovému rozvodu, byl zvolen kompromis. Jako zdroj proudění bylo zakoupeno dvumotorové membránové dmychadlo. Ve škole byly k dispozici dva již dříve zakoupené tepelné snímače, které byly v této trati také využity.

5.2.1 Specifikace a možnosti trati č.2

Jak již bylo předesláno, zdrojem proudění bylo zvoleno membránové dmychadlo o jmenovitém výkonu $225 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Světlost trati je 20 mm. V trati jsou zabudovány dva snímače založené na tepelném principu. První z nich, IST FS5.A, který je hmotností termoanemometr a snímač Honeywell AWM720P1, který funguje na kalorimetrickém principu.

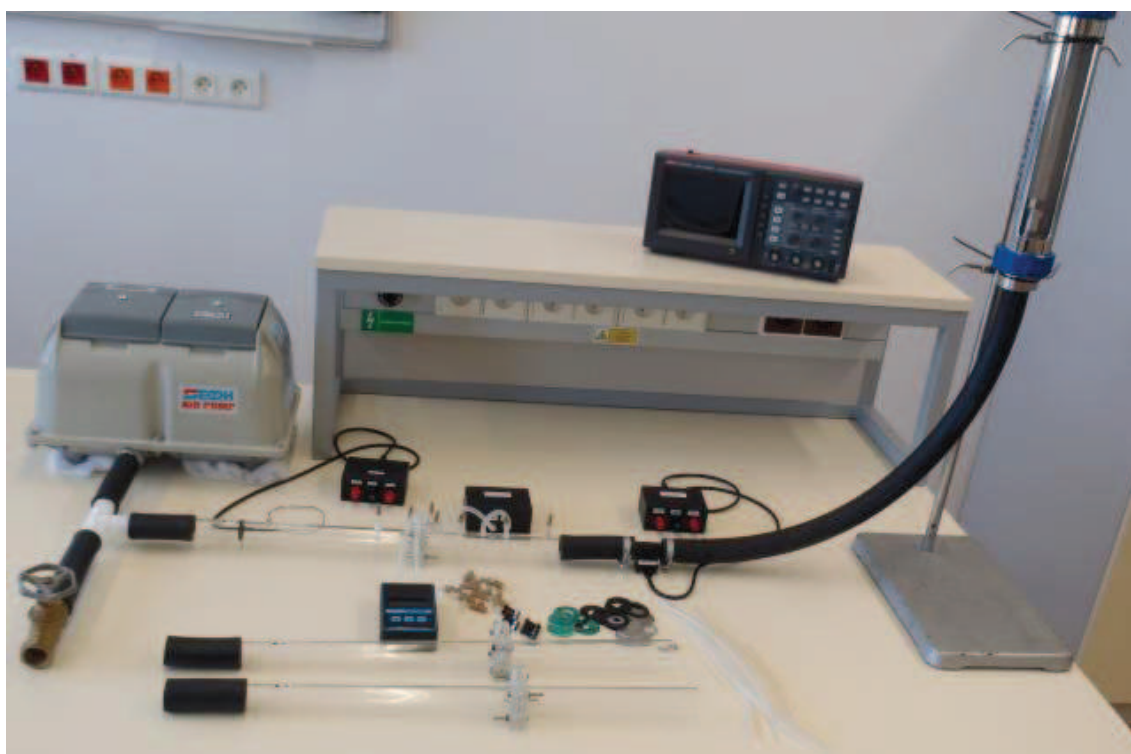
Z teoretického rozboru i z průzkumu trhu vyplývá, že použití měření tlakové difference na cloně není pro tuto měřicí trať zcela vhodné. Rozhodl jsem se vyrobit clonu s tlakovými odběry svépomocí i za cenu oželení normalizovaných parametrů, ale ve snaze přiblížit studentům měření na cloně pomocí tlakové difference. Clony byly vyrobeny 3. Každá z nich je rozebíratelná s připojením na přírubu a její součástí jsou usměrňující úseky potrubí před i za clonou s vhodnou délkou dle [1]. Clonové kotouče jsou pohodlně vyměnitelné a je jich několik připraveno s rozdílnými průměry otvorů. Odběry tlakové difference jsou na přírubě. Jedna ze clon je osazena více vývody pro měření tlaku. Lze tedy proměřit typický průběh tlaku na škrticím členu viz obrázek (Obr. 3.6). K měření tlakové difference byly zakoupeny dva snímače. Sensortechncs HCXPM005D6V s rozsahem $\pm 5 \text{ mbar}$ a Greisinger GDH200 s rozsahem $0 - 200 \text{ mbar}$. Při koupi těchto snímačů, bylo myšleno na to, že budou nasazeny v laboratorní výuce,

a tedy mají několikanásobnou přetížitelnost, než je jejich jmenovitý rozsah. Jako referenční snímač byl zvolen plovákový průtokoměr Krohne VA40, s rozsahem 25 až 225 $\text{Nl} \cdot \text{min}^{-1}$. Blokové schéma trati je na obrázku (Obr. 5.4). Regulace průtoku v měřicím kanále je realizována kulovým ventilem, a to tak, že otevíráním kulového ventilu dochází ke zmenšování proudění v kanále a přebytečný vzduch je vypouštěn mimo kanál. Tím je dosaženo toho, že se neškrť (nezatěžuje) přímo dmychadlo a tedy nedochází k zahřívání, potažmo změnám provozních podmínek při měření.



Obr. 5.4: Blokové schéma trati č.2

Trat' umožňuje proměření převodních charakteristik snímačů v závislosti na průtoku referenčním plovákovým snímačem. Dále je možné proměřit vliv změny průměru clony, či její polohy v potrubí na tlakovou diferenci. Na cloně je také možné ověřit průběh tlaku před a za clonou. Detailněji jsou parametry a možnosti měření popsány dále u popisu laboratorní úlohy.



Obr. 5.5: Trat' číslo 2. + clony a příslušenství

5.3 Použitá zařízení

V podkapitole *Použitá zařízení* bude ve stručnosti popsáno to nejdůležitější, co se daných komponent týká. Informace jsou z katalogových listů zařízení, které jsou součástí elektronické přílohy. Tam se dají dohledat veškeré podrobnosti.

Membránové dmychadlo – Secoh EL-120W

Max. průtok: $225 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Dvoj-membránové

Hlučnost: 39dB

Max příkon: 175W

Bezolejový provoz

Signalizace poškozené membrány

Signalizace přehřívání se samočinným odstavením



Obr. 5.6: Membránové dmychadlo

Ventilátor pro vzduchotechniku - MIXVENT TD

Průtok: $180/140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Výkon: 20/12 W

Otáčky: 2500/2200 otáček za minutu

Určené k montáži do kruhového potrubí



Obr. 5.7: Ventilátor pro vzduchotechniku

Turbínový průtokoměr - Vamet TPP 40

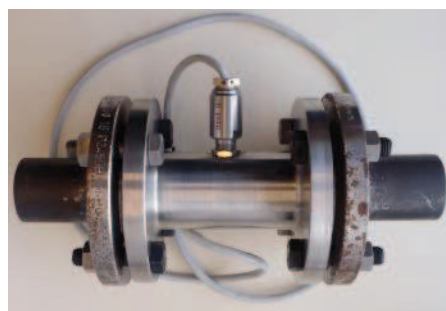
Průtok při 0,1 MPa: 12 až $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Provozní teplota: od -35°C do $+80^\circ\text{C}$

Přesnost měření v rozsahu: 20 až 100 % - 1 %
10 až 20 % - 2 %

Reprodukovatelnost: lepší než 0,2 %

Neznáme podmínky kalibrace. Více informací v popisu úlohy.



Obr. 5.8: Vamet TPP 40

Aby bylo možné tento snímač připojit do měřicí trati, byly zakoupeny dvě příruby a do nich navařeno potrubí se světlostí 50 mm. Do těchto úseků přesně zapadají vyměnitelné kusy, které náleží k měřicí trati č.1.

Vrtulkový anemometr s ruční sondou - Kimo LV101E

Sonda o průměru 14 mm

Přístroj měří průtok vzduchu a teplotu

Oba senzory v jedné měřicí sondě

Měřicí element: ventilátor, Hallova sonda

Pracovní teplota:

přístroje: 0 až +50 °C

sondy: -20 až +80 °C

Měřicí rozsah:

0,8 až 3 m.s⁻¹

3,1 až 25 m.s⁻¹



Obr. 5.9: *Vrtulkový anemometr*

Přesnost:

±3 % z hodnoty ±0,1 m.s⁻¹

±1 % z hodnoty ±0,3 m.s⁻¹

Rozlišení: 0,1 m.s⁻¹

Snímač umožňuje automatické průměrování, dopočítávání objemového průtoku ze zadaných rozměrů potrubí atd.

Hmotnostní termoanemometr - IST FS5.A

Konstrukční řešení tohoto snímače je pro přímé měření v potrubí.

Parametry snímače:

Rozsah průtoku: 0 – 10 m.s⁻¹

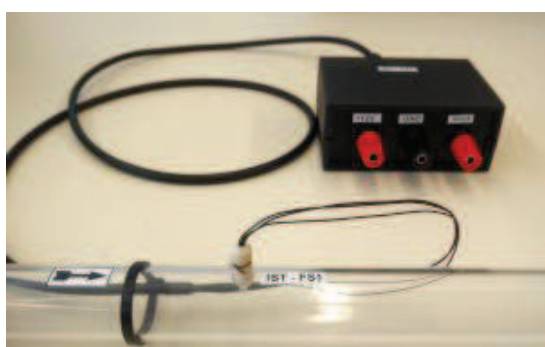
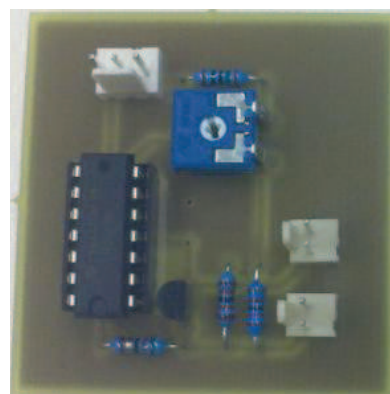
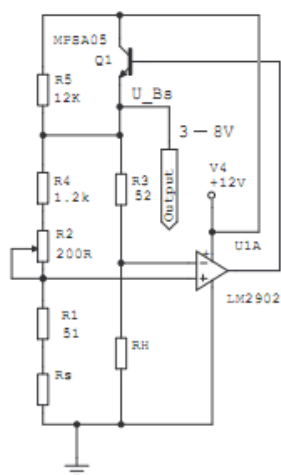
Citlivost: 0,01 m.s⁻¹

Napájecí napětí: 12 V

Teplotní rozsah: -30 – 100 °C

Klidové napětí: 3,7 V

K tomuto snímači byl vyroben vyvažovací můstek, dle schématu výrobce. Dále byla elektronika zapouzdřena do krabičky, ke snadnému využití v laboratorní výuce. Vstup napájecího napětí je chráněn diodou proti nechtěnému přepólování.



Obr. 5.10: *Obrazová dokumentace snímače IST*

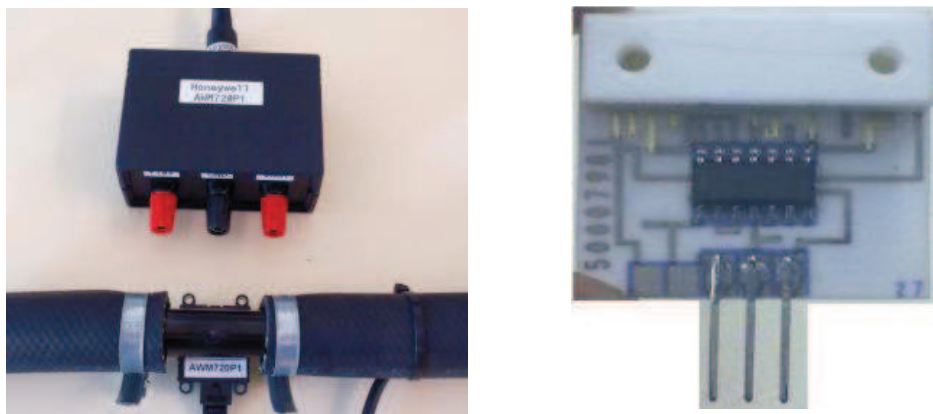
Kalorimetrický snímač - Honeywell AWM 720P1

Kalorimetrický snímač od firmy Honeywell má konstrukční řešení tzv. s obtokem. Jak je zmíněno v teorii, tento typ snímače je vybaven usměrňovačem média, laminarizačním členem.

Parametry snímače:

Rozsah průtoku:	0 – 200 l.min ⁻¹
Napájecí napětí:	10 V
Teplotní rozsah:	-25 – 85 °C
Klidové napětí:	1V
Odezva:	6 ms

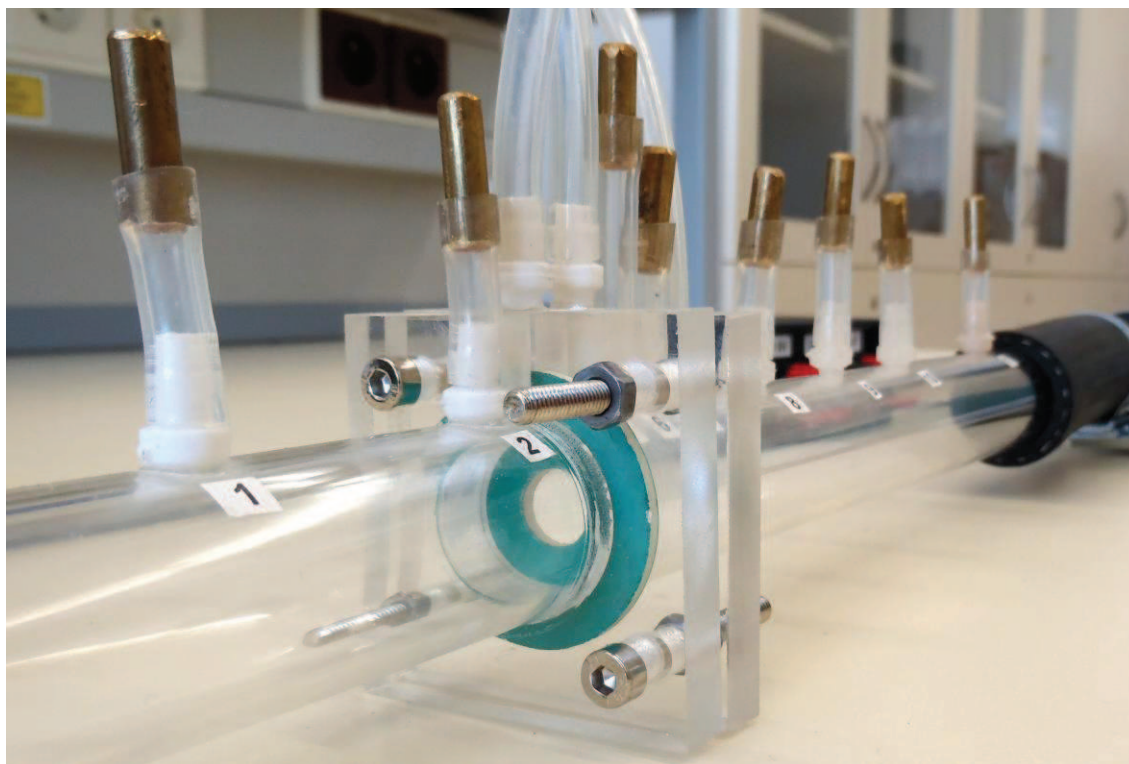
Výrobce také uvádí, že tento snímač byl navrhnout pro medicínské účely. Pro snadné připojení byla vyrobena krabička pro připojení měřicích kabelů. Vstup napájecího napětí je chráněn diodou proti nechtěnému přepólování.



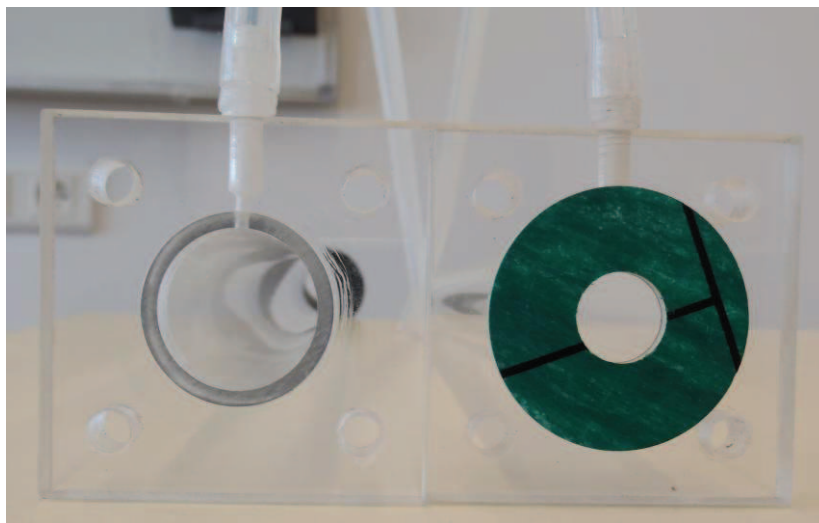
Obr. 5.11: *Honeywell AWM720P1*

Centrická clona – vlastní výroba

Měřicí úsek se clonou je vyroben z čirých akrylátových trubek o vnitřním průměru 20 mm, které jsou osazeny čtvercovými přírubami. Mezi tyto příruby se upíná samotná clona. Clonek je vyrobeno několik s rozličnými průměry. U přímých úseků byly dodrženy vzdálenosti uklidňovacích potrubí v násobcích DN dle [1]. Byly vyrobeny tři sady těchto clon, jak je vidět na obrázku (Obr. 5.5). Každá z těchto clon má vyvedené tlakové odběry na přírubě. Jedna ze clon je osazena více tlakovými odběry, které jsou umístěny před a za clonou, tak aby bylo možné ověřit průběh tlakové ztráty na škrticím členu (Obr. 5.12).



Obr. 5.12: *Clona s více tlakovými odběry*



Obr. 5.13: Rozložená clona - pohled na tlakové odběry na přírubě

Snímač tlakové difference - Greisinger GDH200

Měřicí rozsah:

0,00 až 19,99 nebo 20,0 až 199,9 mbar

Rozlišení: automatické přepínání 0,1 / 0,01

Přetížení: max. 500 mbar

Přesnost

Měřicí rozsah: do 200 mbar

±0,2 % FS hystereze a linearita

±0,4 % FS vliv teploty od 0 do 50 °C

Měřicí rozsah: do 20 mbar

±1 % FS hystereze a linearita

±2 % FS vliv teploty od 0 do 50 °C

Jmenovitá teplota: 25 °C

Pracovní teplota: -25 až 50 °C



Obr. 5.14: Greisinger GDH200

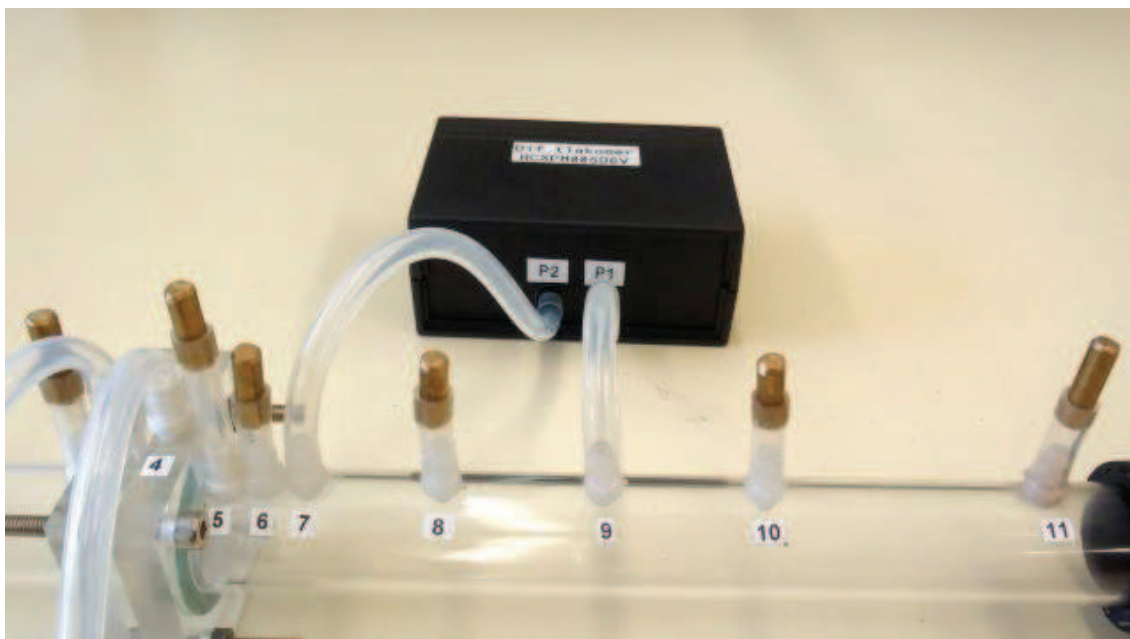
Snímač tlakové difference - Sensortechncs HCXPM005D6V

Měřicí rozsah: ±5 mbar

Napájecí napětí: 4,8 – 18 V

Pracovní teplota: -20 až 70 °C

Tento snímač je v provedení pro instalaci do desky plošného spoje. Byl osazen do univerzální desky a zapouzdřen do krabičky pro snadnější manipulaci a připojení měřicích kabelů.



Obr. 5.15: Přípravek pro měření tlakové difference se snímačem Sensortechinics HCXPM005D6V

Plovákový průtokoměr - Krohne VA40

Odolný plovákový průtokoměr v průmyslovém provedení, kalibrovaný dodavatelem dle požadavků naší trati.

Rozsah: 22,5 – 225 Nl.min⁻¹

Pracovní teplota: 20 °C

Poměr maximální a minimální měřené hodnoty: 10 : 1

Přesnost měření: ± 1% z měřicího rozsahu

Možnost vybavení mezními kontakty

Stupnice na kónusu

Tlaková ztráta: max. 10 mbar

Připojení: vnitřní závit G 1“

Stavební délka: 375 mm



Obr. 5.16: Krohne VA40

Snímač byl dodán s kalibrací na provozní podmínky o teplotě 20 °C a tlaku 130 mbar. Stupnice je ocejchovaná na Nl.min⁻¹ vztažené k teplotě 0 °C a tlaku 1,013 bar. Po kompletaci měřicí trati a určení konkrétních provozních podmínek, byl od výrobce dodán kalibrační list na aktuální pracovní podmínky s teplotou 25 °C a tlakem 10 mbar. Přepočtené hodnoty jsou opět vztaženy k Nl.min⁻¹. Dokument s kalibrací je součástí elektronické přílohy na CD.

6 NÁVRH LABORATORNÍCH ÚLOH

U každé laboratorní úlohy je uvedeno, co bylo záměrem tvorby laboratorního výrobku, co by si měl student vyzkoušet a jaký by měla mít nová úloha přínos. Dělení a grafická úprava jednotlivých podkapitol laboratorních úloh respektuje podobu již vytvořených návodů pro laboratorní cvičení.

6.1 Laboratorní úloha č. 1

Laboratorní úloha č.1 je zaměřena na ozřejmění problematiky měření průtoku vzduchu. Studenti se seznámí s principem turbínového průtokoměru a měřením pomocí anemometrické vrtulkové sondy. Důraz je kladen na vlivy, které mohou ovlivnit výsledek měření. Například si studenti ověří, proč jsou nutné uklidňovací úseky potrubí před snímači, nebo jak může nevhodné umístění snímače ovlivnit výsledky měření. Studenti by měli po odměření zadání být schopni vysvětlit princip měření s turbínovým průtokoměrem, měli by znát jeho možnosti a pro jaké měření se hodí vrtulkový anemometr. Do budoucí technické praxe by si měli zapamatovat např. vliv nerovností v potrubí na výsledek měření. V závěru vypracování laboratorní úlohy by měli dosažené vědomosti vlastními slovy interpretovat.

6.1.1 Zadání

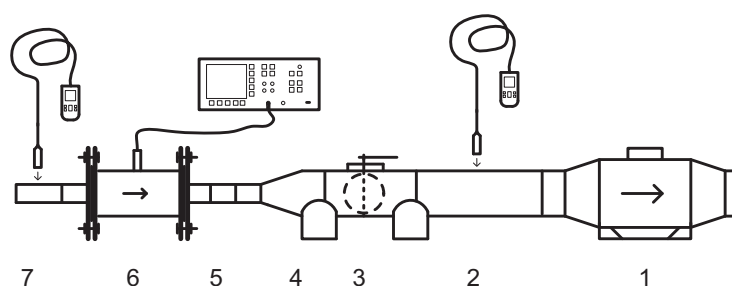
Cíl cvičení: *Seznámit se s měřením průtoku vzduchu, turbínovým snímačem, vrtulkovým anemometrem a vlivy, které působí na přesnost měření.*

1. Seznamte se s vrtulkovým anemometrem Kimo LV101E, jeho možnostmi a podporovanými funkcemi.
2. Pomocí anemometru Kimo LV101E zaznamenejte rychlosti proudění na různých místech v laboratoři. Identifikujte a popište vlivy, které měření ovlivňují. Uveďte příklady aplikací, kde a k čemu je vhodné použít vrtulkovou anemometrickou sondu.
3. Proměřte závislost frekvence výstupního napětí turbínového snímače v závislosti na objemovém průtoku. Kimo LV101E využijte jako referenční snímač. Vypočítejte konstantu pro turbínový snímač.
4. Po vložení tvarovek do měřicího kanálu ověřte a zaznamenejte vliv změny tvaru potrubí na rychlostní profil proudění. Měření proveďte pomocí snímače Kimo LV101E.
5. Proměřte rychlost proudění v úseku DN100 a DN40 pomocí anemometru Kimo LV101E. Diskutujte okolní vlivy na měření.

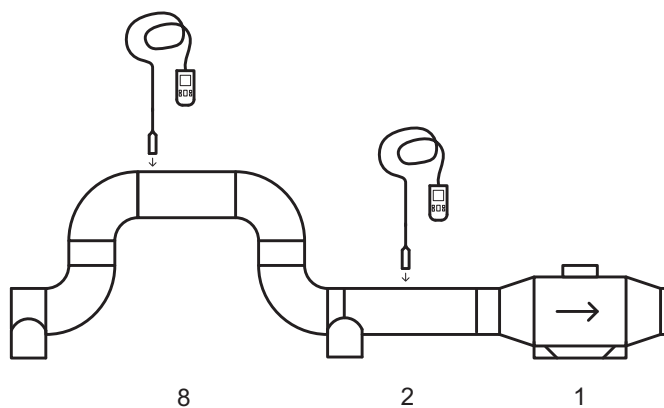
6.1.2 Schéma zapojení

Vysvětlivky k schémátům zapojení měřicí trati:

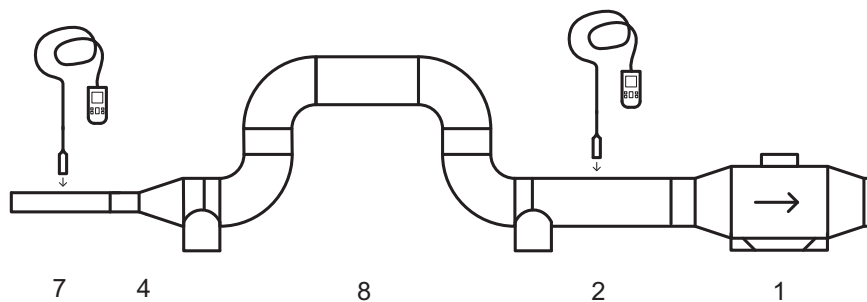
- 1 – ventilátor pro vzduchotechniku
- 2 – přímý úsek potrubí – akrylát, DN100, s otvorem pro sondu
- 3 – regulační klapka
- 4 – přechodka DN100 - DN40
- 5 – akrylátová propojka, DN40
- 6 – turbínový průtokoměr
- 7 – přímý úsek potrubí – akrylát, DN40, s otvorem pro sondu
- 8 – úsek z tvarovek



Obr. 6.1: Modifikace trati – varianta 1



Obr. 6.2: Modifikace trati – varianta 2



Obr. 6.3: Modifikace trati – varianta 3

K propojení jednotlivých dílů použijte spojky, které jsou součástí výbavy pracoviště. Trať mějte uloženou v nosných dílech a pro bezpečnost vaši i zařízení, neodstraňujte pryžové zarážky u přírub turbínového snímače. Mohlo by dojít ke svalení snímače z desky pracovního stolu!

6.1.3 Doporučený postup

- ad 1)** Prostudujte teoretickou přípravu k dané problematice. Doporučeno je využít i další literaturu [1],[5]. Poté využijte přiložených materiálů ke snímači Kimo LV101E a seznámte se s jeho parametry a funkcemi.
- ad 2)** Zaznamenejte maximální naměřené rychlosti proudění pomocí Kimo LV101E. Z okna změřte rychlost větru, průvan v místnosti, rychlost proudění vzduchu u klimatizace, či rychlost „průvanu“ u dveří. Uvažujte např. nejvyšší naměřené rychlosti. Do zprávy o měření uveďte, co na tato měření mělo největší vliv a na co by se dal tento vrtulkový anemometr v praxi použít. Nezapomeňte zaznamenat aktuální podmínky měření (datum, teplota, tlak, vlhkost).
- ad 3)** Sestavte měřicí trať dle schématu (Obr. 6.1). Pro vyhodnocování signálu z indukčního snímače polohy turbínové sondy využijte osciloskop. V potrubí DN100 zaznamenávejte pomocí Kimo LV101E rychlost proudění a pomocí automatické funkce i objemový průtok. Do grafu vyneste závislost frekvence výstupního napětí turbínového snímače na objemovém průtoku. Při měření se snažte umístit sondu s vrtulkou do středu potrubí a kolmo ke směru proudění. V potrubí DN40 měřte rychlostní průtok pomocí sondy. Sondu do kanálu zasuněte tak, aby byla celá vrtulka v kanálu, ale aby snímač bránil průtoku vzduchu co nejmenší plochou. Pro všechna měření na trati utěsněte nepoužívané otvory pro sondy, tak aby byl průběh měření co nejméně ovlivňován. Proveďte výpočet konstanty turbínového snímače.
- ad 4)** Sestavte trať dle schématu (Obr. 6.2). V přímém úseku DN100 určete minimální a maximální hodnotu rychlosti proudění v průřezu potrubí (změna zasunutí sondy). To samé měření proveďte v úseku tvarovek. Naměřené výsledky zaznamenejte a jednoduše graficky znázorněte. Slovně popište výsledek měření a o čem naměřená data vypovídají.
- ad 5)** Sestavte trať dle schématu (Obr. 6.3). V přímém úseku DN100 určete minimální a maximální hodnotu rychlosti proudění v průřezu potrubí (změna zasunutí sondy). To samé měření proveďte pro přímý úsek DN40. Výsledky porovnejte a ve zprávě o měření diskutujte největší vlivy na toto měření.

6.1.4 Seznam přístrojů, přípravků a dokumentace

- Turbínový průtokoměr Vamet TPP 40
- Ruční vrtulková anemometrická sonda Kimo LV101E
- Osciloskop Hewlett-Packard 54601B
- Ventilátor pro vzduchotechniku Mixvent TD
- Stavební části k měřicí trati

6.1.5 Teoretický popis

Teoretickému popisu jsou věnovány úvodní kapitoly této diplomové práce. Z důvodu, aby se text zbytečně neopakoval, budou sem vhodné pasáže z úvodu překopírovány před použitím ve výuce. Další vhodnou literaturou k této problematice jsou např. [1] a [5].

6.1.6 Katalogové listy použitých snímačů

Důležité parametry jednotlivých přístrojů jsou již v diplomové práci uvedeny. Katalogové listy jsou v plném znění součástí elektronické přílohy. V tištěné podobě jsou tyto materiály dostupné u laboratorního pracoviště.

6.2 Laboratorní úloha č. 2

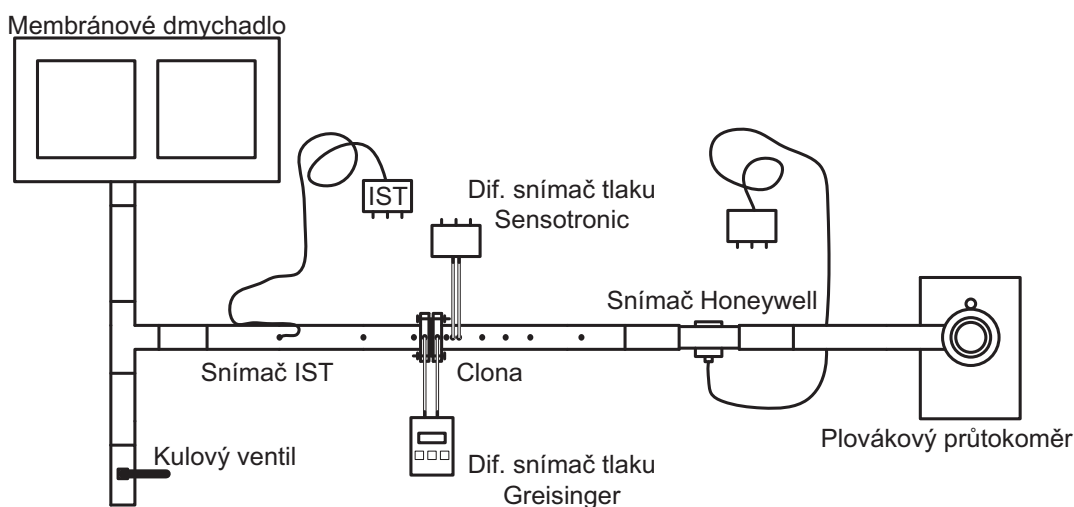
Druhá laboratorní úloha studenty seznámí s měřením proudění vzduchu pomocí tepelných snímačů. Ukáže využití clony a snímání tlakové difference. Studenti mají možnost proměřit průběh tlaku před a za clonou. Dále je možné proměřit vlivy, které měření na cloně ovlivňují jako je přesnost uložení clony v měřicím kanále, či velikost otvoru samotné clony. Jako reference je u této úlohy použit plovákový snímač v průmyslovém provedení. Studenti si vyzkouší výpočet součinitele průtoku clony C a mají za úkol vyčíslit nejistoty měření na jednotlivých přípravcích. Výstupem z této laboratorní úlohy by měli být teoretické znalosti o využitých metodách, vlivech, které na ně působí a schopnost uvažovat o nejistotách, které mají dopad na výsledky měření.

6.2.1 Zadání

Cíl cvičení: *Seznámit se s měřením průtoku vzduchu, s tepelnými principy, s měřením tlakové difference na cloně, s principem plovákového průtokoměru a provést výpočet nejistot měření.*

1. Změřte charakteristiky výstupního napětí tepelných snímačů IST FS5.A a Honeywell AWM720P1 v rozsahu 30 – 200 Nl.min^{-1} . Vypočtěte hodnoty Re pro uvažované průtoky.
2. Snímačem Greisinger GDH200 změřte průběh tlakové difference na přírubě pro clonu $d = 14$ mm. Rozsah měření 30 – 200 Nl.min^{-1} .
3. Snímačem Sensortechncs HCXPM005D6V změřte průběh tlakové difference na přírubě pro clonu $d = 15,6$ mm. Rozsah měření 30 – 200 Nl.min^{-1} .
4. Snímačem Greisinger GDH200 změřte průběh tlakové difference na přírubě pro clonu $d = 10$ mm. Rozsah měření 30 – 200 l.min^{-1} .
5. Změřte a graficky znázorněte průběh statického tlaku (přetlaku) na cloně v měřicím kanále. Měřte pro clonu $d = 10\text{mm}$ a průtok 200 Nl.min^{-1} . Určete celkovou tlakovou ztrátu vzniklou na cloně.
6. Opakujte měření z bodu 4 s maximálně vyoseným středem clony. Tato dvě měření porovnejte.
7. Zamyslete se nad nejistotami měření pomocí přípravků. Zvolte jednu hodnotu průtoku a pro ni proveďte výpočet nejistot.
8. Pro průtok 60 Nl.min^{-1} vypočtěte součinitel průtoku C pro clonu $d = 10$ mm.

6.2.2 Schéma zapojení



Obr. 6.4: Schéma zapojení - trať č. 2

Při práci na měřicí trati dbejte opatrnosti při manipulaci se zařízeními tak, aby nedošlo k odlomení tlakových odběrů na cloně. Při výměně hadiček u tlakových odběrů přidržujte daný vývod a netahejte pouze za hadičku. Při vyměňování clonek odpojte snímače tlaku a vyjměte celý úsek potrubí z trati. Pokud není uvedeno jinak, snažte se střed clony umístit co nejpřesněji do osy potrubí. Po výměně clony zapojte úsek zpět do trati. Jednotlivé přípravky připojte ke zdroji a k vyhodnocovacím voltmetrům dle popisů na krabičkách. Dojde-li ke stržení popisu na krabičce, informujte dozor v laboratoři a snímač zapojte dle katalogových hodnot.

Před měřením se seznámte s funkcemi a rozsahy diferenčních snímačů tlaku. Důležité je dodržet připojení tlaků ke snímači. (Kde se připojuje větší a kde menší hodnota tlaku)

6.2.3 Doporučený postup

Turbínové dmychadlo mějte zapnuté jen po dobu nezbytnou k měření. Tím nedojde k zahřívání zařízení a následnému ohřevu hnaného vzduchu. Bude tedy možné uvažovat teplotu v laboratoři jako teplotu média.

- ad 1)** Zapojte snímač Honeywell a IST dle popisu a změřte požadované charakteristiky. Při měření nemějte mezi přírubami žádnou clonu. Průtok regulujte kulovým ventilem. Hodnoty odečtené na stupnici plovákového průtokoměru upravte dle dodaného přepočtu od výrobce snímače. Uvažujte průtok pro pracovní přetlak v kanále 10 mbar a teplotu v laboratoři 25 °C. Tento kalibrační protokol využijte k zjištění potřebných údajů k výpočtu Re . Zaznamenejte aktuální podmínky v laboratoři.

- ad 2)** Vsaďte požadovanou clonu mezi příruby. Nevyužívané vývody pro odběr tlakové difference mějte vždy utěsněné. Připojte snímač tlakové difference Greisinger dle manuálu (větší/menší tlak). Zapněte jej a nechte kalibrovat na nulovou tlakovou diferenci. Až poté zapněte turbínové dmychadlo.
- ad 3)** Vsaďte požadovanou clonu mezi příruby. Nevyužívané vývody pro odběr tlakové difference mějte vždy utěsněné. Připojte snímač tlakové difference Sensortechinics HCXPM005D6V dle manuálu (větší/menší tlak). Až poté zapněte turbínové dmychadlo.
- ad 4)** Vsaďte požadovanou clonu mezi příruby. Nevyužívané vývody pro odběr tlakové difference mějte vždy utěsněné. Připojte snímač tlakové difference Greisinger dle manuálu (větší/menší tlak). Zapněte jej a nechte kalibrovat na nulovou tlakovou diferenci. Až poté zapněte turbínové dmychadlo.
- ad 5)** Snímačem Greisinger změřte přetlak na tlakových odběrech 1 – 11. Jedná se o měření tlakové difference přetlaku vůči atmosférickému tlaku. Náповěda: Připoj na větší tlak připojte k trati a druhý přípoj nechte volný. Poznamenejte si vzájemnou vzdálenost jednotlivých tlakových odběrů. Vyneste průběh do grafu a výsledky porovnejte s teorií. Určete celkovou tlakovou ztrátu Δp_z .
- ad 6)** Před měřením povolte příruby a nechte clonku propadnout až na šrouby, které spojují příruby. Dále pokračujte jako u úkolu 4. Výsledky porovnejte s úkolem 4.
- ad 7)** Zvolte jednu hodnotu průtoku a u ní uvažujte vliv nejistot. Proved'te výpočet nejistot typu A i B. Pro nejistotu A proved'te 10 měření. Nezapomeňte si zaznamenat použité měřicí přístroje k dohledání informací k nejistotám typu B.
- ad 8)** Nezapomeňte, že je potřeba znát nejen diferenční tlak, ale i tlak před a za clonou. Změřte si světlost potrubí. Pro získání potřebných tabulkových hodnot využijte kalibrační list k plovákovému snímači, nebo jinou důvěryhodnou literaturu. Využijte nomogramu k určení expanzního součinitele ε .

6.2.4 Seznam přístrojů, přípravků a dokumentace

- Membránové dmychadlo Secoh EL-120W
- Kulový ventil
- Snímač IST FS5.A
- Snímač Honeywell AWM720P1

- Clony s příslušenstvím
- Plovákový průtokoměr Krohne VA40
- Diferenční snímač tlaku Greisinger GDH200
- Diferenční snímač tlaku Sensortechncics HCXPM005D6V
- Napájecí zdroj ZPA Košíře – AUL 310
- 2x Hewlett-Packard 34401A
- Posuvné měřítko
- Katalogové listy k používaným snímačům

6.2.5 Teoretický popis

Teoretickému popisu jsou věnovány úvodní kapitoly této diplomové práce. Z důvodu, aby se text zbytečně neopakoval, budou sem vhodné pasáže z úvodu překopírovány před použitím ve výuce. Další vhodnou literaturou k této problematice jsou např. [1] a [5].

6.2.6 Katalogové listy použitých snímačů

Parametry jednotlivých přístrojů jsou již v diplomové práci uvedeny. Katalogové listy jsou v plném znění součástí elektronické přílohy. V tištěné podobě jsou tyto materiály dostupné u laboratorního pracoviště.

7 VYPRACOVÁNÍ LABORATORNÍCH ÚLOH

V následující kapitole budou prezentovány výsledky měření dle navržených zadání z předchozí kapitoly

7.1 Vypracování laboratorní úlohy č.1

ad 1) Dle prvního bodu zadání proběhlo seznámení s teorií popisující měření průtoku vzduchu. Z příloženého manuálu byly nastudovány funkce Kimo LV101E. Tento přístroj umožňuje měření rychlosti proudění vzduchu, teploty a ze znalosti geometrických rozměrů kanálu automatický dopočet objemového průtoku. Dále má průměrovací a zálohovací funkce. Umožňuje změnu zobrazovaných fyzikálních jednotek.

ad 2) Měření proběhlo za následujících laboratorních podmínek

Měření proběhlo: 12.4.2012

Tlak: 1020 hPa

Teplota v laboratoři: 24,5 °C

Vlhkost vzduchu: 30%

Venkovní teplota: 18 °C

Pomocí vrtulkového anemometru byla zaznamenána rychlost větru.

Tab. 7.1: Naměřené hodnoty rychlosti větru

Měření	Rychlost větru
	[m.s ⁻¹]
1.	1,1
2.	0,8
3.	0,9

Při měření rychlosti proudění vzduchu v místnosti přístroj nezaznamenal žádné hodnoty.

U klimatizační jednotky v laboratoři bylo pomocí Kimo LV101T nalezeno maximální proudění 3,3 m.s⁻¹.

Při měření rychlosti větru mělo na měření asi největší vliv, že se měřilo z okna budovy, tedy rychlost a směr větru byla ovlivněna budovou. U ruční vrtulkové sondy je ten problém, že uživatel musí intuitivně nastavit vrtulku co nejvíce kolmo ke směru proudění, což pokud se nejedná o měření v potrubí, kde se dá směr proudění snadněji předpokládat, vůbec jednoduché. Tím je určena i vhodnost použití snímačů tohoto typu. Lze jej použít pro kontrolní či orientační měření, nejčastěji např. v klimatizační technice.

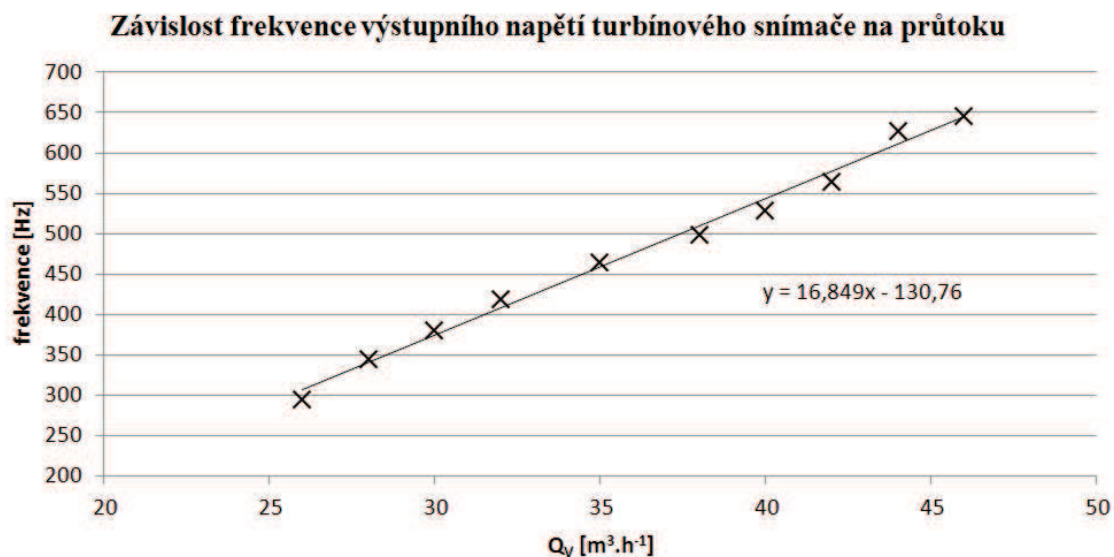
ad 3)

Tab. 7.2: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot - laboratorní úloha 1

Objemový průtok DN100 (automatický dopočet)	Turbínový průtokoměr	Rychlost proudění (DN100)	Rychlost proudění (DN40)
[m ³ .h ⁻¹]	[Hz]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]
26	296	1,0	3,0
28	345	1,0	3,1
30	381	1,1	3,1
32	420	1,2	3,4
35	465	1,3	3,7
38	500	1,4	4,2
40	529	1,4	4,5
42	565	1,5	4,8
44	628	1,6	5,0
46	646	1,7	5,8

Příklad výpočtu konstanty turbínového snímače pro třetí řádek tabulky:

$$Q_v = \frac{f}{k} \Rightarrow k = \frac{f}{Q_v} = \frac{381}{8,33} = \underline{\underline{45,74 \text{ l}^{-1}}}$$



Obr. 7.1: Graf závislosti frekvence výstupního napětí turbínového snímače na průtoku

Z naměřených dat a následného vyhodnocení měření zde vyplývá několik důležitých poznatků. Při měření vrtulkovou anemometrickou sondou bylo důležité udržet přesnou

polohu sondy vůči směru proudění. Drobné výkyvy hodnot bych přisuzoval měření při nesprávném umístění (natočení) vrtulky.

Výpočtem byla určena konstanta turbínového snímače $45,74 \text{ l}^{-1}$. Turbínový průtokoměr byl v měřicí trati využit z několika důvodů. Byl ve škole, chtěl jsem ukázat princip jeho funkce, přepočet objemového průtoku, a dopřát studentům možnost „ošahat“ a prohlédnout si tento snímač. K tomuto snímači přísluší konstanta $96,73 \text{ l}^{-1}$. Problém rozdílnosti výsledků tkví v tom, že ke snímači nebyla dostupná a ani se nepodařila dohledat žádná dokumentace. Není tedy jasné, na jaké podmínky byl kalibrován. Dle konstrukční masivnosti snímače je určen pro velmi vysoké tlaky. V našem případě se jedná v podstatě o beztlakovou instalaci. V průmyslu jsou turbínové průtokoměry doplněny o snímače tlaku a teploty. Hodnoty z turbíny a přídavných snímačů jsou následně zpracovány vyhodnocovací jednotkou, která se stará o dopočet ke vztažným podmínkám a předložení porovnatelných (korektních) výsledků. Z těchto důvodů se dospělo při měření k rozdílným výsledkům. Dle mého názoru je směrodatnější výsledek z měření pomocí vrtulkového anemometru.

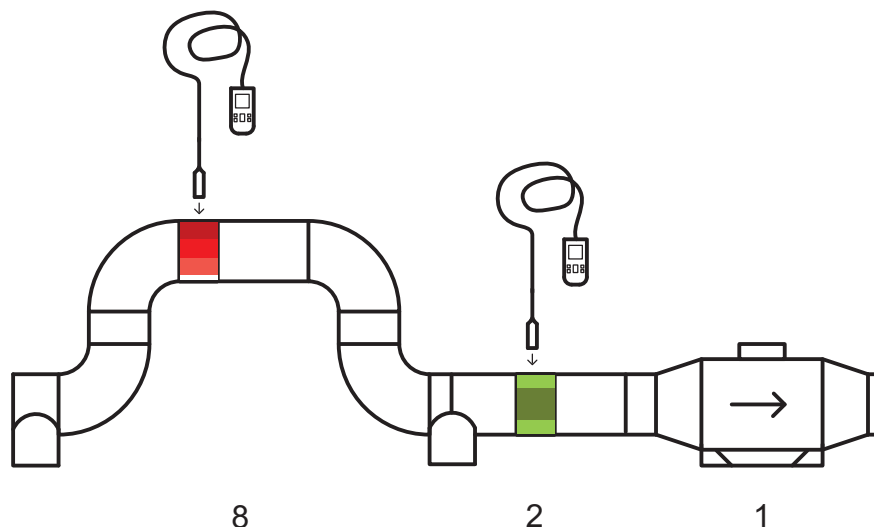
Objemový průtok při měření vrtulkovým anemometrem dosáhl maximu na hodnotě okolo $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Což je hodnota naměřená při plném otevření klapky. To vypovídá o tom, že ventilátor Mixvent TD patří do kategorie nejslabších ventilátorů pro vzduchotechniku. Bez zátěže má dle katalogového listu mít průtok $140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Při zatížení naší trati, kde největší překážkou je přechod z DN100 na DN40, klesne jeho výkon zhruba na třetinu.

ad 4) Ve čtvrtém úkolu bylo zadáno proměřit vliv změny tvaru potrubí na rychlostní profil proudění. V přímém úseku potrubí byla naměřena minimální rychlost proudění $2,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Maximální rychlost byla $2,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tento rozdíl mohl být způsoben nesprávnou polohou ruční sondy ke směru proudění. Dalším vlivem mohlo být ne zcela uklidněné proudění po průchodu tvarovkami, nebo již poměrně blízká vzdálenost od ventilátoru.

Při měření mezi tvarovkami byla naměřena maximální rychlost proudění až $3,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Minimální rychlost v tomto úseku se rovnala $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota byla naměřena přímo za hranou tvarovky. Díky použitým průhledným materiálům se mohlo vizuálně ověřit, že vrtulka anemometru se opravdu netočí. Na obrázku (Obr. 7.2) je znázorněna rychlost proudění v měř. kanále. Sytě červená barva znázorňuje místa, kde byla naměřena maximální rychlost proudění. Červená přechází až do bílé, kde bylo naměřeno $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V zeleném úseku byl rozdíl rychlostí minimální. To znázorňuje zelená barva, která jen mírně přechází do světlejšího odstínu.

Z provedeného měření je tedy zřejmý vliv tvaru potrubí na rychlostní profil jak popisuje např. [1]. Byla potvrzena nutnost využívat usměrňovacích potrubí pro dosažení validních výsledků měření. Například v praxi, při kontrole vzduchotechniky sondou,

by měl technik brát ohled na to, že za odbočkou, či jinou změnou tvaru potrubí nemusí naměřit skutečné hodnoty průtoku.



Obr. 7.2: Znáznornění rychlosti proudění

ad 5) Pátý úkol měl podobný charakter jako úkol předchozí. Trať se modifikovala přidáním přechodu na DN40 a vložením přímého úseku o stejné světlosti s možností vložení sondy. V přímém úseku o světlosti DN100 byla naměřena minimální rychlost proudění $1,5 \text{ m.s}^{-1}$. Maximální rychlost byla $1,9 \text{ m.s}^{-1}$. Tento rozdíl mohl být způsoben, tak jako v předchozí úloze, nesprávnou polohou ruční sondy ke směru proudění, nebo vlivem ne zcela uklidněného proudění po průchodu tvarovkami, či již poměrně blízká vzdálenost od ventilátoru.

V přímém úseku o světlosti DN40 byla naměřena minimální rychlost proudění $6,7 \text{ m.s}^{-1}$. Maximální rychlost byla $9,0 \text{ m.s}^{-1}$. Větší rychlosti proudění jsou způsobeny menším průřezem kanálu, než u DN100. Rozdíl maximální a minimální hodnoty, oproti minulé úloze, byl v tom, že minimální rychlost proudění byla naměřena při minimálním zasunutí sondy do měřicího kanálu. S postupným zasouváním sondy do měřicího kanálu rostla i naměřená rychlost proudění. Při maximálním zasunutí byla naměřena výše uvedená maximální rychlost. Při měření v úseku DN40 nebyla velikost plochy sondy k velikosti průřezu kanálu již zanedbatelná a ovlivňovala měřenou veličinu. Byl prokázán vliv umístění samotného snímače na výsledky měření.

7.2 Vypracování laboratorní úlohy č. 2

ad 1) Aktuální podmínky v laboratoři:

Teplota 25,7 °C, tlak 1005 hPa, vlhkost 25 %.

Pro plovákový průtokoměr a další výpočty v této laboratorní úloze byly uvažovány podmínky: Teplota 25,0 °C, tlak 1013 hPa.

Byla vypočtena hodnota Reynoldsova čísla v měřicím kanále.

Tab. 7.3: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot - úkol 1

Plovákový průtokoměr		Snímač IST FS5.A	Honeywell AWM 720P1	Rychlost proudění v	Re_D
Stupnice	Reálný průtok Q_v				
[$Nl \cdot min^{-1}$]	[$Nl \cdot min^{-1}$]	[V]	[V]	[$m \cdot s^{-1}$]	[-]
0	0	3,672	0,929	0	0
30	27,92	4,675	2,668	1,34	1828
40	37,23	4,713	3,001	1,79	2441
50	46,64	4,789	3,303	2,24	3055
60	55,97	4,851	3,567	2,69	3669
70	65,30	4,918	3,728	3,14	4282
80	74,70	4,978	3,895	3,59	4855
90	84,04	5,031	4,021	4,04	5510
100	93,43	5,061	4,099	4,50	6137
110	102,77	5,115	4,189	4,95	6751
120	113,12	5,151	4,248	5,44	7419
130	121,47	5,197	4,298	5,85	7978
140	130,82	5,247	4,356	6,29	8578
150	140,30	5,305	4,392	6,75	9206
160	149,65	5,328	4,424	7,20	9819
170	159,01	5,374	4,461	7,65	10433
180	168,38	5,428	4,485	8,10	11047
190	177,73	5,481	4,511	8,55	11661
200	187,70	5,523	4,529	9,03	12315

Příklad výpočtu pro druhý řádek tabulky:

Změřený vnitřní průměr potrubí: 21 mm (kruhový profil)

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4} = 0,000346 \text{ m}^2 \quad v = \frac{Q_v}{S} = \frac{0,0004653}{0,000346} = 1,34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Z kalibračního protokolu plovákového snímače byly odečteny potřebné hodnoty k výpočtu Re_D .

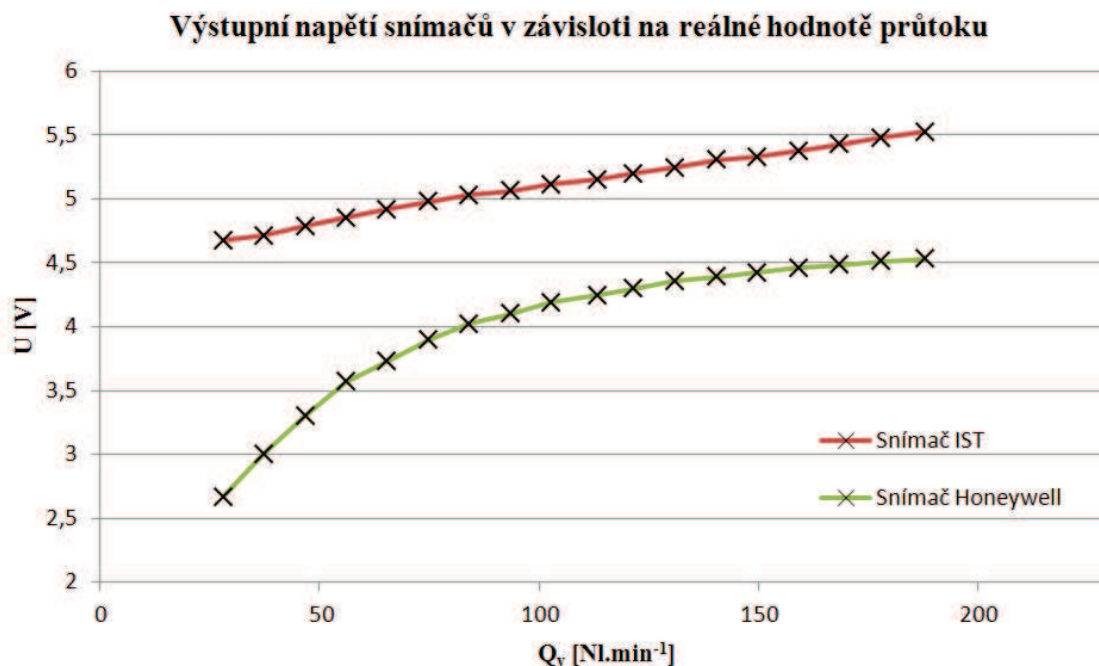
Hustota

$$\rho = 1,196 \text{ kg.m}^3$$

Dynamická viskozita

$$\eta = 0,018416 \text{ mPa.s}$$

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{1,196 \cdot 1,34 \cdot 0,021}{0,000018416} \cong \underline{\underline{1828}} \quad [-]$$



Obr. 7.3: Graf závislosti výstupního napětí snímačů v závislosti na hodnotách reálného průtoku

V prvním úkolu byly změřeny charakteristiky výstupních napětí snímačů IST a Honeywell v závislosti na průtoku. U snímače IST je tato závislost v měřeném intervalu lineární. U snímače Honeywell má průběh napětí přibližně logaritmický charakter a tvarem i hodnotou napětí odpovídá katalogovým hodnotám. Výpočtem byla určena rychlost proudění média v měřicí trati. Maximální rychlost je $9,03 \text{ m.s}^{-1}$. Hodnota Reynoldsova čísla dosahuje až hodnoty 12312. Dle teorie by tedy od reálného průtoku $37,23 \text{ Nl.min}^{-1}$ mělo být proudění v kanále turbulentního charakteru.

ad 2,3,4,6) Vypracování úkolů 2,3,4 a 6 je sjednoceno, jelikož naměřené hodnoty k sobě sounáleží a je přehlednější je uvést a porovnat na jednom místě.

Tab. 7.4: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot tlakových diferencí pro měření na cloně

Plovákový průtokoměr		Měření tlakové difference Δp na přírubě					
Stupnice	Reálný průtok Q_V	Clona d=14mm	Clona d=15,6 mm		Clona d=10mm	Clona d=10mm excentrická	Δ_{Ap}
[Nl.min^{-1}]	[Nl.min^{-1}]	[mbar]	[V]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[mbar]
0	0	0	2,497	0	0	0	0
30	27,92	0,14	2,531	0,09	0,78	0,75	-0,03
40	37,23	0,22	2,554	0,14	1,23	1,21	-0,02
50	46,64	0,36	2,578	0,20	1,86	1,78	-0,08
60	55,97	0,49	2,607	0,28	2,53	2,35	-0,18
70	65,30	0,67	2,635	0,35	3,32	3,08	-0,24
80	74,70	0,89	2,682	0,46	4,42	4,22	-0,20
90	84,04	1,14	2,737	0,60	5,47	5,29	-0,18
100	93,43	1,41	2,786	0,72	6,77	6,34	-0,43
110	102,77	1,69	2,844	0,87	8,14	7,64	-0,50
120	113,12	2,01	2,916	1,05	9,48	8,92	-0,56
130	121,47	2,35	2,989	1,23	11,15	10,56	-0,59
140	130,82	2,74	3,056	1,40	12,78	12,23	-0,55
150	140,30	3,12	3,132	1,59	14,45	13,89	-0,56
160	149,65	3,54	3,239	1,86	16,23	15,84	-0,39
170	159,01	4,08	3,331	2,09	18,35	17,71	-0,64
180	168,38	4,49	3,428	2,33	20,30	19,64	-0,66
190	177,73	5,06	3,517	2,55	22,70	21,80	-0,90
200	187,70	5,48	3,639	2,86	24,90	24,20	-0,70

Δ_{Ap} - rozdíl tlakové difference při měření s vycentrovanou a vyosenou clonou d = 10 mm.

Příklad výpočtu:

Přepočet napětí na tlak pro měření se snímačem Sensortechncis

Rozsah ± 5 mbar.

0 mbar = 2,5 V, +5 mbar = 4,5 V, -5 mbar = 0,5 V

Při rozlišení 1 mV: 1 mV = 0,0025 mbar.

Příklad výpočtu pro druhý řádek tabulky:

$U_0 = 2,497 \text{ V} = 2497 \text{ mV}$

$U_{\Delta p} = 2,531 \text{ V} = 2531 \text{ mV}$

$p = (U_{\Delta p} - U_0) \cdot 0,0025 = (2531 - 2497) \cdot 0,0025 \cong \underline{\underline{0,09 \text{ mbar}}}$

Výpočet rozdílu tlakové difference na přírubě s vycentrovanou a vyosenou clonou:

$$\Delta x = (X_V - X_C)$$

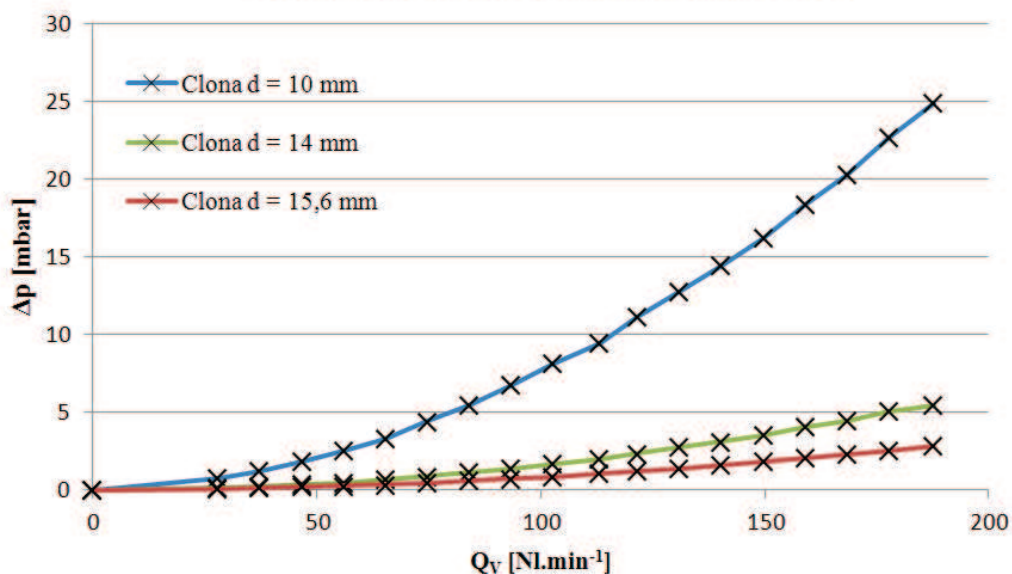
$$\Delta_{\Delta p} = (0,75 - 0,78) = \underline{\underline{-0,03 \text{ mbar}}}$$

kde

X_V hodnota tlakové difference s vycentrovanou clonou [mbar]

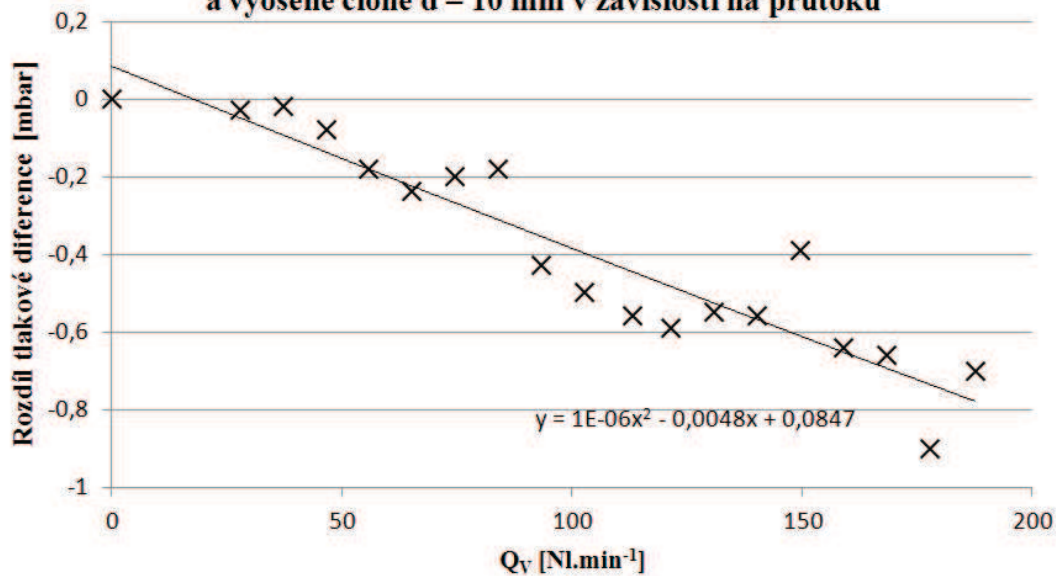
X_C hodnota tlakové difference se záměrně vyosenou clonou [mbar]

Graf tlakové difference v závislosti na průtoku



Obr. 7.4: Graf tlakové difference v závislosti na průtoku Q_V

Graf rozdílu tlakové difference při měření na vycentrované a vyosené cloně d = 10 mm v závislosti na průtoku



Obr. 7.5: Rozdíl tlakové difference při měření na vycentrované a vyosené cloně v závislosti na průtoku.

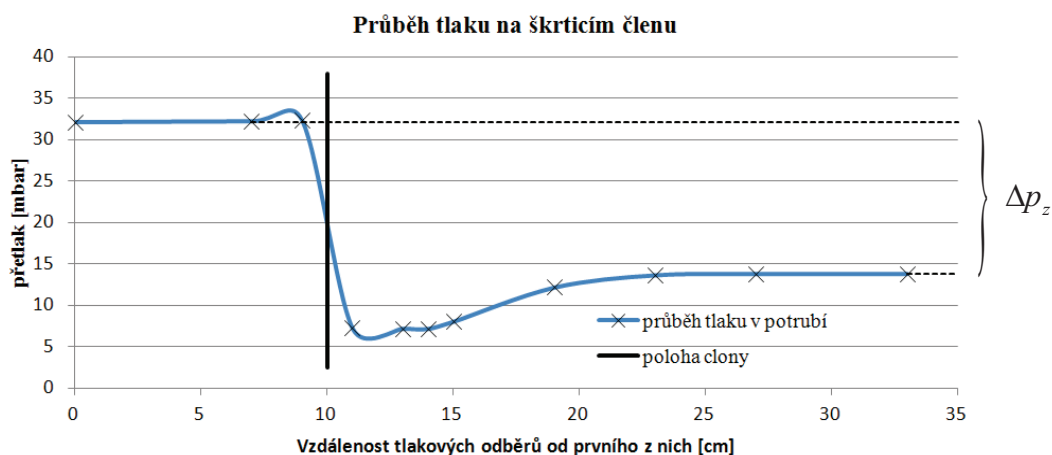
Úlohy 2,3 a 4 ukázaly průběh tlakové difference na přírubě clony v závislosti na objemovém průtoku. Měření bylo provedeno pro clony o průměru $d = 10$; 14 a 15,6 mm. Naměřené hodnoty rostou kvadraticky. Se zmenšujícím se průměrem otvoru clony roste měřená tlaková difference.

V šesté úloze byl střed otvoru clony $d = 10$ mm posunut mimo osu potrubí. Ač by se mohlo zdát, že otvor v potrubí je fyzicky stejný jako v úloze č. 4, má tato změna vliv na hodnotu měřené tlakové difference. O tomto vlivu vypovídá vypočtený rozdíl tlakových diferencí (Tab. 7.4),(Obr. 7.5). Rozdíl hodnot roste se zvětšujícím se průtokem.

ad 5) V pátém úkolu byl vyšetřován průběh tlaku před a za clonou $d = 10 \text{ mm}$ při nominálním průtoku 200 Nl.min^{-1} .

Tab. 7.5: Tabulka průběhu tlaku na cloně

Tlakový odběr č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Přetlak [mbar]	32,10	32,20	32,30	7,21	7,16	7,14	8,01	12,12	13,61	13,76	13,78



Obr. 7.6: Zaznamenaný průběh tlaku na centrické cloně $d = 10 \text{ mm}$

Celková tlaková ztráta lze zjistit z rozdílu statických tlaků naměřených v dostatečné vzdálenosti před a za clonou. V tomto případě: $\Delta p_z = p_{\text{odběr1}} - p_{\text{odběr11}}$

$$\Delta p_z = 32,10 - 13,78 = \underline{\underline{18,32 \text{ mbar}}}$$

Na obrázku (Obr 7.6) jsou graficky znázorněny výsledky měření průběhu tlaku na škrticím členu. Naměřené hodnoty (průběh tlaku) odpovídají teoretickému předpokladu (Obr. 3.6). Před clonou je tlak v podstatě neměnný, 32,1 mbar, až těsně před clonou se lehce zvedá. Přímo na cloně nastává prudký pokles až na 7,14 mbar. Poté se tlak pozvolně navrácí na novou hodnotu statického tlaku v kanálu 13,78 mbar. Rozdíl hodnot původního tlaku a nového statického tlaku, je popisován jako celková tlaková ztráta. V tomto případě $\Delta p_z = 18,32 \text{ mbar}$.

ad 7) Vyčíslování nejistot proběhlo pro průtok 100 Nl.min^{-1} dle cejchování plovákového snímače. Pro určení nejistot snímače tlakové difference Greisinger, bylo měřeno na cloně $d = 10 \text{ mm}$. Nejistoty snímače tlakové difference Sensortechinics byly určovány při měření na cloně $d = 15,6 \text{ mm}$.

Teorie a vztahy k výpočtu nejistot převzaty z [12].

Nejistoty typu A

Tab. 7.6: Tabulka naměřených hodnot k určení nejistoty typu A

Snímač		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	Průměrná hodnota \bar{x}
Krohne AV40	[Nl.min⁻¹]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
IST FS5.A	[V]	5,055	5,062	5,065	5,058	5,056	5,068	5,063	5,058	5,055	5,061	5,06
Honeywell	[V]	4,095	4,112	4,109	4,101	4,099	4,099	4,106	4,104	4,115	4,114	4,105
Greisinger	[mbar]	6,75	6,74	6,75	6,74	6,76	6,75	6,75	6,74	6,76	6,76	6,75
Sensortechinics	[V]	2,786	2,784	2,788	2,780	2,783	2,788	2,785	2,785	2,780	2,782	2,784

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

kde

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{průměrná hodnota z naměřeného vzorku hodnot}$$

kde

n počet vzorků měření.

Určení nejistoty typu A bylo provedeno z opakovaného měření (10 vzorků) a následným výpočtem dle vzorce (14). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce (Tab. 7.6).

Tab. 7.7: Výsledky vyčíslení nejistot typu A

Snímač	u_A	jednotka
Krohne AV40	0	[Nl.min ⁻¹]
IST FS5.A	0,0014	[V]
Honeywell	0,0022	[V]
Greisinger	0,0026	[mbar]
Sensortechinics	0,00091	[V]

Nejistoty typu B

Jednotlivé nejistoty typu B se určují ze vztahu:

$$u_{Bz} = \frac{\Delta_{z\max}}{\chi}$$

kde

$\Delta_{z\max}$ vyjadřuje maximální hodnotu rozpětí měřené veličiny způsobené uvažovaným zdrojem nejistoty.

χ koeficient tvaru rozložení

Celková nejistota typu B je dána geometrickým součtem jednotlivých zdrojů nejistot typu B:

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2}$$

Ve výpočtu bylo uvažováno *rovnoměrné rozložení* s koeficientem $\chi = \sqrt{3}$.

Při vyčíslování zdrojů nejistoty typu B byly uvažovány konkrétní číselné hodnoty přesností jednotlivých zařízení, tak jak je uvádějí výrobci.

Kromě výpočtů, byl proveden test na prokázání dalších možných vlivů na přesnost měření. Při změně napájecího napětí o $\pm 0,1$ V. Tato změna neměla žádný měřitelný (prokazatelný) vliv na výsledky měření.

Dále bylo zatíženo membránové dmychadlo tak, aby došlo k zahřívání proudícího média. Vliv teploty měřeného média se při testu neprojevil.

Výpočet nejistot byl proveden pro jednotlivé snímače. Na přesnost měření na trati jako celku se mohou projevit další vlivy, které měření mohou ovlivnit. Jelikož je celá trať rozebíratelná, může dojít k úniku média netěsnostmi. K úniku může dojít také na tlakových odběrech, či snímačích tlakové difference.

Tab. 7.8: Výsledky vyčíslení nejistot typu B

Snímač	u_B	jednotka
Krohne AV40	5,918	[Nl.min^{-1}]
IST FS5.A	0,0876	[V]
Honeywell	0,0494	[V]
Greisinger	0,231	[mbar]
Sensortechnics	0,00622	[V]

Příklady výpočtu:

Krohne VA40

Nejistota měření průtoku určená z rozlišitelnosti odečtu stupnice plovákového snímače. Stupnice je cejchovaná po deseti Nl.min^{-1} . Byl uvažován interval $\pm \frac{1}{2}$ dílku.

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{1\max}}{\chi} = \frac{100 - 90}{\sqrt{3}} \cong \underline{5,774 \text{ Nl.min}^{-1}}$$

Nejistota měření průtoku určená z přesnosti snímače udávané výrobcem: 1 % z rozsahu

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{2\max}}{\chi} = \frac{225 \cdot 0,01}{\sqrt{3}} \cong \underline{1,299 \text{ Nl.min}^{-1}}$$

Celková nejistota typu B měření průtoku plovákovým průtokoměrem:

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} = \sqrt{5,774^2 + 1,299^2} \cong \underline{\underline{5,918 \text{ Nl.min}^{-1}}}$$

IST FS5.A

Nejistota měření napětí určená z přesnosti snímače udávané výrobcem: 3 % z měřené hodnoty

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{1\max}}{\chi} = \frac{5,06 \cdot 0,03}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,0876 \text{ V}}$$

Nejistota měření napětí určená z přesnosti multimetru HP 34401A, dle specifikace.

Přesnost je definovaná jako $\pm (0,0050 \text{ % z hodnoty} + 0,0035 \text{ % z rozsahu})$. Měřeno na rozsahu 10 V.

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{2\max}}{\chi} = \frac{0,00005 \cdot 5,06 + 0,000035 \cdot 10}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,000348 \text{ V}}$$

Celková nejistota typu B pro měření napětí snímačem IST FS5.A

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} = \sqrt{0,0876^2 + 0,000348^2} \cong \underline{\underline{0,0876 \text{ V}}}$$

Honeywell AWM720P1

Nejistota měření napětí určená z posuvu výstupního napětí v závislosti na teplotě. Výrobce udává: 2 % z měřené hodnoty.

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{1\max}}{\chi} = \frac{4,105 \cdot 0,02}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,0474 \text{ V}}$$

Nejistota měření napětí určená z přesnosti snímače. Výrobce udává přesnost 0,3 % z měřené hodnoty.

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{2\max}}{\chi} = \frac{4,105 \cdot 0,003}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,00711 \text{ V}}$$

Nejistota měření napětí určená z hystereze a opakovatelnosti udané výrobcem: 0,5 % z měřené hodnoty.

$$u_{B3} = \frac{\Delta_{3\max}}{\chi} = \frac{4,105 \cdot 0,005}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,0119 \text{ V}}$$

Nejistota měření napětí určená z přesnosti měřicího přístroje HP 34401A, dle specifikace. Přesnost je udána jako $\pm (0,0050 \% \text{ z hodnoty} + 0,0035 \% \text{ z rozsahu})$. Měřeno na rozsahu 10 V.

$$u_{B4} = \frac{\Delta_{4\max}}{\chi} = \frac{0,00005 \cdot 5,06 + 0,000035 \cdot 10}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,000348 \text{ V}}$$

Celková nejistota typu B pro měření se snímačem Honeywell AWM720P1

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} = \sqrt{0,0474^2 + 0,00711^2 + 0,0119^2 + 0,000348^2} \cong \underline{\underline{0,0494 \text{ V}}}$$

Greisinger GDH200

Nejistota diferenčního tlaku určená z přesnosti snímače udávaná výrobcem:

Pro měření ve využitém rozsahu: 1 digit = 0,01 mbar

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{1\max}}{\chi} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,00577 \text{ mbar}}$$

Nejistota měření diferenčního tlaku určená ze závislosti výsledku měření na teplotě v rozsahu 0 – 50 °C. Závislost je dle výrobce 2 % z rozsahu. (Měření na rozsahu 19,99 mbar)

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{2\max}}{\chi} = \frac{19,99 \cdot 0,02}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,2308 \text{ mbar}}$$

Celková nejistota typu B

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} = \sqrt{0,00577^2 + 0,2308^2} \cong \underline{\underline{0,231 \text{ mbar}}}$$

Sensortechncics HCXPM005D6V

Nejistota měření napětí určená z teplotního posuvu výstupního napětí. Hodnota přesnosti udávaná výrobcem: 0,2 % z rozsahu.

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{1\max}}{\chi} = \frac{0,002 \cdot 2}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,00231 \text{ V}}$$

Nejistota měření napětí určená z hystereze a opakovatelnosti. Výrobce udává přesnost 0,5 % z rozsahu.

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{2\max}}{\chi} = \frac{0,005 \cdot 2}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,00577 \text{ V}}$$

Nejistota měření napětí určená z přesnosti měřicího přístroje HP 34401A, dle specifikace. Přesnost je udána jako $\pm (0,0050 \% \text{ z hodnoty} + 0,0035 \% \text{ z rozsahu})$. Měřeno na rozsahu 10 V.

$$u_{B3} = \frac{\Delta_{3\max}}{\chi} = \frac{0,00005 \cdot 5,06 + 0,000035 \cdot 10}{\sqrt{3}} \cong \underline{0,000348 \text{ V}}$$

Celková nejistota typu B

$$u_B = \sqrt{\sum_{z=1}^n u_{Bz}^2} = \sqrt{0,00231^2 + 0,00577^2 + 0,000348^2} \cong \underline{\underline{0,00622 \text{ V}}}$$

Výpočet kombinované nejistoty měření u_c

Kombinovaná nejistota se získá výpočtem geometrického součtu nejistoty typu A a celkové nejistoty typu B:

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

Kombinovaná nejistota udává interval, ve kterém by se skutečná hodnota veličiny měla vyskytovat s pravděpodobností 68 %. Výpočtem rozšířené nejistoty se pravděpodobnost výskytu výsledku v daném intervalu zvyšuje. Standardně se používá $k_r = 2$. Potom se pravděpodobnost výsledku v daném intervalu zvyšuje na 95 %.

$$U(x) = k_r \cdot u_C(x)$$

Tab. 7.9: Souhrnný přehled výpočtu nejistot zaokrouhlený na dvě platné cifry

Snímač	u_A	u_B	u_C	$U(x)$	jednotka
Krohne AV40	0	5,9	5,9	12	[Nl.min ⁻¹]
IST FS5.A	0,0014	0,088	0,088	0,18	[V]
Honeywell	0,0022	0,049	0,049	0,099	[V]
Greisinger	0,0026	0,23	0,23	0,46	[mbar]
Sensortronics	0,00091	0,0062	0,0063	0,013	[V]

Příklad výpočtu pro druhý řádek tabulky:

$$u_C = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} = \sqrt{0,0014^2 + 0,088^2} \cong \underline{\underline{0,088 \text{ V}}}$$

$$U(x) = k_r \cdot u_C(x) = 2 \cdot 0,088 \cong \underline{\underline{0,18 \text{ V}}}$$

Tab. 7.10: Formální zápis hodnot

Snímač	Zápis	Jednotka
Krohne VA40	100 ± 12	[Nl.min ⁻¹]
IST FS5.A	$5,06 \pm 0,18$	[V]
Honeywell	$4,105 \pm 0,099$	[V]
Greisinger	$6,75 \pm 0,46$	[mbar]
Sensortronics	$2,784 \pm 0,013$	[V]

ad 8) Osmý úkol se zabývá výpočtem součinitele průtoku C pro clonu $d = 10 \text{ mm}$ při průtoku 60 NL.min^{-1} .

Tab. 7.11: Výpočet součinitele průtoku C

Plovákový průtokoměr		Clona $d = 10 \text{ mm}$			Dopočtený Q_v
Stupnice	Reálný průtok Q_v	p1	Δp	p2	
[NL.min ⁻¹]	[NL.min ⁻¹]	[mbar]	[mbar]	[mbar]	[NL.min ⁻¹]
30	27,92	10,61	0,78	9,83	31,08
40	37,23	11,12	1,23	9,89	39,03
50	46,64	11,48	1,86	9,62	48,00
60	55,97	12,13	2,53	9,6	55,98
70	65,30	12,88	3,32	9,56	64,13
80	74,70	13,69	4,42	9,27	73,99
90	84,04	14,77	5,47	9,30	82,31
100	93,43	15,71	6,77	8,94	91,57
110	102,77	17,12	8,14	8,98	100,41
120	113,12	18,22	9,48	8,74	108,36
130	121,47	19,59	11,15	8,44	117,52
140	130,82	21,10	12,78	8,32	125,82
150	140,30	22,80	14,45	8,35	133,79
160	149,65	24,30	16,23	8,07	141,79
170	159,01	26,10	18,35	7,75	150,76
180	168,38	28,20	20,30	7,90	158,57
190	177,73	29,80	22,70	7,10	167,68
200	187,70	32,30	24,90	7,40	175,62

Výpočet součinitele průtoku C pro centrickou clonu při objemovém průtoku $55,97 \text{ NL.min}^{-1}$:

Vzorce a významy veličin viz kapitola 2.1.5.

Změřený průměr otvoru clony:

$$d = 10 \text{ mm}$$

Změřený průměr potrubí:

$$D = 21 \text{ mm}$$

Tlaková diference na přírubě:

$$\Delta p = 2,53 \text{ mbar}$$

Změřený tlak před přírubou:

$$p_1 = 12,13 \text{ mbar}$$

Dopočtený tlak za přírubou:

$$p_2 = p_1 - \Delta p = 12,13 - 2,53 = 9,6 \text{ mbar}$$

Výpočet tlakového spádu (pro odečet z nomogramu):

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} = \frac{12,13 - 9,6}{12,13} = 0,21$$

Z fyzikálních tabulek byly zjištěny konstanty odpovídající pracovním podmínkám:

Hustota vzduchu:

$$\rho = 1,196 \text{ kg.m}^3$$

Poissonova konstanta pro vzduch:

$$\kappa = 1,41$$

Poměrné zúžení průřezu:

$$\beta = \frac{d}{D} = \frac{10}{21} = 0,4762 \Rightarrow \beta^2 \cong 0,2267$$

Z nomogramu (Obr. A.1) byl odečten odpovídající expanzní součinitel:

$$\varepsilon = 0,93$$

Součinitel průtoku:

$$Q_V = C \cdot \varepsilon \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \Rightarrow$$

$$C = \frac{Q_V}{\varepsilon \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}} = \frac{0,000933}{0,93 \cdot 0,2267 \cdot \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 253}{1,196}}} \cong 0,62117 \quad [-]$$

Příklad výpočtu objemového průtoku:

$$Q_V = C \cdot \varepsilon \cdot \beta^2 \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} = 0,62117 \cdot 0,93 \cdot 0,2267 \cdot \frac{\pi \cdot 0,021^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 253}{1,196}} \cong \\ \cong \underline{\underline{55,98 \text{ Nl.min}^{-1}}}$$

V osmém úkolu byl proveden výpočet součinitele průtoku C pro clonu $d = 10 \text{ mm}$ při průtoku $55,97 \text{ Nl.min}^{-1}$. Výsledná hodnota $C = 0,62117$. Pro ověření správnosti výpočtu byl určený součinitel průtoku zpětně dosazen do výpočtu objemového průtoku. Pro objemový průtok, pro který byl součinitel počítán, vychází vypočtený průtok $55,98 \text{ Nl.min}^{-1}$. To ověřuje správnost postupu. Odchylka je daná zaokrouhlením.

Ostatní dopočtené hodnoty objemového průtoku Q_V dopočtené pomocí určeného součinitele průtoku a měřené tlakové difference se od referenční hodnoty liší. Tato nesrovnalost je způsobena využitím clony pro nestandardní podmínky použití, jako např. malá světlost potrubí, relativně malý průtok atd. Proto nelze tento výpočet použít pro cejchování clony. V tomto případě nelze metodu výpočtu objemového průtoku korektně použít.

7.3 Zhodnocení výsledků, použitých snímačů a možného rozšíření měření

Z naměřených dat a vypočtených nejistot vyplývá, že snímače Honeywell AWM720P1 a IST FS5.A se pro vybudovanou trať hodí a vyhovují svými parametry. Jejich pracovní rozsah se v podstatě shoduje s parametry průtoku vzduchu v měřicím kanálu.

Měření na vlastnoručně vyrobené cloně ukázalo, že tato clona není vhodná pro normovaný výpočet objemového průtoku z důvodu nesplnění všech konstrukčních požadavků dle norem. Aby bylo možné využít dostupné snímače tlakové difference, byl zvolen menší průměr clony, tak i malý poměr zúžení β . Měření však ověřilo, že tlaková difference je dobře měřitelná a zakoupené snímače tlakové difference mají pro toto měření vhodný rozsah. Po kalibračním měření v celém rozsahu použití, by se clona díky dobré opakovatelnosti dala pro měření průtoku samostatně použít.

Jako etalon byl zvolen plovákový průtokoměr Krohne VA40. Jeho výhodou bylo to, že jde přímo vizuálně z jeho stupnice odečíst aktuální hodnota průtoku. Navíc výrobce dodal přepočtení stupnice uvedené na snímači na hodnoty normovaného průtoku dle aktuálních podmínek, které byly zjištěny po prvních pokusech na nově budované trati. U tohoto průtokoměru byla vypočtena poměrně velká rozšířená nejistota, která pramení hlavně ze špatné rozlišitelnosti odečtu na stupnici. Pokud však při měření na trati regulujeme průtok a snažíme se jej nastavit co nejpresněji přímo na rysky stupnice, pak se tato nejistota značně eliminuje.

Měřicí trať č.2 jsem prezentoval v rámci studentské soutěže EEICT 2012 a při obhajobě před komisí vzešel nápad, aby byla vyzkoušena časová náročnost vypracovaných úloh pro studenty, kteří se s touto trati budou mít možnost seznámit pouze v časovém úseku jednoho laboratorního cvičení.

Část měření jsem nechal cvičně absolvovat kolegu studenta a z testu vyplynulo, že navrhované laboratorní úlohy jsou poměrně náročné na přípravu než na samotné měření. Předpokladem k úspěšnému splnění zadání je dobrá příprava studentů před měřením. Z testu vyplynulo, že měření v jednom laboratorním cvičení lze absolvovat.

Jako návrh na vylepšení měřicí trati bych uvedl například vybudování sofistikovanějšího systému pro odběry diferenčního tlaku tak, aby nebylo nutné jednotlivé odběrové body stále připojovat, odpojovat a těsnit přímo na úseku trati se clonou. Další cesta rozšíření by mohla vést přes zabudování snímače teploty do trati a například proměřit chování snímačů v závislosti na teplotě proudícího média.

8 ZÁVĚR

Diplomová práce popisuje návrh a realizaci měřicích přípravků pro laboratorní cvičení, které mají studentům praktickou ukázkou přiblížit problematiku měření průtoku vzduchu. V úvodu práce jsou popsány důležité pojmy vztahující se k měření průtoku. Následuje část, která je věnována popisům běžně používaných metod pro měření průtoku plynu. Spolu s literární rešerší snímačů byl proveden průzkum trhu.

Z poznatků plynoucích z průzkumu trhu a již dříve zakoupených snímačů byl vytvořen návrh nové laboratorní trati, jejíž stavba a popis parametrů je v praktické části této práce. Byly vytvořeny dvě měřicí trati spolu s návody pro měření v laboratorní výuce. Při tvorbě tratí se spíše bral ohled na praktičnost, názornost a na rozličnost využitých metod měření, než na striktní dodržení vhodnosti použitých snímačů.

Vytvořená zadání laboratorních úloh byla proměřena a dosažené výsledky jsou prezentovány jako zprávy o měření, které jsou součástí této diplomové práce. Součástí měření je také výpočet nejistoty měření použitými snímači, které jsou na laboratorních přípravcích umístěny.

V poslední části je diskutována vhodnost použitých snímačů na základě výsledků měření a výpočtu nejistot. Jsou vzneseny návrhy na možnost zdokonalení laboratorní úlohy o měření teploty v měřicím kanále a o sofistikovanější metodu připojování snímačů tlakové difference.

Literatura

- [1] DAŽO, Stanislav. BEJČEK, Ludvík; PLATIL, Antonín. *Měření průtoku a výšky hladiny*. . vydání. Praha : BEN, 2005. 447 s. ISBN 80-7300-156-x.
- [2] *Základy fyziky 7. Mechanika tekutin* [online]. 11.1.2006 [cit. 2011-05-01]. VŠB. Dostupné z WWW: http://if.vsb.cz/Studium/FEI/Zakl_fyziky/ZakladyFyziky7.pdf.
- [3] ORLÍKOVÁ, Soňa. *Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů* [online]. Ústav automatizace, měření a kybernetiky VUT Brno : 4.2.2008 [cit. 2011-05-10]. Tzb-info. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy-prutokomeru>.
- [4] KADLEC, Karel. *Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1)*, [online]. Automa, 2006, č.10, 5 s. [cit. 2012-05-04] Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100605.pdf>.
- [5] MIKAN, Jaroslav. *Měření plynu*. 1. vyd. Říčany u Prahy: GAS, 2003. 351 s. ISBN 80-7328-053-1.
- [6] *Mattech* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Dostupné z WWW: <http://www.mattech.cz>.
- [7] *FYZMATIK* [online]. 15.6.2009 [cit. 2011-05-31]. Mechanika. Dostupné z WWW: <http://fyzmatik.pise.cz/114610-pitotova-trubice.html>.
- [8] *Proudění, rychlost a průtok plynů* [online]. 2011 [cit. 2011-05-31]. Průtoky. Dostupné z WWW: <http://www.prutoky.cz/plyny/prandtlovy-trubice>.
- [9] KADLEC, Karel. *Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 2)*, [online]. Automa, 2006, č.11, 6 s. [cit. 2012-05-04] Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100624.pdf>.
- [10] KADLEC, Karel. *Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 3)*, [online]. Automa, 2006, č.12, 5 s. [cit. 2012-05-04] Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100630.pdf>.
- [11] JENČÍK, J.; VOLF, J. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003, [online]. 212 s., [cit. 2012-05-04] Dostupné z WWW: [http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_\(OCR\).pdf](http://www.strojar.com/upload/skripta/notime/Technicka_mereni_(OCR).pdf)
- [12] HAVLÍKOVÁ, M. *Elektronická měřicí technika Laboratorní cvičení*. Brno: 2006. s. 100.

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A ZKRATEK

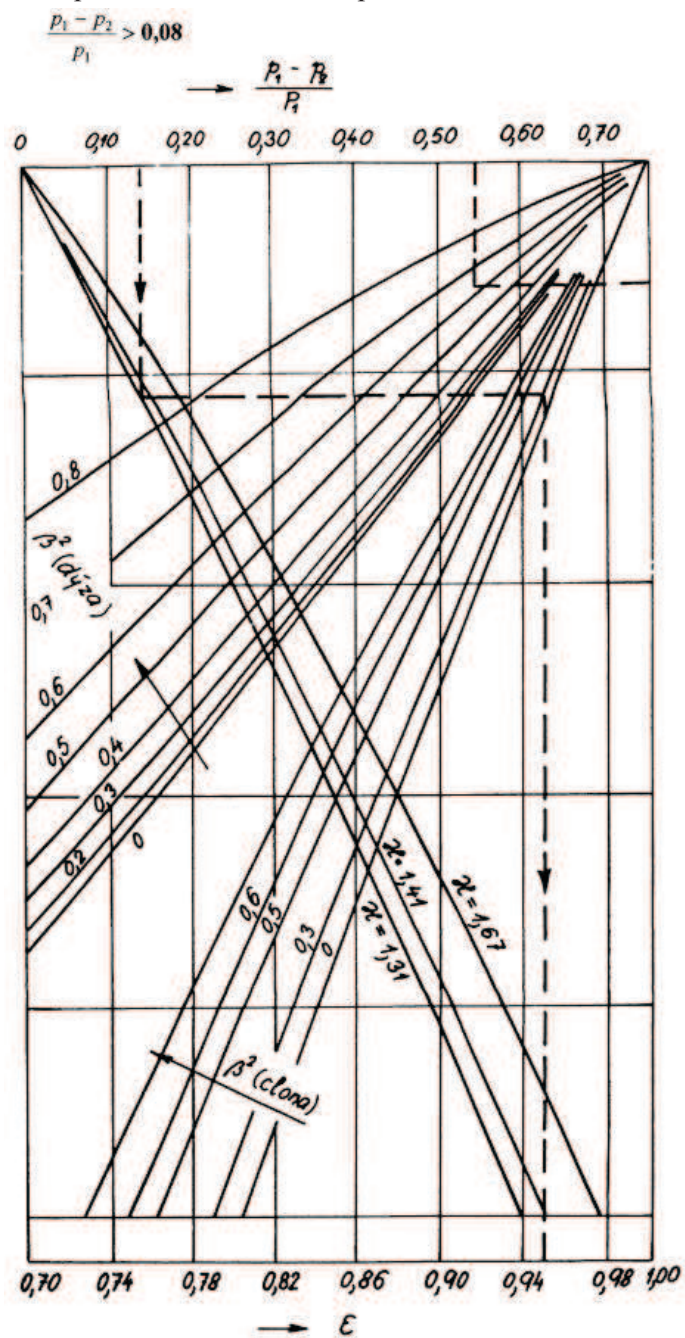
v	rychlost proudění (střední)	$[m.s^{-1}]$
Q_v	objemový průtok	$[m^3.s^{-1}]$
V	objem	$[m^3]$
S	plocha	$[m^2]$
Q_m	hmotnostní průtok	$[kg.s^{-1}]$
t	čas	$[s]$
ρ	hustota	$[kg.m^{-3}]$
m	hmotnost	$[kg]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
D	průměr potrubí	$[m]$
η	dynamická viskozita tekutiny	$[N.s.m^{-2}]$
ν	kinetická viskozita tekutiny	$[m^2.s^{-1}]$
DN	Diametre Nominal (JS)	$[mm]$
JS	Jmenovitá světlost	$[mm]$
T	teplota	$[^{\circ}K]$
p	tlak	$[Pa]$
U	elektrické napětí	$[V]$
I	elektrický proud	$[A]$
R	elektrický odpor	$[\Omega]$
c_p	měrné teplo	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
P	tepelný příkon	$[J.s^{-1}]$
n	otáčky	$[s^{-1}]$
f	frekvence	$[Hz]$
Sr	Strouhalovo číslo	$[-]$
C	součinitel průtoku pro clonu	$[-]$
ε	expanzní součinitel	$[-]$
β	poměrné zúžení průřezu	$[-]$
d	průměr otvoru clony	$[m]$
Δp	tlakový rozdíl na cloně	$[Pa]$
p_1	tlak před clonou (na vstupu)	$[Pa]$
p_2	tlak za clonou (na výstupu)	$[Pa]$
Δp_z	celková (trvalá) tlaková ztráta	$[Pa]$
Nl	„Normolitry“ objem vztažený k určitým podmínkám	

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A Nomogram pro určení expanzního součinitele ε .
- Příloha B Elektronická příloha na CD – zdrojový text práce, katalogový listy,
fotodokumentace

PŘÍLOHA A

Nomogram pro určení expanzního součinitele ε pro:



Obr. A.1: Nomogram pro určení expanzního součinitele [11]