



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MĚŘENÍ PRŮTOKU KAPALIN

FLOW MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Schoř

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Zdeněk Schoř

ID: 186181

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Měření průtoku kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace laboratorního přípravku pro demonstraci vlastností snímačů průtoku kapalin. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Vypracujte přehled nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku kapalin, přehled hlavních parazitních vlivů a přehled metod pro kalibraci snímačů průtoku.
2. Navrhněte a realizujte laboratorní přípravek pro měření průtoku vody, umožňující testování parazitních vlivů na přesnost měření průtoku. Demonstrujte zejména vliv uklidňující dráhy, pulzujícího toku a vzduchových bublin.
3. Proveďte základní ověřovací měření s dostupnými snímači průtoku a výsledky diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

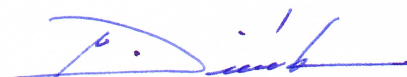
BAKER, R.C. Flow measurement handbook. Cambridge University Press, New York, 2000.

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

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

Konzultant:



doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato bakalářská práce se zabývá měřením průtoku kapalin. První část tvoří teoretický rozbor s přehledem nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku, hlavních parazitních vlivů a metod pro kalibraci snímačů průtoku. Druhou část tvoří návrh a realizace laboratorního přípravku pro měření průtoku vody, který je určen pro výuku studentů. Přípravek je navržen na testování čtyř snímačů průtoku s použitím odvažování jako reference. Výsledkem praktické části je naměření základních charakteristik použitých snímačů průtoku a porovnání získaných hodnot s údaji od výrobce. Dále jsou během měření přidány parazitní vlivy a je určeno, do jaké míry ovlivňují přesnost měření.

Klíčová slova

Průtokoměr, nejistota, přesnost, uklidňující dráhy, kalibrace

Abstract

This bachelor thesis deals with flow measurement of liquids. The first part is a theoretical analysis with an overview of the most important parameters of flow sensors, the main parasitic influences and methods for calibration of flow sensors. The second part is the design and realization of the laboratory apparatus for measuring the flow of water, which is intended for the teaching of students. The apparatus is designed to test four flow sensors using weighing reference. The result of the practical part is the measurement of the basic characteristics of the flow sensors used and comparison of the obtained values with the data from a manufacturer. Further parasitic influences are added during the measurement and is determined to what extent they affect accuracy of the measurement.

Keywords

Flowmeter, uncertainty, accuracy, calming tracks, calibration

Bibliografická citace:

SCHOŘ, Z. *Měření průtoku kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření průtoku kapalin jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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: **10. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne: **10. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod.....	5
2.	Přehled nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku kapalin.....	6
2.1	Nejistota, Přesnost, Opakovatelnost.....	6
2.2	Linearita (Linearity)	6
2.3	Uklidňující dráhy (Calming tracks).....	6
2.4	Rozsah (Range)	7
2.5	Měřená veličina	7
2.6	Tlaková ztráta (Pressure loss)	8
2.7	Maximální tlak (Maximal pressure).....	9
2.8	Nominální průtok (Nominal flow)	9
2.9	Způsob připojení snímače	9
3.	Přehled parazitních vlivů snímačů průtoku kapalin	11
3.1	Okolní podmínky.....	11
3.2	Kapalina	11
3.3	Rozsah průtoku (flow range).....	11
3.4	Teplota.....	11
3.5	Nestabilní tok	12
3.5.1	Pulzující tok.....	12
3.5.2	Neúplné zaplnění.....	13
3.6	Velikost potrubí a konfigurace	13
3.7	Materiál potrubí.....	13
4.	Přehled metod kalibrace snímačů průtoku kapalin	14
4.1	Zařízení pro kalibraci průtoku.....	14
4.1.1	Letmý start a stop	14
4.1.2	Stálý start a stop	15
4.2	Referenční měřič	16
4.3	In Situ kalibrace	17
4.3.1	Test Poklesu	17
4.3.2	Sondy.....	18
4.3.3	Suchá kalibrace	18
5.	Původní přípravek	19

6.	Návrh laboratorního přípravku.....	21
6.1	Základní schéma.....	21
7.	Přehled vybraných průtokoměrů.....	24
7.1	Endress + Hauser, Promass 40.....	24
7.2	Sontex, Superstatic 440.....	24
7.3	OMEGA, FTB 4600.....	24
7.4	OMEGA, FD 613.....	25
8.	Realizace přípravku.....	26
8.1	Konstrukce.....	26
8.2	Sběr dat.....	30
8.2.1	Analogový vstup.....	30
8.2.2	Multimetrový vstup.....	33
8.2.3	Digitální vstup.....	33
9.	Základní ověřovací měření.....	35
9.1	Postup odvzdušnění.....	35
9.2	Ověření kalibrační konstanty u odvažování.....	35
9.3	Endress+Hauser, Promass 40.....	36
9.4	Sontex, Superstatic 440.....	37
9.5	OMEGA, FTB4600.....	38
9.6	OMEGA, FD 613.....	39
10.	Testování parazitních vlivů.....	41
10.1	Pulzující tok.....	41
10.2	Uklidňující dráhy.....	43
10.3	Přítomnost vzduchu.....	44
11.	Závěr.....	48
12.	Literatura.....	49

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Uklidňující dráhy OMEGA FD613 [OME01]	7
Obr. 2-2: Tlakové ztráty SONTEX [SON14]	9
Obr. 2-3: Whitworthův trubkový závit [ROZ17].....	10
Obr. 4-1: Schéma kalib. zařízení pro vodu [BAK16]	14
Obr. 4-2: Nesoulad mezi průtokem a odezvou [BAK16]	16
Obr. 4-3: Diagram systému na test poklesu [BAK16].....	18
Obr. 5-1: Čerpadlo Grundfos UPS 32-55 180	19
Obr. 5-2: Zapojení původního aparátu [BMF17].....	20
Obr. 6-1: Návrh změny uklidňující dráhy snímače.....	21
Obr. 6-2: Původní konstrukce	22
Obr. 6-3: Schéma přípravku pohled z boku	22
Obr. 8-1: Blokové schéma	26
Obr. 8-2: Regulační ventil BELIMO a krabička napájení [BMF17].....	27
Obr. 8-3: Plováчковý průtokoměr s redukčním ventilem.....	28
Obr. 8-4: Výsledná realizace.....	29
Obr. 8-5: Schéma zapojení laboratorního přípravku.....	30
Obr. 8-6: Zesilovač BURSTER 9235	31
Obr. 8-7: Měřicí karta NI myDAQ	31
Obr. 8-8: Aplikace Prutok2.vi.....	32
Obr. 8-9: Pracovní nastavení oken.....	33
Obr. 8-10: Aplikace prutok1.seproj	34

Seznam tabulek

Tabulka 3-1: Kinematická viskozita vody [KIN13]	12
Tabulka 7-1: Parametry průtokoměrů	25
Tabulka 9-1: Kalibrace váhy	35
Tabulka 9-2: Měřené hodnoty základní charakteristiky Promass 40	36
Tabulka 9-3: Měřené hodnoty základní charakteristiky Superstatic 440	37
Tabulka 9-4: Měřené hodnoty základní charakteristiky FTB 4600	38
Tabulka 9-5: Měřené hodnoty základní charakteristiky FD 613	40
Tabulka 10-1: Měřené hodnoty při pulzujícím toku	41
Tabulka 10-2: Vliv pulzujícího toku na relativní odchylku	42
Tabulka 10-3: Měřené hodnoty při vlivu krátkých uklidňujících drah	43
Tabulka 10-4: Vliv uklidňujících drah na relativní odchylku	44
Tabulka 10-5: Množství vzduchu odpovídající úrovni plováku	44
Tabulka 10-6: Naměřené hodnoty při přidávání vzduchu	45

1. ÚVOD

Měření průtoku patří mezi měření neelektrických veličin, která mají nejvýznamnější zastoupení na trhu. V současnosti je měření průtoku velmi často sledovanou veličinou, používá se například při dávkování surovin v potravinářském průmyslu, v domácnosti pro měření odběru vody, ve zdravotnictví pro měření průtoku krve atd.

Měření průtoku kapalin úzce souvisí se spotřebou vody. Mnoho studií poukazuje na neustále se zvyšující využívání vodních zdrojů. Lidská civilizace zažívá v posledním stolení nebývalý růst populace a z toho do budoucna plyne otázka, zdali bude možné zajistit dostatek vody pro další generace. Jako jedno z mnoha řešení může být pomocí kvalitního měření průtoku kapalin docílit lepšího hospodaření s vodou a tím předejít zbytečným ztrátám například při pěstování plodin.

Cílem bakalářské práce je navrhnout a realizovat laboratorní přípravek, který bude sloužit ve výuce studentů. Na laboratorním přípravku bude možné demonstrovat vlastnosti snímačů průtoku kapalin.

Přípravek bude zejména použit ke stanovení základních charakteristik různých typů průtokoměrů a demonstraci parazitních vlivů, které mají vliv na přesnost měření průtoku. Přípravek je koncipován tak, aby bylo v budoucnu možné nevyhovující průtokoměry nahradit jinými, případně vystřídat více vhodných průtokoměrů s odlišnými principy.

Přípravek bude poháněn čerpadlem s více stupni výkonu a regulačním ventilem, abychom mohli průtok nastavit s co největší přesností. Navíc bude umožňovat změnu délky uklidňující dráhy před snímačem, přidání vzduchu do průtokového kanálu v definovaném poměru vůči běžné užitkové vodě a rychlou změnu okamžitého průtoku.

V první polovině této bakalářské práce budou vysvětleny pojmy související s pozdějším postupem. Nejprve budou objasněny jednotlivé parametry, se kterými se můžeme setkat v oblasti měření průtoku kapalin. Poté budou zmíněny nejčastější z hlavních parazitních vlivů snímačů průtoku a kalibrační metody, z nichž některé budou použity přímo v praxi.

Druhá polovina práce je zaměřena na samotný návrh a realizaci laboratorního přípravku pro měření průtoku kapalin. Bude provedeno základní ověřovací měření za účelem zjištění veškerých nesrovnalostí s teoretickými předpoklady. Po stanovení základních charakteristik budou postupně testovány parazitní vlivy. Výstupem měření bude určit, do jaké míry mohou vybrané parazitní vlivy ovlivnit výsledek měření.

2. PŘEHLED NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH PARAMETRŮ SNÍMAČŮ PRŮTOKU KAPALIN

2.1 Nejistota, Přesnost, Opakovatelnost

Nejdříve je potřeba si nadefinovat několik základních pojmů, se kterými se můžeme setkat v oblasti měření s průtokoměry.

Jeden z nejdůležitějších pojmů je určitě nejistota. Nejistota je parametr přiřazený k výsledku měření, charakterizující rozptyl hodnot, které mohou být důvodně přiřazovány k měřené veličině. Tímto parametrem může být například směrodatná odchylka (její násobek) nebo polovina šířky intervalu, mající stanovenou úroveň věrohodnosti. Nejistota měření v sobě zahrnuje obecně mnoho složek. [DEF03]

V datasheetech snímačů se často uvádí mez nejistoty, což je mezní hodnota nejistoty přístroje u zařízení pracujícího za specifikovaných podmínek. Tento údaj je označován anglicky slovem „accuracy“, což bychom přeložili jako přesnost. Nejčastěji je mez nejistoty uvedena v relativním výrazu vztaženém k rozsahu snímače.

Každý přístroj má třídu přesnosti. Třída přesnosti je kategorie měřících přístrojů splňujících soubor specifikací týkajících se nejistoty. Třída přesnosti vždy specifikuje mez nejistoty. V některých případech výrobce uvádí různé třídy přesnosti pro stanovené pracovní podmínky, nejčastěji podle vybraných částí rozsahu. Například třída přesnosti 2 % pro dolních 10 % rozsahu a pro zbytek jen 1 % z odečtené hodnoty. [DEF03]

Opakovatelnost měření je definována jako preciznost měření za souboru podmínek opakovatelnosti měření. Podmínka opakovatelnosti měření zahrnuje stejný postup měření, stejný obslužný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo, a opakování měření na stejném nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku. Opakovatelnost je pak hodnota rozdílu dvou hodnot s 95 % spolehlivostí. V reálném případě pak může být uvedena závislost opakovatelnosti na průtoku. [TER09]

2.2 Linearita (Linearity)

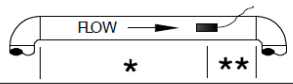
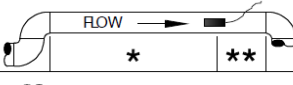
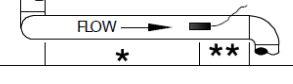
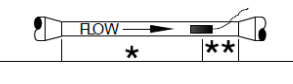
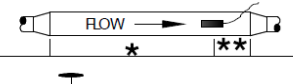
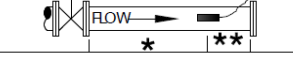
Linearita měření je společně s opakovatelností měření jedním ze základních prvků, kterými hodnotíme přesnost měření. Linearita měření je maximální odchylka od pomyslné rovné čáry, která spojuje nulový bod měřicího rozsahu s koncovým bodem. [ALP18]

2.3 Uklidňující dráhy (Calming tracks)

Některé průtokoměry jsou založeny na principech, které jsou citlivé na neustálý profil toku kapaliny. Ten je způsobený různými záhyby před a za snímači. Proto se uvádí minimální délka potrubí, kde musí být potrubí rovné, aby se tok v kapalině stabilizoval před vstupem do snímače a stejně tak po vyústění ze snímače, aby nedocházelo ke zpětným vlivům do snímače. Většinou se délka vztahuje na počet průměrů potrubí.

V našem případě se můžeme s požadavky na uklidňovací dráhy setkat u použitého ultrazvukového průtokoměru OMEGA FD613. Na obrázku 2-1 si můžeme všimnout, že

u tohoto typu průtokoměru jsou kladeny náročnější požadavky před vstupem do snímače, v anglickém jazyce se tento pojem označuje jako „upstream“. Po vyústění ze snímače (anglicky „downstream“) se hodnoty prakticky nemění.

Piping Configuration and Transducer Position	Upstream Dimenston:	Downstream Dimenston:
	Pipe Diameters	Pipe Diameters
	*	**
	9	3
	14	3
	24	4
	8	3
	8	3
	24	4

Obr. 2-1: Uklidňující dráhy OMEGA FD613 [OME01]

2.4 Rozsah (Range)

Interval hodnot měřené veličiny, která může být měřena daným měřidlem se specifikovanou nejistotou za definovaných podmínek. V této souvislosti rozlišujeme dolní a horní hranici rozsahu. Poměr horní a dolní hranice je označován jako dynamický rozsah snímače.

2.5 Měřená veličina

Průtokem lze rozumět v zásadě tři různé veličiny, které jsou mezi sebou připočítatelné. První veličinou je rychlost proudění, označuje se také jako rychlostní průtok. Jde o střední hodnotu rychlosti částic v_s [$m \cdot s^{-1}$] protékajících průtokovým kanálem. Dále rozlišujeme objemový průtok Q_v , který je definován jako podíl protečeného objemu V za jednotku času podle vztahu (1): [VYT18]

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

Posledním typem průtoků je hmotnostní průtok Q_m definován jako podíl protečené hmotnosti za jednotku času podle vztahu (2):

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

Pro přepočítání rychlostního průtoku na objemový nebo hmotnostní potřebujeme znát obsah průtokového kanálu S [m^2] a hustotu kapaliny ρ [$kg \cdot m^{-3}$].

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} = S \cdot v_s \quad (3)$$

$$Q_m = \rho \cdot Q_v = \rho \cdot S \cdot v_s \quad (4)$$

2.6 Tlaková ztráta (Pressure loss)

Ve většině případů měření průtoku kapalin zároveň měřené médium ovlivňujeme použitým fyzikálním principem snímače. To má za následek vytváření hydraulického odporu.

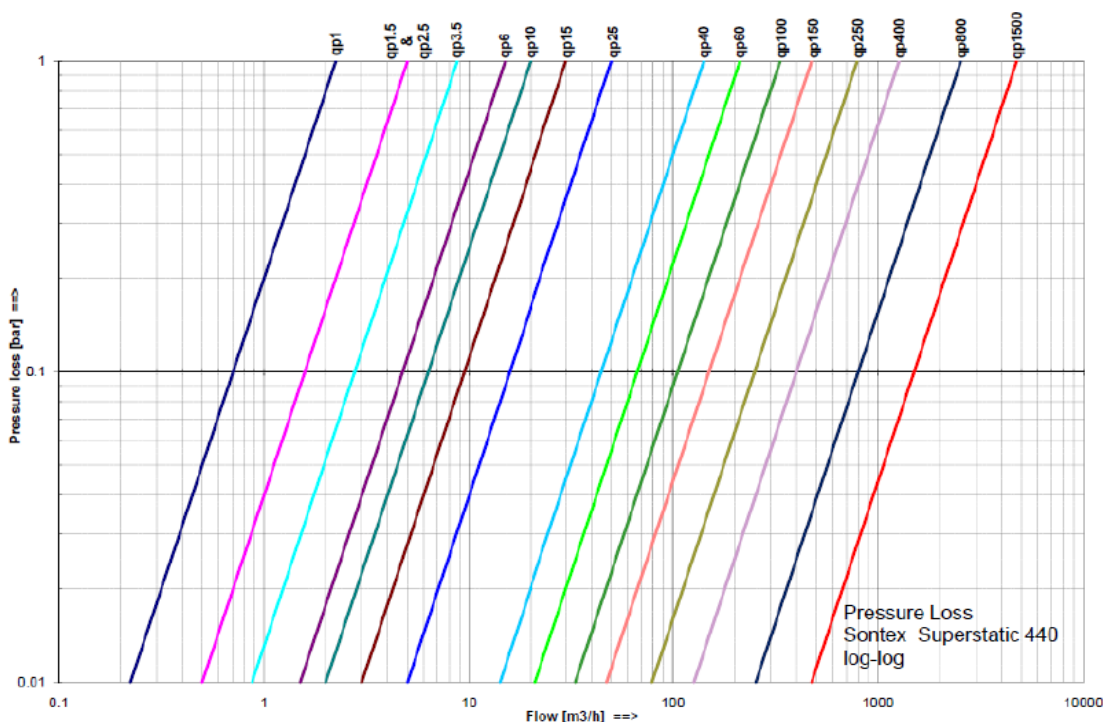
Například lopatkový průtokoměr odebírá ze soustavy energii, kterou převádí na otáčky lopatky a tím vytváří již zmíněný hydraulický odpor. Energie odebíraná ze soustavy se zvyšuje se zvyšující se rychlostí protékající kapaliny a tím se zvyšuje i tlaková ztráta. Můžeme tedy tvrdit, že tlaková ztráta u určitých principů snímačů je úměrná rychlosti kapalin. Z Bernoulliho rovnice pak podrobněji vyplývá, že tlak je úměrný druhé mocnině rychlosti proudění. Na druhou stranu některé principy, zejména ultrazvukové, nemají na soustavu patrný vliv.

Bernoulliho rovnice je vztah, který vyjadřuje zákon zachování mechanické energie pro ustálené proudění ideální kapaliny v uzavřené trubici.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p = \text{konst} \quad (5)$$

První část rovnice představuje kinetickou energii, druhá představuje tlakovou potenciální energii kapaliny. Součet kinetické a potenciální energie je ve všech místech trubice stejný.

Na obrázku 2-3 je příklad tlakových ztrát z datasheetu snímačů SONTEX, Superstatic 440, kde je tlaková ztráta vyjádřena v logaritmickém měřítku v závislosti na aktuálním průtoku.



Obr. 2-2: Tlakové ztráty SONTEX [SON14]

2.7 Maximální tlak (Maximal pressure)

Největší možný tlak v soustavě, který je přijatelný v závislosti na konstrukci zařízení. Při vyšších hodnotách tlaku dochází k postupnému poškozování nebo úplnému zničení zařízení.

2.8 Nominální průtok (Nominal flow)

Nominální průtok je průtok, pro který výrobce ručí za údaje o snímači uvedené v datasheetu. Obvykle tato hodnota odpovídá polovině měřicího rozsahu, ale není to pravidlem.

2.9 Způsob připojení snímače

Jelikož některé typy jsou založeny na měření rychlostního průtoku a na ostatní průtoky se přepočítává ze známého průřezu, tak průřez snímače zásadně ovlivňuje rozsah snímače.

Většina průtokoměrů až na výjimky, jakou je například ultrazvukový nebo indukční průtokoměr, se musí stát pevnou součástí celé soustavy, tzn. že kapalina přichází přímo do kontaktu s průtokoměrem, na průtokoměru pak nastává tlaková ztráta. Mechanická

konstrukce spolu se způsobem připojení, ať už se jedná o montáž na příruby nebo závitové šroubení zajišťují do jisté míry splnění délky uklidňovacích drah.

Ohled bychom měli brát na to, jestli se má jednat o spoje rozebíratelné či nikoli. Mezi rozebíratelné patří montáž na příruby nebo závitové šroubení s převlečnou matkou. Obecně u závitového šroubení je třeba dbát na to, aby v blízkosti snímače nebyly použity zbytečné redukce průměru potrubí, které by mohly porušit profil toku. Snažíme se tedy volit celou soustavu nejlépe o jednom průměru potrubí nebo alespoň v okolí snímače.

Vzniklo několik norem pro popis závitových šroubení. Jeden z nejpoužívanějších typů šroubení je Whitworthův trubkový závit. Na obrázku 2-3 jsou definované rozměry Whitworthova trubkového závitu dle normy ISO 228 a DIN 2999.

ISO 228	Závit podle:		Jmenovitý vnější průměr zaokrouhleně v mm	Vnitřní průměr jádra v mm	Počet závitů na 1" = 25,4 mm
	ISO 228	DIN 2999			
G 1/8"	R 1/8"		10	8,566	28
G 1/4"	R 1/4"		13	11,445	19
G 3/8"	R 3/8"		17	14,950	19
G 1/2"	R 1/2"		21	18,631	14
G 5/8"	R 5/8"		23	20,587	14
G 3/4"	R 3/4"		26	24,117	14
G 7/8"	R 7/8"		30	27,877	14
G 1"	R 1"		33	30,291	11
G 1 1/4"	R 1 1/4"		42	38,952	11
G 1 1/2"	R 1 1/2"		48	44,845	11
G 2"	R 2"		60	56,656	11
G 2 1/2"	R 2 1/2"		75	72,226	11
G 3"	R 3"		88	84,926	11
G 4"	R 4"		113	110,072	11

Obr. 2-3: Whitworthův trubkový závit [ROZ17]

3. PŘEHLED PARAZITNÍCH VLIVŮ SNÍMAČŮ PRŮTOKU KAPALIN

3.1 Okolní podmínky

Ideální průtokoměr by neměl být ovlivněn okolními podmínkami, v praxi to tak ovšem není. Je důležité, aby všechny okolní vlivy byly zaznamenávány. Pokud je předem známo, že přístroj bude nepřiměřeně vystaven nežádoucím okolním vlivům, je třeba volit průtokoměr odolný na předpokládané okolní vlivy, například zvýšený výskyt vibrací. Z hlavních a nejčastějších vlivů okolí jsou teplota okolí, tlak, vlhkost nebo vibrace.

3.2 Kapalina

Přístroje jsou kalibrovány na určitou kapalinu a v praxi je problém dosáhnout shodného složení kapaliny. Při nedosažení kalibrovaných podmínek se nám bude zvyšovat výsledná nejistota měření. Pokud je zkoumaná kapalina voda, pak nás bude hlavně zajímat její čistota, teplota a přítomnost vzduchových bublin.

3.3 Rozsah průtoku (flow range)

Je samozřejmě upřednostňováno, aby rozsah průtoku odpovídal provozním podmínkám, nicméně nepodaří-li se to splnit, je možné najít kompromis mezi rychlostí, objemem a tzv. Reynoldsovým číslem, které bude ještě podrobněji rozebráno.

Při změně rychlosti průtoku kapaliny se mění tvar profilu průtoku kapaliny a s vyššími rychlostmi se začínají více uplatňovat turbulence, což popisuje Reynoldsovo číslo. Změna Reynoldsova čísla souvisí také s měnící se viskozitou, která poměrně zásadně ovlivňuje profil toku uvnitř měřícího přístroje. Některé typy průtokoměrů, například vírové průtokoměry, mohou být na nepřesné nastavení Reynoldsova čísla velmi citlivé kvůli jejich fyzikální podstatě měření. [BAK16]

3.4 Teplota

S teplotou souvisí Reynoldsovo číslo (Re), které je závislé na střední rychlosti proudění kapaliny (w), na průměru používaného potrubí (d) a na kinematické viskozitě tekutiny ν podle následujícího vztahu:

$$Re = w \cdot d / \nu \quad (6)$$

Z těchto veličin je teplotou ovlivňována kinematická viskozita vody ν . Pro vodu o teplotě 20 °C je $\nu = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Právě s touto hodnotou budeme dále počítat v této práci. Pro lepší pochopení můžeme vidět v tabulce 3-1 názornou ukázkou závislosti kinematické viskozity na teplotě.

Tabulka 3-1: Kinematická viskozita vody [KIN13]

Teplota [°C]	Kinematická viskozita [m ² /s] * 10 ⁻⁶
0	1.787
5	1.519
10	1.307
20	1.004
30	0.801
40	0.658
50	0.553
60	0.475
70	0.413
80	0.365
90	0.326
100	0.29

Pokud bychom měli dvě identické kapaliny (v našem případě vodu) a měřili stejným průtokoměrem při stejné rychlosti proudění, tak při teplotách 0 °C a 20 °C se sníží hodnota kinematické viskozity o 44 %, což bude mít značný vliv na výslednou chybu měření. V ideálním případě pro eliminaci této chyby vlivem teploty by bylo vhodné měřit teplotu a následně upravovat požadovanou konstantu přímo během měření.

Průtokoměry citlivé na změnu Re jsou ultrazvukové průtokoměry, které pracují dobře při nižších hodnotách Re , kdy je tok laminární. U Coriolisova typu průtokoměru nastává vlivem velké viskozity problém s dosažením nulové stability výkonu. Velmi citlivé na změnu Re jsou diferenciální průtokoměry založené na principu Venturiho trubice. [TUV10] [BAK16]

3.5 Nestabilní tok

Většina průtokoměrů je ovlivněna nestálým tokem. Nestabilní tok můžeme chápat více způsoby. Jeden případ je pulzující chování protékající kapaliny, při kterém se rychle sníží rychlost protékající kapaliny a vzápětí se opět rychle zvýší na původní úroveň. Schopnost snímače zachytit tyto rychlé změny je dána snímací frekvencí a rychlostí vyhodnocovací jednotky.

Druhý případ je dlouhodobé neúplné zaplnění potrubí, takže uvnitř snímacího ústrojí je přítomen vzduch, který může mnohým fyzikálním principům snímačů vadit, a tudíž zvyšovat nejistotu měření.

3.5.1 Pulzující tok

Pulzující tok ovlivňuje rychlostní profil v potrubí a tím se zpětně ovlivní měření průtokoměru. V roce 1994 pánové Hakansson a Delsing potvrdili, že vlivem pulzujícího chování se profil toku zplošťuje [BAK16]. V případě ultrazvukového průtokoměru to způsobuje nesprávné průměrování signálu.

Turbínové a lopátkové průtokoměry jsou na tento vliv velmi náchylné. [BAK16]

3.5.2 Neúplné zaplnění

Při neúplném zaplnění se kapalina chová velmi odlišně od situace, kdy je potrubí a vnitřní ústrojí měřiče plně zaplněno. Průtokoměry diferenčního tlaku pracují na principu rozdílného tlaku před clonou a za ní. V případě, že měřič očekává v určitém místě změnu tlaku vlivem clony, tak je-li právě místo vody čidlo v kontaktu se vzduchem, nemůže se tlak odpovídajícím způsobem přenést na čidlo a celé měření je znehodnoceno.

Další příklad jsou vírové průtokoměry. Vírové průtokoměry pracují na principu překážky. Náraz kapaliny na překážku způsobí turbulence, které se dají vyhodnocovat a nejčastěji se využívá závislost na rychlosti proudění kapaliny. Při neúplném zaplnění používaného kanálu nastává problém s přepočtem rychlostního průtoku. Pro přepočet rychlostního průtoku na objemový nebo hmotnostní uvažujeme přesně daný průměr průtokového kanálu, takže tento princip nemůžeme použít. Za další vlivem neúplného zaplnění kanálu se ovlivní přenášení vzniklých turbulencí na čidlo a celé měření je znehodnoceno. Závisí to samozřejmě na umístění překážky a míře zaplnění. Míra zaplnění neboli obsah vzduchu vzhledem ke kapalině se uvádí v procentech.

3.6 Velikost potrubí a konfigurace

Používaná průměr potrubí nemusí být stejná jako při kalibraci. Mnoho průtokoměrů je citlivých na skokovou změnu průměru potrubí před vstupem. Nejlepší postup je připevnit průtokoměr k potrubí a při odinstalování tak vzít měřič i s částí potrubí, aby při jejich opětovném nainstalování k soustavě bylo zachováno prvotní nastavení.

Dále bychom do těchto vlivů mohli zahrnout i uklidňovací dráhy. Nehledě na potřebné minimum pro měření je potřeba se zabývat i délkou potrubí před a za snímačem pro správné ustálení profilu toku. Tato délka se většinou uvádí 60 průměrů použitého potrubí, některé zdroje však uvádění až délku 70 průměrů. I tak se v některých případech stává, že se profil toku zcela neustálí. [BAK16]

3.7 Materiál potrubí

Zde se jedná spíše o sekundární efekt drsnosti povrchu. Vnitřní strana potrubí by měla být jemná, aby se zajistila předvídatelnost profilu toku. Drsnost může být definována jako střední hodnota odchylky drsnosti oproti střední čáře založené na minimálnímu součtu čtverce odchylky. Maximální povolená drsnost povrchu materiálu je v rozmezí 10^{-3} - 10^{-4} průměru použitého potrubí.

Dále v některých případech může být ovlivněn průtokoměr okolním potrubím. Například elektromagnetický průtokoměr může být citlivý na elektrické a magnetické vlastnosti potrubí. [BAK16]

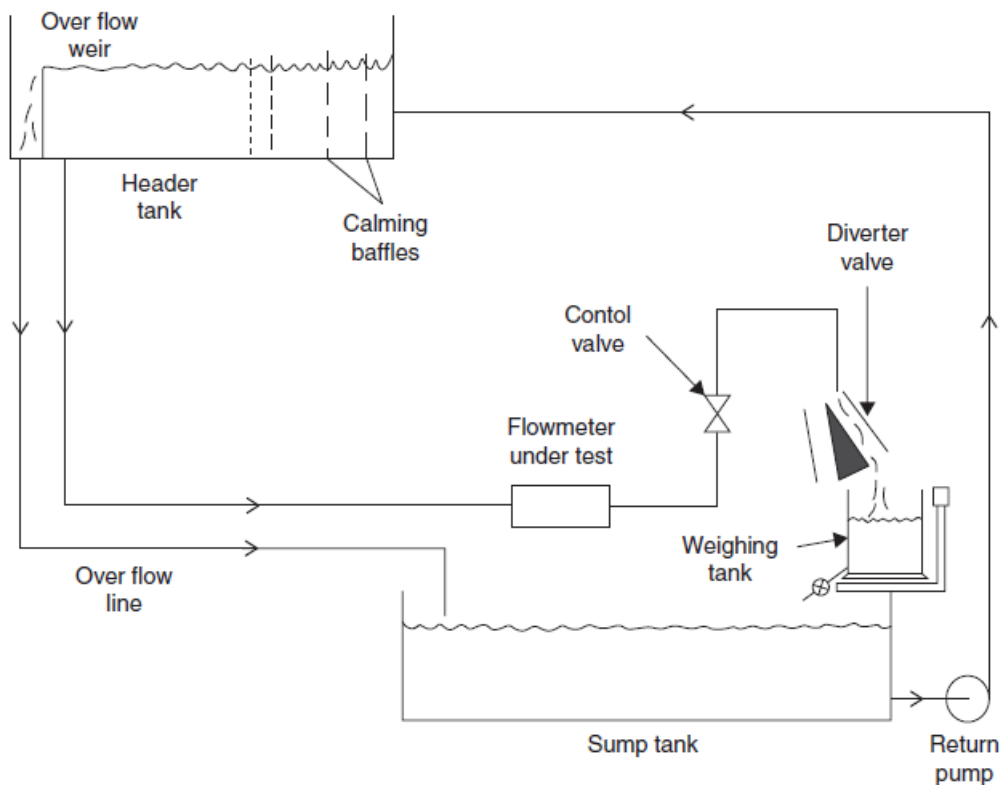
4. PŘEHLED METOD KALIBRACE SNÍMAČŮ PRŮTOKU KAPALIN

Kalibrace je soubor úkonů, kterými se za specifikovaných podmínek stanovuje vztah mezi údajem a výsledkem měření na základě etalonů. Pomocí kalibrace nastavujeme zařízení tak, abychom dosáhli co největší opakovatelnosti a přesnosti měření za určitých podmínek a co nejvíce snížili nejistotu měření. Při kalibraci se snažíme vytvořit ideální podmínky tak, abychom se mohli zaměřit pouze na měřenou veličinu a všechny ostatní faktory ovlivňující výslednou hodnotu byly co nejvíce zohledněny. [DEF03]

4.1 Zařízení pro kalibraci průtoku

4.1.1 Letmý start a stop

Obrázek 4-1 zobrazuje princip kalibrace, která se nejčastěji používá pro vodu. Princip je známé také jako tzv. statická odvažovací metoda, kde je voda rozdělována do tanku po danou časovou periodu a ten pak může být odvažován. Problémem je, že je fyzicky nemožné rozdělit tok do a z odvažovacího tanku okamžitě. Změna vychýlení zabere určitý čas, který není nekonečně malý, a tudíž způsobuje chybu. [BAK16]



Obr. 4-1: Schéma kalib. zařízení pro vodu [BAK16]

Při řešení vycházíme z toho, že během vychýlení z odpadního tanku do odvažovacího máme určitý objem vody, který se ještě přesune do odpadního tanku. Pro přesnější určení doby pro odvažovací tank můžeme tedy odstartovat časování až po příbytku objemu o stanovenou hodnotu. Stejný princip platí i při zpětném vychýlení z odvažovacího tanku do odpadního.

Tento postup si můžeme ověřit tím, že budeme vychylovat vodu mezi tanky po malých časových intervalech a srovnáme výsledek s jedním delším vychýlením po dobu celkového součtu právě těchto malých časových intervalů. Postupně tak zdůrazníme odchylky a budeme je moci kompenzovat.

Po této kompenzaci lze předpokládat, že měření času bude o několik řádů přesnější než jiné měřené veličiny. Chyba bude zejména vznikat u měření hmotnosti a nastavení přepínacího ventilu (diverter valve). Typická nejistota takového uspořádání je dnes v řádech desetin procent.

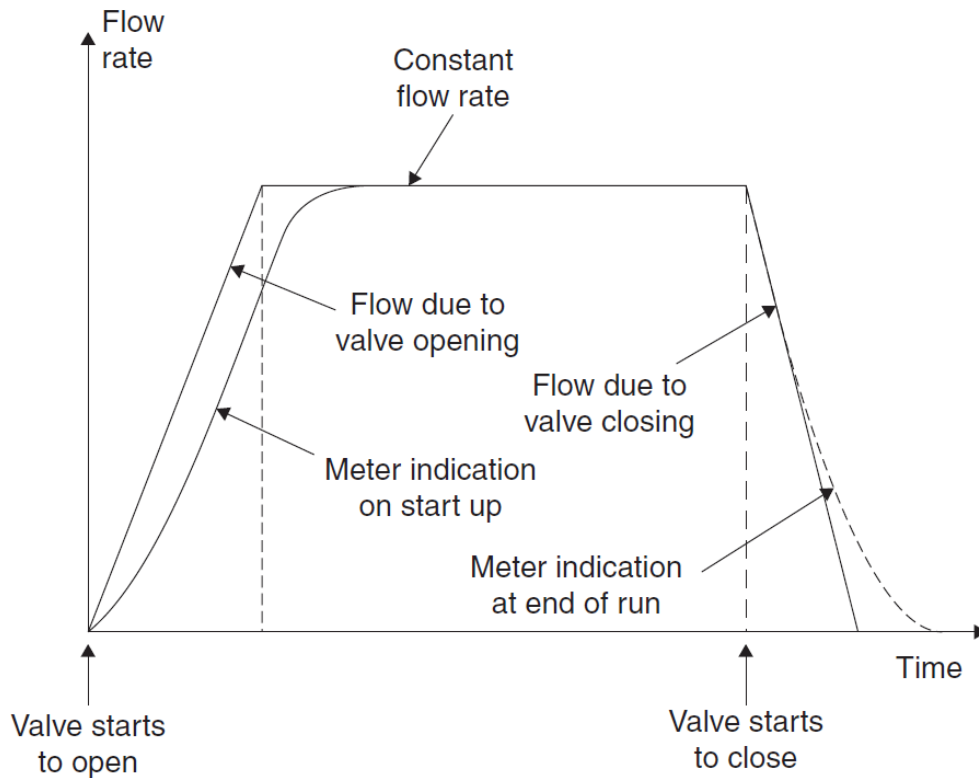
První varianta odvažování je použití dynamický odvažovací systém, kde tok vstupuje do tanku, který má možnost rychlého odtoku. Prázdný tank se začíná plnit a můžeme měřit hmotnost. Obvykle se měří elektronicky, ale je potřeba synchronizovat začátek měření hmotnosti s měřením průtokoměru. Po naplnění dostatečného množství vody se provede druhé měření a otevře se odvodňovací ventil.

Další varianta je známá jako substituční odvažovací metoda. Na začátku má odvažovací přístroj téměř prázdný tank a kalibrovanou hmotnost stejné hodnoty jako tekutina, která bude přitékat do odvažovacího tanku. Poté necháme tekutinu přitékat, dokud není nastolena rovnováha hmotností. [BAK16]

4.1.2 Stálý start a stop

Princip stálého startu a stopu je umožnit tekutině protékat skrze měřicí zařízení po přesně danou dobu a poté porovnávat zaznamenané množství s referenčním měřičem. Nashromážděné množství můžeme měřit buď jako objem nebo jako hmotnost. Problémem této metody je, že měřič musí přesně sledovat měnící se průtok a mnohé měřiče s tím mají problém.

Na obrázku 4-2 vidíme rozdíl mezi skutečným průtokem a reakcí měřiče. Při otevření ventilu a zvyšujícím se toku až do nastolení konstantního průtoku lze vidět, že měřič reaguje s určitým zpožděním. Stejně je to i při uzavření ventilu, kdy při nulovém skutečném průtoku ještě měřič nějakou dobu indikuje určitou nenulovou hodnotu. Chyba měření se bude projevovat zejména u průtokoměrů, které mají horší přesnost u malých průtoků.



Obr. 4-2: Nesoulad mezi průtokem a odezvou [BAK16]

Pro stálý start a stop je tedy nezbytné zajistit, že totožné množství tekutiny, které prošlo přes průtokoměr, dorazí i do odměřovacího tanku. Je zde obvykle potřeba věnovat pozornost návržení odměřovacích hladin a kontrolních skel, podle kterých si můžeme ověřit, že je hladina na stejné úrovni před a po provedení pokusu. Další důležitý aspekt je rychlost zastavení průtoku a neprodyšnost uzavíracího ventilu. V důsledku těchto aspektů by mohlo nastat hromadění malého množství tekutiny v systému mezi průtokoměrem a referenčním zařízením, tudíž by nám narůstala chyba měření, kdy by průtokoměr ukazoval v principu vyšší hodnoty než referenční zařízení. K omezení této chyby je vhodné volit soustavu tak, aby nevznikaly prostory pro hromadění těchto nežádoucích tekutin.

Typická odměřovací nádoba pro objemové měření je kalibrována použitím zváženého množství destilované vody za známé teploty. Horní a spodní část nádoby je malého průměru, aby se změny objemu zřetelněji projeví na úrovni hladiny. Počáteční hladina tekutiny je ustálena hrází. Tekutině je poté umožněno vtékat do nádoby, dokud nedosáhne horní zúžené části. K odečtení této úrovně se využívá kalibrované průhledné sklo se stupnicí objemu nebo se měří vzdálenost povrchu hladiny. Ověřovací nádoby tohoto typu jsou používány pro kalibraci měřičů s chybou $\pm 0,1 \%$. [BAK16]

4.2 Referenční měřič

Jde o porovnání již kalibrovaného (referenčního) přístroje s druhým doposud nekalibrovaným, kde jsou přístroje řazeny za sebe do série. Tato metoda je jednou z nejekonomičtějších, avšak náklady budou zahrnovat překalibrování referenčního měřiče. Pro použití referenčního měřiče budou muset být zajištěny určité podmínky,

zejména stálý tok a plně rozvinutý profil průtoku referenčního i kalibrovaného měřiče. Měl by být zajištěn adekvátní rozsah pro všechny měřice, dále prostředky pro přizpůsobení průtokoměrů s různými průměry ústí a délkami, aby je bylo možné namontovat za sebe do jedné linie. Jelikož srovnáváme dva přístroje, je zapotřebí mít vysoce kvalitní měřicí a zaznamenávací systémy s přesností určitě větší, než je cílená přesnost kalibrace.

Referenční měřič by měl mít vysokou opakovatelnost a jeho charakteristika se nesmí měnit s časem, v opačném případě je potřeba častější kalibrace. Určitě by měl mít široký rozsah průtoku, přinejmenším z ekonomických důvodů, aby se dal použít pro co nejvíce zařízení. Dá se předpokládat, že se bude často předělovat mezi různými systémy, a proto by neměl být citlivý na instalaci, ale co nejvíce jednoduchý a robustní.

Pro tuto metodu je vhodné vědět, jestli bude měřené médium kapalina nebo vzduch. Pro oba případy jsou jiné typy průtokoměrů, které více vyhovují požadavkům na referenční měřič. Pro kapaliny jsou vhodné elektromagnetické průtokoměry, ultrazvukové průtokoměry a Coriolisovy průtokoměry. [BAK16]

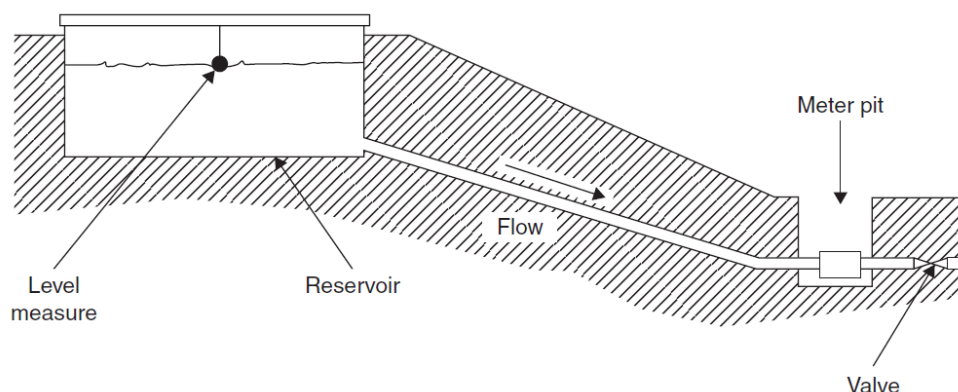
4.3 In Situ kalibrace

Jedná se o kalibraci na místě, někdy se používá z anglického „on site“. Použití této metody je vhodné hlavně v případech, kdy není možné měřicí přístroje přemísťovat z jejich polohy nebo provozní podmínky a nároky nedovolí nepřítomnost přístroje po nezbytnou dobu. Při předpokladu nově koupeného měřiče se nejistota pohybuje mezi 1–2 % v závislosti na splnění ukliďovacích drah a podobně. Jakmile měřič zapojíme a začne plnit svou úlohu, tak zkušenosti z vodního průmyslu říkají, že nejistota se může časem dostat k hodnotám 5-50 %. Z tohoto důvodu je nutné vést dokumentaci údržby a překalibrování. [BAK16]

Doba mezi jednotlivými kalibracemi na místě by se měla provádět v závislosti na posunu nejistoty. Pokud za rok dojde k nepatrnému posunu, může se časový interval zvýšit např. na 2 roky, v opačném případě je vhodné časový interval snížit o polovinu. Výstupní nejistota In Situ kalibrace se pohybuje okolo ± 3 %, což je o poznání horší než originální stav.

4.3.1 Test Poklesu

In situ kalibrace zahrnuje metody, jakou je například test poklesu. Při této metodě je objemový průtok měřičem porovnán se změnou úrovně hladiny v rezervoáru.



Obr. 4-3: Diagram systému na test poklesu [BAK16]

Pro realizaci je potřeba mít vhodný systém s rezervoárem, ze kterého vede potrubí přímo do průtokoměru a všechny ostatní vývody mohou být uzavřené. Musí být zajištěno, že všechna voda, co opustí rezervoár projde měřičem, takže je vhodné mít rezervoár ve vyšší poloze. Za měřičem musí být ventil kontrolující průtok. Důležité je správně získat hodnotu úrovně hladiny, nejistota takového měření se pohybuje okolo 2 %. [BAK16]

4.3.2 Sondy

Další využívaná metoda používá sondy pro měření rychlosti průtoku. Pokud je možné měřit pouze v jednom místě a máme plně rozvinutý laminární profil toku, je možné umístit sondu do vzdálenosti $l = 0,76 \cdot r_p$, kde r_p je poloměr potrubí a vzdálenost l měříme od středu. Rychlost v tomto místě je rovna průměrné rychlosti v potrubí. Nesprávné umístění sondy může vyústit ve velkou chybu měření. V ostatních místech není profil tak citlivý, ale rychlost v jiných místech není úměrná průměrné rychlosti potrubí a musíme použít korekční koeficient. Pro sondu dosahujeme nejistoty 1 %, takže celková dosažená nejistota je v řádu 3 %. [BAK16]

4.3.3 Suchá kalibrace

Způsob suché kalibrace není ve své podstatě kalibrace. Dá se použít pouze pro spočitatelné průtokoměry, např. clony. Jedná se o měření mechanických částí průtokoměru, zdali jsou zkonstruovány správně podle nadnárodních předpisů. Z těchto měření by se mělo vyvodit chování přístroje pro jednotlivé tlakové poklesy. Při této metodě se nepoužívá žádný reálný tok přístrojem. Pokud měření potvrdí, že přístroj splňuje požadavky ISO, pak by měl být průtok předvídatelný s nejistotou 1 - 2,5 %. Celková nejistota je zhruba 5 %. [BAK16]

5. PŮVODNÍ PŘÍPRAVEK

Původní laboratorní přípravek je založen na principu samospádu, kde se přes škrťící člen reguluje protékající množství kapaliny. Nejdříve se čerpá voda pomocí čerpadla Grundfos UPS 32-55 180 ze spodní zásobní nádrže do nádrže horní. Čerpadlo leží v nejnižším možném místě z důvodu trvalého zavodnění.



Obr. 5-1: Čerpadlo Grundfos UPS 32-55 180

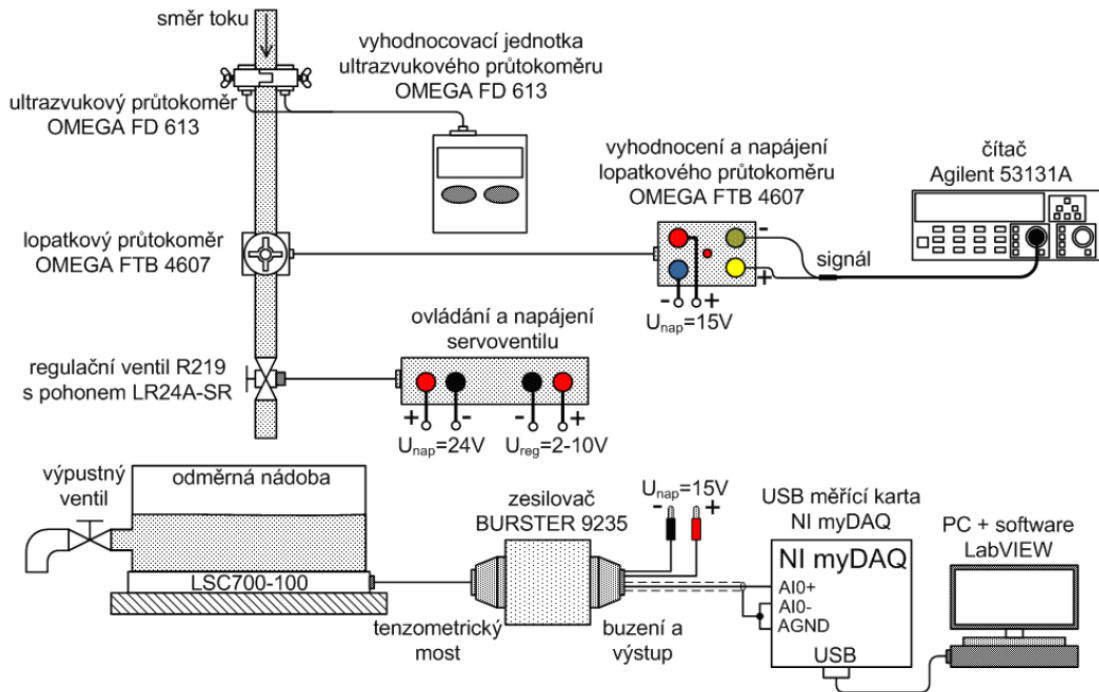
Horní nádoba slouží jako zásobník vody o objemu 50 litrů a zároveň udržuje konstantní výšku hladiny pro konstantní velikost průtoku, což je zajištěno přepadem. Výška přepadu je nad úroveň přítoku od čerpadla, aby byl případný odtok co nejvíce konstantní. Odtok z horní nádoby představuje začátek měřícího kanálu složeného z plastových trubek o průměru 3/4 palce, kde jsou v sérii za sebou jednotlivé snímače.

Použit je zde nejprve ultrazvukový průtokoměr OMEGA FD613, který měří rychlost protékající kapaliny v rozsahu 0,1 až 9,0 m/s. Přesnost v celém rozsahu měření je ± 2 % z maximálního rozsahu.

Dále je použit lopatkový průtokoměr OMEGA FTB4607. Otáčky u tohoto průtokoměru jsou snímány Halovou sondou. Výstupní puls ze sondy odpovídá 0,05 l a výrobcem udávaná přesnost je 1,5 % ze čtené hodnoty. Tento průtokoměr je navržen pro dlouhodobé měření průtoku vody, obsahuje zabudovaný filtr proti vniknutí menších částí, které by mohly poškodit měřící lopatky. Nevýhodou toho průtokoměru je pásmo necitlivosti, které je způsobeno vlivem mechanického tření na lopatkách, takže pro malé průtoky se lopatka vůbec neotáčí.

Pro změnu průtoku a ověření pásma necitlivosti je použit regulační ventil R219 s pohonem LR24A-SROV. Ventil je ovládán napětím 2-10 V. Rychlost pohonu není příliš velká, a proto je potřeba čekat, než se nastaví požadovaná poloha a poté se může začít s měřením.

Referenční měření je prováděno hmotnostním měřením průtoku. Jako snímač je použita váha OMEGA LSC 700-100, která má rozsah až do 45 kg. Váha obsahuje tenzometrický most, který musí být napájen z externího stabilizovaného zdroje. Výstup z váhy je přes zesilovač BURSTER 9235 přiveden do počítače pro další zpracování.



Obr. 5-2: Zapojení původního aparátu [BMF17]

Pomocí laboratorního přípravku je možné měřit charakteristiky jen dvou snímačů a princip samospádu a regulačního ventilu nabízí pouze omezené možnosti průtoku měřicím kanálem. Pro realizaci přípravku pro testování parazitních vlivů na snímače průtoku je vhodné mít k dispozici více možností manipulace s průtokem. Důležitá vlastnost je také možnost dalšího rozšíření pro více snímačů pro budoucí práce.

Zejména nevyužit je výkon čerpadla a objem vody, se kterým je zásobní nádrž a odměrná nádoba s váhou schopna pracovat. Na základě těchto údajů v novém návrhu nebudeme uvažovat horní nádobu ani měřicí kanál z původní aparatury, ale zachováme čerpadlo, zásobovací nádrž a odměrnou nádobu s váhou a výpustným ventilem.

6. NÁVRH LABORATORNÍHO PŘÍPRAVKU

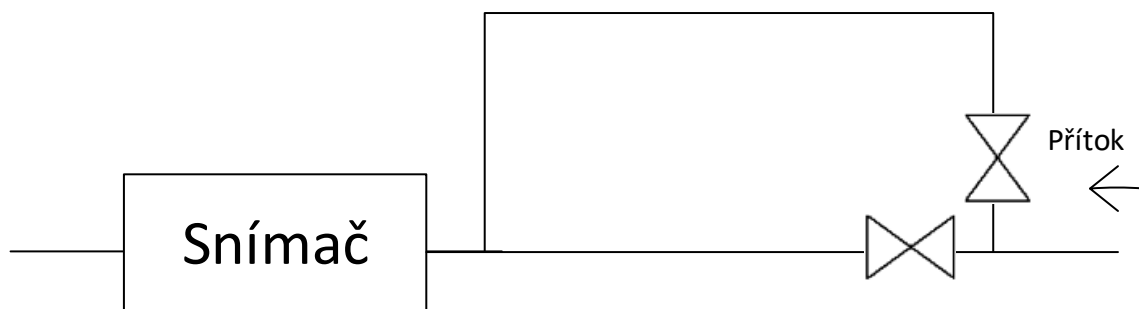
Cílem nového přípravku je ukázat studentům co nejvíce parazitních vlivů na výsledný údaj snímače průtoku. Hlavním záměrem je sestavit takový přípravek, který dokáže napodobit pulzující tok. Provedení by bylo realizováno manuálním přepínáním mezi primární a sekundární (odvodňovací) větví. Nejlépe po definovanou dobu, například 60 sekund.

Dále je záměrem sestavit přípravek, který dokáže nasimulovat přítomnost vzduchu v potrubí. Tuto situaci bych chtěl simulovat pomocí externího přívodu vzduchu z rozvodu tlakového vzduchu 0,6 MPa, který je součástí rozvodné sítě vzduchu budovy.

Stávající čerpadlo nabízí celkem 3 možnosti výkonu. V kombinaci s regulačním ventilem se zde nabízí možnost proměření základních charakteristik široké škály snímačů s různými rozsahy průtoku.

Za další je přínosné ukázat vliv uklidňovacích drah na výsledný údaj průtokoměru. Z konstrukčních a prostorových důvodů se zaměříme na uklidňovací dráhy před snímačem. Na obrázku 6-1 je vidět teoretický princip simulace uklidňovacích drah. Jedna z možností realizace je přidání dvou ventilů s paralelním potrubím ke každé ze zkoumaných větví. V jednom případě by bylo umožněno kapalině protékat přímým směrem po dostatečně dlouhou trajektorii, aby se ustálil profil toku, v druhém případě by byl vyveden záhyb přímo před ústím snímače, aby byl tok co nejvíce porušen.

Přípravek bude navržen i pro měření tlakové ztráty na snímači pomocí diferenčního měřiče tlaku.



Obr. 6-1: Návrh změny uklidňující dráhy snímače

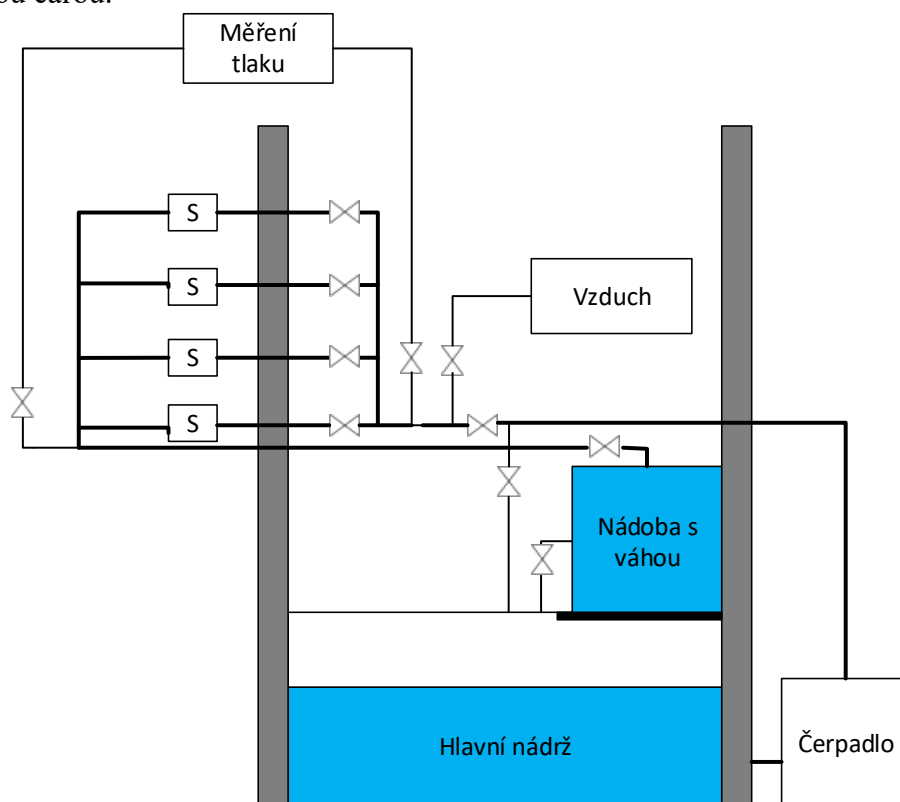
6.1 Základní schéma

Protože budou použity některé části z původního laboratorního přípravku, návrhy v sobě zahrnují prvky původní konstrukce pro lepší představu a orientaci.



Obr. 6-2: Původní konstrukce

Na obrázku 6-3 můžeme vidět schéma návrhu nového přípravku při pohledu z boku. Návrh počítá se zachováním čerpadla Grundfos. Bloky označené modře jsou ty místa, kde můžeme očekávat větší shromažďování vody. Hlavní trasa vody je zvýrazněna tučnou černou čarou.



Obr. 6-3: Schéma přípravku pohled z boku

Použití přípravku by mělo vypadat následovně. Na začátku zatopíme čerpadlo vodou z hlavní nádrže a rozhodneme, zdali má být aktivní primární úsek se zkoumanými snímači nebo sekundární úsek, který odvede vodu zpět do hlavní nádrže. Zvolíme-li primární úsek, tak krátce za ventilem bude připojen přívod vzduchu, který má zajistit požadovaný přístup vzduchu do potrubí. Jelikož se posléze dělí potrubí na jednotlivé větve pro každý snímač, je vhodné v tomto místo zvolit první místo měření tlaku jako referenční bod s vyšším tlakem.

Zvolíme, kterým snímačem má voda protékat a po definovanou dobu budeme zaznamenávat výstupní signál z vybraného snímače. Jako reference ke zkoumaným průtokoměrům bude použito hmotnostní odvažování po stejnou definovanou dobu. Pro zkoumání vybraných parazitních vlivů a zároveň z pohledu časové proveditelnosti jsem stanovil dobu jednoho měření 60 sekund pro všechny prováděná měření.

Po opětovném sloučení jednotlivých větví nastává další úsek vhodný pro změření diferenciálního tlaku v potrubí. Dále voda putuje do nádrže, která je položena na váze. Těsně, než voda opustí potrubí je v návrhu zamýšlen regulační ventil, který má zajistit, aby se tok netrhal a bylo možné regulovat průtok s velkou citlivostí v reálném čase.

7. PŘEHLED VYBRANÝCH PRŮTOKOMĚRŮ

U nového laboratorního přípravku jsou použity 4 různé průtokoměry, každý se svou vlastní větví. Výběr těchto průtokoměrů byl podmíněn hlavně cílem dosáhnout potřebné rozmanitosti pro zvýraznění jednotlivých parazitních vlivů. Další faktor při rozhodování byla dostupnost, kdy většina již byla ve vlastnictví školy a volně dostupná k použití.

Velmi důležitým parametrem při výběru byl nominální průtok a celkový rozsah průtoku, abychom všechny zařízení využívali v relativně stejné oblasti jejich rozsahu. Tento požadavek však není zcela splněn, nakonec se muselo přejít ke kompromisu.

7.1 Endress + Hauser, Promass 40

Nejpřesnějším použitým průtokoměrem je Coriolisův průtokoměr od firmy Endress + Hauser s přesností 0,35 % z celého rozsahu. Výrobce k tomuto údaji přesnosti přičítá hodnoty v řádech tisícín procent závislé na aktuální měřené hodnotě, které pro účely této práce budeme zanedbávat.

Rozsah udaný výrobcem je 0 - 2000 kg/h, avšak softwarem nastavený rozsah byl pouze 0 – 400 kg/h. Přenastavení nejpřesnějšího průtokoměru mi nebylo dovoleno a tak se celá práce provedla na nižším rozsahu. Je zde tedy prostor pro zlepšení právě přenastavením rozsahu, po kterém by více odpovídal rozsahu zbylých průtokoměrů.

Průtokoměr má výstup formou proudové smyčky v rozmezí 4 – 20 mA. Pro vyhodnocení naměřených údajů jsem si vyjádřil konstantu průtoku k výstupnímu proudu $K = 25 \text{ (kg/h)/mA}$. Konstantu jsem dostal dělením největšího možného průtoku 400 kg/h celým rozsahem výstupního proudu 16 mA.

7.2 Sontex, Superstatic 440

Průtokoměr od firmy Sontex pracující na principu fluidní oscilace má přesnost udanou technickou normou EN1434-1. Z normy pak vyčteme, že přesnost závisí pracovním bodě průtokoměru (velikost průtoku), ale nesmí překročit 5 % v celém svém rozsahu. Tudíž tento parametr budeme schopni na nové aparatuře sami zjistit pomocí reference.

Tento méně známý princip průtokoměru nemá od výrobce definované chování ve vztahu k přítomnosti vzduchu a pulzujícího toku. Při rozsahu 15 – 3000 kg/h a nominálním průtoku 1500 kg/h je vidět, že průtokoměr budeme používat pouze v dolních 15 % jeho rozsahu.

Na obalu průtokoměru je uvedena konstanta 27 impulzů na jeden litr protečené kapaliny. Po připojení výstupního signálu na osciloskop jsem naměřil maximální amplitudu signálu 11,4 V pro napájecí napětí 12 V.

7.3 OMEGA, FTB 4600

Poměrně obyčejný levný lopatkový průtokoměr s rozsahem průtoku od 34 do 4540 kg/h. Výrobce udává dvě různé přesnosti pro rozsahy průtoku. Ve většině rozsahu je udaná přesnost 1,5 %, avšak na spodních 10 % rozsahu je přesnost 2 %.

Konstanta výstupního signálu uváděná v datasheetu od výrobce je 94,6 impulzů na gallon, ale přímo na obalu průtokoměru je uvedeno 76,7 impulzů na galon. 1 galon je 3,7854 litrů, a tak po přepočtu dostáváme konstantu 20,262 impulzů na litr.

Po připojení výstupního signálu na osciloskop jsem naměřil maximální amplitudu signálu 13,6 V pro napájecí napětí 15 V.

7.4 OMEGA, FD 613

Tento průtokoměr od firmy OMEGA byl vybrán pro svou jednoduchou instalaci a ultrazvukový princip měření průtoku. Je citlivý na nízké rychlosti už od 0,1 m/s a závislý na délce uklidňujících drah. Výrobce doporučuje obecně délku uklidňovacího potrubí 10 průměrů potrubí před sondou a 5 průměrů za.

U ultrazvukových průtokoměrů mající přenosné vysílací a přijímací sondy není definován přesně průměr potrubí, nýbrž povolené rozmezí hodnot rychlosti protékající kapaliny. Vybral jsem stejné plastové potrubí, které bylo použito na dalších částech přípravku. Přenosné vysílací a přijímací sondy jsem nainstaloval na plastové PPR potrubí s průměrem 16,02 mm. Při rychlostech 0,1 – 9 m/s protékající kapaliny dostáváme rozsah průtoku 73 – 6520 kg/h.

Výrobce garantuje přesnost měření 2 % v celém rozsahu. Z použitého průměru potrubí jsem si vyjádřil převodní konstantu mezi čteným údajem m/s a odpovídajícím průtokem kg/min. Vezmeme-li rychlostní průtok 1 m/s, vynásobíme jej πr^2 , dostaneme průtok m^3/s . Tuto konstantu budu porovnávat s měřenými hodnotami. Pro naše měření je nejvhodnější převést si konstantu na kg/min, takže musíme ještě vynásobit 1000 a 60.

Příklad výpočtu pro rychlost 1 m/s:

$$K = 1 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{0,01602}{2}\right)^2 \cdot 1000 \cdot 60 = 12,1 \text{ kg/m}$$

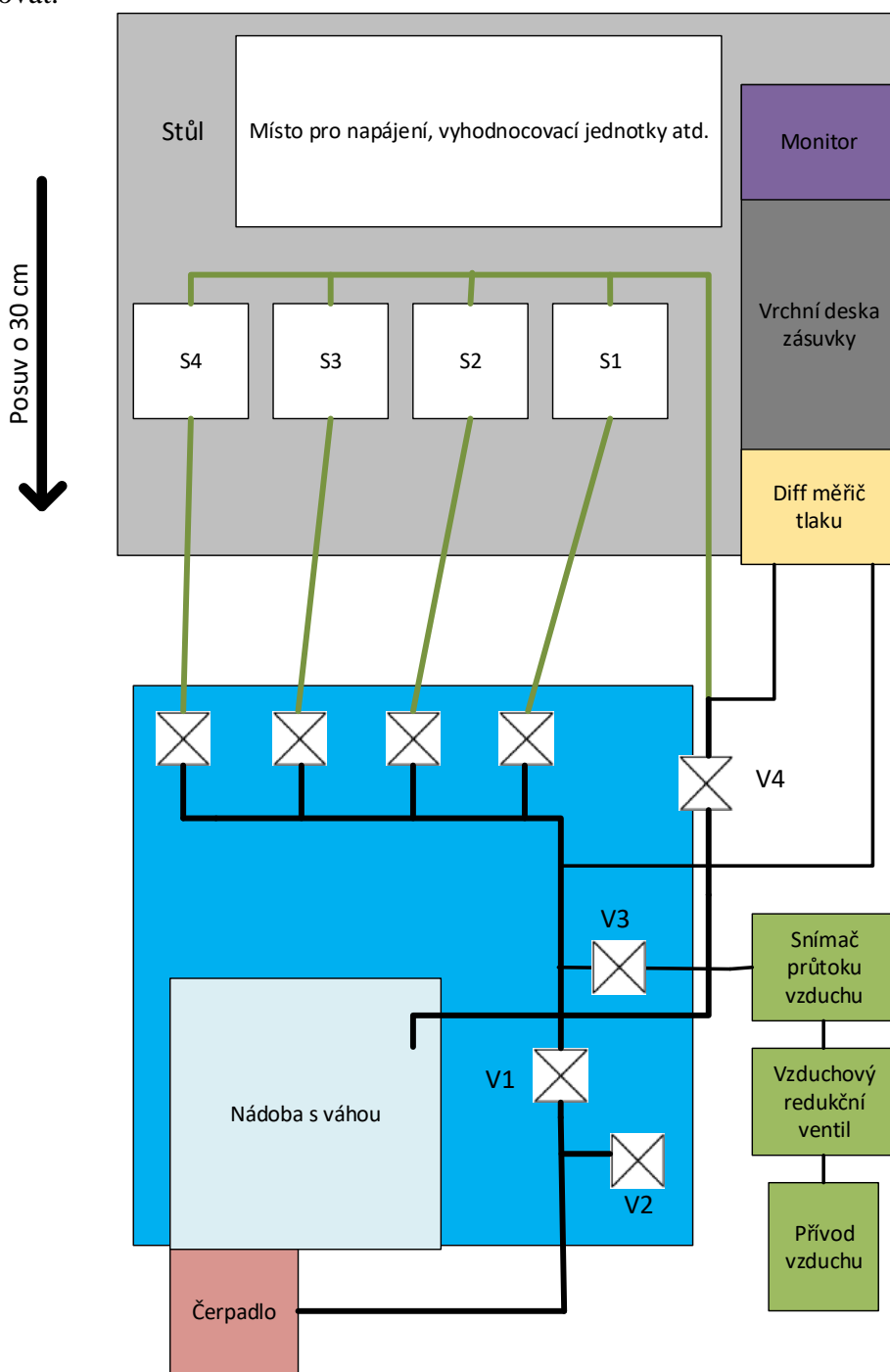
Tabulka 7-1: Parametry průtokoměrů

Průtokoměry	Rozsah [kg/h]	Přesnost [%]	Výstup	sledovaná konstanta
Promass 40	0 - 400	0,35	4 - 20 mA	25 (kg/h)/mA
Superstatic 440	15 - 3000	5	Impulzy (11,4 V)	27 imp/kg
FTB4600	34 - 4540	2	Impulzy (13,6 V)	20,262 imp/kg
FD613	73 - 6520	2	m/s	12,1 kg/m

8. REALIZACE PŘÍPRAVKU

8.1 Konstrukce

Na obrázku 8-1 je schéma při pohledu shora na výsledný přípravek. Toto schéma považuji za nejpřehlednější a k popisu jednotlivých částí přípravku na něj budu odkazovat.



Obr. 8-1: Blokové schéma

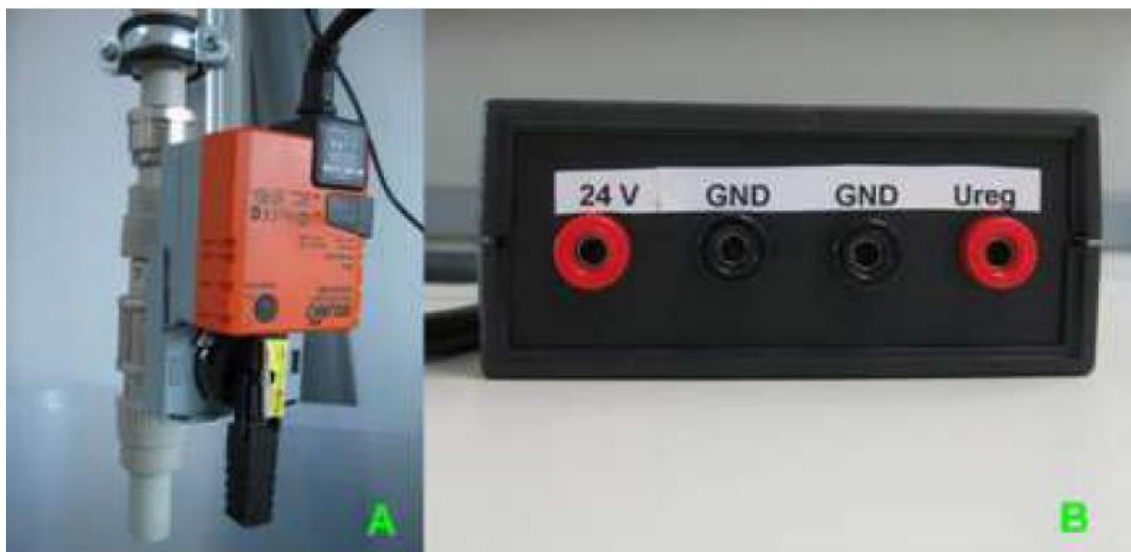
Černou tučnou čarou jsou znázorněny hlavní trasy pro vodu, které vedou plastovým PPR potrubím. Černou tenkou čarou jsou pak vyznačeny přípojná místa pro specifické účely, kterými by neměla procházet voda.

Zelená tučná čára představuje trasy pro vodu, které vedou plastovou zahradní hadicí. Tady nastala změna v konstrukci oproti návrhu. V návrhu se uvažovaly před každým snímačem 2 větve pro demonstraci ukliďňovacích drah. V konstrukci se to provedlo pomocí zahradní hadice, kterou můžeme ohýbat díky prostoru mezi stolem a nádrží. Všechny snímače průtoků, ve schématu označené jako S1 – S4, jsou na pevné dřevěné podložce. Posunutím této podložky k okraji stolu se hadice vlivem vlastní hmotnosti začnou ohýbat směrem dolů do volného prostoru. Možná délka posuvu na stole je zhruba 30 cm. V našem měření budeme proměřovat pouze největší možné přiblížení snímačů k okraji stolu, tedy nejkratší ukliďňovací dráhy pro snímače, a největší oddálení od okraje stolu.

V přípravku se nachází několik ventilů, ty důležité jsem pojmenoval V1 – V4. Ventily V1 a V2 jsou kulové ventily ovládané manuálně a slouží pro regulaci vody a přepínání mezi primární a sekundární větví přípravku. Ventil V3 je oproti tomu menší, také manuální a slouží k zapnutí přívodu vzduchu do potrubí. Zároveň vedle ventilu V3 je nainstalován jednocestný ventil, který má za úkol pustit pouze vzduch do potrubí a zabránit zpětnému proudění vody do přívodu vzduchu.

Ventil V4 je spojitý regulační ventil se servořízením BELIMO LR24A-SR ovládaný napětím 2 V (zavřeno) – 10 V (otevřeno). Ventil V4 nám zaručí potřebnou citlivost pro nastavování různých průtoků. Reálně se hodnoty regulačního napětí pro naše potřeby pohybují od 3 do 7 V. Dále je umístěn ventil u jednotlivých větví snímačů, které ovládají průtok do jednotlivých větví s měřeními průtokoměry.

Na obrázku 8-2 je regulační ventil společně s dodatečně vytvořenou krabičkou na napájení. Ventil se může napájet střídavým i stejnosměrným napětím 24 V, toto napětí se připojuje na krabičku vlevo. Regulační napětí 2 až 10 V pak vpravo. Při regulaci průtoků je třeba dbát na velmi pozvolné otáčení serva, je nutné vždy chvíli počkat pro ustálení průtoků.



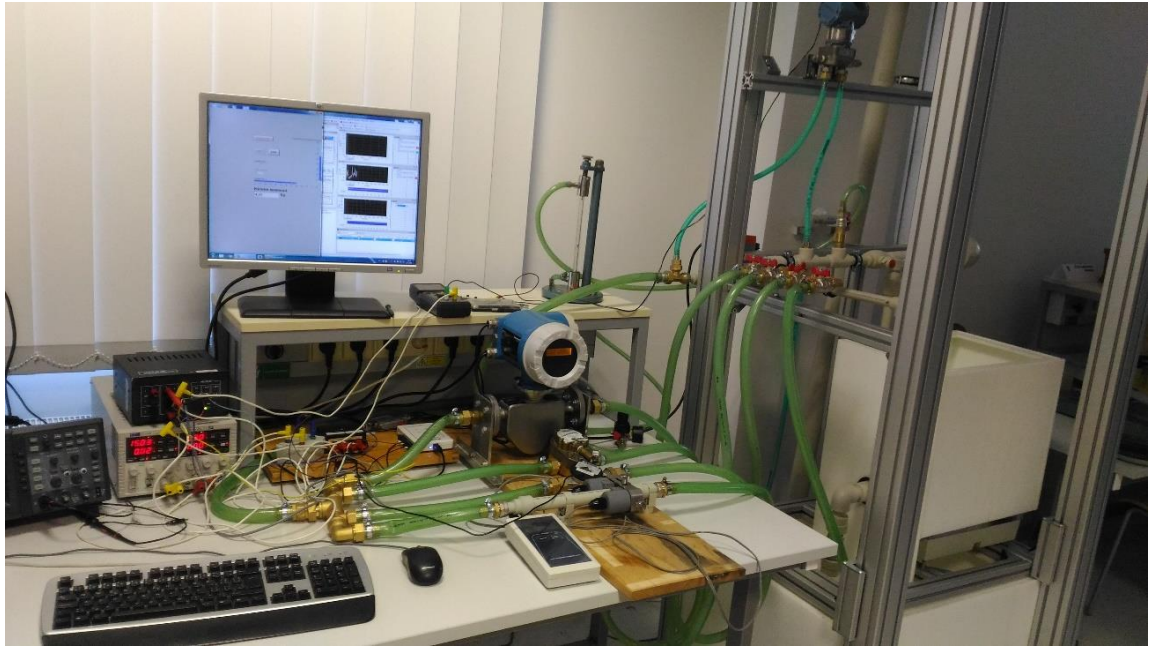
Obr. 8-2: Regulační ventil BELIMO a krabička napájení [BMF17]

Části systému související s přívodem vzduchu jsou v blokovém schématu vyznačeny zelenými bloky. Průtok přiváděného vzduchu ventilem V3 je potřeba měřit, abychom mohli později uvádět poměr přidaného vzduchu k protečené vodě. Vzduch je tedy potřeba regulovat, to je provedeno otočným vzduchovým redukčním ventilem. Za něj je nainstalován plováчковý průtokoměr s trubicí R-01, do které je vložen hliníkový dutý plovák. Plovák vystoupá do výšky úměrné průtoku vzduchu a na stupnici trubice lze okamžitě vidět účinky otáčení redukčního ventilu a přesně nastavit požadovaný průtok.



Obr. 8-3: Plováчковý průtokoměr s redukčním ventilem

Na obrázku 8-4 můžeme vidět výslednou realizaci přípravku. Oproti blokovému schématu došlo k prohození diferenčního měřiče tlaku Rosemount s přívodní částí pro vzduch, měřič tlaku bylo potřeba pevně připevnit k nosné konstrukci a umístit měřič do vyšší polohy oproti vývodům ze soustavy, abychom docílili vhodnějších podmínek pro měření tlakové ztráty na snímači.



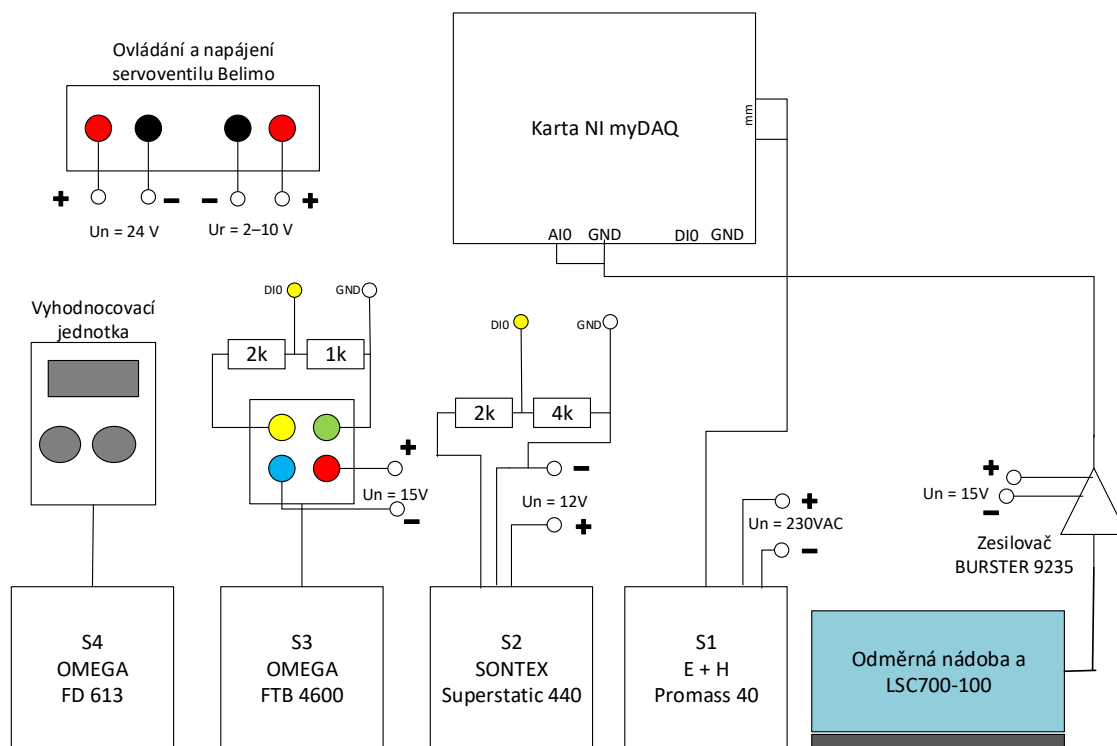
Obr. 8-4: Výsledná realizace

K přípravku bylo nutné připojit ještě 2 zdroje stejnosměrného napětí, protože pro správný chod všech přístrojů potřebujeme 4 různá napětí např. 24 V pro regulační ventil, 12 V pro napájení průtokoměru Sontex, 15 V pro napájení lopatkového průtokoměru OMEGA a také je potřeba mít jedno jemně nastavitelné napětí od 2 do 10 V pro regulaci průtoku regulačním ventilem.

Během měření a sběru naměřených dat bylo potřeba sledovat některé z výstupních signálů průtokoměrů, proto jsem do sestavy přípravku zařadil i osciloskop, jak je částečně vidět na obrázku 8-4 v levém spodním rohu.

Dále při prvních testovacích měřeních bylo zjištěno, že rozsah diferenčního snímače tlaku je pro naše potřeby nevyhovující. Tlaková ztráta soustavy se zdá být o hodně větší, než bylo předpokládáno.

Do budoucna se počítá s jeho výměnou, a proto jej nebudu dále uvádět ani na schématu zapojení.



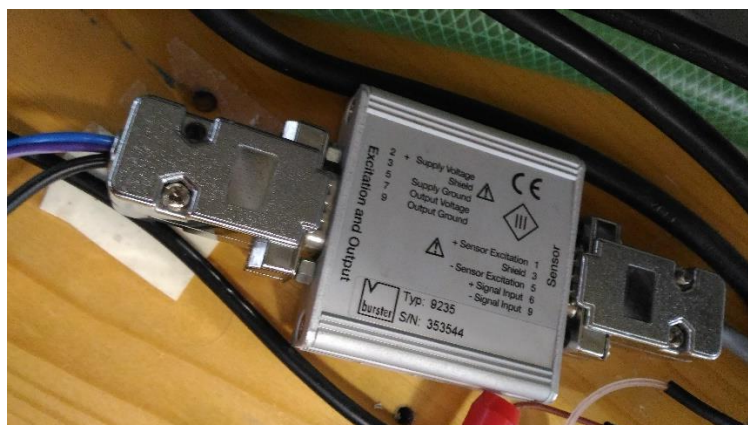
Obr. 8-5: Schéma zapojení laboratorního přípravku

8.2 Sběr dat

V celé práci budu uvažovat $1 \text{ l vody} = 1 \text{ kg vody}$ pro usnadnění výpočtů. U ultrazvukového průtokoměru je k získání rychlostního průtoku použita vlastní vyhodnocovací jednotka od výrobce. Při odečítání měřené hodnoty máme na výběr z dvou jednotek ft/s a m/s . Pro lepší rozlišení jsem odečítal v jednotkách ft/s a následně přepočítal na m/s .

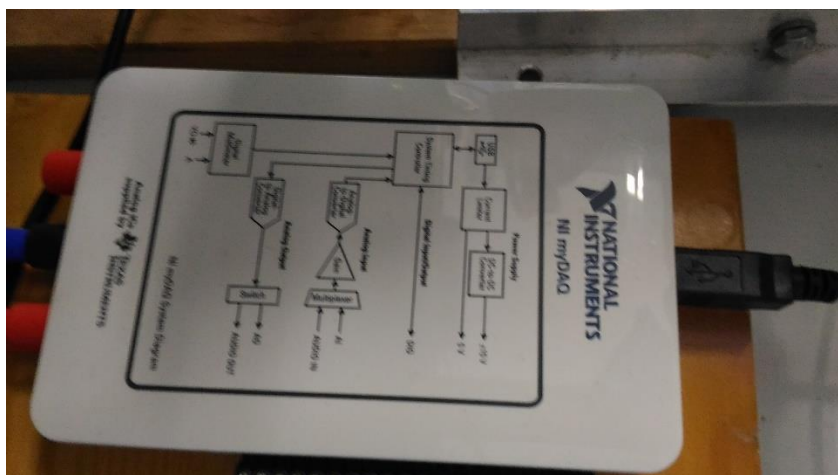
8.2.1 Analogový vstup

Pro referenční měření průtoku je použito odvažování nádoby pomocí vážního čidla OMEGA LSC 7000-100. Jedná se o nosník, na kterém jsou deformační účinky hmotnosti převáděny na změnu mechanického napětí v nosníku. Změna mechanického napětí je měřena tenzometrickým můstkem nalepeným na nosníku. Měřicí Wheatstoneův můstek je připojen k zesilovači BURSTER 9235, který výstupní signál zesílí na úroveň vhodnou pro další zpracování. Zesilovač je napájen ze zdroje 15 V (červený banánek je kladný pól napájení, černý pól je záporný) a přes něj je buzen i tenzometrický most. [BMF17]



Obr. 8-6: Zesilovač BURSTER 9235

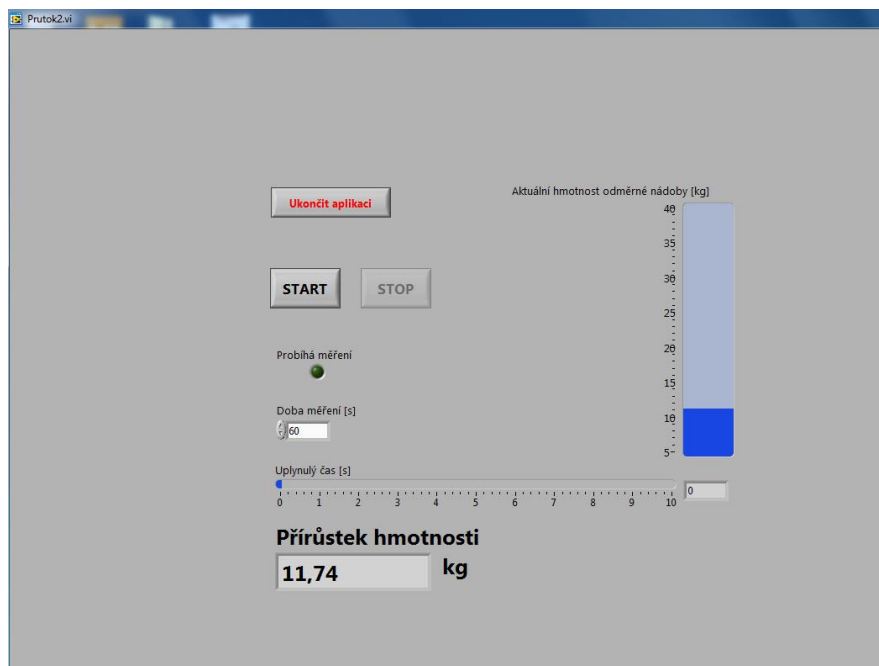
K přenosu signálu do počítače je použita USB měřicí karta NI myDAQ. Signál ze zesilovače BURSTER je přiveden na analogový vstup karty s označením „AI0“.



Obr. 8-7: Měřicí karta NI myDAQ

Ke zpracování signálu z nosníku byla v počítači v původním přípravku použita aplikace Prutok2.vi. Na obrázku 8-8 můžeme vidět prostředí aplikace Prutok2.vi. Aplikace ukazuje rozdíl hmotností za zadaný čas.

Při provádění měření je odvažovací nádoba poměrně daleko od operátorského místa s klávesnicí a myší. Proto na aplikaci Prutok2.vi je možné ocenit i názorné znázornění hladiny vody a její pomyslné hranice, aby se nestalo, že voda z odvažovací nádoby přeteče.



Obr. 8-8: Aplikace Prutok2.vi

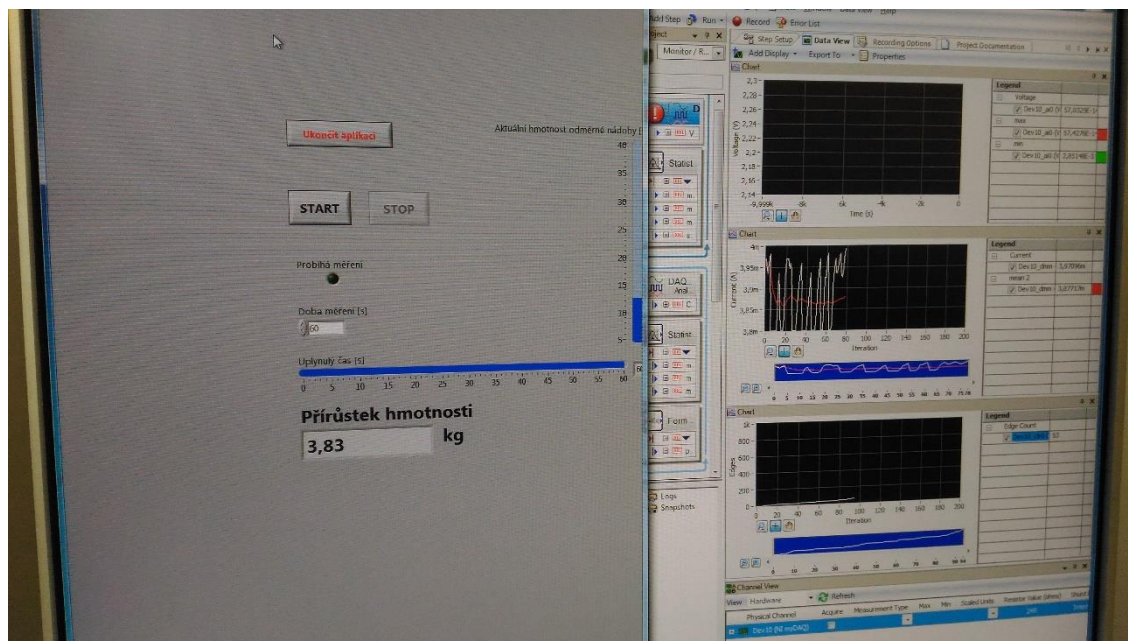
Avšak aplikace byla vytvořena zhruba před 3 lety a použitá kalibrační konstanta pro převod signálu by nemusela být postupem času zachována (případné přetížení nebo poškození tenzometrického můstku). Bylo potřeba se přesvědčit o správnosti aplikace, a tak jsem provedl novou kalibraci tenzometrického můstku. K nové kalibraci jsem použil prostředí SignalExpress. Jedná se o provizorní řešení, jelikož během konstrukce a měření docházelo k mnoha změnám a objevovalo se mnoho neznámých, tak se přistoupilo k tomuto prozatímnímu řešení. Signály ostatních průtokoměrů jsou taktéž zpracovávány v prostředí SignalExpress. Pro tyto účely jsem vytvořil projekt s názvem „prutok1.seproj“.

Jde o zjednodušené prostředí systému LabVIEW, které umožňuje rovnou namapovat jednotlivé vstupy z měřicí karty NI myDAQ a přiřadit je již definovaným blokům.

Pro zpracování analogového signálu z tenzometrického můstku jsem použil blok Analog Input – Voltage. Kromě okamžité čtené hodnoty na vstupu prostředí umožňuje využívat statistiky z měřených hodnot.

Jelikož u tohoto měření nás zajímal rozdíl mezi počáteční a konečnou hodnotou, použil jsem prvky statistiky min (pro počáteční hodnotu napětí) a max (pro konečnou hodnotu). Kalibrace bude ještě podrobněji rozebrána v pozdější kapitole. Výsledek kalibrace umožnil použití původní aplikace Prutok2.vi, a tak jsem u všech měření pracoval zároveň s aplikací prutok1.seproj a Prutok2.vi.

Na obrázku 8-9 je ukázka toho, jak jsem prováděl měření. Při měření byla otevřena obě okna aplikací přes sebe tak, abych viděl pomyslnou hladinu nádoby a mohl včas zabránit přetečení nádoby. Dále je potřeba vidět na zobrazované průběhy a na legendu v pravé části obrázku. Obě aplikace jsou nastavené na dobu měření 60 s.



Obr. 8-9: Pracovní nastavení oken

8.2.2 Multimetrový vstup

Pro zpracování proudového výstupu signálu Coriolisova průtokoměru od firmy Endress + Hauser jsem použil multimetrový vstup měřicí karty NI myDAQ umístěn ze spodní strany karty.

V prostředí SignálExpress jsem vstupu přiřadil blok Analog Input – Current. Jak je vidět na obrázku 8-10 (prostřední graf), tak hodnota proudu během měření kolísá, bylo potřeba použít prvek statistiky mean, abychom dostali střední hodnotu proudu za dobu 60 s. Tato hodnota pak odpovídá průtoku, který uvažujeme, že průtokoměrem po celou dobu měření protékal.

8.2.3 Digitální vstup

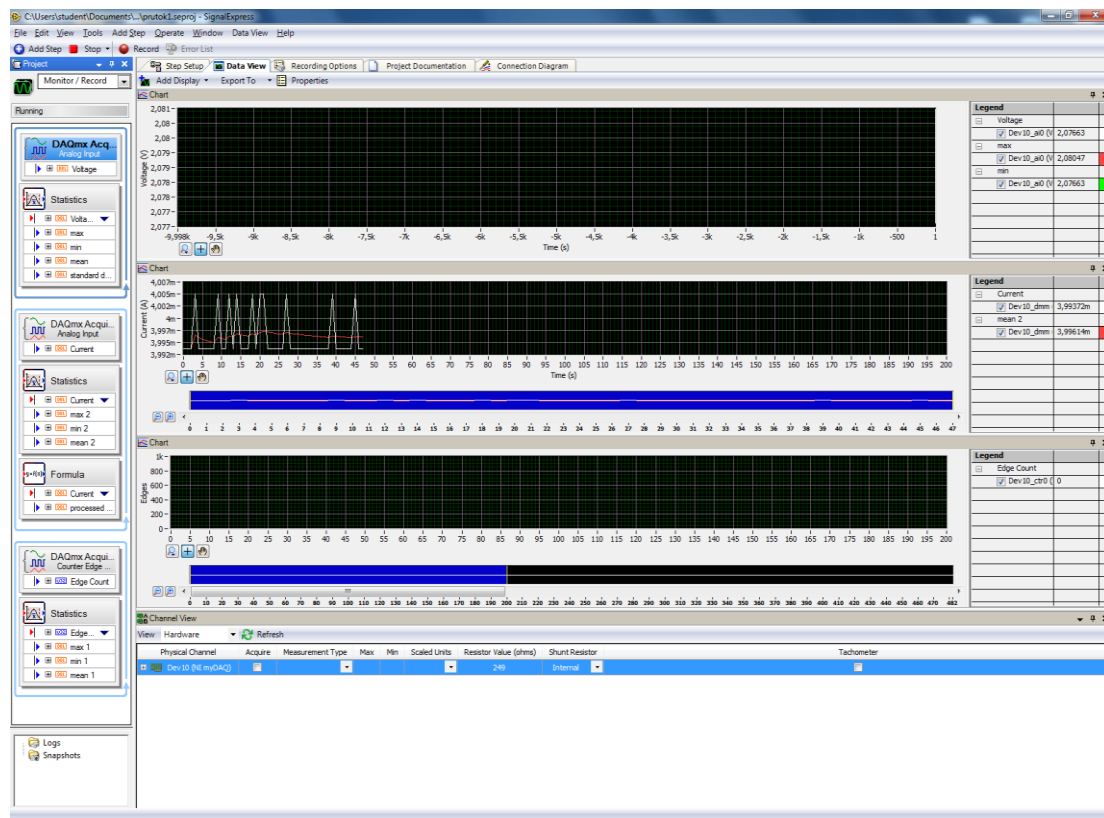
Lopatkový průtokoměr OMEGA a fluidně oscilační průtokoměr Sontex mají jako výstupní signál definovaný počet impulzů na litr. Bylo třeba použít čítač hran signálu, takový čítač je pouze na digitálním vstupu měřicí karty NI myDAQ na vstupu „DIO“. Protože máme pouze 1 vstup pro čítač impulzů, je třeba mezi měřeními signálové výstupy průtokoměrů mezi sebou přepojovat. Problém byl s amplitudou signálu. Měřicí karta dokáže zpracovat jenom signál v rozmezí 3,3 – 5 V.

Z lopatkového průtokoměru vychází signál s amplitudou 13,6 V. Abychom mohli přivést signál do měřicí karty, bylo potřeba použít napěťový dělič. Použil jsem dva rezistory o odporech 2k a 1kΩ. Po kontrole na osciloskopu se maximální napětí pohybovalo okolo 4,5 V a signál jsem mohl použít.

Z fluidně oscilačního průtokoměru vychází signál s amplitudou 11,4 V. Provedl jsem stejný postup a vyrobil napěťový dělič se stejnými rezistory. Po kontrole na osciloskopu

však maximální amplituda byla 1 V. Příčinou je nejspíš sériový odpor zabudovaný ve snímači jako pojistka proti zkratu. Pro nastavení optimální hodnoty maximální amplitudy signálu jsem využil odporovou dekádu. Postupným přidáváním po $k\Omega$ místo předešlého $1\text{ k}\Omega$ odporu jsem při použití odporu $4\text{ k}\Omega$ nastavil maximální amplitudu $3,3\text{ V}$ a s touto hraniční hodnotou dále prováděl měření.

V prostředí SignalExpress je pro čítání hran signálu použit blok Counter Edge. Na obrázku 8-10 jde o spodní graf. V legendě je automaticky zobrazen počet hran za definovanou dobu 60 s a nebylo potřeba nic jiného nastavovat.



Obr. 8-10: Aplikace prutok1.seproj

9. ZÁKLADNÍ OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ

Použití přesně definované doby měření eliminuje chybu, která by mohla vznikat prostorem mezi snímači a nádobou s váhou, jak je patrné z celkového blokového schématu. Avšak případné zdržování bublin během měření v nějakém ohybu můžeme jen velmi těžko vyloučit. Určitě ale můžeme provést postup odvodušnění před samotným měřením, abychom výskyt bublin snížili co nejvíce.

9.1 Postup odvodušnění

Pro správné měření je potřeba přípravky před začátkem měření odvodušnit. Před puštěním čerpadla zavřeme ventil V1 a otevřeme ventil V2, v případě, že tak neučiníme, by trvalo déle, než by čerpadlo naběhlo a v soustavě by se tvořily vzduchové bubliny.

Pustíme čerpadlo na největší výkon, označeno na čerpadle římskou číslicí III (3). Jakmile slyšíme, že se průtok ustálil, začneme otvírat ventil V1 a poté zavřeme ventil V2. Chvilu počkáme a sledujeme, jestli v soustavě zůstal nějaký vzduch. V případě, že ano, tak je potřeba dodat prudký ráz, který uvězněný vzduch uvolní. To uděláme tak, že budeme rychle otvírat a zavírat ventil V2, dokud v hadicích uvidíme známky vzduchu. Poté přepneme čerpadlo na nejmenší výkon (římská číslice I) a můžeme provést měření. Tento postup je vhodný provést před každým začátkem měření i při přepínání jednotlivých snímačů.

9.2 Ověření kalibrační konstanty u odvažování

Při kalibraci jsem použil odměrnou nádobu na 1 l vody s takovou výškou, abych okem dokázal napouštět nádobu s přesností 0,5 ml. Postupně jsem přidával po 1 l vody do odměrné nádoby a zaznamenával odpovídající hodnotu zesíleného napětí v prostředí SignalExpress. Hodnoty jsem proložil lineární spojnici trendu a získal citlivost 0,2016 V/kg. Následně jsem provedl zkušební měření v aplikaci Prutok2.vi a prutok1.seproj a výsledné hodnoty se shodovaly, takže pro všechna měření jsem použil původní aplikaci Prutok2.vi hlavně z důvodu dobré přehlednosti a časové efektivity.

Tabulka 9-1: Kalibrace váhy

m [kg]	U [V]	m [kg]	U [V]
0	2,129	11	4,357
1	2,341	12	4,561
2	2,544	13	4,761
3	2,746	14	4,961
4	2,947	15	5,163
5	3,145	16	5,364
6	3,351	17	5,568
7	3,552	18	5,768
8	3,754	19	5,967
9	3,957	20	6,169
10	4,159		

9.3 Endress+Hauser, Promass 40

K popisu základní charakteristiky snímače vyjádřím z naměřených dat hodnoty, které budou v kapitole testování parazitních vlivů použity jako referenční. Jedná se o absolutní a relativní odchylku od předpokládané konstanty snímače, průměrnou hodnotu konstanty a velikost náhodné chyby s pravděpodobností 99 %, která bude vyjádřena trojnásobkem směrodatné odchylky aritmetického průměru.

Tento průtokoměr má nastaven rozsah průtoku 0 – 400 kg/h, jelikož je ze zkoumaných průtokoměrů nejpresnější, tak všechny základní charakteristiky budu měřit v tomto jednotném rozsahu.

Rozsahu odpovídá proudový výstup 4 – 20 mA. Vyjádřená konstanta je $K_1 = 25$ (kg/h)/mA. V blokovém schématu je tento průtokoměr označen S1, proto konstantu tohoto průtokoměru budu značit K_1 a podobné značení zavedu i u dalších průtokoměrů. K ověření konstanty jsem proměřil průtokoměr ve většině jeho rozsahu až na nižší hodnoty průtoku, protože nešlo zaručit stálý tok na přípravku.

Tabulka 9-2: Měřené hodnoty základní charakteristiky Promass 40

Váha		Promass 40			K_1 [(kg/h)/mA]
Q_s [kg/min]	Q_s [kg/h]	I_m [mA]	Q_m [kg/h]	Q_m [kg/min]	
6,58	394	19,603	390	6,50	25,30
6,29	377	18,976	374	6,24	25,20
6,27	376	18,935	373	6,22	25,18
5,94	356	18,116	352	5,88	25,24
5,86	351	17,905	347	5,79	25,28
5,54	332	17,223	330	5,51	25,13
5,21	312	16,408	310	5,17	25,19
4,95	297	15,799	294	4,91	25,17
4,52	271	14,760	269	4,48	25,20
4,18	250	13,946	248	4,14	25,21
3,52	211	12,386	209	3,49	25,18
2,81	168	10,688	167	2,78	25,20
2,16	129	9,128	128	2,13	25,27
1,73	103	8,032	100	1,68	25,74
1,30	78	7,089	77	1,28	25,25
1,05	63	6,477	61	1,03	25,43
0,83	49	5,967	49	0,82	25,31
0,68	40	5,600	40	0,66	25,50

V tabulkách základních charakteristik budou uvedeny naměřené hodnoty společně s některými přepočítanými hodnotami pro lepší porovnání. Po přepočítání naměřených hodnot si vyjádříme konstantu snímače pro každé měření.

Příklad výpočtu konstanty snímače pro první řádek tabulky 9-2:

$$K_1 = \frac{Q_s \left[\frac{kg}{h} \right]}{I_m - 4} = \frac{394,8}{19,603 - 4} = 25,3 \text{ [(kg/h)/mA]}$$

Příklad výpočtu absolutní a relativní odchylky konstanty snímače pro první řádek tabulky XY (neuváděno v tabulce):

$$\Delta_{K1\max} = K_1 - K_{1s} = 25,3 - 25,0 = 0,3 \text{ [(kg/h)/mA]}$$

$$\delta_{K1\max} = \frac{\Delta_{K1}}{K_{1s}} = \frac{0,3}{25,0} = 1,21 \%$$

Největší absolutní odchylka měřené hodnoty od správné je $\Delta_{K1\max} = 0,74 \text{ (kg/h)/mA}$.
Největší relativní odchylka je $\delta_{K1\max} = 3,0 \%$.

Sečtením všech konstant snímače a podělením jejich počtem získáme průměrnou hodnotu konstanty $K_{1p} = 25,3 \text{ (kg/h)/mA}$.

Vzorec výpočtu náhodné chyby s_{K1} :

$$s_{K1} = 3 * \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_1 - K_{1p})^2}{n(n-1)}} = 0,1 \text{ (kg/h)/mA}$$

Náhodná chyba s pravděpodobností 99 % vyjádřená trojnásobkem směrodatné odchylky aritmetického průměru je $\pm 0,1 \text{ (kg/h)/mA}$.

9.4 Sontex, Superstatic 440

Na obalu průtokoměru je udána konstanta snímače $K_2 = 27 \text{ impulzů na kilogram protečené kapaliny [imp/kg]}$. V našem měření této hodnoty ani v jednom případě nedosáhne, přesto tuto hodnotu budu uvažovat jako správnou.

Tabulka 9-3: Měřené hodnoty základní charakteristiky Superstatic 440

VÁHA		Superstatic 440	
Q_s [kg/min]	Q_s [kg/h]	N [imp/min]	K_2 [imp/kg]
6,72	403	160	23,8
6,6	396	157	23,7
6,27	376	149	23,7
6,11	366	146	23,9
5,89	353	141	23,9
5,71	342	137	23,9
5,47	328	131	23,9
4,86	291	116	23,9
4,44	266	108	24,3
4,22	253	102	24,2
3,76	225	92	24,5
2,94	176	72	24,5
2,06	123	51	24,8
1,74	104	44	25,3
1,48	88	37	25,0
1,22	73	29	23,8
0,94	56	23	24,5

Konstantu snímače K_2 získáme podělením naměřených impulzů za minutu referenční hodnotou protečeného množství kapaliny za minutu.

Příklad výpočtu konstanty K_2 pro první řádek tabulky 9-3:

$$K_2 = \frac{Q_s \left[\frac{kg}{min} \right]}{N} = \frac{160}{6,72} = 23,8 \text{ [imp/kg]}$$

Při výpočtu absolutní a relativní odchylky od správné hodnoty se postupuje stejně jako v předchozím případě. Největší absolutní odchylka měřené hodnoty od referenční je $\Delta_{K2max} = - 3,23 \text{ imp/kg}$. Největší relativní odchylka je $\delta_{K2max} = 12 \%$.

Průměrnou hodnotu konstanty je $K_{2p} = 24,2 \text{ imp/kg}$. Náhodná chyba směrodatné odchylky aritmetického průměru s_{K2} je $\pm 0,34 \text{ imp/kg}$.

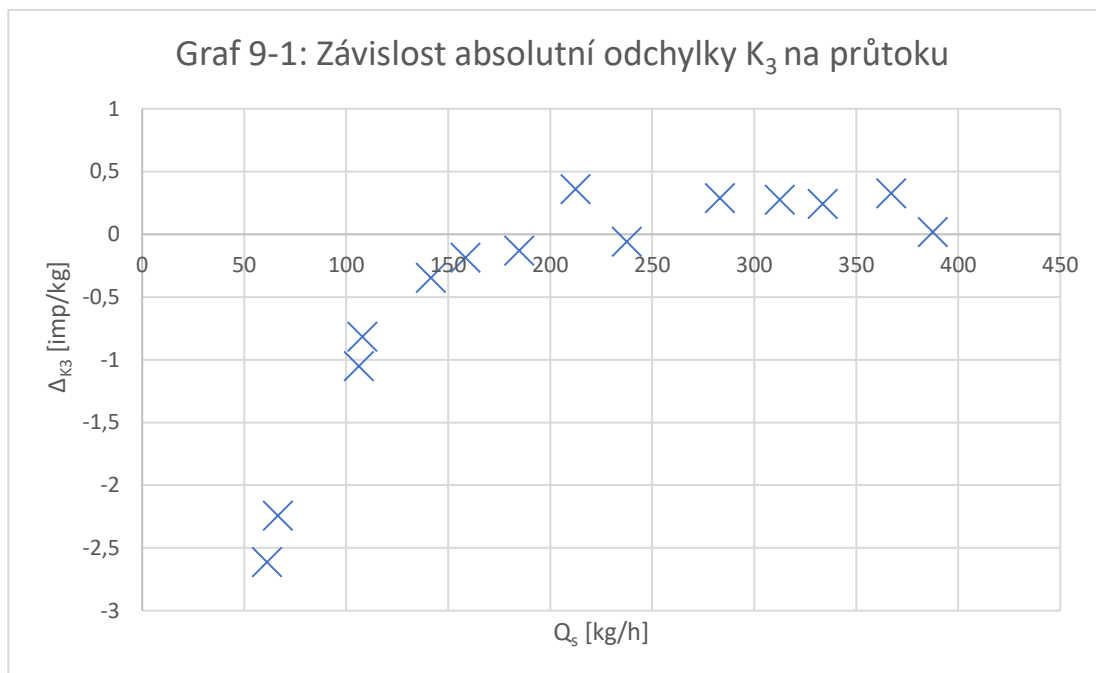
9.5 OMEGA, FTB4600

Postup je podobný jako u průtokoměru Superstatic 440. Po přepočtu údaje z obalu dostaneme konstantu snímače $K_3 = 20,262 \text{ imp/kg}$.

Tabulka 9-4: Měřené hodnoty základní charakteristiky FTB 4600

VÁHA		FTB 4600	
Q_s [kg/min]	Q_s [kg/h]	N [imp/min]	K_3 [imp/kg]
6,46	388	131	20,28
6,12	367	126	20,59
5,56	334	114	20,50
5,21	313	107	20,54
4,72	283	97	20,55
3,96	238	80	20,20
3,54	212	73	20,62
3,08	185	62	20,13
2,64	158	53	20,08
2,36	142	47	19,92
1,8	108	35	19,44
1,77	106	34	19,21
1,11	67	20	18,02
1,02	61	18	17,65

Pokud si vyneseme závislost absolutní odchylky od správné hodnoty od výrobce, zpozorujeme velké odchýlení na dolních hodnotách průtoku. Pro zpřesnění měření budeme uvažovat pouze horní dvě třetiny z měřeného rozsahu.



Budeme uvažovat tedy hodnoty od průtoku 130 kg/h a výše. Postup výpočtů je stejný jako v předchozí části. Konstantu snímače K_3 získáme podělením naměřených impulzů za minutu referenční hodnotou protečeného množství kapaliny za minutu.

Největší absolutní odchylka je $\Delta_{K3\max} = 0,35$ imp/kg. Největší relativní odchylka je $\delta_{K3\max} = 1,7$ %.

Průměrnou hodnotu konstanty je $K_{3p} = 20,3$ imp/kg. Náhodná chyba směrodatné odchylky aritmetického průměru s_{K3} je $\pm 0,25$ imp/kg.

9.6 OMEGA, FD 613

Vzhledem k rozměrům potrubí, na kterém byl nainstalován tento ultrazvukový průtokoměr jsem vyjádřil referenční konstantu 12,1 kg/m. Při měření je možné si zvolit, zdali chceme hodnoty z vyhodnocovací jednotky odečítat v metrech za sekundu [m/s] nebo stopách za sekundu [ft/s]. Z důvodu lepšího rozlišení jsem odečítal hodnoty ve stopách za sekundu a následně pro přepočítání na metry za sekundu podělil zaokrouhlenou převodní hodnotou 3,281 [-].

Pro výpočet konstanty podělíme referenční hodnoty průtoku za minutu rychlostí proudění kapaliny, u které uvažujeme, že byla po celou minutu konstantní.

Příklad výpočtu konstanty K_4 pro první řádek tabulky 9-5:

$$K_4 = \frac{Q_s [\text{kg}/\text{min}]}{v [\text{m}/\text{s}]} = \frac{6,58}{0,646} = 10,2 \text{ [kg/m]}$$

Výpočet absolutní a relativní odchylky od referenční hodnoty probíhá stejně jako v předchozích částech. Největší absolutní odchylka je $\Delta_{K4\max} = 6,05$ kg/m. Největší relativní odchylka je $\delta_{K4\max} = 50$ %.

Průměrnou hodnotu konstanty je $K_{4p} = 11,4$ kg/m. Náhodná chyba směrodatné odchylky aritmetického průměru s_{K4} je $\pm 2,55$ kg/m.

Tabulka 9-5: Měřené hodnoty základní charakteristiky FD 613

VÁHA		Ultrazvuk			
Q _s [kg/mi]	Q _s [kg/h]	v [m/s]	Q _m [kg/min]	v [feet/s]	K ₄ [kg/m]
6,58	395	0,646	7,81	2,12	10,2
6,22	373	0,625	7,55	2,05	10,0
6,13	368	0,610	7,36	2,00	10,1
5,71	343	0,594	7,18	1,95	9,6
5,42	325	0,570	6,88	1,87	9,5
4,94	296	0,549	6,63	1,80	9,0
4,23	254	0,442	5,34	1,45	9,6
2,82	169	0,155	1,87	0,51	18,1
2,59	155	0,143	1,73	0,47	18,1
4,3	258	0,427	5,15	1,40	10,1
4,26	256	0,418	5,04	1,37	10,2
3,51	211	0,357	4,31	1,17	9,8
3,23	194	0,283	3,42	0,93	11,4
2,68	161	0,189	2,28	0,62	14,2

10. TESTOVÁNÍ PARAZITNÍCH VLIVŮ

Pro každý vybraný parazitní vliv porovnáám změnu údajů ze základní charakteristiky snímače. Prováděná měření budou v přibližném rozsahu průtoku 320 – 350 kg/h, aby se zajistily co nejvíce stabilní podmínky za nominálního průtoku. Tyto podmínky budou nastaveny před začátkem měření, ale výsledný tok na referenci se může pochopitelně dramaticky snížit v důsledku parazitního vlivu.

10.1 Pulzující tok

Pro simulaci pulzujícího toku jsem si určil po dobu 60 sekund pustit 6x odvodňovací ventil V2 na 2 sekundy, čímž se prudce zpomalí proudění snímačem.

Tabulka 10-1: Měřené hodnoty při pulzujícím toku

VÁHA		Promass 40	
Q [kg/min]	Q [kg/h]	I [mA]	K ₁ [(kg/h)/mA]
3,57	214	12,63	24,8
3,36	202	11,68	26,3
3,91	235	13,05	25,9
3,93	236	13,22	25,6
3,98	239	13,16	26,1
3,74	224	12,88	25,3
VÁHA		Superstatic 440	
Q [kg/min]	Q [kg/h]	N [imp/min]	K ₂ [imp/kg]
4,18	251	79	18,9
3,9	234	58	14,9
3,34	200	39	11,7
4,22	253	60	14,2
3,8	228	61	16,1
VÁHA		FTB 4600	
Q [kg/min]	Q [kg/h]	N [imp/min]	K ₃ [imp/kg]
5,93	356	122	20,6
3,95	237	85	21,5
4,31	259	91	21,1
4,08	245	87	21,3
4,10	246	88	21,5
4,55	273	96	21,1
VÁHA		FD 613	
-	-	nelze měřit	

Z naměřených hodnot použijeme vždy případ, kdy se konstanta snímače K_{max} bude lišit nejvíce od průměrné hodnoty K_p zjištěné u základní charakteristiky, abychom vyjádřili, do jaké míry se může parazitní vliv projevit.

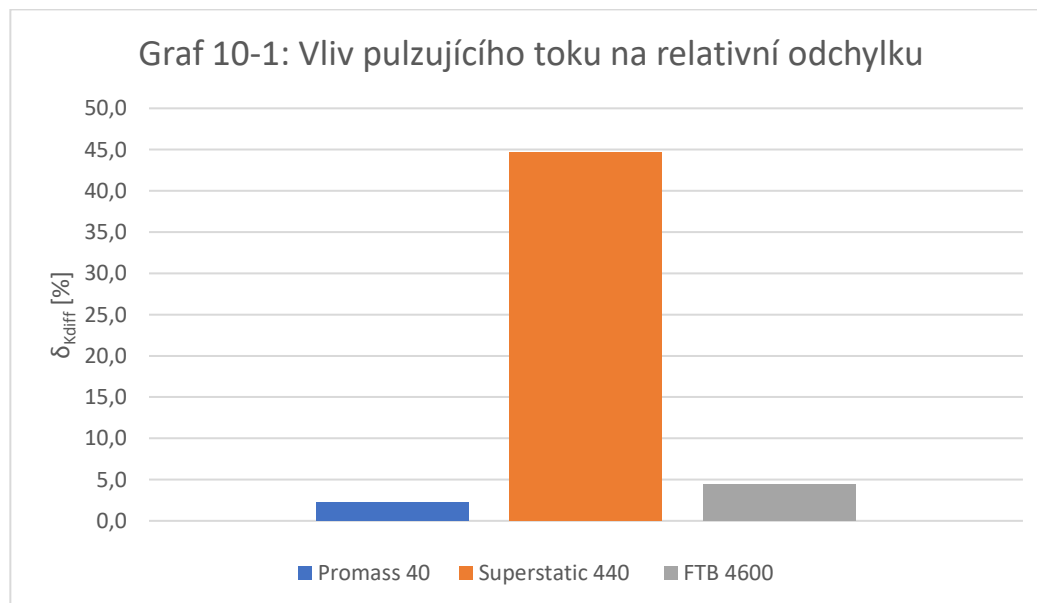
Tabulka 10-2: Vliv pulzujícího toku na relativní odchytku

Snímač	K_p	$\delta_{K_{max}}$ [%]	K_{max}	δ_{K_v} [%]	$\delta_{K_{diff}}$ [%]
Promass 40	$25,3 \pm 0,1$	3,0	26,3	5,2	2,2
Superstatic 440	$24,2 \pm 0,34$	12,0	11,7	56,7	45
FTB 4600	$20,3 \pm 0,25$	1,7	21,5	6,1	4,4

Příklad výpočtu relativní odchytky konstanty v důsledku parazitního vlivu:

$$\delta_{K_v} = \frac{K_{max} - K_{1s}}{K_{1s}} * 100 = \frac{26,3 - 25}{25} * 100 = 5,2 \text{ [%]}$$

Nejdůležitějším parametrem je diferenční změna relativní odchytky konstanty snímače $\delta_{K_{diff}}$, kterou dostaneme odečtením relativní odchytky $\delta_{K_{max}}$ ze základní charakteristiky od relativní odchytky konstanty snímače δ_{K_v} v důsledku parazitního vlivu. $\delta_{K_{diff}}$ znázorňuje tzv. „očištěnou“ relativní odchytku konstanty snímače, aby bylo možné pozorovat, v jaké míře se projeví daný parazitní vliv.



Z grafu 10-1 je vidět, že pulzující tok nejvíce ovlivňuje fluidně oscilační průtokoměr Superstatic 440. Změna relativní odchytky konstanty snímače je až 45 %. U lopatkového průtokoměru FTB 4600 nastane změna 4,4 %. U Coriolisova průtokoměru Promass 40 se údaj změní pouze o 2,2 %.

10.2 Uklidňující dráhy

Tento parazitní vliv jsem napodobil ohnutím přívodní hadice co nejbliže před průtokoměrem. Vzhledem ke šroubení a přechodům z hadice na závit se zachová zhruba 13 cm rovné dráhy.

Tabulka 10-3: Měřené hodnoty při vlivu krátkých uklidňujících drah

VÁHA		Promass 40	
Q [kg/min]	Q [kg/h]	I [mA]	K ₁ [(kg/h)/mA]
6,68	401	19,926	25,2
6,54	392	19,515	25,3
6,35	381	19,104	25,2
6,13	368	18,600	25,2
5,9	354	18,026	25,2
5,75	345	17,656	25,3
5,47	328	17,022	25,2
VÁHA		Superstatic 440	
Q [kg/min]	Q [kg/h]	N [imp/min]	K ₂ [imp/kg]
6,79	407	159	23,4
4,01	241	98	24,4
4,29	257	105	24,5
5,15	309	121	23,5
5,49	329	129	23,5
5,46	328	127	23,3
5,44	326	126	23,2
5,42	325	127	23,4
VÁHA		FTB 4600	
Q [kg/min]	Q [kg/h]	N [imp/min]	K ₃ [imp/kg]
5,43	326	115	21,2
5,39	323	113	21,0
5,42	325	113	20,8
5,41	325	113	20,9
5,39	323	111	20,6
5,44	326	113	20,8
5,39	323	112	20,8
VÁHA		FD 613	
Q[kg/min]	Q [kg/h]	v [m/s]	K ₄ [kg/m]
5,37	322	0,634	8,47
5,32	319	0,625	8,51
5,34	320	0,613	8,72
5,36	322	0,622	8,62

Podobně jako v předchozí části kapitoly použijeme vždy případ, kdy se konstanta snímače K_{\max} bude lišit nejvíce od průměrné hodnoty K_p zjištěné u základní charakteristiky, abychom vyjádřili, do jaké míry se může parazitní vliv projevit.

Tabulka 10-4: Vliv uklidňujících drah na relativní odchylku

Snímač	K_p	$\delta_{K_{\max}}$ [%]	K_{\max}	δ_{K_v} [%]	$\delta_{K_{\text{diff}}}$ [%]
Promass 40	$25,3 \pm 0,1$	3,0	25,3	1,2	-
Superstatic 440	$24,2 \pm 0,34$	12,0	23,2	14,1	2,1
FTB 4600	$20,3 \pm 0,25$	1,7	21,2	4,4	2,7
FD 613	$11,4 \pm 2,55$	50,1	8,47	29,9	-

Z naměřených dat je vidět, že ve dvou případech se nepodařilo dokázat vliv na zvýšení relativní odchylky konstanty snímače. U ultrazvukového průtokoměru FD 613 je měření velmi nepřesné na to, abychom mohli vliv zkoumat. Změna odchylky u fluidně oscilačního a lopatkového průtokoměru je nepatrná a může být způsobena nepřesností měření nebo malým rozlišením vyčítaných impulzů.

10.3 Přítomnost vzduchu

Pro otestování parazitního vlivu přítomnosti vzduchu je do potrubí přiveden vzduch z rozvodné sítě vzduchu budovy. Pro detailnější otestování vlivu laboratorní přípravek umožňuje zvolit různé množství přidávaného vzduchu. To je provedeno otočným vzduchovým redukčním ventilem v kombinaci s odečítáním aktuální hodnoty průtoku vzduchu pomocí plováčkového průtokoměru.

U plováčkového průtokoměru plovák vystoupá do úrovně úměrné množství procházejícího vzduchu. V reálném čase můžeme na stupnici plováčkového průtokoměru odečítat úroveň plováku a podle toho zjistit množství proudícího vzduchu podle následující tabulky:

Tabulka 10-5: Množství vzduchu odpovídající úrovni plováku

l [cm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q [l/min]	0,25	0,4	0,57	0,72	0,88	1,05	1,17	1,5	1,74	2

Přítomnost vzduchu budu vztahovat v poměru k protečenému množství vody. Například bude-li referenční odvažování ukazovat hodnotu 4 kg/min a vzdálenost plováku bude 5 cm, znamená to, že s přibližně 4 litry vody proudí průtokoměrem 1 litr vzduchu. Vzduch tvoří 20 % proudícího média, tento poměr bude značen ε [%].

Reálně budu pracovat jen s některými úrovněmi plováku z důvodu nestability nebo neměnicích se hodnot.

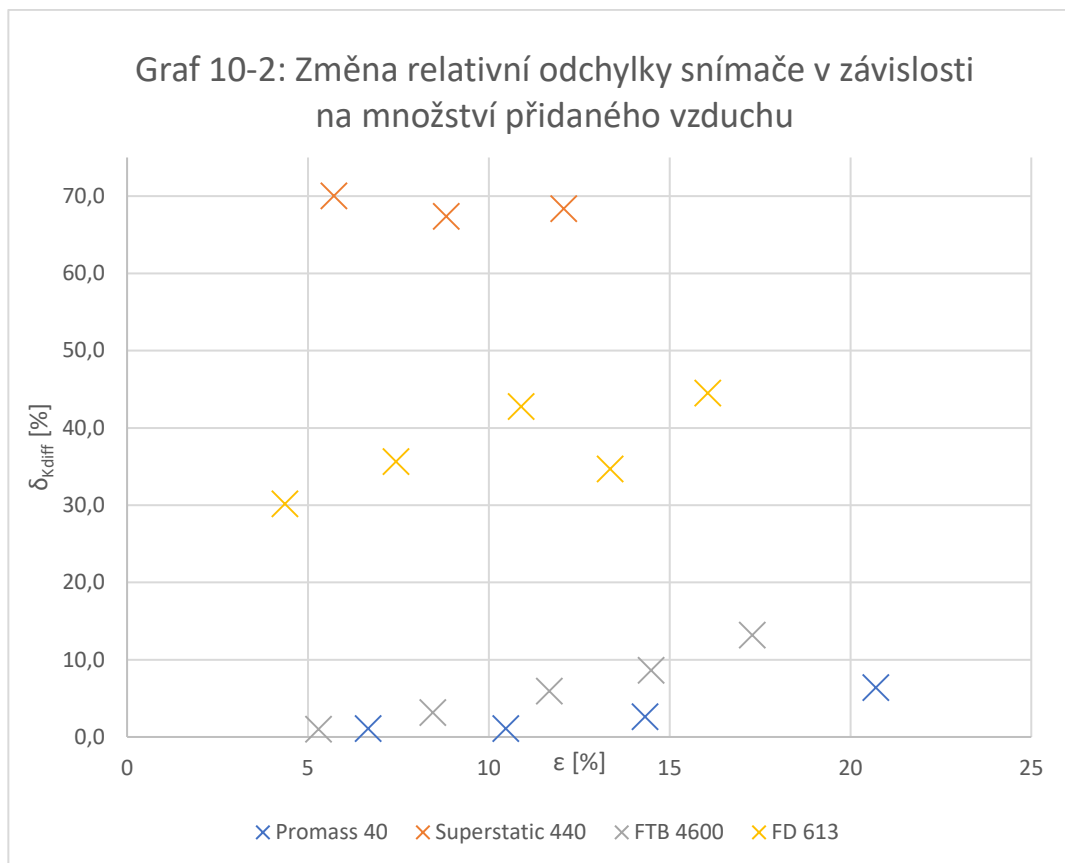
Tabulka 10-6: Naměřené hodnoty při přidávání vzduchu

Vzduch	VÁHA		Promass 40	
ε [%]	Q[kg/min]	Q[kg/h]	I [mA]	K_1 [(kg/h)/mA]
7	3,5	210	12,07	26,0
7	3,43	206	11,93	25,9
7	3,42	205	11,91	25,9
10	3,43	206	12,02	25,7
11	3,4	204	11,93	25,7
10	3,42	205	11,89	26,0
14	3,48	209	12,20	25,5
14	3,41	205	11,75	26,4
15	3,33	200	11,59	26,3
21	3,37	202	11,39	27,3
21	3,33	200	11,32	27,3
21	3,31	199	11,37	27,0
Vzduch	VÁHA		Superstatic 440	
ε [%]	Q[kg/min]	Q[kg/h]	N[imp/min]	K_2 [imp/kg]
5	5,26	316	46	8,7
5	4,69	281	25	5,3
6	4,12	247	20	4,9
9	4,16	250	34	8,2
9	4,13	248	23	5,6
9	4,15	249	34	8,2
12	4,15	249	22	5,3
12	4,06	244	25	6,2
12	4,04	242	24	5,9
Vzduch	VÁHA		FTB 4600	
ε [%]	Q[kg/min]	Q[kg/h]	N[imp/min]	K_3 [imp/kg]
5	4,82	289	99	20,5
5	4,48	269	93	20,8
5	4,47	268	93	20,8
8	4,41	265	93	21,1
8	4,34	260	92	21,2
8	4,33	260	92	21,2
12	4,31	259	94	21,8
12	4,31	259	94	21,8
12	4,31	259	93	21,6
14	4,35	261	95	21,8
14	4,30	258	94	21,9
14	4,25	255	95	22,4
17	4,26	256	98	23,0
17	4,27	256	98	23,0
17	4,21	253	98	23,3

Vzduch	VAHA		FD 613	
ε [%]	Q[kg/min]	Q[kg/h]	v[m/s]	K_4 [kg/m]
4	5,48	329	0,646	8,48
4	5,48	329	0,634	8,64
4	5,48	329	0,649	8,44
7	4,98	299	0,628	7,93
7	4,98	299	0,610	8,16
7	4,98	299	0,640	7,78
11	4,66	280	0,594	7,84
11	4,66	280	0,674	6,91
11	4,66	280	0,579	8,04
13	4,67	280	0,585	7,98
13	4,67	280	0,591	7,89
13	4,67	280	0,518	9,01
16	4,6	276	0,677	6,79
16	4,6	276	0,546	8,43
16	4,6	276	0,686	6,70

V tomto případě nebude uvedena tabulka s přehledem změny relativní odchylky, protože by se opakovala značná část tabulky 10-6. Místo toho uvedu pouze grafické znázornění změny relativní odchylky snímače v závislosti na množství přidaného vzduchu do potrubí.

Pro grafické znázornění použiji podobný postup i výpočty jako v předchozí části kapitoly. Pro každý poměr vzduchu a vody použiji případ s největším odchýlením konstanty snímače od předpokládané hodnoty. Poté vypočítám relativní odchylku v důsledku parazitního vlivu, dále od ní odečtu relativní odchylku ze základní charakteristiky a získám výslednou diferenční změnu relativní odchylky $\delta_{Kdiff.}$.



Z grafu 10-2 je vidět, že nejvíce je na přítomnost vzduchu náchylný fluidně oscilační průtokoměr Superstatic 440 se změnou relativní odchyly až 70 % a to poměrně nezávisle na množství přidaného vzduchu.

Patrná je i závislost u ultrazvukového průtokoměru FD 613, avšak zde je použita pouze relativní odchyly po působení parazitního vlivu bez odečtení základní relativní odchyly. Vliv nemůže být správně vyhodnocen, protože změřená odchyly je stále v rozmezí základní relativní odchyly 50 %. Pro vyhodnocení parazitního vlivu by bylo potřeba přesnějšího snímače.

Dále můžeme vidět, že i lopatkový průtokoměr FTB 4600 je značně ovlivněn přítomností vzduchu v průtokovém kanále. Při přítomnosti 17 % vzduchu se dostáváme na změnu relativní odchyly až 13 %.

Nejodolnějším ze zkoumaných průtokoměrů na vliv přítomnosti vzduchu je Coriolisův průtokoměr Promass 40. Podle teoretických předpokladů je tento princip sice závislý na přítomnosti vzduchu v průtokovém kanále, ale v porovnání s ostatními použitými průtokoměry se stále jeví jako nejpřesnější. V případě, kdy vzduch tvoří 21 % z protečeného objemu, se relativní odchyly dostane až na 6,4 %.

11. ZÁVĚR

V bakalářské práci byly splněny všechny body zadání. První část práce tvoří teoretickou část s přehledem nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku kapalin, hlavních parazitních vlivů a metod pro kalibraci snímačů průtoku.

Druhá část se věnuje návrhu a realizaci laboratorního přípravku pro měření průtoku vody, který umožňuje testování parazitních vlivů na přesnost měření průtoku. Při realizaci přípravku byly využity především dostupné snímače laboratoře. Původně zamýšlelo také použít diferenční měřič tlaku, abychom mohli měřit tlakovou ztrátu na snímači, avšak po ověřovacím měření se zjistilo, že rozsah vybraného snímače nevyhovuje daným potřebám a do budoucna se počítá s jeho výměnou.

Jako měřicí médium byla použita běžná užitková voda z vodovodního řádu. Množství nečistot ve vodě je proměnné, proto se v celé práci pro usnadnění výpočtů uvažuje, že 1 litr vody odpovídá 1 kg vody.

Laboratorní přípravek byl využit k testování čtyř průtokoměrů s rozdílnými principy měření průtoku. Současně bylo použito hmotnostní odvažování jako referenční měření, které udávalo výsledek na tři platné číslice, tudíž i ostatní měření a výpočty jsou uvedeny na tři platné číslice.

V prováděném měření byly nejprve naměřeny základní charakteristiky použitých průtokoměrů, abychom ověřili hodnoty uváděné od výrobce a získali referenční klidové hodnoty, které budou srovnávány v případě působení parazitního vlivu na přesnost měření průtokoměru. Jako údaj pro porovnání slouží daná převodní konstanta snímače, která závisí na typu výstupu nebo průměru použitého potrubí.

Ze základního ověřovacího měření vyplývá, že u fluidně oscilačního průtokoměru Superstatic 440 se konstanta snímače liší až od 12 % oproti údaji udávanému na obalu. Dále u ultrazvukového průtokoměru FD 613 je vidět značná nepřesnost měření dosahující až 50 % oproti definované převodní konstantě $K_4 = 12,1 \text{ kg/m}$ určené z rozměru potrubí. Ostatní snímače nevykazují výraznější odchylky.

Při testování parazitních vlivů na přesnost měření průtoku kapalin je cílem ukázat, do jaké míry může daný parazitní vliv ovlivnit přesnost měření. Při použití pulzujícího toku je nejvíce ovlivněn průtokoměr Superstatic 440, u kterého se změnila přesnost až o 45 %. Ovlivněn je i lopatkový průtokoměr FTB 4600 a to se změnou přesnosti do 4,4 %, o něco méně Coriolisův průtokoměr Promass 40 se změnou přesnosti 2,2 %.

U změny uklidňujících drah se nepotvrdila výrazná závislost u žádného ze zkoumaných průtokoměrů. Podle teoretických předpokladů k tomu mělo dojít u ultrazvukového průtokoměru, avšak použitý průtokoměr je velmi nepřesný, a tak se vliv nemohl potvrdit, a to i v případě vlivu přítomnosti vzduchu.

Nejvíce se u všech průtokoměrů projevil parazitní vliv přítomnosti vzduchu v potrubí. U průtokoměru Superstatic 440 se přesnost měření změnila až o 70 % nezávisle na množství přidaného vzduchu. Výrazný byl vliv i na lopatkový průtokoměr FTB 4600 se změnou přesnosti měření až o 13 % a u průtokoměru Promass 40 až o 6,4 %.

Pro budoucí práci na laboratorním přípravku by bylo vhodné zvýšit přesnost referenčního odvažování alespoň na 4 platné číslice, dále použít přesnější ultrazvukový průtokoměr a vytvořit jednotný přehledný software pro všechna prováděná měření.

12. LITERATURA

- [BAK16] BAKER, R.C. *Flow measurement handbook* [online]. 2nd edition. New York: Cambridge University Press, 2016 [cit. 2018-01-13]. ISBN 978-1-107-04586-6. Dostupné z: <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=121C9F76E831442C33DCD625762024D4>
- [SON14] Data sheet: Sontex, Thermal energy, Flow metering. *Www.sontex.ch* [online]. Sonceboz Switzerland, 2014 [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <https://www.sontex.ch/en/download/datasheet440/?wpdmdl=2771>
- [ROZ17] *Rozměry závitů* [online]. 2017 [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <http://www.lubomir-rek.cz/rozmary.html>
- [OME01] User's guide. *www.omega.com* [online]. [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M3238.pdf>
- [KIN13] *Kinematická viskozita vody: Praktické informace* [online]. 2013 [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/kinematicka-a-dynamicka-viskozita-vody>
- [GRU12] *Návody Grundfos: Coriolis mass flowmeters* [online]. 2012 [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: http://marcomplet.cz/docs/Grundfos/Grundfos_Alpha2L_kl.pdf
- [ULT15] ULTRASONIC FLOWMETER. *Http://www.fujielectric.com* [online]. 2015 [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <http://www.fjielectric.com/products/instruments/>
- [BMF17] BMFV: Návody do laboratorních měření. [online]. 2017 [cit. 2018-01-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studis/student.-phtml?gm=gm_detail_predmetu&apid=169966
- [TER09] MILDE, David. *Základní terminologické pojmy: Mezinárodní terminologický slovník VIM3* [online]. 2009, 6 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/02a-terminologievim3-1287047120.pdf>
- [ALP18] *APLHA INTERNATIONAL S.R.O.* [online]. 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.alphaint.cz/slovník/linearita-mereni/>
- [DEF03] *Elektrická a elektronická měřicí zařízení – Vyjadřování vlastností: ČSN EN 60359* [online]. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 2003, (67954) [cit. 2018-05-10].
- [VYT18] Ing. REINBERK, Zdeněk. Přepočítání průtoku a rychlosti proudění v potrubí. *Https://vytapani.tzb-info.cz* [online]. 2018 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/83-prepocet-prutoku-a-rychlosti-proudeni-v-potrubi>