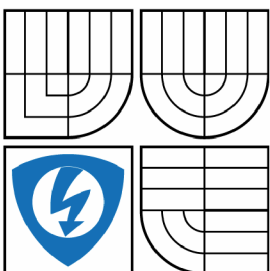




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN

LIQUID FLOW MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

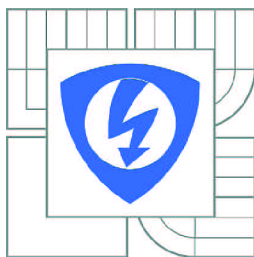
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ HRADIL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BENEŠ, 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. Jiří Hradil

ID: 73026

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Měření průtoku kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zpracujte literární rešerši v oblasti měření průtoku kapalin v rozsahu nominálního průtoku cca 60 l/min, popište vhodné metody měření a porovnejte parametry dostupných snímačů pro uvedený rozsah.
2. Navrhněte a realizujte přípravek pro měření průtoku kapalin pro využití v laboratorních cvičeních, definujte jeho parametry a proveďte výběr vhodných snímačů.
3. Vytvořte pomocný program v prostředí NI LabVIEW pro řízení experimentu a sběr a zpracování dat z instalovaných průtokoměrů.
4. Navrhněte vhodné zadání pro laboratorní cvičení. Zpracujte vzorový záznam z měření a případně stanovte nejistoty měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Ripka, P., Ďaďo, S., Kreidl, M., Novák, J.: Senzory a převodníky. Vydavatelství ČVUT, Praha. 2005. ISBN 80-01-03123-3

[2] Bejček, L., Ďaďo, S., Platil, A.: Měření průtoku a výšky hladiny. BEN, Praha. 2006. ISBN 80-7300-156-X

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, 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.

Anotace

Ve své diplomové práci se zabývám měřením průtoku. V krátkosti jsou popsány principy senzorů průtoku, jejich výhody a nevýhody. Byla navržena a sestavena aparatura pro praktické měření průtoku. Jsou instalovány 3 průtokoměry, jejichž charakteristiky byly proměřeny a vyhodnoceny. V programovém prostředí LabVIEW byl vytvořen program pro sběr a analýzu dat z průtokoměrů.

Annotation

In my master's thesis, I consider with flow measurement. In shortness is described principle of flow sensors functionality, its advantages and disadvantages. I designed and made device for practice measurement of flow. On this device are installed three flowmeters The characteristic of this flowmeters were measured and evaluated.

I made program in LabVIEW to collect and analyze information from instaled flowmeters.

Klíčová slova

Měření průtoku, ultrazvukový senzor průtoku, lopatkový senzor průtoku, přípravek pro měření průtoku, LV.

Keywords

Liquid flow measurement, ultrasonic flow sensor, paddle wheel flowmeters, device for flow measurement, LV.

Bibliografická citace:

Hradil, J. *Měření průtoku kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

Prohlášení

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

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

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Benešovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Miroslavu Uhrovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

OBSAH

1.	ÚVOD	9
2.	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	ZÁKLADNÍ POJMY	10
2.1.1	<i>Objemový průtok</i>	10
2.1.2	<i>Hmotnostní průtok</i>	10
2.1.3	<i>Druhy proudění</i>	10
2.1.4	<i>Torricelliho vzorec</i>	10
2.1.5	<i>Reynoldsovo číslo</i>	11
2.2	ZÁKLADNÍ DĚLENÍ PRŮTOKOMĚŘŮ	11
2.2.1	<i>Objemové metody</i>	11
2.2.2	<i>Rychlostní metody</i>	11
2.2.3	<i>Hmotnostní metody</i>	12
2.3	VHODNÉ TYPY PRŮTOKOMĚŘŮ.....	14
2.3.1	<i>Průřezové průtokoměry</i>	14
2.3.2	<i>Turbínové a lopatkové senzory průtoku</i>	15
2.3.3	<i>Ultrazvukové průtokoměry</i>	16
2.3.4	<i>Indukční průtokoměry</i>	19
2.3.5	<i>Tepelné průtokoměry</i>	20
2.3.6	<i>Coriolisovy průtokoměry</i>	20
2.3.7	<i>Deformační průtokoměry</i>	21
3.	PRAKTICKÁ REALIZACE MĚŘICÍ APARATURY	23
3.1	ZÁKLADNÍ KONCEPCE	23
3.2	NOSNÁ KONSTRUKCE MĚŘICÍ APARATURY	23
3.3	VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODOINSTALACE	25
3.3.1	<i>Nádoby</i>	25
3.3.2	<i>Čerpadlo</i>	26
3.3.3	<i>Vodní instalace</i>	26
3.3.4	<i>Zajištění konstantní hladiny v horní nádobě–přepad</i>	27
3.3.5	<i>Měřicí kanál</i>	27
3.4	POUŽITÉ SENZORY	28
3.4.1	<i>Umístění senzorů</i>	28
3.4.2	<i>Lopatkový průtokoměr OMEGA FTB4607</i>	28

3.4.3	<i>Ultrazvukový snímač průtoku FD613</i>	30
3.4.4	<i>Clona</i>	31
3.5	HMOTNOSTNÍ MĚŘENÍ PRŮTOKU - VÁHA.....	31
3.5.1	<i>Vyhodnocení výstupu z váhy</i>	32
3.6	ELEKTRICKÝ REGULAČNÍ VENTIL	32
3.7	ELEKTRICKÝ VENTIL.....	33
3.8	OCHRANA PŘED PŘETEČENÍM STŘEDNÍ NÁDOBY.....	34
3.9	SCHÉMA PRO MĚŘENÍ – RUČNÍ MĚŘENÍ	35
3.10	POSTUP PŘI MĚŘENÍ – RUČNÍ MĚŘENÍ	35
3.10.1	<i>Měření charakteristiky snímačů</i>	35
3.10.2	<i>Nastavení Multimetru Agilent 34410A:</i>	36
3.10.3	<i>Nastavení generátoru HP 33120A</i>	37
4.	AUTOMATIZACE MĚŘICÍHO EXPERIMENTU	38
4.1	MĚŘICÍ KARTA.....	38
4.2	PROGRAM V PROSTŘEDÍ LABVIEW	39
4.2.1	<i>Čelní panel programu</i>	39
4.2.2	<i>Koncepce programu</i>	40
4.2.3	<i>Ovládání ventilů a vstup čítače</i>	41
4.2.4	<i>Vyhodnocení signálu z hmotnostního senzoru – váhy</i>	42
4.2.5	<i>Výpočet průtoku</i>	43
4.2.6	<i>Vyhodnocení signálu z clony</i>	44
4.3	SCHÉMA PRO AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ	45
4.4	POSTUP PŘI AUTOMATICKÉM MĚŘENÍ.....	46
5.	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	47
5.1	POUŽITÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ	47
5.2	KALIBRAČNÍ KŘIVKA VÁHY	47
5.3	ZÁKLADNÍ PROMĚŘENÍ SNÍMAČŮ – RUČNÍ METODA	48
5.3.1	<i>Určení maximální chyby použitých snímačů</i>	51
5.4	PROMĚŘENÍ SNÍMAČŮ – AUTOMATIZOVANÁ METODA.....	51
5.4.1	<i>Proměření snímačů při maximálním průtoku</i>	51
5.4.2	<i>Základní proměření charakteristiky snímačů</i>	52
5.5	POSTUP PŘI VÝPOČTU NEJISTOT MĚŘENÍ	55
5.5.1	<i>Vážní čidlo</i>	56
5.5.2	<i>Ultrazvukový snímač</i>	58
5.5.3	<i>Lopatkový snímač</i>	60

6.	ZÁVĚR.....	61
7.	SEZNAM LITERATURY	62
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
9.	SEZNAM GRAFŮ	66
10.	SEZNAM TABULEK.....	67
11.	SEZNAM PŘÍLOH.....	68

1. ÚVOD

Cílem mé diplomové práce je vytvořit měřicí aparaturu, která bude sloužit ve výuce studentů. Měřicí aparatura má sloužit k praktickému měření průtoku kapalin. V současnosti totiž není k dispozici ve výuce žádná aparatura, která by studentům umožnila získat praktickou zkušenost s měřením průtoku.

V diplomové práci popíši základní principy průtokoměrů využitelných pro měření v zadaném rozsahu průtoků, představuji aspekty jejich praktické aplikace a shrnuji výhody a nevýhody jednotlivých snímačů.

Dále pak navrhnu koncepci aparatury a její mechanickou konstrukci, bude popsána prakticky realizovaná aparatura sestávající se ze 3 nádob na vodu, vodoinstalace, čerpadla, vážního čidla a v neposlední řadě snímačů průtoku. Každá část aparatury bude detailně popsána.

Na aparatuře bude provedeno proměření snímačů a ověření funkčnosti zvolené koncepce.

V programovém prostředí LabVIEW pak dále vytvořím program pro sběr a analýzu dat z instalovaných průtokoměrů a pro ovládání ventilů. Princip a funkce programu bude v práci také detailně popsána.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 ZÁKLADNÍ POJMY

Průtok patří k jedné z nejčastěji měřených veličin v průmyslové praxi. Existuje celá řada různých principů a metod jak průtok měřit. V teoretické části mé diplomové práce budou nejprve shrnuty základní pojmy náležející k měření průtoku. Dále pak zde shrnuji vhodné principy pro měření průtoku v okolí zadaného nominálního průtoku 60 l/min.

2.1.1 Objemový průtok

Objemový průtok Q_v vyjadřuje objem tekutiny V , který proteče daným průřezem průtokového kanálu za jednotku času t . Tuto definici vyjadřuje Rovnice 1.

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}; \text{m}^3, \text{s}] \quad (1)$$

2.1.2 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok Q_m vyjadřuje hmotnost tekutiny m , která proteče za daný časový interval t průtokovým kanálem. Tuto definici vyjadřuje Rovnice 2.

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}; \text{kg}, \text{s}] \quad (2)$$

2.1.3 Druhy proudění

- *Laminární proudění* – částice tekutiny se pohybují po drahách, které se navzájem nekříží.
- *Turbulentní proudění* – dráhy částic tekutiny se kříží, vytváří se víry. Proudění je charakterizováno chaotickým pohybem tekutiny nepřispívajícím k průtoku.

O tom, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění, můžeme rozhodnout na základě stanovení Reynoldsova čísla – Re . Pro $Re < 2000$ se jedná o laminární proudění. Pro $Re > 4000$ pak jde o turbulentní proudění. Pro $Re = 2000 - 4000$ pak jde o kombinaci obou proudění.

[1]

2.1.4 Torricelliho vzorec

Dle Torricelliho vzorce můžeme vypočítat výtokovou rychlost ideální kapaliny. Torricelliho vzorec je odvozen ze zákona zachování energie (z rovnosti potenciální a kinetické energie kapaliny) při zanedbání ztrát. V praxi je výtoková rychlost reálné

kapaliny vždy menší. V upravené Rovnici 3 pro výtokovou rychlost se ztráty často vyjadřují bezrozměrným součinitelem c , kterým se výraz násobí.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

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

g ... gravitační zrychlení [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]

h ... výška hladiny [m]

[7]

2.1.5 Reynoldsovo číslo

Toto číslo udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pro kruhové potrubí o světlosti D jej lze vypočítat pomocí Rovnice (4).[2]

$$\text{Re}_D = \frac{\text{setrvačné}_\text{síly}}{\text{třecí}_\text{síly}} = \frac{\rho v_s^2 D}{\eta v} = \frac{\rho v_s D}{\eta} = \frac{v_s D}{\nu} \quad (4)$$

η ... dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

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

v_s ... rychlost proudící kapaliny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

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

D ... světlost potrubí [m]

[2]

2.2 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ PRŮTOKOMĚRŮ

2.2.1 Objemové metody

„Objemové měření průtoku patří mezi absolutní metody. Měřidla využívající tento princip se proto používají pro přesná bilanční měření a jako etalony pro ověřování jiných měřidel průtoku. Objemová měřidla jsou založena na principu odměřování objemu plynu nebo kapaliny v odměrných prostorách. Lze je rozdělit na měřidla s nespojitou funkcí, kde je průtok určen přírůstkem objemu za určitou dobu a na měřidla se spojitou funkcí.“ [3] Mezi typické zástupce objemové metody patří lopátkové průtokoměry, oválové průtokoměry, průtokoměry s oběžnými koly [2].

2.2.2 Rychlostní metody

Při měření pomocí rychlostních metod měříme rychlost proudící kapaliny. Známe-li pak průřez potrubí, ve kterém průtok měříme, můžeme vypočítat objemový průtok Q_v .

Přesná znalost průřezu potrubí, resp. měřicího kanálu je pro stanovení objemového průtoku velmi důležitá. V některých aplikacích může být díky chybně určenému průřezu potrubí do měření zanesena soustavná chyba multiplikativního charakteru.

Typickými zástupci rychlostích metod měření průtoku jsou průřezové a indukční průtokoměry.

2.2.3 Hmotnostní metody

Používáme-li hmotnostní metody pro měření průtoku, tak pomocí průtokoměru měříme veličiny, které jsou přímo úměrné hmotnostnímu průtoku Q_m .

Hmotnostní metodu je možné využít v mnoha technologických procesech, kde nás zajímá hmotnostní bilance surovin. Například ve velkých potrubních systémech typu ropovodů a plynovodů.

Měření hmotnostního průtoku je možné provádět pomocí Coriolisova průtokoměru nebo také pomocí hmotnostního termoanemometru.

Metoda	Typ průtokoměru	Blíže specifikace snímače	Charakteristika principu měření	Výstup	Tlaková ztráta	Přesnost (procenta z měřícího rozsahu)	Rozsah průtoků (m ³ /h)	Poměr Q_{max}/Q_{min}	Použití
objemová	objemová měřidla	s nespojitou funkcí (zvonový krychloměr)	průtok je určen přírůstkem objemu za určitou dobu	lineární	-	lepší než 0,1	10^{-3} až 10^2	-	vhodné pro plyny a čisté a neviskózní kapaliny, zejména jako etalon
		se spojitou funkcí (membránový a bubnový plynoměr, pístové měřidlo, oválový průtokoměr)	cyklické plnění a vyprazdňování několika odměrných prostorů	lineární	střední až velká	0,1 až 2	10^{-3} až 10^3	100 : 1 až 200 : 1	především jako měřidla proteklého množství, bilanční měřidla
rychlostní	průtokoměry s měřením rozdílu tlaků	rychlostní sondy (trubice Pitotova, Prandtlowa; několikaotvorové sondy)	závislost dynamického tlaku proudícího média na rychlosti proudění	odmocnina	malá	2 až 5	1 až 10^3	3 : 1 až 10 : 1	rychlostní sondy jsou vhodné k jednorázovému měření; několikaotvorové sondy jsou vhodné i pro velmi rozměrná potrubí
		průřezová měřidla (clona, dýza, Venturiho dýza)	měření rozdílu statických tlaků před a za zúžením průtočného průřezu	odmocnina	střední až velká	0,5 až 2	10^{-4} až 10^3	4 : 1 až 8 : 1	dříve nejrozšířenější v průmyslu; nyní na ústupu ve prospěch průtokoměrů vírových, ultrazvukových atd.
		kapilární průtokoměry (laminární)	měření tlakového spádu na kapiláře	lineární	velká	0,5 až 5	10^{-5} až 10	100 : 1	zejména pro laboratorní měření
		kolenové průtokoměry	měření rozdílu tlaků tekutiny na vnitřní a vnější stěně kolena	odmocnina	bez přidavné tlakové ztráty	5 až 10	10 až 10^3	3 : 1	jednoduché měřidlo, ale s velkou nejistotou
	rotametry (plováčkové průtokoměry)	-	se změnou průtoku se mění průtočný průřez při téměř stálé tlakové ztrátě	přibližně lineární	střední	0,5 až 5	10^{-4} až 10^3	10 : 1	vhodné pro laboratorní i provozní použití; měřicí trubice musí být svislá
	náporové (deformační) průtokoměry	terčíkové průtokoměry	kinetická energie proudící tekutiny deformuje pružný prvek	odmocnina	střední až velká	5	1 až 10^4	50 : 1	vhodné k měření znečištěných, korozivních a viskózních tekutin
	turbínové a lopatkové průtokoměry	axiální průtokoměry (šroubový, turbínový)	silovým účinkem proudící tekutiny je uváděn do pohybu rotační prvek s otáčkami úměrnými rychlosti proudění	lineární	velká	0,1 až 2	10^{-4} až 10^3	20 : 1	vhodné k měření i za vysokých tlaků a teplot; neměří od nulového průtoku
		radiální průtokoměry (jedno- či několikavrtkový lopatkový průtokoměr)		lineární	velká	0,1 až 2	10^{-4} až 10^3	10 : 1	měření množství užitkové i pitné vody; neměří od nulového průtoku
	elektromagnetické indukční průtokoměry	-	elektromagnetická indukce při pohybu vodiče v magnetickém poli	lineární	žádná	0,5 až 2	10^{-3} až 10^5	30 : 1 až 100 : 1	pouze k měření elektricky vodivých kapalin; vliv teploty je zanedbatelný; necitlivé na změny hustoty, viskozity a tlaku; lze měřit obousměrně
	ultrazvukové průtokoměry	založené na Dopplerově jevu	měření změny frekvence ultrazvuku při odrazu od pohybující se nehomogenity v proudícím médiu	lineární	žádná	1 až 3	10^{-3} až 10^4	30 : 1	měřené médium musí obsahovat částice odrážející zvuk; vhodné k měření kalů a znečištěných tekutin
vyhodnocující dobu šíření ultrazvukového signálu		měření doby šíření ultrazvuku ve směru a proti směru proudění	lineární	žádná	0,1 až 1	10^{-3} až 10^4	30 : 1	náročné na technické provedení; obtížná kalibrace; nezasahuje do proudu média; lze dodatečně instalovat na povrch potrubí i měřit obousměrně	
vírové průtokoměry	-	měří se frekvence vírů vznikajících při obtékání tělesa neprůdučného tvaru	lineární	střední	0,5 až 1	10^{-1} až 10^4	20 : 1 až 50 : 1	frekvenční výstup se snadno zpracovává číslicově; nevhodné pro malé průtoky; typická náhrada klasických průřezových měřidel	
značkovací průtokoměry	průtokoměry s umělé vytvořenou značkou	měří se doba, za níž se značka unášená tekutinou přemístí z místa svého vzniku ke snímači	lineární	žádná	0,1 až 1	-	1 000 : 1	vhodné pro kalibraci instalovaných průtokoměrů; lze měřit průtok i v potrubí složitých tvarů; nevhodné pro průběžné měření	
	korelační průtokoměry	značkou je zvolená náhodná proměnná proudící tekutiny a koreluje se signály ze dvou za sebou umístěných detektorů	lineární	žádná	1	-	100 : 1	použitelné tam, kde ostatní metody selhávají; nevýhodou je složitě zařízení i zpracování signálu	
	přepady, žlaby	měřicí přepad	měření polohy hladiny před přepadem	odmocnina	malá	2 až 5	10^{-1} až 10^4	400 : 1	měření průtoku kapalin v otevřených kanálech
	Parshallův žlab	modifikace Venturiho koncepce	odmocnina	malá	2 až 5	10^{-1} až 10^5	120 : 1		
hmotnostní	Coriolisovy průtokoměry	se zakřivenou trubicí	využití Coriolisovy síly vznikající při pohybu tekutiny v rotující soustavě	lineární	střední	0,1 až 0,5	1 až 10^3	50 : 1	nezávislé na změnách tlaku, teploty, viskozity, hustoty a vodivosti média
		s přímou trubicí		lineární	minimální	0,5 až 2		500 : 1	
tepelné průtokoměry	hmotnostní termoanemometry	měří se chladičí účinek nucené konvekce na vyhřívání čidla		odmocnina	střední	0,5 až 2	10^{-4} až 1	50 : 1	vhodné i k měření velmi malých průtoků v laboratorní i provozní praxi
		kalorimetrické hmotnostní průtokoměry	měří se míra oteplení způsobená prouděním hmoty	lineární v omezené oblasti	velká	0,5 až 2	10^{-5} až 1	100 : 1	

Tabulka 1: Přehledné shrnutí vlastností průtokoměrů [3]

2.3 VHODNÉ TYPY PRŮTOKOMĚRŮ

2.3.1 Průřezové průtokoměry

Umístěním škrtícího členu do potrubí dojde k tlakové diferenci mezi místy před tímto škrtícím členem a za ním. Tato diference je úměrná rychlosti proudění daného média. Tento princip je založen na Bernoulliho rovnici a jde o velmi často využívanou metodu. [1] Při měření je tedy využita rychlostní metoda.

Přednosti průřezových průtokoměrů:

- jednoduchá konstrukce
- nízká cena
- nevyskytují se zde pohyblivé části
- vhodné pro většinu plynů a kapalin
- široký rozsah použití

Nedostatky průřezových průtokoměrů

- vliv změn hustoty, teploty, tlaku a viskozity
- tlaková ztráta na měřicím členu
- je nutný přímý úsek potrubí před a za měřicím členem
- neměří od nulového průtoku

[12]

2.3.1.1 Clony

“Slouží ke zmenšení průřezu potrubí a mají tvar desky s otvorem vložené do potrubí kolmo na směr proudění.” [1, str. 58]

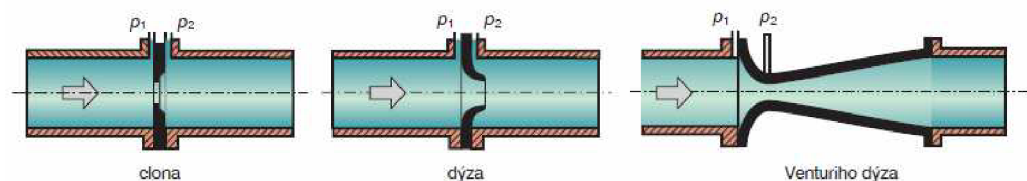
Při instalaci sondy do měřícího kanálu je nutné dbát na to, aby jak před clonou, tak za ní bylo přímé uklidňovací potrubí v dané délce. Obvykle se udává 10-15 D před clonou a 5-10 D za clonou, kde D je průměr potrubí.[1]

2.3.1.2 Dýza

Má zaoblenou vtokovou hranu, výtoková hrana je ostrá. Výhodou dýzy je menší tlaková ztráta než u clony. U dýzy má opotřebení menší vliv na přesnost než u clony [2]

2.3.1.3 Venturiho trubice

Jde v podstatě o prodlouženou dýzu, která se kuželovitě rozšiřuje, její tlaková ztráta je v porovnání s ostatními užívanými průřezovými členy nejmenší.



Obrázek 1: Průřezové průtokoměry [3]

2.3.2 Turbínové a lopatkové senzory průtoku

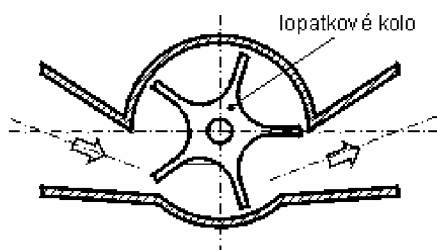
Jde o jednu z nejstarších metod měření průtoku. Tekutina protékající průtokoměrem uvádí do rotačního pohybu lopatkový rotor.

Lopatkové průtokoměry se skládají z rotoru se zakřivenými plochými lopatkami, každému otočení lopatky odpovídá jisté objemové množství.

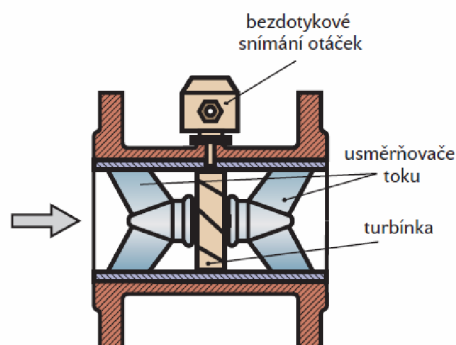
Lopatkové průtokoměry mají lopatky orientované kolmo na směr proudění, turbínové průtokoměry mají lopatkový rotor umístěný v ose proudění.

[2]

Lopatkové a turbínové průtokoměry mají při velmi malých průtocích pásmo necitlivosti, ve kterém nemají na svém výstupu žádný měronosný signál. Výstupem průtokoměrů jsou impulzy a měronosnou veličinou je frekvence nebo počet těchto impulsů. Každému otočení lopatkového kola u lopatkového průtokoměru odpovídá daný objem kapaliny. Jde tedy o objemovou metodu měření.



Obrázek 2: Lopatkový průtokoměr [9]



Obrázek 3: Turbínový průtokoměr [4]

Přednosti turbínových a lopatkových průtokoměrů:

- vhodné i pro malé průtoky (s ohledem na pásmo necitlivosti)
- malá nejistota a velmi dobrá opakovatelnost pro definovaný rozsah a viskozitu
- vhodné i pro velké tlaky (desítky MPa)

Nedostatky turbínových a lopatkových průtokoměrů:

- nevhodné pro kapaliny s velkou viskozitou
- viskozita se během měření nesmí měnit
- vhodné jen pro čisté kapaliny a plyny
- značná tlaková ztráta

[12]

2.3.3 Ultrazvukové průtokoměry

„Jsou založeny na změně rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukového vlnění prouděním tekutiny. Ultrazvukové vlnění se šíří mezi vysílačem a přijímačem, které jsou umístěny na stěnách potrubí, v němž se měřená tekutina pohybuje rychlostí v . Proudění vyvolá změnu rychlosti ultrazvukového vlnění úměrnou průmětu vektoru rychlosti pohybu tekutiny v do vektoru rychlosti ultrazvukového vlnění c_0 .“ [1]

Ultrazvukem nazýváme kmitání částic pružného prostředí nad rozsahem slyšitelným pro lidský sluch, řekněme tedy v pásmu od 20 kHz výše.

Zdrojem vlnění schopného vyvolat sluchový vjem, tzn. zdrojem zvuku je každé periodicky i neperiodicky se pohybující (kmitající nebo chvějící se) těleso, které předává mechanickou energii látkovému prostředí, se kterým se stýká. Ultrazvuk je obvykle generován piezoelektrickým měničem.

2.3.3.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry

Měří dobu průchodu ultrazvukového vlnění mezi vysílačem a přijímačem.

Jedno z možných uspořádání je na níže uvedeném obrázku 4. Jsou zde vidět 2 vysílače a 2 přijímače. Jeden ultrazvukový signál je vyslán ve směru proudění kapaliny a druhý proti směru proudění. Vyhodnocují se časové rozdíly při průchodu impulsů v obou směrech šíření. 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 příjmem impulsu pro jednotlivé dvojice vysílače a přijímače budou t_1 a t_2 a jejich rozdíl $\Delta t = t_2 - t_1$. Bude poté platit Rovnice 5:

$$\Delta t = \frac{2Lv \cos \alpha}{c^2 - v^2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

což za předpokladu, že $v^2 \ll c^2$, lze zjednodušit a upravit na

$$v = \frac{c^2}{2L \cos \alpha} \Delta t \quad (6)$$

a při použití substituce $c = 2L/(t_1 + t_2)$

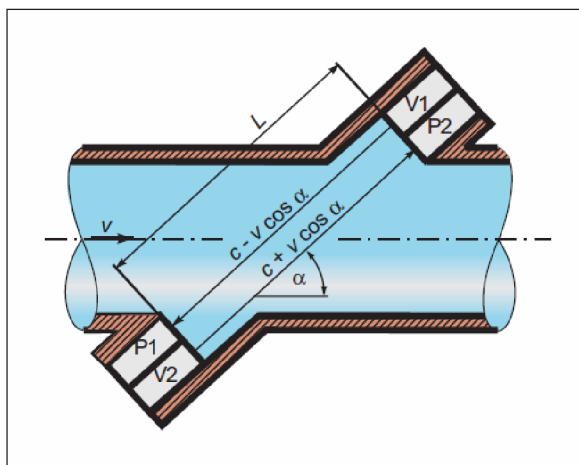
se z této rovnice získají výsledné vztahy pro střední rychlost a objemový průtok:

$$v = \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)^2} \cdot \frac{2L}{\cos \alpha} \quad (7)$$

$$Q_v = \frac{\pi D^2 L}{2 \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta t}{(t_1 + t_2)} \quad (8)$$

„Protože se ve výsledném vztahu nevyskytuje rychlost šíření ultrazvuku v médiu c , není ani údaj průtokoměru závislý na složení, teplotě a tlaku média.“

[4]



Obrázek 4: Přímý ultrazvukový průtokoměr-princip[4]

2.3.3.2 Zpětnovazební ultrazvukové průtokoměry

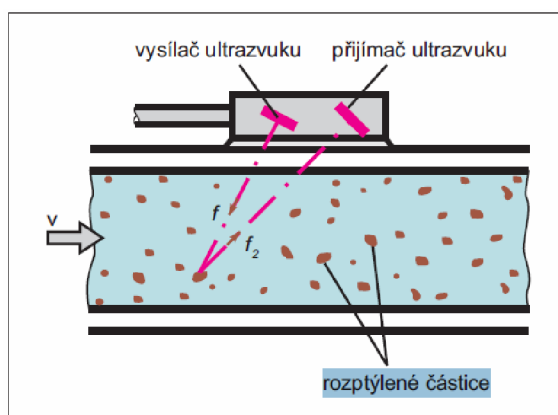
„Výstupní signál z přijímače je po zesílení a úpravách fáze přiveden do měniče, pracujícího v režimu vysílače. Vzniká tak zpětnovazební zapojení tvořící oscilátor. Signál z přijímače může být spojitý harmonický nebo ve tvaru impulzů harmonického signálu.“[1]

2.3.3.3 Dopplerovy průtokoměry

„Doplerův jev byl objeven roku 1842 rakouským fyzikem Christianem Dopplerem, který teoreticky předpověděl, že vlna odražená od pohybujícího se objektu bude mít posunutou frekvenci.“ [6,76-1]

Experimentálně byl tento jev potvrzen roku 1846 Bysem Ballotem v Holandsku.[5]

Tyto průtokoměry lze využít v případě, že měřené médium v sobě obsahuje částice, které odrážejí zvuk. Jde například o drobné nečistoty, bublinky.[4]



Obrázek 5: Princip Dopplerova průtokoměru[4]

Přednosti ultrazvukových průtokoměrů:

- široký rozsah měřených průtoků
- vhodné i pro velké průměry potrubí
- žádné pohyblivé části
- nulová tlaková ztráta
- rychlá odezva
- možnost měřit průtok v obou směrech

Nedostatky ultrazvukových průtokoměrů:

- změny teploty a hustoty média ovlivňují ultrazvukový signál
- potrubí musí být zaplněné
- vyšší cena
- při využití Dopplerova efektu musí měřené médium obsahovat drobné částice, nebo např. bublinky

[12]

2.3.4 Indukční průtokoměry

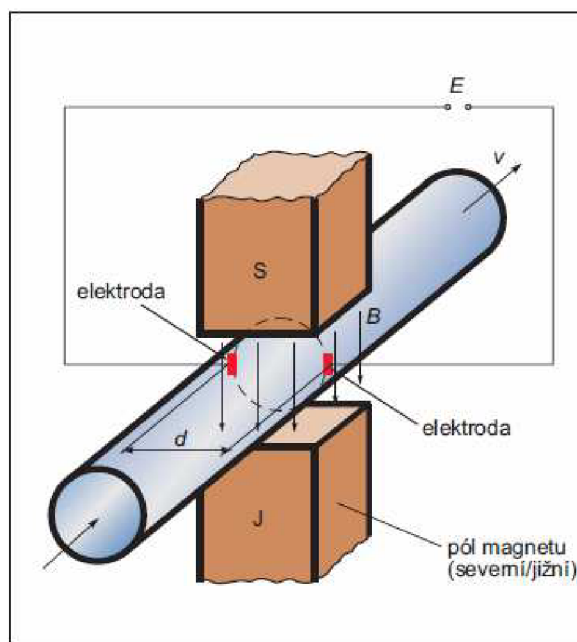
„Vznik napětí na elektrodách při pohybu vodivé tekutiny v magnetickém poli je základem činnosti indukčního průtokoměru, jelikož se vznik napětí na elektrodách při proudění vysvětluje Faradayovým indukčním zákonem. Ve skutečnosti je vznik napětí důsledkem Lorentzova zákona. Označení lépe vyznačující podstatu průtokoměru je *elektromagnetický průtokoměr*.“ [2]

Pohybující se vodič je v případě indukčního průtokoměru tvořen elektricky vodivou kapalinou. Permanentní magnet nebo elektromagnet pak vytváří magnetické pole, které prochází jak potrubím tak i kapalinou. [4]

Pro správnou činnost indukčního průtokoměru je nutné, aby měřená kapalina byla elektricky vodivá, musí být také antimagnetická. Většina kapalin na bázi vody toto splňuje, ale roztoky, jejichž hlavní složkou je ropa toto nesplňují.

Úsek potrubí se snímacími elektrodami musí být zhotoven z magneticky a elektricky nevodivého materiálu. V případě kovového materiálu musí být její vnitřní povrch pokryt izolací.

Při měření je třeba magnetické pole s konstantní hodnotou magnetické indukce B . [14]



Obrázek 6: Princip indukčního průtokoměru [4]

Přednosti indukčních průtokoměrů:

- nulová tlaková ztráta
- neobsahuje pohyblivé části
- možnost měření průtoku dvěma směry

- vhodné pro agresivní média, znečištěné kapaliny a kaly
- malá nejistota měření

Nedostatky indukčních průtokoměrů:

- měří pouze elektricky vodivé kapaliny
- většinou vyžadují zcela zaplněné potrubí
- vyšší cena

[12]

2.3.5 Tepelné průtokoměry

Jejich základním principem je výměna tepelné energie mezi proudící tekutinou a zdrojem tepelné energie. V nejjednodušší formě jde o vyhřívané topné tělísko, které se umístí do proudící tekutiny. Prouděním tekutiny je tělísko ochlazováno úměrně rychlosti proudění kapaliny. Existuje také opačné provedení, kdy je pomocí topného tělíska oteplována tekutina.

Tepelné průtokoměry se hodí především pro měření průtoku čistých kapalin a plynů. K jejich výhodám patří především možnost přímého měření hmotnostního průtoku. [2]

Přednosti tepelných průtokoměrů:

- měří hmotnostní průtok
- vhodné i pro měření velmi malých průtoků

Nedostatky tepelných průtokoměrů:

- větší nejistota měření
- nutná znalost složení média [12]

2.3.6 Coriolisovy průtokoměry

„Využívají Coriolisovy síly, která působí na těleso o hmotnosti m , pohybující se přímočaře rychlostí v v soustavě, otáčející se úhlovou rychlostí ω “ [2].

V současnosti jde o nejpoužívanější metodu pro měření hmotnostního průtoku. Tato metoda je považována za jednu z nejpřesnějších metod měření hmotnostního průtoku.

Jde o velmi přesnou metodu měření, velkou výhodou těchto průtokoměrů je též to, že průtok je v podstatě nezávislý na teplotě, tlaku, viskozitě a obsahu pevných částic v tekutině.

[10]

Coriolisovy průtokoměry jsou rozšířeny v mnoha oblastech průmyslu, protože výrobní bilance většiny průmyslových celků je prováděna hmotnostně.



Obrázek 7: Příklad využití Coriolisova průtokoměru v čerpací stanici LPG [11]

Přednosti Coriolisových průtokoměrů:

- Přímé měření hmotnostního průtoku
- Malá nejistota měření (0,1%)
- Nezáleží na druhu média
- Nevyžaduje přímé úseky potrubí před a za průtokoměrem
- Neobsahuje pohyblivé části
- Možnost obousměrného měření
- Dobré dynamické vlastnosti

Nedostatky Coriolisových průtokoměrů:

- Nevhodné pro velké průměry potrubí
- U některých provedení velká tlaková ztráta
- Vysoká cena

[12]

2.3.7 Deformační průtokoměry

„Deformační průtokoměry využívají kinetické energie proudící tekutiny k deformaci pružného členu (reakční desky) různého tvaru (kruhový terčík, nosník, pádlo).“ [2]

V případě, že tento člen je symetrický, je možné měřit průtok v obou směrech. Síla, kterou vyvolává dynamický tlak tekutiny působí na plochu terčíku S umístěnou

v proudu tekutiny. Pro přesné vyhodnocení síly působící na terčík se používají odporové tenzometry.

Přednosti deformačních průtokoměrů:

- Vhodné pro široký rozsah aplikací
- Vhodné pro měření znečištěných nebo korozivních tekutin

Nedostatky deformačních průtokoměrů:

- Nízká přesnost měření
- Nevhodné pro kaly a tekutiny s vysokou viskozitou

[2]

3. PRAKTICKÁ REALIZACE MĚŘICÍ APARATURY

3.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE

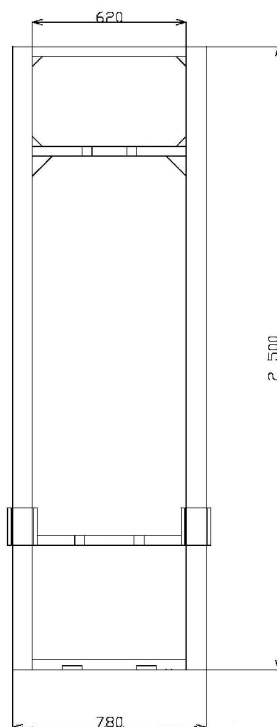
Základní koncepce měřicí aparatury vychází z uzavřeného vodního hospodářství s oběhovým čerpadlem.

Čerpadlo čerpá vodu ze spodní - zásobní nádrže do nádrže horní, ve které je pomocí přepadu zajištěna konstantní výška hladiny. Ve spodní části horní nádoby se nachází výtok pro měřicí kanál. Voda se po protečení měřicím kanálem dostane do střední nádrže, která je umístěna na váze.

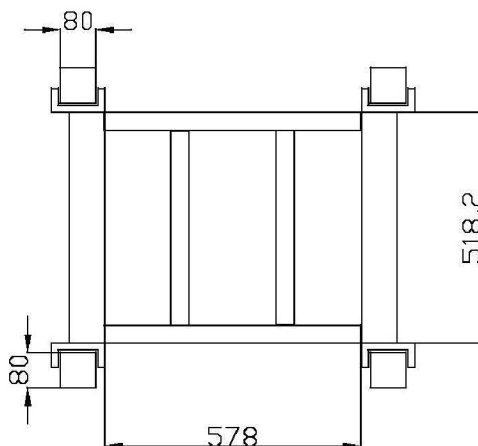
Změřením přírůstku hmotnosti v daném čase jsme schopni vypočítat hmotnostní průtok, váha slouží jako referenční měřidlo.

Parametry přípravku byly navrženy po teoretickém výpočtu pomocí Torricelliho vzorce a praktickém experimentu, při kterém byla ještě ověřena výtoková rychlost kapaliny při dané výšce hladiny. Tato problematika byla řešena především v rámci Semestrální práce 1, proto zde není již podrobněji rozváděna.

3.2 NOSNÁ KONSTRUKCE MĚŘICÍ APARATURY



Obrázek 8: Nosná konstrukce měřicí aparatury



Obrázek 9: Půdorys měřicí aparatury

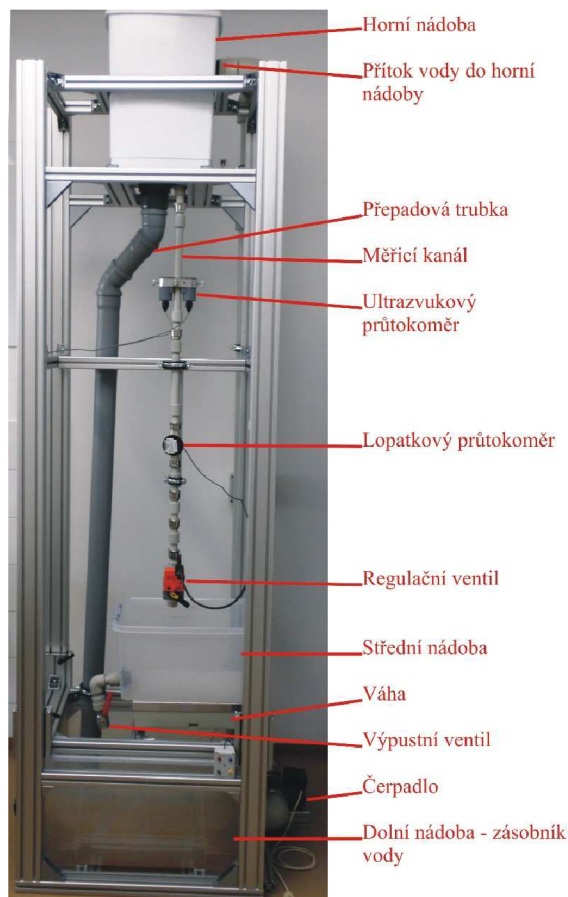
Nosná konstrukce celého přípravku je tvořena hliníkovými profily, které jsou spojeny pomocí trojúhelníkových spojek, matic a šroubů. Výška hliníkové konstrukce je 2,5 metru.

Konstrukce je dostatečně dimenzována, díky tomu je zajištěna i její stabilita a odolnost případným nehodám, při kterým by mohlo dojít například k převrácení aparatury.

Zvolená technologie konstrukce zajišťuje vysokou variabilitu celého systému, kdy je možné jednotlivé příčky konstrukce různě posouvat a tím docílit požadovaného uspořádání.

Střední příčka, na které je umístěna váha, je navíc uložena na kluzných plastových elementech a zajištěna čtyřmi kličkami. Díky tomu je možné, v řádu desítek sekund bez použití nástrojů s touto příčkou manipulovat ve vertikální ose.

Horní nádoba je pojištěna proti převrácení pomocí profilů, které ještě více zpevňují konstrukci. Skutečné uspořádání jednotlivých příček se může mírně lišit od výše uvedeného uspořádání. Základní vnější rozměry jsou neměnné, ale například poloha horních příček se může mírně měnit. Na Obrázku 10, je vidět již osazená nosná konstrukce ve stavu, v jakém je aparatura nyní připravena pro měření.



Obrázek 10: Měřicí aparatura – celkový pohled

3.3 VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ A VODOINSTALACE

3.3.1 Nádoby

Základem vodního hospodářství jsou 3 plastové nádoby. Spodní nádoba s objemem 121 l, střední nádoba s objemem 38 l a horní nádoba s objemem 50 l. Tyto objemy jsou maximální a v praxi v žádném případě nedoporučuji objem plně využít. Vždy musí být dostatečná bezpečnostní rezerva, toto se týká především střední nádoby u které může dojít při chybné obsluze k přetečení.

Spodní nádoba byla dimenzována tak, aby při plné horní a střední nádobě bylo v této nádobě dostatečné množství vody, aby mohlo být plynule zásobováno čerpadlo, resp. horní nádoba. Současně má takovou rezervu objemu, aby při vypuštění horní i spodní nádoby byla ve spodní nádobě dostatečná rezerva a nedošlo k přetečení.

Spodní nádoba je těsně zasazena do hliníkové konstrukce a je navíc zpevněna na okrajích hliníkovými profily. Toto je nutné především vzhledem k tomu, že nádoba není

primárně určena na vodu a je třeba ji zpevnit, aby nemohlo v krajním případě dojít k jejímu protržení.

3.3.2 Čerpadlo

Oběh vody je zajištěn čerpadlem Grundfos UPS 32-55 180, které čerpá vodu ze spodní do horní nádrže.

Čerpadlo je vybaveno třípolohovým přepínačem, kdy pro zajištění konstantní hladiny stačí 2. rychlostní stupeň. Pro případ zvýšení průtoku (například při změnách v měřicím kanálu) je k dispozici ještě třetí rychlostní stupeň. Čerpadlo pracuje velmi tiše, prakticky není slyšet jeho činnost.

Čerpadlo potřebuje být pro svou činnost trvale zavodněno, je tedy umístěno v nejnižším možném místě ve spodní části aparatury. Čerpadlo leží na hliníkové podpěře a ve své poloze je zajištěno dvoupalcovým potrubím, na které je připevněno.



Obrázek 11: Čerpadlo Grundfos UPS 32-55 180

3.3.3 Vodní instalace

Okruh čerpadla je vyřešen pomocí dvoupalcové plastové vodovodní trubky, spojky a kolena jsou řešeny technologií svařování.

Jako přepad slouží odpadní trubky o průměru 75 mm, které jsou dostatečně dimenzovány, aby v žádném případě nemohlo dojít ke zvýšení hladiny nad okraj horní nádoby.

Výpustný ventil, resp. potrubí sloužící k vypuštění střední nádoby, má průměr 1 palec a opět bylo dimenzováno tak, aby při maximálním průtoku měřicím kanálem a otevření ventilu hladina ve střední nádobě klesala. Toto však platí beze zbytku především pro mechanický ventil. Při instalaci elektrického ventilu se totiž ukázalo, že

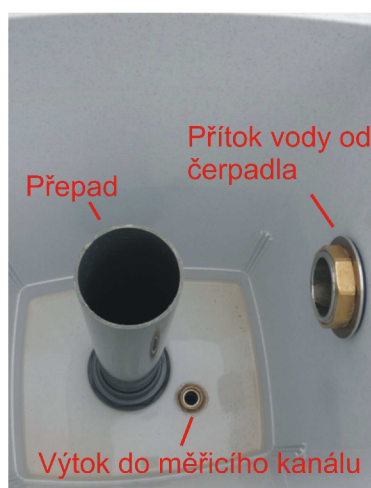
jeho tlaková ztráta je tak velká, že při maximálním průtoku dochází k velmi pozvolnému nárůstu hladiny.

3.3.4 Zajištění konstantní hladiny v horní nádobě–přepad

Horní nádoba o objemu 50 litrů slouží jako zásobník vody a současně udržuje konstantní výšku hladiny pro konstantní velikost průtoku, což je zajištěno přepadem. Délku přepadové trubky je v základním uspořádání 40 cm, lze ji ovšem v určitém rozsahu měnit (cca +5 až -10 cm).

Především při zkrácení přepadové trubky je třeba brát v úvahu umístění přítoku vody, protože při umístění přepadové trubky pod úroveň přítoku by docházelo ke kolísání hladiny.

Uspořádání přepadu je vidět na následujícím Obrázku 12.



Obrázek 12: Zajištění konstantní hladiny- přepad

3.3.5 Měřicí kanál

Měřicí kanál se skládá opět z plastových trubek tentokrát o průměru $\frac{3}{4}$ palce. Dle označení $\frac{3}{4}$ palce by se dalo předpokládat, že vnitřní průměr potrubí bude $0,75 * 2,54\text{cm} = 1,905\text{cm}$. Ve skutečnosti se však po proměření digitálním posuvným měřidlem ukázalo, že průměr potrubí je 1,795 cm. Znat přesně průřez potrubí je velmi důležité při využití rychlostní metody a následném stanovení objemového průtoku.

Měřicí kanál poskytuje vysokou variabilitu, kdy je možné pomocí technologie kovových spojek měnit délku potrubí před i za snímači.

V základním uspořádání je délka měřicího kanálu 145 cm. Tuto délku lze snížit v případě potřeby. Výška hladiny v horní nádobě je 43 cm, tuto výšku lze pak v případě

požadavku zkrácením přepadu upravit směrem dolů. V základním uspořádání tedy lze brát rozdíl výšky hladin jako 188 cm.



Obrázek 13: Různé délky potrubí pro měřicí kanál

3.4 POUŽITÉ SENZORY

3.4.1 Umístění senzorů

Měřicí kanál vychází ze dna horní nádoby. Tento kanál se skládá z několika variabilních vzájemně zaměnitelných dílů potrubí různé délky. Tyto elementy jsou sériově spojeny a vytváří tak souvislé potrubí. Součástí měřicího kanálu je lopatkový průtokoměr a také ultrazvukový průtokoměr, jejich uspořádání je opět velmi variabilní.

3.4.2 Lopatkový průtokoměr OMEGA FTB4607

Jedná se o lopatkový průtokoměr, u něhož jsou otáčky snímány Halovou sondou. Měřicí rozsah je 0,83 – 75,7 l/min, jednomu protečenému litru odpovídá 20 pulsů na výstupu průtokoměru, tzn 1 puls odpovídá 0,05 l. Výrobce udávaná přesnost v měřicím rozsahu je 1,5 % ze čtené hodnoty.

Tento průtokoměr je konstruován pro dlouhodobé měření průtoku vody, je dodáván se zabudovaným filtrem, který brání vniknutí předmětů, které by mohly poškodit měřicí lopatky.

Vlivem mechanického tření má každý lopatkový průtokoměr pásmo necitlivosti, tzn. že se při velmi malých průtocích lopatka vůbec neotáčí.



Obrázek 14: Lopatkový průtokoměr

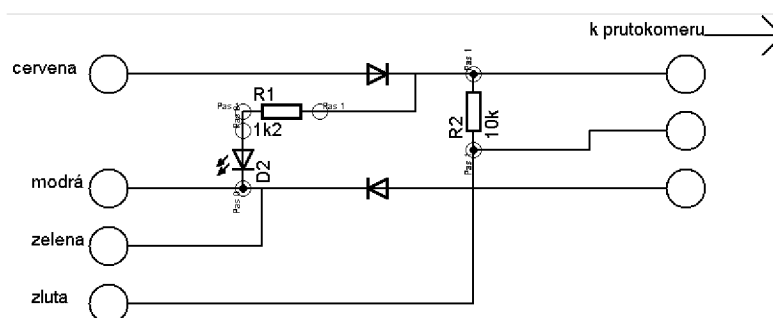
3.4.2.1 Vyhodnocovací obvod

Signál průtokoměru vyhodnocujeme pomocí čítače, jenž připojíme ke „krabičce - přípravku“, ke které je připojen průtokoměr. Tato „krabička“ má také ochranný význam (aby nedošlo k přepólování průtokoměru) .

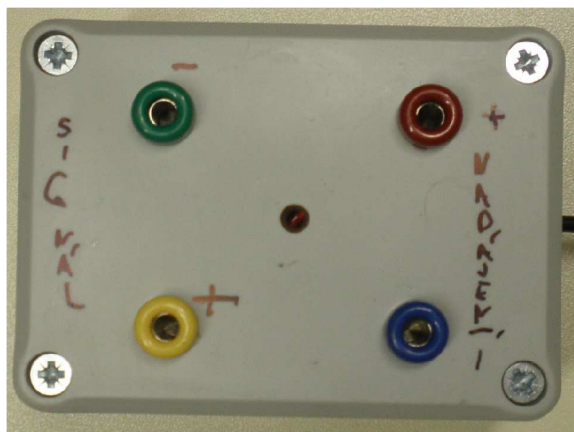
Význam jednotlivých zdířek je shrnut v tabulce 2.

Barva zdířky	význam
červená	napájení +15 V
modrá	zem (napájení)
zelená	zem (signál)
žlutá	signál

Tabulka 2: Význam zdířek přípravku



Obrázek 15: Vnitřní schéma zapojení přípravku



Obrázek 16: Přípravek pro připojení lopatkového průtokoměru

3.4.3 Ultrazvukový snímač průtoku FD613

Jedná se o přenosný ultrazvukový průtokoměr FD613, rozsah měření 0,1 až 9,0 m/s. Přesnost v celém rozsahu měření je $\pm 2\%$ z maximálního rozsahu.

Skládá se ze dvou snímačů, které se umístí na měřicí kanál. Pomocí kabelu jsou tyto snímače připojeny k vyhodnocovací a měřicí jednotce.

Jde o princip přímého ultrazvukového průtokoměru viz Obrázek 4, vyhodnocovací jednotka průtokoměru je schopna zpracovávat i signál ze snímače pracujícím na Dopplerově principu viz Obrázek 5. Snímač pracující na Dopplerově principu ale nebyl k dispozici (je dodáván pouze k potrubím s větším průměrem, větším jak 1 palec), takže nebylo možné provést měření tímto principem.

Při montáži snímačů na měřicí kanál je doporučeno použít speciální vazební pastu.

Ovládání jednotky je velmi jednoduché, obsahuje pouze 2 tlačítka „ON/OFF“ a přepínač mezi „FT/SEC“ a M/SEC. Převodní vztah mezi těmito jednotkami je: $1 \text{ m/s} = 3,2808 \text{ ft/s}$.

Výhodou tohoto průtokoměru je jednoduchá montáž a s tím související možnost měřit prakticky v libovolném místě bez jakéhokoliv zásahu do měřicího procesu. Pro přesné měření je velmi důležitá přesná znalost průřezu potrubí, na kterém je prováděno měření. Bohužel dokumentace výrobce k tomuto přístroji je velmi stručná, kdy prakticky jedině dva údaje udané výrobcem jsou přesnost měření a rozsah měření.



Obrázek 17: Ultrazvukové snímače a vyhodnocovací jednotka

3.4.4 Clona

V současné době je přípravek připraven také pro instalaci průřezového snímače průtoku – clony.

Pro clonu je již provedena příprava pro umístění v dolní části měřicího kanálu, kde bude clona vložena mezi spojky a pomocí diferenčního tlakoměru bude vyhodnocována tlaková ztráta na cloně.

3.5 HMOTNOSTNÍ MĚŘENÍ PRŮTOKU - VÁHA

Jedná se o průmyslový snímač váhy pro absolutní měření průtoku OMEGA LSC 700-100, rozsah do 100 lb, tzn. 45 kg.

Samotná váha obsahuje pouze tenzometrický most, most proto musí být napájen z externího stabilizovaného zdroje. Výstup z váhy je přiveden do zesilovače, který zesiluje výstupní napětí z tenzometrického mostu.

Základní parametry váhy dle výrobce:

Linearita: 0,01%

Hystereze: 0,02%

Maximální napájecí napětí je 15 V.

Váha je připevněna závitovými tyčemi ke střední pohyblivé příčce, čímž je zajištěna variabilita její polohy ve výšce a zároveň je zajištěna její pevná poloha.

Váha je vybavena vestavěnou vodováhou, umístěnou pod nerezovým krytem, při přemístění aparatury je potřeba provést vyvážení váhy.



Obrázek 18: Váha OMEGA LSC700-100

3.5.1 Vyhodnocení výstupu z váhy

Pro zesílení výstupu z váhy je použit zesilovač BUSTER 9235.

Zesílení je přizpůsobeno citlivosti použitého tenzometrického mostu 1 mV/V.

Napájení zesilovače je 15-30 V, pro měření jsem používal napětí 15 V.

Fialový drát se připojuje na +15 V a hnědý na zem.



Obrázek 19: Zesilovač výstupu váhy BURSTER 9235

3.6 ELEKTRICKÝ REGULAČNÍ VENTIL

Na konci měřicího kanálu je umístěn elektricky ovládaný regulační ventil, pomocí kterého je možné regulovat průtok.

Pohon ventilu je ovládán napětím 2-10 V, zvolené napětí odpovídá úhlu natočení pohonu a tím pádem i ventilu, řízení má lineární průběh. Při 2 V je ventil zcela zavřen, při 10 V zcela otevřen. Rychlost pohonu není příliš vysoká, proto je potřeba vždy vyčkat, než je dosaženo požadované polohy a až poté začít s měřením. Ventil je napájen stejnosměrným napětím 24 V, červený vodič s označením „2“ se připojuje na +24 V, černý s označením „1“ na zemní potenciál. Na bílý vodič s označením „3“ se přivádí ovládací signál.

Ventil umožňuje i ruční ovládání, kdy po stisku černého tlačítka v pravé horní části je možné ventil rychle uzavřít resp. otevřít nezávisle na elektrickém signálu na vstupu ventilu. Průtočná charakteristika ventilu není lineárně úměrná ovládacímu napětí na jeho vstupu, ale je rovnoprocentní, což je výhodné především pro topenářské soustavy. Vhodný lineární ventil se nám v daných parametrech nepodařilo získat.



Obrázek 20: Regulační ventil R219 s pohonem LR24A-SR (Belimo)

3.7 ELEKTRICKÝ VENTIL

Pro vypouštění střední nádoby slouží elektricky ovládaný dvoupolohový ventil (otevřeno - zavřeno). Tento je možné při připojení přes vhodný výkonový spínač, resp. relé ovládat z prostředí labVIEW. Bez napětí je ventil uzavřen a po přivedení ovládacího napětí 24 V dojde k jeho otevření a vypouštění střední nádoby. Původně byl zamýšlen ventil, který by byl bez napětí otevřen, byl ovšem problém s dostupností tohoto ventilu, proto byla zvolena tato varianta.



Obrázek 21: Elektrický vypustní ventil

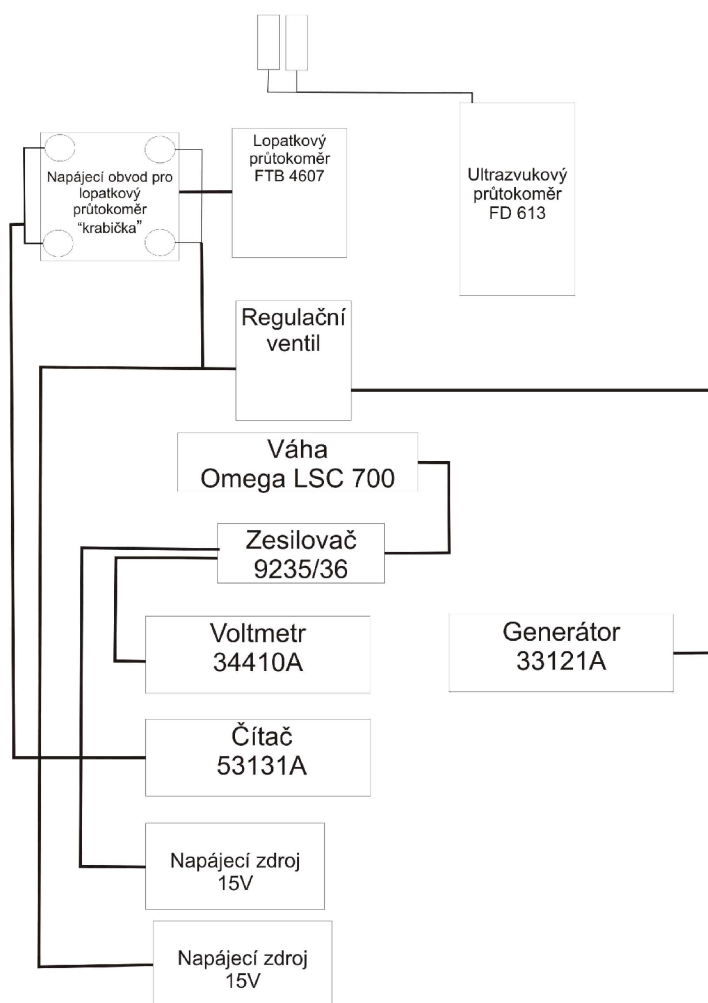
3.8 OCHRANA PŘED PŘETEČENÍM STŘEDNÍ NÁDOBY

Jako ochrana před možným přetečením střední nádoby je počítáno s čidlem hladiny Kemo M158. Toto by mělo být připojeno na zvukovou signalizaci, čímž by upozornilo obsluhu na nutnost uzavřít přítok vody, resp. přímo na vypouštěcí ventil, který by přes svůj spínaný výstup mohlo sepnout.



Obrázek 22: Čidlo hladiny

3.9 SCHÉMA PRO MĚŘENÍ – RUČNÍ MĚŘENÍ



Obrázek 23: Elektrické schéma pro ruční měření

3.10 POSTUP PŘI MĚŘENÍ – RUČNÍ MĚŘENÍ

3.10.1 Měření charakteristiky snímačů

Bezpečnostní upozornění: Voda ve střední nádobě nikdy nesmí překročit rysku „Maximální hladina“! Toto zajistíme výpustným ventilem střední nádoby, při jakémkoliv přerušení měření vždy dbáme na to, aby byl výpustní ventil otevřen!

1. Provedeme zapojení podle schématu a necháme zkontrolovat vyučujícím.
2. Zapneme napájení.
3. Nastavíme napětí na regulačním ventilu 2 V, čímž je tento uzavřen.
4. Zapneme čerpadlo.

5. Ve chvíli, kdy je slyšet voda proudící přepadem (cca. 30 s) je aparatura připravena k měření.
6. Zvýšíme napětí na regulačním ventilu na hodnotu, při které již začne proudit voda měřicím kanálem. Současně dbáme na to, aby byl výpustný ventil z měřicí nádoby otevřen.
7. Po dosažení požadované polohy regulačního ventilu (regulační ventil je relativně pomalý) uzavřeme vypouštěcí ventil ze střední nádoby.
8. Následně odečteme napětí na výstupu zesilovače připojeného k váze a současně zapneme stopky, napětí si zaznamenáme.
9. Během napouštění střední nádoby si zaznamenáme údaje o průtoku z ultrazvukového snímače a lopatkového průtokoměru.
10. Poté po uplynutí určité doby (při nižších průtocích doporučuji minimálně 60 s), po kterou se plní střední nádoba, odečteme napětí na výstupu zesilovače a poznamenejeme si jak napětí, tak čas. Pozn. **Při měření nesmí nikdy překročit hladina střední nádoby rysku „Maximální hladina“!**
11. Vypustíme vodu ze střední nádoby a současně nastavíme na regulačním ventilu další měřenou polohu, resp. napětí.
12. Opakujeme body 6-11 až do hodnoty napětí na regulačním ventilu 10 V, vhodně si zvolíme krok, v jakém budeme zvyšovat hodnotu napětí (např. 0,5 V).
13. Po dokončení měření vypneme čerpadlo, otevřeme regulační ventil a vypustíme vodu z horní i ze střední nádrže.
14. Po vypuštění vody uzavřeme regulační ventil a vypneme přístroje

3.10.2 Nastavení Multimetru Agilent 34410A:

Voltmetr vyhodnocující výstup váhy:

1. Nastavit integrační dobu na 10 period síťového kmitočtu (200 ms).
2. Šipkou doprava nastavit 10 NPLC.
3. Pro přesnější odečítání využijeme jednorázového měření pomocí tlačítka Trigger.

Čítač pro lopatkový snímač:

1. Je třeba nastavit 100 kHz filtr – zmáčknout tlačítko.
2. Tlačítko Trigger/sensitivity – nastavit AUTO TRG: OFF.
3. LEVEL 1V (potvrdit entrem).
4. Nastavit měření frekvence na příslušném kanále tlačítkem Freq and Ratio.

3.10.3 Nastavení generátoru HP 33120A

Generátor pro regulační ventil, generuje stejnosměrný signál.

Nastavení:

1. Zapnout impedanční přizpůsobení – High Z (Sys Menu – Out Term – High Z).
2. Na sekundu podržte některou z funkční klávesu např. AM.
3. Ovládacím knoflíkem nastavujte stejnosměrný offset v rozsahu 2-10 V.

4. AUTOMATIZACE MĚŘICÍHO EXPERIMENTU

Pro automatické měření jsou nahrazeny jednotlivé měřicí a ovládací přístroje měřicí kartou připojenou k PC. Celý proces měření, resp. ovládání ventilů je pak řízen z programového prostředí labVIEW.

4.1 MĚŘICÍ KARTA

Pro ověření možnosti automatizace měření byla použita měřicí karta firmy National Instruments – NI USB-6008. Tato karta je vybavena 8 analogovými výstupními kanály (AO- Analog Output) 12 obousměrnými digitálními linkami (DIO – Digital Input/Output) a jedním 32-bitovým čítačem (C - Counter). Připojuje se přes komunikační rozhraní USB 2.0 full-speed.

Analogový vstup karty je použit pro měření napětí váhy, na které je umístěna střední nádoba s kapalinou a také pro signál z diferenčního tlakoměru. Analogový vstup obsahuje A/D převodník s postupnou aproximací, rozlišení analogového vstupu je 12 bitů.

Výrobce udaná přesnost je na použitém rozsahu (+-10 V) typicky při 25°C 7,73 mV maximální 84,8 mV. [16]

Pro měření výstupu z lopatkového průtokoměru je využit čítač, jenž má rozlišení 32 bitů. [13] V programu je počítáno, že výstup z lopatkového průtokoměru bude připojen na PFI0.

Další využití karty je pro nastavení napětí na regulačním ventilu na konci měřicího kanálu. Protože maximální výstupní napětí karty je dáno jeho napájecím napětím, což je v tomto případě sběrnice USB, nelze dosáhnout většího napětí než 5 V. Proto je počítáno se zesilovačem se zesílením $k = 2$. Poté bude již možné ovládat regulační ventil v plném rozsahu tedy 2-10 V.

V programu je počítáno, že výstup vážního čidla bude připojen na AI1.

Výstup na regulační ventil umístěný na konci měřicího kanálu je AO0.

Výstup na výpustní ventil je P0.0 a GND.



Obrázek 24: Měřicí karta NI USB-6008

4.2 PROGRAM V PROSTŘEDÍ LABVIEW

Pro poloautomatické měření experimentu jsem vytvořil v prostředí labVIEW 2009 program, jenž dokáže sbírat data z lopatkového průtokoměru a vyhodnocovat výstup z váhy. Dále umožňuje nastavení požadované polohy regulačního ventilu a ovládá výpustní ventil střední nádoby.

„LabVIEW je graficky orientované prostředí na úrovni jazyka C. Výsledný produkt tohoto prostředí se nazývá virtuální přístroj, protože svými projevy a činnostmi připomíná klasický přístroj ve své fyzické podobě. Běh programu není řízen sekvenčně, ale řídí se připraveností všech dat, která jsou zapotřebí k provedení určité akce. Znamená to, že blok zahájí činnost až v okamžiku, kdy jsou na všech jeho vstupech připravena vstupní data. Na výstupech bloku se data objeví až po ukončení jeho činnosti.“ [15]

4.2.1 Čelní panel programu

Čelní panel slouží k ovládání běhu programu a současně zobrazuje naměřené hodnoty a množství vody ve střední nádobě.

V bločku „ovládání měření“ je možné nastavit požadovanou dobu měření v sekundách, dále je zde tlačítko start, kterým se spustí samotné měření.

V bločku ovládání servoventilu se pomocí otočného ovladače nastavuje požadované napětí na ventilu a tím pádem i průtok. Při nastavování je třeba brát v úvahu rychlost nastavení požadované polohy servomechanismem, která není příliš vysoká. Až po ukončení otáčivého pohybu ventilu je možné zahájit měření tlačítkem

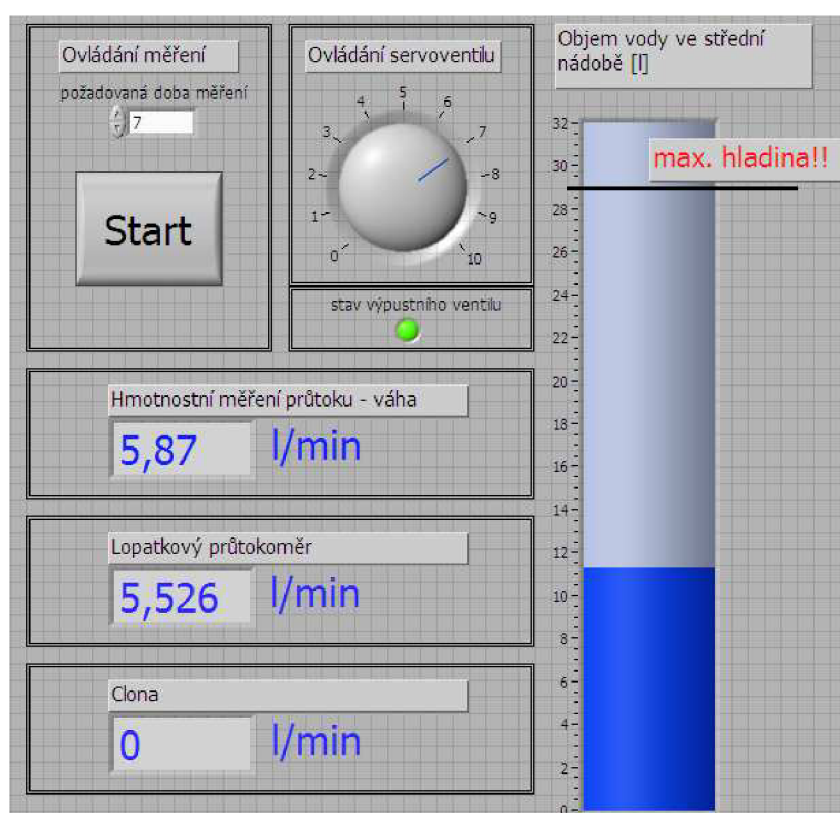
start, v opačném případě by bylo měření ovlivněno chybou, protože by se již nejednalo o měření při konstantním průtoku.

Na pravé straně je model střední nádoby, se zobrazením aktuálního stavu hladiny. Pro omezení možnosti přetečení střední nádoby by neměla hladina nikdy překročit rysku max. hladiny!

Dále jsou zde umístěny tři rámečky se vstupy z instalovaných průtokoměrů.

Hmotnostní měření průtoku – váha, lopatkový průtokoměr a clona.

Princip měření a vyhodnocení výsledků je uveden v další části práce. Program je připraven pro připojení výstupu z clony, která ovšem není prozatím fyzicky instalována, zobrazovaný průtok je tedy prozatím nulový.



Obrázek 25: Čelní panel programu

4.2.2 Koncepce programu

Základem programu je měřicí sekvence běžící ve smyčce while. Po spuštění programu, je třeba nastavit požadovanou dobu měření - „požadovaná doba měření“. Toto je doba po kterou bude zavřen výpustní ventil střední nádoby a současně se bude provádět měření pomocí lopatkového průtokoměru s hmotnostním senzorem.

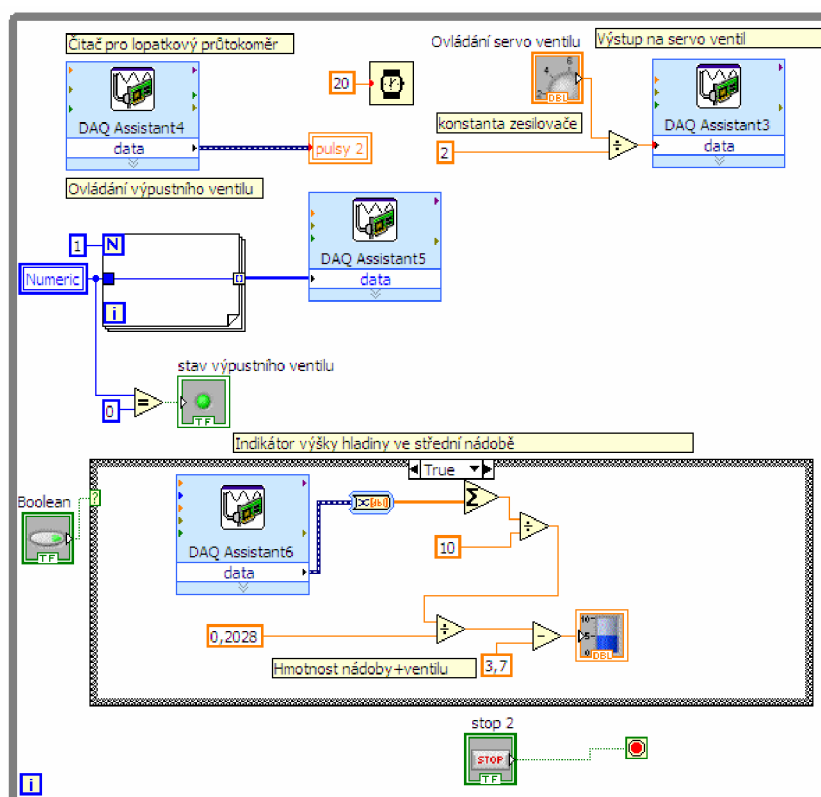
Po uplynutí nastavené doby zůstanou až do dalšího stisknutí tlačítka start zobrazeny naměřené hodnoty.

4.2.3 Ovládání ventilů a vstup čítače

Na následujícím obrázku 26 je část programu, ve které pomocí bloku DAQ Assistant4 přijímám data z výstupu lopatkového průtokoměru, tedy v podstatě počítám příchozí pulsy. Tyto jsou zaznamenány do lokální proměnné „pulsy2“. Pomocí DAQ Assistant5 ovládám výstupní ventil střední nádoby.

Po spuštění měření a stisknutí tlačítka start dojde k nastavení proměnné „Numeric“ na 1 a tím pádem zavření ventilu. Tento je po uplynutí celkové doby měření nastaven do 0, čímž dojde k uzavření ventilu. Obsluha se tedy nemusí ovládáním ventilu zabývat.

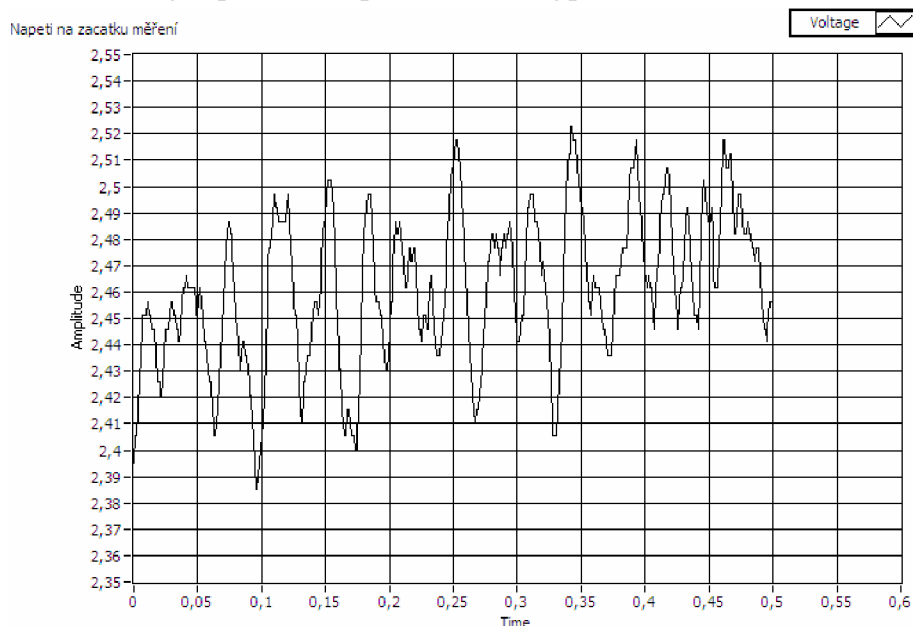
DAQ Assistant3 slouží k nastavování regulačního servoventilu umístěného na konci měřicího kanálu. Před započítím měření je třeba tento pomocí otočného ovladače v čelním panelu nastavit do požadované polohy. DAQ Assistant6 načítá data z vážního čidla, program má definovaný vstup z vážního čidla stejný, jako při měření přírůstku hmotnosti tedy vstup „AI1“. Data se pak využívají ke grafickému znázornění výšky hladiny.



Obrázek 26: Ovládání ventilů a vstup čítače

4.2.4 Vyhodnocení signálu z hmotnostního senzoru – váhy

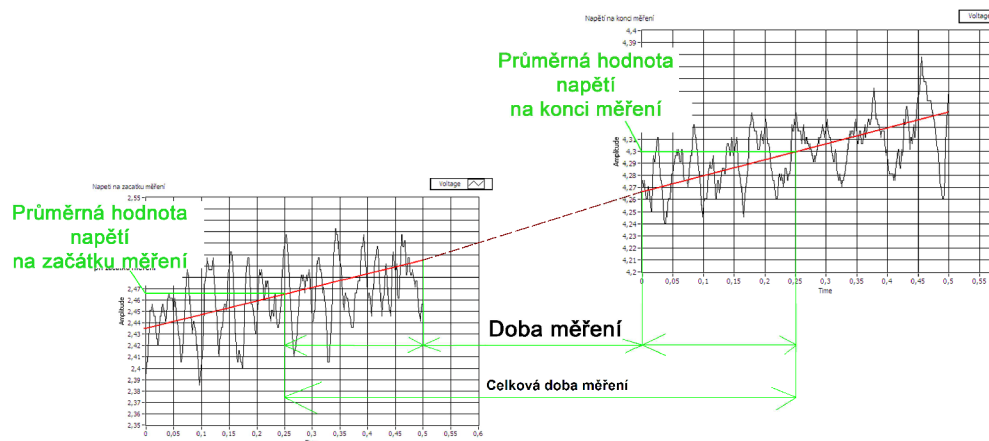
Při vyhodnocení signálu z vážního čidla se ukázalo, že dochází k poměrně značnému kolísání hodnoty napětí. Toto je způsobeno především kolísáním hladiny ve střední nádobě. Pro omezení tohoto vlivu se ukázalo jako velmi vhodné použít delší dobu měření např. 500 ms a z naměřených dat odhadnout střední hodnotu výpočtem aritmetického průměru. Tuto operaci je možné udělat z důvodu, lineární charakteristiky vážního čidla, neměnného průtoku během měření a také za předpokladu nulové střední hodnoty šumu měřeného napětí způsobeného kolísáním hladiny. Tímto je prakticky omezen vliv kolísání hladiny. Jak jde vidět na následujícím Obrázku 27 při maximálním průtoku (cca 26 l/min) napětí kolísá v rozsahu 0,1 V. Jde též vidět vzrůstající tendence napětí, protože měření bylo provedeno při zavřeném výpustním ventilu střední nádoby.



Obrázek 27: Průběh napětí vážního čidla

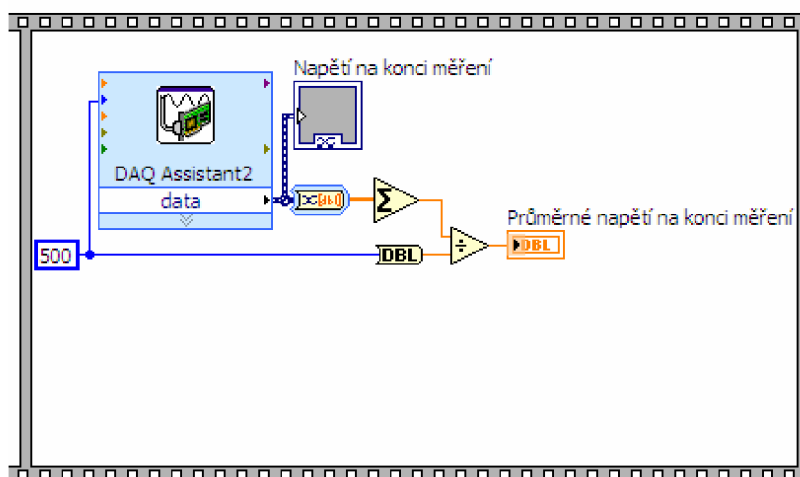
Na Obrázku 28 je graficky znázorněn princip vyhodnocení signálu z vážního čidla. Po spuštění měření dochází nejprve po určitý časový okamžik k zaznamenávání hodnot, v tomto případě jde o 500 ms, během kterých je odebráno celkem 500 vzorků napětí (vzorkují se vzorkovací frekvencí 1 kHz), ty jsou sečteny a následně vyděleny počtem naměřených vzorků.

Díky lineárnímu nárůstu napětí touto operací získáme prakticky napětí v polovičním čase, tj. 250 ms. Stejnou operaci poté provedeme i na konci intervalu „doba měření“ a tím získáme napětí v čase 250 ms + „doba měření“ + 250 ms.



Obrázek 28: Princip měření pomocí vážního čidla

Praktická realizace výše popsaného principu v programové prostředí labVIEW je vidět na následujícím Obrázku 29. Měřicí karta zaznamenává 500 hodnot, které jsou poté jako blok dat poslány z karty do labVIEW a následně vyděleny počtem vzorků tedy 500. Do lokální proměnné „Průměrné napětí na konci měření“ jsou pak data uložena a dále se zpracovávají v dalším bloku – Obrázek 30.



Obrázek 29: Princip získání průměrné hodnoty napětí

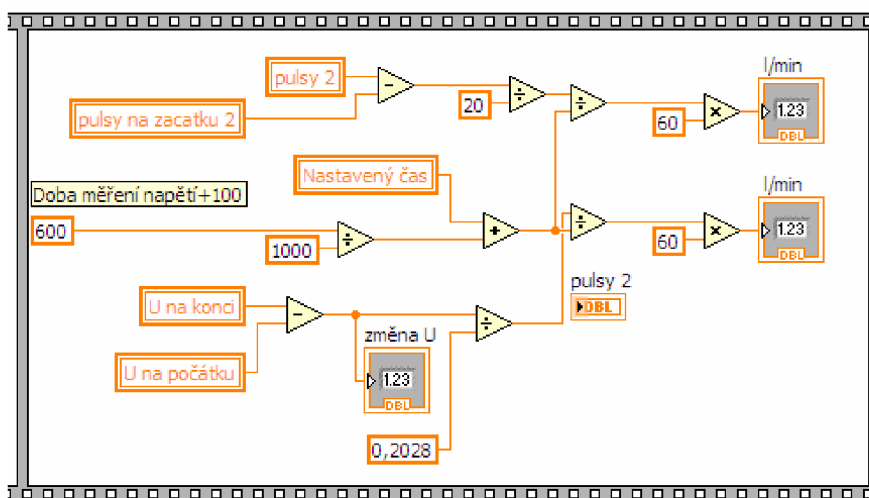
4.2.5 Výpočet průtoku

V posledním kroku sekvence programu je z naměřených hodnot napětí a počtu pulsů zaznamenaných čítačem z lopatkového průtokoměru vypočítán průtok.

V tomto případě uvádím průtok v l/min, ale je samozřejmě možné v případě jiných požadavků uvádět průtok i v jiných jednotkách, což vyžaduje drobnou úpravu v programu.

Při vyhodnocení signálu od lopatkového průtokoměru odečítám počet pulsů na konci měření a na začátku měření, dělím je konstantou 20, čímž získám počet litrů, které průtokoměrem protekly. Vydělením dobou měření získám průtok v l/s a následným vynásobením 60 pak v litrech za minutu.

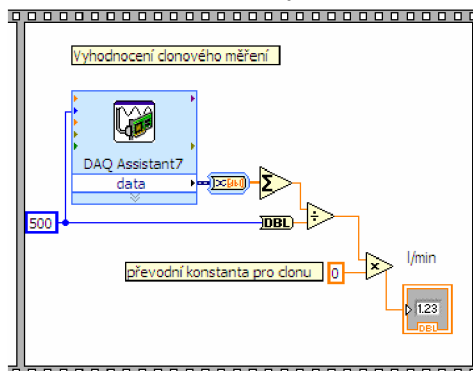
Pro hmotnostní průtok měřený vážním čidlem byl postup objasněn v předchozí kapitole. Získám ho tedy z rozdílu napětí uložených v proměnných „průměrné napětí na konci měření“ a „průměrné napětí na začátku měření“. Ze známé kalibrační křivky váhy (bod 5.2) pak mohu vypočítat přírůstek hmotnosti za daný časový interval. Po vydělení časem měření a 60 pak opět získávám průtok v litrech za minutu, při předpokladu, že 1l = 1kg.



Obrázek 30: Vypočet průtoku z naměřených hodnot

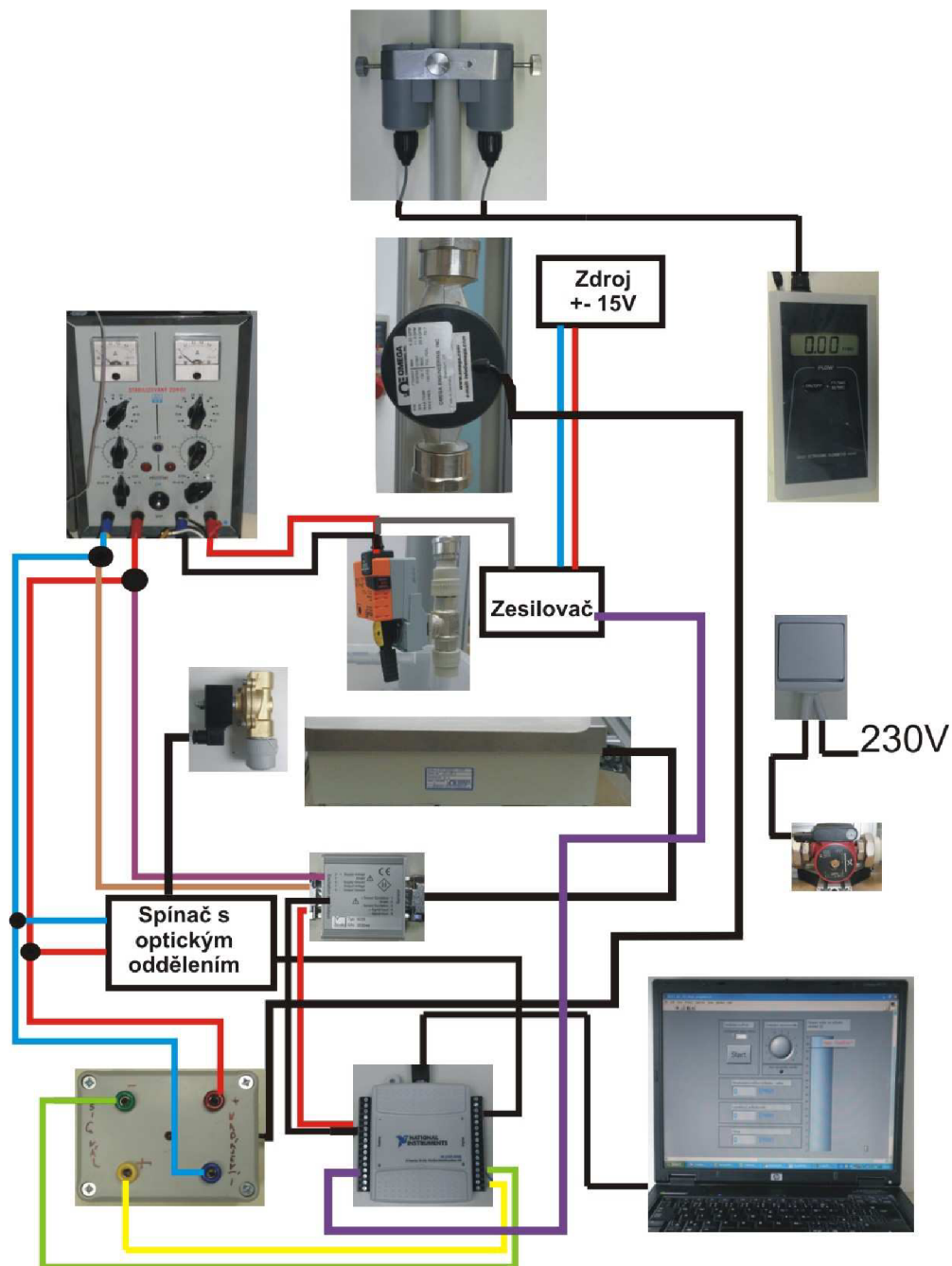
4.2.6 Vyhodnocení signálu z clony

Jak již bylo řečeno, program i měřicí aparatura je připravena pro instalaci clonového měření. Bloček zobrazen na Obrázku 31 zpracovává napětí z diferenčního tlakoměru a vynásobením „převodní konstantou clony“ získá hledaný průtok. Konstanta clony bude dosazena po jejím stanovení se zvolenou clonou, popřípadě může být předmětem stanovení v zadání laboratorní úlohy.



Obrázek 31: Vyhodnocení signálu z clony

4.3 SCHÉMA PRO AUTOMATIZOVANÉ MĚŘENÍ



Obrázek 32: Schéma pro automatizované měření

Obrázek 32 přehledně zobrazuje rozmístění výše popsanych komponent potrebných pro měření a jejich připojení.

4.4 POSTUP PŘI AUTOMATICKÉM MĚŘENÍ

Bezpečnostní upozornění: Voda ve střední nádobě nikdy nesmí překročit rysku „Maximální hladina“! Toto zajistíme výpustným ventilem střední nádoby, při jakémkoliv přerušení měření vždy dbáme na to, aby byl výpustní ventil otevřen!

1. Provedeme zapojení podle schématu a necháme zkontrolovat vyučujícím.
2. V PC spustíme měřicí program v prostředí labVIEW.
3. Zapneme napájení a spustíme čerpadlo.
4. Po cca 30 sekundách dojde k naplnění horní nádoby, což poznáme tak, že začne protékat voda přepadovou trubicí.
5. Zapneme ultrazvukový snímač.
6. Otočným ovladačem v předním panelu programu nastavíme napětí na regulačním ventilu čímž můžeme regulovat průtok. Před započítím měření je třeba vyčkat než dojde k nastavení ventilu do požadované polohy.
7. Nastavíme dobu, po kterou chceme provádět měření (např. 20 sekund)
8. Stisknutím tlačítka „start“ spustíme měření. Po stisknutí tlačítka start dojde k automatickému uzavření výpustního ventilu střední nádoby.
9. Během měření si poznačíme údaj z ultrazvukového snímače.
10. Po uběhnutí doby měření se zobrazí údaje o naměřením průtoku. Tyto si před započítím dalšího měření poznačíme.
11. Opakujeme bod 6 až 10 do té doby, než získáme požadované množství hodnot.

5. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Měření probíhala v laboratoři za teploty 23 °C a vlhkosti 55%, teplota vody byla 23,5 °C.

5.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ

Stabilizovaný zdroj AT 7054 č. 4695

Stabilizovaný zdroj TESLA BK127

Digitální posuvné měřítko Mitutoyo

Měřicí karta NI USB 6008 č. 14105D4

Multimetr Agilent 34401

Zesilovač Buster 9235, č. 353544

PC HP Compaq nx6110, 1,5 Ghz, 1GB RAM.

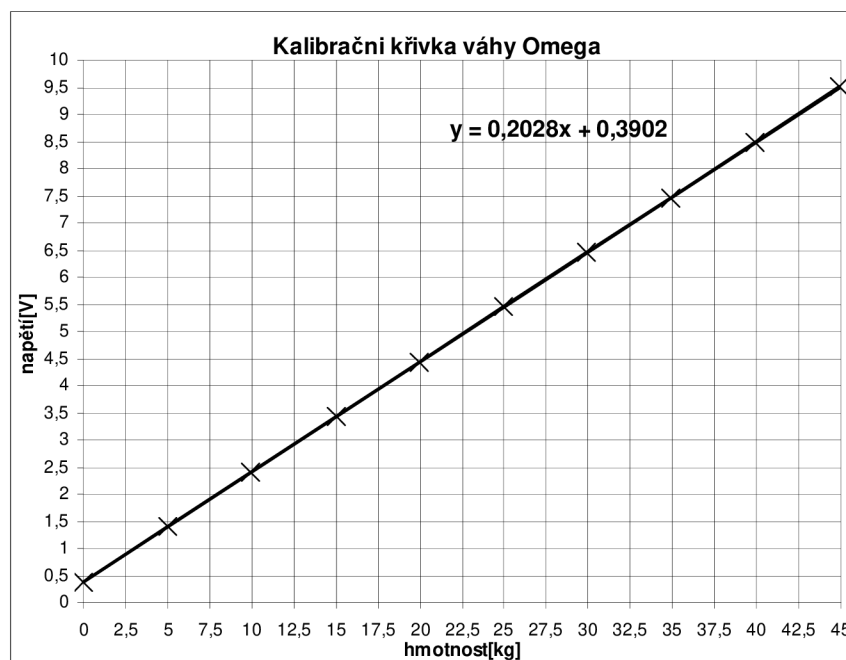
Svinovací metr Proskit

Laboratorní váha Kern

5.2 KALIBRAČNÍ KŘIVKA VÁHY

Provedl jsem kalibraci váhy pomocí závaží známých hmotností, jejichž hmotnost byla ještě ověřena na laboratorní váze Kern s rozlišením 5 g. Váha byla podle schématu zapojení připojena přes zesilovač k Multimetrovi Agilent 34410A.

Napájecí napětí přivedené na zesilovač bylo 15V.



Graf 1: Kalibrační křivka váhy Omega LSC700-100

Z naměřené závislosti je jasně patrné, že váha má lineární charakteristiku a lze ji aproximovat rovnicí přímky.

Zkoumal jsem také, zda má vliv na měřené napětí rozložené závaží, tento vliv se ukázal jako zcela minimální (drobná změna až na čtvrté platné číslici).

Pro výpočet hmotnosti z napětí na výstupu zesilovače tedy stačí pouze vydělit hodnotu napětí konstantou 0,2028 a přičíst offset 0,3902.

Vypočetl jsem též maximální chybu nelinearity, tato vyšla 0,11% při zatížení váhy 0 kg, tedy pouze jejím krytem. Tento údaj je ale mírně zavádějící, protože prakticky váha nebude nikdy pracovat „naprázdno“. Pro další měřené zatížení váhy je nejhorší výsledek 0,016% což s přihlédnutím i k možnému ovlivnění signálu v zesilovači je vzhledem k výrobcem udávané hodnotě 0,01% odpovídající hodnota.

5.3 ZÁKLADNÍ PROMĚŘENÍ SNÍMAČŮ – RUČNÍ METODA

Provedl jsem proměření charakteristiky ultrazvukového a lopatkového průtokoměru, které byli zařazeny v sérii v pořadí ultrazvukový, lopatkový.

Jako referenční hodnota je brán údaj váhy. Měření bylo pro nižší průtoky prováděno pro čas 60 s u vyšších pak 30 s. Problémem, se kterým jsem se setkal při měření, bylo kolísání údaje o průtoku na ultrazvukovém průtokoměru resp. kolísání frekvence čítače vyhodnocujícího údaj lopatkového průtokoměru. Při měření jsem se tedy snažil vždy zaznamenat hodnotu, kolem které se údaj nejčastěji pohyboval.

Délka měřicího kanálu byla v tomto případě 132 cm.

	Hmotnostní průtok - váha					Ultrazvukový snímač			Lopatkový snímač	
	Váha [V]		čas[s]	delta [V]	průtok[l/min]	[ft/s]	[m/s]	[l/min]	[Hz]	[l/min]
Ventil[V]	start	konec								
2	1,139	1,139	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1,139	1,139	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1,369	1,563	60	0,194	0,96	0,33	0,10	1,53	0,506	1,518
4,5	1,467	1,912	60	0,445	2,19	0,54	0,16	2,50	0,724	2,172
5	1,579	2,339	60	0,760	3,75	0,76	0,23	3,52	1,225	3,675
5,5	2,022	3,107	60	1,085	5,35	1,15	0,35	5,32	1,764	5,292
6	1,907	3,273	60	1,366	6,74	1,46	0,45	6,76	2,249	6,747
6,5	1,919	3,574	60	1,655	8,16	1,75	0,53	8,10	2,731	8,193
7	2,066	4,277	60	2,211	10,90	2,29	0,70	10,60	3,610	10,830
7,5	2,253	3,866	30	3,226	15,91	3,38	1,03	15,64	5,200	15,600
8	2,370	4,454	30	4,168	20,55	4,55	1,39	21,06	6,900	20,700
8,5	2,430	4,805	30	4,750	23,42	5,26	1,60	24,34	8,100	24,300
9	2,555	5,035	30	4,960	24,46	5,4	1,65	24,99	8,500	25,500
9,5	2,447	4,971	30	5,048	24,89	5,5	1,68	25,45	8,600	25,800
10	2,441	4,956	30	5,030	24,80	5,5	1,68	25,45	8,400	25,200

Tabulka 3: Základní proměření snímačů

V tabulce jsou žlutě vyznačeny naměřené hodnoty, bíle pak hodnoty vypočtené.

Příklady výpočtů pro napětí na ventilu 4 V:

Hmotnostní průtok – váha:

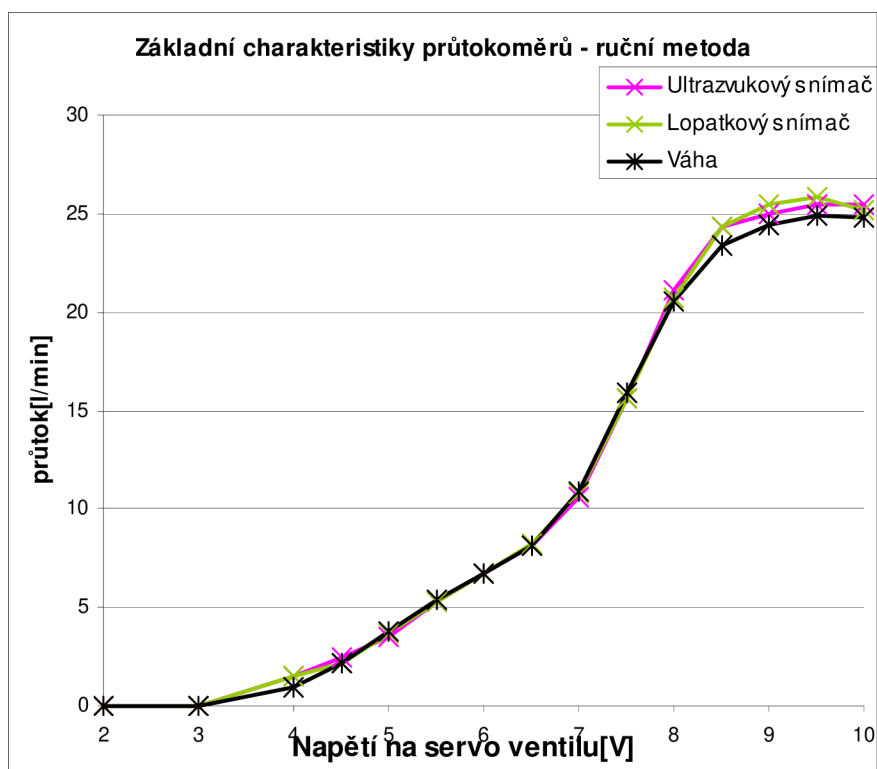
$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{\text{delta}}{k_v} = \frac{0,194}{0,2028} = 0,96 \text{ l / min}$$

Ultrazvukový snímač:

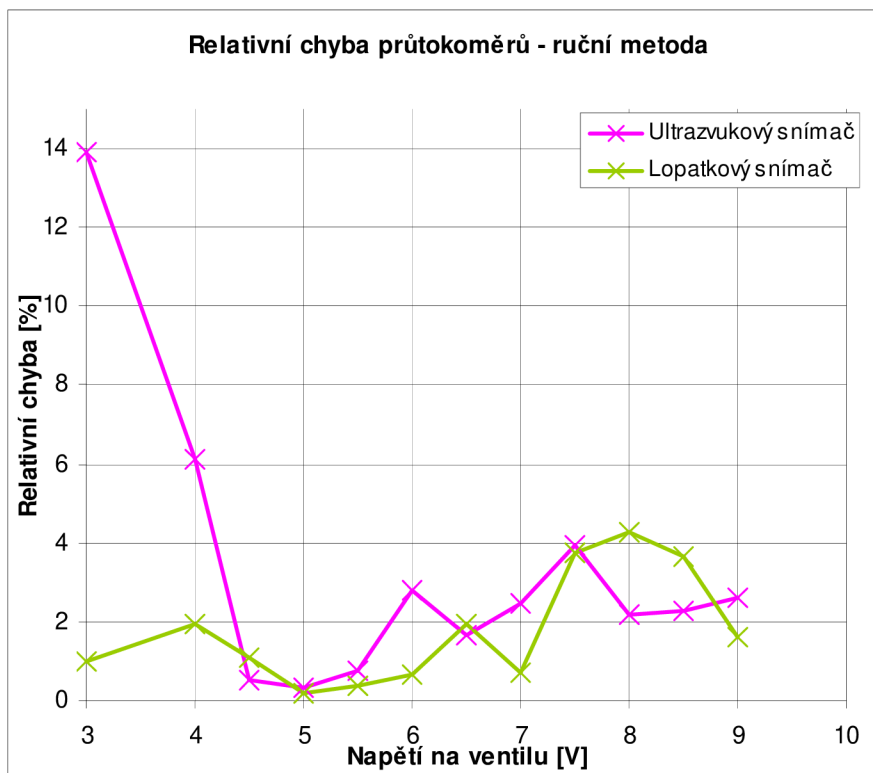
Konstanta pro přepočet m/s na ft/s k = 3.2808

$$Q[m/s] = \frac{Q[ft/s]}{3,2808} = \frac{0,33}{3,2808} = 0,1 \text{ m/s}$$

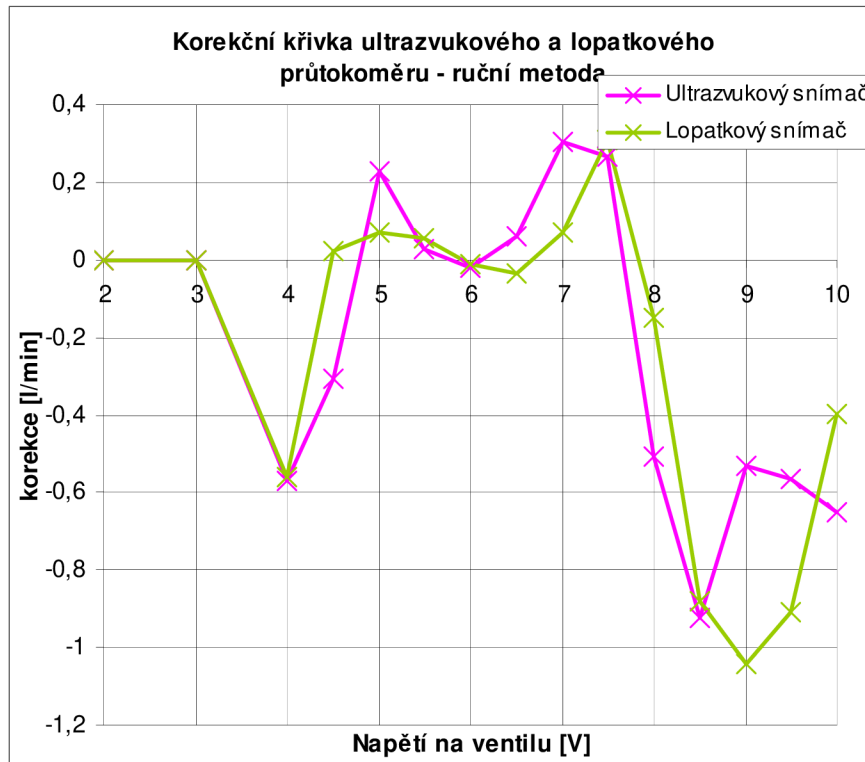
$$Q[l/min] = \pi^2 * Q[m/s]^2 * 60 * 1000 = 0,00025306 * 0,1^2 * 60 * 1000 = 1,53 \text{ l / min}$$



Graf 2: Základní charakteristiky průtokoměrů – ruční metoda



Graf 3: Relativní chyby průtokoměrů – ruční metoda



Graf 4: Korekční křivka ultrazukového a lopatkového průtokoměru

Z grafů je patrné, že přesnost lopatkového i ultrazvukového snímače je v daném rozsahu velmi podobná. Lopatkový snímač v rozsahu napětí 4,5 – 8 V na regulačním ventilu prakticky přesně kopíruje hodnoty naměřené hmotnostní metodou pomocí váhy. Odchylna ultrazvukového snímače s rostoucím průtokem narůstá. Je třeba uvést, že u ultrazvukového snímače nebyla při tomto měření použita výrobcem doporučená kontaktní pasta, která jak se ukázalo při dalších měřeních, především odstraní kolísání údaje průtokoměru. Jak lopatkový, tak především ultrazvukový průtokoměr pracují v dolních hodnotách maximálního měřicího rozsahu, což také může přispívat k jejich nižší přesnosti.

V korekční křivce Graf 4 je jako referenční snímač brána váha.

Vzhledem k časovým možnostem bylo provedeno měření při zařazení obou snímačů, což společně s tlakovou ztrátou na regulačním ventilu snížilo maximální průtok. Pro zvýšení průtoku a proměření snímačů v širším rozsahu je možné například experimentálně vyřadit regulační ventil a tím získat vyšší průtok.

5.3.1 Určení maximální chyby použitých snímačů

Pro ultrazvukový snímač udává výrobce přesnost 2 % z měřicího rozsahu, tedy z 9 m/s. V celém rozsahu se tedy může hodnota naměřená ultrazvukovým průtokoměrem lišit od té skutečné o max. 0,18 m/s, což při uvažování průměru měřicího kanálu 17,95 mm je rozdíl 2,73 l/min. Při výše uvedeném měření se tyto hodnoty lišily maximálně o 0,92 l/min, což odpovídá chybě 0,67 % z maximálního rozsahu. Je tedy možno říct, že průtokoměr splňuje výrobcem deklarovanou přesnost měření.

Pro lopatkový snímač je výrobcem udaná přesnost 1,5 % ze čtené hodnoty. Maximální chyby bylo dosaženo 24,46 l/min (údaj váhy) a to 4,2 %, což už je výrazně více než je údaj výrobce. Toto bych ovšem přisoudil především kolísání údaje frekvence z čítače. Zvolená metoda měření pomocí frekvence se tedy neukázala jako vhodná. Z tohoto pohledu by byla spíše vhodnější metoda měření počtu pulsů (TOTALIZE).

5.4 PROMĚŘENÍ SNÍMAČŮ – AUTOMATIZOVANÁ METODA

5.4.1 Proměření snímačů při maximálním průtoku

Z měřicího kanálu byl vyřazen regulační ventil, čímž hlesla tlaková ztráta a vzrostl průtok přibližně o 2 l/min. Ventil byl nahrazen rovným úsekem potrubí, celková délka měřicího kanálu byla v tomto uspořádání 133 cm. Doba měření byla 20 s a doba,

po kterou se odebírali vzorky z vážního čidla, byla 500 ms, dalších 100 ms byla prodleva v sekvenci programu, celková doba měření tedy byla 20,6 s.

Váha		Ultrazvukový snímač			Lopátkový snímač
čas[s]	Q[l/min]	[ft/s]	[m/s]	Q[l/min]	Q[l/min]
20	26,53	6	1,83	27,77	26,600
20	26,47	5,95	1,81	27,54	26,170
20	26,63	5,92	1,80	27,40	26,150
20	26,50	5,98	1,82	27,68	26,360
20	26,52	5,86	1,79	27,12	26,320
20	26,55	6,01	1,83	27,81	26,270
20	26,64	5,85	1,78	27,07	26,570
20	26,55	5,87	1,79	27,17	26,420
20	26,51	5,94	1,81	27,49	26,420
20	26,57	6,02	1,83	27,86	26,570
průměr	26,547		1,811	27,490	26,385

Tabulka 4: Měření maximálního průtoku

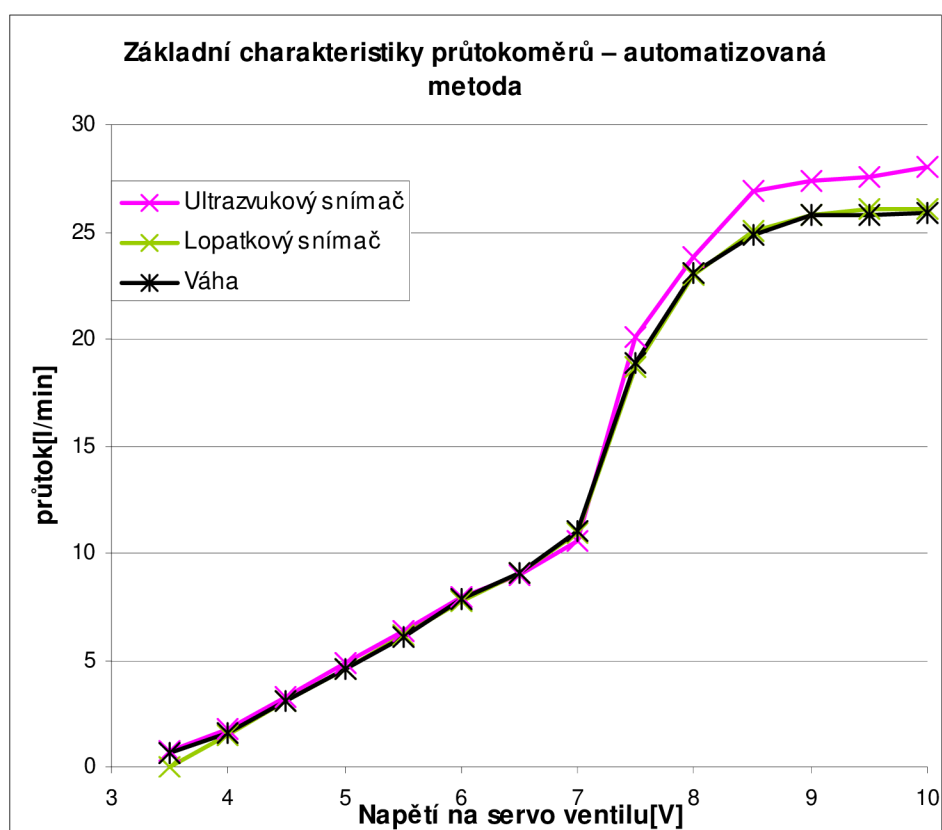
Pro zjištění maximálního průtoku, kterého je možné dosáhnout, byl vyřazen lopátkový průtokoměr, který byl nahrazen rovným úsekem potrubí. Celková délka měřicího kanálu byla 140 cm, při výšce hladiny v horní nádobě 43 cm. Průtok naměřený pomocí vážního čidla byl 45 l/min a pomocí ultrazvukového průtokoměru 11 ft/s, což odpovídá 50,91 l/m. Z těchto údajů je zřejmé, že lopátkový průtokoměr má značnou tlakovou ztrátu.

5.4.2 Základní proměření charakteristiky snímačů

Automatizovanou metodou jsem provedl proměření obdobně jako v bodě 5.3. Vzhledem k úpravám v měřicím kanále (prodloužení měřicího kanálu) není možné vzájemně porovnávat absolutní hodnoty průtoky pro dané napětí na regulačním ventilu. Délka měřicího kanálu byla v tomto případě 136 cm.

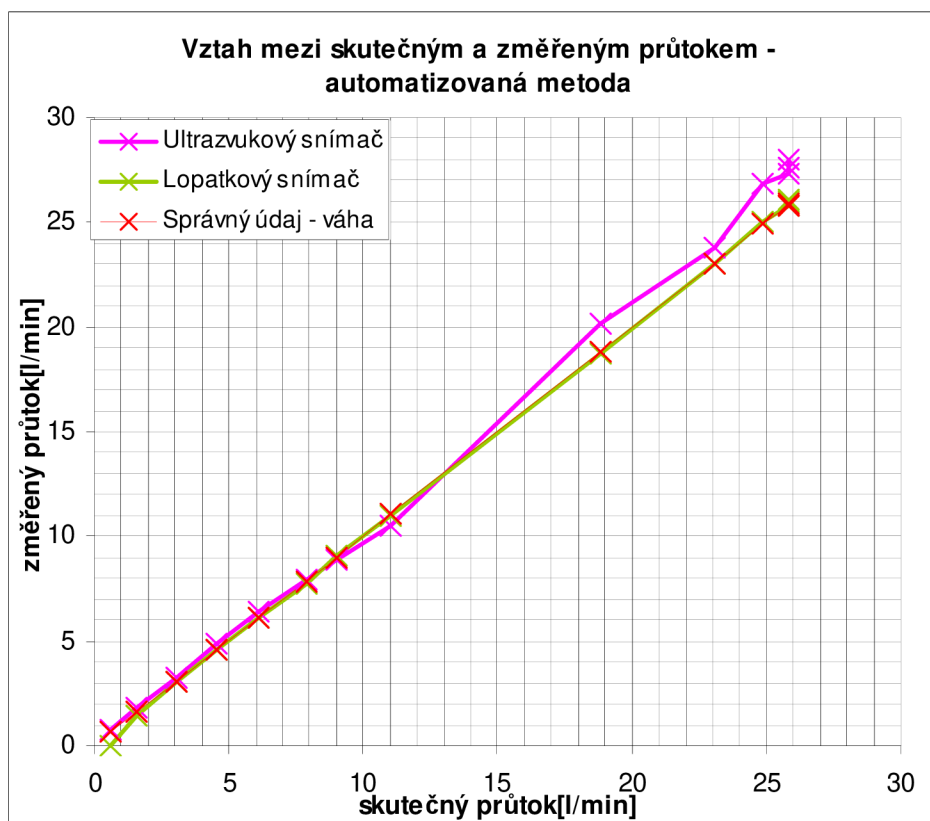
Ventil[V]	Váha	Ultrazvukový snímač			Lopatkový snímač
	Q[l/min]	v [ft/s]	v[m/s]	Q[l/min]	Q[l/min]
2	0	0	0	0	0
3,5	0,63	0,16	0,05	0,74	0,00
4	1,58	0,39	0,12	1,80	1,46
4,5	3,07	0,71	0,22	3,29	3,04
5	4,57	1,05	0,32	4,86	4,54
5,5	6,11	1,38	0,42	6,39	6,14
6	7,86	1,72	0,52	7,96	7,75
6,5	9,02	1,93	0,59	8,93	9,07
7	11,05	2,28	0,69	10,55	10,98
7,5	18,86	4,35	1,33	20,13	18,73
8	23,04	5,15	1,57	23,83	22,98
8,5	24,89	5,81	1,77	26,89	25,02
9	25,83	5,91	1,80	27,35	25,76
9,5	25,84	5,96	1,82	27,58	26,03
10	25,86	6,05	1,84	28,00	26,05

Tabulka 5: Základní proměření snímačů – automatizovaná metoda



Graf 5: Základní charakteristiky průtokoměrů – automatizovaná metoda

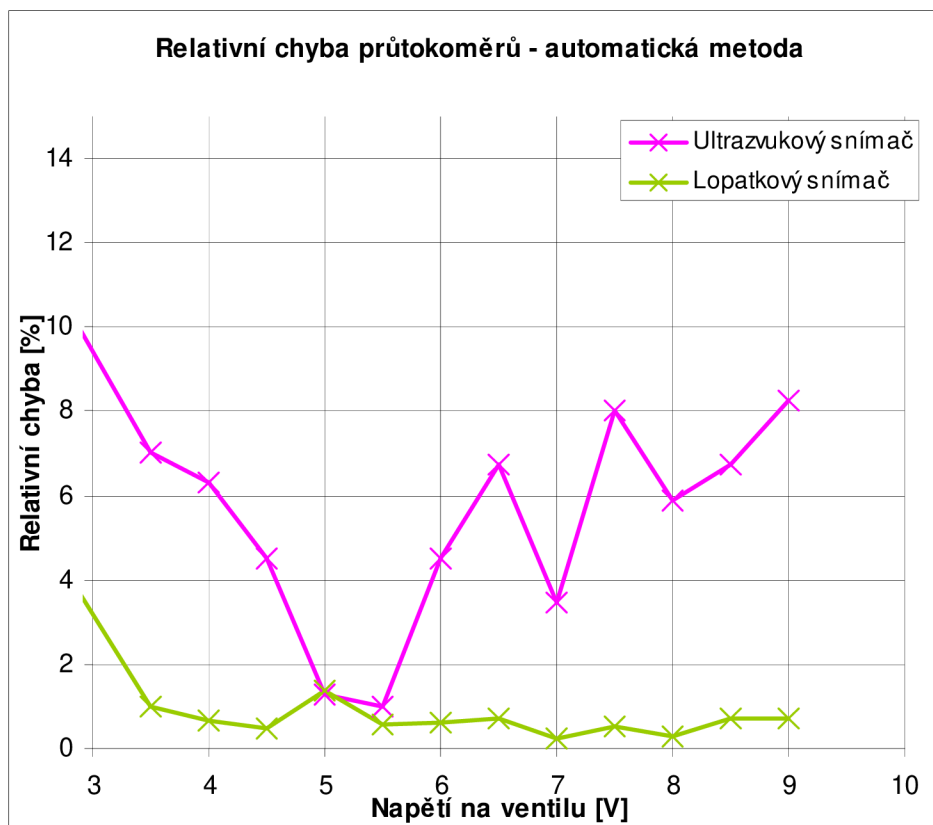
Z Grafu 5 je patrné, že zpracováním a vyhodnocením dat pomocí labVIEW se podařilo pro lopatkový průtokoměr dosáhnout mnohem větší přesnosti. Největší chyby bylo dosaženo při průtoku 1,58 l/min (změřeného hmotností metodou) a to 7,6 %. Tato chyba značně převyšuje výrobce udaných 1,5 % v rozsahu 0,83 – 75,7 l/min. Od další změřené hodnoty průtoku (3,07 l/min), již přesnost odpovídá výrobcem udávaným 1,5 %, když se přesnost pohybuje stále pod 1 %. U ultrazvukového snímače se projevil pouze vliv zpracování hodnot z vážního čidla, který měl minimální vliv.



Graf 6: Vztah mezi skutečným a měřeným průtokem – automatizovaná metoda

V Grafu 6 jsem vzal jako skutečný průtok údaj z vážního čidla, proto má toto čidlo směrnici přímky 1. Ostatní dva průběhy jsou pak staženy k tomuto skutečnému průtoku.

Je patrné, že lopatkový snímač velmi přesně kopíruje skutečný průtok. U ultrazvukového snímače je při nižších průtocích průběh také velmi podobný, ale se vzrůstajícím průtokem je zobrazená rychlost průtoku (resp. po přepočtu průtok v l/min) na ultrazvukovém senzoru vyšší než skutečná.



Graf 7: Relativní chyba průtokoměrů – automatická metoda

5.5 POSTUP PŘI VÝPOČTU NEJISTOT MĚŘENÍ

Výpočet nejistoty typu A

Nejistota typu A, se určí statistickými výpočty z opakované série měření, jako rozptyl hodnot. [17]

Nejprve je nutné vypočítat aritmetický průměr z naměřených hodnot

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad [17] \quad (9)$$

Nejistota typu A se pak určí jako směrodatná odchylka.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [17] \quad (10)$$

5.5.1 Vážní čidlo

Jde o nepřímé měření. U nepřímých měření se nejistota B určí pomocí citlivostních koeficientů, které lze získat parciální derivací funkční závislosti.[17]

Určení nejistoty při měření napětí

Nejistota typu A

Při měření nebyly zaznamenávány hodnoty napětí U, ale pouze průtok.

Vzhledem k tomu, že nejistota typu A pro průtok ($u_A = 0,017 \text{ l/min}$) byla u vážního čidla výrazně menší než u lopatkového a ultrazvukového čidla, budu nejistotu měření napětí typu A považovat jakou nulovou.

$$u_A = 0 \text{ V}$$

Zdroje nejistoty typu B:

Vážní čidlo

Chyby nelinearity vážního čidla je 0,01%

Chyby nelinearity vztažená k měřené hodnotě napětí 5 V je 0,0005V

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{z1\max}}{\chi} = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 2,8868 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

Hystereze 0,02%

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{z2\max}}{\chi} = \frac{0,0002}{\sqrt{3}} = 1,1547 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

Zesilovač

Zbytkové zvlnění je menší 5mV.

$$u_{B3} = \frac{\Delta_{z3\max}}{\chi} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 2,8868 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Vstupní šum zesilovače je menší než 2μV, což se na výstupu projeví po zesílení jako 549 μV, což vzhledem k zbytkovému zvlnění 5mV hodnota, kterou lze zanedbat.

Vliv teploty je menší než 100ppm/K z výstupního napětí zesilovače, se vzrůstajícím signále tato chyba vzrůstá. Například pro napětí 5 V 100ppm/K

znamená při uvažované teplotní změně $+2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, tedy 5K změnu maximálně 2,5 mV.

$$u_{B4} = \frac{\Delta_{z4\text{ max}}}{\chi} = \frac{0,0025}{\sqrt{3}} = 1,4434 \cdot 10^{-3} \text{ V}$$

Měřicí karta

Absolutní přesnost při diferenciálním zapojení je obvykle při 25°C na rozsahu $\pm 10\text{V}$ 7,73 mV. Maximálně při jiné teplotě 84,8mV. Pro mé měření budu uvažovat hodnotu 84,8 mV.

$$u_{B5} = \frac{\Delta_{z5\text{ max}}}{\chi} = \frac{0,0848}{\sqrt{3}} = 0,04896 \text{ V}$$

Celková nejistota typu B pro měření napětí:

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2} = 0,0491 \text{ V}$$

Určení kombinované nejistoty pro měření napětí

$$u_{c\text{-napeti}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0 + (5,5164 \cdot 10^{-3})^2} = 0,0491 \text{ V}$$

Určení nejistoty při měření času:

$$u_A = 0$$

Zdroje nejistoty typu B pro měření času:

Doba měření je 600 ms, budu předpokládat, že při měření času může dojít k chybě 1ms

$$u_B = \frac{\Delta_{z\text{ max}}}{\chi} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 5,7735 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

$$u_{c\text{-cas}} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0 + (5,7734 \cdot 10^{-4})^2} = 5,7735 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

Nejistota měření průtoku

Při výpočtu vycházím ze vzorce:

$$Q = k \frac{U_2 - U_1}{t}$$

Pro přepočtenou kombinovanou nejistotu u_c platí:

$$u_{c-\text{přepočetn}} = \frac{\partial Q}{\partial U_2} \cdot u_{c-\text{napěap}} + \frac{\partial Q}{\partial U_1} \cdot u_{c-\text{napěap}} + \frac{\partial Q}{\partial t} \cdot u_{c-\text{cas}}$$

Po derivaci výrazu:

$$u_{c-\text{přepočetn}} = \frac{k}{t} \cdot u_{c-\text{napeti}} + \frac{k}{t} \cdot u_{c-\text{napeti}} + k \cdot \frac{U_2 - U_1}{t^2} \cdot u_{c-\text{cas}}$$

$$u_{c-\text{přepočetn}} = \frac{4,9301}{20,6} \cdot 0,0491 + \frac{4,9301}{20,6} \cdot 0,0491 + 4,9301 \cdot \frac{5-3}{20,6^2} \cdot 5,7735 \cdot 10^{-4}$$

$$u_{c-\text{přepočetn}} = 0,0235 \text{ l / min}$$

Rozšířená standardní nejistota U měření průtoku

Standardní kombinovaná nejistota u byla určena s pravděpodobností 68%, pro získání vyšší pravděpodobnosti, že se skutečná hodnota pohybuje v daném intervalu použijeme koeficient rozšíření [17]. Pro pravděpodobnost 95% $k = 2$.

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 0,0235 = 0,047 \text{ l / min}$$

S 95 % pravděpodobností tedy mohu tvrdit, že průtok změřený vážním čidlem se pohybuje v intervalu (26,547 +/- 0,047) l/min.

5.5.2 Ultrazvukový snímač

Jde o nepřímé měření.

Určení nejistoty typu A pro rychlost proudění

Nejistotu typu A určím výpočtem z opakovaného měření - Tabulka 4 dle rovnice 10.

$$u_{A-\text{ultrazvuk}} = 0,0061 \text{ m / s}$$

Určení nejistoty typu B pro rychlost proudění

Přesnost ultrazvukového snímače je 2% z rozsahu, což znamená 0,18m/s.

$$u_b = \frac{0,18}{\sqrt{3}} = 0,1039 \text{ m / s}$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,0061^2 + 0,1039^2} = 0,1042 \text{ m / s}$$

Určení nejistoty pro průměr měřicího kanálu

Hodnota průměru měřicího kanálu byla při opakovaném měření stále stejná, proto:

$$u_A = 0 \text{ m}$$

Zdrojem nejistoty B je přesnost měření posuvným měřidlem, což jsem určil jako rozlišení posuvného měřidla tedy 0,01 mm.

$$u_b = \frac{0,00001}{\sqrt{3}} = 5,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0 + 5,77 \cdot 10^{-6}} = 5,77 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Nejistota měření průtoku

Pro přepočtenou hodnotu u_c v l/min pak platí:

Při výpočtu vycházím z následujícího vztahu pro průtok Q .

$$Q = \left(\frac{D^2}{4} \cdot \pi \cdot v \cdot 60 \cdot 1000 \right) \text{ l/min}$$

Vztah zjednoduším na tvar

$$Q = (k \cdot D^2 \cdot v) \text{ l/min}$$

kde

$$k = 15 \cdot \pi \cdot 10^3$$

$$u_{c-\text{přepočten}} = \left(\frac{\partial Q}{\partial v} \cdot 0,1042 + \frac{\partial Q}{\partial D} \cdot 5,77 \cdot 10^{-6} \right) \text{ l/min}$$

Po derivaci výrazu:

$$u_{c-\text{přepočten}} = (k \cdot D^2 \cdot 0,1042 + 2 \cdot k \cdot D \cdot v \cdot 5,77 \cdot 10^{-6}) \text{ l/min}$$

$$u_{c-\text{přepočten}} = (15 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot 0,01795^2 \cdot 0,1042 + 2 \cdot 15 \cdot \pi \cdot 10^3 \cdot 0,01795 \cdot 1,811 \cdot 5,77 \cdot 10^{-6}) \text{ l/min}$$

$$u_{c-\text{přepočten}} = 1,5821 + 0,01768 = 1,599 \text{ l/min}$$

Rozšířená standardní nejistota U měření průtoku

$$U = k \cdot u_c = 2 \cdot 1,599 = 3,199 \text{ l/min}$$

S 95 % pravděpodobností tedy mohu tvrdit, že průtok změřený ultrazvukovým průtokoměrem se pohybuje v intervalu (27,490 +/- 3,199) l/min.

5.5.3 Lopatkový snímač

U lopatkového snímače se jedná o přímé měření.
Nejistotu typu A určím výpočtem viz: rovnice 10.

$$u_{A-\text{lopatky}} = 0,0513$$

Zdroje nejistoty typu B:

Chyba na jeden puls 0,05 l/min, při vyhodnocení v prostředí labVIEW se tedy mohou dopustit chyby maximálně $\pm 0,05$ l/min.

Nejistota typu B se pro normální rozložení vypočte dle vztahu:

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{z_{\max}}}{\chi} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,0287 \text{ l/min}$$

Výrobce udává přesnost snímače jako 1,5% z čtené hodnoty
1,5% z 26,385 je 0,3958, tedy:

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{z_{\max}}}{\chi} = \frac{0,3958}{\sqrt{3}} = 0,2285 \text{ l/min}$$

Celková nejistota typu B

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{0,0287^2 + 0,2285^2} = 0,2303 \text{ l/min}$$

Určení kombinované nejistoty u

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,0513^2 + 0,2303^2} = 0,2359 \text{ [17]}$$

Rozšířená standardní nejistota U

$$U = k \cdot u = 2 \cdot 0,2359 = 0,4719 \text{ l/min [17]}$$

S 95 % pravděpodobností tedy mohou tvrdit, že průtok změřený lopatkovým průtokoměrem se pohybuje v intervalu (26,385 \pm 0,4719) l/min.

Z uvedených výpočtů nejistot vyplývá, že přesnost měření pomocí vážního čidla je výrazně vyšší, než pomocí ultrazvukového resp. lopatkového průtokoměru. Přesnost vážního čidla je o jeden řád vyšší než přesnost lopatkového průtokoměru. Toto byl základní předpoklad při plánování koncepce měřicí aparatury.

6. ZÁVĚR

V mé diplomové práci jsem shrnul základní principy pro měření průtoku. Uvádím vhodné typy průtokoměrů s jejich přednostmi a nedostatky.

Navrhl jsem princip měřicího přípravku pro měření průtoku využitelného v laboratořích pro praktické měření průtoku kapalin.

Navrhl jsem a sestavil nosnou konstrukci, která se skládá z hliníkových profilů s vysokou variabilitou a možností následných úprav.

Byla provedena kompletní vodoinstalace skládající se ze 3 plastových nádob a plastových potrubí, zajišťující cirkulaci vody a také konstantní hladinu v horní nádobě a tím i konstantní průtok pro měření.

Pro měření byly použity 2 snímače (ultrazvukový a lopatkový) je počítáno i s clonou, pro kterou je již připraveno místo v měřicím kanálu a také program v prostředí labVIEW je připraven na vyhodnocení signálu z clonového měření. Jako referenční měřidlo byla použita hmotnostní metoda s vážním čidlem.

Na měřicím přípravku jsem provedl proměření charakteristik 2 snímačů a vyhodnotil jejich charakteristiku. Měřením jsem též ověřil funkčnost zvolené základní koncepce, která prokázala při měření svou funkčnost.

V programovém prostředí labVIEW jsem vytvořil program pro sběr a analýzu dat z průtokoměrů a také ovládání ventilů.

Stanovil jsem nejistoty měření, které potvrdily funkčnost základního principu aparatury, tzn. že přesnost vážního čidla je výrazně vyšší než přesnost instalovaných průtokoměrů.

Vytvořená aparatura bude sloužit studentům v laboratoři, kde budou mít možnost se prakticky seznámit s měřením průtoku.

7. SEZNAM LITERATURY

- [1] Ripka P., Ďaďo S., Kreidl M., Novák J. : Senzory a převodníky. Vydavatelství CVUT, Praha. 2005 ISBN 80-01-03 123-3
- [2] Ďaďo S., Bejček L., Platil A., Měření průtoku a výšky hladiny. BEN, Praha 2006. ISBN 80-7300-156-X
- [3] Časopis Automa 10/2006, str. 5-9 [cit.2010-05-03]. Dostupné z URL: <<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?CenterContentExec=SearchDetail>>
- [4] Časopis Automa 11/2006, str. 24-29 [cit.2010-05-03]. Dostupné z URL: <<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?CenterContentExec=SearchDetail>>
- [5] Fyzika HRW, 2. část Mechanika-Termodynamika, Vysoké učení technické v Brně – Nakladatelství VUTIUM, Prometheus , str 467-487
- [6] MEASUREMENT, INSTRUMENTATION, AND SENSORS Handbook, John G. Webster
- [7] Torricelliho vzorec [cit.2008-11-03]. Dostupné z URL:< http://sk.wikipedia.org/wiki/Torricelliho_vzorec>
- [8] Fluid Flow Measurement, A Practical Guide to Accurate Flow Measurement
- [9] Měření průtoku a protečeného množství [cit.2010-05-03]. Dostupné z URL:< <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm>>
- [10] Časopis Automatizace 12/2004 [cit.2010-05-03]. Dostupné z URL: <<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?CenterContentExec=SearchDetail>>
- [11] Strnad R. : Trendy měření průtoku. Říčany u Prahy 2004
- [12] Časopis Automa 12/2006, str. 30-34 [cit.2010-05-03]. Dostupné z URL: <<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?CenterContentExec=SearchDetail>>
- [13] National Instruments, USB-6008/6009 – Uživatelská příručka, Leden 2006
- [14] Časopis Automatizace 5/2006 [cit.2011-05-10]. Dostupné z URL: < <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1260>>
- [15] ZIKMUND, Jiří. Měřicí SW pro USB měřicí kartu National Instruments. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 38s., 1 příloha. Vedoucí práce Ing. Jiří Kepřt.
- [16] Datasheet NI USB 6008, [cit.2011-05-19]. Dostupné z URL : < <http://www.ni.com/pdf/products/us/20043762301101dlr.pdf>>

- [17] Čejka M.: Elektronická měřicí technika. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Průřezové průtokoměry [3]	15
Obrázek 2: Lopatkový průtokoměr [9]	15
Obrázek 3: Turbínový průtokoměr [4].....	15
Obrázek 4: Přímý ultrazvukový průtokoměr-princip[4]	17
Obrázek 5: Princip Dopplerova průtokoměru[4]	18
Obrázek 6: Princip indukčního průtokoměru[4]	19
Obrázek 7: Příklad využití Coriolisova průtokoměru v čerpací stanici LPG [11].....	21
Obrázek 8: Nosná konstrukce měřicí aparatury	23
Obrázek 9: Půdorys měřicí aparatury	24
Obrázek 10: Měřicí aparatura – celkový pohled.....	25
Obrázek 11: Čerpadlo Grundfos UPS 32-55 180	26
Obrázek 12: Zajištění konstantní hladiny- přepad	27
Obrázek 13: Různé délky potrubí pro měřicí kanál	28
Obrázek 14: Lopatkový průtokoměr	29
Obrázek 15: Vnitřní schéma zapojení přípravku	29
Obrázek 16: Přípravek pro připojení lopatkového průtokoměru	30
Obrázek 17: Ultrazvukové snímače a vyhodnocovací jednotka.....	31
Obrázek 18: Váha OMEGA LSC700-100	32
Obrázek 19: Zesilovač výstupu váhy BURSTER 9235	32
Obrázek 20: Regulační ventil R219 s pohonem LR24A-SR (Belimo).....	33
Obrázek 21: Elektrický výpustní ventil	33
Obrázek 22: Čidlo hladiny	34
Obrázek 23: Elektrické schéma pro ruční měření.....	35
Obrázek 24: Měřicí karta NI USB-6008.....	39
Obrázek 25: Čelní panel programu	40
Obrázek 26: Ovládání ventilů a vstup čítače	41
Obrázek 27: Průběh napětí vážního čidla	42
Obrázek 28: Princip měření pomocí vážního čidla.....	43
Obrázek 29: Princip získání průměrné hodnoty napětí.....	43
Obrázek 30: Vypočet průtoku z naměřených hodnot	44

Obrázek 31: Vyhodnocení signálu z clony	44
Obrázek 32: Schéma pro automatizované měření	45

9. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Kalibrační křivka váhy Omega LSC700-100.....	47
Graf 2: Základní charakteristiky průtokoměrů – ruční metoda	49
Graf 3: Relativní chyby průtokoměrů – ruční metoda.....	50
Graf 4: Korekční křivka ultrazvukového a lopatkového průtokoměru.....	50
Graf 5: Základní charakteristiky průtokoměrů – automatizovaná metoda	53
Graf 6: Vztah mezi skutečným a měřeným průtokem – automatizovaná metoda	54
Graf 7: Relativní chyba průtokoměrů – automatická metoda.....	55

10. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehledné shrnutí vlastností průtokoměrů [3]	13
Tabulka 2: Význam zdířek přípravku	29
Tabulka 3: Základní proměření snímačů	48
Tabulka 4: Měření maximálního průtoku	52
Tabulka 5: Základní proměření snímačů – automatizovaná metoda	53

11. SEZNAM PŘÍLOH

1. Testovací protokol zesilovače 9235(1 list)
2. Parametry zesilovače 9235 (1 list)
3. Uživatelská příručka ultrazvukového průtokoměru FD613 (8 listů)
4. Parametry lopatkového průtokoměru a jeho zapojení (2 listy)
5. Návod do BMFV (15 listů)

