

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MODEL PRŮTOKOMĚRU S CLONOU

MODEL OF ORIFICE FLOWMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

TOMÁŠ DVOŘÁČEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSC.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2010/11

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Dvořáček

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

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

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

Model průtokoměru s clonou

v anglickém jazyce:

Model of Orifice Flowmeter

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při měření průtoku se můžeme setkat relativně často s aplikací měřící clony. Navržená a realizovaná laboratorní úloha by měla tuto problematiku přiblížit potřebám výuky.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je přiblížení měření průtoku clonou potřebám laboratorní výuky. Návrh a realizace modelu clonového průtokoměru s počítačovou podporou vyhodnocení.

Doporučená osnova práce:

1. Měření průtoku.
2. Návrh uspořádání pracoviště
3. Návrh a realizace měření s clonou
4. Návrh, realizace a odladění vyhodnocení měření
5. Ověření funkce modelu - vzorové měření

Seznam odborné literatury:

ŽAŘO, S.; Bejček, L.; Platil, A. Měření průtoku a výšky hladin. 1. vydání : Praha : BEN – technická literatura, 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X.

CHUDÝ, V.; Palenčár, R.; Kureková, E.; Halaj, M. Meranie technických veličín : 1. vydání Bratislava : Vydavateľstvo STU, 1999. 688s. ISBN 80-227-1275-2.

SLÁDEK, Z.; Vdoleček, F. Technická měření : 1. vydání Brno : Nakladatelství VUT, 1992. 220 s. ISBN 80-214-0414-0.

Firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Vdoleček, CSc.

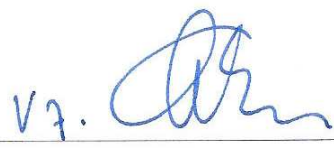
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 4.11.2010

L.S.




Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt [CZ]

Cílem práce je přiblížení měření průtoku clonou pro potřeby laboratorní výuky. V úvodu se potom tato bakalářská práce zabývá vysvětlením principů a popsáním problematik měření průtoku tekutin. Jsou zde představeny jednotlivé metody měření a typy snímačů průtoku tekutin

Praktická část bakalářské práce spočívá v návrhu a vlastní realizaci modelu clonového průtokoměru s počítačovou podporou vyhodnocení.

Abstract [EN]

The aim of this Bachelor thesis is to make the orifice flowmeter accessible for laboratory tuition. The introduction of this Bachelor thesis explains and describes the issues of measuring of liquid flow rate. The individual measurement methods and the types of flowmeter sensors are introduced.

The practical section of the Bachelor thesis consists of a proposal and an actual realisation of a model of an orifice flowmeter with a computer supported evaluation.

Klíčová slova

Model průtokoměru s clonou, měření průtoku, škrtící orgány, clona, průtokoměry, senzory na měření průtoku tekutin.

Keywords

Model of orifice flowmeter, measuring of liquid flow rate, flowmeters, orifice plate, types of flowmeter sensors

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, stejně jako všem ostatním, kteří mi byli nápomocni při psaní této bakalářské práce.

Obsah

Zadání závěrečné práce	2
Abstrakt	4
1 ÚVOD.....	8
1.1 Měření průtoku	8
1.1.1 Objemový průtok	8
1.1.2 Hmotnostní průtok	9
1.1.3 Proteklé množství	9
2 ZÁKLADNÍ METODY MĚŘENÍ	10
2.1 Měření rychlosti proudění tekutiny.....	10
2.1.1 Turbínkové průtokoměry	10
2.1.2 Vírové průtokoměry.....	11
2.1.3 Elektromagnetické (indukční) průtokoměry	12
2.1.4 Ultrazvukové průtokoměry	13
2.2 Měření objemového průtoku.....	14
2.2.1 Bubnový plynoměr	14
2.3 Měření hmotnostního průtoku	15
2.3.1 Coriolisův průtokoměr.....	16
2.3.2 Tepelný hmotnostní průtokoměr.....	16
2.4 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru	18
3 ŠKRTÍCÍ ORGÁNY	20
3.1 Clona.....	20
3.1.1 Segmentová clona	21
3.2 Venturiho trubice	21
3.3 Dýza.....	21
3.3.1 Normalizovaná čtvrtkruhová dýza.....	22
3.4 Plováčkové průtokoměry (rotametry).....	22
3.5 Měřicí kapilára.....	22
4 NÁVRH A REALIZACE MODELU LABORATORNÍHO PRACOVISTĚ 24	24
4.1 Základní pojmy	24
4.2 Obecný popis modelu clonového průtokoměru	25
4.3 Komponenty modelu clonového průtokoměru	25
4.3.1 Novodurová trubka	27
4.3.2 Příruba.....	27
4.3.3 Clonový kotouč.....	28
4.3.4 Ventilátor – MEZAXIAL 3142	28
4.3.5 Vysavač ETA QUINTO ELECTRONIC, 1250W	29
4.3.6 Snímač tlakové difference – Freescale MPX5010DP.....	29
4.3.7 DataLab IO ² – vstupně/výstupní jednotka	30
4.3.8 Control Web + Aplikace pro vyhodnocení měření.....	31
4.4 Návrh a výpočet clony	33
4.4.1 První fáze – předběžný návrh	33
4.4.2 Druhá fáze – konečný návrh	34

4.4.3	Reálný výpočet clony.....	35
4.5	Kalibrace modelu	38
5	NÁVOD NA OBSUHU MODELU	43
5.1	Návod na obsluhu	43
5.2	Ukázkové měření	43
ZÁVĚR		46
Seznam použité literatury		47
Přílohy		49

1 ÚVOD

Při měření průtoku se relativně často můžeme setkat s aplikací měřící clony. Cílem této bakalářské práce je seznámení se s měřením průtoku clonou pro potřeby laboratorní výuky. Pro zvládnutí a splnění požadavků na vytvoření modelu průtokoměru s clonou je nutné se seznámit s obecnými metodami měření průtoku a průtokového množství.

Praktická část bakalářské práce bude pojednávat o navržení a konkrétní realizaci modelu průtokoměru s clonou a o realizaci počítačové podpory vyhodnocování měření. Součástí praktické části práce je odladění navrženého modelu, a jeho následné ověření ukázkovým měřením.

1.1 Měření průtoku, [1, 3]

Pro měření průtoku a proteklého množství, ať už plynu nebo kapalin, se dnes používá nepřeberné množství přístrojů a snímačů, využívajících spoustu fyzikálních principů. Množství těchto průtokoměrů je zapříčiněno rozdílnými fyzikálními a chemickými vlastnostmi jednotlivých měřených médií. Na množství průtokoměrů má také velký vliv účel, pro který jsou průtokoměry používány a rozdílnost pracovních podmínek, pro které jsou jednotlivé průtokoměry navrženy. Význam měření průtoku je nesporný. Průtokoměry poskytují informace o toku materiálu, slouží jako čidla v regulačních obvodech a mají také velký význam pro bilanční měření znečišťujících látek v oblastech péče o životní prostředí.

Většina průtokoměrů udává průtok, ať už hmotnostní nebo objemový, nebo proteklé množství při jasně daných provozních podmínkách – tlak, teplota. V případě proměnných stavových veličin se provozní podmínky musí přepočítávat na určité vztažné podmínky. Moderní průtokoměry dnes již bývají vybaveny elektronickými obvody, které automaticky provádí tuto korekci. Současný trend průtokoměrů je zaměřen na tzv. přímé měření, tj. měření nezávislé na teplotě, tlaku a viskozitě měřené tekutiny.

1.1.1 Objemový průtok, [1, 3]

Objemovým průtokem, označovaný Q_v , označujeme objem tekutiny, který projde potrubím za jednotku času (např. $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Pro zjištění objemového průtoku se užívá výpočet z rychlosti proudění tekutiny potrubí známého průřezu nebo měření pomocí rozdílů tlaků. Ne vždy je splněn náš předpoklad, že tekutina zaplňuje celé potrubí. Proto je při měření průtoku kapalin někdy zapotřebí provádět korekci objemového průtoku na změny teploty a tlaku. U měření průtoku u par a plynů se tyto korekce musí provádět vždy, z důvodu stlačitelnosti proudícího média. Vztah pro výpočet objemového průtoku (1).

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

1.1.2 Hmotnostní průtok, [1, 3]

Hmotnostní průtok, označovaný Q_m , udává hmotnost tekutiny, která proteče potrubím za jednotku času. Pro přímé měření hmotnostního průtoku existují dvě metody měření. První metoda využívá Coriolisova principu a druhá metoda potom využívá tepelné hmotnostní průtokoměry. Hmotnostní průtok lze určit ze vztahu (2).

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad [kg.s^{-1}] \quad (2)$$

1.1.3 Proteklé množství, [1, 3]

Jedná se o hmotnost nebo objem tekutiny, proteklé určitým místem potrubí za jednotku času. Typickými zástupci průtokoměrů, které měří proteklé množství jsou plynoměry nebo vodoměry v domácnostech.

2 ZÁKLADNÍ METODY MĚŘENÍ

U každé metody měření průtoku najdeme různé typy průtokoměrů, založené na konkrétních principech. Výčet existujících snímačů průtoku však není úplný. Z velkého množství byly vybrány jen ty nejčastěji používané. Mezi základní metody měření průtoku: [10]

- 1 Měření rychlosti proudění tekutiny
- 2 Měření objemového průtoku
- 3 Měření hmotnostního průtoku
- 4 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvem průtokoměru

2.1 Měření rychlosti proudění tekutiny, [1, 5, 10]

Při tomto způsobu měření je signál na výstupu průtokoměru lineárně závislý, na rozdíl od snímačů, které jsou založeny na principu měření difference tlaků, tam je závislost kvadratická. Z důvodu lineární závislosti nám odpadají problémy s chybami při umocňování. Průtokoměry, které pracují na principu měření rychlosti proudění tekutin reprezentují turbínové průtokoměry, vírové průtokoměry, elektromagnetické průtokoměry a ultrazvukové průtokoměry.

U tohoto principu měření se stanovuje objemový průtok ze vztahu (3).

$$Q_v = \bar{v} \cdot S \quad (3)$$

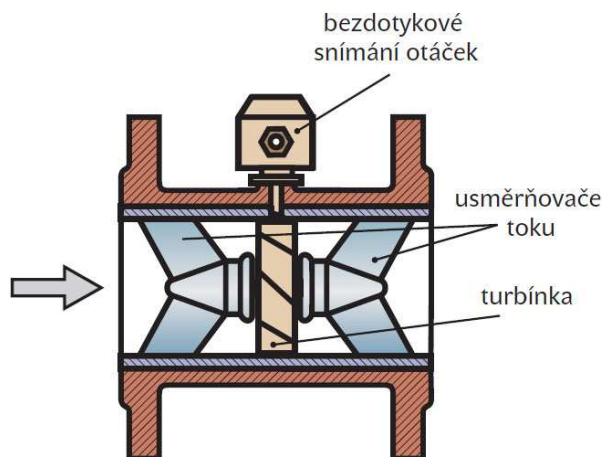
Kde

$\bar{v}$ - střední rychlost proudění tekutiny

S – průřez potrubí

2.1.1 Turbínkové průtokoměry, [1, 5]

Základ těchto průtokoměrů tvoří volně otočný rotor s lopatkami, obvykle čtyřmi nebo osmi. Vlivem proudění tekutiny se rotor otáčí. Otáčky rotoru jsou přímo úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky jsou snímány různými typy snímačů, ať už mechanickými nebo bezdotykovými (indukční, fotoelektrické, ultrazvukové aj.). Výstupem snímače jsou napěťové impulsy, které jsou dále zpracovány a vyhodnoceny. Impulzy se dále zesilují a tvarují. Frekvence otáčení



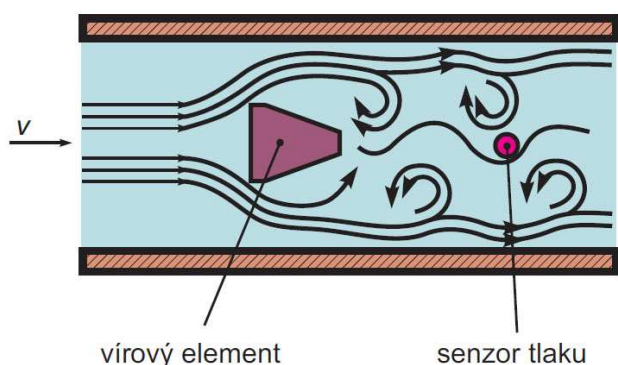
Obr. 1 – Turbínový průtokoměr – schéma, [5]

turbíny je úměrná okamžitému průtoku, celkový počet otáček souvisí s proleklým množstvím tekutiny. Bezdotykové snímače jsou z hlediska číslicového zpracování signálu výhodnější. Pro zjištění okamžitého průtoku se s konstantní periodou sčítají impulsy, A/D převodník není nutný.

Mezi výhody turbínových průtokoměrů se řadí široký rozsah měřených rychlostí proudících tekutin, krátkodobá přesnost a reprodukovatelnost měření. Tyto průtokoměry většinou nachází uplatnění při měření průtoku vody. Naopak nevýhodou těchto průtokoměrů je nemožnost užití na měření proudění tekutin, které víří. Stejně tak není doporučeno používat tyto průtokoměry pro tekutiny s velkou viskozitou s ohledem na pohyblivé části průtokoměru, jež jsou náchylné na usazování nečistot a na opotřebování.

2.1.2 Vírové průtokoměry, [1, 3, 5]

Princip tvorby vírů v proudícím médiu je znám již dlouho. Ke konstrukci průtokoměru byl tento jev využit teprve až po roce 1970. Tyto průtokoměry pracují na bázi von Karmanova efektu, kdy po stranách překážky, která je neaerodynamického tvaru, obtékané tekutinou se střídavě oddělují víry na obou stranách, tyto víry vytvářejí tzv. von Karmanovu stezku. Frekvence vzniku těchto vírů je v určitém rozsahu Reynoldsova čísla úměrná rychlosti proudění tekutiny, a zároveň také velikosti průtoku.



Obr. 2 – Vírový průtokoměr – uspořádání, [5]

Vznik vírů na přepážce průtokoměru vyvolává změnu tlaku nebo rychlosti média. Tyto změny jsou snímány vhodným snímačem (např. piezoelektrickým snímačem nebo kapacitním diferenčním snímačem) a jsou převedeny na elektrický signál. Jednotlivé typy vírových průtokoměrů se liší zejména tvarem a velikostí vloženého tělesa, dále místem, kde je výše zmíněné těleso umístěno a také principem snímání. Nejlépe vyhovují hranolovitá tělesa s rovnou čelní stěnou a definovanou rovinou snímání vírů.

Nejčastěji se používají vložená tělesa tvaru lichoběžníku nebo deltoidu s ostře ohraničenou náběžnou hranou. Pro snímání frekvence vírů lze využít buď odpovídající změny tlaku nebo rychlost. Na obr. 2 je znázorněno typické uspořádání vírového průtokoměru.

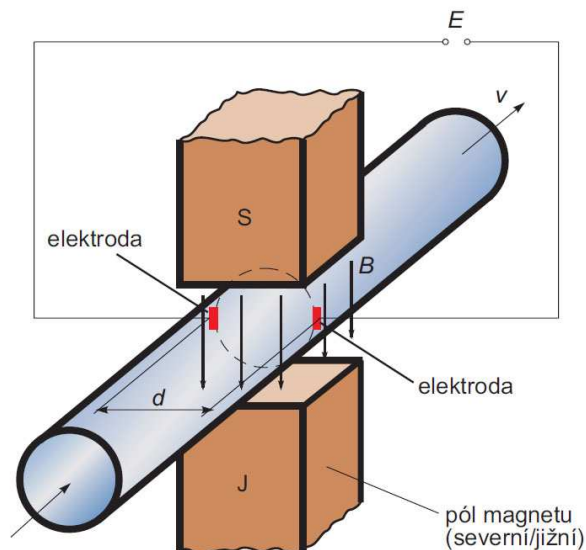
Výhodou vírových průtokoměrů je relativní necitlivost na změny teploty, tlaku nebo hustoty média. Jako další výhodu můžeme zmínit také jejich velmi malou tlakovou ztrátu a také možnost užití těchto průtokoměrů v rozsahu 20:1. Mezi nevýhody patří, že

tyto průtokoměry nelze použít při velmi malých rychlostech proudění a nelze je použít ani pro měření průtoku tekutin s viskozitou přesahující 30 mPa.s.

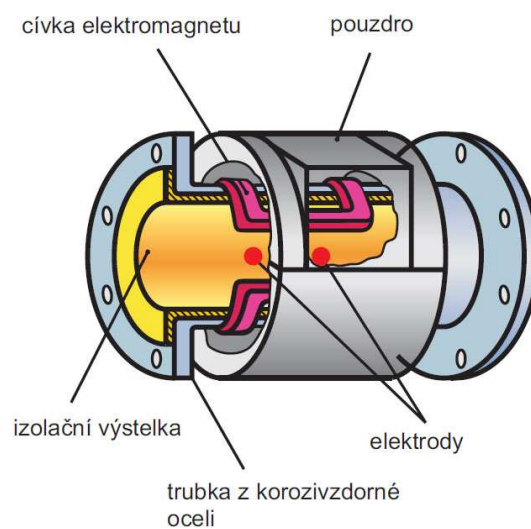
2.1.3 Elektromagnetické (indukční) průtokoměry, [1, 5]

Tyto průtokoměry pracují na bázi Faradayova zákona elektromagnetické indukce při pohybu vodiče v magnetickém poli. U elektromagnetického indukčního snímače průtoku (Obr. 3, 4) je pohybující se vodič představován elektricky vodivou kapalinou. Permanentní magnet nebo elektromagnet vytváří magnetické pole procházející potrubím i kapalinou. Úsek potrubí mezi póly magnetu musí být z neferomagnetického a nevodivého materiálu. Na vnitřním průměru měřicí trubice průtokoměru jsou zabudovány dvě elektrody pro snímání indukovaného napětí. Spojnice elektrod je kolmá na směr magnetických siločar.

Elektromagnetickým průtokoměrem lze měřit kapaliny, které jsou elektricky vodivé, ale i kapaliny nemagnetické. Pro správné měření je nutno, aby potrubí bylo zcela zaplněno tekutinou. S ohledem, že se jedná o bezdotykové průtokoměry (nevkládají se do potrubí), tak tyto průtokoměry nezpůsobují tlakovou ztrátu. Neobsahují taktéž žádné pohyblivé části, které by se mohli opotřebovávat.



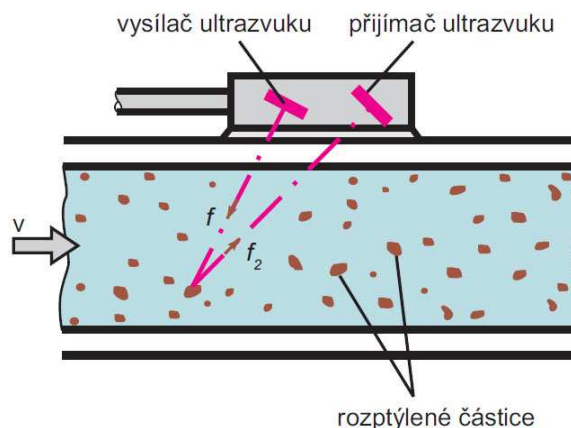
Obr. 3 – Indukční průtokoměr – princip, [5]



Obr. 4 – Indukční průtokoměr – řez, [5]

2.1.4 Ultrazvukové průtokoměry, [1, 5]

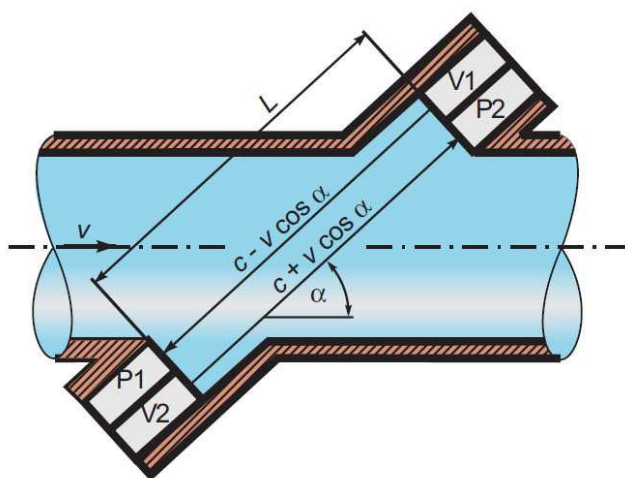
Jak již název průtokoměrů napovídá, průtokoměry toho typu využívají pro měření rychlosti proudění tekutiny v potrubí ultrazvukového vlnění. Průtokoměry ultrazvukové se dělí na dvě skupiny a to na průtokoměry využívající Dopplerova principu, který spočívá ve vysílání ultrazvukových vln do tekutiny, přičemž přijímají vlnění odražené od pevných částic nebo od bublin, rozptýlených v tekutině. Ultrazvukový o frekvenci 1,2 MHz je vysílačem vyslán do proudící kapaliny, kde se odráží od pohybující částice nebo bubliny a je zachycen přijímačem, který vyhodnocuje frekvenci přijatého signálu. Rozdíl těchto frekvencí je potom úměrný rychlosti proudění kapaliny.



Obr. 5 – Průtokoměr založený na Dopplerově jevu, [5]

Ultrazvukové průtokoměry využívající Dopplerův jev neovlivňují měřený průtok, protože nezasahují do proudícího média, a lze je s výhodou využít k měření průtoku kalů a znečištěných tekutin, které běžným průtokoměrům způsobují těžkosti. Při velkých koncentracích pevných částic či vzduchových bublin má charakter šumu, který je těžko rozpoznatelný od šumu pozadí.

Druhou skupinou těchto průtokoměrů jsou zařízení, fungující na principu měření doby průchodu médiem. Průtokoměry, u nichž se vyhodnocuje doba šíření ultrazvukového signálu, se nejčastěji konstruují v rozdílovém zapojení. Ultrazvukový signál se vysílá jak ve směru, tak i proti směru proudění. K vysvětlení principu měření slouží Obr. 6. Ultrazvukové signály jsou vysílány ve formě impulsů a vyhodnocují se



Obr. 6 – Ultrazvukový průtokoměr – princip, [5]

časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření. V potrubí jsou zabudovány dvě dvojice elektroakustických měničů (vysílače a přijímače ultrazvuku). Vysílač V1 vysílá impulsy proti a vysílač V2 ve směru proudění. Impuls z V2 se šíří rychlostí $c + v \cos \alpha$, kde c je rychlost šíření ultrazvuku v daném prostředí a v střední rychlost proudícího média. Doby mezi vysláním a přijmem impulsu pro jednotlivé Na rozdíl od první skupiny ultrazvukových průtokoměrů, pracujících na bázi Dopplerova principu, jsou tyto průtokoměry schopny měřit pouze rychlost proudění čistých tekutin.

Ultrazvukové průtokoměry neobsahují žádné pohyblivé části, které by se mohli opotřebovávat, stejně tak je spojuje s elektromagnetickými průtokoměry skutečnost, že se jedná o průtokoměry bezkontaktní a tudíž nezpůsobují tlakovou ztrátu.

2.2 Měření objemového průtoku, [1, 10]

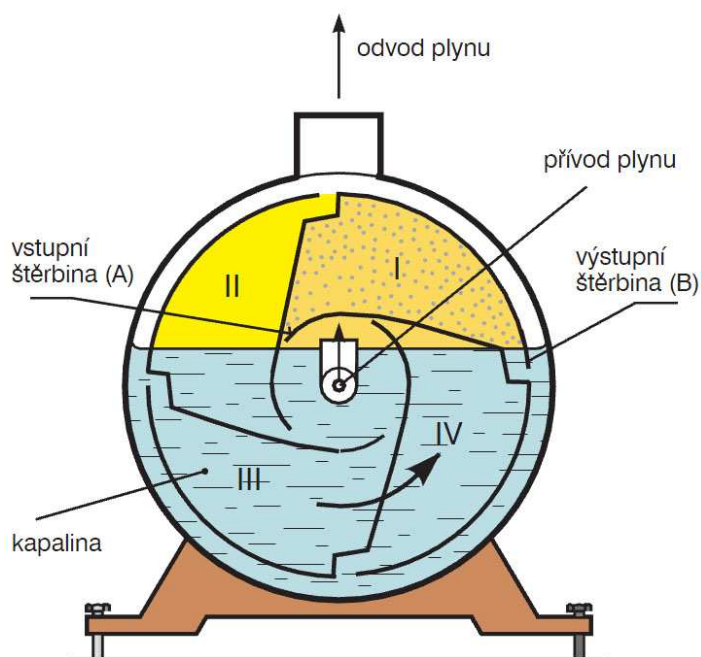
Průtokoměry, které jsou určeny pro měření objemového průtoku měří objem tekutiny přímo, rozdělením objemu do samostatných odměrných prostor se známým objemem. Jestliže známý objem odměrného prostoru vynásobíme počtem postupně naplněných prostor, dostáváme hodnotu objemu tekutiny, která protekla potrubím za určitou měřenou dobu.

Na svém výstupu objemové průtokoměry obvykle mají počítadlo, na kterém se ukazuje celkový proteklý objem, ale mohou také mít na výstupu impulsy, odpovídající počtu naplněných prostor. Těchto dávkovacích průtokoměrů existuje nepřeberné množství. Jednotlivá provedení se liší velikostí naplňovaných prostor, tvarem prostor, které jsou naplňovány ale také např. uložením lopatek. Mezi typické zástupce těchto průtokoměrů patří průtokoměr s krouživým pístem, oválové měřidlo, bubnové plynoměry a další.

Tyto průtokoměry obsahují velké množství pohyblivých částí, proto nejsou vhodné pro měření kapalin obsahující pevné částice nebo kapalin znečištěných. S ohledem na nemožnost spolehlivého utěsnění nelze objemové průtokoměry používat pro měření průtoku plynů. Způsobují tlakovou ztrátu.

2.2.1 Bubnový plynoměr, [1, 4]

Používá se pro přesné laboratorní a ověřovací měření. Ve válcové ležaté nádobě, která je zčásti vyplněna tekutinou (olej nebo voda) je otočně uložen vlastní měřicí buben, viz Obr. 7. Buben je opatřen štěrbinami pro přívod a odvod plynu a rozdělen radiálními přepážkami na čtyři odměrné prostory. Plyn se do měřicího bubnu přivádí trubicí, která je umístěna v ose otáčení bubnu a ústí nad hladinou uzavírací kapaliny. Přepážky v bubnu jsou tvarovány tak, aby při jejich otáčení kapalina současně uzavírala např. vstupní štěrbinu (A) i výstupní štěrbinu (B). Tím je odměřen objem



Obr. 7 – Bubnový plynoměr, [4]

plynu v prostoru I. S hřídélí bubnu je spojeno počítadlo, které udává proteklé množství. S ohledem na skutečnost, že objem plynu závisí na tlaku a teplotě, je nutno měřit i tyto veličiny a provádět korekční výpočet.

I, II, III, IV – Odměrné prostory: prostor I je zcela vyplněn plynem, prostor II se vyprazdňuje, prostor III je zcela vyplněn oddělovací kapalinou a prostor IV se začíná plnit plynem.

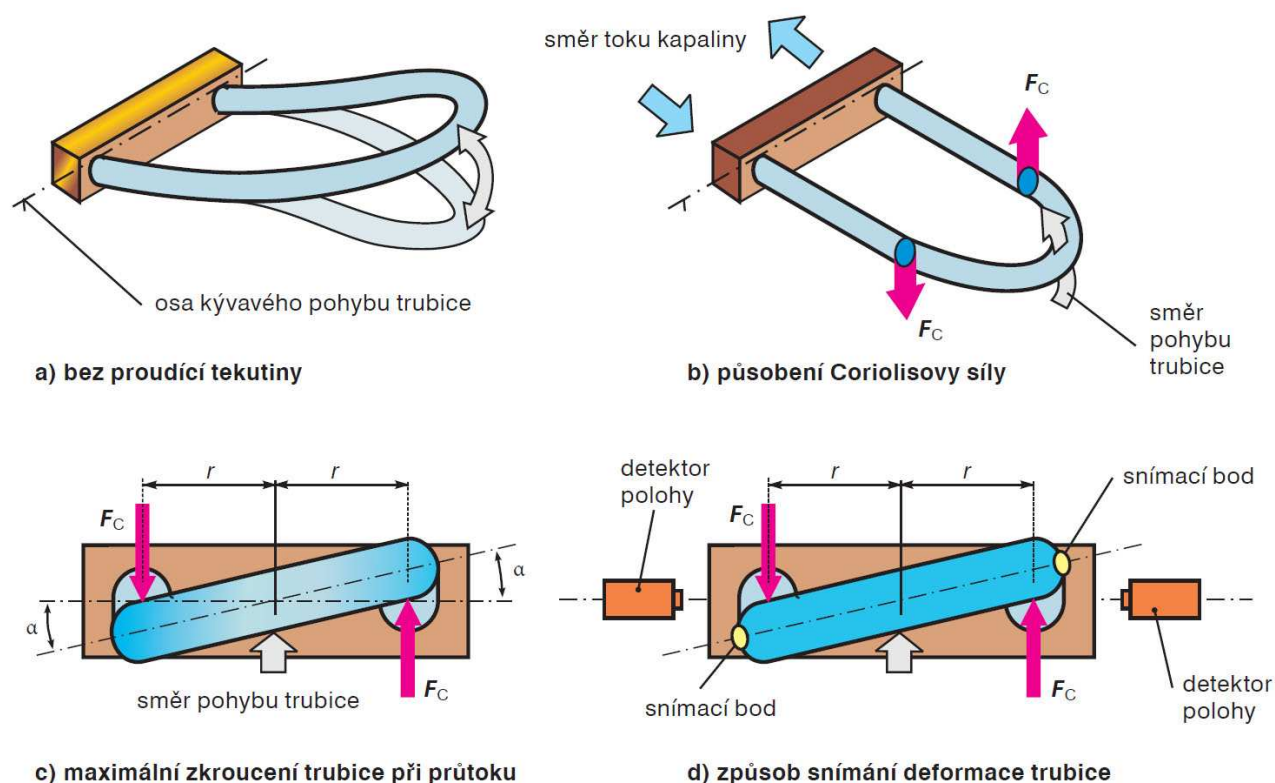
2.3 Měření hmotnostního průtoku, [1, 6, 10]

Většina průtokoměrů je vyráběna jako objemová měřidla. Údaj objemových průtokoměrů je ovlivňován změnami teploty, tlaku a hustoty, popř. viskozity měřeného média. Kapaliny a plyny jako např. ropné produkty, zemní plyn, uhlovodíkové produkty apod. jsou často transportovány z jedné organizace do druhé potrubními systémy. Vzhledem k tomu, že tyto produkty jsou kupovány a prodávány v hmotnostních jednotkách, je zapotřebí přesně znát hmotnost přepravených médií. Při použití rychlostních nebo objemových průtokoměrů se hmotnostní průtok zjišťuje nepřímo výpočtem. Vhodný je způsob umožňující přímo měřit hmotnostní průtok, resp. hmotnost přepraveného množství. V současné době se pro stanovení hmotnostního průtoku používají nepřímé i přímé metody. K nepřímým metodám patří použití mikroprocesorové techniky ve spojení s konvenčními průtokoměry a dalšími senzory. Hmotnostní průtok a proteklá hmotnost se vypočítají z naměřeného objemového průtoku a naměřené hustoty. Hustota čistých kapalin závisí pouze na teplotě, a jsou-li změny teploty malé, lze hustotu pokládat za konstantní. Závisí-li hustota měřeného média na jeho složení a také na teplotě, musí být hustota měřena.

S výjimkou nepřímého zjištění hmotnostního průtoku, kterého docílíme přepočtem z průtoku objemového, existuje relativně málo přímých metod, které umožňují měření hmotnostního průtoku. U přímých metod měření je výstup ze snímače závislý na hmotnostním průtoku média, které protéká průtokoměrem. Takovéto zařízení je přesnější, než-li zařízení měřící objemový průtok nepřímo. Jedním z nejznámějších a nejúspěšnějších hmotnostních průtokoměrů je dozajista průtokoměr založen na Coriolisově jevu. Tepelné hmotnostní průtokoměry odvozují hmotnostní průtok z měření rozložení tepla mezi dvě místy v potrubí. Obě tyto metody byly předmětem intenzivních výzkumů po mnoho let. Měřicí zařízení vhodná pro komerční využití jsou k dispozici od poloviny osmdesátých let minulého století.

2.3.1 Coriolisův průtokoměr, [1, 6]

Tento průtokoměr, vyobrazený na obr. č. 4, využívá k měření tzv. Coriolisovy síly F_C . Tato síla vzniká při průtoku hmotného média ve vibrujících měřicích trubicích. Jako důsledek působení Coriolisovy síly vzniká fázový posuv v rezonančním kmitání trubic, který je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí. Frekvence vlastních kmitů potom odpovídá hustotě tekutiny. Průtokoměry, využívající Coriolisovy síly, měří hmotnostní průtok velmi přesně. Jejich měření je v podstatě nezávislé na teplotě, tlaku, viskozitě a obsahu pevných částic v tekutině.



Obr. 8 – Coriolisův senzor typu U, [6]

2.3.2 Tepelný hmotnostní průtokoměr, [1, 6]

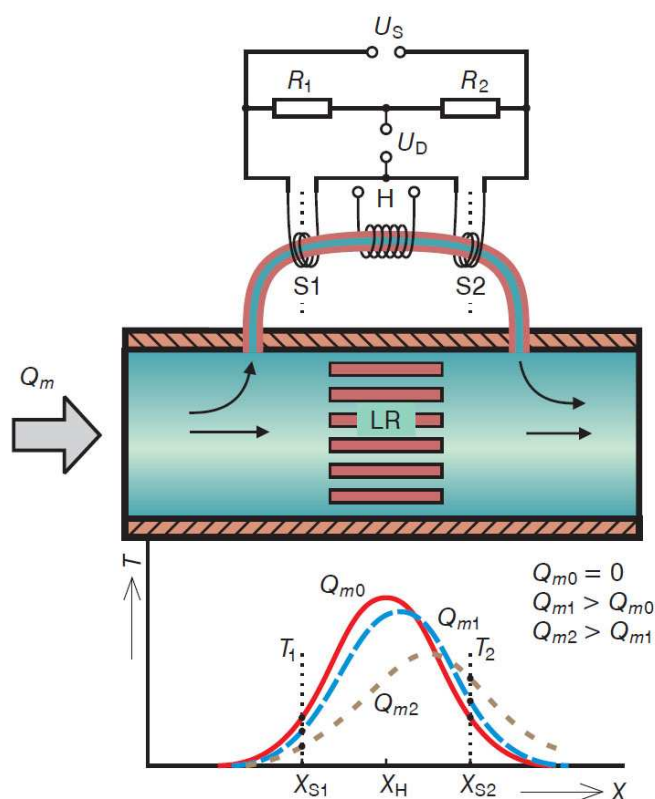
Tepelný hmotnostní průtokoměr je založen na závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolím, které tvoří proudící tekutina, na hmotnostním průtoku. Existují dva typy těchto průtokoměrů, termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry.

Termoanemometr je elektricky vyhřívaná sonda, která je vložena do potrubí, kterým tekutina proudí. Množství tepla, které je odebíraného na sondě tekutinou, je závislé na rychlosti proudění, hustotě, tepelné vodivosti a na teplotě proudícího média,

kterou je potřeba měřit. Čidlem termoanemometrů bývá platinový drátek o průměru 0,01 mm až 0,1 mm, který je zpravidla žhavený na teplotu 200 až 500 °C.

Zdroje vyhřívání termoanemometru jsou dvojího typu. První z nich využívá sondu s konstantním elektrickým proudem, změnou průtoku se mění teplota sondy a tuto změnu teploty měříme. Druhou možností jsou termoanemometry se sondou, která má konstantní teplotu. U těchto termoanemometrů zjišťujeme velikost elektrického proudu, která musí být taková, aby sonda i při změně rychlosti proudění měla pořád stejnou hodnotu. Velikost elektrického proudu je úměrná hmotnostnímu průtoku.

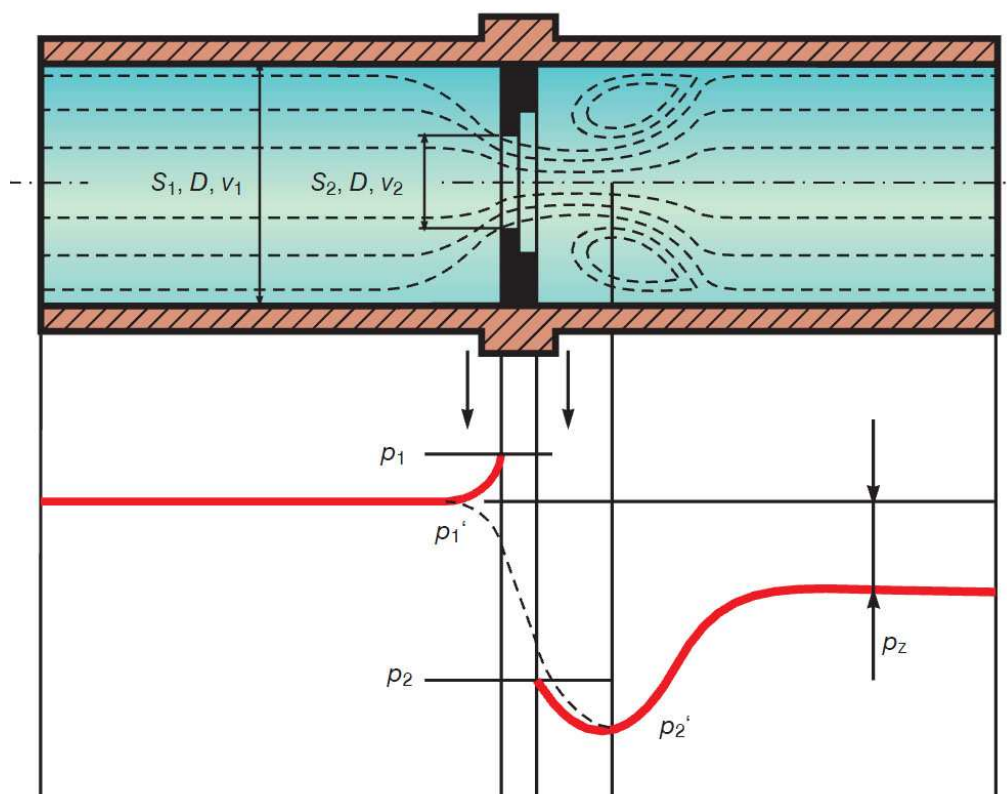
U kalorimetrických průtokoměrů je zdroj tepla umístěn do středu proudového profilu a teplota se snímá před a za tímto zdrojem tepla. Průtok pak určujeme z rozdílu teplot. Kalorimetrický hmotnostní průtokoměr vyhodnocuje míru oteplení způsobenou prouděním hmoty. Kalorimetrický senzor bývá standardně vytvořen na tenké obtokové kapiláře. Tato tenkostěnná kapilára má určený průměr (přibližně 1 mm) a prochází skrze ni jen určitá část průtoku vzhledem k celkovému průtoku měřeného média procházejícího průtokoměrem. Typické uspořádání senzoru je znázorněno na Obr. 9.



Obr. 9 – Kalorimetrický průtokoměr, [6]

2.4 Měření rozdílu tlaku před a za primárním prvkem průtokoměru, [1, 4, 10]

Právě na tomto principu je založena většina průmyslových průtokoměrů. Základní skupinou těchto průtokoměrů jsou škrťací orgány, mezi které patří clona, dýza, Venturiho trubice aj. Mezi další zástupce průtokoměrů, založených na snímání difference tlaku, patří rychlostní sondy (Pitotova trubice, Prandtlůva trubice, kulová sonda, válcová sonda aj.), kolenový průtokoměr, plovákové průtokoměry, atd.



Obr. 10 – Proudění a průběh tlaků na cloně, [4]

v_1, v_2 – rychlost v průřezu S_1 , popřípadě S_2

p_1, p_2 – statický tlak u stěny před zúžením popřípadě v místě zúžení

p_1', p_2' – statický tlak v ose potrubí

p_Z – tlaková ztráta na škrťacím orgánu

Tlakové poměry v potrubí při proudění popisuje Bernoulliho rovnice. Ta vyjadřuje zákon zachování mechanické energie v tekutinách. Dle tohoto zákona při stejných podmínkách tlak v tekutině klesá s nárůstem rychlosti jejího proudění. K tomuto jevu dojde vložení překážky do potrubí, ve kterém tekutina proudí. Rychlost proudění (kinetická energie) při průchodu překážkou roste při poklesu statického tlaku v tekutině (potenciální energie). Rozdíl tlaků před a za překážkou závisí na tvaru překážky, a je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti proudění (4).

$$v = k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (4)$$

kde:

v – rychlost proudění tekutiny [m.s^{-1}]

k – konstanta určující vlastnosti primárního prvku průtokoměru [-]

Δp – diferenční tlak [Pa]

ρ – hustota tekutiny [kg.m^{-3}]

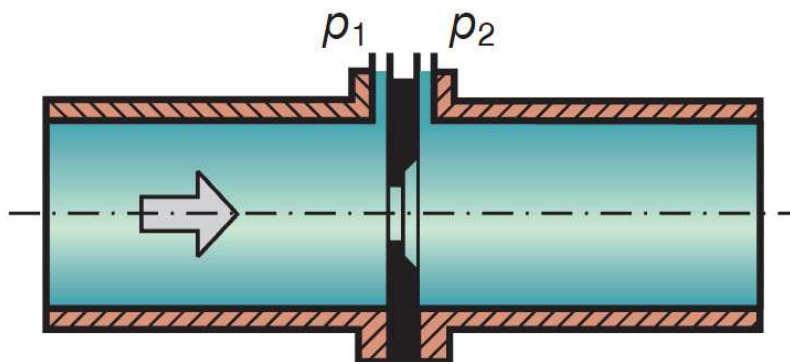
Existují škrťací orgány normalizované (clona, dýza, Venturiho dýza a čtvrtkruhová dýza), jejichž výpočtové rozměry jsou jednoznačně určeny v České technické normě, a nenormalizované (segmentová clona, dvojitá clona, válcová dýza aj.), které se užívají především pro zvláštní účely, kdy měření probíhá ve ztížených podmínkách a při vyšších nárocích na prostředí. Pro praktické použití je nezbytná geometrická přesnost škrťacích orgánů na různé rozměry potrubí. Průtokový součinitel α musí být pro daný typ škrťacího orgánu konstantní v celém měřicím rozsahu.

3 ŠKRTÍCÍ ORGÁNY

Princip měření využívá jevy provázející proudění zúženým průřezem. Do potrubí se umístí škrticí orgán, který zmenšuje průtočný průřez. Statický tlak v tekutině je snímán před zúžením a za zúžením pomocí diferenčního tlakoměru. S ohledem na jiné typy průtokových měřidel mají průřezová měřidla mnohé výhody. Tyto měřidla je možné využít i při měření korozivních látek, protože materiál, ze kterého bude měřidlo vyrobeno lze individuálně navrhnout. Neobsahují žádné pohyblivé části a také jejich opotřebení je velmi nízké, z čehož vyplývá malá náročnost měřidla na jeho údržbu. Mezi další výhodu bezesporu patří i fakt, že za daných podmínek jsou tyto měřidla použitelná ve velkém rozmezí průtoků.

3.1 Clona, [1, 2, 3, 4]

Normalizovaná clona je deska s kruhovým otvorem uprostřed, která je vložena do potrubí mezi příruby. Průměr škrticího otvoru a jeho umístění je závislý na typu tekutiny, která je měřena. Odběry statických tlaků jsou realizovány těsně před a za škrtícím místem. Existují dva základní typy odběru tlaků – koutové a přírubové odběry. Náběhová hrana otvoru clony musí být vždy ostrá. Clony mají poměrně velkou tlakovou ztrátu.



Obr. 11 – Clona, [4]

p_1 – statický tlak před zúžením, p_2 – statický tlak v místě zúžení

Základní typy clon reprezentují clona normalizovaná (soustředná), excentrická a segmentová. Clonou je možno měřit průtok většiny čistých tekutin. Clony jsou náchylné na opotřebení, které může vznikat znečištěným médiem nebo médiem s částicemi. Tento fakt může ovlivnit snímanou tlakovou diferencii, odpovídající určitému průtoku. Pro dosažení požadovaných vlastností clonu montujeme do přímého úseku potrubí s předem definovanými uklidňujícími úseky před a za clonou. U všech typů průtokoměrů bývají tyto uklidňující úseky definovány, normalizovaná clona má uklidňovací úseky jedny z nejdelších.

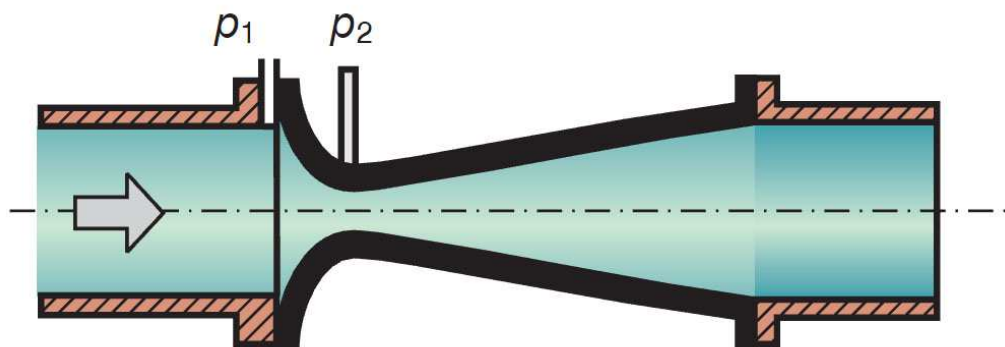
Normalizované clony se užívají pro průměry potrubí v rozsahu $50 \div 1000$ mm. Poměrné zúžení clony je v rozsahu $\beta^2 = 0,05 \div 0,7$.

3.1.1 Segmentová clona, [1]

Tato clona se používá pro měření průtoků znečištěných kapalin, Mokrých par a vlhkých plynů. Průtočný průřez není dole seškracen, proto může vlhkost a nečistoty volně procházet a statické vlastnosti škrťícího orgánu se nemění.

3.2 Venturiho trubice, [1, 3, 4, 7]

U Venturiho trubice se tekutina zrychluje v kuželovém konfuzoru. Tato skutečnost opět vyvolává místní pokles statického tlaku. V difuzoru, následující části trubice, se tlak vrací téměř na úroveň tlaku před zúžením. Mezi výhody Venturiho trubice patří velká přesnost měření a menší tlaková ztráta než-li u clony. Nevýhodou je pak poměrně vysoká cena tohoto škrťícího orgánu, proto se využívá velmi málo.



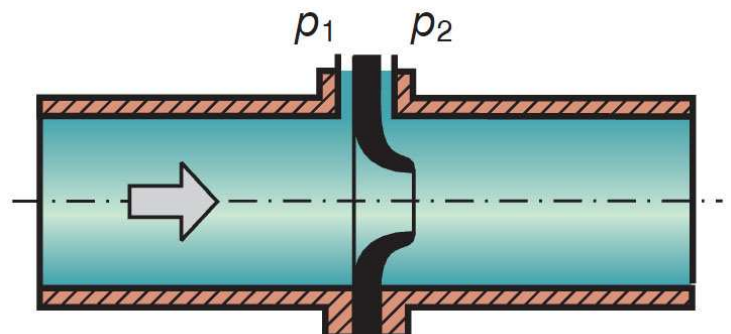
Obr. 12 – Venturiho trubice, [4]

p_1 – statický tlak před zúžením, p_2 – statický tlak v místě zúžení

3.3 Dýza, [1, 3, 4, 7]

Dýza je jakýmsi kompromisem mezi Venturiho trubicí a clonou. Od Venturiho trubice se odlišuje absencí difuzoru. Na rozdíl od clon jsou dýzy schopny měřit větší průtoky a také je možno měřit tekutiny, obsahující větší pevné částice. Tlaková ztráta dýzy je přibližně stejná jako u clony. Dýzy jsou levnější než Venturiho trubice, ovšem méně přesné.

Výroba normalizované dýzy je náročnější, z důvodu nutnosti velké tvarové přesnosti. Užívá se v potrubích o průměrech $50 \div 500$ mm při poměrném zúžení $0,05 \div 0,64$ tam, kde jsou vyšší požadavky na přesnost měření.



Obr. 13- Dýza, [4]

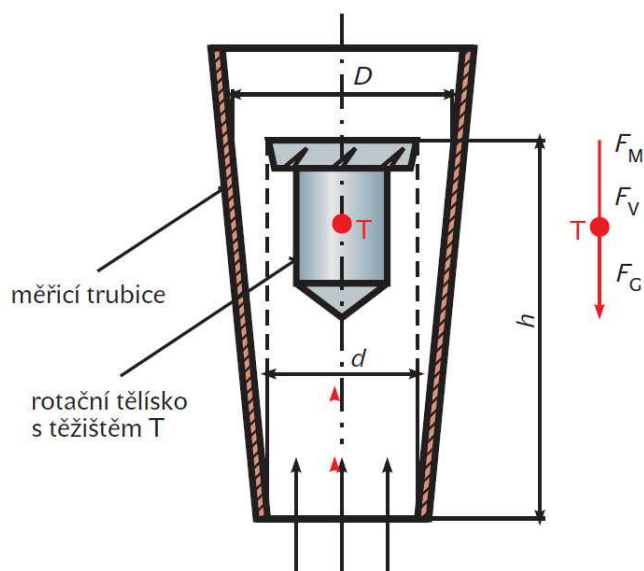
p_1 – statický tlak před zúžením, p_2 – statický tlak v místě zúžení

3.3.1 Normalizovaná čtvrtkruhová dýza, [1]

Tento škrtící orgán je určen k měření kapalin s velmi velkou viskozitou při malých rychlostech proudění. Tvar vstupního otvoru je čtvrtkruhový.

3.4 Plováčkové průtokoměry (rotametry), [1, 5]

Základem těchto průtokoměrů je svislá kónická měřicí trubice, která se směrem nahoru rozšiřuje. V této trubici se volně pohybuje plováček z materiálu, jehož hustota je větší než je hustota měřené tekutiny. Pokud tekutina neproudí, je plováček v trubici dole. Při početí proudění tekutiny se plováček začne zvedat. Při určitém průtoku tekutiny zaujme rovnovážnou polohu s takovou plochou mezikruží, při které je síla nadnášející plováček rovna síle gravitační, která na plováček působí. Zdvih plováčku je úměrný rychlosti proudění tekutiny.

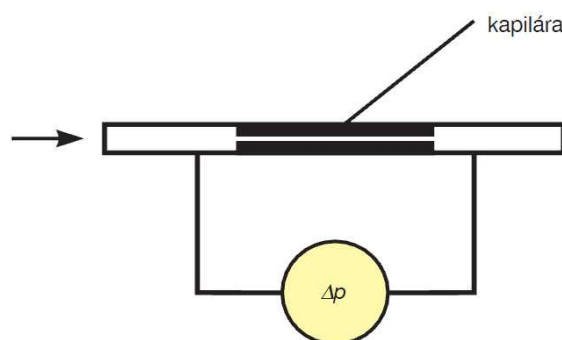


Máme různé tvary plováčků, které vychází z účelu, na které se jednotlivé plováčky používají. Poloha plováčku se buďto snímá elektricky nebo se odečítá přímo na stupnici stěny skleněné trubice, taktéž je možné i pneumatické snímání, využívající systém klapka – tryska. Mezi nejvýznamnější výhody těchto typu škrtících orgánů je jejich měřící rozsah, a to 10:1, malá tlaková ztráta, snadná instalace, relativně nízká cena, ale i schopnost měřit malé průtoky.

Obr. 14 - Princip rotametru, [5]

3.5 Měřicí kapilára, [4]

Měřicí kapilára je používá pro měření velmi nízkých průtoků a to převážně v laboratorních podmínkách. Princip měření je založen na odporu kapiláry proti proudění tekutiny. Tlaková diference na kapiláře je úměrná průtoku. Pro praktické užití je zapotřebí kapiláru kalibrovat. Délka kapiláry musí být dostatečně velká pro zajištění laminárního proudění. Při přítomnosti více kapilár v jednom tělese a při zajištění pouze laminárního proudění ve všech kapilárách lze měřit i relativně velké průtoky a to s velkou přesností.



Obr. 15 – Princip kapilárního průtokoměru, [4]

Pro laminární tok kapilárou platí Hakenova-Pouseillova rovnice (6).

$$Q_v = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} (p_1 - p_2) \quad (6)$$

Kde:

d – průměr kapiláry

l – délka kapiláry

η - dynamická viskozita média

Při použití kapilárního průtokoměru v praxi vznikají často odchylky od Hakenova-Pouseillova rovnice, a to z důvodu nesplnění předpokladů jako je nestlačitelnost tekutiny nebo laminárního proudění po celé délce kapiláry. Důležitou podmínkou pro použití kapilárních průtokoměrů je čistota měřeného média, jeho definované složení a známá hodnota dynamické viskozity.

4 NÁVRH A REALIZACE MODELU LABORATORNÍHO PRACOVISTĚ

Cílem realizace modelu clonového průtokoměru je přiblížení problematiky pro potřebu výuky. Pro samotnou realizaci návrhu modelu clonového průtokoměru pro laboratorní měření bylo nejprve nutné vypočítat rozměry clony, která bude v měřící trati zabudována. Pro přiblížení výpočtu je nutné uvést definice některých pojmů.

4.1 Základní pojmy

Hustota ρ

Hustota se vyskytuje ve vztazích pro výpočet průtoku proudícího média. Do těchto vztahů je zapotřebí dosazovat hodnotu hustoty média zpravidla před škrtícím orgánem. U kapalin je předpoklad závislosti hustoty na teplotě. Oproti hustotě vzduchu, která je závislá nejenom na teplotě, ale také na tlaku. Pro výpočet hustoty plynů musíme znát jeho teplotu a tlak před škrtícím orgánem. [5]

Expanzní součinitel ε

Expanzní součinitel vyjadřuje poměry, které nastávají při expanzi plynů na škrtícím orgánu, především změnu hustoty plynu. Pro kapaliny je hodnota expanzního součinitele rovna jedné, z důvodu nestlačitelnosti kapalin. Hodnoty expanzního součinitele pro plyny se určují z nomogramu – způsob odečtení hodnoty znázorňuje čárkovaná čára se šipkami. Nejprve je nutné určit poměr diferenčního tlaku a absolutního tlaku před škrtícím orgánem. Pro další krok je také nutno znát Poissonovu konstantu, typ průřezového měřidla, a poměr zúžení. [5]

Dynamická viskozita plynů η

Viskozita má zásadní význam při měření průtoku, protože společně s drsností stěn, místní rychlostí a polohou v potrubí určují profil rychlosti v potrubí. Viskozita plynů je podstatně menší než-li viskozita kapalin, stejně tak jako je menší i její účinek na proudění. Viskozita plynů stoupá s teplotou a lze ji považovat za nezávislou na tlaku, s výjimkou velmi nízkých a velmi vysokých tlaků. [1]

Reynoldsovo číslo R_e

Reynoldsovo číslo udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pomocí tohoto čísla je možné určit, zda-li se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. Pro toto zjištění je stěžejní tzv. kritická hodnota Reynoldsova čísla, která je pro různé typy potrubí a různé kapaliny odlišná. Její zjišťování probíhá experimentálně, avšak tato kritická hodnota se obvykle pohybuje kolem $R_e = 2000$. Se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se snižuje vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. [1, 5]

Součinitel průtoku α

Tento součinitel je závislý na poměru zúžení a na Reynoldsově čísle.

4.2 Obecný popis modelu clonového průtokoměru

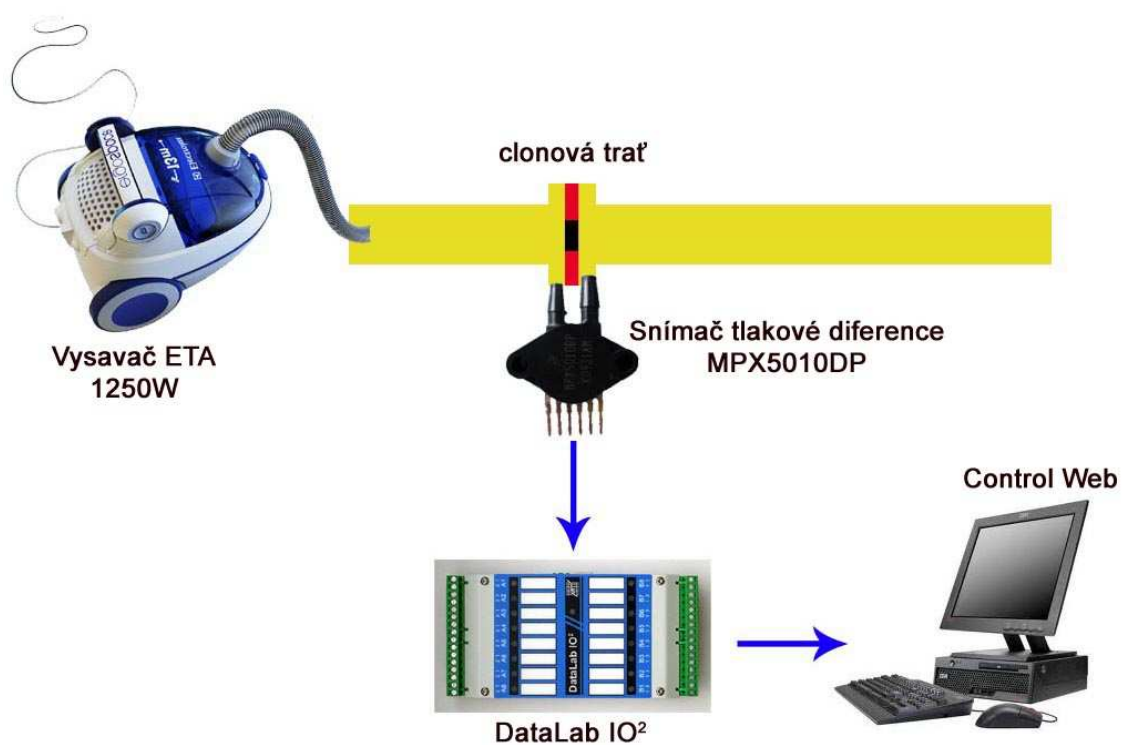
Model clonového průtokoměru je v laboratoři realizován pomocí novodurového potrubí, skládající se ze dvou částí. Tyto dvě části jsou spojeny pomocí příruby, do které je vsazen škrťací orgán – clona, vyrobená dle výpočtu pro tento model, které jsou součástí této kapitoly. V těsné blízkosti příruby jsou vyvrtány otvory pro odběry tlaků před a za škrťacím orgánem, které vyústí do snímače tlakové difference. Tento snímač naměřené hodnoty dále distribuuje do vstupně/výstupní jednotky DataLab IO², odkud je signál odeslán do počítače, kde probíhá samotné vyhodnocování naměřených hodnot v programu, vytvořeném v softwarovém prostředí Control Web. Na počátku této soustavy je vysavač, který vysává ze systému vzduch. Výkon vysavače je regulovatelný. Podrobné specifikace jednotlivých komponent, použitých pro tento model jsou uvedeny níže.

Obdobný model pro měření průtoku clonou, realizovaný pomocí tratě menších rozměrů, o cca polovičním průměru potrubí již byl v laboratoři zastoupen, ovšem s postupem času se zjistilo, že daný model již nevyhovuje nárokům, kladeným pro potřeby měření průtoku clonou. Z tohoto důvodu, má tato práce také inovativní charakter, a má nahradit výše zmíněnou starší trať pro měření průtoku clonou. Nový model bude navíc využívat podpory softwarového prostředí Control Web pro vyhodnocení výsledků měření v „reálném“ čase a uživatel nebude muset přepočítávat hodnotu průtoku vzduchu, jak tomu bylo doposud.

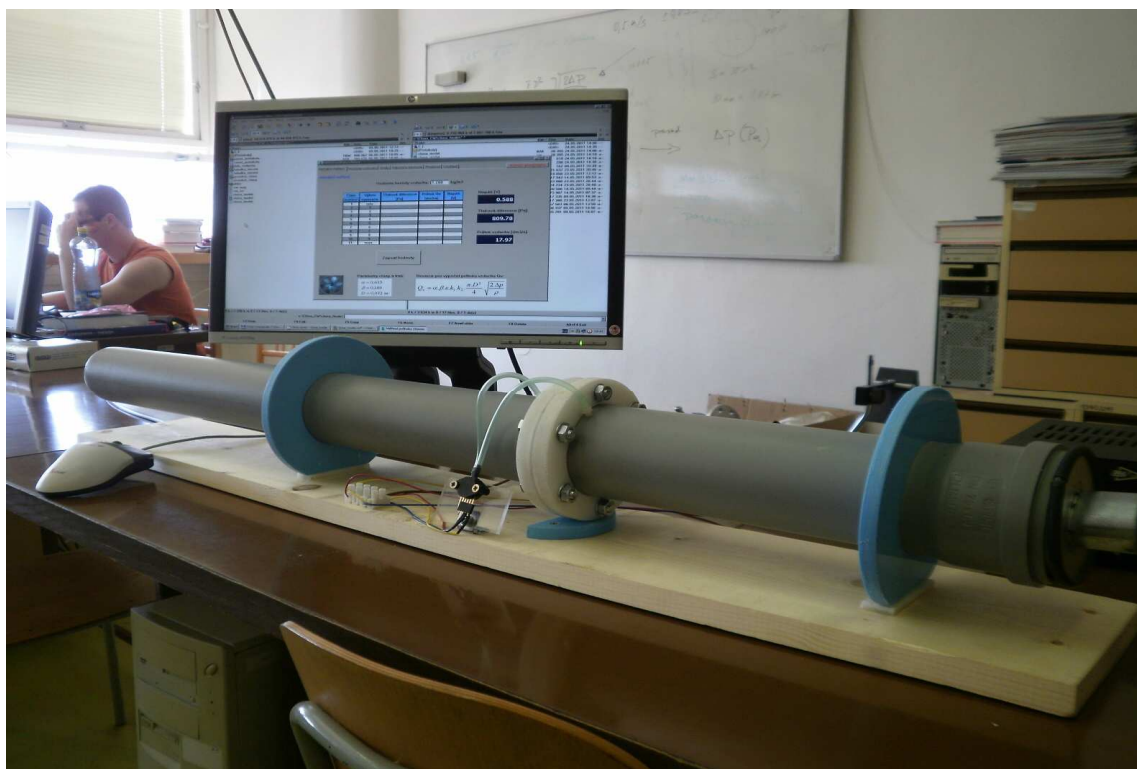
Realizace modelu clonového průtokoměru je podřízena České technické normě, konkrétně se jedná o normu ČSN EN ISO 5167-2, která detailně popisuje geometrii, způsob užití, podmínky montáže clon, které jsou vloženy do potrubí, jehož průřez je proudem zcela zaplněn, za účelem stanovení průtoku tekutiny, proudícím potrubím. V normě se také nachází informace potřebné pro výpočet průtoku a jeho nejistot.

4.3 Komponenty modelu clonového průtokoměru

1. Novodurová trubka
2. Příruba
3. Clonový kotouč
4. Ventilátor ATAS MEZAXIÁL 4142
5. Vysavač ETA QUINTO ELECTRONIC, 1250W s nastavitelným výkonem
6. Snímač tlakové difference FreeScale MPX5010DP
7. DataLab IO²



Obr. 16 – Schéma modelu průtokoměru s clonou



Obr. 17 – Reálný model průtokoměru s clonou



Obr. 18 – Pracoviště pro měření průtoku clonou

4.3.1 Novodurová trubka

Trat' je vyhotovena z novodurové trubky, šedé barvy. Trubka je rozdělena na dva úseky. První varianta počítala se stejnými délkami obou úseků, a to o délce desetinásobku průměru potrubí. Avšak následně jsme museli trat' modifikovat, jak je dále popsáno v této bakalářské práci, a délky obou úseků jsme zkrátili na minimální možnou hodnotu, kterou ošetřuje ČSN EN ISO 5167-2. Trat' má tedy délku 10 před clonou a 5D za clonou. Vnější průměr trubky je $D = 75 \text{ mm}$, vnitřní průměr je $d = 72 \text{ mm}$.

4.3.2 Příruba

Příruba měřící trati, spojující dvě části potrubí je vysoustružena z bílého silonu. Na potrubí je uložena s přesahem. Pro lepší těsnost systému a také z důvodu zamezení pohyblivosti jednotlivých částí trati, je potrubí na přírubu nalepeno. Příruba je osazena šesti šrouby o rozměrech M6, Obr. 19.



Obr. 19 – Příruba

4.3.3 Clonový kotouč

Geometrie a rozměry škrtícího orgánu – clony, je podřízena České technické normě, ČSN EN ISO 5167-2. Výrobu clonového kotouče proto bylo nutné přizpůsobit výše zmíněné normě. Clona je vyrobena z nerezového plechu o síle 3,2 mm. Dle výpočtů byly vyrobeny celkem dvě clony, jedna o vnitřním průměru $d = 30,5$ mm, druhá potom o průměru $d = 35$ mm. Clona je znázorněna na Obr. 20.



Obr. 20 – Clonový kotouč

4.3.4 Ventilátor – MEZAXIAL 3142

Ventilátor od firmy ATAS, nese označení MEZAXIAL 3142, a jak již název samotného ventilátoru napovídá jedná se o ventilátor axiální. Ventilátor slouží k vytváření proudění v modelu clonového průtokoměru.

V původním řešení trati se počítalo využití axiálního ventilátoru MEZAXIAL 3142, specifikace viz níže, který měl dle technické specifikace od výrobce plně stačit, aby vyvinul optimální proudění vzduchu. V praxi se ovšem ukázalo, že je jeho výkon nedostatečný, a na navržené trati dosahujeme pouze minimálního pohybu vzduchu. Při zapojení ventilátoru v systému nefungoval tlakový výstup – ventilátor je odtahový bez přetlaku, proto jsme zdroj proudění vyměnili za vysavač, specifikace viz níže.



Obr. 21 – Ventilátor MEZAXIAL 3142

Tab. 1 – Specifikace ventilátoru MEZAXIAL 3142

Napětí	Kmitočet	Proud	Příkon	Otáčky	Objem. průtok	Prac. poloha
230 V	50-60 Hz	0,16 A	21 W	2600 ot/min	0,05 - 0,06 m ³ /s	libovolná

4.3.5 Vysavač ETA QUINTO ELECTRONIC, 1250W

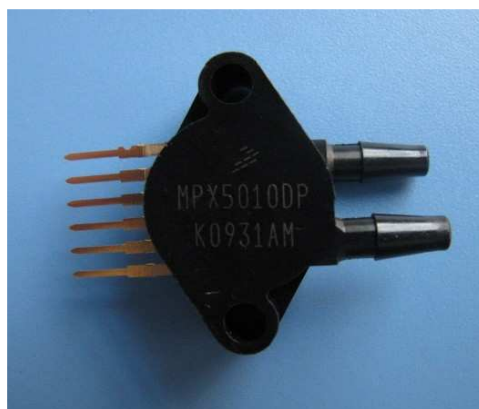
Proudění vzduchu v trati je realizováno pomocí vysavače, který je pomocí přechodu z průměru hadice na velikost průměru potrubí připojen k trati. Vysavač má nastavitelný výkon od 1100W až do svého maxima 1250W. Charakter regulace je pozvolný, regulátor výkonu je rozdělen na 11 kroků.

4.3.6 Snímač tlakové difference – Freescale MPX5010DP

Snímač tlakové difference je výrobek firmy Freescale a nese označení MPX5010DP. Jedná se o piezorezistivní senzor. Tento snímač, dle informací dostupných v jeho technické dokumentaci nabízí široké možnosti uplatnění. Rozsah snímaného tlaku je 0 kPa až 10 kPa. Napájení snímače je realizováno pomocí 5Vss. Výstupem z tohoto snímače je napětí, úměrné měřenému tlaku, které je dále zpracováváno v počítači. Použitý snímač tlakové difference má v sobě zakomponovaný převodník tlaku na napětí, výstup z převodníku má lineární charakter. Tento snímač je vybaven dvěma vstupy, na jeden je přiveden vývod, který snímá tlak před škrticím orgánem, na druhý je pak přiveden vývod, který snímá tlak za škrticím orgánem. Vývody do snímače jsou realizovány pomocí hadiček z PVC o průměru 4 mm. Další specifikace snímače jsou uvedeny v tabulce a v přílohách.

Tab. 2 – Specifikace snímače tlakové difference Freescale MPX5010DP

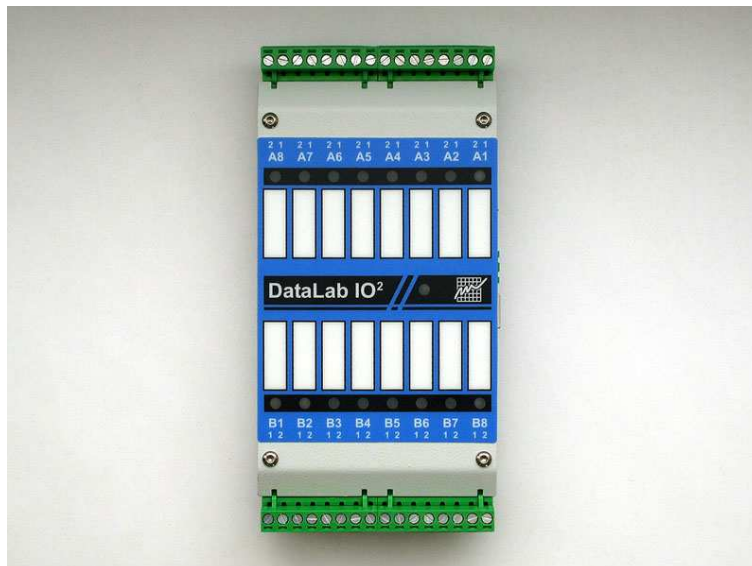
Charakteristika	Symbol	Min	Optimum	Max	Jednotka
Rozsah tlaku	P_{OP}	0	—	10 1010,78	kPa mm H ₂ O
Napájecí napětí	V_S	4,75	5,0	5,25	Vdc
Napájecí proud	I_O	—	5,0	10	mAdc
Min. tlaková kompenzace	V_{off}	0	0,2	0,425	Vdc
Plný rozsah výstupu	V_{FSO}	4,475	4,7	4,925	Vdc
Plný rozsah rozpětí	V_{FSS}	4,275	4,5	4,725	Vdc
Přesnost	—	—	—	$\pm 5,0$	% V_{FSS}
Citlivost	V/P	—	450 4,413	—	mV/mm mV/mm H ₂ O
Výstupní zdroj proudu	I_{O+}	—	0,1	—	mAdc
Zahřívací čas	—	—	20	—	ms



Obr. 22 – Snímač tlakové difference MPX5010DP

4.3.7 DataLab IO² – vstupně/výstupní jednotka

Jedná se o vstupně/výstupní jednotku, výrobek firmy Moravské přístroje, a.s. Jednotka je s počítačem spojena pomocí rozhraní USB. DataLab IO² realizuje převod signálu ze snímače tlakové difference do počítače, kde je tento signál dále vyhodnocován v programu, vytvořeného v prostředí aplikace Control Web. Podrobná specifikace je uvedena níže.



Obr. 23 – Vstupně/výstupní jednotka DataLab IO², [13]

Pro správně fungující spojení vstupně/výstupní jednotky s počítačem, bylo potřeba nainstalovat ovladač k zařízení DataLab IO² a v jeho parametrickém souboru nastavit modul, dle našich požadavků (rozsah měření, vstupní kanál). V našem případě pracujeme v měřícím rozsahu 0 až 2V (mód 11) a využíváme vstup A1 na kanálu č.18.

Modul analogových vstupů AI3

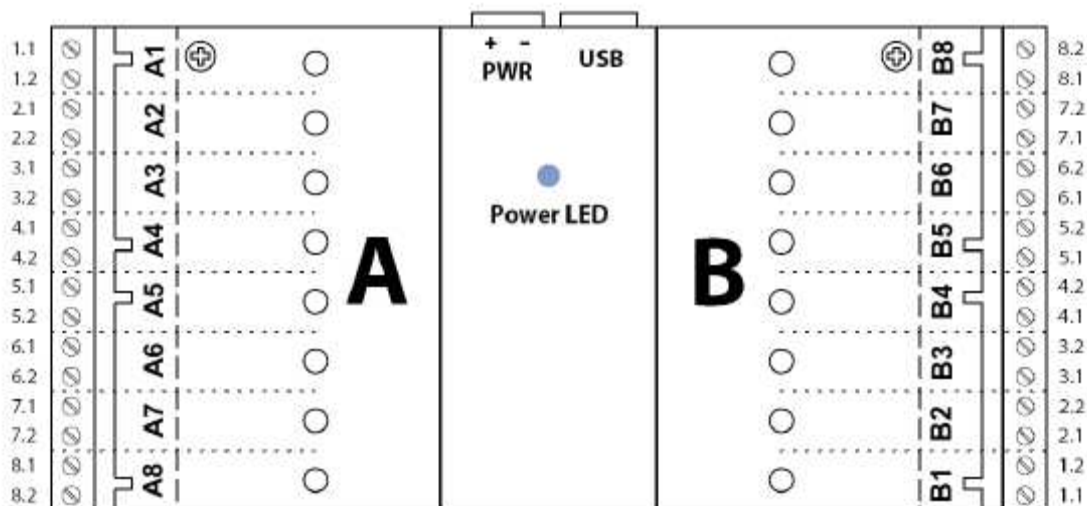
- Označení typu modulu v parametrickém souboru AI3
- Vstupní kanály: 8 kanálů typu `real` pro každý analogový vstup.
- Výstupní kanály: 8 kanálů typu `cardinal` pro nastavení měřicího rozsahu odpovídajícího kanálu. Hodnoty 0 nebo 8 vypnou (vyřadí) měření daného vstupu.
- Nastavení rozsahu měření – Mód: číslo udávající měřicí rozsah všech vstupů modulu, vždy 4 bity odpovídají jednomu vstupu (číselně mód odpovídá řídicímu kanálu). Nejnižší 4 bity určují mód prvního vstupu.

Zdrojový kód parametrického souboru:

```
[module_a]
module_type      = AI3
first_output_channel = 10
first_input_channel = 18
control_channel   = 9
mode1             = 11
```

Tabulka 3 – Nastavení rozsahu měření DataLab IO², [13]

Rozsah	Napětový rozsah	Proudový rozsah
0	měření vypnuto	měření vypnuto
1	+/-10 V	nelze použít
2	+/-5 V	nelze použít
3	+/-2 V	+/-20 mA
4	+/-1 V	+/-10 mA
5	+/-0,5 V	+/-5 mA
6	+/-0,2 V	+/-2 mA
7	+/-0,1 V	+/-1 mA
8	měření vypnuto	měření vypnuto
9	0..10 V	nelze použít
10	0..5 V	nelze použít
11	0..2 V	0..20 mA
12	0..1 V	0..10 mA
13	0..0,5 V	0..5 mA
14	0..0,2 V	0..2 mA
15	0..0,1 V	0..1 mA



Obr. 24 – Označení svorek DataLab IO², [13]

4.3.8 Control Web + Aplikace pro vyhodnocení měření

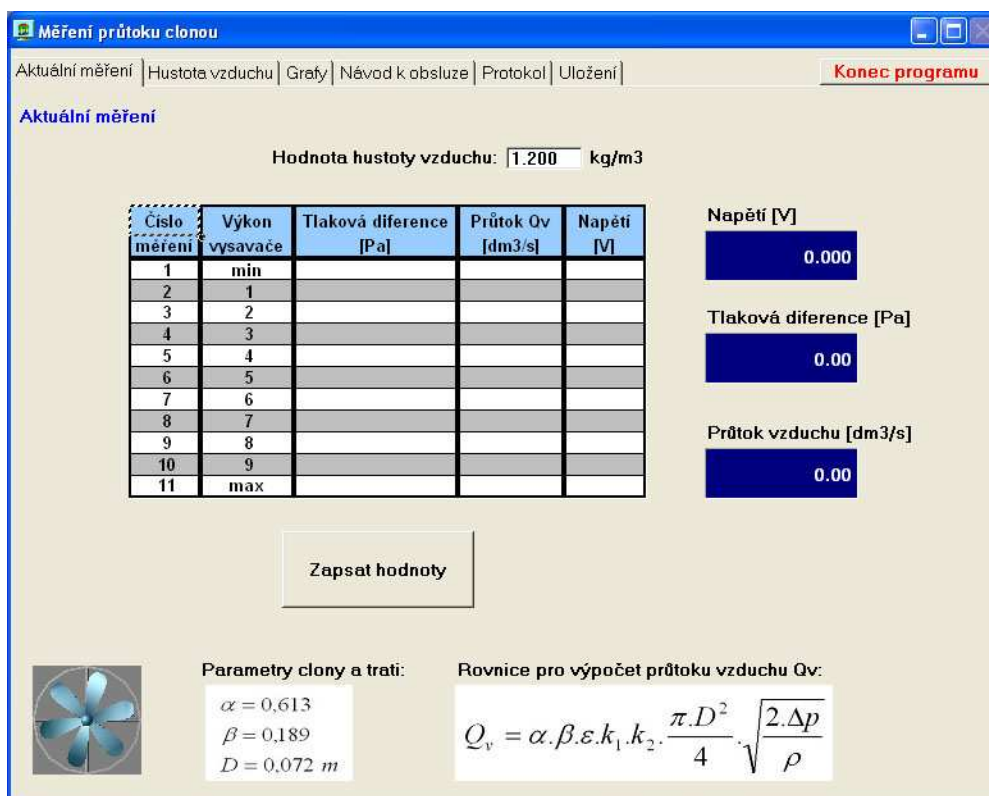
Systém Control Web je vyvíjen tuzemskou společností přístroje, a.s. Control Web je otevřený průmyslový řídicí a informační systém, který slouží jako univerzální nástroj pro vývoj a následné řízení aplikací, k vyhodnocování a ukládání dat. Uplatnění

nachází nejenom v řízení celopodnikových informačních systému, ale také jako levná varianta řídicího systému strojů.

Aplikace pro vyhodnocování měření tlakové difference vyhodnocuje aktuální tlakovou difference, ale také aktuální průtok vzduchu v trati. Přehledná aplikace je soustředěna do šesti záložek – Aktuální měření, hustoty vzduchu, grafy, návod k obsluze, protokol a uložení protokolu. V první záložce probíhá samotné měření, kde se po stisknutí příslušného tlačítka zapíše vždy jedno měření do tabulky měření. Na základě této tabulky je vykreslován graf závislosti průtoku vzduchu na stupni výkonu vysavače a graf závislosti průtoku vzduchu na tlakové difference, tyto grafy jsou k nahlédnutí v záložce „Grafy“. V dalších dvou záložkách „Protokol“ a „Uložení protokolu“ se uskutečňuje zapsání dalších náležitostí do protokolu (jméno studenta, studijní skupina, tlak a teplota v laboratoři, závěr z měření). Jediný parametr, ovlivňující měření, který musí zadávat uživatel je hustota vzduchu v závislosti na aktuálním atmosférickém tlaku a teplotě v laboratoři. Pro určení hustoty vzduchu je v aplikaci v záložce „Hustota vzduchu“ umístěna přehledná tabulka závislosti hustoty vzduchu na teplotě a atmosférickém tlaku.

Aplikace pro vyhodnocování měření průtoku vzduchu průtokoměrem s clonou, včetně jejího zdrojového kódu, je jako příloha č.5 této bakalářské práce dostupná na vypáleném CD. Pro spuštění aplikace je zapotřebí mít na počítači nainstalován program Control Web a mít zapojenou vstupně/výstupní jednotku DataLab IO².

Na obr. č. 25 je zobrazen náhled prostředí aplikace pro měření průtoku s clonou, obrázky kompletní aplikace, všech jejích záložek jsou umístěny v příloze č.3 této bakalářské práce.



Obr. 25 – Ukázka prostředí aplikace pro měření průtoku clonou

4.4 Návrh a výpočet clony

Návrh každého škrťacího orgánu je nutno uzpůsobit daným parametrům. Hlavním parametrem, který počítáme je průměr škrťacího otvoru. Pro výpočet škrťacího orgánu je nutné znát [2, 3]:

- Průměr potrubí D
- Tlak měřené tekutiny p_1
- Teplotu měřené tekutiny t_1
- Dynamickou viskozitu η_1 (popřípadě kinematickou viskozitu ν_1) měřené tekutiny
- Očekávaný objemový průtok Q_v nebo hmotnostní průtok Q_m měřené tekutiny
- Typ diferenčního tlakoměru, který bude připojen do systému a bude vyhodnocovat průtok měřené tekutiny

Průtok Q_v tekutiny se určí z rovnice (7)

$$Q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (7)$$

α – **průtokový součinitel škrťacího orgánu**, určuje se z tabulek a nomogramů pro konkrétní škrťací orgány a pro poměrné zúžení $\beta^2 = d^2/D^2$. Závisí na Reynoldsově čísle a rychlostním součiniteli kontrakce, který je u normalizovaných škrťacích orgánů konstantní od tzv. Hraničního Reynoldsova čísla. [3]

ε – **expanzní součinitel**, u kapalin $\varepsilon = 1$, u plynů $\varepsilon < 1$. Určuje se z nomogramu pro poměrný tlakový spád $\Delta p/p_1$, daný škrťací orgán, izoentropický součinitel χ a poměrné zúžení β^2 . [3]

d – **průměr otvoru škrťacího orgánu**, [m]

D – **průměr potrubí**, [m]

β^2 – **poměrné zúžení** $(d/D)^2$, které vyjadřuje poměr průřezu škrťacího orgánu k průřezu potrubí

Δp – **tlakový rozdíl měřený na škrťacím orgánu**, [Pa]

ρ – **hustota měřené tekutiny**, [kg.m⁻³]

4.4.1 První fáze – předběžný návrh

Pro předběžný návrh škrťacího orgánu volíme expanzní součinitel $\varepsilon = 1$ jak u plynů, tak i u kapalin. V tomto důsledku se nepatrně změní rovnice (7) na následující tvar (8) [2, 3]:

$$Q_v = \alpha \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

Vypočteme minimální hodnotu Reynoldsova čísla Re_{Dmin} pro plyny z rovnice (9).

$$Re_{Dmin} = \frac{D \cdot w_{min}}{\nu_1} = 1,273 \cdot \frac{Q_v \cdot \rho_1}{D \cdot \eta_1} \quad (9)$$

Hodnotu dynamické viskozity η_1 určíme z nomogramů, které jsou součástí příloh bakalářské práce. Aby hodnota průtokového součinitele α byla stála i při minimálním průtoku Q_{min} , zvolíme vypočtenou hodnotu Reynoldsova čísla Re_{Dmin} rovnu hodnotě hraničního Reynoldsova čísla pro zvolený škrťací orgán. Z nomogramů v přílohách zvolíme pro hraniční hodnotu Re_{Dhr} hodnoty poměrného zúžení β^2 a průtokového součinitele α , respektive jejich součin $\alpha \cdot \beta^2$. [2, 3]

Pro zjištěné hodnoty $\alpha \cdot \beta^2$ vypočítáme maximální tlakový rozdíl $(p_1 - p_2)_{max}$ na škrťacím orgánu. Tuto hodnotu dále upravíme dle standardních rozsahů snímače tlakové difference. Výpočet maximálního tlakového rozdílu popisuje rovnice (10).

$$\sqrt{\Delta p_{max}} = \frac{4 \cdot Q_{v_{max}} \cdot \sqrt{\rho_1}}{\alpha \cdot \beta^2 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{Q_{v_{max}} \cdot \sqrt{\rho_1}}{1,111 \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot D^2} \quad (10)$$

4.4.2 Druhá fáze – konečný návrh

S ohledem na skutečnost, že budeme měřit průtok vzduchu, je nutné pro upravený tlakový rozdíl $p_1 - p_2$ stanovit expanzní součinitel ε z nomogramu v přílohách. Velikost $(p_1 - p_2)_\varepsilon$ pro stanovení hodnoty expanzního součinitele ε se volí přibližně (11).

$$(p_1 - p_2)_\varepsilon \cong 0,5 \cdot (p_1 - p_2) \quad (11)$$

Pro vypočítanou hodnotu $\alpha \cdot \beta^2$ určíme poměrné zúžení β^2 a z něj přesný průměr vnitřního otvoru škrťacího orgánu. Pro vypočítání hodnoty $\alpha \cdot \beta^2$ budeme vycházet z rovnice (12). Do rovnice dosazujeme průtok Q_v [$m^3 \cdot h^{-1}$] a průměr D [mm].

$$\beta^2 \cdot \alpha = \frac{Q_{max} \cdot \sqrt{\rho_1}}{0,004 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)}} \quad (12)$$

Přesný průměr vnitřního otvoru škrťacího orgánu [mm] potom zjistíme ze vztahu (13).

$$d = \beta \cdot D \quad (13)$$

Dále je nutné do výpočtu zahrnout korekční součinitele. V našem případě korekční součinitele k_1 průtoku α respektive C clony na vliv viskozity a korekční součinitel k_2 pro α respektive C clony na drsnost potrubí. Hodnoty korekčních součinitelů nalezneme v nomogramech.

4.4.3 Reálný výpočet clony

Pro výpočet clony je nutné dosadit hustotu vzduchu, která je závislá na teplotě a aktuálním atmosférickém tlaku. Hodnoty, které vybíráme z tabulek jsou dosazovány pro teplotu $t = 20^{\circ}\text{C}$, atmosférický tlak $p = 101\,325\text{ Pa}$. Do výpočtů budeme dosazovat následující hodnoty:

- Objemový průtok – $Q_v = 0,05\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
- Dynamická viskozita vzduchu při 20°C – $\eta_{20} = 18,2 \cdot 10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{s}$
- Atmosférický tlak – $p = 101\,325\text{ Pa}$
- Teplota – $t = 20^{\circ}\text{C}$
- Hustota vzduchu při 20°C – $\rho = 1,205\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Průměr potrubí – $D = 0,072\text{ m}$
- Poissonova konstanta pro vzduch – $\kappa = 1,41$

Nejprve vypočítáme hodnotu Reynoldsova čísla, dosadíme naše hodnoty do rovnice (9)

$$\begin{aligned}\text{Re}_{D\min} &= \frac{D \cdot w_{\min}}{\nu_1} = 1,273 \cdot \frac{Q_v \cdot \rho_1}{D \cdot \eta_1} \\ \text{Re}_{D\min} &= 1,273 \cdot \frac{0,05 \cdot 1,205}{0,072 \cdot 18,2 \cdot 10^{-6}} \\ \text{Re}_{D\min} &= 58530,41\end{aligned}\tag{9}$$

Z nomogramu pro výpočet normalizované clony určíme hodnoty α a β^2 na následující:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,612 \\ \beta^2 &= 0,185\end{aligned}$$

Následně vypočítáme maximální tlakovou diferenci Δp na škrtícím orgánu. Hodnoty dosazujeme do rovnice (10).

$$\begin{aligned}\sqrt{\Delta p_{\max}} &= \frac{4 \cdot Q_{v\max} \cdot \sqrt{\rho_1}}{\alpha \cdot \beta^2 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{Q_{v\max} \cdot \sqrt{\rho_1}}{1,111 \cdot \alpha \cdot \beta^2 \cdot D^2} \\ \sqrt{\Delta p_{\max}} &= \frac{0,05 \cdot \sqrt{1,205}}{1,111 \cdot 0,612 \cdot 0,185 \cdot 0,072^2} \\ \sqrt{\Delta p_{\max}} &= 84,17 \\ \Delta p_{\max} &= 7084,72\text{ [Pa]}\end{aligned}\tag{10}$$

V dalším kroku výpočtu clony počítáme hodnotu $\alpha \cdot \beta^2$, ze které dále určíme hodnotu poměrného zúžení β^2 . Pro vypočítání hodnoty $\alpha \cdot \beta^2$ budeme vycházet z rovnice (12). Do rovnice dosazujeme průtok Q_v [$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$] a průměr D [mm]. Do rovnice je nutné

dosadit také expanzní součinitel ε , který určíme z nomogramu pro určování expanzního součinitele. Pro naše hodnoty má expanzní součinitel hodnotu $\varepsilon = 0,98$

$$\begin{aligned}\beta^2 \cdot \alpha &= \frac{Q_{\max} \cdot \sqrt{\rho_1}}{0,004 \cdot D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)}} \\ \beta^2 \cdot \alpha &= \frac{180 \cdot \sqrt{1,205}}{0,004 \cdot 72^2 \cdot 0,98 \cdot \sqrt{7084,72}} \\ \beta^2 \cdot \alpha &= 0,1155\end{aligned}\tag{12}$$

Do výpočtů škrtícího orgánu je třeba zakomponovat korekční součinitele, které korigují případné odchylky od ideálního stavu. Z grafů nalezneme korekční součinitele k_1 a k_2 a vypočítáme hodnoty α^* a β^{2*} , které jsou ošetřeny korekcemi. Pro naše hodnoty nacházíme korekční součinitele $k_1 = 1,01$ a $k_2 = 1,05$ [2, přílohy č.29 a č.30]

Určíme hodnoty α^* a β^{2*} z rovnice (13)

$$\begin{aligned}\alpha^* \cdot \beta^{2*} &= \frac{\alpha \cdot \beta^2}{\varepsilon} \\ \alpha^* \cdot \beta^{2*} &= \frac{0,612 \cdot 0,185}{0,98} \\ \alpha^* \cdot \beta^{2*} &= 0,1158\end{aligned}\tag{13}$$

Hodnotě $\alpha^* \cdot \beta^{2*}$, odpovídají:

$$\begin{aligned}\alpha^* &= 0,613 \\ \beta^{2*} &= 0,189\end{aligned}$$

Výpočet úhrnného součinitele (14)

$$\begin{aligned}\alpha^+ &= \alpha^* \cdot k_1 \cdot k_2 \\ \alpha^+ &= 0,613 \cdot 1,01 \cdot 1,05 \\ \alpha^+ &= 0,65\end{aligned}\tag{14}$$

Skutečné zúžení má potom hodnotu (15)

$$\begin{aligned}\beta^{2+} &= \frac{\alpha^* \cdot \beta^{2*}}{\alpha^+} \\ \beta^{2+} &= \frac{0,613 \cdot 0,189}{0,65} \\ \beta^{2+} &= 0,178\end{aligned}\tag{15}$$

V následujícím kroku určíme přesný průměr vnitřního otvoru škrťacího orgánu – clony, vycházíme z rovnice (16)

$$\begin{aligned}d &= \beta^+ . D \\d &= \sqrt{0,178} . 0,072 \\d &= 0,03037 [m] \\d &= 30,37 [mm]\end{aligned}\tag{16}$$

Z důvodu vyrobitelnosti vnitřního otvoru prvního škrťacího orgánu jsme rozměr přeúčili na hodnotu $d = 30,5$ mm.

Již v popisu jednotlivých komponent modelu průtokoměru s clonou bylo zmíněno, že byly vyrobeny celkem clony dvě. Druhou clonu jsme navrhovali z důvodu obav, že tlaková diference na škrťacím orgánu s první clonou by mohla přesáhnout rozsah měřicího snímače tlakové diference. Druhá clona byla počítána na maximální tlakový rozdíl na škrťacím orgánu a to na hodnotu $\Delta p_{max} = 5000$ Pa. Výpočet provádíme z rovnice pro výpočet $\alpha \cdot \beta^2$, (12).

Výpočet druhé clony, pro $\Delta p = 5000$ Pa

$$\begin{aligned}\beta^2 . \alpha &= \frac{Q_{max} \cdot \sqrt{\rho_1}}{0,004 . D^2 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{(p_1 - p_2)}} \\ \beta^2 . \alpha &= \frac{180 \cdot \sqrt{1,205}}{0,004 . 72^2 \cdot 0,98 \cdot \sqrt{5000}} \\ \beta^2 . \alpha &= 0,1375\end{aligned}\tag{12}$$

Do výpočtu opět zahrneme korekční součinitele $k_1 = 1,01$ a $k_2 = 1,05$ a v následném kroku přistoupíme k určení přesného průměru vnitřního otvoru druhého navrhovaného škrťacího orgánu, při kterém budeme vycházíme z rovnice (16).

Zahrneme korekční součinitele (13)

$$\begin{aligned}\alpha^* . \beta^{2*} &= \frac{\alpha . \beta^2}{\varepsilon} \\ \alpha^* . \beta^{2*} &= \frac{0,1375}{0,98} \\ \alpha^* . \beta^{2*} &= 0,1403\end{aligned}\tag{13}$$

Hodnotě $\alpha^* . \beta^{2*}$, odpovídají:

$$\begin{aligned}\alpha^* &= 0,619 \\ \beta^{2*} &= 0,227\end{aligned}$$

Výpočet úhrnného součinitele (14)

$$\begin{aligned}\alpha^+ &= \alpha^* \cdot k_1 \cdot k_2 \\ \alpha^+ &= 0,619 \cdot 1,01 \cdot 1,05 \\ \alpha^+ &= 0,656\end{aligned}\tag{14}$$

Skutečné zúžení má potom hodnotu (15)

$$\begin{aligned}\beta^{2+} &= \frac{\alpha^* \cdot \beta^{2*}}{\alpha^+} \\ \beta^{2+} &= \frac{0,619 \cdot 0,227}{0,656} \\ \beta^{2+} &= 0,214\end{aligned}\tag{15}$$

V následujícím kroku určíme přesný průměr vnitřního otvoru druhého navrhovaného škrtícího orgánu – clony, vycházíme z rovnice (16)

$$\begin{aligned}d &= \beta^+ \cdot D \\ d &= \sqrt{0,214} \cdot 0,072 \\ d &= 0,03331[m] \\ d &= 33,31[mm]\end{aligned}\tag{16}$$

Z důvodu vyrobiteľnosti vnitřního otvoru škrtícího orgánu jsme rozměr druhé clony, dimenzované pro maximální tlakový rozdíl na škrtícím orgánu $\Delta p = 5000$ Pa přeúčili na hodnotu $d = 35$ mm.

4.5 Kalibrace modelu

Abychom na modelu průtokoměru s clonou dosáhli co nejpřesnějších hodnot měření, bylo nutné model správně seřídít. Použitý snímač tlakové difference má v sobě zakomponovaný převodník tlaku na napětí, výstup z převodníku má lineární charakter.

Seřízení modelu jsme provedli s pomocí mikromanometru se sklopným ramenem, který jsme připojily na vývody z odběrů tlaků před a za škrtícím orgánem. Díky manometru jsme určili výšku vodního sloupce, která odpovídá různým výkonnostním stupňům sání vzduchu z trati, nastavených na vysavači. Zároveň jsme měřili výstupní napětí ze snímače tlakové difference. Na základě hodnot výšky vodního sloupce jsme provedli přepočet na tlak, dle rovnice (17). Poté jsme dali do závislosti vypočtený tlak na napětí vystupující ze snímače tlakové difference. Z této závislosti jsme určili polynom, který aproximoval naměřené hodnoty výšky hladiny vodního sloupce a výstupního napětí ze snímače tlakové difference.

Abychom dosáhli co nejpřesnější polynomu tak jsme kalibrační měření provedli celkem pětikrát, každé měření bylo zastoupeno devatenácti hodnotami. Poté bylo těchto

pět měření zprůměrováno a byl určen výsledný polynom. Jednotlivé hodnoty jsou uvedeny v tabulce č.4.

Po implementaci polynomu do vyhodnocující aplikace jsme prováděli kontrolní měření. Zkoumali jsme rozdílnost hodnot tlakové difference vypočtené na základě polynomu a tlaku vypočítaného na základě změřené výšky vodního sloupce. Provedli jsme 30 kontrolních měření, které potvrdili, že vypočtený polynom dostatečně dobře popisuje závislost tlakové difference na výstupním napětí z tlakového snímače.

Pro přepočtení výšky hladiny vodního sloupce – milimetrů odečtených pomocí hladiny kapaliny mikromanometru na tlakový rozdíl, jsme vycházeli ze vztahu (14).

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad (17)$$

Při kalibračních měřeních byla teplota v laboratoři 22°C, proto jsme dosazovali hodnotu hustoty vody $\rho_{22} = 997,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Za hodnotu gravitačního zrychlení jsme dosazovali hodnotu $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Rovnici přímky, která aproximuje závislost tlakového rozdílu na škrťícím orgánu na výstupním napětí ze snímače tlakové difference je popsána rovnicí (18).

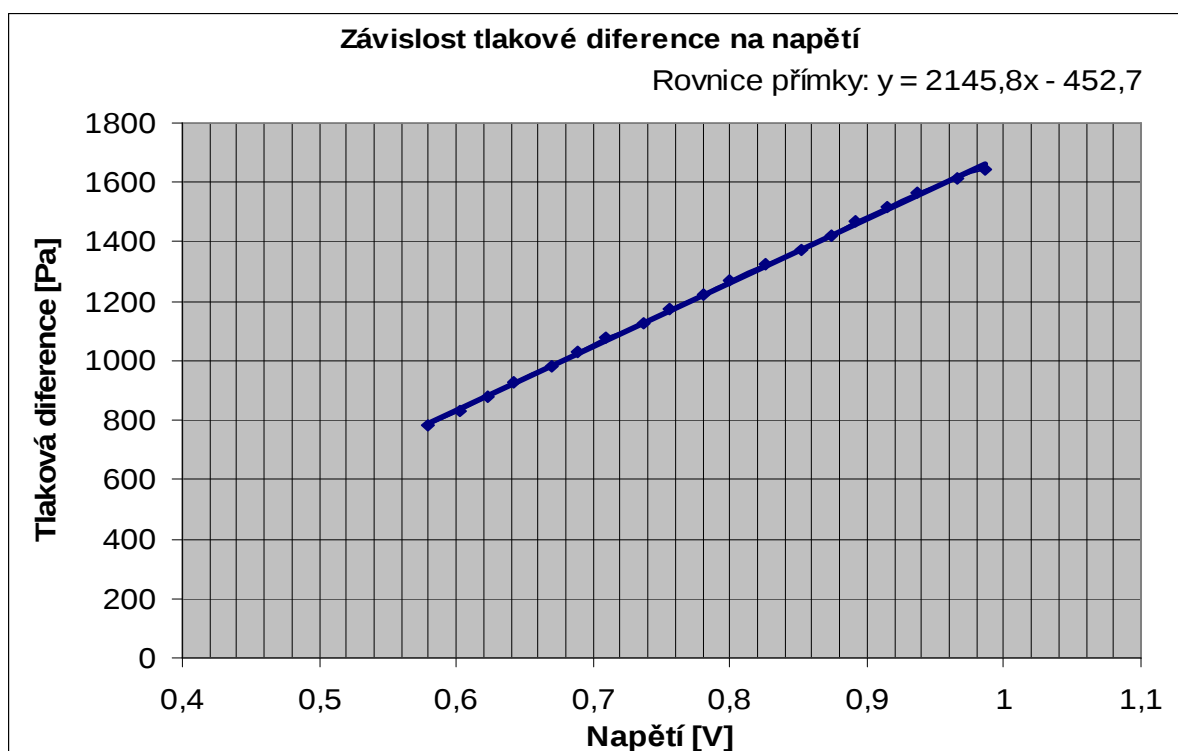
$$y = 2145,8x - 452,7 \quad (18)$$

S ohledem na výměnu zdroje proudění vzduchu v clonové trati z původního ventilátoru na vysavač, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3., dosahujeme jistého tlakového výstupu, nicméně objemový průtok Q_v je oproti ventilátoru poloviční. To však bylo zjištěno až při reálném zapojení trati, proto jsme také nepřepočítávali rozměry již vyrobeného clonového kotouče, také je to důvod, proč v praktickém ukázkovém měření výstupní tlaková difference nedosahuje původně kalkulované hodnoty 5kPa.

Tabulka č.4 – Naměřené hodnoty kalibračních měření

Výška hladiny [mm]	Napětí [V]						Tlak [Pa]
	1.měření	2.měření	3.měření	4.měření	5.měření	Průměr napětí [V]	
80	0,565	0,577	0,586	0,584	0,582	0,579	783,07
85	0,592	0,608	0,602	0,609	0,606	0,603	832,02
90	0,613	0,622	0,626	0,625	0,628	0,623	880,96
95	0,636	0,646	0,644	0,643	0,638	0,641	929,90
100	0,658	0,677	0,662	0,668	0,681	0,669	978,84
105	0,686	0,688	0,686	0,689	0,693	0,688	1027,78
110	0,702	0,705	0,707	0,714	0,718	0,709	1076,73
115	0,726	0,744	0,732	0,739	0,740	0,736	1125,67
120	0,754	0,766	0,754	0,751	0,755	0,756	1174,61
125	0,774	0,786	0,773	0,792	0,779	0,781	1223,55
130	0,796	0,806	0,797	0,805	0,797	0,800	1272,49
135	0,815	0,827	0,819	0,837	0,828	0,825	1321,44
140	0,842	0,852	0,848	0,865	0,854	0,852	1370,38
145	0,862	0,885	0,877	0,874	0,869	0,873	1419,32
150	0,885	0,888	0,888	0,893	0,905	0,892	1468,26
155	0,903	0,915	0,918	0,921	0,919	0,915	1517,20
160	0,926	0,938	0,941	0,944	0,935	0,937	1566,15
165	0,956	0,964	0,963	0,971	0,974	0,966	1615,09
168	0,977	0,982	0,992	0,997	0,985	0,987	1644,45

Graf č.1 – Závislost tlakové difference na napětí



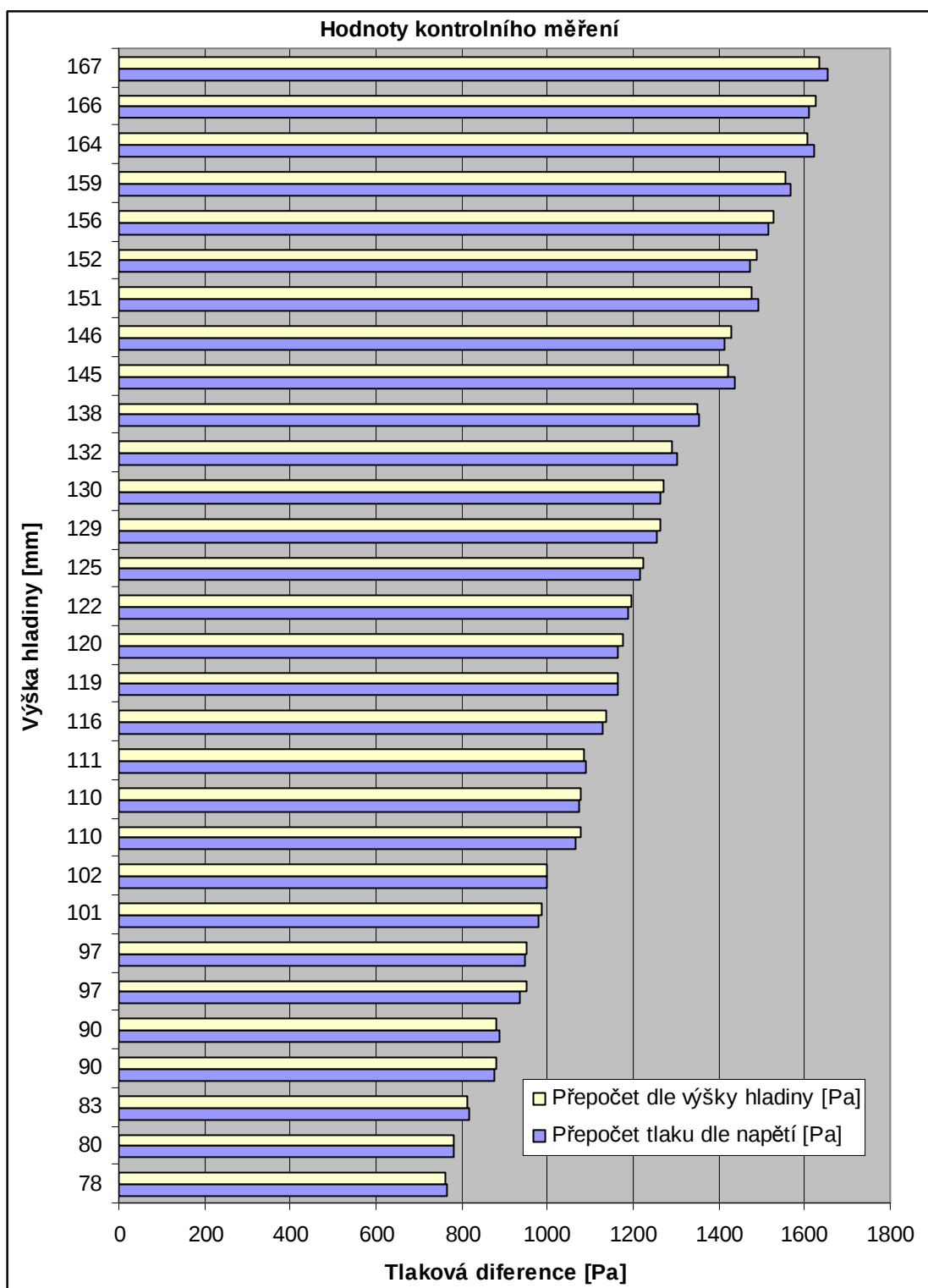
Tabulka č.5 – Rozdílnost hodnot tlakové difference při kontrolním měření

Napětí [V]	Přepočet tlaku dle napětí [Pa]	Výška hladiny [mm]	Přepočet dle výšky hladiny [Pa]	Rozdílnost výpočtů [Pa]
0,568	766,11	78	763,50	-2,62
0,576	783,28	80	783,07	-0,21
0,592	817,61	83	812,44	-5,17
0,619	875,55	90	880,96	5,41
0,625	888,43	90	880,96	-7,47
0,647	935,63	97	949,48	13,84
0,653	948,51	97	949,48	0,97
0,667	978,55	101	988,63	10,08
0,676	997,86	102	998,42	0,56
0,708	1066,53	110	1076,73	10,20
0,712	1075,11	110	1076,73	1,62
0,718	1087,98	111	1086,51	-1,47
0,737	1128,75	116	1135,46	6,70
0,753	1163,09	119	1164,82	1,73
0,754	1165,23	120	1174,61	9,38
0,765	1188,84	122	1194,19	5,35
0,778	1216,73	125	1223,55	6,82
0,796	1255,36	129	1262,71	7,35
0,800	1263,94	130	1272,49	8,55
0,818	1302,56	132	1292,07	-10,49
0,842	1354,06	138	1350,80	-3,26
0,880	1435,60	145	1419,32	-16,28
0,870	1414,15	146	1429,11	14,96
0,906	1491,39	151	1478,05	-13,34
0,898	1474,23	152	1487,84	13,61
0,917	1515,00	156	1526,99	11,99
0,941	1566,50	159	1556,36	-10,14
0,967	1622,29	164	1605,30	-16,99
0,962	1611,56	166	1624,88	13,32
0,981	1652,33	167	1634,67	-17,66

Z výše uvedené tabulky kontrolního měření vyplývá, že maximální rozdíl hodnot tlakové difference na škrťacím orgánu byl roven hodnotě 17,66 Pa. Kdy hodnota tlaku, vypočítaná dle polynomu (18) je o 17,66 Pa nižší než hodnota tlaku vypočtená v závislosti na rovnici (17).

Odchylka v hodnotách tlaků o velikosti 17,66 Pa odpovídá odchylce hodnot výšky vodního sloupce o 1,8 mm. S ohledem na cejchování mikromanometru, který má stupnici dělenou po 1 mm a skutečnost, že již při samotné kalibraci mohlo dojít k malé odchylce při odečítání výšky vodního sloupce, je hodnota maximální odchylky uspokojivá a můžeme konstatovat, že se nám povedlo model průtokoměru s clonou úspěšně zkalibrovat.

Graf č.2 – Rozdílnost hodnot tlakové difference při kontrolním měření



5 NÁVOD NA OBSUHU MODELU

Aby mohl navržený model průtokoměru s clonou být vhodně užíván ve výuce k měření, je nutné se s ním seznámit, zjistit všechny jeho funkce. Proto byl vytvořen názorný návod na obsluhu pracoviště.

5.1 Návod na obsluhu

1. Připojte vysavač do elektrické sítě a nastavte jeho výkon na nejnižší hodnotu. Pokud není připojena sací hadice k clonové trati – připojíme.
2. Pro napájení snímače tlakové difference jej připojte ke zdroj stabilizovaného napětí o hodnotě $5V_{ss}$
3. Zapněte počítač a připojte k němu přes rozhraní USB vstupně/výstupní jednotku DataLab IO² a zkontrolujte zapojení kanálů, dle schématu.
4. Přivolejte vyučujícího, aby vám zkontroloval zapojení modelu, po jeho odsouhlasení můžete začít měřit průtok vzduchu.
5. V počítači spusťte aplikaci pro měření průtoku vzduchu clonou v Control Webu, pomocí tlačítka „spustit aplikaci“ spustíte aplikaci k měření.
6. Zjistěte aktuální teplotu a atmosférický tlak v laboratoři a na základě těchto hodnot určete hustotu vzduchu z tabulky na záložce „*Hustota vzduchu*“. Tuto hodnotu vepište na záložce „*Aktuální měření*“ do příslušné kolonky.
7. Zapněte vysavač na nejnižší výkonnostní stupeň označený „min“, počkejte než se hodnota průtoku vzduchu ustálí a stisknutím tlačítka „*Zapsat hodnoty*“ provedte záznam hodnot do tabulky.
8. Postupujte po jednotlivých výkonnostních dílcích vyznačených na vysavači až po maximální výkon, v každém výkonnostním kroku provedte zápis naměřených hodnot do tabulky.
9. Na záložce „*Protokol*“ provedte zápis jména a příjmení, studijní skupiny, aktuálního tlaku a teploty v laboratoři a závěru, který vyplývá z uskutečněného měření tak, že je vepíšete do příslušných kolonek a zmáčknete tlačítko „*zapsat hodnoty do protokolu*“.
10. Na záložce „*Uložit protokol*“ uložte protokol a aplikaci ukončete tlačítkem „*Konec programu*“.

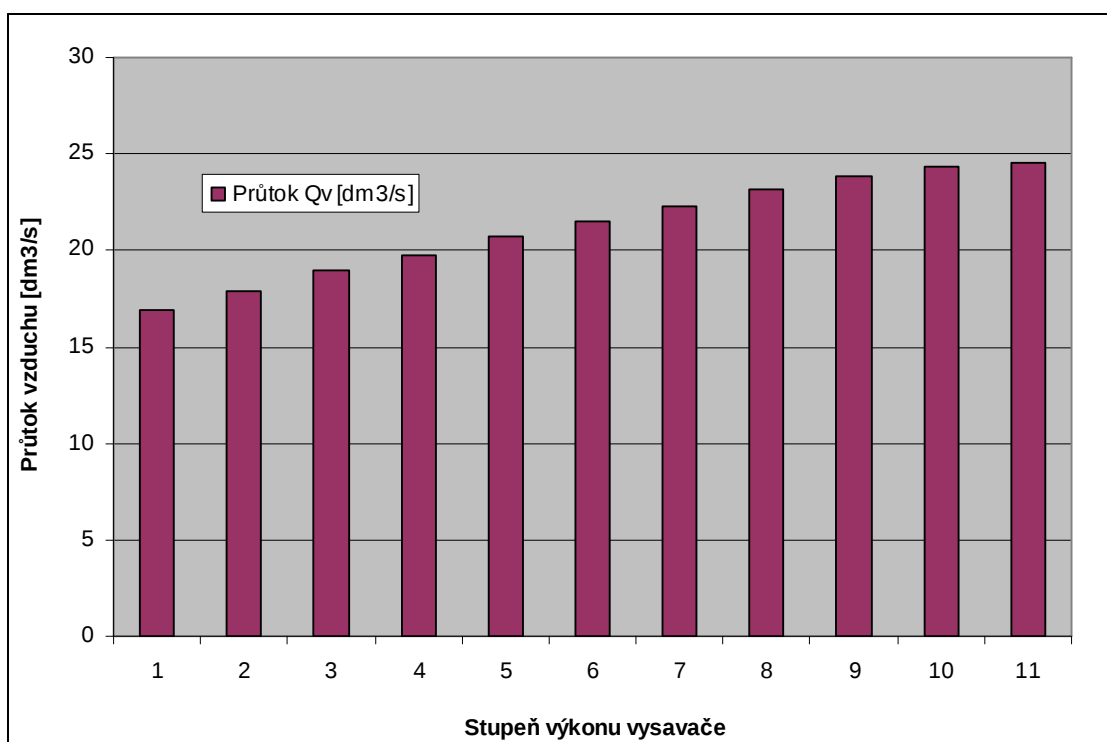
5.2 Ukázkové měření

Při měření se do tabulky zapisují hodnoty tlakové difference na škrťícím orgánu, průtok vzduchu a výstupní napětí ze snímače tlakové difference. Z těchto hodnot se automaticky vykreslují grafy – závislost průtoku vzduchu na stupni výkonu vysavače a závislost průtoku vzduchu na tlakové diferenci.

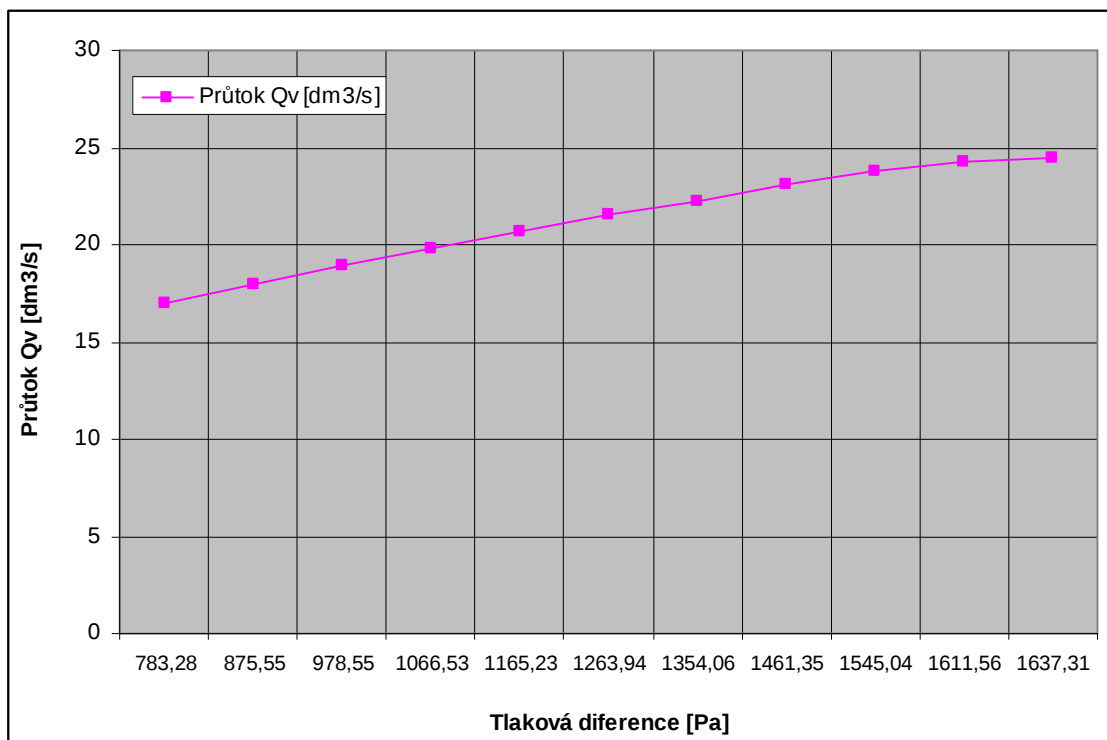
Tabulka č.6 – Tabulka naměřených hodnot

Číslo měření	Výkon vysavače	Tlaková difference [Pa]	Průtok Qv [dm ³ /s]	Napětí [V]
1	min	783,28	16,95	0,576
2	1	875,55	17,92	0,619
3	2	978,55	18,94	0,667
4	3	1066,53	19,78	0,708
5	4	1165,23	20,67	0,754
6	5	1263,94	21,53	0,8
7	6	1354,06	22,28	0,842
8	7	1461,35	23,15	0,892
9	8	1545,04	23,8	0,931
10	9	1611,56	24,31	0,962
11	max	1637,31	24,5	0,974

Graf č.3 – Závislost průtoku vzduchu na stupni výkonu vysavače, graf z měření



Graf č.4 – Závislost průtoku vzduchu na tlakové diferenci, graf z měření



ZÁVĚR

Všechny cíle, kladené v zadání bakalářské práce byly splněny v požadovaném rozsahu. Jako největší úskalí modelu clonového průtokoměru se ukázal axiální ventilátor MEZAXIAL 4142, se kterým jsme původně počítali jako se zdrojem proudění vzduchu. Na průtok tohoto ventilátoru, $Q_v = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$, také byly spočítány a následně vyrobeny obě clony. Dle technických specifikací, uvedených výrobcem tohoto ventilátoru, měl ventilátor bez problémů poskytovat dostatečnou tlakovou diferenci na škrťicím orgánu při proudění vzduchu v trati o délce 2 m. Avšak na této délce trati při zapojení všech komponent byl průtok vzduchu téměř roven nule. Proto jsme přistoupili ke zkrácení trati clonového průtokoměru. Trať jsme zkrátili na nejmenší možnou délku, dle ČSN EN ISO 5167-2, která ošetřuje měření průtoku škrťicími orgány, na délku desetinásobku průměru potrubí před clonou, a pětinásobku průměru za clonou. Původní model přitom počítal s dvěma stejně dlouhými částmi o délce desetinásobku průměru potrubí. Ukázalo se však, že i toto výrazné zkrácení trati nemělo takřka žádný efekt, jelikož se tlaková diference pouze minimálně navýšila. Ventilátor je odtahový bez přetlaku – nepřidává do systému tlak, proto jsme museli přistoupit k dalšímu kroku, kterým byla náhrada zdroje proudění za vysavač.

Místo ventilátoru, jsme do modelu připojili vysavač s výkonem 1250 W s možností regulace výkonu. Tento zdroj proudění již se ukázal jako dostatečný, a proto jsme mohli úspěšně zkalibrovat snímač tlakové difference, tak aby aplikace v Control Webu správně vyhodnocovala signál, který přichází do počítače.

Dle předchozích výpočtů byla trať dimenzována tak, aby bylo plně využito měřicí spektrum snímače tlakové difference (0 až 5 kPa), avšak po nahrazení původního zdroje proudění vysavačem, jsme se dostali na maximum tlaku, které bylo rovno přibližně jedné polovině měřicího rozsahu snímače, proto také v praktickém ukázkovém měření výstupní tlaková diference nedosahuje původně navržené hodnoty 5 kPa.

Navzdory těmto skutečnostem můžeme říci, že je tento model průtokoměru s clonou plně funkční a jeví se jako vhodný nástroj pro přiblížení problematiky měření průtoku vzduchu studentům v laboratorním prostředí. K realizované úloze je také připojen návod na obsluhu pracoviště, včetně vzorového protokolu o měření.

V budoucnu by bylo vhodné model doplnit ještě výkonnějším zdrojem proudění – ventilátorem, který by měl nejenom vhodnou hodnotu průtoku vzduchu Q_v , ale také vhodnou hodnotu přidělovaného tlaku do systému, aby bylo dosaženo bezproblémového proudění vzduchu v celé délce trati. Výkon ventilátoru by měl poskytovat dostatečné proudění vzduchu, abychom mohli využít snímač tlakové difference v celém jeho rozsahu, tedy 0 až 10 kPa. Jako možným zdrojem, který by splňoval výše uvedené podmínky můžeme zmínit ventilátor od firmy KARS, spol. s r.o., model CK 150 C. Specifikace tohoto modelu ventilátoru je jako příloha č.2 součástí této bakalářské práce.

Seznam použité literatury

- [1] ĎAĎO, S.; BEJČEK, L.; PLATIL, A. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha : Nakladatelství BEN, 1.vydání, 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X
- [2] SLÁDEK, Z.; VDOLEČEK, F. *Technická měření – cvičení*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1. vydání, 1989. 75 s. ISBN 80-214-1059-0
- [3] JENČÍK, J.; VOLF, J. *Technická měření* : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6
- [4] KADLEC K. *Automa : Snímače průtoku – Principy, vlastnosti a použití (část 1)*. [online PDF dokument]. Číslo 10/2006. [cit. 20.12. 2010].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100605.pdf>
- [5] KADLEC K. *Automa : Snímače průtoku – Principy, vlastnosti a použití (část 2)*. [online PDF dokument]. Číslo 11/2006. [cit. 22.12. 2010].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au110624.pdf>
- [6] KADLEC K. *Automa : Snímače průtoku – Principy, vlastnosti a použití (část 3)*. [online PDF dokument]. Číslo 12/2006. [cit. 28.12. 2010].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au120630.pdf>
- [7] MACHAČ, J. *C1 - Měření průtoku vzduchu normovanou Venturiho dýzou*. – Podpurný text VŠCHT Praha. [online PDF dokument]. 17 s. [cit. 1.4.2011]. Dostupné z: http://eso.vscht.cz/cache_data/1396/www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/machacj/docs/C1.pdf
- [8] ČSN EN ISO 5167-2. *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu – část 2: Clony*. Praha : Český normalizační institut, Listopad 2003. 52 s.
- [9] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *Data Sheet : Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated*. [online PDF dokument]. 2009. 23 s. [cit. 5.4. 2011]. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5010.pdf
- [10] ORLÍKOVÁ, S. *Měření průtoků tekutin – principy průtokoměrů* [online]. [cit. 22.12.2010]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy-prutokomeru>
- [11] ATAS ELEKTROMOTORY. *Axiální ventilátor MEZAXIAL - technická dokumentace*. [online PDF dokument]. [cit. 5.4.2011]. Dostupné z: <http://www.atas.cz/files/MEZAXIAL3140.pdf>

[12] KARS, SPOL. S.R.O. *Ventilátory potrubní, model CK – technická specifikace* [online PDF dokument]. [cit. 10.5.2011]. Dostupné z:
<http://www.kars-brno.cz/FileDownload.aspx?file=3200145.pdf>

[13] MORAVSKÉ PŘÍSTROJE, A.S. DataLab IO manuál [online PDF dokument].
[cit. 10.5.2011]. Dostupné z:
<http://www.mii.cz/download/datalab/cze/DataLab%20IO%20Manual.pdf>

Přílohy

Příloha č.1 – Schéma snímače tlakové difference MPX5010DP, [9]

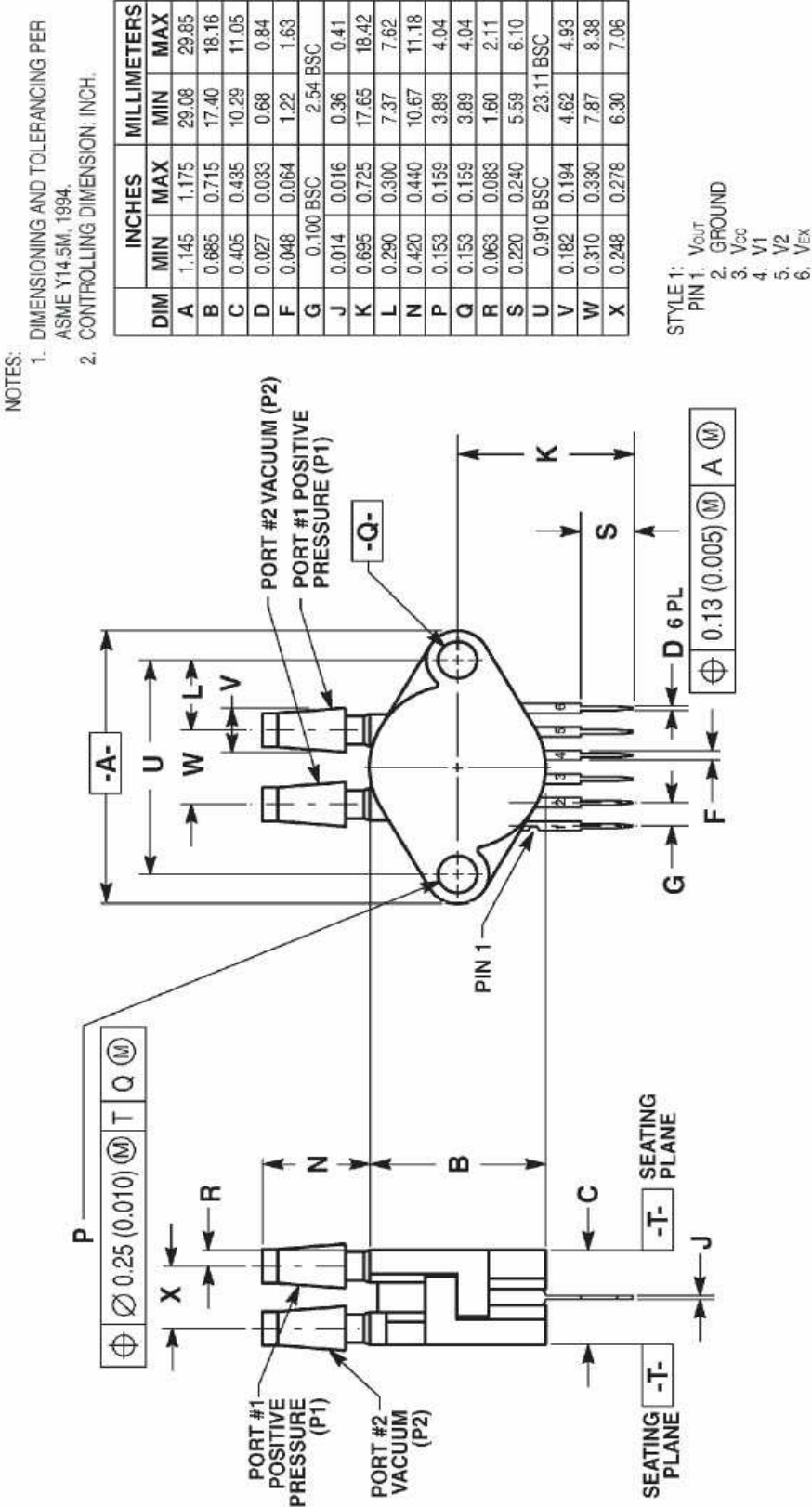
Příloha č.2 – Technická specifikace ventilátoru KARS CK 150C, [12]

Příloha č.3 – Prostředí aplikace pro měření průtoku clonou

Příloha č.4 – Nomogramy pro výpočet normalizované clony, [3]

Příloha č.5 – CD s aplikací pro měření průtoku vzduchu, včetně zdrojového kódu

Příloha č.1 – Schéma snímače tlakové difference MPX5010D, [9]



Příloha č.2 – Technická specifikace ventilátoru KARS CK 150C, , [12]



CK

PODMÍNKY PROVOZU

Ventilátor je vhodný pro použití v kruhových vzduchotechnických rozvodech větších délek. Ventilátor je určen pro dopravu čistého vzduchu bez prachu, mastnot, výparů chemikálií a dalších znečištění.

SKŘÍŇ

Tuhý plášť z pozinkované oceli.

OBĚŽNÉ KOLO

Oběžné kolo má zpětně zakřivené lopatky a je staticky a dynamicky vyváжено. Materiál je kombinací pozinkované oceli a plastu. Rozsah pracovních teplot viz tabulka.

MOTOR

Asynchronní motor se stíněnou kotvou nakrátko. Vnější rotor je uložen v kuličkových ložiskách s tukovou náplní na celou dobu životnosti. Tepelná ochrana přímo v motoru. Rozsah pracovních teplot viz tabulka. Napájení 230 V/50 Hz. Krytí IP44.

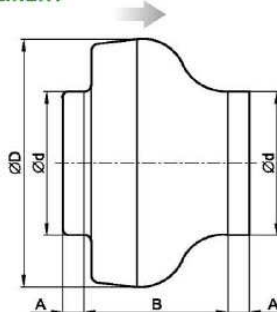
ELEKTRICKÁ SVORKOVNICE

Skříňka z plastu je umístěna na plášti ventilátoru. Krytí IP55.

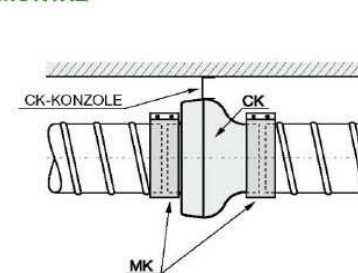
INSTALACE

Snadná a rychlá instalace pomocí montážní desky v jakékoli poloze.

ROZMĚRY

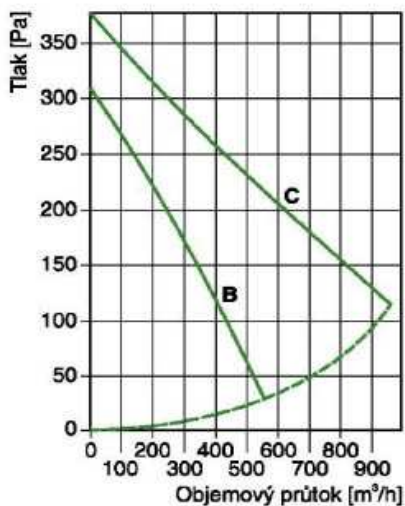


MONTÁŽ



Typ	Rozměry [mm]				Příkon [W]	Proud [A]	Otačky [1/min]	Teplota [°C]	Hmotnost [kg]
	A	B	Ød	ØD					
CK100A	25	154	100	237	65	0,29	2670	80	2,9
CK100C	20	146	100	242	70	0,32	2460	70	2,9
CK125A	25	143	125	237	65	0,28	2525	80	2,9
CK125C	20	150	125	242	72	0,33	2360	70	2,9
CK150B	25	145	150	278	64	0,27	2550	70	3,2
CK150C	28	177	160	344	100	0,44	2480	65	4,3
CK160B	25	145	160	278	64	0,27	2550	70	3,2
CK160C	28	177	160	344	100	0,44	2480	65	4,3
CK200A	25	160	200	333	100	0,45	2500	60	4,6
CK200B	25	160	200	333	158	0,67	2530	60	5,1
CK250A	28	172	250	344	115	0,50	2580	60	4,6
CK250C	28,5	153	250	333	168	0,72	2445	60	5,3
CK315B	28	199	315	402	190	0,84	2465	50	6,1
CK315C	25	210	315	402	250	1,05	2550	60	6,5

CK150; CK160



Příloha č.3 – Prostředí aplikace pro měření průtoku clonou

Měření průtoku clonou

Aktuální měření | Hustota vzduchu | Grafy | Návod k obsluze | Protokol | Uložení | **Konec programu**

Aktuální měření

Hodnota hustoty vzduchu: kg/m³

Číslo měření	Výkon vysavače	Tlaková difference [Pa]	Průtok Q _v [dm ³ /s]	Napětí [V]
1	min			
2	1			
3	2			
4	3			
5	4			
6	5			
7	6			
8	7			
9	8			
10	9			
11	max			

Napětí [V]

Tlaková difference [Pa]

Průtok vzduchu [dm³/s]

Zapsat hodnoty



Parametry clony a trati:

$\alpha = 0,613$
 $\beta = 0,189$
 $D = 0,072 \text{ m}$

Rovnice pro výpočet průtoku vzduchu Q_v:

$$Q_v = \alpha \cdot \beta \cdot \varepsilon \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

Měření průtoku clonou

Aktuální měření | Hustota vzduchu | Grafy | Návod k obsluze | Protokol | Uložení | **Konec programu**

Hustota vzduchu

p [hPa]	840	860	880	900	920	940	960	980	1000
t [°C]									
10	1,033	1,058	1,083	1,107	1,132	1,156	1,181	1,206	1,230
11	1,030	1,054	1,079	1,103	1,128	1,152	1,177	1,201	1,226
12	1,026	1,051	1,075	1,099	1,124	1,148	1,173	1,197	1,222
13	1,023	1,047	1,071	1,096	1,120	1,144	1,169	1,193	1,217
14	1,019	1,043	1,068	1,092	1,116	1,140	1,165	1,189	1,213
15	1,015	1,040	1,064	1,088	1,112	1,136	1,161	1,185	1,209
16	1,012	1,036	1,060	1,084	1,108	1,132	1,157	1,181	1,205
17	1,008	1,032	1,057	1,081	1,105	1,129	1,153	1,177	1,201
18	1,005	1,029	1,053	1,077	1,101	1,125	1,149	1,173	1,196
19	1,002	1,025	1,049	1,073	1,097	1,121	1,145	1,169	1,192
20	0,998	1,022	1,046	1,069	1,093	1,117	1,141	1,165	1,188
21	0,995	1,018	1,042	1,066	1,090	1,113	1,137	1,161	1,184
22	0,991	1,015	1,049	1,062	1,086	1,109	1,133	1,157	1,180
23	0,988	1,012	1,035	1,059	1,082	1,106	1,129	1,153	1,176
24	0,985	1,008	1,032	1,055	1,079	1,102	1,125	1,149	1,172
25	0,981	1,005	1,028	1,052	1,075	1,098	1,122	1,145	1,168
26	0,978	1,001	1,025	1,048	1,071	1,095	1,118	1,141	1,164
27	0,975	0,998	1,021	1,045	1,068	1,091	1,114	1,137	1,160
28	0,972	0,995	1,018	1,041	1,064	1,087	1,110	1,134	1,157
29	0,968	0,991	1,015	1,038	1,061	1,084	1,107	1,130	1,153
30	0,956	0,988	1,011	1,034	1,057	1,080	1,103	1,126	1,149

Měření průtoku clonou

Aktuální měření | Hustota vzduchu | Grafy | **Návod k obsluze** | Protokol | Uložení | **Konec programu**

Návod k obsluze

- 1) Připojíme vysavač do elektrické sítě a nastavíme jeho hodnotu na nejnižší hodnotu. Pokud není připojena sací hadice k clonové trati - připojíme.
- 2) Zjistíme aktuální teplotu a atmosférický tlak v laboratoři a na základě těchto hodnot určíme hustotu vzduchu z tabulky na záložce "Hustota vzduchu". Tuto hodnotu vepíšeme na záložce "aktuální měření" do příslušné kolonky.
- 3) Zapneme vysavač na nejnižší výkonnostní stupně, označený min, počkejte až se hodnota průtoku vzduchu ustálí a stisknutím tlačítka "Zapsat hodnoty" provedte záznam naměřených hodnot do tabulky.
- 4) Postupujte po jednotlivých výkonnostních stupních vyznačených na vysavači až po maximální výkon, v každém výkonnostním stupni proveďte zápis hodnot do tabulky.
- 5) Z hodnot zapsaných v tabulce se automaticky vykreslí grafy, které jsou zobrazeny na záložce "Grafy" a také jsou součástí protokolu.
- 6) Na záložce "Protokol" proveďte zápis jména a příjmení, studijní skupiny, aktuálního tlaku a teploty v laboratoři a v závěru zhodnoťte měření. Data zapište do příslušných kolonek a stisknutím tlačítka "Zapsat hodnoty do protokolu" je uložte do protokolu.
- 7) Na záložce "Uložit protokol", uložte protokol a ukončete aplikaci tlačítkem "konec programu".

Měření průtoku clonou

Aktuální měření | Hustota vzduchu | Grafy | **Návod k obsluze** | **Protokol** | Uložení | **Konec programu**

Protokol a jeho náležitosti

Podmínky v laboratoři:

Jméno a příjmení: Teplota: °C

Studijní skupina: Tlak: hPa

Datum měření:

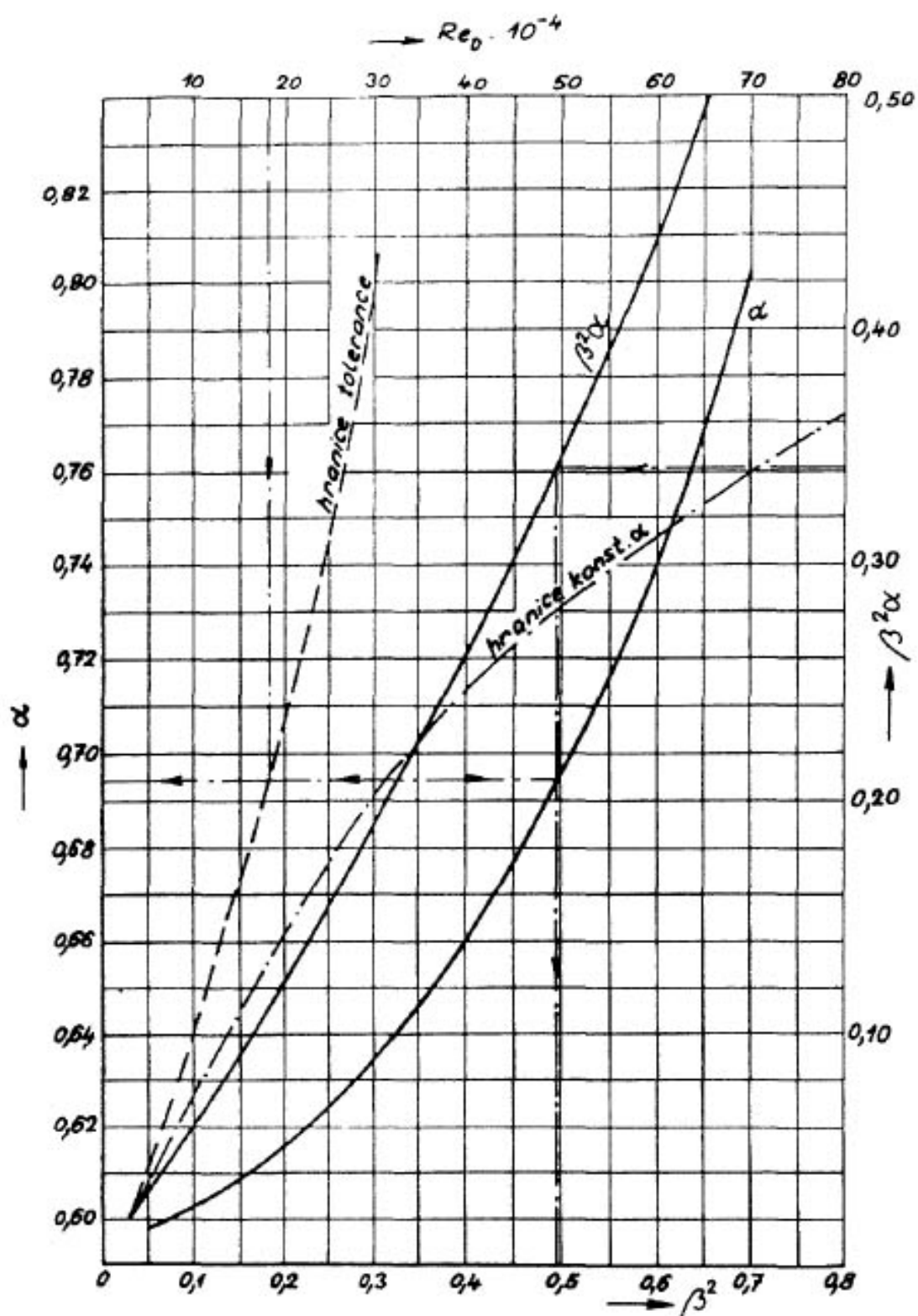
Závěr:

Měření průtoku vzduchu probíhalo bez komplikací. Můžeme konstatovat, že největší průtok vzduchu je při nastavení výkonnostního stupně vysavače na max. Při tomto nastavení výkonu vysavače je také největší tlaková diference na škrtkovém orgánu.

Zapsat hodnoty do protokolu

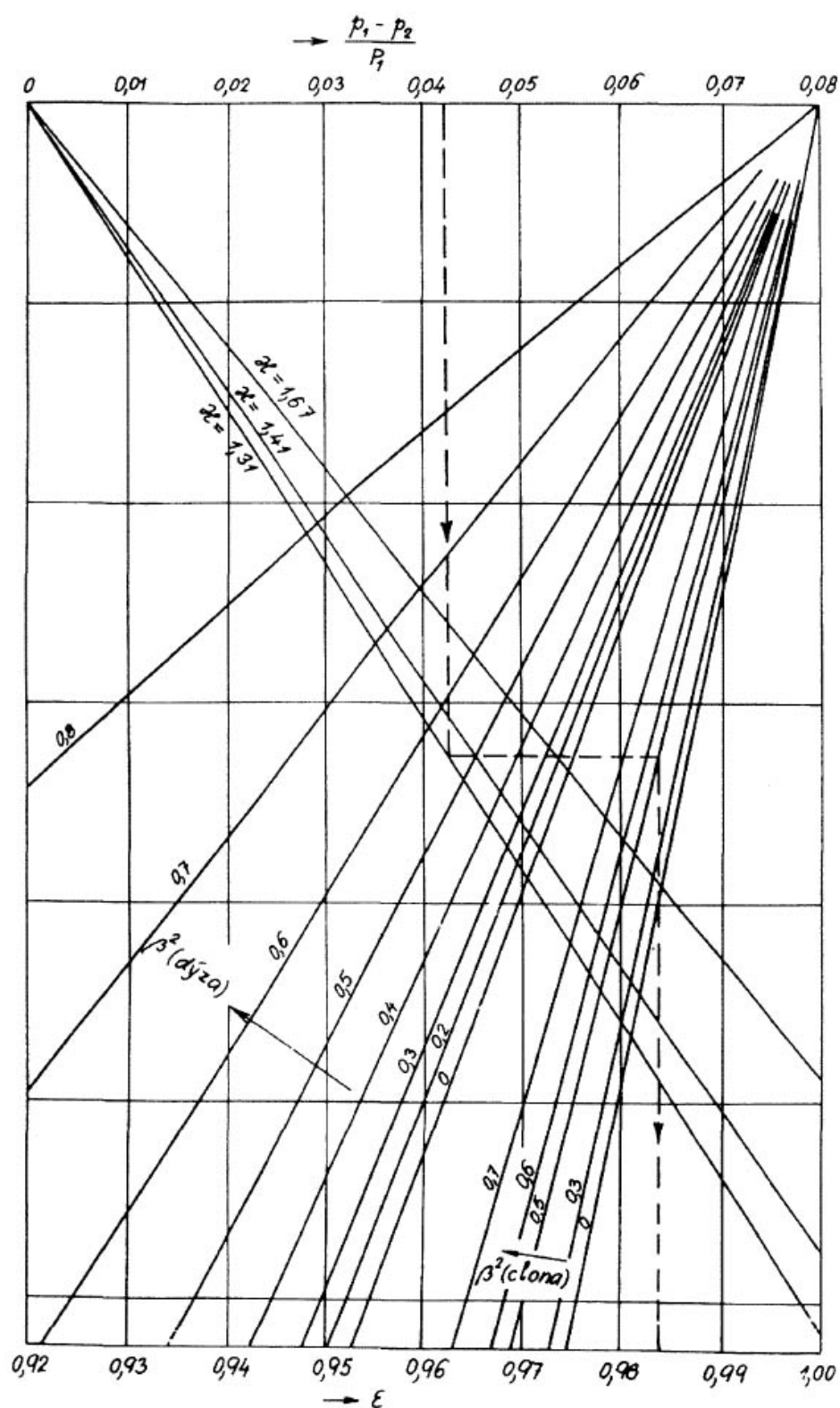


Příloha č.4 – Nomogramy pro výpočet normalizované clony, [3]



NOMOGRAM PRO URČENÍ EXPAZNÍHO SOUČiniteLE PRO

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 0,08$$



NOMOGRAM PRO URČENÍ EXPANZNÍHO SOUČINITELE PRO

$$\frac{p_1 - p_2}{p_1} > 0,08$$

