

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

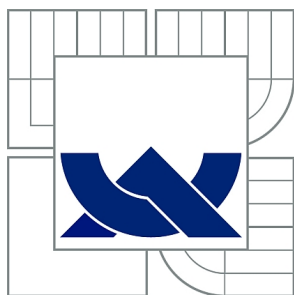
SOFTWARE VYBAVENÍ MĚŘICÍ TRATI

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

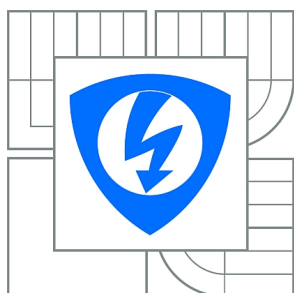
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. STANISLAV PIKULA

BRNO 2011



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

SOFTWAREOVÉ VYBAVENÍ MĚŘICÍ TRATI

SOFTWARE FOR MEASURING TRACK

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

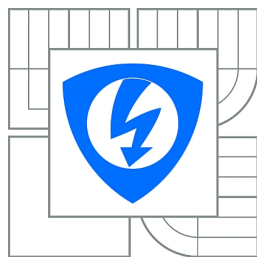
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. STANISLAV PIKULA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. SOŇA ŠEDIVÁ, Ph.D.

BRNO 2011



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. Stanislav Pikula

ID: 72935

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Softwarové vybavení měřicí trati

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Literární rešerše v oblasti měření průtoku vzduchu se zaměřením na škrtkové orgány a víceotvorové rychlostní sondy.
- 2) Navrhnout program v prostředí LabVIEW pro sběr naměřených dat z víceotvorové rychlostní sondy, normalizované clony a snímače teploty. Snímače jsou umístěny v měřicí trati pro testování víceotvorových rychlostních sond na ÚAMT.
- 3) Navržený měřicí systém má umožňovat sběr dat pomocí měřicí karty NI USB-6008, převod na dané fyzikální veličiny, výpočet koeficientu sondy z naměřených dat a zobrazení naměřených dat do tabulek a grafů. Dále má mít uživatel možnost uložení výsledků do souboru a tisk zprávy o měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] LIPTAK, B.G. - Instrument Engineers' Handbook: Process measurement and analysis. CRC Press, 2003. ISBN 9780849310836
- [2] ĎAĎO, S., KREIDL, M. - Senzory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [3] HAVLÍČEK, J., VLACH, J. a kol. - Začínáme s LabVIEW. BEN - technická literatura, Praha, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být 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.

ABSTRAKT

Diplomová práce shrnuje teorii měření průtoku snímači diferenčního tlaku, zejména normalizovanou clonou, a teorii týkající se měření víceotvorovou rychlostní sondou. Je stručně popsáno programovací prostředí LabVIEW a měřicí trať průtoku pro kterou byl vytvořen software. V práci je následně popsán návrh samotného programu a zejména jeho finální realizace. Program umožňuje sledování aktuálního dění na měřicí trati, ukládání dat do souboru, podrobnou analýzu zaznamenaných dat i vytvoření protokolu o měření. Hlavním cílem programu je určení koeficientu víceotvorové rychlostní sondy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Normalizovaná clona, víceotvorová rychlostní sonda, LabVIEW, měřicí trať, software, koeficient víceotvorové rychlostní sondy

ABSTRACT

The master's thesis summarizes the theory of flow measurement by differential pressure sensors, especially by Normalized Orifice, and summarizes theory concerning Averaging Pitot Tube. It is briefly described LabVIEW programming environment and flow measuring track for which the software was developed. The thesis describes creation of concept of program and in particular its final realization. The program provide observing actual events on measuring track, saving data to file, detail analysis of stored data and creation of measurement report. The main objective is to determine the Averaging Pitot Tube coefficient.

KEYWORDS

Normalized Orifice, Averaging Pitot Tube, LabVIEW, measuring track, software, Averaging Pitot Tube coefficient

PIKULA, Stanislav *Softwarové vybavení měřicí trati*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2011. 63 s. Vedoucí práce byla Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Softwarové vybavení měřicí trati“ 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....

(podpis autora)

OBSAH

1	Úvod	8
2	Měření průtoku	9
2.1	Princip rozdílů tlaků	9
2.2	Škrticí členy	11
2.3	Výpočet průtoku škrticím členem	13
2.4	Rychlostní sonda	17
3	Měřicí trať	20
3.1	Rychlostní sonda	20
3.2	Snímač teploty Pt100	21
3.3	Normalizovaná clona	21
4	LabVIEW	22
4.1	Programování	22
4.2	Komunikace s hardware	23
4.3	Prezentace dat	23
4.4	Další vlastnosti	23
5	Návrh měřicího software	24
5.1	Požadavky	24
5.2	Měřicí karta NI USB-6008	24
5.3	Rozvržení portů	25
5.4	Výpočty fyzikálních veličin	26
6	Realizace v LabVIEW	30
6.1	Rozvržení programu	30
6.1.1	Vnitřní struktura programu	32
6.2	Popis grafického prostředí	33
6.3	Ukládání do souboru	46
6.3.1	Ukládání samostatného nastavení	47
6.4	Vytvoření protokolu o měření	48
6.5	Ukázka analýzy dat	48
6.6	Import dat do Excelu	49
6.7	Prostor pro vylepšení	51
7	Závěr	52

Literatura	53
Seznam symbolů, veličin a zkratk	55
A Parametry normalizované clony	57
B Slovníček použitých pojmů	58
C Protokol o měření	61

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a realizací software pro měřicí trať průtoku přítomnou na ÚAMT FEKT VUT. Cílem vytvořeného programu je měření průtoku vzduchu v trati a zejména následné určování koeficientu víceotvorové rychlostní sondy. K jeho určení je použita přesná normalizovaná clona, která je považována za etalon.

Vytvořený software je realizován v prostředí LabVIEW. Aplikace sbírá data ze snímačů na měřicí trati pomocí zadané měřicí karty NI USB-6008 a získané hodnoty napětí přepočítává na fyzikální veličiny a vynáší je do grafů. Z naměřených dat program určuje jednak průtok, ale hlavně koeficient víceotvorové rychlostní sondy.

Součástí aplikace je záznam dat do souboru ve vhodném formátu i následná intuitivní a pohodlná analýza změřených dat. Součástí programu je také vytvoření protokolu o měření ve formátu HTML, který obsahuje všechna zdrojová data a může tedy sloužit jako plnohodnotná zpráva o provedeném měření či analýze dat.

2 MĚŘENÍ PRŮTOKU

Měření průtoku patří k nejčastějším měřením v průmyslu. Pro měření se používá velká šíře principů. Jednak se používají tradiční principy, zejména:

- škrticí orgány s měřením rozdílu tlaků,
- měření objemu,
- teplotní princip,
- turbíny,
- plováčky

a v posledních letech do tohoto odvětví více či méně výrazně zasahují nové metody, jako jsou:

- magneticko-indukční princip,
- měření ultrazvukem,
- využití Coriolisovy síly a
- využití vírů.

Na měřicí trati, pro kterou je úkolem navrhnout softwarové vybavení, se nalézají pouze snímače využívající diferenčního měření tlaku, proto se budu dále podrobně zabývat pouze tímto principem. Měřeným médiem je vzduch, ale protože teorie se zakládá na měření obecně tekutin, bude souhrn teorie popisovat obecně tekutiny s případnými poznámkami a doplněními pro případ měření plynů.

2.1 Princip rozdílů tlaků

Využití škrticích orgánů a měření diferenčních tlaků je stále uváděno jako velmi používaný princip měření průtoku. V minulosti byl vůbec nejpoužívanějším principem v průmyslu, ale dnes je na ústupu ve prospěch vírových, ultrazvukových a jiných principů, viz [14]. V následujících odstavcích bude popsána teorie na níž leží celé měření průtoku pomocí diferenčních tlaků. Naprostým základem je vztah, který popsal již v první polovině 18. století švýcarský fyzik Daniel Bernoulli.

Základní Bernoulliho rovnice

Tento vztah popisuje zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny. Vztah zní:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho u(h) = \text{konst.} \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

Kde

- ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota,
- v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost proudění,
- p [Pa] statický tlak a
- $u(h)$ gravitační potenciál (ve výšce h).

První člen v rovnici 2.1 reprezentuje kinetickou energii, druhý tlakovou potenciální energii a třetí výškový potenciál. Rovnice je často uváděna ve tvaru, kdy výškový potenciál je vyjádřen gravitační konstantou g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] a výškou nad povrchem h [m]:

$$\frac{\rho v^2}{2} + p + \rho gh = \text{konst.} \quad [\text{Pa}] \quad (2.2)$$

Tyto vzorce ovšem neplatí pouze pro ideální kapalinu, ale i v případě, kdy lze zanedbat ztráty způsobené třením (viskozitou). Například dle [6] lze používat neupravenou Bernoulliho rovnici i pro vzduch, pokud je rychlost proudění výrazně menší než rychlost zvuku.

Diferenční tlak

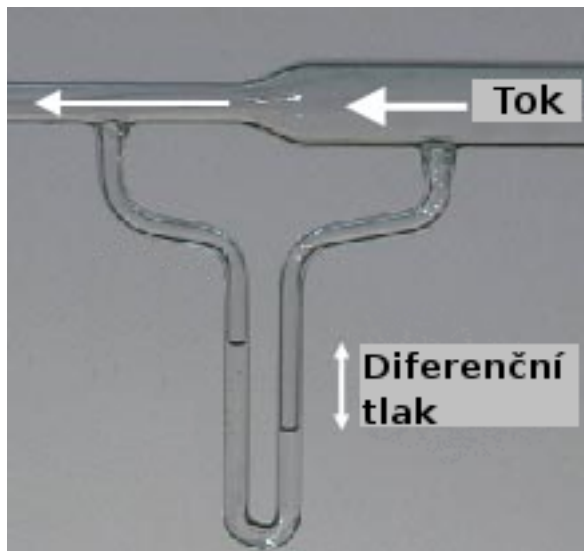
V případě nestlačitelné kapaliny můžeme považovat hustotu kapaliny za nezávislou na tlaku. To stejné platí i pro pomalé proudění plynů běžných tlaků. Výrazem pomalé proudění je opět myšlena rychlost mnohem menší než rychlost zvuku. Pokud dále předpokládáme konstantní výšku (horizontální potrubí) a fakt, že tekutina nekoná žádnou práci (nepředává teplo), platí zákon zachování energie. Následně jediné proměnné ve vzorci 2.1 jsou rychlost a tlak. Je zřejmé, že s rostoucí rychlostí musí klesat tlak a naopak.

Pokud budeme brát v úvahu změnu průměru potrubí, bude se měnit rychlost a tedy podle Bernoulliho rovnice i tlak. Změna rychlosti je přitom dána zákonem zachování hmotnosti (přesněji rovnicí kontinuity). Ta říká, že hmotnost tekutiny, co vejde za určitý čas do vstupního (například tlustšího) potrubí, musí vyjít za stejný čas výstupním (například tenčím) potrubím. Z toho důvodu je logické, že bez změny hustoty musí tekutina proudit v užším potrubí rychleji.

Při změně průřezu potrubí se tedy mění rychlost průtoku (důsledek rovnice kontinuity) i tlak (důsledek změny rychlosti – Bernoulliho rovnice). Z uvedeného vzorce je zjevné, že každá veličina mění svou hodnotu jiným směrem – jedna klesá a druhá roste.

Při zvětšení průřezu potrubí tedy kapalina zmenší rychlost a její tlak naroste, při zmenšení průřezu tomu bude naopak. Jedná se o přelévání kinetické energie v tlakovou potenciální či zpět. Tento jev všichni dobře známe například z přelévání kinetické energie v potenciální u obyčejného kyvadla.

Jako důsledek Bernoulliho rovnice nám tedy změnou průřezu potrubí vzniká diferenční tlak, který můžeme měřit. Tento tlak je znázorněn na obrázku 2.1



Obr. 2.1: Znázornění diferenčního tlaku, který vzniká jako důsledek Bernoulliho základní rovnice. Část obrázku převzata z [18].

Tlak v tekutině, označovaný v předchozích vzorcích p , bývá nazýván jako statický tlak. Rychlost v vytváří potom tzv. dynamický tlak. Součet obou tlaků se nazývá celkový tlak.

2.2 Škrticí členy

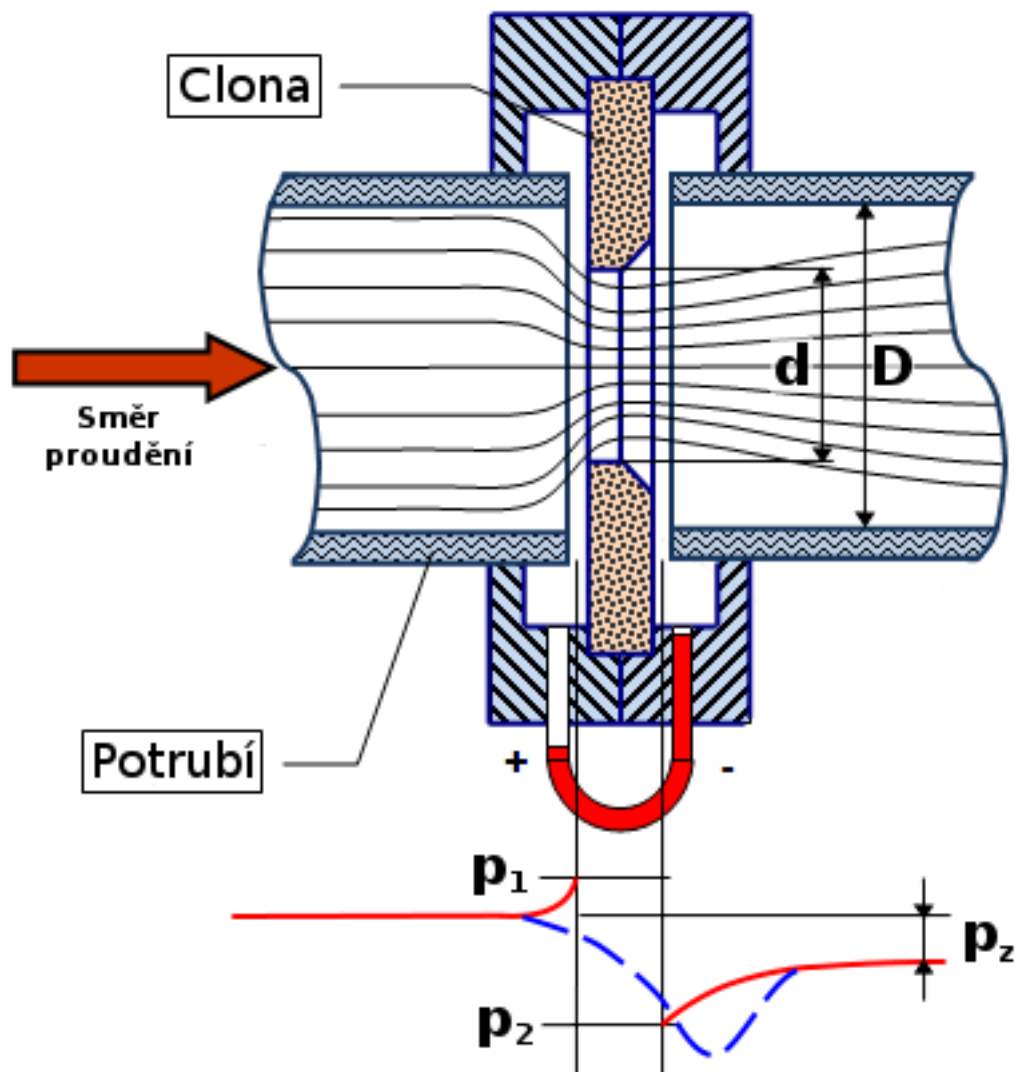
Tyto členy, někdy nazývané průřezová měřidla, využívají rozdílu statického tlaku těsně před zúžením a těsně za ním. Rozdíl tlaků je měřen rozdílovým tlakoměrem a je závislý na průtoku. Mezi základní škrticí orgány patří clony, dýzy a Venturiho dýzy. Vzhledem k tomu, že v měřicím řetězci, na který má být navrhován software, je přítomna pouze normalizovaná clona, budu se podrobněji zabývat pouze jí.

Normalizovaná clona

Jedná se o tenkou desku s kruhovým otvorem uprostřed, která je zabudovaná do potrubí. Normalizovaná clona je z konstrukčního hlediska velice jednoduchý prvek. Znázornění, včetně typického průběhu statického tlaku, je na obrázku 2.2.

Charakteristickým parametrem clony je poměr průměru otvoru clony d [m] ku vnitřnímu průměru potrubí D [m]:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad [-] \quad (2.3)$$



Obr. 2.2: Normalizovaná clona a průběh statického tlaku. Část obrázku převzata z [17] (červeně průběh tlaku u stěny potrubí, modře v ose potrubí).

Na obrázku 2.2 jsou znázorněny průběhy tlaku jak na stěně potrubí, tak v ose potrubí. Průběh statického tlaku na okraji potrubí je vyznačen červeně, v ose potrubí modře. Diferenční tlak, který je měřen na cloně, je:

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.4)$$

Pro postižení rozdílu mezi tlakem u stěny (měřeným) a tlakem v ose potrubí se zavádí opravný koeficient nazývaný součinitel průtoku C . Součinitel průtoku se určuje experimentálně. Podrobněji o něm bude pojednáno v kapitole 2.3. Navíc, pokud je měřeným médiem plyn, dochází v okolí clony ke změně hustoty média a tato parazitní vlastnost je vyjádřena součinitelem expanze ϵ .

Tlak, značený v obrázku 2.2 jako p_z , je tzv. ztrátový tlak, o který se sníží statický tlak v potrubí z důvodu zařazení clony. Velkou nevýhodou clony je tedy nezanedbatelná tlaková ztráta. Ta je větší než při použití jiných typů škrticích členů (zejména Venturiho dýza vykazuje malou tlakovou ztrátu, ale za cenu složitější konstrukce, viz [2]).

2.3 Výpočet průtoku škrticím členem

Následující informace jsou čerpány z normy ČSN EN ISO 5167-1, viz [4]. K dispozici jsem měl starou verzi normy (z roku 1993), přičemž od roku 2003 je tato norma nahrazena novou verzí. Čerpané informace jsou zejména obecně platné vztahy, které se nebudou v nové verzi normy odlišovat.

Samotný princip měření je zabudování primárního prvku, například clony, do potrubí a měření rozdílu statických tlaků před a za prvkem, případně před a v prvku (pro dýzu). Z rozdílu tlaků se určí průtok tekutiny. Určuje se buď objemový průtok, nebo průtok hmotnostní.

Hmotnostní průtok

Značí se q_m a je definován jako hmotnost tekutiny, která proteče za jednotku času daným průřezem kolmým ke směru toku.

Počítá se na základě znalosti parametrů clony ze vzorce:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.5)$$

Kde

- C [-] je součinitel průtoku,
- β [-] poměr průměru otvoru clony a průměru potrubí,
- ϵ [-] součinitel expanze,
- d [m] průměr otvoru clony,
- Δp [Pa] diferenční tlak a
- ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota tekutiny.

Objemový průtok

Objemový průtok q_v je definován jako objem, který projde průřezem kolmým na směr toku za jednotku času. Má jednoznačný vztah s hmotnostním průtokem přes hustotu:

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.6)$$

Kde

- q_m [kg · s⁻¹] je hmotnostní průtok a
- ρ [kg · m⁻³] hustota.

Součinitel průtoku

Součinitel průtoku C je definovaný pro proud nestlačitelné tekutiny jako poměr reálného průtoku škrticím prvkem k teoretickému průtoku. U plynů přibývá ještě součinitel expanze. Pro součinitel průtoku musí dle rovnice 2.5 zřejmě platit:

$$C = \frac{q_m \sqrt{1 - \beta^4}}{\epsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2 \Delta p \rho}} \quad [-] \quad (2.7)$$

Kde

- q_m [kg · s⁻¹] je hmotnostní průtok,
- β [-] poměr průměru otvoru clony a průměru potrubí,
- ϵ [-] součinitel expanze,
- d [m] průměr otvoru clony,
- Δp [Pa] diferenční tlak a
- ρ [kg · m⁻³] hustota tekutiny.

Ovšem součinitel lze odvodit i jen ze znalosti geometrie a Reynoldsova čísla. O Reynoldsově číslu bude pojednáváno níže. V rámci normy [4] jsou uvedeny orientační tabulky pro odvození součinitele průtoku. Podmínkou je dodržení geometrické a hydrodynamické podobnosti s normalizovanou clonou popsanou v normě.

Dále je v normě empirický vzorec pro výpočet součinitele průtoku. Dnes se nejčastěji používá Stolzova rovnice (starší verze normy):

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,1840\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,75} + \\ + 0,0900L_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0,0337L_2\beta^3 \quad [-] \quad (2.8)$$

Kde

- $L_1 = \frac{l_1}{D}$ [-],
- $L_2 = \frac{l_2}{D}$ [-],
- β [-] je poměr průměru otvoru clony a průměru potrubí,
- Re_D [-] Reynoldsovo číslo,
- D [m] průměr potrubí,
- l_1 [m] vzdálenosti předního odběru tlaku od přední strany clonové desky a
- l_2 [m] vzdálenosti zadního odběru tlaku od zadní strany clonové desky.

Případně v aktuálně platné verzi normy je použita přesnější Reader-Harris-Gallagherova rovnice (čerpáno z [16]):

$$\begin{aligned}
C = & 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521\left(\frac{10^6\beta}{Re_D}\right)^{0,7} + \\
& + (0,0188 + 0,0063A) \cdot \beta^{3,5}\left(\frac{10^6}{Re_D}\right)^{0,3} + \\
& + \frac{(0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A)\beta^4}{1 - \beta^4} - \\
& - 0,031(M - 0,8M^{1,1})\beta^{1,3} \quad [-]
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Kde

- $A = \left(\frac{19000\beta}{Re_D}\right)^{0,8} \quad [-]$
- $M = \frac{2L_2}{1-\beta} \quad [-]$
- $L_1 = \frac{l_1}{D} \quad [-]$,
- $L_2 = \frac{l_2}{D} \quad [-]$,
- $\beta [-]$ je poměr průměru otvoru clony a průměru potrubí,
- $Re_D [-]$ Reynoldsovo číslo,
- $D [m]$ průměr potrubí,
- $l_1 [m]$ vzdálenosti předního odběru tlaku od přední strany clonové desky a
- $l_2 [m]$ vzdálenosti zadního odběru tlaku od zadní strany clonové desky.

Potřebné veličiny

Předpokladem určení průtoku je znalost vlastností proudící tekutiny, charakterizují ji zejména hustota, dynamická viskozita a Reynoldsovo číslo.

Hustota

Z definice se jedná o hmotnost $m [kg]$ objemové jednotky látky $V [m^3]$:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [kg \cdot m^{-3}] \tag{2.10}$$

V rámci měření průtoku se hustota měří buď přímo, nebo je vypočtena ze známého statického tlaku, teploty a charakteristik tekutiny. V normě [4] se předpokládá, že odběr tlaku před primární prvkem poskytuje nejsprávnější výsledky. Dále je uvedeno, že měření teploty by mělo probíhat až za primárním prvkem, při dané minimální vzdálenosti a za předpokladu stejné teploty primárního prvku a tekutiny před prvkem. V případě, že se jedná o plyn, smí být teplota před prvkem vypočítána z teploty změřené až za prvkem.

Viskozita

Dynamická viskozita μ charakterizuje vnitřní tření v tekutině. Čím větší viskozita, k tím většímu dochází brzdění pohybu. Ideální kapalina má nulovou hodnotu viskozity.

Často se také používá kinematická viskozita ν , která je podílem dynamické viskozity μ [Pa·s] a hustoty ρ [kg·m⁻³]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.11)$$

U plynů je viskozita prakticky nezávislá na tlaku (neplatí pro velmi nízké a vysoké tlaky). Dle [7] je chyba zanedbání závislosti viskozity na tlaku do 35 barů menší než 10 %. Pro výpočet dynamické viskozity v závislosti na teplotě se používá Sutherlandův vzorec:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_0 + C_s}{T + C_s} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \quad [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (2.12)$$

Kde

- μ [Pa · s] je dynamická viskozita při teplotě T [°K]
- a μ_0 [Pa · s] známá viskozita při známé teplotě T_0 [°K].

Reynoldsovo číslo

Je poměr mezi setrvačností a silami viskozity. Pro průtoky je zásadní jeho kritická hodnota. Při podkritické hodnotě (pod 2000 až 2400 podle tekutiny a potrubí – zjišťuje se experimentálně) mluvíme o proudění laminárním (částice se pohybují vedle sebe a nekříží si dráhu). Při překročení kritické hodnoty existuje přechodná oblast, kdy se proudění mění z laminárního na turbulentní. Při hodnotách Reynoldsova čísla nad 4000 je proudění již jen prakticky turbulentní, tedy částice proudění si navzájem kříží dráhy.

U toků v potrubích kruhových průřezů bývá Reynoldsovo číslo Re_D určeno vzhledem k průměru potrubí následovně:

$$Re_D = \frac{v_{stř} D}{\nu} = \frac{4q_m}{\pi \mu D} \quad [-] \quad (2.13)$$

Kde

- $v_{stř}$ [m·s⁻¹] je střední rychlost průtoku,
- D [m] průměr potrubí,
- q_m [kg·s⁻¹] hmotnostní průtok,
- μ [Pa·s] dynamická viskozita a
- D [m] průměr potrubí.

Někdy se také Reynoldsovo číslo udává vzhledem k průměru škrticího členu a poté se značí Re_d :

$$Re_d = \frac{Re_D}{\beta} \quad [-] \quad (2.14)$$

Kde

- Re_D [-] je Reynoldsovo číslo (vzhledem k průměru potrubí) a
- β [-] poměru průměru otvoru škrticího členu a průměru potrubí.

2.4 Rychlostní sonda

Rychlostní sondy se používají pro měření rychlosti proudění. Využívají principu závislosti dynamického tlaku na rychlosti proudění. V nejjednodušším případě se jedná o Pitotovu trubici.

Pitotova trubice

Pitotova trubice má otvor nasměrován přímo proti proudění. V ústí sondy tedy klesne v praxi rychlost proudění na nulu a veškerá kinetická energie přejde v potenciální. Pitotova trubice tedy snímá celkový tlak p_c :

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (2.15)$$

Kde

- p_s [Pa] je statický tlak,
- p_d [Pa] dynamický tlak,
- v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] rychlost proudění a
- ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] hustota.

Pokud tedy známe statický tlak (například ho v blízkosti pitotovy trubice měříme), tak prostým výpočtem ze vzorce můžeme při známé hustotě spočítat rychlost kapaliny:

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.16)$$

Objemový průtok potom můžeme stanovit jako vynásobení rychlosti plochou průřezu. Problémem je rozdílná rychlost tekutiny v různém místě průřezu potrubí. Z toho důvodu se nejčastěji používají rychlostní sondy, které určují rychlostní profil, či střední rychlost tekutiny.

Víceotvorová sonda

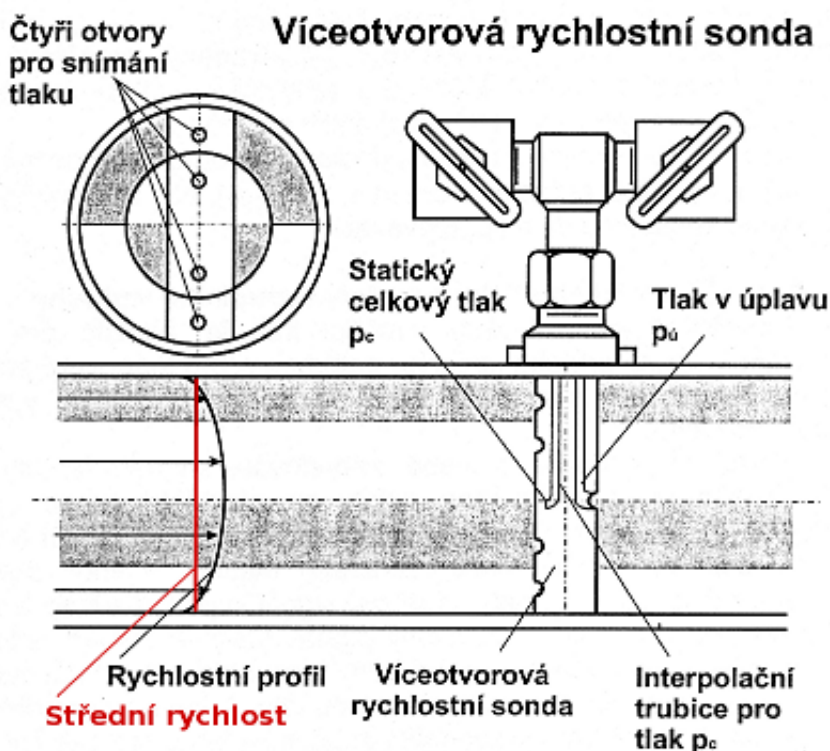
Ve zmíněném případě, kdy nás více než rychlostní profil zajímá střední rychlost tekutiny, použijeme víceotvorovou rychlostní sondu. Její znázornění společně s rychlostním profilem a střední rychlostí je na obrázku 2.3.

Počítáním rozdílu celkového tlaku p_c a tlaku v úplavu p_u je vytvářen diferenční tlak, který je dle [13] úměrný střednímu dynamickému tlaku p_d :

$$p_d = k^2 \cdot (p_c - p_u) = k^2 \cdot \Delta p \quad [\text{Pa}] \quad (2.17)$$

Kde

- $k [-]$ je koeficient sondy,
- $p_c [\text{Pa}]$ je celkový tlak,
- $p_u [\text{Pa}]$ tlak v úplavu a
- $\Delta p [\text{Pa}]$ diferenční tlak.



Obr. 2.3: Víceotvorová rychlostní sonda MQS, rychlostní profil. Část obrázku převzata z [13].

Vzorec pro vztah mezi hodnotou diferenčního tlaku na víceotvorové rychlostní

sondě a střední rychlostí proudění, viz [15], je:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\frac{v_{\text{stř}}}{k} \right)^2 \quad [\text{Pa}] \quad (2.18)$$

Kde

- $\rho \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ je hustota,
- $v_{\text{stř}} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}]$ střední rychlost a
- $k \text{ [-]}$ koeficient sondy.

Pro výpočet střední rychlosti tedy zřejmě platí:

$$v_{\text{stř}} = \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.19)$$

Z čehož snadno získáme objemový průtok při známém průřezu potrubí:

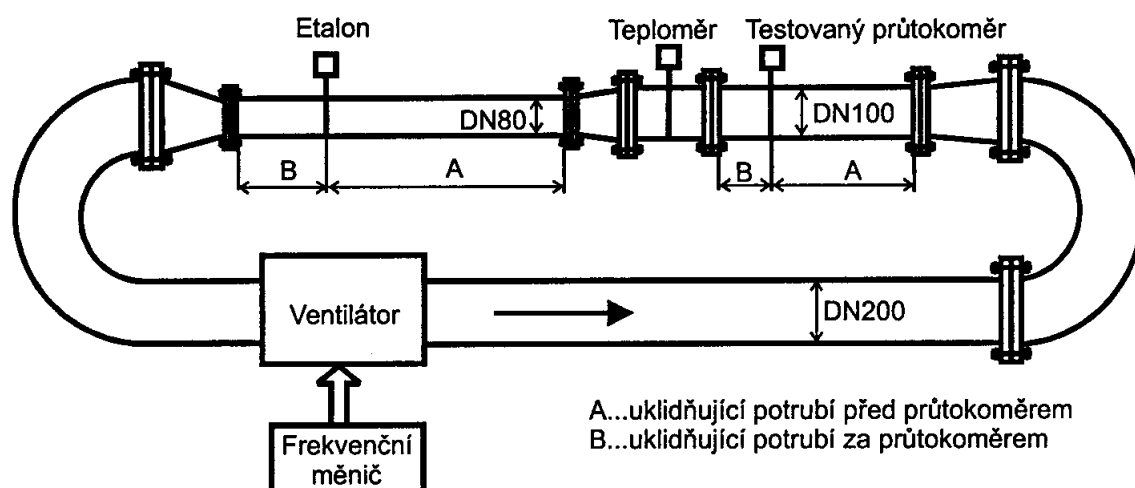
$$q_V = S_v \cdot v_{\text{stř}} = S_v \cdot k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.20)$$

Kde

- $S_v \text{ [m}^2\text{]}$ je průřez potrubí v místě rychlostní sondy.

3 MĚŘICÍ TRATĚ

Po seznámení s teorií měření s normalizovanou clonou a rychlostní sondou následovalo nutné upřesnění parametrů měřicí trati, která je znázorněna na obrázku 3.1. V potrubí proudí vzduch, který je vháněn ventilátorem, jehož rychlost je řízena frekvenčním měničem. Ventilátor je umístěn na potrubí DN200.



Obr. 3.1: Měřicí trať, obrázek převzat z [13].

Proudící vzduch postupně prochází přes testovaný průtokoměr v potrubí DN100, teploměr Pt100 a normalizovanou clonu v potrubí DN80. Mezi různými průměry potrubí jsou umístěny difuzory. Normalizovaná clona je na trati považována za etalon. Potrubí v části s testovaným průtokoměrem je přizpůsobeno různým pozicím uložení průtokoměru, takže je možné měřit s různou vzdáleností uklidňujícího potrubí před a za průtokoměrem. Oba snímače diferenčního tlaku (normalizovaná clona i testovaný průtokoměr), tak snímač teploty, mají unifikovaný proudový výstup 4-20 mA.

3.1 Rychlostní sonda

Jedná se o víceotvorovou rychlostní sondu firmy Vavra s.r.o typu Annubar MQS. Sonda je vyrobena pro potrubí DN100. Sonda má na výstupu diferenční tlak úměrný střední rychlosti proudění a tento tlak je následně převáděn na zmíněnou proudovou smyčku. Příkladem využití měřicí trati je určení hodnoty koeficientu sondy za daných podmínek.

3.2 Snímač teploty Pt100

Dle mezinárodní normy [5] se jedná o platinový kovový odporový teploměr, pro který je typický odpor $100\ \Omega$ při teplotě $0\ ^\circ\text{C}$. Na měřicí trati umístěný teploměr má rozsah 0 až 150°C . Výstupem je také zmiňovaná proudová smyčka.

3.3 Normalizovaná clona

Jedná se o clonu do potrubí DN80, která je použita jako etalon, protože jsou pro ni v normě [4] „přímo uvedeny vztahy i výpočty korekcí a nejistot“ [13]. Přesné parametry použité normalizované clony jsou v příloze A.

4 LABVIEW

LabVIEW je grafické programovací prostředí firmy National Instruments (dále jen NI), které existuje již od roku 1986. Název LabVIEW je zkratka pro „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“, česky tedy volně řečeno „virtuální vybavení inženýrského laboratorního pracoviště“. Z názvu vyplývá i hlavní cíl tohoto programovacího jazyka – virtualizovat měřicí přístroje potřebné v laboratoři. LabVIEW tedy umožňuje vyvíjet sofistikované měřicí, testovací a řídicí systémy pomocí intuitivního grafického prostředí a poskytuje tak individuální řešení pro prakticky libovolný inženýrský či vědecký záměr.

4.1 Programování

Grafické programování, které používá LabVIEW, je mnoha programátory zatracováno, ovšem při pohledu do minulosti je zřejmé, že trend vývoje programování je jednoznačný. Tak, jako se v počátcích počítačů přecházelo od assembleru k Fortranu, či později k objektovému modelu programování, i přechod ke grafickému programování, jaké reprezentuje LabVIEW, je jasný krok směrem k vyšší abstrakci a většímu důrazu na pohodlí a rychlost se kterou může inženýr či programátor využít programovacího prostředku k dosažení svého cíle.

Programovací jazyk G

Na rozdíl od většiny programovacích jazyků, jazyk LabVIEW, nazývaný jazyk G, používá k programování ikony pospojované v diagramy, které jsou přímo překládány do strojového kódu. Přitom však jazyk G funguje na stejném konceptu jako ostatní programovací jazyky, tedy obsahuje standardní programovací konstrukce od typů, proměnných, přes cykly, rekurze, vyjímky až po objektově orientovaný model programování.

Je zajímavé, jak v běžném životě lidé tíhnou ke grafickému zobrazování, ale přitom většina programovacích jazyků nutí k naučení se textové syntaxe. Programovací jazyk G tento syntaktický problém obchází pomocí intuitivního používání obrazů a jejich blokové propojování dráty, které velmi rychle pochopí každý.

Jazyk G navíc obsahuje interaktivní nástroje pro ladění programu, které umožňují od jednoduchého sledování proměnných až po zobrazování průběhu programu. Ten je v jazyce G další zvláštností. Program totiž nefunguje sekvenčně jako klasické programovací jazyky, ale řídí se tokem dat. O posloupnosti provádění operací se tedy nestará programátor, ale sám program vykonává ty činnosti, které potřebuje

k ukončení úkolu, přitom však jsou přístupné funkce pro vnucení sekvenčního pořadí úkolů a programátor tak neztrácí kontrolu nad programem.

Vícevláknové programování

Výhodou sledování datového toku je také automatický paralelismus, který v dnešní době víceprocesorových systémů ještě nabývá na významu. LabVIEW automaticky rozděluje vykonávané činnosti na paralelní procesy a umí tak bez jediné změny kódu optimálně využít více procesorových jednotek.

4.2 Komunikace s hardware

Pro ušetření času a tedy zrychlení vývoje klade LabVIEW velký důraz na kvalitní integraci jakéhokoli hardware. Mimo vlastních NI měřicích zařízení, které fungují prakticky systémem „Plug-and-Play“, je k dispozici obrovské kvantum ovladačů pro téměř libovolný připojitelný hardware od jednoduchého senzoru, přes měřicí karty či FPGA až po specializovaný hardware na zpracování obrazu.

4.3 Presentace dat

Každý virtuální instrument, který je naprogramován v jazyce G, má v zásadě svůj čelní panel. Do tohoto čelního panelu je otázkou chvilky vložit metodou „Drag-and-Drop“ od uživatelského rozhraní v podobě tlačítek, přes zobrazovací grafy, nebo indikátory až po vložení ActiveX či .NET prvků jako je webový prohlížeč či multimediální přehrávač.

4.4 Další vlastnosti

Mezi další nezdůrazněné, ale zajímavé vlastnosti programování v LabVIEW patří:

- ukládání kódu do souborů .VI,
- integrované pokročilé metody analýzy a zpracování signálů,
- podpora různých operačních systémů (včetně Real-Time) a podpora mikrokontrolérů i FPGA,
- snadný export i import dat do a z řady formátů
- a v neposlední řadě podpora od firmy NI od dostupných příkladů programů, diskuzních fór až po výukové a certifikační kurzy.

Další informace o LabVIEW jsou dostupné v [11].

5 NÁVRH MĚŘICÍHO SOFTWARE

5.1 Požadavky

Na základě teorie měření průtoku diferenčními měřidly, znalosti vzhledu měřicího řetězce a požadavků zadání bylo možné vytvořit seznam úkolů, na jejichž základě byl vytvořen měřicí software.

Požadavky dané měřicí trati

Tyto požadavky je možné shrnout do tří bodů:

- získání proudového výstupu ze tří senzorů (snímač teploty Pt100, diferenční tlak z normalizované clony a diferenční tlak z víceotvorové rychlostní sondy),
- k záznamu využít NI měřicí kartu USB-6008, která je pro měření k dispozici
- a z toho důvodu využívat bočníky pro převod unifikovaného proudového výstupu senzorů na napětí, které na vstupu dovoluje karta USB-6008.

Další požadavky

Tyto požadavky plynou zejména ze zadání:

- realizace v LabVIEW,
- převod měřených dat na fyzikální veličiny (zejména na průtok a střední rychlost proudění v potrubí, ale kvůli získání těchto hodnot samozřejmě nutnost vypočítat hustotu, viskozitu, atd.),
- ukládání dat pro pozdější zpracování,
- prezentace dat v grafech a tabulkách a
- vytvoření zprávy o měření.

5.2 Měřicí karta NI USB-6008

Jedná se o jednu z nejzákladnější měřicích karet firmy NI. I přesto bude našim požadavkům plně vyhovovat. Nevyužijeme ani polovinu z osmi analogových vstupů (až 12 bitů a maximální sdílená vzorkovací frekvence 10 tisíc vzorků za sekundu). Velkou výhodou karty je napájení přímo z USB portu a plná kompatibilita s LabVIEW, ve kterém bude vytvořen měřicí program.

Karta má dále 2 analogové výstupy (12 bitů a maximální sdílená vzorkovací frekvence 150 tisíc vzorků za sekundu), 12 digitálních vstupů/výstupů či 32 bitový čítač. Plná specifikace je v [10]. Vzhled karty je na obrázku 5.1.

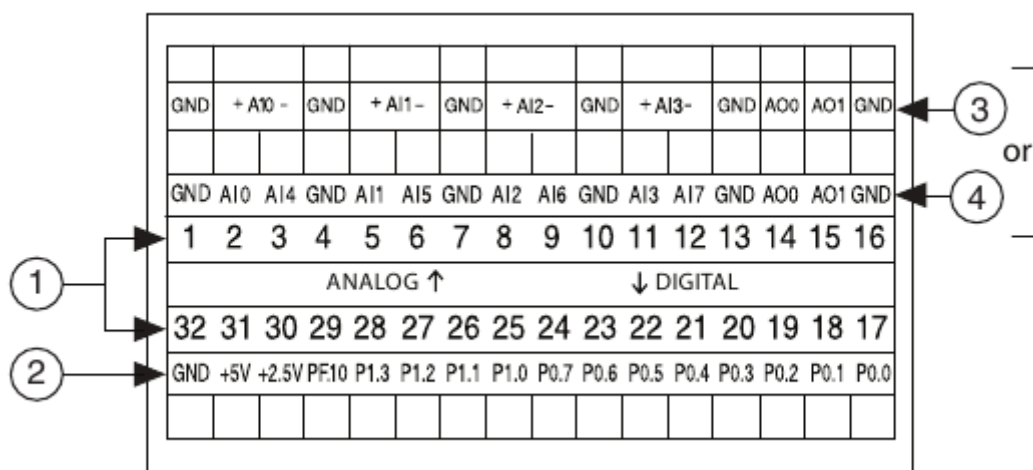


Obr. 5.1: Měřicí karta NI USB-6008, zdroj [10]

5.3 Rozvržení portů

Jak již bylo zmíněno, karta, která má být použita, nemá proudový vstup a proto musí být proudový výstup dvou převodníků diferenčního tlaku a převodník teploty pomocí bočníků převeden na napětí. Toto napětí je měřeno vzhledem k zemi, takže se použije zapojení v návodu karty označované jako „single-ended“.

Podle rozložení portů na obrázku 5.2 bude software naprogramován pro využití vstupů AI0, AI1 a AI2 (dle označení (4)).



Obr. 5.2: Porty karty NI USB-6008, (1) čísla portů, (2) vstupy/výstupy, (3) diferenční zapojení, (4) „single-ended“, obrázek čerpán z [9].

Očekávané zapojení vstupů i s uvedeným snímačem je pro přehlednost shrnuto

v tabulce 5.1. Zem je možné zapojit například na čísla portů 1, 4 a 7. Mohou nám tak vzniknout přehledné páry napětí-zem na číslech 2-1, 4-3 a 8-7.

Tab. 5.1: Zapojení vstupů datové karty, fyzická pozice viz obrázek 5.2

Číslo portu	Vstup	Veličina
2	AI0	Teplota
5	AI1	Diferenční tlak z rychlostní sondy
8	AI2	Diferenční tlak z clony

5.4 Výpočty fyzikálních veličin

Pro výpočet průtoku (objemového nebo hmotnostního), Reynoldsova čísla a pro výpočet teoretické hodnoty střední rychlosti proudění v potrubí je nutné znát parametry tekutiny zmiňované v kapitole 2.3 a následujících. Pro výpočet těchto parametrů potřebujeme znát některé konstanty, jejich hodnoty a aplikace ve vzorcích jsou popsány v následujících odstavcích a dále jsou připomenuty výpočty jednotlivých měřených veličin.

Výpočet dynamické viskozity

Dle [8] má suchý vzduch Sutherlandovu konstantu 120 a při teplotě 18°C je jeho dynamická viskozita μ_0 $1,827 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto konstanty použijeme se změřenou teplotou z tratě ve vzorci 2.12 a tím získáme dynamickou viskozitu pro aktuální teplotu.

Výpočet hustoty

Hustota suchého vzduchu ρ při teplotě T a tlaku p se dle [12] určuje z výrazu:

$$\rho = \frac{\rho_0}{\gamma T} \cdot \frac{p}{p_0} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (5.1)$$

Kde použijeme konstanty

- $\rho_0 = 1,276 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,
- $p_0 = 10^5 \text{ Pa}$ a
- $\gamma = 0,00366 \text{ K}^{-1}$.

Přepočet vstupů na fyzikální veličiny

Tlak

Pro převod tlaku z napětí na fyzikální veličinu se použije vzorec:

$$p = \frac{\frac{U}{R_B} \cdot 1000 - 4 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} \cdot k_{\text{MAX}} \quad [\text{Pa}] \quad (5.2)$$

Kde

- U [V] je napětí měřené na bočníku (úměrné proudovému výstupu snímače),
- R_B [Ω] hodnota odporu bočníku,
- k_{MAX} [Pa] maximální hodnota převodníku tlaku na proudovou smyčku (hodnota tlaku, pro který bude převodník na výstupu udávat 20 mA).

Teplota

Pro převod teploty z napětí na fyzikální veličinu potom poslouží vzorec:

$$T = \frac{\frac{U}{R_B} \cdot 1000 - 4 \text{ mA}}{16 \text{ mA}} \cdot (T_{\text{MAX}} - T_{\text{MIN}}) + T_{\text{MIN}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.3)$$

Kde

- U [V] je napětí měřené na bočníku (úměrné proudovému výstupu snímače),
- R_B [Ω] hodnota odporu bočníku,
- T_{MAX} [$^{\circ}\text{C}$] maximální hodnota teploty (hodnota teploty, pro kterou bude převodník na výstupu udávat 20 mA),
- T_{MIN} [$^{\circ}\text{C}$] minimální hodnota teploty (hodnota teploty, pro kterou bude převodník na výstupu udávat 4 mA).

Výpočet průtoku clonou

Pro výpočet hmotnostního průtoku použijeme zjištěnou hustotu plynu a následně konstanty trati a clony aplikujeme do vzorce 2.5. Objemový průtok pak získáme snadným dělením hmotnostního průtoku hustotou.

Výpočet Reynoldsova čísla

Obdobně jako pro výpočet průtoku aplikujeme zjištěný hmotnostní průtok a dynamickou viskozitu na vzorec 2.13 a získáme hodnotu Reynoldsova čísla.

Výpočet teoretické rychlosti průtoku sondou

Jako důsledek rovnice kontinuity, viz kapitola 2.1, můžeme teoretickou střední rychlost na rychlostní sondě $v_{\text{stř-teor}}$ vypočítat jednoduše jako objemový průtok na cloně děleno průřez potrubí v místě rychlostní sondy:

$$v_{\text{stř-teor}} = \frac{q_V}{S_V} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5.4)$$

Kde

- $S_V = \left(\frac{D_V}{2}\right)^2 \cdot \pi$ $[\text{m}^2]$
- q_V $[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$ je objemový průtok na cloně a
- D_V $[\text{m}]$ průměr potrubí v místě víceotvorové rychlostní sondy.

Výpočet rychlosti průtoku sondou a objemového průtoku

Pro výpočet středního průtoku rychlosti v místě víceotvorové rychlostní sondy se použije diferenční tlak na ní změřený a vzorec 2.19. Následně lze snadno vypočítat objemový průtok pomocí vzorce 2.20.

Výpočet teoretického koeficientu sondy

Ze vzorce 2.20 můžeme odvodit výpočet koeficientu sondy při znalosti průřezu, hustoty, objemového průtoku a diferenčního tlaku na sondě:

$$k = \frac{q_V}{S_V} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\rho}{\Delta p}} \quad [-] \quad (5.5)$$

Kde

- ρ $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$ je hustota a
- Δp $[\text{Pa}]$ diferenční tlak na rychlostní sondě.

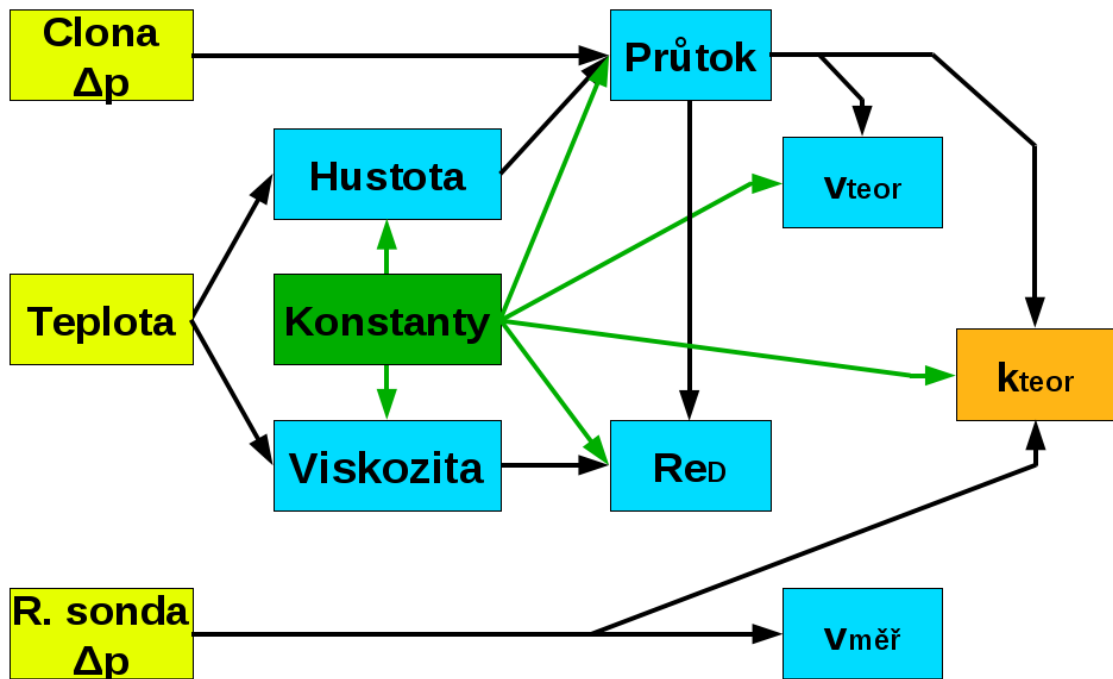
Na základě měření etalonem (normalizovanou clonou) tedy známe hodnotu objemového průtoku a při znalosti diferenčního tlaku udávaného víceotvorovou rychlostní sondou tak můžeme pomocí výše uvedeného vzorce dopočítat správný koeficient sondy.

Diagram posloupnosti výpočtů

Výše uvedená posloupnost výpočtů je pro přehlednost shrnuta v diagramu na obrázku 5.3. Pro zpřehlednění nejsou zobrazeny všechny počítané veličiny a rovněž nejsou zaznačeny vztahy mezi hustotou, konstantami a výpočtem měřené rychlosti $v_{\text{měř}}$.

Blok konstanty v obrázku 5.3 obsahuje všechny potřebné konstanty, které jsou:

- součinitelé clony, tedy průtoků C a expanze ϵ ,
- průměr otvoru clony d a průměru potrubí D , potažmo jejich poměr β ,
- výše zmíněné konstanty pro výpočet dynamické viskozity vzduchu μ ,
- výše zmíněné konstanty pro výpočet hustoty suchého vzduchu ρ při dané teplotě T a tlaku p a
- koeficient víceotvorové rychlostní sondy k a průměr potrubí sondy D_v .



Obr. 5.3: Diagram posloupnosti výpočtů.

Parametry měřicí tratě (průměry potrubí apod.) jsou uvedeny v kapitole 3. Parametry normalizované clony jsou shrnuty v příloze A.

6 REALIZACE V LABVIEW

Před rozvržením programu jsem si nejdříve prostudoval literaturu, jednak doporučenou [3], ale také zejména množství příkladů, které jsou dostupné jak přímo v LabVIEW, tak na stránkách Texas Instruments [11].

6.1 Rozvržení programu

Zpočátku byla zvažována jednoduchá varianta s čelním panelem, který by obsahoval graf, tabulky a množství ovládacích prvků. Takovýto čelní panel by byl ovšem velmi nepřehledný a proto byly funkce software rozděleny na čtyři hlavní části. Funkce těchto čtyř částí jsou zobrazeny na ideovém schématu, které je na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Diagram programu (barevné šipky jsou průběhy čtyř základních částí programu, černé šipky jsou vyžádaná data).

Čtyři hlavní části jsou:

- online sledování,
- záznam vzorků,
- nastavení konstant a
- prohlížení dat.

V diagramu jsou pro přehlednost odlišeny barevně. Průběh programu při jednom „módu“ je značen stejnobarevnými šipkami. Černé šipky znamenají předávání vyžádaných dat. K tomu dochází ve třech případech:

- využívání nastavených konstant,
- čtení vzorků z měřicí karty nebo
- čtení ze souboru.

Toto rozdělení mohlo být provedeno, protože se předpokládá, že uživatel bude od programu očekávat čtyři hlavní funkce, které mohou být odděleny:

- „online“ sledování aktuálních hodnot diferenčních tlaků a teploty na měřicí trati přes bočníky a datovou kartu včetně výpočtu aktuálního stavu fyzikálních veličin (průtoky, Reynoldsovo číslo apod.) a to nejspíše z důvodu rychlé kontroly aktuálního stavu trati,
- záznam série vzorků z měřicí tratě (se zobrazováním průběžných hodnot fyzikálních veličin),
- prohlížení dříve zaznamenaných dat a
- nastavování hodnot a konstant od samotných parametrů měření (počty vzorků, průměrování) po měřicí trať (průměry potrubí, hodnoty bočníků, parametry snímačů).

Následuje popis funkce jednotlivých funkčních (šedých) bloků z obrázku 6.1.

Čtení dat z NI karty

O čtení dat z karty se stará vytvořený blok „subVI“ s názvem dataAQ. Jako vstup bloku je vyžadována vzorkovací frekvence a počet vzorků, který má být sejmuto. Výstupem jsou navzorkované hodnoty. Protože je použita datová karta firmy NI, je uvnitř subVI v programu použit jednoduchý DAQ Asistent, který se stará o komunikaci (vyčítání dat) z datové karty. V rámci něho je nastaveno rozvržení portů popsané v kapitole 5.3.

Zpracování dat

Při zpracování dat se na základě měřených (či ze souboru načtených) vzorků, nastavených konstant měřicího řetězce a podle výpočtů rozebraných v kapitole 5.4 získává výsledek, tedy hodnoty jednotlivých veličin:

- diferenční tlak na cloně,
- diferenční tlak na víceotvorové rychlostní sondě
- teplota,
- statický tlak,
- dynamická viskozita
- Reynoldsovo číslo
- hustota vzduchu
- hmotnostní průtok (na základě clony)
- objemový průtok (na základě clony)
- teoretická střední rychlost průtoku (na základě clony)

- teoretický koeficient víceotvorové rychlostní sondy (na základě průtoku přes clonu a diferenčního tlaku rychlostní sondy)
- objemový průtok (na základě rychlostní sondy)
- měřená střední rychlost průtoku (na základě rychlostní sondy)

V případě měření dat může navíc docházet k vzorkování N vzorků s danou vzorkovací frekvencí a k jejich zprůměrování pro potlačení šumu.

Načtení souboru

Ze zvoleného souboru jsou načtena data, která jsou zpracována příslušným blokem a dříve změřená data mohou být tak detailně prohlížena. Součástí datového souboru může být i nastavení parametrů, případně se může jednat o soubor pouze s nastavením. Obě varianty budou pojednány níže. Podrobnosti o datovém souboru jsou v kapitole 6.3.

Zobrazení dat

Tento logický blok se stará o zobrazení zvolených dat do grafů, případně tabulek. Podrobnosti o zobrazování budou uvedeny níže v kapitole 6.2.

Uložení do souboru

Tato část programu se stará o uložení dat, případně uložení nastavení, do souboru na disku. Podrobnosti jsou níže v kapitole 6.3.

6.1.1 Vnitřní struktura programu

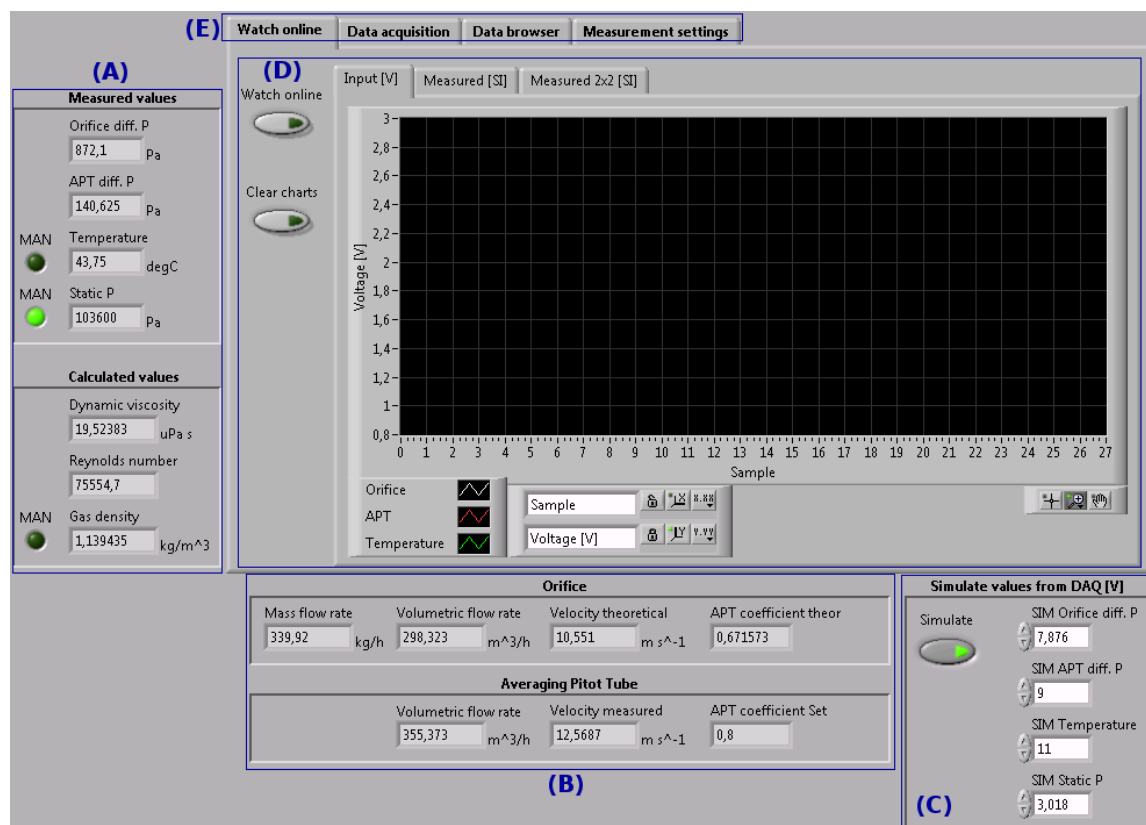
Drtivá většina programu je realizována v jednom VI souboru s názvem „main“. Přesto zůstává vnitřní struktura programu slušně čitelná, a to díky častému použití struktury case, která opticky zmenšuje kód a zpřehledňuje ho.

Mimo hlavní VI je v programu přítomno ještě několik subVI, které se téměř výhradně starají o aplikaci teoretických vzorců:

- `calc_Re_and_flow.vi` počítá Reynoldsovo číslo a průtok na základě diferenčního tlaku a parametrů clony,
- `density.vi` počítá hustotu vzduchu na základě statického tlaku a teploty,
- `dynamic_viscosity.vi` počítá dynamickou viskozitu na základě teploty,
- `to_unit_P.vi` se stará o přepočet napětí na odpovídající tlak,
- `to_unit_T.vi` se obdobně stará o přepočet napětí na teplotu,
- `mean.vi` se stará o průměrování vzorků pořízených těsně za sebou a
- `dataAQ.vi` se stará o vyčtení dat z datové karty.

6.2 Popis grafického prostředí

Čelní panel aplikace je na obrázku 6.2. Pro popis všech prvků grafického prostředí byl zvolen anglický jazyk, jakožto univerzální technický jazyk. V příloze B jsou uvedeny české ekvivalenty anglických označení.



Obr. 6.2: Čelní panel programu s označením jednotlivých bloků.

Na čelním panelu je patrné rozčlenění na několik bloků. Levý (A) a spodní blok (B) jsou zejména informativní. Pravý spodní (C) slouží pro simulaci napěťových vstupů a největší část zabírá hlavní blok (D). V jeho horní části (E) je možné přepínat mezi zmiňovanými čtyřmi hlavními logickými celky celé aplikace. Pod přepínacími záložkami je umístěna plocha, ve které jsou ovládací prvky a většinou také další záložky, kterými se volí různé typy zobrazení (nejčastěji grafy).

Levý informativní blok (A) je v detailu na obrázku 6.3. Skládá se z dvou panelů. Horní s popisem „Measured values“ nás informuje o základních aktuálně měřených hodnotách přepočtených na fyzikální veličiny, shora:

- diferenční tlak na cloně,
- diferenční tlak na víceotvorové rychlostní sondě,
- teplota a
- statický tlak.

Measured values	
Orifice diff. P	872,1 Pa
APT diff. P	140,625 Pa
MAN Temperature	43,75 degC
MAN Static P	103600 Pa

Calculated values	
Dynamic viscosity	19,52383 uPa s
Reynolds number	75554,7
MAN Gas density	1,139435 kg/m ³

Obr. 6.3: Levá část čelního panelu s měřenými hodnotami.

U teploty a statického tlaku může být využita funkce manuálně nastavitelné hodnoty (viz nastavení níže), což se projeví případným rozsvícením kontrolky „MAN“.

Spodní panel levého bloku s nadpisem „Calculated values“ nás informuje o základních parametrech průtoku vypočtených z měřených hodnot. Jedná se o:

- dynamickou viskozitu,
- Reynoldsovo číslo a
- hustotu plynu (vzduchu), která může být v nastavení manuálně zvolena konstantní, obdobně jako výše zmíněná teplota a statický tlak.

Ve spodní části čelního panelu (B), zobrazené detailně na obrázku 6.4, jsou potom hodnoty týkající se průtoku dle clony (Orifice) – horní část a víceotvorové rychlostní sondy (Averaging Pitot tube) – spodní část. Zleva doprava jsou zde údaje o aktuálně měřeném:

- hmotnostním průtokem (pouze u clony),
- objemovém průtokem,
- střední rychlosti průtoku a
- koeficientu rychlostní sondy (u clony se jedná o teoreticky vypočtený koeficient, u víceotvorové rychlostní sondy o zadaný koeficient).

Orifice			
Mass flow rate	Volumetric flow rate	Velocity theoretical	APT coefficient theor
339,92 kg/h	298,323 m ³ /h	10,551 m s ⁻¹	0,671573

Averaging Pitot Tube		
Volumetric flow rate	Velocity measured	APT coefficient Set
355,373 m ³ /h	12,5687 m s ⁻¹	0,8

Obr. 6.4: Spodní část čelního panelu s parametry průtoku měřenými clonou (Orifice) a víceotvorovou rychlostní sondou (Averaging Pitot Tube).

Nakonec v pravé spodní části (C) čelního panelu je umístěn blok „Simulate values from DAQ [V]“, který slouží pro simulování vstupních hodnot z datové karty a nachází se na obrázku 6.5. Tento blok byl původně vytvořen pro ladění programu, ale zůstal zde, zejména pro možnost otestovat všechny funkce programu i bez připojené datové karty, jinak by totiž při pokusu o přístup na nepřipojenou datovou kartu (při sledování, či záznamu dat) došlo k chybě a běh programu by byl zastaven.

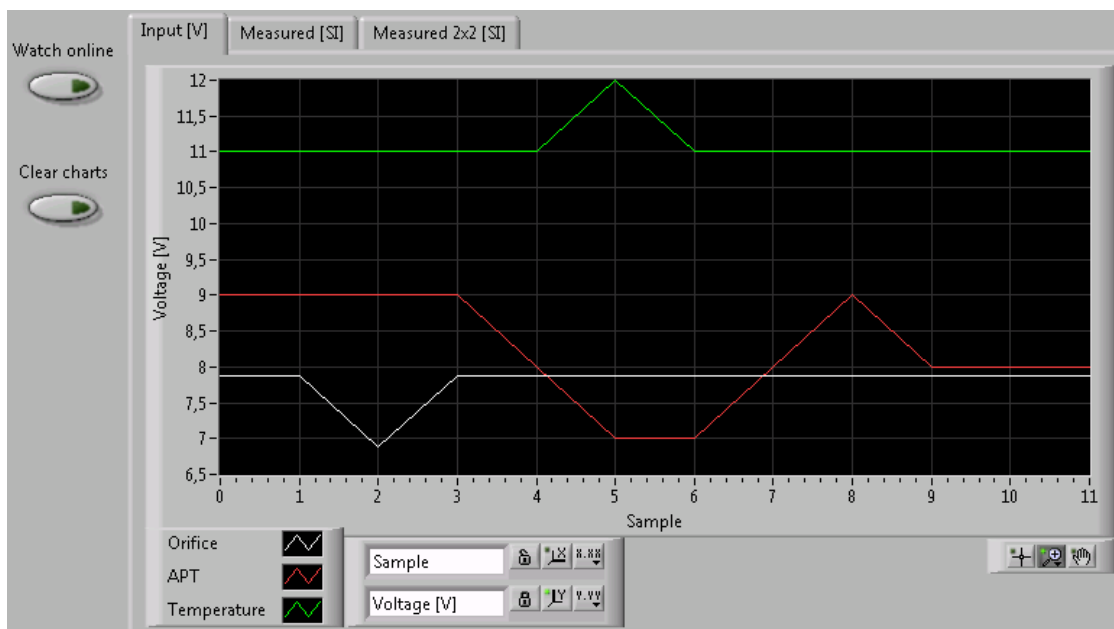
Simulate values from DAQ [V]	
Simulate 	SIM Orifice diff. P
	7,876
	SIM APT diff. P
	9
	SIM Temperature
	11
	SIM Static P
	3,018

Obr. 6.5: Detail pravé spodní části panelu s možností jednoduché simulace vstupních napětí.

Následující kapitoly se budou věnovat každá jedné ze čtyř voleb (E) v horní části čelního panelu.

Online sledování

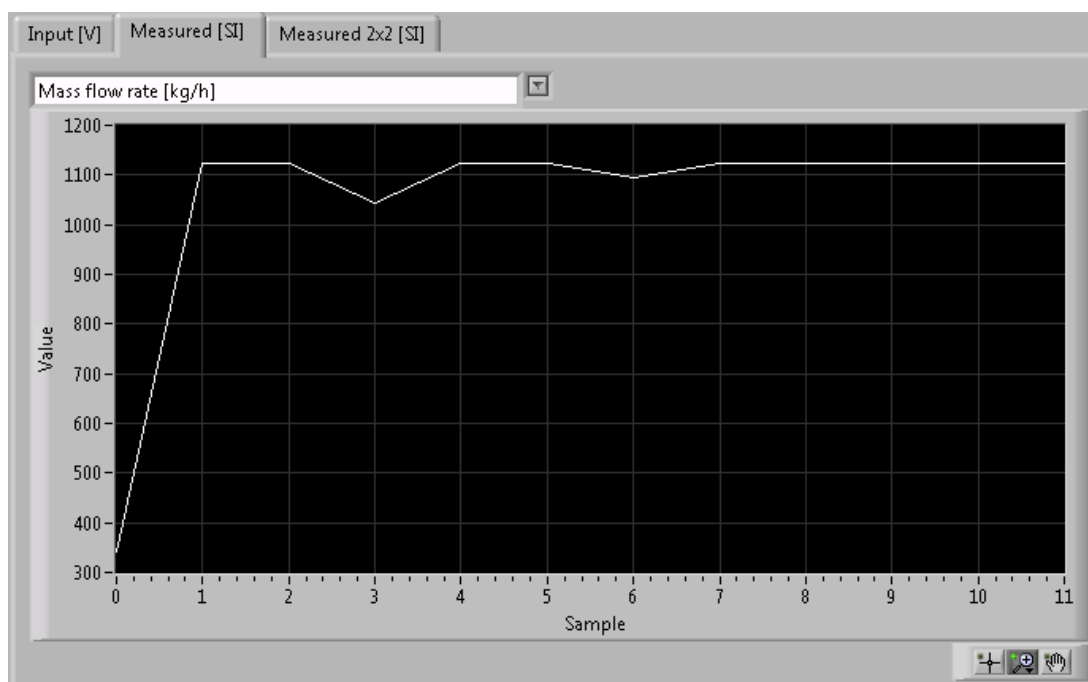
Hlavní blok online sledování je na obrázku 6.6. V horní části se volí typ grafu ve kterém se budou data zobrazovat. V levé části je tlačítko „Watch online“ pro zapnutí vzorkování. Pod ním je tlačítko pro vymazání grafů.



Obr. 6.6: Čelní panel „Watch online“ při sledování napěťových vstupů.

V případě první volby grafu „Input[V]“ se zobrazuje průběh měřených napětí úměrných diferenčnímu tlaku na cloně, diferenčnímu tlaku na sondě a teplotě. Poslední navzorkované hodnoty přepočtené na jednotlivé fyzikální veličiny se objevují v levé a spodní části čelního panelu, jak bylo uvedeno výše (tato pole nejsou v obrázku 6.6 zahrnuta). Vzorkované hodnoty se zaznamenávají do grafu a nikam jinam se neukládají. Pod grafem je zleva legenda ke grafu, volby k osám a nakonec volby pro změnu zobrazení grafu. Graf je nastaven tak, aby se jeho osa Y automaticky přizpůsobovala vykreslovaným hodnotám. Měnit zobrazení grafu přes volby vpravo dole pod grafem je proto vhodné dělat při vypnutém vzorkování, jinak bude osa Y upravena tak, aby byly viditelné všechny tři průběhy.

Při volbě druhého zobrazení měřených hodnot „Measured [SI]“ se zobrazuje průběh jedné zvolené fyzikální veličiny. Jedná se o jednu z třinácti veličin uvedených v kapitole 6.1. Na obrázku 6.7 je například vidět průběh hmotnostního průtoku v kilogramech za hodinu. Je podstatné zmínit, že data se opět ukládají pouze do grafu, tedy v případě, že v průběhu sledování je změněn grafem sledovaný parametr bez vymazání obsahu grafu, ukazuje část grafu vývoj jedné veličiny a druhá část grafu vývoj úplně jiné veličiny.



Obr. 6.7: Čelní panel „Watch online“ při sledování jedné měřené fyzikální veličiny.

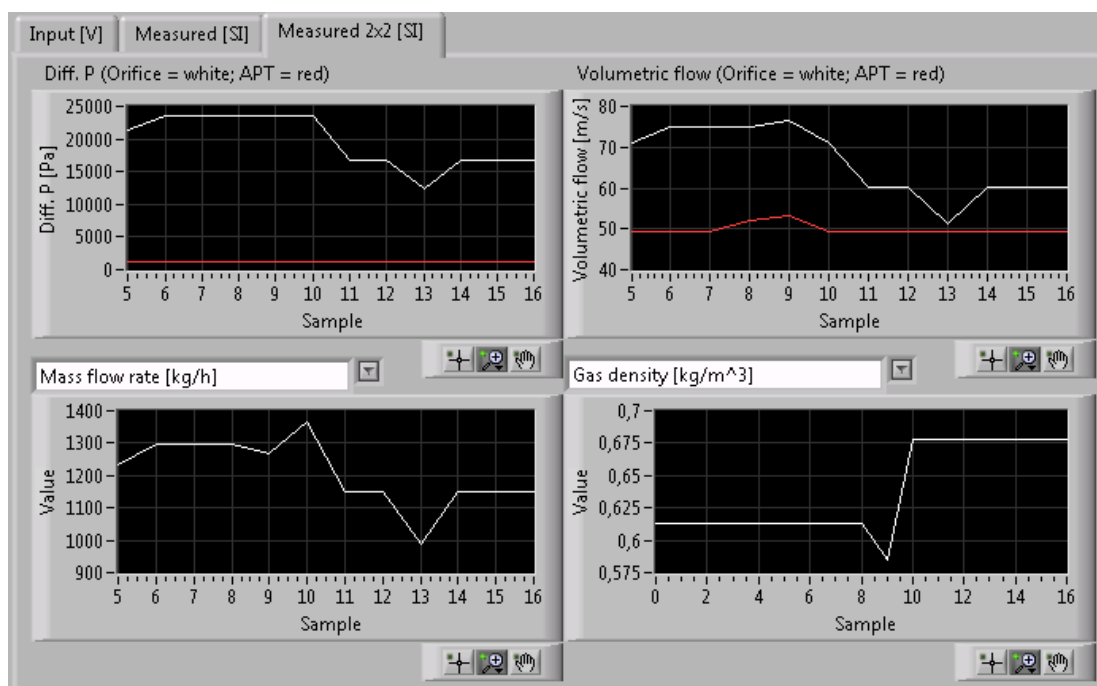
To je v zásadě matoucí a doporučuji tedy měnit zobrazovanou veličiny pokud možno při vypnutém vzorkování, případně následně aplikovat vymazání obsahu („Clear chart“). Smazání obsahu grafu je možné buď zmíněným tlačítkem pro smazání obsahu všech grafů vlevo od grafu, nebo volbou nad grafem přes pravé tlačítko myši.

Při třetí možné volbě zobrazení měřených hodnot „Measured 2x2 [SI]“ (viz obrázek 6.8), je možné sledovat průběhy čtyř fyzikálních veličin zároveň. Z důvodu předpokládaného využití jsou horní dva grafy předvoleny a spodní dva jsou volitelné. Vlevo nahoře je graf vývoje diferenčního tlaku na cloně a rychlostní sondě, vpravo nahoře objemový průtok dle clony a rychlostní sondy. Ve spodní části jsou dva průběhy zvolených fyzikálních veličin. Opět lze vybrat libovolnou ze třinácti veličin uvedených v kapitole 6.1 a stejně tak platí doporučení nulování grafu při změně veličiny, jako u předchozí volby sledování aktuálního stavu na měřicí trati.

Záznam dat

Jako druhá hlavní volba programu je možnost záznamu dat. Čelní panel záznamu dat je na obrázku 6.9. V tomto módu má program za cíl zaznamenat N vzorků do souboru. Poslední zaznamenané a z nich vypočtené hodnoty se zobrazují v levé a spodní části programu obdobně, jako při sledování stavu trati. Záznam se spouští tlačítkem START. V horní části je nastavitelná cesta, kam bude soubor uložen. Před započe-

tím záznamu je cesta otestována a případně je uživatel informován o neplatné cestě (záznam samozřejmě není spuštěn).



Obr. 6.8: Čelní panel „Watch online“ při sledování více měřených fyzikálních veličin.

Pod zmiňovaným tlačítkem START jsou dvě binární volby. První „Save in SI units“ určuje jestli mají být do souboru data ukládána jako napětí měřené na vstupu měřicí karty, nebo jestli mají být ukládány přímo hodnoty fyzikálních veličin (diferenční tlaky a telota). Druhá volba určuje, jestli má být do hlavičky souboru uloženo také aktuální nastavení měření, což je vřele doporučená volba, protože bez znalosti správných parametrů není možné dopočítat jednotlivé veličiny.

Následně je zde volba „Samples to save“, které určuje počet vzorků, které budou uloženy. Každý vzorek je tvořen z M průměrovaných vzorků a mezi jednotlivými průměrovanými vzorky je určité rozmezí, podrobněji viz dále v kapitole 6.5. Dle těchto nastavených časů se vyplní následná zašedlá pole s časem mezi vzorky a odhadem celkového času měření, který je počítán následovně:

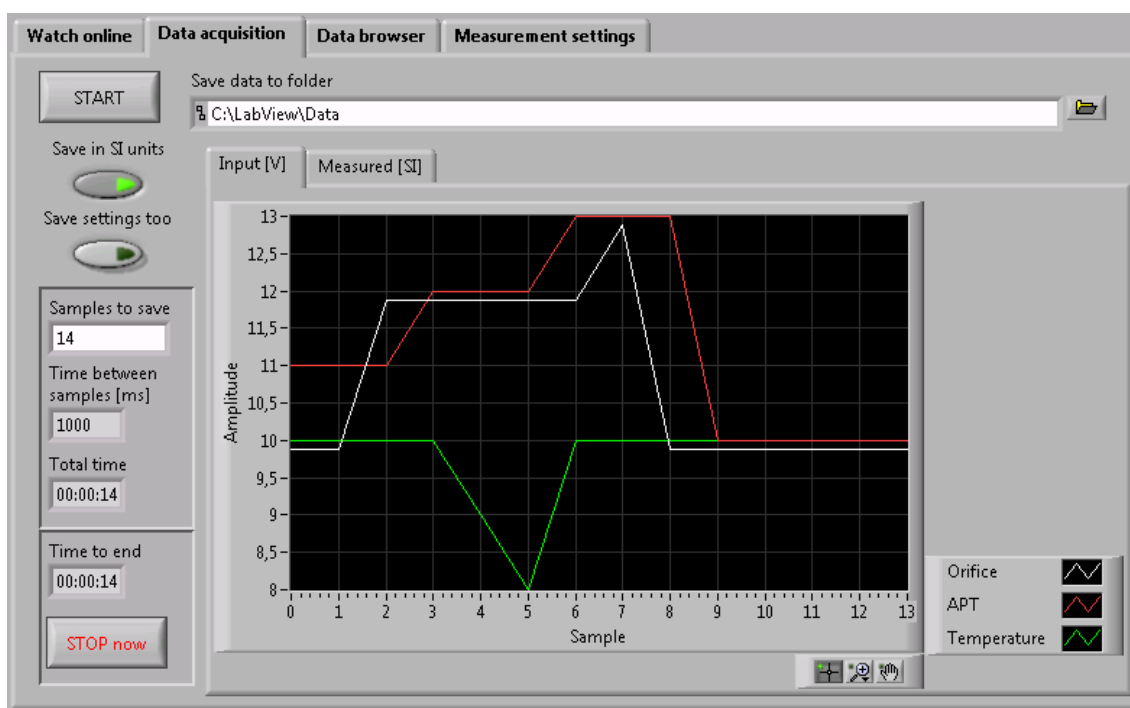
$$t_{\text{celk}} = N \cdot (M \cdot f_{\text{vz}}^{-1}) + N \cdot W \quad [\text{s}] \quad (6.1)$$

Kde

- N [–] je počet vzorků, které se mají zaznamenat do souboru,
- M [–] počet vzorků ze kterých se dělá průměr pro jeden finální záznam,
- f_{vz} [vzorků $\cdot \text{s}^{-1}$] nastavená vzorkovací frekvence a
- W [s] čas čekání mezi jednotlivými průměrovanými záznamy.

První část vzorce 6.1 odpovídá času pro záznam všech průměrovaných vzorků a druhá část celkovému času čekání mezi vzorky. Další zpoždění způsobená měřicí kartou nebo programem považují při běžných pracovních podmínkách za zanedbatelná.

Pod odhadovaným celkovým časem měření je čas, který odpovídá odhadu do konce aktuálního měření a při spuštění se tedy postupně zmenšuje k nule. V případě, kdy již bylo pořízeno dostatečné množství vzorků je možné pomocí tlačítka vlevo dole s červeným textem „STOP now“ ukončit měření a nechat data zapsat do souboru.

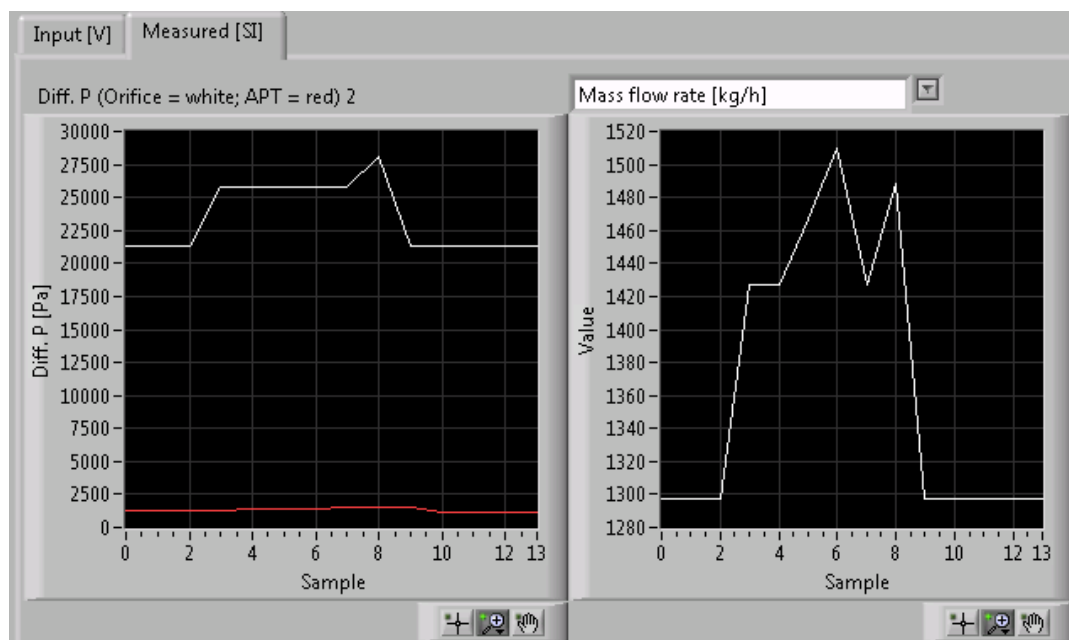


Obr. 6.9: Čelní panel „Data acquisition“ na konci záznamu dat při sledování napěťových úrovní vstupů (Input [V]).

Jak již bylo dříve zmíněno, nepředpokládá se hluboká analýza dat při zaznamenávání, k tomu je určen až následující blok pro prohlížení dat. Z toho důvodu jsou při záznamu dat k dispozici pouze dva typy jednoduchých grafů. Tyto grafy mají sloužit hlavně pro jednoduchý dozor, jestli měření skutečně probíhá a jestli měřicí aparatura nevykazuje nesmyslné výsledky. V takovém případě je možné použít zmiňované tlačítko „STOP now“ a začít hledat řešení problému.

První typ zobrazení měřených dat obsahuje pouze informace o napětích snímávaných kartou, viz obrázek 6.9. Kdykoliv je možné přepnout se na druhé zobrazení, viz obrázek 6.10, kde je vlevo do grafu vynášen diferenční tlak na cloně a rychlostní sondě v pascálech a vpravo je průběh volitelné veličiny. Při začátku záznamu jsou grafy automaticky vyčištěny, ale jinak pro graf volitelné veličiny opět platí výše

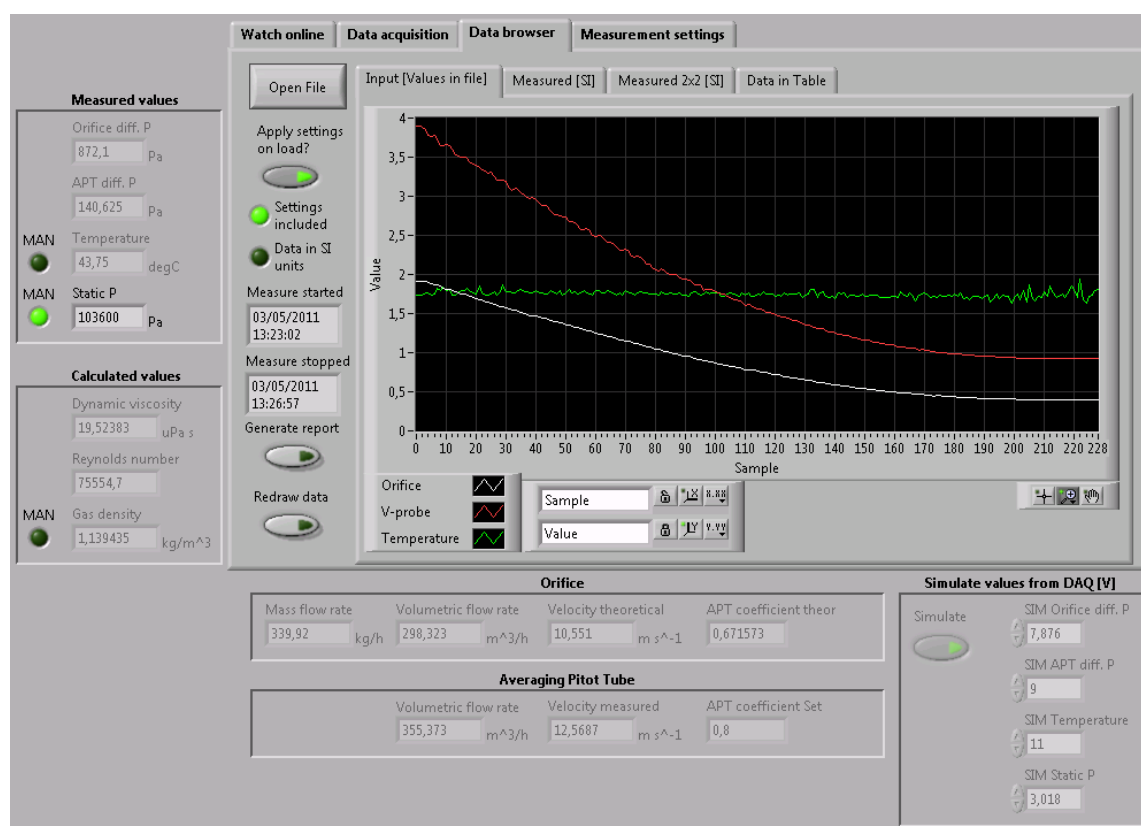
uvedené upozornění na změnu veličiny v průběhu měření, protože data jsou v grafu nezávisle na ukládaných hodnotách a tedy při změně veličiny se nezmění minulý průběh v grafu.



Obr. 6.10: Čelní panel „Data acquisition“ při sledování měřených fyzikálních veličin v jednotkách SI (Measured [SI]).

Prohlížeč zaznamenaných dat

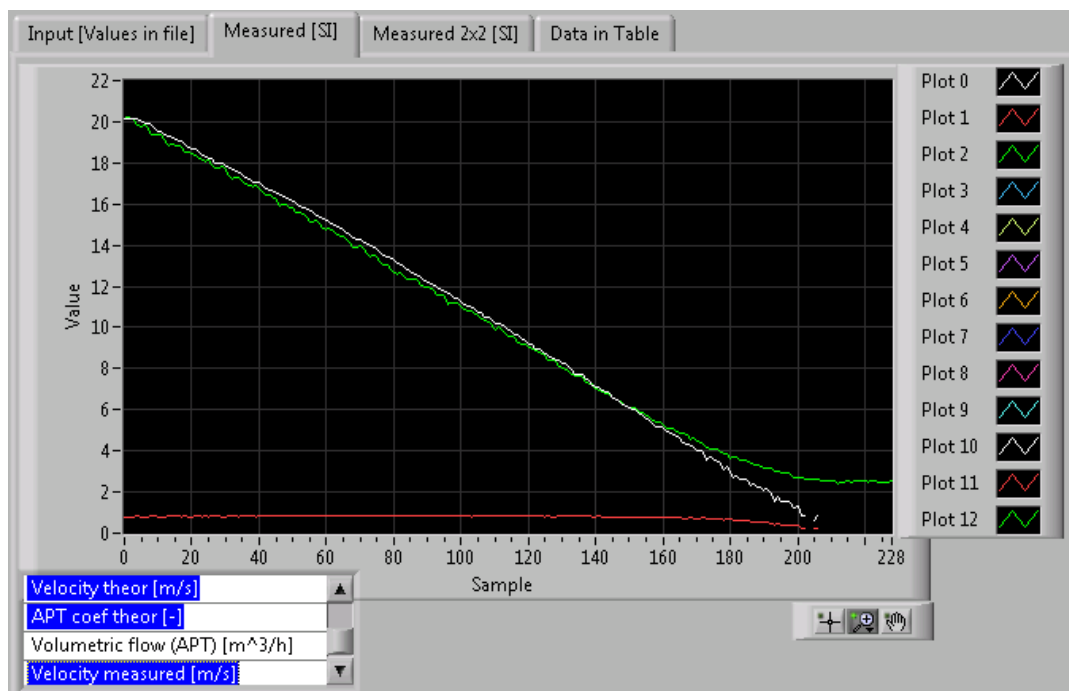
Tato část programu má nejdůmyslnější systém grafů, obsahuje tabulky hodnot a to z důvodu kvalitní analýzy změřených dat. Celý čelní panel programu při přepnutí do prohlížeče je na obrázku 6.11. Levá a spodní část programu je zašedlá, protože hodnoty veličin odpovídající poslednímu měření postrádají při prohlížení dat význam. Vyjímkou jsou v nastavení manuálně nastavené konstantní hodnoty, jako v obrázku statický tlak. Tyto hodnoty jsou potom brány v potaz místo jinak vypočtených či získaných dat. Všechna data, která jsou zašedlá, jsou plně přístupná pro každý vzorek a to přehledně v tabulce, která je k dispozici v jedné ze záložek (viz níže).



Obr. 6.11: Čelní panel „Data browser“ pro prohlížení naměřených dat.

V hlavní části panelu je vlevo nahoře tlačítko „Open file“ pro načtení datového souboru. Pod ním je volba „Apply settings on load?“, která umožňuje případně v souboru přítomné nastavení aplikovat (hodnoty v části programu pro nastavování parametrů jsou nenávratně změněny). Níže následují informace přítomnosti nastavení v souboru a jestli jsou data v souboru v jednotkách SI, nebo v hodnotách napětí. Dále jsou zde uvedeny časy začátku a konce měření. Dále je zde tlačítko pro vytvoření protokolu o měření „Generate report“ a tlačítko pro překreslení dat

v grafech „Redraw data“. V hlavní části je poté velký graf s třemi průběhy úměrnými diferenčnímu tlaku na cloně, sondě a teplotě. Jedná se buď o průběhy napětí, nebo průběhy v jednotkách SI, což signalizuje zmiňovaná kontrolka vlevo od grafu.

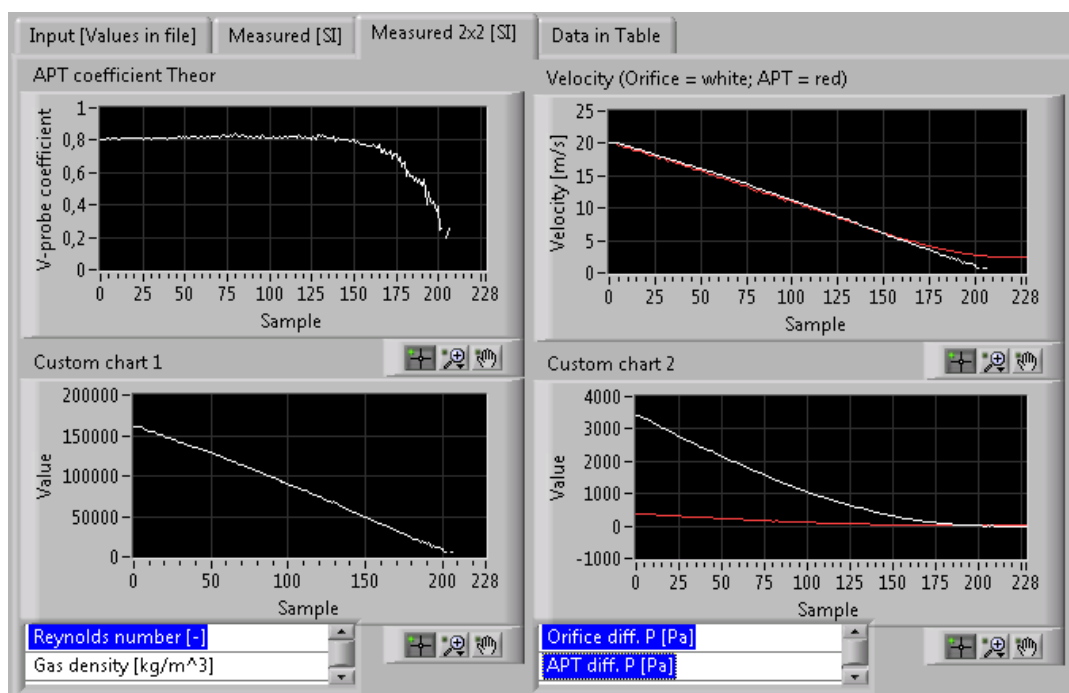


Obr. 6.12: Čelní panel „Data browser“ pro prohlížení vybraných naměřených dat přepočtených dle nastavení na jednotky SI (Measured [SI]).

Další možnou volbou zobrazení je jeden velký graf přes celou plochu s názvem „Measured [SI]“, který je na obrázku 6.12. V tomto případě je ovšem v levé spodní části přidáno výběrové pole, které umožňuje pomocí kláves CTRL nebo SHIFT vybírat i více voleb. V grafu je tak možné zobrazit zároveň i všech třináct veličin shrnutých v kapitole 6.1. Po výběru příslušných veličin je nutné použít zmiňované tlačítko „Redraw data“ pro překreslení grafu. Vpravo od grafu je legenda. Barvy v grafu odpovídají vybraným položkám tak, že je respektováno pořadí od nejvýše umístěné veličiny ve výběrovém poli.

Další vzhled, přímo vytvořený pro analýzu koeficientu víceotvorové rychlostní sondy, je na obrázku 6.13. Opět se jedná, jako již v případě sledování aktuálního stavu na měřicí trati, o sestavu čtyř grafů. V tomto případě je vlevo nahoře vyobrazení průběhu teoretického koeficientu rychlostní sondy, vpravo nahoře rychlost průtoku dle clony a sondy a ve spodní polovině dva průběhy libovolně nakombinovaných fyzikálních veličin. Pro aktualizaci grafů po změně výběru je opět nutné použít tlačítko „Redraw data“.

Poslední variantou analýzy načtených dat je prohlížení tabulek hodnot, jak je vidět na obrázku 6.14. V levé části jsou data načtená ze souboru (řádky odpovídají



Obr. 6.13: Čelní panel „Data browser“ pro prohlížení vybraných naměřených dat přepočtených dle nastavení na jednotky SI ovšem při zobrazení více grafů na čelním panelu (Measured 2x2 [SI]).

jednotlivým vzorků) a v pravé části je třináct vypočtených veličin, viz kapitolu 6.1.

Aby se uživatel mohl orientovat v hodnotách, myšleno poznat, který sloupec patří které veličině, tak při zapnuté kontextové nápovědě se zobrazí výpis veličin v pořadí, v jakém jsou v jednotlivých sloupcích v tabulce, jak je vidět na obrázku 6.15.

The screenshot shows the 'Data browser' panel with two tabs: 'Input [Values in file]' and 'Measured [SI]'. The 'Input Data' table on the left contains 16 rows of input values, with the last column being 'NaN'. The 'Calculated data' table on the right contains 16 rows of calculated values across 8 columns.

Input Data					Calculated data							
0	1,9078	3,8912	1,7389	NaN	0	3392,55	384,955	24,4006	103600	18,5864	161544	1,21353
0	1,90882	3,90343	1,73788	NaN	0	3394,85	386,518	24,3716	103600	18,585	161619	1,21365
	1,90984	3,88407	1,73584	NaN		3397,14	384,043	24,3136	103600	18,5821	161714	1,21389
	1,90474	3,85352	1,76752	NaN		3385,67	380,138	25,2136	103600	18,6264	160814	1,21022
	1,89557	3,7812	1,76752	NaN		3365,03	370,892	25,2136	103600	18,6264	160324	1,21022
	1,88029	3,76491	1,74095	NaN		3330,65	368,81	24,4588	103600	18,5893	160023	1,21329
	1,87417	3,78629	1,74912	NaN		3316,88	371,543	24,6909	103600	18,6007	159532	1,21235
	1,86092	3,73639	1,82783	NaN		3287,07	365,163	26,927	103600	18,7104	157293	1,20331
	1,84563	3,65287	1,80023	NaN		3252,67	354,486	26,1429	103600	18,672	156995	1,20647
	1,82729	3,64268	1,84214	NaN		3211,4	353,184	27,3335	103600	18,7303	155201	1,20169
	1,812	3,65592	1,79103	NaN		3177	354,876	25,8815	103600	18,6592	155332	1,20752
	1,80589	3,64777	1,80943	NaN		3163,25	353,834	26,4043	103600	18,6848	154648	1,20541
	1,7957	3,60092	1,7389	NaN		3140,33	347,845	24,4006	103600	18,5864	155423	1,21353
	1,78041	3,52351	1,72868	NaN		3105,92	337,949	24,1102	103600	18,5721	154764	1,21472
	1,7641	3,51435	1,77059	NaN								

Obr. 6.14: Čelní panel „Data browser“ pro prohlížení dat v tabulkách. Vlevo načtená data a vpravo z nich vypočtených data.

This screenshot shows the same 'Data browser' panel as in Figure 6.14, but with two 'Context Help' windows open. The left window shows the 'Input Data' context, and the right window shows the 'Calculated data' context, listing the physical quantities corresponding to each column of the calculated data table.

Input Data					Calculated data							
0	1,9078	3,8912	1,7389	NaN	0	3392,55	384,955	24,4006	103600	18,5864	161544	1,21353
0	1,90882	3,90343	1,73788	NaN	0	3394,85	386,518	24,3716	103600	18,585	161619	1,21365
	1,90984	3,88407	1,73584	NaN		3397,14	384,043	24,3136	103600	18,5821	161714	1,21389
	1,90474	3,85352	1,76752	NaN		3385,67	380,138	25,2136	103600	18,6264	160814	1,21022
	1,89557	3,7812	1,76752	NaN		3365,03	370,892	25,2136	103600	18,6264	160324	1,21022
	1,88029	3,76491	1,74095	NaN		3330,65	368,81	24,4588	103600	18,5893	160023	1,21329
	1,87417	3,78629	1,74912	NaN		3316,88	371,543	24,6909	103600	18,6007	159532	1,21235
	1,86092	3,73639	1,82783	NaN		3287,07	365,163	26,927	103600	18,7104	157293	1,20331
	1,84563	3,65287	1,80023	NaN		3252,67	354,486	26,1429	103600	18,672	156995	1,20647
	1,82729	3,64268	1,84214	NaN		3211,4	353,184	27,3335	103600	18,7303	155201	1,20169
	1,812	3,65592	1,79103	NaN		3177	354,876	25,8815	103600	18,6592	155332	1,20752
	1,80589	3,64777	1,80943	NaN		3163,25	353,834	26,4043	103600	18,6848	154648	1,20541
	1,7957	3,60092	1,7389	NaN		3140,33	347,845	24,4006	103600	18,5864	155423	1,21353
	1,78041	3,52351	1,72868	NaN		3105,92	337,949	24,1102	103600	18,5721	154764	1,21472
	1,7641	3,51435	1,77059	NaN								

Context Help - Input Data

Input data [V or SI units]:
 Orifice diff. P
 APT diff P
 Temperature
 Static P

Context Help - Calculated data

Calculated data are:
 Orifice diff. P [Pa]
 APT diff. P [Pa]
 Temperature [Cdeg]
 Static P [Pa]
 Dynamic viscosity [uPa s]
 Raynolds number [-]
 Gas density [kg/m^3]
 Mass flow rate [kg/h]
 Volumetric flow rate [m^3/h]
 Velocity theoretical [m/s]
 APT coef Theor [-]
 Volum. flow rate APT [m^3/h]
 Velocity measured [m/s]

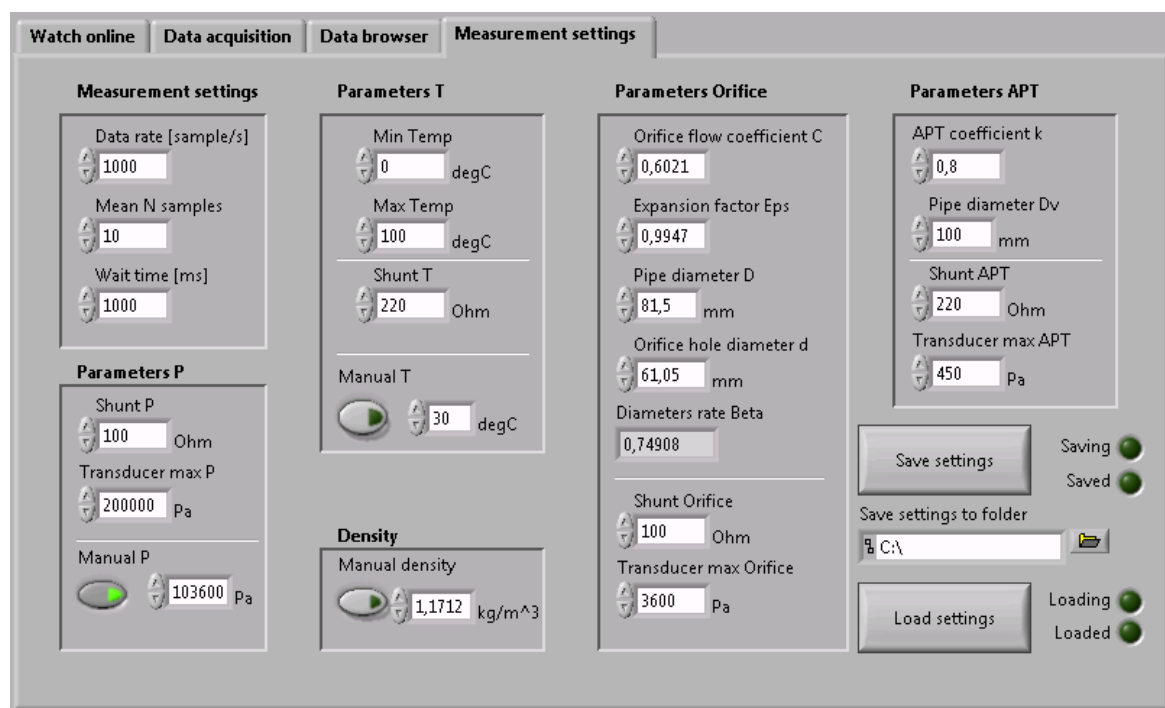
Obr. 6.15: Čelní panel „Data browser“ pro prohlížení dat v tabulkách. Při zapnutí kontextové nápovědy se ukáže popis kolikátý sloupeček je kterou veličinou.

Nastavení měření

Čtvrtá a poslední část programu je nastavení parametrů měření. Část čelního panel je na obrázku 6.16. Panel je rozdělen na 6 logických částí pro nastavení různých parametrů:

- nastavení měření (frekvence vzorkování, počet průměrovaných vzorků a čas čekání mezi jednotlivými průměrovanými vzorky),
- parametry měření statického tlaku (hodnota bočníku, maximum převodníku či výběr manuálně nastavené konstantní hodnoty statického tlaku),
- parametry teploty (minimální a maximální hodnota teploty převodníku, hodnota bočníku nebo výběr manuálně nastavené konstantní hodnoty teploty),
- možná volba konstantní hustoty,
- parametry clony (koeficient clony, koeficient expanze, průměry potrubí v místě clony, otvoru clony, hodnota bočníku a maximum převodníku diferenčního tlaku) a
- parametry víceotvorové rychlostní sondy (koeficient sondy k, průměr potrubí v místě sondy, hodnota bočníku a maximum převodníku diferenčního tlaku).

V pravé spodní části je navíc možnost uložit nastavení do souboru či ze souboru nastavení načíst.



Obr. 6.16: Čelní panel „Measurement settings“ pro nastavení parametrů měření, převodníků, bočníků, měřidel a trati.

6.3 Ukládání do souboru

Při používání čelního panelu „Data acquisition“ jsou měřené hodnoty ukládány do souboru, jak již bylo poznamenáno výše. Data jsou ukládána do textového dokumentu ve formátu, který je vhodný pro import dat, například do programu MS Office Excel. Ukládaný soubor je pojmenován „Track-measure-“ a následuje rok, měsíc, den a podtržítka oddělená hodina, minuta a sekunda začátku měření. Jedná se tedy o formát YYMMDD_hh_mm_ss. Takto zvolený název má výhodu, že i podle řazení dle názvu se naměřená data automaticky řadí od prvních uložených po poslední. Navíc při tomto pojmenovávání souborů je na první pohled zřejmé, ze kterého data a času hodnoty pocházejí.

Formát souboru

Jedná se o běžný textový dokument, který je čitelný i v běžném poznámkovém bloku. Po jeho otevření vidíme:

- „Measure-start:“ a za tabulátorem časový údaj identický s koncem názvu souboru,
- „Measure-stop:“ a za tabulátorem časový údaj konce měření ve stejném formátu jako čas začátku měření,
- v případě, že je k datům připojeno nastavení, tak slovo „Settings:“ a na následujícím řádku tabulátory oddělené hodnoty jednotlivých nastavení:
 1. vzorkovací frekvence
 2. počet průměrovaných vzorků
 3. čas mezi průměrováním vzorků
 4. hodnota bočníku statického tlaku
 5. maximum převodníku statického tlaku
 6. manuálně zadána hodnota statického tlaku (logická hodnota)
 7. hodnota manuálně zadaného statického tlaku
 8. minimální teplota teploměru
 9. maximální teplota teploměru
 10. hodnota bočníku teploměru
 11. manuálně zadána hodnota teploty (logická hodnota)
 12. hodnota manuálně zadané teploty
 13. manuálně zadána hodnota hustoty vzduchu (logická hodnota)
 14. hodnota manuálně zadané hustoty
 15. koeficient clony
 16. koeficient expanze
 17. průměr potrubí v místě clony

18. průměr otvoru clony
 19. hodnota bočnicku clony
 20. maximum převodníku diferenčního tlaku clony
 21. zadaný koeficient rychlostní sondy
 22. bočník rychlostní sondy
 23. maximum převodníku diferenčního tlaku rychlostní sondy
 24. průměr potrubí v místě rychlostní sondy
- na dalším řádku následuje číslo 0 nebo 1 (0 značí, že data jsou ve voltech čtených z datové karty, 1 značí, že data jsou v jednotkách SI) a
 - následují na každém řádku čtyři čísla oddělená tabulátorem značící:
 1. diferenční tlak na cloně,
 2. diferenční tlak na víceotvorové rychlostní sondě,
 3. teplotu a
 4. případně měřený statický tlak

Většinu souboru tedy nejspíše zabírají uložené série vzorků, jak je LabVIEW získalo od měřicí karty, případně série hodnot, které jsou již přepočteny na jednotky SI.

Všechna čísla jsou uložena s potřebným počtem číslic před desetinou čárkou a pěti místy za desetinou čárkou.

Velikost souboru

Velikost souboru se skládá z:

- úvodních časů začátku a konce měření (61 bajtů),
- možné nastavení (cca 240 bajtů, přesná velikost se odvíjí od počtu číslic před desetinnými čárkami),
- informace, jestli jsou data v jednotce SI a nápis „Data:“ (8 bajtů) a
- řádek dat (30 bajtů či více, opět závislé na počtu číslic před desetinou čárkou).

Velikost datového řádku v případě záznamu napětí menšího než 10 V a neznamenávání statického tlaku je právě 30 bajtů. Pro představu datové náročnosti, při záznamu dat desetkrát za sekundu bude mít po hodině měření záznam velikost lehce přes 1 MB.

6.3.1 Ukládání samostatného nastavení

V případě, že je v části „Measurement settings“ ukládáno nastavení, tak je soubor pojmenován „Track-settings-“ a dále výše zmiňovaný formát data a času. Obsahem souboru je pouze jediný řádek, odpovídající přesně řádku s hodnotami nastavení jednotlivých parametrů, jak bylo zmiňováno výše.

6.4 Vytvoření protokolu o měření

Při prohlížení dat je možné vygenerovat protokol o měření stisknutím tlačítka „Generate report“. Před vytvořením zprávy je vhodné nastavit grafy v prohlížeči dat, protože se ve stavu, v jakém jsou vidět, objeví v protokolu.

Protokol je ukázán v příloze C, kde jsou ovšem zkráceny tabulky vstupních a vypočtených hodnot pro ušetření místa. Ve zprávě je:

- nadpis,
- základní informace o měření (datum vytvoření zprávy, začátek a konec měření),
- parametry nastavení měřicí tratě,
- všechny grafy prohlížeče dat v takovém stavu, jako jsou při stisknutí tlačítka „Generate report“ (přičemž při najetí myši nad graf se zobrazí jeho stručný název),
- tabulka načtených dat,
- velmi rozměrná tabulka spočtených dat a
- jednovětný popis v rámci jaké práce vznikl program, který vytvořil protokol.

Tento záznam o měření se otevře ve webovém prohlížeči, ze kterého je možné ho snadno vytisknout, či uložit.

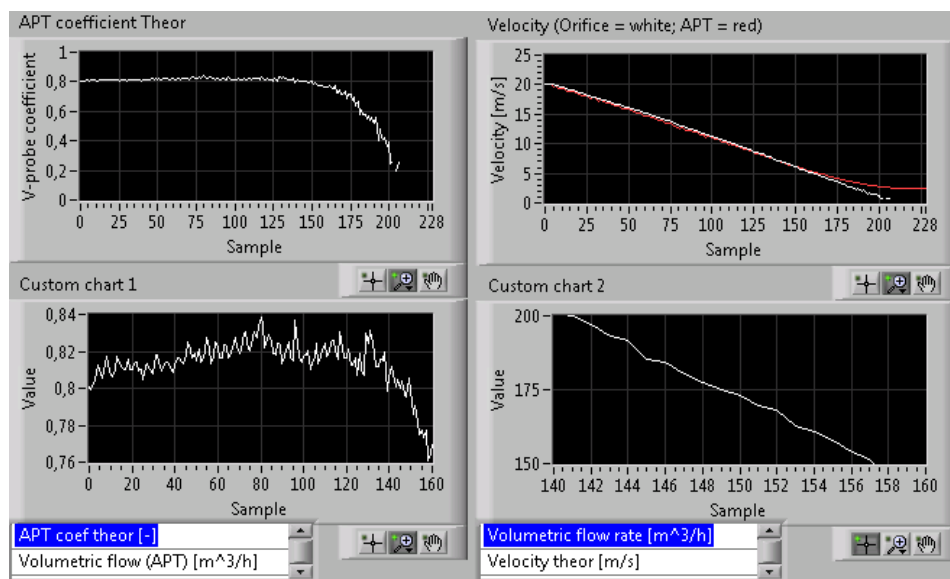
6.5 Ukázka analýzy dat

S vytvořeným software bylo úspěšně provedeno pokusné měření na měřicí trati v laboratoři. Analyzovaná data jsou vidět na obrázku 6.17. Jedná se o sérii bezmála 230 vzorků, které byly pořizovány se sekundovým rozestupem. Jak je patrné z pravého horního grafu, během měření bylo z maximálního průtoku postupně ubíráno až na průtok minimální.

V levém horním grafu je vidět, že většinu času byl počítaný teoretický koeficient víceotvorové rychlostní sondy prakticky konstantní a teprve v poslední fázi měření (při nízkém průtoku) prudce klesl. Pro podrobnější zjištění parametrů byl v levém spodním grafu nastaven také průběh koeficientu rychlostní sondy, ale rozsahy os byly upraveny tak, aby bylo dobře čitelné, že koeficient se až do 150. vzorku pohyboval v rozmezí 0,80-0,84 a následně prudce klesl.

V pravém spodním grafu byl následně nastaven průběh objemového průtoku a po přiblížení je patrné, že 150. vzorek odpovídá objemovému průtoku zhruba $175 \text{ m}^3/\text{h}$. Mohli bychom tedy konstatovat, že pro průtoky nad $175 \text{ m}^3/\text{h}$ je koeficient testované víceotvorové rychlostní sondy prakticky konstantní o hodnotě $0,82 \pm 0,02$. Pod udaný objemový průtok koeficient prudce klesá a víceotvorová rychlostní sonda tak není prakticky použita pro měření.

V tomto případě se jedná samozřejmě o idealizovaný stav. Ve skutečnosti je patrné, že průběhy jsou značně rozkolísané, což by mohlo být potlačeno průměrováním většího počtu vzorků (v tomto případě bylo průměrováno pouze 10 vzorků, které byly sejmuty s frekvencí 1 kHz). Další věcí je, že zadané hodnoty bočníků jsou jen přibližné a při exaktním měření by bylo vhodné jejich hodnoty přímo změřit. Tyto nedostatky ovšem nic nemění na faktu, že program testem prošel jako plně funkční a lze s ním opravdu velmi snadno analyzovat měření pořízená na měřicí trati.



Obr. 6.17: Ukázka analýzy dat pro určení koeficientu víceotvorové rychlostní sondy.

6.6 Import dat do Excelu

Díky zvolenému formátu ukládání do textového souboru není problém uložená data importovat do jiných programů, například do tabulkového procesoru Excel.

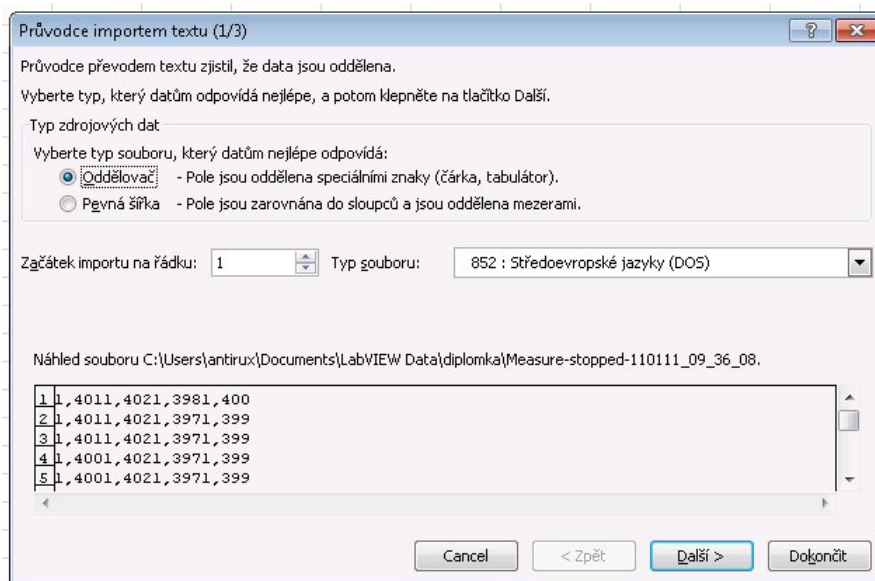
Následující postup je otestován na verzi Excel 2010. Při otevření souboru, který obsahuje uložená data, je nutné potvrdit, že soubor je opravdu v pořádku. Následně se nám objeví okno na obrázku 6.18.

Vybereme volbu, že pole jsou oddělena speciálním znakem a dáme další. V následujícím okně vybereme možnost, že oddělovačem je tabulátor. Ve třetím a posledním okně vybereme volbu obecného formátu a dokončíme import.

Naměřená data jsme tak velmi jednoduše dostali do tabulky v Excelu, jak znázorňuje obrázek 6.19.

Možnost importování je důležitější, než se může zdát. Nejenom, že můžeme použít libovolný, například statistický nástroj, na který jsme v Excelu zvyklí, ale navíc takto uložená data ve formátu .XLS jsou čitelná prakticky pro libovolného počítačového

uživatelé. Pro nás je pak jednoduché data poslat jako přílohu a nemusíme řešit, jestli náš formát dat příjemce přečte.



Obr. 6.18: První krok importu do programu MS Office – Excel

	A1				
	A	B	C	D	E
1	1,401	1,402	1,398	1,4	
2	1,401	1,402	1,397	1,399	
3	1,401	1,402	1,397	1,399	
4	1,4	1,402	1,397	1,399	
5	1,4	1,402	1,397	1,399	
6	1,4	1,402	1,397	1,399	
7	1,4	1,402	1,397	1,399	
8	1,4	1,402	1,397	1,399	
9	1,4	1,402	1,397	1,399	
10	1,4	1,402	1,397	1,401	
11	1,4	1,402	1,398	1,401	
12	1,4	1,402	1,397	1,401	
13					

Obr. 6.19: Správně importovaná data v tabulce v programu MS Office – Excel

6.7 Prostor pro vylepšení

Na následujících řádcích jsou shrnuty nápady na vylepšení stávající verze programu, které jsou nad rámec zadání:

- podstatným vylepšením programu by mohlo být automatické vyčíslování nejistot měření,
- v případě požadavků na vyšší stupeň automatizace by bylo možné přidat do programu ovládání frekvenčního měniče a program by tak sám mohl například pomalu proměřovat celý rozsah možných průtoků na trati, bez nutnosti lidské obsluhy, jak je tomu v momentálním stavu,
- pokud by měl být software použit pro dlouhodobější monitorování, bylo by vhodné přidat automatickou kompresi datových souborů (například do formátu ZIP) pro ušetření místa na disku a
- v případě, že by bylo potřebné monitorovat přesněji čas pořízení jednotlivých vzorků, bylo by možné ke každému vzorku měření ukládat časový otisk a každý vzorek by byl pak jasně časově identifikovatelný.

7 ZÁVĚR

Byla provedena rešerše v oblasti měření průtoku se zaměřením na škrticí orgány a víceotvorové rychlostní sondy a následně byly v této práci shrnuty základní poznatky potřebné pro měření s těmito snímači.

Podle upřesnění vzhledu a parametrů měřicí trati na ÚAMT FEKT VUT byl proveden návrh softwarového vybavení, které bylo následně realizováno v prostředí LabVIEW. Vytvořený systém umožňuje měření průtoku na zmíněné trati pomocí datové karty NI USB-6008, která sbírá data z normalizované clony, víceotvorové rychlostní sondy a snímače teploty. Systém počítá koeficient víceotvorové rychlostní sondy na základě měřených dat. Součástí měření je i počítání vlastností průtoku jako je viskozita či Reynoldsovo číslo.

Dále jsou v programu měřené hodnoty vynášeny do grafů a v rámci analýzy je možné data procházet i v tabulkách. Měření může být realizováno se záznamem do souboru, který je vhodný k importu do tabulkového procesoru a dále je program vybaven analyzátozem takto vytvořených souborů. Přitom zůstává aplikace plně parametrizovatelná, takže může být bez problému použita na jiné trati, či po změnách na stávající trati.

Součástí programu je i vytvoření protokolu ve formátu HTML obsahujícím informace o měření, grafy a tabulky hodnot. Na závěr byla plná funkčnost softwaru ověřena v praxi na měřicí trati včetně analýzy koeficientu víceotvorové rychlostní sondy, která byla v době měření přítomna na testovací trati.

LITERATURA

- [1] LIPTAK, B.G. *Instrument Engineers' Handbook: Process measurement and analysis*. CRC Press, 2003. ISBN 978-08-493-1083-6.
- [2] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-010-1500-9.
- [3] HAVLÍČEK, J., VLACH, J. a kol. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [4] ČSN ISO 5167-1 (25 7710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku : Část 1: Clony, dýzy a Venturiho trubice vložené do zcela vyplněného potrubí kruhového průřezu*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 68 s.
- [5] CEI IEC 751:1983. *Industrial platinum resistance thermometer sensors*. Geneva, Switzerland, 1983.
- [6] MILNE-THOMPSON, L.M. *Theoretical hydrodynamics*. New York: Dover Publications, 1996. ISBN 0486689700.
- [7] *Flow of fluids : through valves, fittings, and pipe (Metric Edition)*. New York: CRANE CO., 1982. ISBN 14-005-2731-9.
- [8] WEAST, R. C. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1984. ISBN 08-493-0484-9.
- [9] *NI USB-6008/6009 – User guide and specifications* [online]. Poslední revize 26.4.2008 [cit. 2011-05-15]. URL: <http://www.ni.com/pdf/manuals/3713031.pdf>.
- [10] *NI USB-6008 – data sheet* [online], Poslední revize 7.4.2010 [cit. 2011-05-15]. URL: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-218/lang/en>.
- [11] *National Instruments – The LabVIEW Environment* [online], [cit. 2011-05-15]. URL: <http://www.ni.com/labview/>.
- [12] MIKULČÁK, J., KRKAVEC, L., KLIMEŠ, B., BARTŮNĚK, J., ŠIROKÝ, J., PAUKOVÁ, M. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1982. 352 s.
- [13] ŠEDIVÁ, S., BEJČEK, L. Zkušební měřicí trať průtoku ÚAMT FEKT VUT Brno. *Průtok 2003 – sborník příspěvků*. Praha: Agentura Action M, 2003. s. 71-78.

- [14] KADLEC, K. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *Automa: Časopis pro automatizační techniku*, říjen 2006, roč. 12, č 10, s. 5–9. URL: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100605.pdf>.
- [15] *Víceotvorové rychlostní sondy*. Brno: Vavra s.r.o, firemní katalog.
- [16] STRNAD, R. *Přednáška Trendy v měření průtoku zemního plynu* [online]. Poslední revize 8.6.2009 [cit 2011-05-15]. URL: <http://www.cgoa.cz/cs/download/akce-2009/metrologie/02-prednaska-strnad.pdf>.
- [17] *Orifice plate* – *Wikipedia.org* [online]. Poslední revize 4.5.2011 [cit. 2011-05-15]. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Orifice_plate.
- [18] *Bernoulli's principle* – *Wikipedia.org* [online]. Poslední revize 8.5.2011 [cit. 2011-05-15]. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Bernoulli%27s_principle.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

C [–] – součinitel průtoku

C_s [K] – Sutherlandova konstanta

d [m] – průměr otvoru clony

D [m] – vnitřní průměr potrubí (clona)

D_v [m] – vnitřní průměr potrubí (rychlostní sonda)

t_{celk} [vzorků $\cdot$ s $^{-1}$] – celkový čas měření

g [m $\cdot$ s $^{-2}$] – gravitační konstanta (na Zemi často používána hodnota 9,81)

h [m] – výška

k [–] – součinitel sondy

k_{MAX} [Pa] – maximální snímaná hodnota převodníku tlaku

l_1 [m] – vzdálenost předního odběru tlaku od přední strany clonové desky

l_2 [m] – vzdálenost zadního odběru tlaku od zadní strany clonové desky

m [kg] – hmotnost

M [–] – počet vzorků, ze kterých se dělá průměr

N [s] – počet hodnot, které budou zaznamenány

NI National Instruments

p [Pa] – tlak v kapalině

p_c [Pa] – celkový tlak

p_d [Pa] – dynamický tlak

p_s [Pa] – statický tlak

p [Pa] – tlak v úplavu

p_z [Pa] – ztrátový tlak

Δp [Pa] – diferenční (statický) tlak

q_m [kg $\cdot$ s $^{-1}$] – hmotnostní průtok

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

R_B [Ω] – odpor bočníku

Re_D [–] – Reynoldsovo číslo

S [m^2] – průřez potrubí

S_v [m^2] – průřez potrubí v místě rychlostní sondy

T [$^{\circ}\text{K}$] – teplota

TT_{MAX} [$^{\circ}\text{K}$] – maximální snímaná hodnota teploty

T_{MIN} [$^{\circ}\text{K}$] – minimální snímaná hodnota teploty

t_{celk} [s] – celkový čas měření

$u(h)$ [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] – gravitační potenciál (ve výšce h)

U [V] – napětí

v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – rychlost (proudění tekutiny)

$v_{\text{stř}}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – střední osová rychlost tekutiny v potrubí

$v_{\text{stř-teor}}$ [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] – teoretická střední osová rychlost tekutiny v potrubí u
víceotvorové rychlostní sondy vypočtená z průtoku na normalizované clone

V [m^3] – objem

W [s] – čas čekání mezi jednotlivými záznamy

β [–] – poměr průměru otvoru clony a vnitřního průměru potrubí

ϵ [–] – součinitel expanze

μ [$\text{Pa} \cdot \text{s}$] – dynamická viskozita

ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] – kinematická viskozita

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

A PARAMETRY NORMALIZOVANÉ CLONY

Průměr potrubí při provozních podmínkách [mm]	81,500
Reynoldsovo číslo při provozním průtoku	108662
Rychlost při provozním průtoku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	19,87
Reynoldsovo číslo při maximálním průtoku	139708
Rychlost při maximálním průtoku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	25,54
Reynoldsovo číslo při minimálním průtoku	24837
Součinitel průtoku C_p	0,6021
Součinitel expanze ϵ	0,9947
Poměr průměrů $\beta = d/D$ při provozních podmínkách	0,7491
Průměr otvorů clony d při provoz. podmínkách [mm]	61,050
Průměr otvoru clony d při 20 °C [mm]	61,050
Přímé délky před clonou:	
Jednoduché koleno nebo T kus	28,0D
Přímá délka za clonou do nejbližší tvarovky	7,0D
Tlaková ztráta při maximálním průtoku [Pa]	1009
Reynoldsovo číslo minimální povolené	10000

B SLOVNÍČEK POUŽITÝCH POJMŮ

Pro jednotlivé části programu jsou uvedeny české ekvivalenty pro anglická označení:

Záložky

Watch online	sleduj aktuální stav
Data acquisition	záznam dat
Data browser	prohlížeč dat
Measurement settings	nastavení měření

Společná pole (vlevo a dole)

Measured values	měřené hodnoty
Orifice diff. P	diferenční tlak na cloně
APT diff. P	diferenční tlak na rychlostní sondě
Temperature	teplota
Static P	statický tlak
Calculated values	vypočtené hodnoty
Dynamic viscosity	dynamická viskozita
Reynolds number	Reynoldsovo číslo
Gas density	hustota plynu
Orifice	clona
Mass flow rate	hmotnostní průtok
Volumetric flow rate	objemový průtok
Velocity theoretical	teoretická rychlost (proudění)
APT coefficient theor	teoretický koeficient rychlostní sondy
Averaging Pitot Tube	víceotvorová rychlostní sonda
Velocity measured	měřená rychlost (proudění)
APT coefficient Set	nastavený koeficient sondy
Simulate values from DAQ	simuluj hodnoty z DAQ
Simulate	simuluj
SIM Orifice diff. P	simuluj diferenční tlak na cloně
SIM APT diff. P	simuluj diferenční tlak na rychlostní sondě
SIM Temperature	simuluj teplotu
SIM Static P	simuluj statický tlak

Záložka „Watch online“

Watch online	sleduj aktuální stav
Clear chart	vymaž obsah grafu

Záložka „Data acquisition“

Save data to folder	uložit data do složky
Save in SI units	uložit v jednotkách SI
Save settings too	uložit také nastavení
Samples to save	ulož vzorků
Time between samples	čas mezi vzorky
Total time	celkový čas
Time to end	čas do konce
Stop now	zastav (již) teď

Záložka „Data browser“

Open file	otevřít soubor
Apply settings on load?	použít nastavení při nahrání?
Settings included	nastavení zahrnuto
Data in SI units	data v jednotkách SI
Measure started	měření začalo
Measure stopped	měření skončilo
Generate report	vytvořit protokol
Redraw data	překreslit data

Záložka „Measurement settings“

Measurement settings	nastavení měření
Data rate [sample/s]	vzorkovací frekvence [vzorků/s]
Mean N samples	průměruj N vzorků
Wait time	čas čekání (mezi vzorky)
Parameters P	parametry měření statického tlaku
Shunt P	bočník statického tlaku
Transducer Max P	maximum převodníku statického tlaku
Manual P	ručně zadaná hodnota statického tlaku
Parameters T	parametry měření teploty
Min temp	minimální teplota
Max temp	maximální teplota
Shunt T	bočník teploměru
Manual T	ručně zadaná hodnota teploty
Density	hustota
Manual density	ručně zadaná hodnota hustoty
Parameters Orifice	parametry clony
Orifice flow coefficient C	součinitel průtoku clony C
Expansion factor Eps	součinitel expanze Eps
Pipe diameter D	průměr potrubí D
Orifice hole diameter d	průměr otvoru clony d
Diameters rate Beta	poměr průměrů Beta
Shunt orifice	bočník clony
Transducer max Orifice	maximum převodníku diferenčního tlaku clony
Parameters APT	parametry víceotvorové rychlostní sondy
APT coefficient k	koefficient rychlostní sondy k
Pipe diameter Dv	průměr potrubí u rychlostní sondy Dv
Shunt APT	bočník rychlostní sondy
Transducer max APT	maximum převodníku diferenčního tlaku rychlostní sondy

C PROTOKOL O MĚŘENÍ

Measurement report

Basic information

Report generated: 18/05/2011 00:58:16

Measure started: 03/05/2011 13:23:02

Measure ended: 03/05/2011 13:26:57

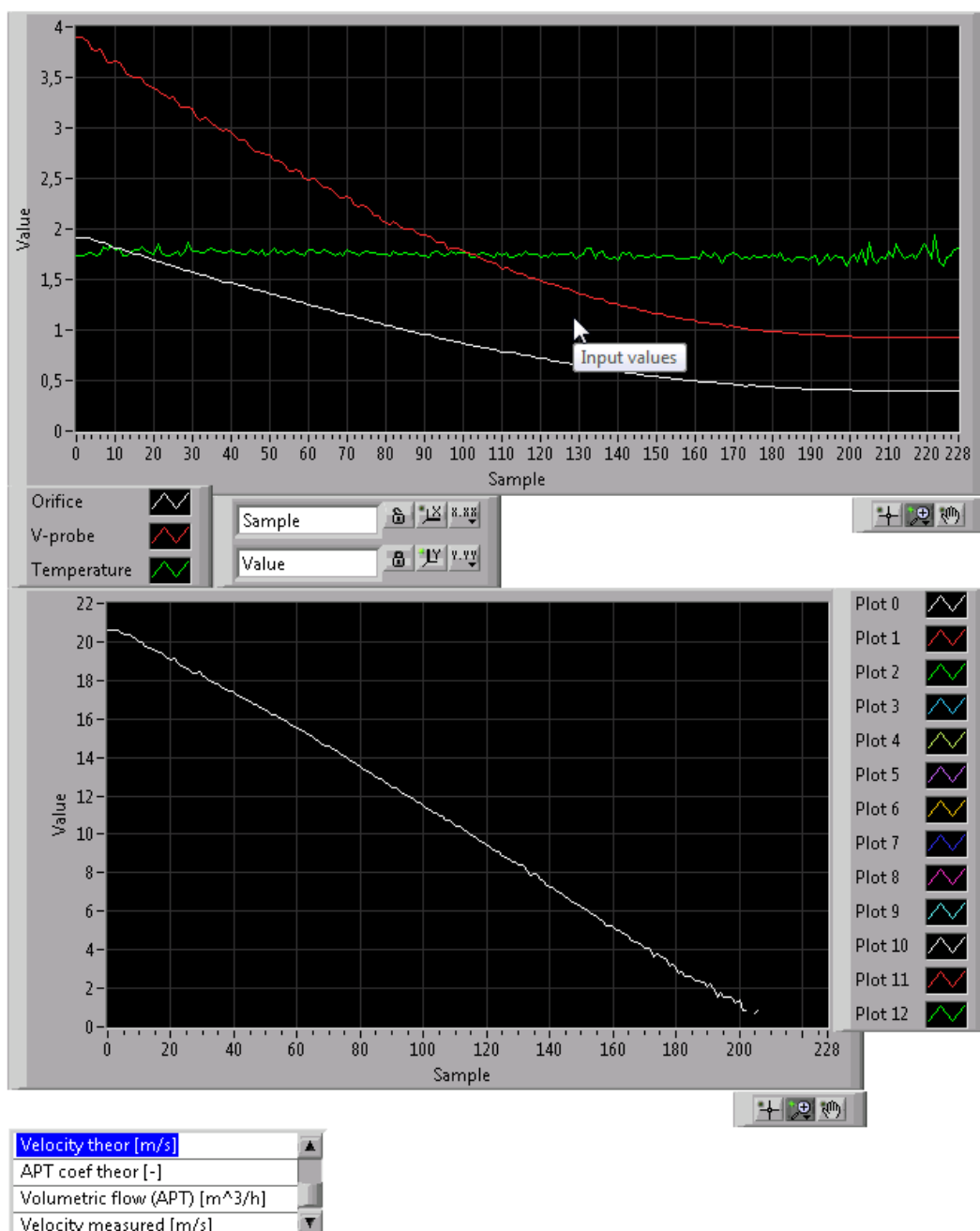
Number of samples: 229

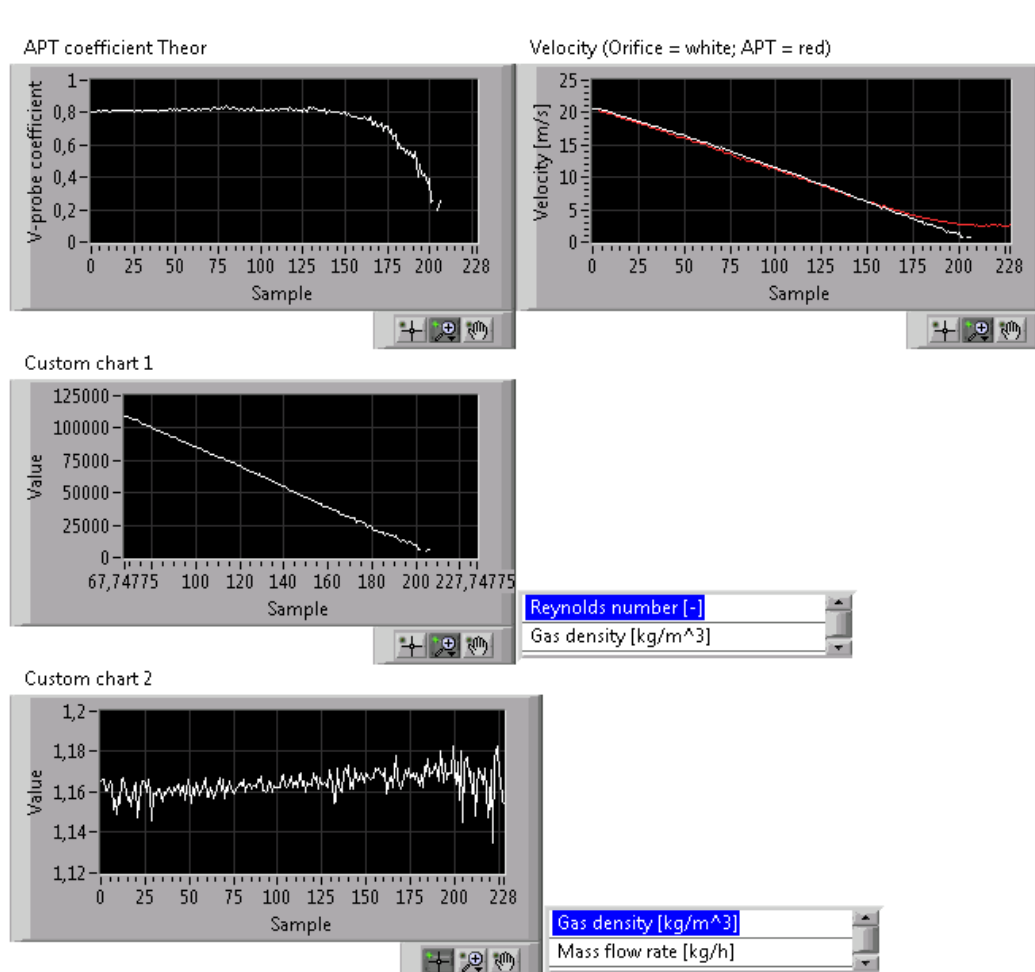
Settings

Data rate [sample/s]	1000,000
Mean N samples	10,000
Wait time [ms]	1000,000
Shunt P [Ohm]	100,000
Transducer max P [Pa]	200000,000
Manual P	1,000
Manual P value [Pa]	103600,000
Min temp [degC]	273,150
Max temp [degC]	423,150
Shunt T [Ohm]	220,000
Manual T	0,000
Manual T value [degC]	303,150
Manual density	0,000
Manual density value [kg/m^3]	1,171
Orifice flow coefficient C [-]	0,602
Expansion factor Eps [-]	0,995
Pipe diameter D [m]	0,082
Orifice hole diameter d [m]	0,061
Shunt Orifice [Ohm]	100,000

Transducer max Orifice [Pa]	3600,000
APT coefficient k [-]	0,800
Shunt APT [Ohm]	220,000
Transducer max APT [Pa]	450,000
Pipe diameter Dv [m]	0,100

Charts





Loaded data

Orifice diff. P	APT diff. P	Temperature	Static P
1,90780	3,89120	1,73890	NaN
...	...	...	...

Calculated data

Orifice diff. P [Pa]	APT diff. P [Pa]	Temperature [degC]	...
3392,55000	384,95455	36,60085	...
...	...	...	...

About

Created by Software for measuring track (Master's thesis by Stanislav Pikula) at FEEC BUT.
<http://www.feec.vutbr.cz/>