



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Měření spotřeby kapalného paliva pro
dvoupalivový vznětový motor

Liquid fuel consumption measurement for dual
fuel compression ignition engine

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2020

Filip LABUTA

Studijní program: B2341 STROJÍRENSTVÍ
Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem
Vedoucí práce: Ing. Ivan Bortel

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Labuta** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **466695**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Měření spotřeby kapalného paliva pro dvoupalivový vznětový motor

Název bakalářské práce anglicky:

Liquid fuel consumption measurement for dual fuel compression ignition engine

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte soustavu na měření malých průtoků kapalného paliva pro dvoupalivový vznětový motor nafta-CNG, případně nafta-vodík.

Návrh obsahuje výběr vhodných komponent a jejich sestavení do funkčního celku.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivan Bortel, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhě(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **27.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:


Ing. Ivan Bortel
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) katedry/katedry


prof. Ing. Michael Valásek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

29. 4. 2020
Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Filip Labuta

Název práce: Měření spotřeby kapalného paliva pro dvoupalivový vznětový motor

Anglický název: Liquid fuel consumption measurement for dual fuel compression ignition engine

Rozsah práce:

60 stran

51 obrázků

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Strojírenství

Vedoucí práce: Ing. Ivan Bortel

Klíčová slova: Měření spotřeby kapalného paliva, dvoupalivový motor, nafta-CNG, nafta-vodík, Coriolisův průtokoměr

Key words: Consumption measurement of liquid fuel, dual fuel engine, diesel-CNG, diesel-hydrogen, Coriolis flow meter



Abstrakt

Cílem této práce je navrhnout soustavu na měření malých průtoků kapalného paliva pro dvoupalivový vznětový motor nafta-CNG, případně nafta-vodík. Tato práce se zabývá pohledem na různé typy měření a výběrem našeho systému měření. V další fázi je postupně nahlíženo na uspořádání komponent systému tak, aby nedocházelo k potížím s průtokem či k případnému zavzdušňování systému. V této práci jsou vybrány co nejvhodnější varianty připojení jak hydraulického systému, kde dochází k průtoku kapalného paliva, tak elektrického systému, kde dochází k výběru nejvíce vhodných elektronických komponent k řízení a s jeho vhodným nastavením, aby vše spolu dokázalo řádně a bez potíží komunikovat.

Klíčová slova

Měření spotřeby kapalného paliva, dvoupalivový motor, nafta-CNG, nafta-vodík, Coriolisův průtokoměr

Abstract

The goal of this work is to devise a flow meter system for measuring low flow of liquid fuel for dual fuel diesel engine using diesel-CNG or diesel-hydrogen. In this work is taken look at different types of measuring and choosing the right one for our system. In the next phase is taken look at how the system will be put together that there will not be flow issues or no possible aeration in the system. In the end is chosen the most suitable variation of connection of the hydraulic system, where the flow of liquid fuel occurs, but also the most suitable variation of electronic components for controlling and their setup, so that all components could properly communicate with no difficulties.

Key words

Consumption measurement of liquid fuel, dual fuel engine, diesel-CNG, diesel-hydrogen, Coriolis flow meter



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “ Měření spotřeby kapalného paliva pro dvoupalivový vznětový motor” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 20.5.2020

.....

(podpis autora)



Poděkování

Začátkem této práce bych velice rád poděkoval svému vedoucímu a odbornému konzultantovi Ing. Ivanu Bortelovi za vstřícný přístup, ale také za cenné rady a poznatky, které mi během mé práce dal, bez nichž by bylo pro mne velmi složité tuto práci dokončit. Dále také nesmím opomenout značnou podporu ze strany mé rodiny a přátel, kterým tímto velice děkuji.



Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Úvod	9
1. Teoretická část	10
1.1. Základní rozdělení metod měření	10
1.1.1. Přímé metody	10
1.1.2. Nepřímé metody	10
1.2. Měření průtoku	11
1.3. Základní metody měření průtoku	11
1.3.1. Objemový průtok	11
1.3.2. Hmotnostní průtok	12
1.3.3. Rychlostní metody měření průtoku	12
1.4. Typy průtokoměrů	12
1.4.1. Průřezové průtokoměry	12
1.4.1.1. Clony	13
1.4.1.2. Venturiho trubice	13
1.4.1.3. Dýza	13
Zhodnocení průřezových průtokoměrů	13
1.4.2. Indukční průtokoměry	14
Zhodnocení indukčních průtokoměrů	15
1.4.3. Turbínové či lopatkové průtokoměry	15
Zhodnocení turbínových a lopatkových průtokoměrů	16
1.4.4. Tepelný hmotnostní průtokoměr	16
Zhodnocení tepelných hmotnostních průtokoměrů	17
1.4.5. Coriolisovy průtokoměry	17
Zhodnocení Coriolisových průtokoměrů	18
1.5. Konečné porovnání průtokoměrů	19
1.6. Experimentální laboratoře CVUM	20
1.7. Stávající systém vah AVL 733s	22
2. Praktická část	24
2.1. Napojení na stávající systém	24
2.1.1. První možnost se dvěma ventily	25
2.1.2. Druhá možnost s ventilem na vstupu	26
2.1.3. Třetí možnost se ventilem na výstupu	26
2.2. Základní komponenty nutné v měřící soustavě	27
2.2.1. Měřidlo průtoku CORI-FLOW M13	28
2.2.2. Třícestný ventil s přestavovacím mechanismem	29



2.2.3. Zubové čerpadlo BOSCH.....	31
2.2.4. Tlakový snímač Baumer Y91	32
2.3. Hydraulické propojení komponent.....	33
2.3.1. Vstupní propojení a rozcestí na přímou větev a bypass	33
2.3.2. Propojení třícestného ventilu s měřicí soustavou	34
2.3.3. Propojení čerpadlo – CORI-FLOW, CORI-FLOW – třícestný ventil.....	35
2.4. Rozmístění soustavy.....	36
2.5. Uchycení soustavy.....	37
2.5.1. Uchycení měřidla CF do skříně.....	37
2.5.2. Uchycení čerpadla do skříně	38
2.5.3. Uchycení servopohonu s ventilem a jeho hydraulických armatur.....	38
2.6. Řízení systému – použité elektronické komponenty	40
2.6.1. Programovatelný modul ARDUINO	41
2.6.2. Problematika řízení čerpadla a zpětné vazby od servopohonu.....	42
2.6.3. Elektrické zdroje komponent v měřicí soustavě.....	44
2.7. Samotné řízení systému při běžném režimu a při přepínání.....	45
2.8. Programování modulu ARDUINO	48
2.8.1. Nastavení vstupů a výstupů	48
2.8.2. Nastavení základní funkce pro řízení čerpadla.....	49
2.8.3. Nastavení přepínání za pomoci signálu z brzdy	50
2.9. Skříně na uložení měřicí soustavy s elektronikou	52
3. Závěr.....	55
Seznam použité literatury	57
Seznam obrázků	59
Seznam příloh.....	60



Seznam použitých symbolů a zkratek

CF	Cori-Flow měřidlo založené na Coriolisových silách
CNG	Stlačený zemní plyn
CO	Oxid uhelnatý
CO ₂	Oxid uhličitý
CPU	Central Process Unit – centrální procesorová jednotka
CR	Common Rail – přímé vstřikování u vznětových motorů
CVUM	Centrum Vozidel Udržitelné Mobility
H	Vodík
Li-Po	Lithium-Polymerové akumulátory
LPG	Zkapalněný ropný plyn
MPI	Multi Point Injection – vícebodové (nepřímé) vstřikování u zážehových motorů
NiMH	Nikl-metal hydridové akumulátory
NO _x	Oxidy dusíku
PC	Personal computer – Osobní počítač
PID	Regulátor složený z proporcionální, integrační a derivační složky
PLC	Programmable Logic Controller – Programovatelný logický automat
PWM	Pulse Width Modulation – Pulzně šířková modulace
Q	Jednotka objemového průtoku
SRAM	Statická paměť RAM – Random Access Memory
TDI	Turbocharged Direct injection – přeplňované vznětové motory s přímým vstřikováním
TTL	Tranzistorově-tranzistorová-logika, logický systém 1 a 0
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice
VW	Značka Volkswagen



Úvod

S ohledem na stále přísnější podmínky pro schvalování spalovacích motorů a dopravních prostředků do provozu podle platné legislativy, je akcentován zejména popis spotřeby paliva a složení výfukových plynů vznikajících při vnitřním spalování. Důraz je taktéž kladen na obsah pevných částic vznikajících zejména u systémů s přímým vstřikováním paliva. Alternativou pohonu spalovacího motoru je v dnešní době pohon elektrický či jejich kombinace, které se nazývají pohony hybridními.

Výrobci dopravních prostředků kladou důraz na docílení snížení těchto emisí spalovacích motorů, a to různými způsoby jako jsou motory spalující CNG, LPG nebo v našem případě dvoupalivový motor v kombinaci motorová nafta-CNG, případně motorová nafta-vodík či další různá fosilní i obnovitelná paliva. Vznikají tak různorodé kombinace pohonů s vnitřním spalováním oproti dnešním pohonům elektrickým, pro které je značná část elektřiny vytvářena neekologickými způsoby z neobnovitelných zdrojů. Kombinace nafta-CNG či nafta-vodík disponují oproti konvenčním motorům benzínovým či naftovým ještě větším snížením emisí CO₂.

Experimentální průzkum patří k základním vývojovým činnostem napříč různými obory a taktéž je tomu v oboru spalovacích motorů. K experimentálním účelům s dvoupalivovými systémy spalovacích motorů, ale i mnoho dalším účelům, slouží laboratoře CVUM, kde jsou tyto systémy dvoupalivových motorů zkoušeny a měřeny. Tímto se dostáváme k obsahu této práce, kde je úkolem navrhnout soustavu pro měření spotřeby kapalného paliva, u již zmiňovaných dvoupalivových motorů. Měření spotřeby bude koncipováno jako soustava měření malých průtoků paliva, která bude substituovat systém vah, jenž při větších průtocích naopak vyhovuje. Požadavek je tedy pokrytí malých průtoků paliva, kde je chyba měření u použitého systému vah značná a alternativně bude tato soustava přenositelná. Když bude soustava přenositelná, tak bude možnost využívat čerpadlo, vyrovnávající tlakové ztráty v měřicí soustavě, jako čerpadlo podávací nebo také u zážehových motorů MPI jako čerpadlo systémové.

Teoretická část bude zaměřena na základní pojmy ohledně měření průtoku paliva pomocí vybraného měřidla a na problémy s tím spojené.

Praktická část bude zaměřena na výběr a sestavení komponent do funkčního celku tak, aby vše bylo kompatibilní navzájem, dostupné a pokud možno levné. Z funkčního hlediska je



nutno udržet nepřerušovaný průtok paliva tak, aby nedošlo k nepravidelnému chodu motoru. V této části bude porovnáno více řešení sestav a jejich zapojení, výhody a nevýhody s tím spojené.

Značnou problematikou bude nutnost řízení čerpadla, které vyrovnává tlakovou ztrátu měnící se v závislosti na velikosti průtočného množství paliva u vybraného měřidla. Bude navíc použit snímač tlaku či informace o sepnutí třicestného ventilu, která slouží k obtoku měřící soustavy, zejména pro větší průtoky, kdy bude průtok měřen systémem vah. Součástí této práce bude příslušná dokumentace ke kompletaci soustavy.

1. Teoretická část

1.1. Základní rozdělení metod měření

Pro měření průtoku, ale i jiných veličin jako je například teplota či tlak je využíváno dělení z metrologického hlediska na přímé a nepřímé metody.

1.1.1. Přímé metody

Tato metoda využívá srovnávání hodnot, a to naší měřené veličiny s veličinou výchozí, tedy hodnotou danou například vynulováním, kalibrací apod. Je tak využíváno například rozdílu potenciálu u elektrického napětí, či diferenci odporu u tenzorového snímače tlaku.

1.1.2. Nepřímé metody

U této metody je námi požadovaná veličina zjišťována pomocí dopočítávání z hodnot měřených pomocí určitého vztahu, například z měřené teploty je rozměr součásti dopočítán pomocí součinitele roztažnosti. [1] [2] [3] [4]



1.2. Měření průtoku

Měření průtoku je důležité v mnoha odvětvích průmyslu, energetiky, odpadů, chemickém či potravinářském průmyslu (například při plnění lahví) nebo například pro měření průtoku vody v domácnostech pro přehled o spotřebě.

Nejsou měřeny pouze kapaliny, ale i plynné látky. Problém je však se stlačitelností u plynů a par, která se nás netýká, protože kapaliny se považují za nestlačitelné. U systému CR použitého v laboratořích je však zapotřebí počítat s jistou stlačitelností kapaliny z důvodu vysokého tlaku, ale pouze ve větvi za vysokotlakým čerpadlem. Pro nás toto znamená, že se stlačitelností nebudeme zabývat, jelikož naše soustava bude situována do větve s nízkým tlakem.

Náš systém bude zapojen před podávací čerpadlo, které dodává tlak přibližně 3-4 bar do vstupu vysokotlakého čerpadla CR tak, jak je to použito ve vozidlech. Na rozdíl od systému s rotačním čerpadlem, které bylo použito například u motoru 1,9TDI 66 kW od VW, kde podávací čerpadlo nebylo součástí palivového systému. Tudíž čerpadlo v systému měření nemusí být tak silné, protože tlak bude vytvořen čerpadlem podávacím.

1.3. Základní metody měření průtoku

1.3.1. Objemový průtok

Tento způsob průtoku je označován jako objem tekutiny, který prochází potrubím, trubkou apod. za jednotku času tedy m^3/s . Například čas, za který je naplněna nádoba o známém objemu. Měřidla, využívající objemového průtoku, jsou používány jako přesná bilanční měřidla či jako etalony pro ostatní měřidla průtoku.

Objemová měřidla nejsou vhodná pro měření průtoku znečištěných či pevné částice obsahujících kapalin z důvodu velkého počtu pohyblivých částí. Dále je problém s tlakovou ztrátou. Typickými zástupci jsou lopátkové průtokoměry, oválové průtokoměry nebo průtokoměry s oběžnými koly či krouživým pístem.



1.3.2. Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok je udáván hmotností tekutiny, která proteče potrubím za jednotku času (například kg/h) a je dopočítán nepřímou metodou z objemového průtoku a známé hodnoty hustoty proudící tekutiny, která se však může měnit. Existuje relativně málo přímých metod měření hmotnostního průtoku a jako dvě základní jsou tepelný hmotnostní průtokoměr, tedy termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry a Coriolisův průtokoměr, který je námi vybrán.

1.3.3. Rychlostní metody měření průtoku

Tato metoda měření využívá jednoduchého vztahu $Q = v \cdot S$, kde v je rychlost proudění tekutiny a S je průřez potrubí.

Typickými zástupci jsou například ultrazvukové průtokoměry či indukční průtokoměry. Ultrazvukové průtokoměry využívají Dopplerova principu, kdy vysílané ultrazvukové vlnění je odraženo od pevných částic či bublin a tím dochází k rozdílu ve frekvencích vysílaných a přijímaných vln. Tento rozdíl je poté úměrný rychlosti proudění.

Oproti tomu indukční průtokoměry využívají Faradayova zákona elektromagnetické indukce, kdy dochází k indukci při pohybu vodiče, respektive tekutiny. Více informací o indukčních průtokoměrech bude však rozepsáno dále. [1] [2] [3] [4] [5]

1.4. Typy průtokoměrů

1.4.1. Průřezové průtokoměry

Zde je využíváno tlakové diference založené na tlakové diferenci podle Bernoulliho rovnice, která popisuje zákon o zachování mechanické energie v tekutinách a která je hojně využívána pro její značnou jednoduchost. Využívá se toho, že v různých průřezech je různá rychlost proudění, a tudíž i jiný objemový průtok.

Využívá se různých škrťících prvků, jako jsou clony, dýzy či Venturiho trubice. Na snímání diferencí v tlaku jsou založeny i sondy jako je Pitotova trubice, Prandtlova trubice, plováčkové průtokoměry nebo kolenové průtokoměry.



1.4.1.1. Clony

Clona neboli zmenšení průřezu pomocí desky s otvorem je vložena do potrubí mezi příruby. Průměr tohoto otvoru a jeho umístění závisí na použité měřené tekutině. Je také zapotřebí použití tzv. uklidňovacích úseků před a za clonou a ty bývají u normalizovaných clon poměrně dlouhé. Má však nespornou výhodu v jednoduchosti, ale za to nevýhodu ve velkých tlakových ztrátách.

1.4.1.2. Venturiho trubice

Oproti cloně je tvarově komplikovanější, navíc i delší. Tekutina je urychlena v kuželovém konfuzoru, což vyvolá snížení tlaku a zvýšení rychlosti. Výhodou je ale nejmenší tlaková ztráta z těchto průřezových průtokoměrů a zároveň velká přesnost měřené hodnoty. Nevýhodou jsou však delší rozměry či cena.

1.4.1.3. Dýza

Jedná se o spojení clony a Venturiho trubice, kdy vzniká kompromis v podobě dýzy. Oproti Venturiho trubici neobsahuje difuzor, který zaručuje menší tlakovou ztrátu a větší přesnost. Oproti cloně však zvládne měřit větší průtok i s větším obsahem pevných částic.



Obrázek 1: Srovnání průřezových průtokoměrů [3]

Zhodnocení průřezových průtokoměrů

Výhody

- velmi jednoduché konstrukce, zejména u clony
- žádné pohyblivé části
- široký rozsah použití i díky použití nečistých tekutin
- u větších rozměrů i ekonomicky velmi příznivé

Nevýhody

- na měření působí nepříznivě změny hustoty, teploty, tlaku a viskozity



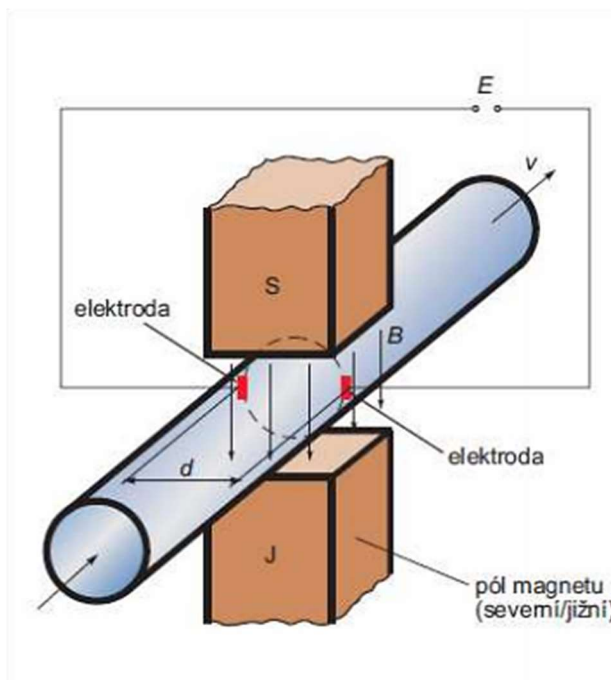
- tlaková ztráta na měřícím členu
- přímý ukladňovací úsek před i za členem
- neměří při nízkých hodnotách průtoku [1] [2] [3] [4] [5]

1.4.2. Indukční průtokoměry

U tohoto průtokoměru je využíván princip Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Ten je založen na pohybu vodiče, v našem případě na pohybu tekutiny, v homogenním magnetickém poli, kde je indukováno elektrické napětí. Počítá se dle následujícího vzorce, který platí pro kruhový průřez:

$$U_i = B \cdot l \cdot v = B \cdot D \cdot \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot D^2}$$

kde **B** je magnetická indukce, **Q_v** je objemový průtok a **D** je průměr potrubí. Využívá se však u elektricky vodivých a nemagnetických kapalin, které musí zcela vyplňovat potrubí, kde dochází k měření. Velikou výhodou je bezdotykové měření, tedy bez pohyblivých částí, a navíc i bez tlakové ztráty. [3] [4] [5]



Obrázek 2: Princip funkce indukčního průtokoměru [3]



Zhodnocení indukčních průtokoměrů

Výhody

- žádná tlaková ztráta
- žádné pohyblivé části, možno tedy použít znečištěné či agresivní média
- malá nejistota měření průtoku
- neovlivněno tlakem, teplotou, viskozitou nebo obsahem částic

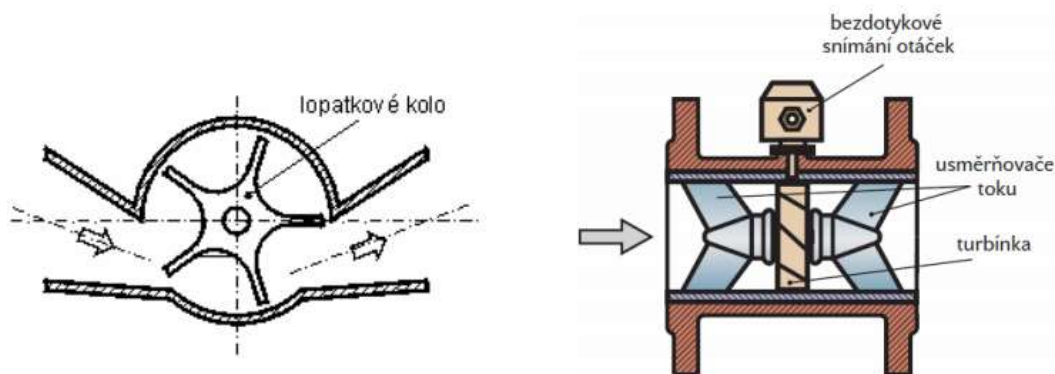
Nevýhody

- možnost měření pouze elektricky vodivých kapalin, navíc při použití izolace
- nutnost zaplněného potrubí kapalinou, potrubí nesmí být zavzdušněné
- vyšší cena [3] [4] [15]

1.4.3. Turbínové či lopatkové průtokoměry

Tento způsob patří mezi jedny z nejstarších a nejzákladnějších způsobů měření průtoku. Dochází zde k rotačnímu pohybu lopatkového rotoru za pomoci proudící tekutiny, kdy každé otočení odpovídá jistému množství objemu tekutiny. Jedná se tedy o měření objemovou metodou.

Zatímco turbínové průtokoměry mají umístění lopatek v ose proudění, tak lopatkové průtokoměry mají lopatky umístěné kolmo ke směru proudění tekutiny (viz. obrázky níže). Je měřena frekvence neboli počet impulsů za jistý čas, tedy například otáčky za minutu. Mají však nedostatek, a to v podobě pásma necitlivosti, který je přítomen při malých průtocích. V tomto pásmu jsou totiž udávány nevěrohodné informace o průtočném množství. [3]



Obrázek 3: Lopatkové vs Turbínové průtokoměry [3]



Zhodnocení turbínových a lopatkových průtokoměrů

Výhody

- jednoduchá konstrukce
- vhodné i pro menší průtoky, při malé nejistotě a dobré opakovatelnosti (musí se však počítat s pásmem necitlivosti)
- vhodné i pro větší tlaky (stovky bar/ desítky MPa)

Nevýhody

- použití jen čistých kapalin a plynů bez nečistot
- nevhodné použití u kapalin s velkou viskozitou
- měnící se viskozitou je narušováno měření
- značná tlaková ztráta [3] [4]

1.4.4. Tepelný hmotnostní průtokoměr

Tento průtokoměr vychází ze závislosti výměny tepla mezi zdrojem a okolím, které tvoří proudící tekutina. Existují dva typy, a to termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry.

Termoanemometr využívá elektricky vyhřívaného tělíska vloženého do potrubí, ve kterém proudí tekutina. Tím, že tekutina proudí přes tělísko tak dochází k odebrání tepla, které je závislé na rychlosti proudění, hustotě, tepelné vodivosti a na teplotě proudícího média, kterou musíme měřit pro přesnější údaje o průtoku.

Je užíváno způsobu, kdy proudící tekutina odebírá teplo tělísku, které má konstantní proud. Měří se tak teplotní rozdíl na tělísku. Čidlem bývá platinový drátek o průměru 0,01 až 0,1 mm s teplotou 200 až 500 °C. Nabízí se i možnost, kdy se udržuje konstantní teplota na tělísku i při změně rychlosti průtoku a tím je zjišťována velikost dodávaného elektrického proudu. Velikost elektrického proudu je poté úměrná hmotnostnímu průtoku.

Kalorimetrické průtokoměry naopak využívají rozdíl teplot před a za zdrojem tepla, který je umístěn do proudového profilu. [3] [4]



Zhodnocení tepelných hmotnostních průtokoměrů

Výhody

- vhodné i pro velmi malé průtoky
- jednoduchá konstrukce

Nevýhody

- větší nejistota měření
- nutná znalost složení média, například tepelné vodivosti, která se může měnit se složením
- vysoké teploty vzniklé ohříváním tekutiny, které chceme naopak snižovat

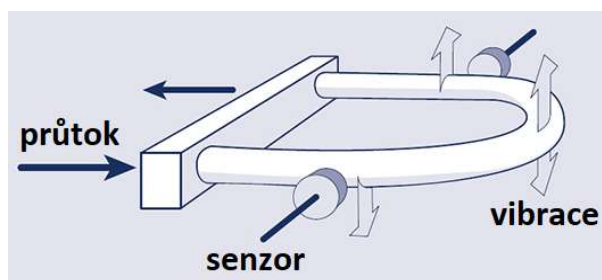
[3] [4]

1.4.5. Coriolisovy průtokoměry

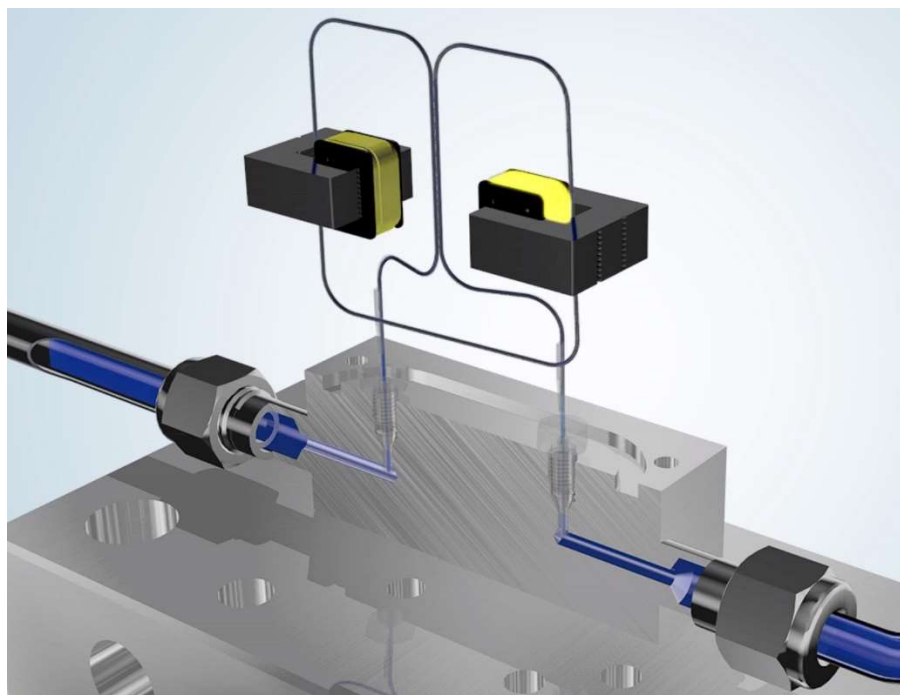
U tohoto typu průtokoměru se využívá tzv. Coriolisových sil. Ke vzniku těchto sil dochází ve vibrujících měřících trubicích při průtoku hmotného média. Fázový posuv v rezonančním kmitání trubic vznikající působení Coriolisových sil, je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny v trubici a frekvence vlastních kmitů odpovídá hustotě této proudící tekutiny.

V současnosti se jedná o jednu z nejpoužívanějších metod měření průtoku tekutin, jelikož je to jedna z nejpřesnějších metod. Je využívána v mnoha oblastech průmyslu, protože výrobní kalibrace jsou většinou prováděny hmotnostně. Velikou výhodou je, že tyto průtokoměry měří velmi přesně s malou nejistotou a údaje o průtoku jsou v podstatě nezávislé na teplotě, tlaku, viskozitě či obsahu pevných částic v tekutině. Z příznivých vlastností i zkušeností s tímto typem měřidel byl vybrán tento typ měřidla průtoku od firmy Bronkhorst.

[3] [4] [5] [10]



Obrázek 4: Princip Coriolisových průtokoměrů (www.Bronkhorst.com)



Obrázek 5: Útroby průtokoměrů CORI-FLOW od Bronkhorst (www.Bronkhorst.com)

Zhodnocení Coriolisových průtokoměrů

Výhody

- opět měření hmotnostního průtoku spojené s měřením hustoty tekutiny
- malá nejistota měření kolem 0,2 % z měřené hodnoty, tedy velmi přesné
- nezávislé na druhu média a jeho vlastnostech jako je teplota, viskozita či obsah částic
- neobsahuje pohyblivé části
- dobré dynamické vlastnosti
- velký rozsah měření

Nevýhody

- nevhodné pro větší průměry potrubí
- velká tlaková ztráta
- vyšší cena
- zvýšené nároky na tlumení vibrací [3] [4] [5]



1.5 Konečné porovnání průtokoměrů

Průtokoměr	Rozsah (Q_{\max}:Q_{\min})	Teplota [°C]	Tlak [MPa]	Přesnost (z měřené hodnoty)
Normalizovaná clona	4:1	do 540	do 41	1-2%
Excentrická clona	4:1	do 540	do 41	2%
Segmentová clona	4:1	do 540	do 41	2%
Venturiho trubice	4:1	do 540	do 41	1-2%
Dýza	4:1	do 540	do 41	1-2%
Pitotova trubice	3:1	do 540	do 41	5%
Kolenový	3:1	do 540	do 41	5%
Plováčkový skleněný	10:1	do 120	do 3	1%
Elektromagnetický - Indukční	30:1	do 180	do 10,5	1%
Vírový	20:1	do 430	do 10,5	1,5%
Turbínkový	10:1	do 500	do 43	0,5%
Turbínový a lopatkový	20:1	-	-	1%
Ultrazvukový (Dopplerův efekt)	30:1	do 300	do 10	3%
Membránový, bubnový, pístový, oválový (objemové)	100:1 až 200:1	-	-	0,1 až 2%
Coriolisův	80:1	do 200	do 10	0,2%
Termoanemometr	50:1	do 65	do 31	1%

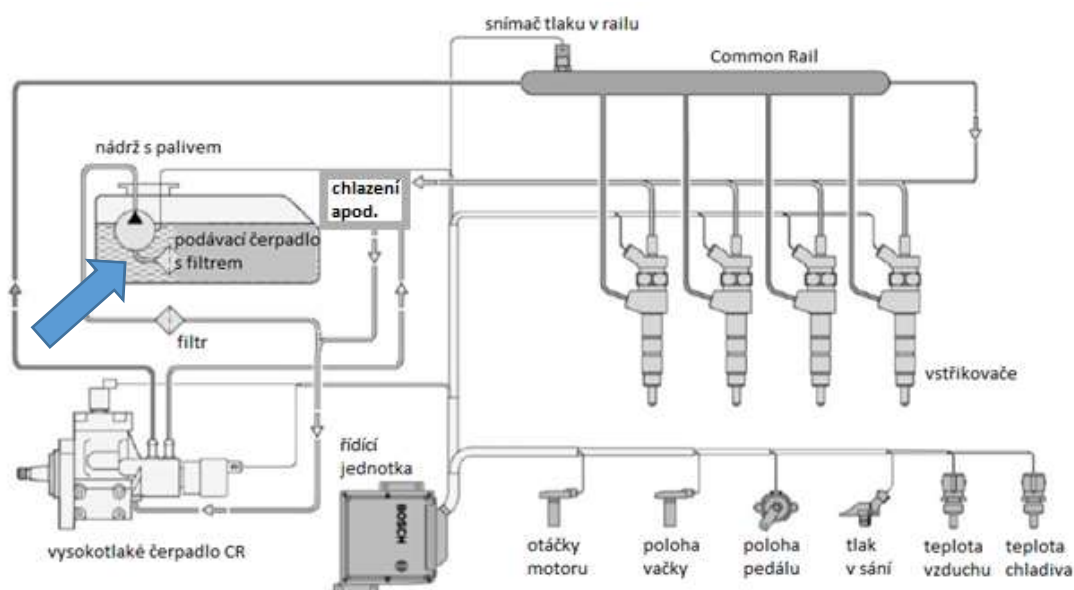
Zde nám vychází nejlépe Coriolisův průtokoměr, jak z hlediska rozsahu, tak z hlediska přesnosti, které jsou zde dokonce jedny z nejlepších v tabulce. Teplota je u nás nízká, jakožto i tlak je relativně nízký, takže je to ideální použití pro naše potřeby z těchto hledisek. [3] [4]



1.6 Experimentální laboratoř ve VTP Roztoky

Jak již bylo naznačeno v úvodu, tak naším úkolem je měření průtoku kapalného paliva dodávaného do spalovacího motoru. Jedná se o experimentální jednoválcový motor, který je umístěn v laboratořích CVUM. Je použit jednoválec jak z důvodu ekonomického, z pohledu jednotných dílů, tak i z dalších důvodů, jako je ovlivňování snímačů či chodu motoru, které by způsoboval víceválcový motor.

Tento motor může spalovat směs různých paliv a od toho je laboratoř vybavena směšovací stanicí pro míchání paliva z různých plynů umístěných v tlakových nádobách, jako jsou již uvedené CNG a vodík. Ke vstřikování paliva u vznětové verze motoru je používáno přímé vysokotlaké vstřikování Common Rail. Systém je vybaven podávacím čerpadlem, před které bude umístěn náš měřící systém. U druhého experimentálního zážehového motoru MPI je nízký tlak paliva, kde stačí pouze podávací čerpadlo. Tuto funkci by mělo zastat naše systémové čerpadlo určené převážně pro vyrovnání tlakových ztrát v našem měřícím systému. Systém bude umístěn do větve dle obrázku níže, před vracející se palivo ze systému, tudíž nedochází k ovlivnění měření ohříváním či tlakem paliva, které se vrací (zde u systému CR).



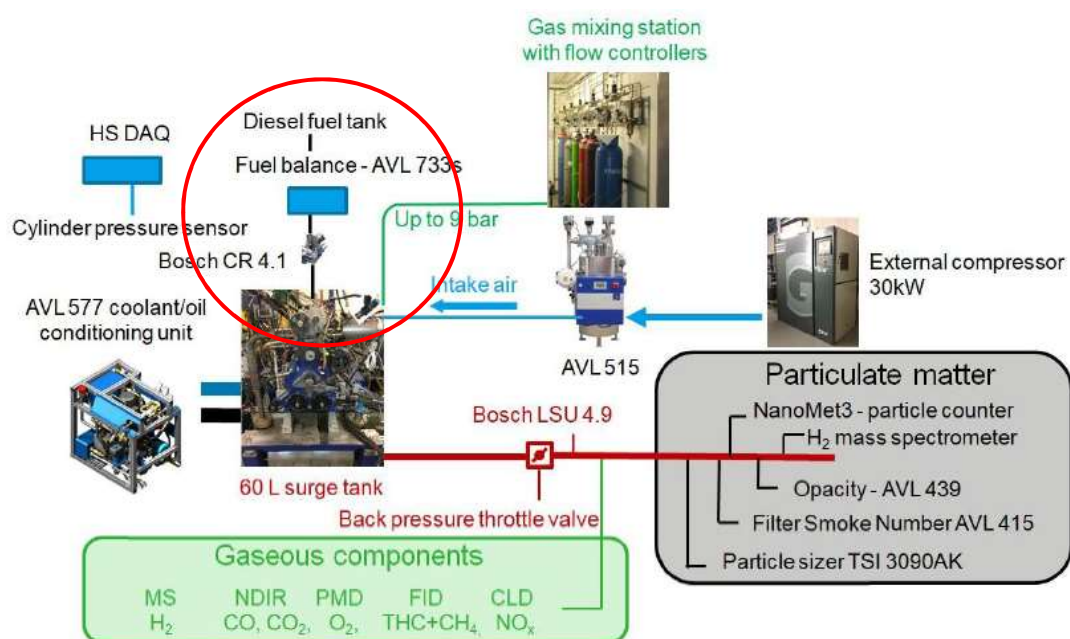
Obrázek 6: Schéma systému Common Rail a zakomponování naší soustavy do palivového systému [6]

Naš systém bude umístěn před podávací čerpadlo, podobně jak je tomu na obrázku výše, s tím rozdílem, že tato větev je v laboratoři umístěna mimo nádrž a zpětné vedení paliva z motoru se sériově umístěným chlazením paliva, bude umístěno na vývod z naší měřící soustavy. Díky tomuto uspořádání tak nebude docházet k ovlivňování ohříváním či tlakem vracejícího se paliva. Měřeno bude pouze to palivo, které přitéká z nádrže.

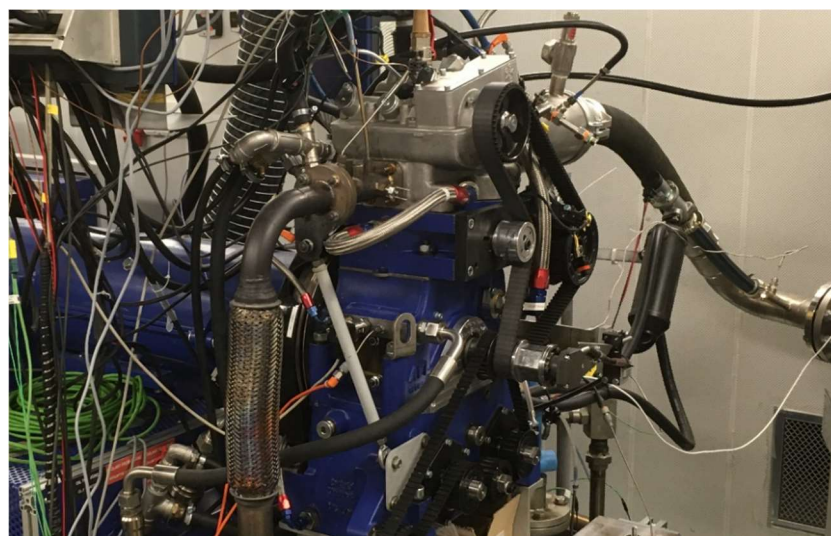


Cílem je tedy vytvořit přenosný měřicí systém, který zakomponujeme do stávajícího systému přívodu kapalného paliva do motoru. Stávající systém s váhami AVL 733s, umístěnými taktéž před podávací čerpadlo, totiž nevyhovuje z důvodu nepřesnosti u malých průtoků. Naším cílem je návrh a výběr komponent, které je potřeba dodat do funkčního celku a jejich rozmístění a umístění. Je zejména nutné hledět na funkčnost, nepřerušenosť chodu motoru či zabránit zavzdušnění a nepříznivému průtoku paliva, například z hlediska turbulencí.

Schéma testovací kóje s experimentálním jednoválcovým motorem je níže na obrázku s vyznačenou větví, kde budeme umisťovat náš měřicí systém. [6]



Obrázek 7: Schéma testovací kóje s experimentálním jednoválcem [6]



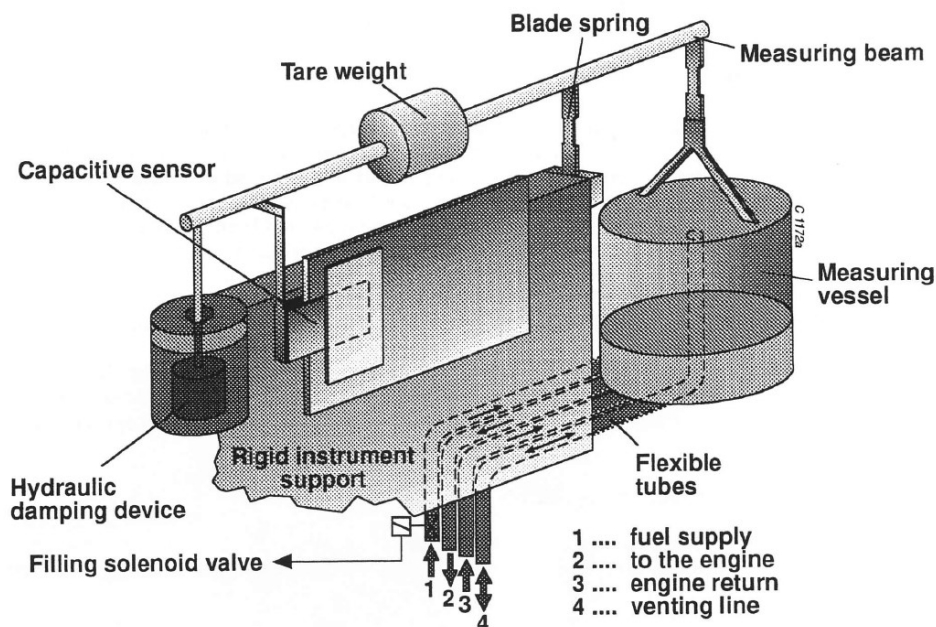
Obrázek 8: Pohled na experimentální vznětový jednoválcový motor



1.7 Stávající systém vah AVL 733s

Systém vah, umístěný v laboratořích CVUM u experimentálního jednoválce, byl doposud používán k měření průtoku kapalného paliva. Jedná se o systém pracující na gravimetrickém principu vah, kdy váženým elementem je nádobka, ze které je odváděno palivo do motoru. Tato nádobka je připevněna k rameni, na jehož druhém konci je kapacitní snímač, kde je snímán pohyb (umístění) nádobky při rozdílném odtoku paliva.

Nádobka je naplňována určitou rychlostí a také určitou rychlostí vyprazdňována. Dochází ke spojitému měření polohy nádobky v závislosti na její hmotnosti, respektive na její naplněnosti.



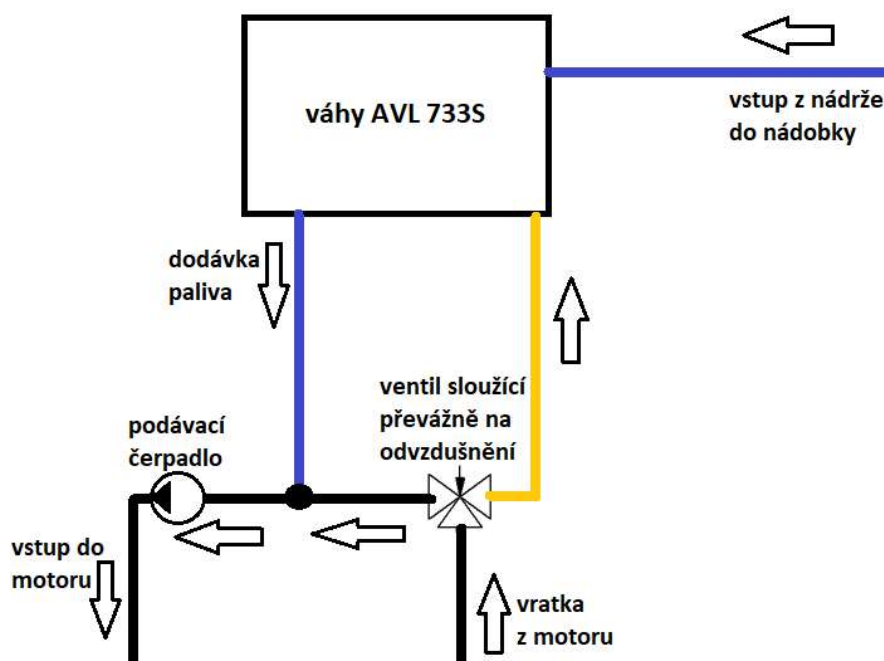
Obrázek 9: Vnitřek vah AVL 733s [16]

V laboratořích CVUM je varianta s větší nádobkou na 1800 g paliva. Váhy běžně bez zásahu výrobce měří 0-150 kg/h. Výhodou systému vah je jeho jednoduchost, velká přesnost, kdy chyba se pohybuje kolem 0,12 % z měřené hodnoty při průtocích nad 100g/h či nezávislost na teplotě či množství bublin. Váhy v základu mají ochranu proti přetížení či požáru.

Problém však nastává při měření průtoku kapalného paliva u našeho systému dvoupalivového spalovacího motoru, kde kapalné palivo slouží pouze k zažehnutí směsi paliva. To znamená, že velikost průtoku kapalného paliva bude malá. Zde tedy nastává problém, protože váhy u malých průtoků mají nedostatečnou přesnost.



Proto je zvolen jiný systém měření průtoku paliva, který pokryje měření malých průtoků kapalného paliva místo vah, které mají poměrně velkou chybu při malých průtocích. Další požadavek, což je mobilita systému, váhy také nespĺňují, například už z toho důvodu, že musí být izolované od vnějšího vlivu a umístěné vodorovně. Do stávajícího systému tedy potřebujeme zakomponovat náš měřicí systém. Stávající schéma zapojení vah do palivového systému je následující.



Obrázek 10: Schéma zapojení vah do palivového systému v laboratoři CVUM



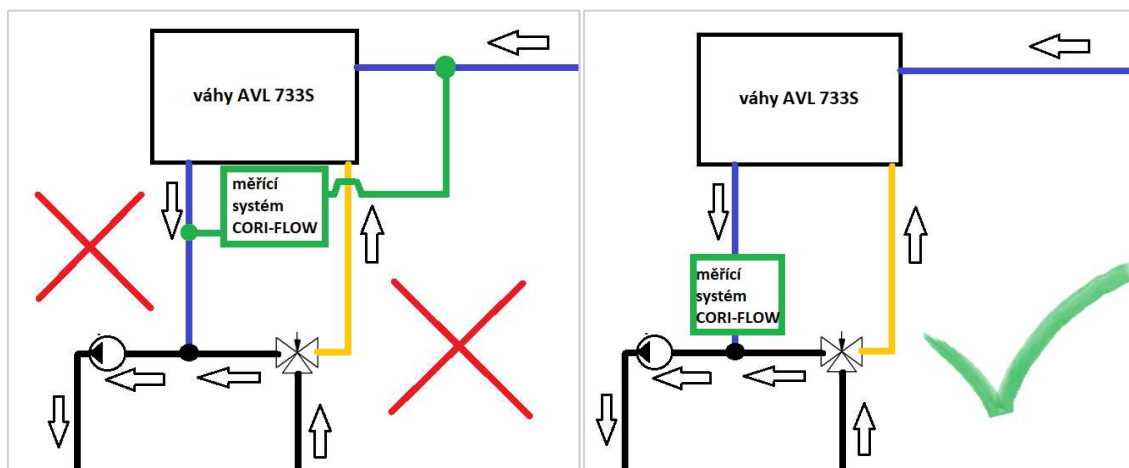
Obrázek 11: Váhy v laboratoři CVUM



2. Praktická část

2.1. Napojení na stávající systém

První záležitostí, kterou je nutno se zabývat, je umístění našeho měřicího systému do stávajícího systému měření pomocí vah. Musí se tedy vyřešit umístění do stávajícího systému.



Obrázek 12: možnost zapojení č.1 vlevo a č.2 vpravo

Zde, na obrázcích výše, je zobrazena základní úvaha zapojení měřicího systému, který je brán jako samostatný celek. Jak si lze všimnout, tak oba systémy mají dán výstup na větev, která dodává palivo. Žlutá větev zde slouží pouze pro odvodušnění a při provozu je zavřená. Výstup je tedy stejný a s ním problém není. Mohla by být uvažována i možnost dle obrázku vpravo, kde systém by však byl připojen ne na větev zásobovací, ale na větev plnicí nádobku ve vahách, tu vpravo nahoře.

Zde však nastává problém, protože na této větvi nemůže být měřeno vůbec z důvodu, že tato větev slouží k plnění nádobky ve vahách. Na této větvi by byly měřeny absolutně irelevantní hodnoty o naplňování nádobky vah, která s následnou velikostí průtoku na zásobovací větvi nemá moc společného. Opačně by se dalo zase uvažovat o ovlivnění naplňování této nádobky díky našemu systému.

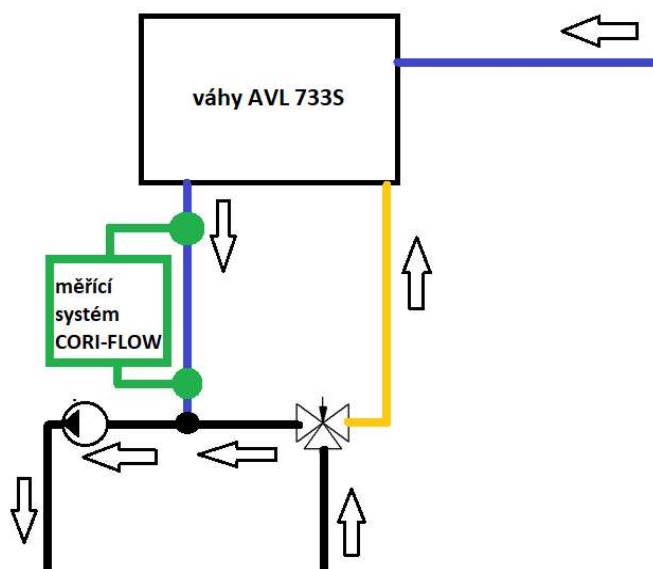
Proto náš systém musí být umístěn za váhy, na větev, která zásobuje palivem palivový systém motoru. Tento systém je umístěn na obrázku vpravo.

Další úvahou bylo, že systém by v tomto zapojení pracoval neustále přes náš měřicí systém CORI-FLOW, což není přípustné u průtoků nad 2 kg/h. Pro větší průtoky by mělo



sloužit opět měření pomocí vah, které mají větší přesnost u větších průtoků, oproti CF. Tlaková ztráta u průtoku 2 kg/h dosahuje u CF přibližně 2 bar.

Požadavkem je tak umístění obtokové větve (bypassu), která bude sloužit jako odpojení i například v případě poruchy. Systém s bypassem by měl být umístěn dle obrázku níže.



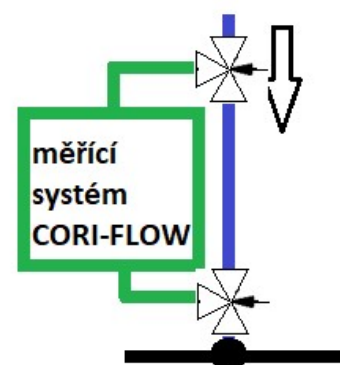
Obrázek 13: měřicí systém na bypassu

Zde je znázorněno, že náš měřicí systém je dán na bypass, tedy na odbočku. To znamená, že základní větev bude pro co nejmenší průtokový odpor zapojena napřímo.

Pro odpojení neboli odvod průtoku na vedlejší větev bude sloužit ventil či ventily. Jde o to jak a kolik ventilů je potřeba umístit na místa, která jsou označena zelenými kolečky.

2.1.1 První možnost se dvěma ventily

U této možnosti je nevýhodou, že jsou ventily dva, a je to tedy cenově nevýhodné. Dva ventily znamenají dvojitý řízení, kde však může nastat problém, že jeden ventil se bude otevírat jinak rychle nebo se neotevře vůbec a mohou tak vzniknout zbytečné problémy s průtokem.

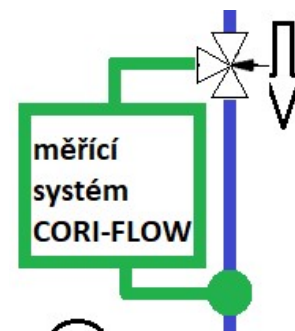


Obrázek 14: Ventily na vstupu i výstupu



2.1.2 Druhá možnost s ventilem na vstupu

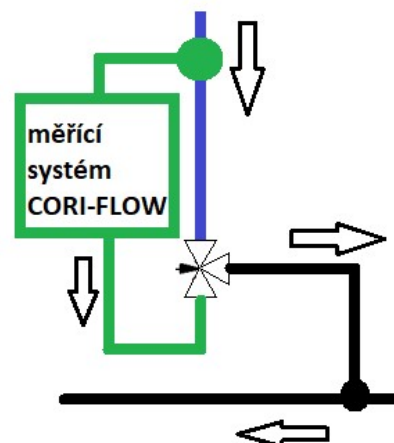
Zde bude jednodušší řízení oproti řízení dvou ventilů, kdy by bylo nutné korigovat jejich otevírání se zpožděním apod. V případě netěsnosti systému mezi ventilem a měřicím systémem však může dojít k úniku kapalin, ale i k zavzdušnění při nasávání čerpadlem, a tak nežádoucímu chodu motoru, kdy bude bypass uzavřen. V horších případech může dojít i ke kavitaci způsobenou podtlakem při nasávání čerpadla, a proto nastupuje možnost třetí.



Obrázek 15: Ventil na vstupu

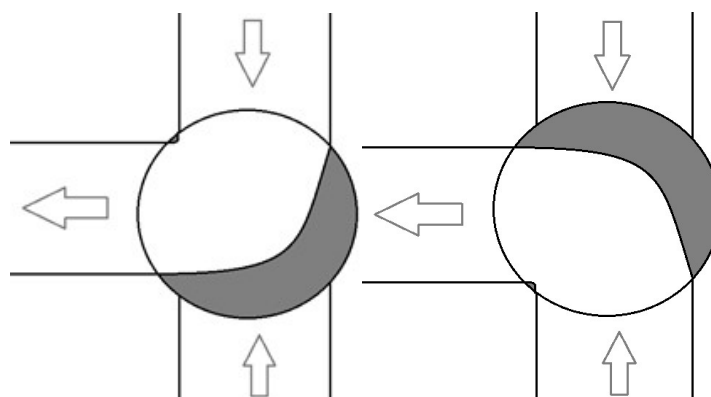
2.1.3 Třetí možnost s ventilem na výstupu

U této varianty se eliminuje problém s netěsností systému, kdy při uzavření bypassu dojde jediné k úniku kapaliny, ale už ne k narušení chodu motoru jeho zavzdušněním. Problém však nastává z ekologického hlediska při úniku kapalin. Ten by měl být však eliminován pomocí uzavřené skříně, v níž bude náš systém umístěn.



Obrázek 16: Ventil na výstupu

Pro úplnost musí být náš ventil umístěn tak, jak je to na obrázku výše, protože kulový ventil u našeho vybraného třicestného ventilu má průchod v podobě 90° kolena (viz obrázek níže). To znamená, že výstup musí být na větvi umístěné kolmo k oběma větvím.



Obrázek 17: Zjednodušený profil kulového ventilu



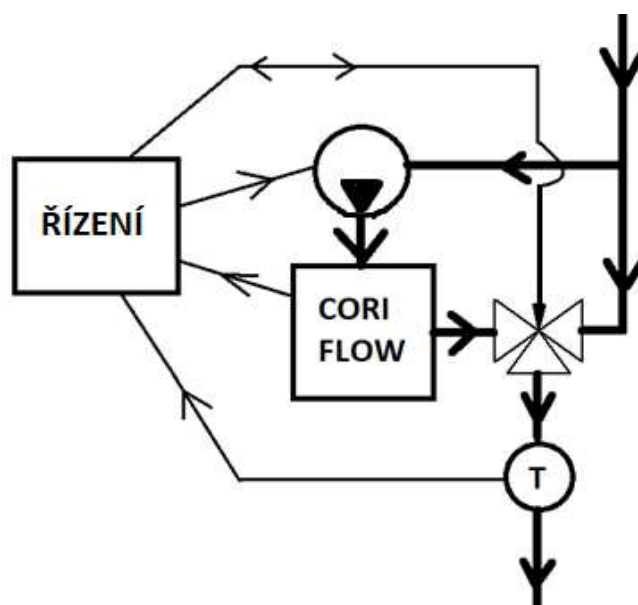
2.2 Základní komponenty nutné v měřící soustavě

Základem pro měření průtoku kapaliny je zařízení, pomocí něhož bude samotný průtok měřen, k čemuž jsme vybrali velmi přesné měřidlo s velkým rozsahem. Jedná se o systém CORI-FLOW M13 od firmy Bronkhorst, využívající působení Coriolisových sil.

K tomu přibudou další potřebné komponenty, jako je již uvedený ventil sloužící k přepínání z větve CF na přímou větev z vah a obráceně. K tomuto ventilu přibude mechanismus na jeho přestavování, který bude dle uvedeného signálu pootáčen, a tak dojde k přestavení větví.

Je tu však problém s tlakovou ztrátou na měřidle CF, kterou je potřeba vyrovnat. K tomu nám bude sloužit čerpadlo. Toto čerpadlo bude vyrovnávat tlakové ztráty a dále bude i v případě použití v terénu (což je požadavek do budoucna) sloužit jako čerpadlo podávací, tedy s tlakem 3-4 bar.

Není však dána žádná informace o tom, jaký tlak v systému je. K tomu bude sloužit tlakový snímač umístěný také v systému. K řízení a zpětným vazbám bude zapotřebí systém řízení, který bude podrobněji probrán v dalších částech. Základní měřící soustava je níže na obrázku. Tlusté čáry jsou hydraulické cesty a tenké čáry elektrické cesty.



Obrázek 18: Základní komponenty v měřící soustavě

Snímač tlaku je umístěn na výstup z ventilu z důvodu, že informace z větví před ventilem mohou být rozdílné než výstupní, a tedy finální tlak, který bude zapotřebí dále v palivovém systému.

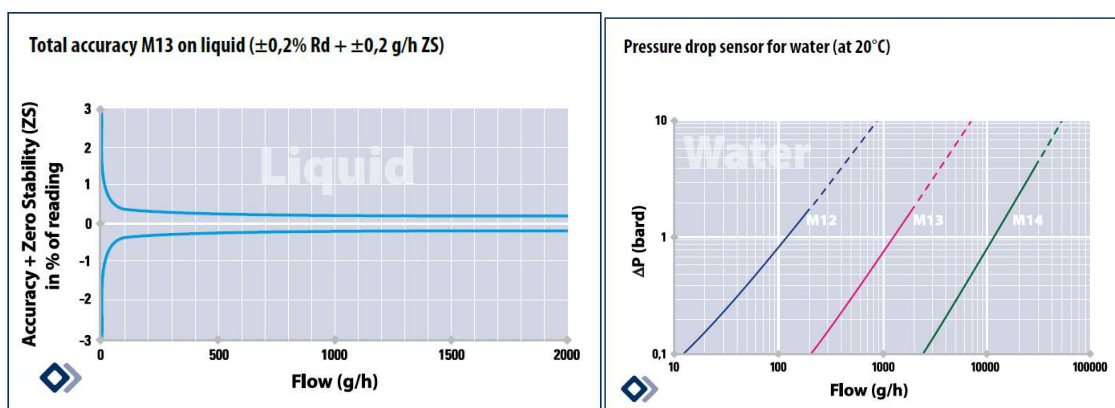


2.2.1 Měřidlo průtoku CORI-FLOW M13

Jak již bylo uvedeno, jedná se o měřidlo založené na využití Coriolisových sil, což je uvedeno v teoretické části.

Toto měřidlo má velmi přesné měření u nízkých průtoků, u tohoto typu M13 v rozsahu od 1 až do 2000 g/h, tedy do 2 kg/h. Měřidlo má velmi kompaktní rozměry, oproti například uvedeným průřezovým průtokoměrům. Je použitelné i u měření průtoku plyných tekutin, což se nás netýká, protože zde je potřeba měřit kapalné tekutiny.

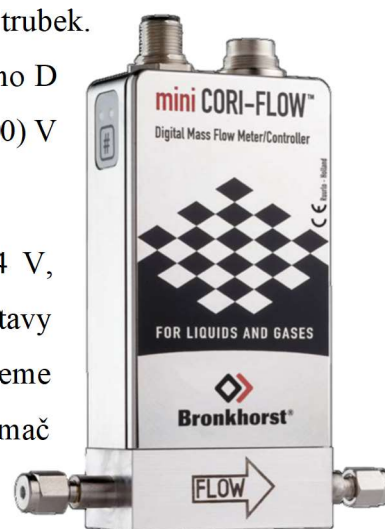
Přesnost se pohybuje okolo $\pm 0,2\%$ z měřené hodnoty průtoku, $\pm 5 \text{ kg/m}^3$ z měřené hustoty či $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ z měřeného průtoku. [10]



Obrázek 19: Přesnost měření a tlakový spád (růžová prostřední linka) na měřidle CF M13 [10]

Připojení na měřidlo je za pomoci normalizovaných trubek. Připojení elektroniky je nahoře na měřidle pomocí 8 - pinového D konektoru. Napájení je +15-24 V, analogový výstup je 0 až 5 (10) V / 0 (4) až 20 mA a komunikace pomocí RS232.

K napájení bude zapotřebí samostatného zdroje na 24 V, protože ze síťové zásuvky je napětí 220-240 V. Do řízení soustavy nejspíše nebude zasahovat, bude připojen přes PC, kde budeme sledovat měření. Naše řízení by měl ovlivňovat zejména snímač tlaku. [10]



Obrázek 20: Měřidlo CF M13 [10]



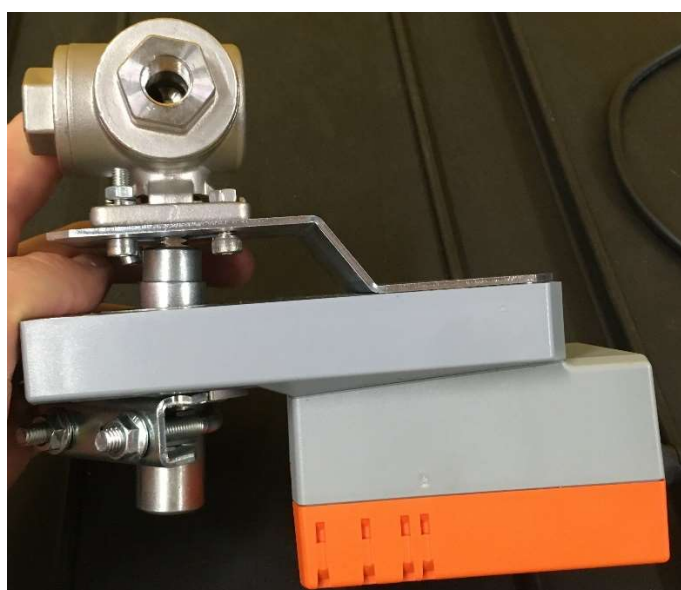
2.2.2 Třícestný ventil s přestavovacím mechanismem

Ventil sloužící k přestavování větví je jednoduché třícestné šroubení s vnitřním kulovým otočným ventilem s průchodem v podobě 90° kolena, jak již bylo uvedeno v kapitole 2.1.



Obrázek 21: Pohled na výstup z třícestného ventilu

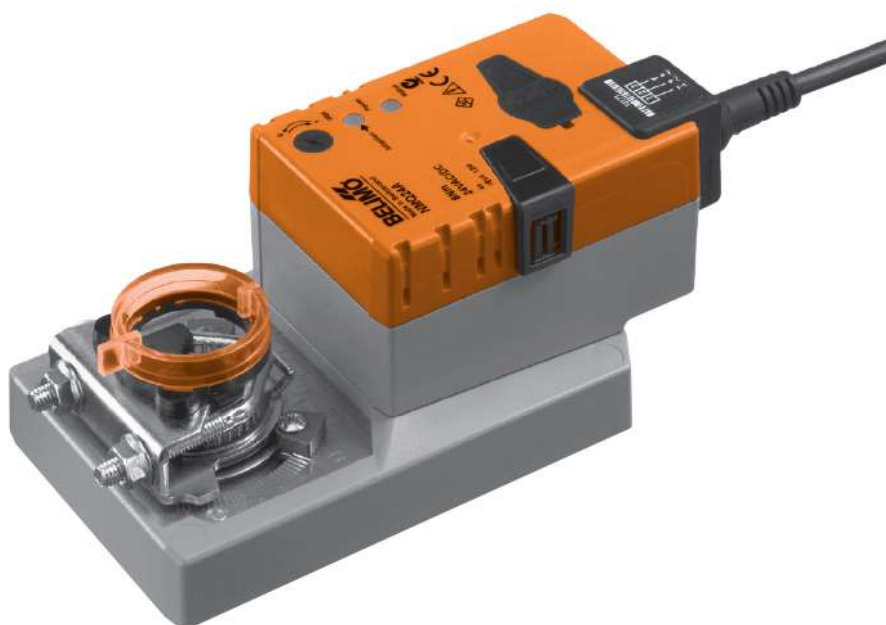
Ventil má udán tlak PN 63, což znamená, že je určen na 0-63 bar. Světlost průměru je udána DN 8, s tím že připojení je pomocí vnitřního trubkového závitu G1/4. Třícestný ventil je z austenitické nerezové oceli 1.4408. Zespodu je ventil přišroubován na plech, jenž je zajištěn v přestavovacím mechanismu (v servopohonu). Je přišroubován přes čtyři šroubky k plechu a vnitřní kulový ventil je chycen přes hřídel k servopohonu. Tato hřídel je volně se pohybující oproti ventilu samotnému a díky tomu dochází k přestavování ventilu a tedy větví.



Obrázek 22: Ventil připevněný k přestavovacímu servopohonu



Vybraný servopohon Belimo NMQ 24 A je dvoustavový, což znamená že je v jedné či druhé poloze. V jedné poloze jde přes CF nebo v druhé přes větev z vah. To vůbec nevadí, protože když dochází k přepínání, tak se měření stává irrelevantním pro náš měřicí systém, protože dochází k protékání i jinou větví, a tudíž neměříme skutečný průtok.



Obrázek 23: Přestavovací servopohon Belimo NMQ 24 A [17]

Přestavování ventilu trvá 4 vteřiny, je tedy poměrně rychlé. V tomto čase bude muset být zajištěno řízení, pomocí něhož se bude muset plynule přejít z větve CF na přímou větev z vah, bez toho aniž by došlo k přerušení plynulé dodávky paliva do motoru.

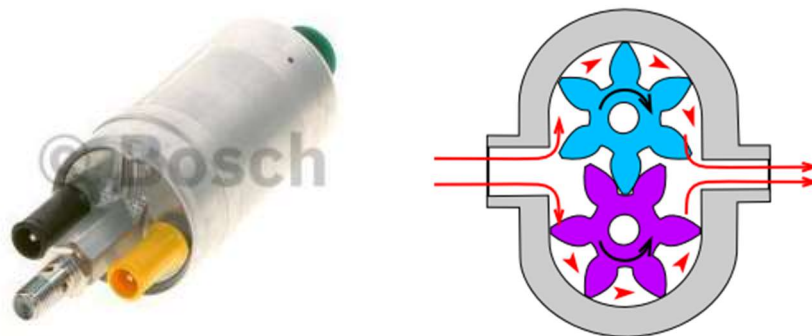
Bohužel není tento typ vybaven potenciometrem, který by dodával informace o poloze ventilu při jeho samotném přestavování, čemuž se bude muset následně přizpůsobit v řízení.

Servopohon je tedy spouštěn a napájen opět pomocí 24 V sítě, což tedy znamená, že opět bude muset být použit 24 V zdroj napětí jako u CF. Servopohon bude však nejspíše ovládán přes PC, jakožto CF, tedy pro naše řízení bude sloužit spíše jako zpětná vazba. Zapojení je pomocí tří kabelů a to plus, mínus a spínacího kabelu, na kterém při přivedení napětí dojde k přestavení ventilu. [17]



2.2.3 Zubové čerpadlo BOSCH

Pro účely vyrovnání tlakových ztrát bylo zvoleno automobilové čerpadlo, které je velmi snadno dostupné. Čerpadlo od firmy BOSCH s kódovým označením 0 580 254 952, je zubové čerpadlo, kde rotací dvou ozubených kol dochází k čerpání a vytváření tlaku kapaliny po obvodu (viz obrázek níže).



Obrázek 24: Čerpadlo BOSCH 0 580 254 952 a princip funkce zubového čerpadla [12] [18]

Čerpadlo bylo vybráno z důvodu jednoduché integrace do systému a snadné dostupnosti na trhu. Čerpadlo je napájeno 12 V sítí, což vyhovuje našemu použití jak z hlediska řízení, tak napájení. Čerpadlo má na vstupu průměr 15 mm a na výstupu je umístěn průtokový šroub M12, na který bude nasazeno průtokové oko neboli banjo, na němž bude připevněna hadice s vnitřním průměrem 6 m. Ta bude na druhém konci napojena na trubku do CF měřidla.

Čerpadlo obsahuje dva kontakty, a to plus a mínus, na které bude přiváděno námi regulované napětí v závislosti na velikosti tlakové ztráty. Ta bude způsobena rozdílnou velikostí průtoku. Tato tlaková ztráta, respektive tlak na výstupu, bude snímán tlakovým snímačem, který bude předávat tyto informace o aktuálním tlaku do řízení. [12]



Obrázek 25: Aktuální čerpadlo i s průtokovým okem



2.2.4 Tlakový snímač Baumer Y91

Do našeho systému byl vybrán tlakový snímač Y91 od firmy Baumer, který bude zakomponován do měřicí soustavy přes trubkový závit. Snímač bude totiž připojen k systému přes T šroubení. Snímač disponuje kompaktními rozměry o průměru 27 mm a délce přibližně 93 mm i se započítaným poloměrem ohybu kabelů.



Obrázek 26: Varianta snímače Y91 s konektorem [19]

Jedná se o snímač pracující na principu tenzometrů. U tenzometrů se při změnách rozměrů mění jejich odpor, k čemuž zde dochází při pnutí membrány při přetlaku. Snímač je vybaven tenkovrstvým senzorem na keramické membráně.

Snímač má robustní pouzdro z nerezové oceli 1.4301 s procesním připojením z nerezové oceli 1.4404, pomocí závitu G1/4. Napájení je opět pomocí 24 V zdroje s tím, že výstup je buď 4-20 mA nebo 0-10 V (1-5 V). Tento snímač je vyráběn v širokém spektru měřících rozsahů od 0-1 bar až 0-600 bar.

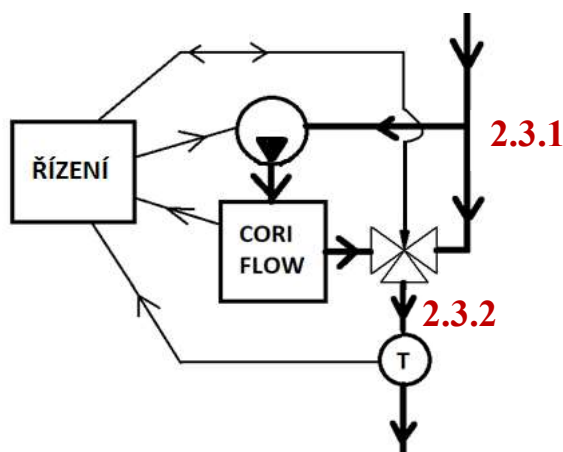
V našem případě bude však nejspíše použit snímač s rozsahem 0-4 bar, přestože je požadován přibližně atmosférický tlak pro zapojení v laboratoři. Pro zapojení v terénu bude však naše čerpadlo vyrovnávající tlakovou ztrátu použito jako podávací s tlakem 3-4 bar, tudíž budou měřeny tlaky do 4 bar. Přesnost snímače je udávána jako $\pm 0,3$ % z plného rozsahu snímače, což pro menší rozsah znamená větší přesnost.

Snímač disponuje třídou krytí IP65. Toto krytí udává, že snímač je chráněn proti vniknutí prachu a dále proti tryskající vodě ze 3 m při tlaku 0,3 bar po dobu 3 minut. U varianty chráněného konektoru je třída ochrany IP67, což znamená navíc ochranu do hloubky 1 m po dobu nejméně 30 minut. Tato ochrana však není zapotřebí u našeho použití. [19]



2.3 Hydraulické propojení komponent

V minulých kapitolách byly uvedeny potřebné komponenty pro měřicí řetězec, které musí být navzájem propojeny. K propojení budou zapotřebí hadicové nástavce, redukce, šroubení, hadice či trubky. Tato kapitola nahlédne na tyto hydraulické komponenty neboli armatury. Schéma, dle kterého bude systém propojen, je na obrázku níže. Hydraulické propojení je znázorněno tlustými čarami, oproti tomu tenké reprezentují elektronické propojení. Konkrétní komponenty od výrobců jsou uvedeny v této práci a ve zdrojích.



Obrázek 27: Schéma zapojení měřícího řetězce

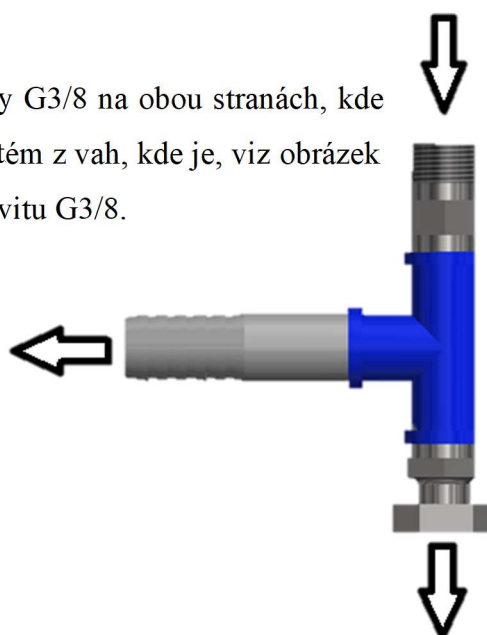
2.3.1 Vstupní propojení a rozcestí na přímou větev a bypass

Návrh vstupní armatury je navržen takto, dle obrázku vpravo dole. Základní armaturou je zde T šroubení (vyznačeno modře) s vnitřními závity G3/8, na které jsou dále připojeny další armatury.

Na vrchu na vstupu je dáno šroubení se závity G3/8 na obou stranách, kde z jedné strany je připraveno uchycení na stávající systém z vah, kde je, viz obrázek níže, uchycení přes šroubení a převlečnou matici o závitu G3/8.



Obrázek 28: Výstup z vah



Obrázek 29: Návrh vstupní dvoucestné armatury



Na výstupu vlevo je umístěn hadicový nástavec s vnějším průměrem 17,2 mm. Zde bude hadice nasazena a zajištěna pomocí hadicových spon. Na druhém konci bude napojena na čerpadlo, kde bude taktéž zajištěna prostřednictvím hadicových spon.

Vespodu je umístěn výstup rovnou na třicestný ventil. Prvotním návrhem u prvních uspořádání soustavy, bylo použití hadicového nástavce. Zde však nepasovaly průměry hadicových nástavců z důvodů různých závitů na T šroubení a na třicestném ventilu. To by se však dalo vyřešit použitím hadicové redukce.

Nakonec však došlo ke změně rozmístění a také uspořené délky tohoto přechodu, jakožto jeho složitosti a ceny. Propojení bude tedy zajištěno pomocí závitové redukce z G3/8 na G1/4 přímo z T šroubení na třicestný ventil. Vybrané komponenty jsou uvedeny v přiložené dokumentaci.

2.3.2 Propojení třicestného ventilu s měřicí soustavou

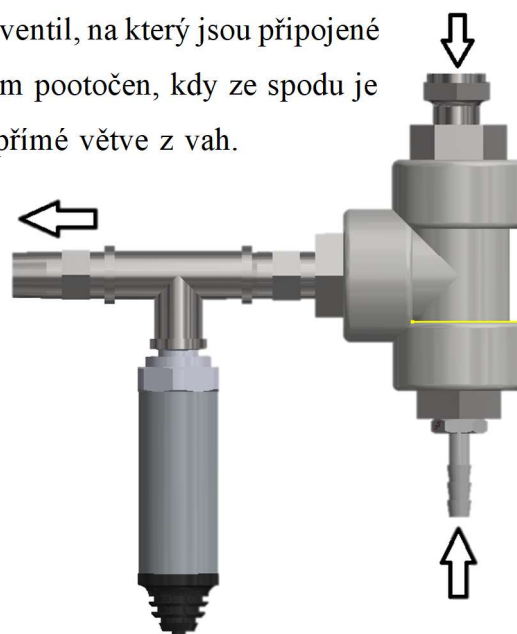
Zde je místo T šroubení již zmiňovaný třicestný ventil, na který jsou připojené další armatury. Tento návrh je oproti prvotním návrhům pootočen, kdy ze spodu je přívod z bypassu, tedy z měřicí větve CF a z vrchu z přímé větve z vah.

Vlevo, na výstup, je dán snímač tlaku.

Na vrchu na vstupu z přímé větve je redukované šroubení z minulé kapitoly, a to z G3/8 na závit třicestného ventilu G1/4.

V dolní části byl problém s návrhem. Bylo totiž složité sehnat hadicový nástavec s průměrem 6-7 mm a závitem G1/4 tak, aby byl připojitelný na příslušnou hadici vedoucí z CF. Vznikl tedy návrh na výrobu vlastního hadicového nástavce ze šestihranné tyče či trubky, který je zobrazen v dokumentaci formou výkresu. Nakonec se však podařilo najít i variantu dostupnou na českém trhu se správnými rozměry, ale nákladnější oproti konvenčním hadicovým nástavcům přibližně čtyřnásobně.

Na výstup z třicestného ventilu je umístěno šroubení, přes které je uchyceno opět T šroubení, zde však se závity G1/4. Na levou stranu bude umístěno výstupní redukované šroubení na závit G3/8 i s převlečnou maticí na uchycení vývodu, který je před podávacím čerpadlem, totožně jako tomu na vstupu. Alternativou může být hadicový nástavec, pomocí



Obrázek 30: Návrh armatury u třicestného ventilu

Na výstup z třicestného ventilu je umístěno šroubení, přes které je uchyceno opět T šroubení, zde však se závity G1/4. Na levou stranu bude umístěno výstupní redukované šroubení na závit G3/8 i s převlečnou maticí na uchycení vývodu, který je před podávacím čerpadlem, totožně jako tomu na vstupu. Alternativou může být hadicový nástavec, pomocí



něhož by nastala možnost připojení pokračující hadice, čímž by mohl být vývod propojen mimo soustavu (tedy myšleno mimo skříňku). Ve spodu, tedy na kolmé větvi, je umístěn přes závit snímač tlaku Baumer Y91.

Vybrané komponenty jsou opět přiloženy v dokumentaci i s výkresem pro výrobu vlastního hadicového nástavce.

2.3.3 Propojení čerpadlo - CORI-FLOW, CORI-FLOW – třícestný ventil

Na obrázku níže je znázorněn výstup z čerpadla a vstup do CF. Zde je vyskytován problém v podobě hadicového nástavce, tedy průtokového oka na čerpadle a trubkového nástavce s převlečnou maticí na vstupu do CF. Jinými slovy je nutno propojit hadici s trubkou.



Obrázek 31: Znázornění výstupu čerpadla a vstupu CF

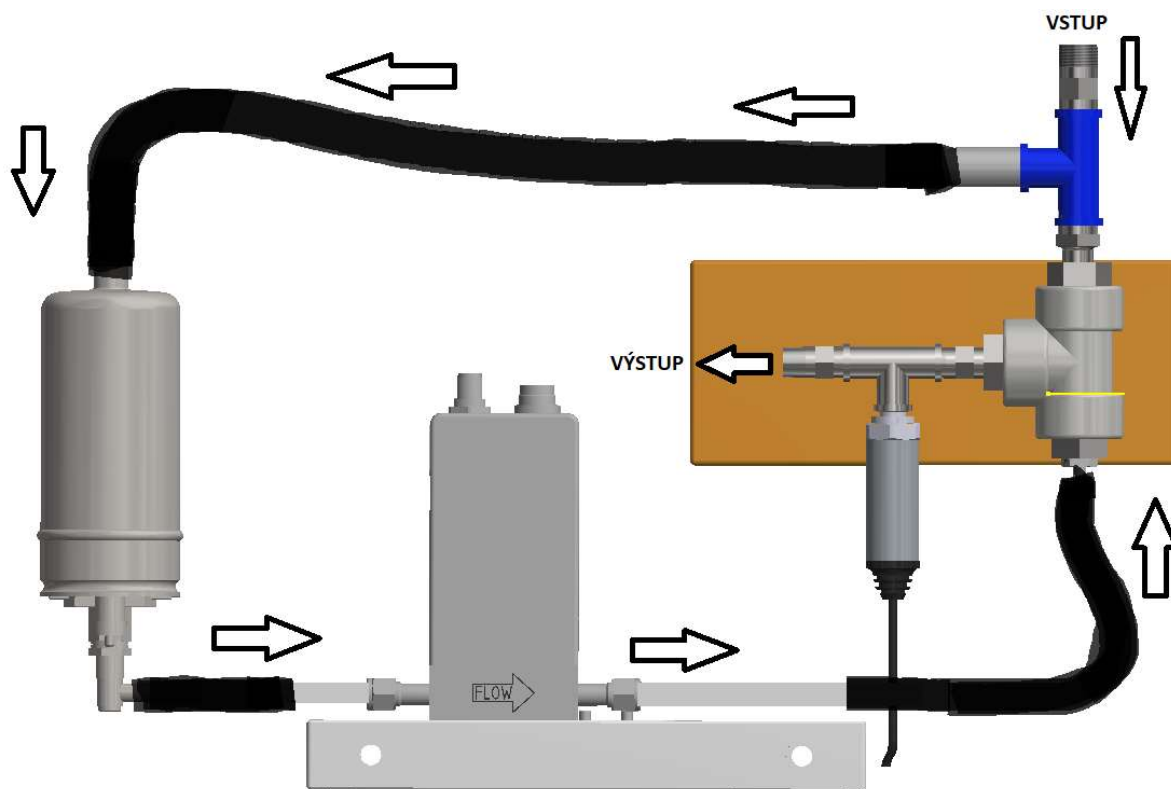
Nabízí se možnost použít hadicový nástavec, kdy hadice půjde na nástavec a druhá strana nástavce se závitem bude opatřena závitem s převlečnou maticí, díky které by se dalo připojit trubku. Jedná se však o drahé a komplikované řešení s prostorovou náročností. Náhradní volbou je navařit „prstenec“ na trubku, který po následném obroušení bude sloužit jako kuželové osazení pro hadici, jako je tomu v případě průtokového oka vlevo.

Tato volba se nabízí i na výstup z CF, kdy se opět snažíme propojit hadici s trubkou. Zde je však navíc možnost použít šroubení, pomocí kterého je možnost připojit trubku přímo na třícestný ventil. Od této možnosti bylo však upuštěno s tím, že by bylo nutné vyrobit složité tvary trubek bez možnosti eliminace případných vibrací.



2.4 Rozmístění soustavy

Na obrázku níže je vyobrazeno rozmístění soustavy i s hadicemi a trubkami. Nejedná se o finální verzi, ale jednu z posledních. Bude už jenom lehce upravována z důvodu nadbytečné velikosti.



Obrázek 32: Soustava se znázorněním hadic a trubek

Hlavní změnou oproti prvotním návrhům je otočení třicestného ventilu, tedy jeho výstupu dovnitř, do prostoru měřicí soustavy. Tím dochází k úspoře délkových rozměrů, jinak by docházelo k přesahu v pravé části díky natočení armatury se snímačem tlaku na pravou stranu. Takto je umístěn souběžně se servopohonem a zabírá pouze místo na hloubku, kterou jsme nezměnili. Výstup nezasahuje do CF, protože je vpředu před CF, jak by bylo patrné z bokorysu. Výstup nevychází spodem z důvodu, aby při pokládání soustavy nijak nepřekážel svými výstupky jinak rovnému podkladu skříňky.

Měřidlo CF, je zde umístěno co nejnižší, protože tím je zabráněno jeho zavzdušnění. Vzduch se bude držet ve vrchní části nikoliv spodní. Toto umístění je doporučováno i výrobcem Bronkhorst. Čerpadlo je umístěno svisle, protože horizontálně by mohlo překážet, a také by se špatně připevňovalo, jak bude v dalších částech patrné.



2.5 Uchycení soustavy

Kdyby soustava vyobrazená v minulé kapitole držela ve vzduchu tak jak je, tak by nebylo dále co řešit. To však ve skutečnosti nelze, a proto je nutné uchytit komponenty do skříně. A to proto, aby byla soustava volně přenositelná, tedy aby byla v jedné, k tomuto účelu určené, skříně. Skříněmi se bude zabýváno později, v této části se bude naopak zaměřovat na příchytky a uchycení soustavy, respektive komponent.

2.5.1 Uchycení měřidla CF do skříně

Základní uchycení, a to uchycení CF, je pomocí pevného bloku, ke kterému je měřidlo CF uchyceno. Tento blok je uchycen přes silentbloky do skříně z důvodu, aby nedocházelo k přenosu vibrací ze skříně do měřidla. Těmito vibracemi by byl narušen chod měření, protože samotné měření je založeno na měření vibrací při proudění tekutiny. Blok může být uchycen z boku (oranžové šipky) či zespodu (modré šipky) viz obrázek.



Obrázek 33: Znárodnění uchycení CF



2.5.2 Uchycení čerpadla do skříně

Další na řadě je uchycení čerpadla do skříně. Zde jsou nabízeny různé varianty uchycení, jako jsou příchytky, objímky či úchyty. U různých příchyttek a objímek je však problém s uchycením přes jediný šroub, kdy může docházet ke kmitání čerpadla, čemuž je snaha spíše zabránit. Proto nastupují úchyty trubek, které mají uchycení uzpůsobeno pomocí dvou šroubů. Tyto úchyty mohou být vyrobeny na 3D tiskárně z plastu. Bylo však vybráno lepší řešení celopryžových úchytů. Díky tomu bude zaručeno příznivé tlumení vibrací od čerpadla. Čerpadlo tak bude uchyceno uvnitř pomocí dvou sešroubovaných pryžových kusů.



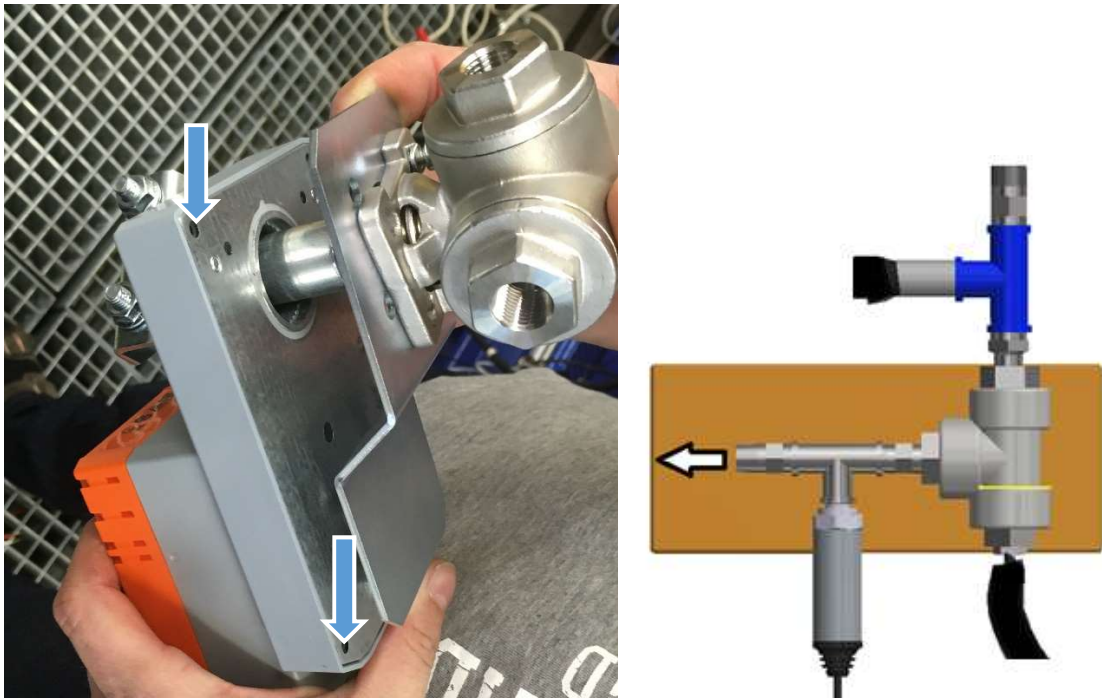
Obrázek 34: Pohled na celopryžové příchytky [20]

2.5.3 Uchycení servopohonu s ventilem a jeho hydraulických armatur

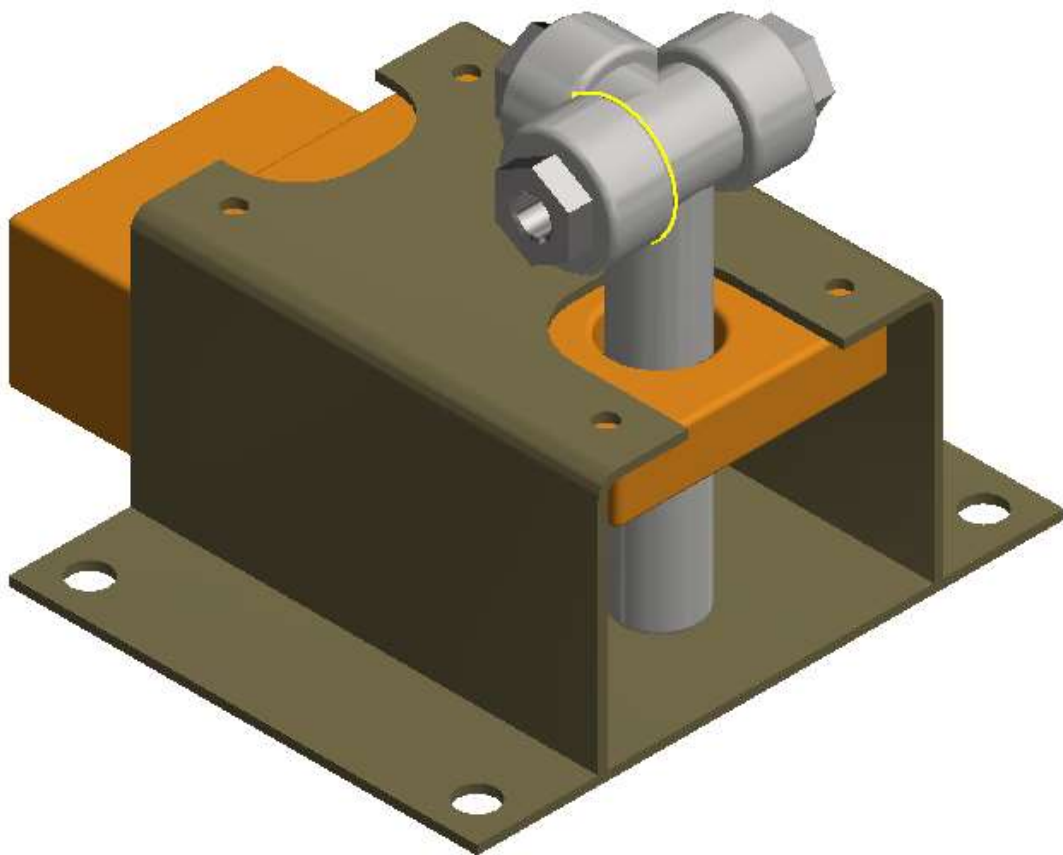
Servopohon musí být uchycen s tím, že bude nést vstupní T šroubení a výstupní T šroubení se snímačem tlaku. Servopohon má připraveny otvory pro šrouby, ale z druhé strany, než je potřeba. Tím by se muselo použít nezvykle dlouhých šroubů.

Vznikl návrh na vytvoření vlastního uchycení z 3 mm plechu, jenž je jakožto výkres přiložen v dokumentaci. Snahou bylo, aby uchycení tvořilo uzavřený profil, protože jak je z pružnosti a pevnosti známo, tak otevřený profil má větší napětí v příčném průřezu oproti profilu uzavřenému, kdy je přenášen krouticí moment.

Dále je požadováno, aby úchyt nezasahoval do ovládání na servopohonu, tedy úchyt musí mít na spodní straně zaručenou vůli. Na obrázcích na další stránce je vidět, jak je myšleno uchycení na druhé straně.



Obrázek 35: Vlevo zobrazení otvorů pro uchycení šroubů a vpravo komponenty pro uchycení



Obrázek 36: Servopohon s ventilem a navrženým uchycením



2.6 Řízení systému – použité elektronické komponenty

Jak již bylo uvedeno, tak je zapotřebí vyrovnávat tlakovou ztrátu způsobenou měřidlem CF s tím, že výsledný tlak může být i vyšší než před čerpadlem. Vyšší z důvodu, aby naše čerpadlo v případě potřeby zastalo funkci podávacího čerpadla, například u systému nepřímého vstřikování benzínu. To už by však měla být jenom záležitost změny v algoritmech řízení čerpadla.

Byly vybrány dvě základní možnosti, a to PLC automaty s PID regulátory nebo programovatelné moduly. PLC automaty jsou oproti programovatelným modulům dražší, prostorově náročnější a často i obtížnější na programování. Po této úvaze byly vybrány programovatelné moduly i díky jejich rozsáhlé softwarové a hardwarové podpoře. Řadí se sem systémy jako je RASPBERRY PI, ARDUINO nebo ORANGE PI. Jedná se o malé programovatelné moduly, které se dají programovat například pomocí algoritmů C jazyka. Pro komplikovanější systémy s více řízenými veličinami je však vhodné použití PLC automatů.

Úkolem řízení bude měnit napájecí napětí čerpadla a tím jeho výstupní tlak. Napětí bude měněno zejména v závislosti na výstupním koncovém tlaku ze systému, tedy na výstupu za třícestným ventilem. Tím pádem musí být naprogramována funkce do modulu, u níž bude řídicí veličinou koncový tlak.

Zásadní otázkou je, jak bude probíhat přepínání větví pomocí třícestného ventilu. Další části budou na tuto problematiku zaměřeny, tedy na problematiku kolísání tlaků, které mohou nastat při přepínání. Hlavním požadavkem při přepínání větví je, aby nebyl narušen chod motoru.

K informaci o přepínání větví bude určen spínací signál k řízení servopohonu třícestného ventilu, tedy signál zahajující přestavení ventilu do jiné polohy. Nakonec je ještě uvažováno o použití informace o průtoku z měřidla CF, o použití této informace je však zatím uvažováno z důvodu kontroly než z řízení samotného. [13]



2.6.1 Programovatelný modul ARDUINO

Vybraným modulem pro řízení čerpadla v závislosti na výstupním tlaku, případně i průtoku, je systém ARDUINO UNO R3. Jedná se o vývojovou desku založenou na jednočipovém mikrořadiči ATmega328 zahrnující 8-bit CPU, flash paměť 32kB či SRAM 2kB. Deska obsahuje 14 digitálních vstupních / výstupních pinů (z toho lze použít 6 pinů pro výstupní PWM signály), 6 analogových vstupů, připojení pomocí USB, napájecí konektor a resetovací tlačítko.

Deska je snadno připojitelná k PC a následně pomocí vývojářského prostředí programovatelná. Vstupní analogové signály musí být převedeny na 0–5 V rozsah s maximálním proudem 40 mA na pin.



Obrázek 37: ARDUINO UNO R3 [13]

Vybraný snímač tlaku splňuje rozsah se svými výstupními signály v rozmezích 0–5 V, kdy z rozsahu 0–10 V získáme rozbočením podle Kirchhoffova zákona rozsah 0–5 V. Alternativou je snímač v rozdílné konfiguraci s výstupním signálem v rozsahu 1–5 V. Problém však nastává u dalších vstupů a výstupů, například čerpadlo, které má napájení 12 V a proud až 10 A, by byla deska ARDUINO spálena. [13]



2.6.2 Problematika řízení čerpadla a zpětné vazby od servopohonu

Jak již bylo naznačeno v minulé kapitole, tak nelze řídit čerpadlo přímo přes desku ARDUINA. Musí být použity prvky podobné, jako jsou relé, kdy je malým proudem spínán větší proud. Relé však nelze použít, protože relé slouží ke spínání obvodu. Pomocí relé totiž nemůže být proud ani napětí regulováno. Proto je nutné použít měniče napětí, regulátory napětí či otáček.

Všechny nalezené měniče však nesplňovali zadané požadavky. Disponovali většinou špatnými rozsahy, ve kterých měnič zvládne pracovat, což by pro nás znamenalo, že čerpadlo by nešlo nastavit na nízký až nulový tlak nebo naopak na vysoký tlak.

Vhodnějším řešením se nabízí regulátor otáček hojně využívaný v modelářském odvětví, který je dokonce cenově příznivější než měniče napětí. Napětí je zde regulováno pomocí digitálního signálu PWM, který udává délku obdélníku logické 1 a tím otáčky motoru čerpadla. Pro tyto účely byl vybrán regulátor QuicRun 1625 25A od firmy HOBBYWING.



Obrázek 38: Vybraný regulátor otáček [22]

Jedná se o stejnosměrný regulátor otáček vhodný pro modely aut a lodí. Tento regulátor je obousměrný, voděodolný a prachotěsný, což je pro tuto aplikaci víceméně nepodstatné, protože bylo zamýšleno umístit regulátor do samostatné uzavřené krabičky na elektroniku. Jelikož nebude tato krabička disponovat přílišným přístupem vzduchu, tak byl požadavek na vhodné chlazení tohoto regulátoru. Zde lze vidět, na obrázku výše, rudě zbarvené pasivní chlazení, které je umístěno uprostřed regulátoru.



Regulátor zvládne běžně pracovat s trvalým proudem 25 A, což by v této aplikaci mělo dostačovat danému proudu do 10 A. Napájecí napětí je dáno v počtu článků NiMH, kterých může být 6-9 a v počtu článků Li-Po, kterých může být 2-3. To znamená u plně nabitého článku NiMH s 1,4 V, respektive u plně nabitého článku Li-Po s 4,2 V rozmezí napájecího napětí 8,4-12,6 V. U použitého čerpadla je nutné napětí do cca 12 V, což tato rozmezí splňují.

Dále regulátor disponuje ochranou proti přehřátí, ochranou proti nízkému napětí, ale to spíše slouží pro vybité akumulátory nebo také vypnutím při ztrátě signálu.

Druhým problémem zmíněným v samotném názvu kapitoly je zpětná vazba ze servopohonu. První myšlenkou bylo, že servopohon bude řízen mimo náš systém, tedy externě z řídicího systému brzdy, kam půjde i signál z CF. Signál udávající přemístění ventilu není však možné přímo zavést do Arduina, jelikož má tento signál napětí 24 V.

Proto byl vybrán jiný jednodušší způsob, a to pomocí spínání relé, které je dokonce pro komunikaci s Arduinem uzpůsobeno.



Obrázek 39: Spínací relé modul [13]

Vybrané relé se totiž dodává jako standardní rozhraní pro připojení k mikroprocesorům jako je Arduino, s buzením 5V a 15-20 mA. Výstup z relé je 30 V a 10 A, což pro servopohon s 24 V a přibližně 0,75 A zcela dostačuje. [13] [22]



2.6.3 Elektrické zdroje komponent v měřící soustavě

Jak již bylo uvedeno, tak komponenty není možné napájet ze síťového napětí 220–240 V, ale ze zdrojů s napětím 12 V a 24 V. Tyto zdroje tak budou muset být zakomponovány do soustavy a do skříně.

Jsou vybrány dva zdroje a prvním vybraným je 12 V zdroj s proudem 10 A, což dává celkových 120 W. Jedná se o zdroj MW SDR-120-12 s měnitelným napětím v rozsahu 12–14 V, s uchycením pomocí DIN lišty. Tento zdroj by měl být dostačující, jelikož čerpadlo BOSCH, které máme vybrané, má maximální udávaný příkon okolo 108 W, tudíž zbývá ještě rezerva 12 W pro další případné komponenty. [12]



Obrázek 40: Zdroj 12 V [21]

Druhým vybraným zdrojem je 24 V zdroj s proudem 4,2A, dávající celkových 100,8 W. Jedná se o zdroj taktéž od MW tentokrát model DR-100-24 taktéž s regulací napětí a to 24-29 V a s možností umístění na DIN lištu. Zde je zapotřebí, aby bylo napájeno měřidlo CF s příkonem 72 W. Dále ještě přibude servopohon třicestného ventilu, který je dimenzován na 18 W, a tlakový snímač s příkonem 0,8 W. Celkový potřebný příkon je 90,8 W, zde tak zbývá rezerva 10 W pro další případné komponenty. [10] [17] [19] [21]

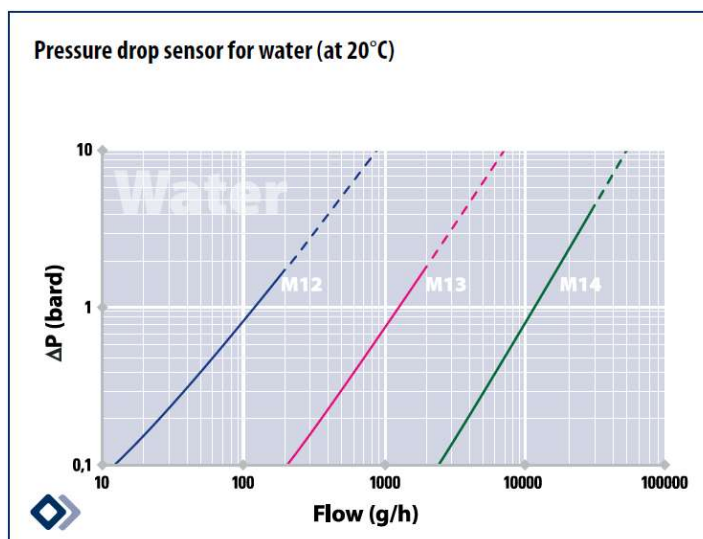


Obrázek 41: Zdroj 24 V [21]



2.7 Samotné řízení systému při běžném režimu a při přepínání

Základní řízení systému spočívá v regulaci napájecího napětí na čerpadle, které bude regulováno pomocí výstupního tlaku, o kterém nás bude informovat snímač tlaku. Je zapotřebí vyrovnávat tlakový spád měnící se v závislosti na průtoku v měřidle CF. Tento tlak bude vyrovnáván systémovým čerpadlem, tak aby byl výstupní tlak nižší nebo vyšší než tlak dodávaný z vah.



Obrázek 42: Tlakový spád na měřidlech CF M12-M14 [10]

Při běžném provozu je celkem nepodstatné, jak vysoký bude výstupní tlak z rozsahu cca 0,8-4 bar. Tento tlak by měl být srovnán podávacím čerpadlo umístěným na výstupu. Bez tohoto čerpadla, například při použití v terénu, je nutné dodávat vyšší tlak 3-4 bar. Je však důležité, aby byl dodáván specifický tlak, a to zejména při přepínání větví a kolísání tlaků.

Průběh řízení čerpadla bude měněn přestavováním servopohonu, kdy při jeho přestavování musí být zajištěn nepřerušovaný chod motoru. Měření se při přepínání větví stává irrelevantním z důvodu spojení průtoků těchto dvou větví.

Informace o průtoku z CF jsou odeslány na řídicí systém brzdy mimo náš systém, a po zvážení nakonec i do našeho systému řízení. To znamená přímé řízení čerpadla napětovým (v našem případě proudovým) signálem dle průtoku, kterému odpovídá daný tlakový spád dle logaritmické závislosti.

Na začátku bylo uvažováno, že signál z průtokoměru nebude použit, ale z důvodu přesnějšího řízení bude nakonec využíván pro řízení tlaku čerpadla. PWM signál vysílaný

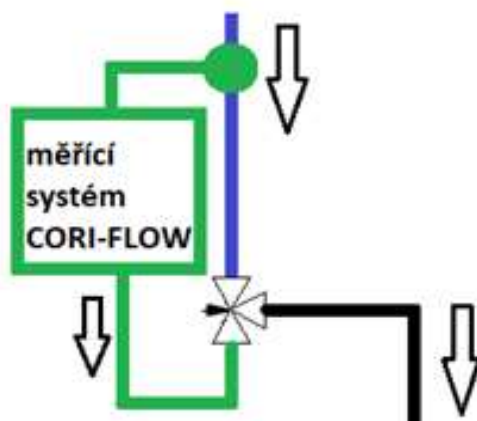


z Arduina do regulátoru, bude založen na průtoku z CF společně se zpětnou vazbou ze snímače tlaku. Pro informaci o přepínání bude sloužit zpětná vazba ze signálu servopohonu.

Touto kombinací dopředného a zpětnovazebního řízení bude probíhat kalibrace napěťového vstupu do čerpadla pomocí upravené základní funkce. Základní funkci bude $y = f(x)$, kde x je průtok. Tato rovnice bude v podobě $y = f(x) + g(\Delta p)$, kdy Δp určuje diferenci tlaku ze snímače tlaku na výstupu a žádaného tlaku. Příkladem takové regulace je lambda regulace u směsi paliva a vzduchu u vozidel. Signál z CF musí být upraven pomocí převodníku na napěťový signál, kvůli modulu Arduino. K tomuto účelu byl vybrán prostorově a energeticky nenáročný převodník na 0-5 V.

Druhou možností bylo, že by čerpadlo bylo přímo řízeno ze snímače tlaku se zpětnou vazbou o spínání servopohonu bez signálu z měřidla CF. To by ale znamenalo méně přesnou, a pomalejší odezvu oproti přímé vazbě z měřidla CF.

Problémem řízení při přepínání větví jsou různé tlakové úrovně čerpadla vyvolané odlišným chováním na výstupu, které jsou popsány dále.



Obrázek 43: Schéma zapojení měřící soustavy

Při přepínání soustavy dle obrázku výše nebude docházet k hladkému přechodu z jedné větve na druhou a to z jednoduchého důvodu. Tím důvodem je setrvačnost průtoku a s ním spojený problém, že si čerpadlo bude přisávat palivo z modré větve. Při uzavírání zelené větve bude v modré větvi podtlak způsobený přisáváním a na výstupu z třicístného ventilu taktéž, což pro chod motoru rozhodně není příznivé.

Myšlenkou je, že se čerpadlo při přepínání vypne a nebude nasávat palivo z modré větve. S touto myšlenkou je však problém opět se setrvačností, protože průtok procházející do té doby zelenou větví bude náhle přerušen tlakovým spádem na měřidle. Touto zábranou



neproteče bez tlaku čerpadla palivo, tudíž docílíme okamžitého zaškrcení průtoku. Ze špatného průtoku paliva vyplývá i narušení chodu motoru, což nevyhovuje daným požadavkům.

Druhou myšlenkou bylo, že bude čerpadlo postupně vypínáno při přepínání větví, respektive přestavování ventilu. To by znamenalo, postupné zmenšování přísávání z modré větve, kdy by došlo k vyrovnanému tlaku na výstupu a tedy eliminaci problémů s chodem motoru. Vypínání by tak probíhalo lineárně, kdy při plném zapojení zelené větve bude 100 % využití čerpadla, tak při plném zapojení modré větve už 0 % využití čerpadla, tedy bude vypnuté.

Další otázkou může být jaký tlak bude vyžadován, aby čerpadlo dodávalo. Při vyšším tlaku by opět mohlo docházet k přísávání z důvodu rozdílu tlaku při přepínání, tudíž bude požadován stejný nebo spíše nižší tlak než je tlak vycházející z vah. To znamená, že by průtok z vah s relativně větším tlakem protékal s menším odporem na výstup současně s eliminováním problému chodu motoru.

Vše je ovšem zatím teorie, v praxi se zapojený systém může projevovat odlišným způsobem. Předpokladem pro čerpadlo je však to, že bude při přepínání postupně vypínáno postupně s nižším výstupním tlakem než je tlak z vah.

Nakonec je dobré uvést, že když bude systémové čerpadlo použito zároveň i jako podávací, tak nebude moct být využito přepínání větví. Průtok bude muset být veden jediné přes měřidlo. Přepínání může být využito u systému s podávacím čerpadlem, které je momentálně v laboratoři nebo s následným použitím dalšího čerpadla, které bude sloužit jako podávací, což je však myšlenka do budoucna. Cílem této práce je prozatím měření na laboratorním stanovišti s podávacím čerpadlem.



2.8 Programování modulu ARDUINO

V této kapitole bude nahlédnuto na programování modulu Arduino. Odkazy s návody pro programování budou vypsány v příloženém dokumentu. Nejdříve bude muset být modul propojen s PC za pomoci USB kabelu. Na PC je třeba stáhnout program vývojářského prostředí Arduino, ve kterém bude vše následně programováno. Pro správné nahrání programu na desku je zapotřebí zvolit správnou verzi desky a také komunikační port. Pro ověření syntaxe našeho programu slouží tlačítko ověřit a pro nahrání programu do modulu zase tlačítko nahrát.

2.8.1 Nastavení vstupů a výstupů

První věcí, která musí být naprogramována je přiřazení jednotlivých vstupů a následných výstupů k příslušným pinům na desce Arduina, neboli definovat čísla pinů a proměnné.

```
//Přiřazení pinů
#define ANALOG_PRUTOK A0 // analogový signál 0-5 V z Cori-Flow
#define ANALOG_TLAK A2 //analogový signál 1-5 V ze snímače tlaku
#define RELE_MODUL 2 //signál spínání/rozepínání relé servopohonu
#define SIGNAL_PWM 6 //PWM signál na regulátor 490Hz pin
#define SIGNAL_BRZDA 7 //Signál na přestavení servopohonu

// definice
#define ON HIGH
#define OFF LOW
  //define POZADOVANY_TLAK 2 //tlak požadovaný (výstup 1-5 V, 0-4 bar - 1 bar tedy 2 V?)

// proměnné
int PWM = 0;
int CORI = A0; //analogový vstup z převodníku z Cori-Flow
int y = 0;
int POZADOVANY_TLAK = 0; //tlak požadovaný (výstup 1-5 V, 0-4 bar - 1 bar tedy 2 V?)
int PRUTOK = 0;
int TLAK = 0;
int kp = 0;
int t = 0;
int Ti = 0;
int delta_p = 0;

//#define SerialDebug

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  pinMode(SIGNAL_PWM, OUTPUT); // nastavení pinu PWM jako výstupu na regulátor čerpadla
  pinMode(RELE_MODUL, OUTPUT);
  pinMode(SIGNAL_BRZDA, INPUT);
  pinMode(ANALOG_PRUTOK, INPUT);
  pinMode(ANALOG_TLAK, INPUT);
}
```

Obrázek 44: Náhled na algoritmus pro vstupy a výstupy

Zde je jako první definováno, co každý pin obsahuje za signál, např. signál o průtoku je přiváděn na pin A0, který je určen pro analogový signál. Dalšími definovanými jsou hodnoty ON a OFF, tedy HIGH a LOW pro logické řízení pomocí 1 a 0. Dále jsou určeny proměnné a



keré piny mají sloužit jako vstupní a výstupní hodnoty. Za dvojitým lomítkem jsou uvedeny poznámky a informace navíc či nepoužité algoritmy.

2.8.2 Nastavení základní funkce pro řízení čerpadla

Proměnnou pro funkci v podobě $y = f(x)$ je v našem případě průtok, který udává velikost tlakového spádu na měřidle v závislosti na velikosti tohoto průtoku dle grafu od výrobce Bronkhorst. Vyčtením hodnot z tohoto grafu je získána rovnice pro funkci tlakového spádu. To znamená, že funkce y bude vysílat již zmiňovaný PWM signál do regulátoru otáček. K tomuto účelu je určen příkaz Read pro čtení vstupních hodnot, které jsou dále zpracovány.

```
int PRUTOK_VOLTY = analogRead(A0);
    delay(10); // delay in between reads for stability

int TLAK_VOLTY = analogRead(A2);
    delay(10);

int BRZDA = digitalRead(7);
    delay(10);

PRUTOK = PRUTOK_VOLTY*2,5; //převod voltů na průtok v kg/h
TLAK = TLAK_VOLTY/1,2; //převod voltů na tlak v barech pro rozsah snímače 0-4 bar

// výpis čtené hodnoty (průtoku CF):
//Serial.println(CF);

// y = tlakový spád na měřidle CF v barech

y = 0,9641*(PRUTOK) - 0,1642; //závislost funkce tlakového spádu na průtoku dle CF
//y = 0,8621*(PRUTOK) - 0,0766; //rovnice sestavená výčtem dvou hodnot

//PI Regulace - Tu - doba průtahu; Tn - doba náběhu; Su - statická citlivost reg. veličiny
kp = 1; // zesílení, neboli proporcionální konstanta - upřesněna
// posléze například z přechodové charakteristiky nebo také kp = 0,9 * Tn / (Su * Tu)
t = 0,5; // upraví se, určeno jako tau = Tu / (Tu + Tn) - přechodová charakteristika

Ti = 1; // integrační časová konstanta
// upraví se taktéž, bývá 2krát až 3krát doba průtahu?
POZADOVANY_TLAK = 1; // 1 bar

delta_p = kp*(TLAK - POZADOVANY_TLAK)*( 1 + t/Ti); //rovnice PI regulace
```

Obrázek 45: Náhled na základní algoritmus pro řízení čerpadla

Funkce $y = f(x)$ bude však rozšířena o proměnnou Δp ze snímače tlaku na výstupu z našeho systému, kdy tato hodnota tlaku bude sloužit jako korekce výsledného PWM signálu na regulátor. Toto všechno by mělo probíhat jako cyklus funkce s korekcí, tedy $y = f(x) + g(\Delta p)$, podobně jako je tomu například u regulace za pomoci lambda sondy u spalovacích motorů. Tato hodnota tlaku bude regulována pomocí PI regulace.

Další proměnnou bude spínání servopohonu ventilu z řízení mimo náš systém, které bude dávat logický signál 1 či 0, proto je uveden příkaz digitalRead.



Nakonec je v tomto kroku funkce $y = f(x) + g(\Delta p)$ převedena na PWM signál, jenž je vysílán do regulátoru otáček čerpadla. Obecně je signál PWM udáván obdélníkovým signálem s danou frekvencí a proměnnou šířkou pulzu. V algoritmu výše je výstup převeden na hodnotu v ms, tedy například když je dán signál s periodou 20 ms a doba trvání logické 1 je 2 ms, pak má střída 10%.

2.8.3 Nastavení přepínání za pomoci signálu z brzdy

Signál z brzdy bude udávat, zda má náš systém pracovat přes měřící větev, či přímou větev z vah. Servopohon bude ovládán přes relé zapojené na modul Arduina, které bude dostávat signál pro sepnutí z řízení mimo náš systém, tedy ze systému brzdy. Požadavek je takový, aby při sepnutém servopohonu procházel průtok přes měřící větev, a naopak při vypnutém servopohonu přes přímou větev z vah.

```
//korekce za pomoci snímače tlaku k tlakovému spádu z CF + převod na PWM signál v rozsahu 0 až 255

PWM = 12,75*(y - delta_p); // korekce výsledného tlaku, kdy teoreticky pro max. průtok 2kg/h je hodnota PWM 255
                          // pro 5 až 10 %, je PWM 12,75 až 25,5 - proto desetina 12,75, pro 0 až 100% je 127,5

if (BRZDA == HIGH){
  digitalWrite(RELE_MODUL, LOW); //vysílán signál do relé na základě signálu z brzdy
} else {
  digitalWrite(RELE_MODUL, HIGH); //relé normálně sepnuté v tomto případě
}

if (RELE_MODUL == LOW){ //pro sepnuté relé, běžný chod čerpadla - u LOW vypnutý měřící obtok, tudíž vypíná se čerpadlo
  //vypínání postupně
  //zkracování PWM signálu na pin
  for (int i; i != 0; i -=0,06375) { // 255/4000 = 0,06375 krok za lms?, tedy chceme max hodnotu 255, neboli z 0 na 255 za 4s (4000ms)?
    // přičítaná a odečítaná hodnota se může změnit v závislosti na rychlosti odezvy
    analogWrite(SIGNAL_PWM, i);

    //pauza mezi kroky lms? případná regulace odezvy
    //delay(1);

    //v jiném případě, tedy při sepnutém relé (sepnutém servopohonu a měřící větve)
    //se opět postupně čerpadlo zapíná
  }
} else {
  for (int i; i != PWM; i +=0,06375) {
    analogWrite(SIGNAL_PWM, i);

    //pauza mezi kroky lms? případná regulace odezvy
    //delay(1);
  }
}
```

Obrázek 46: Náhled na algoritmus přepínání za pomoci signálu z brzdy

Musí být však zajištěno, aby čerpadlo při přepínání bylo plynule zapínáno či vypínáno, jak již bylo uvedeno v minulé kapitole. Tento plynulý přechod by mohl být nastaven například pomocí příkazu if (viz obrázek výše), kdy při signálu k řízení servopohonu by čerpadlo bylo postupně vypínáno či naopak zapínáno. V návodech je znázorněna ukázka DC čerpadla, kde se u čerpadla PWM signálem postupně zvyšuje a snižuje čerpané množství, což slouží jako předloha.



Podobný způsob by mohl být převeden na náš program, kdy se toto přepínání bude spínat až při signálu k přestavení servopohonu. Zároveň by také mohlo být uvažováno o tom, aby postupné přepínání šlo opět vrátit, například když dojde během přepínání ke změně. Čerpadlo tak při změně nezačne pracovat na maximální výkon, ale bude pokračovat od stavu, ve kterém bylo před změnou ve směru přestavování ventilu. To by mělo být zaručeno proměnnou i (viz výše v algoritmu).

Toto všechno je zatím ve fázi přípravy a je třeba naprogramování pořádně zkonzultovat s odborníky z ústavu automatického řízení či z elektrotechnické fakulty.

Každopádně je potřeba naprogramovat funkci, která bude na základě průtoku a korekce tlaku udávat PWM signál do regulátoru, kterým bude naše čerpadlo napájeno. Tento cyklus bude měnit přepínání, kdy signál o přepínání bude udáván zvenčí do Arduina, které následně sepne relé napájecí servopohon. Toto přepínání bude asi nejsložitější na naprogramování.

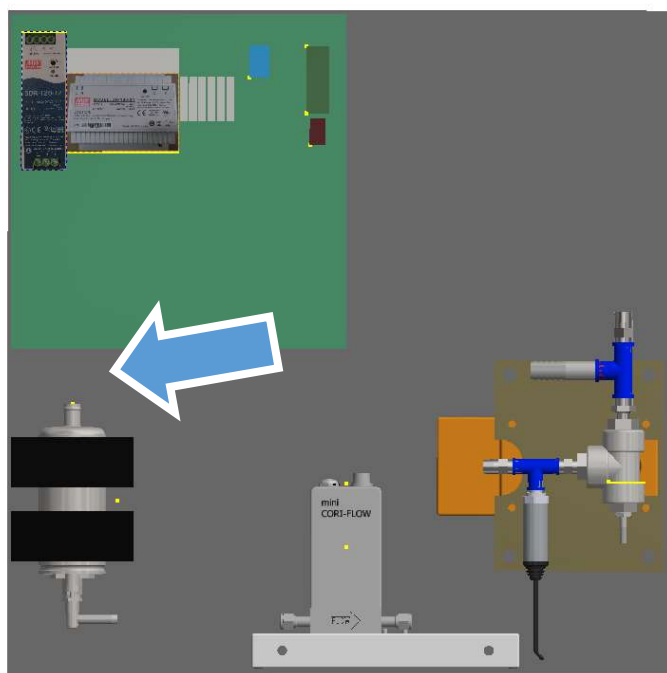
Součástí této práce budou přiloženy odkazy s návody, kde je plno příkladů pro napsání programů pro čerpadlo, relé, průtokoměr, různé snímače a podobně tak, aby na toto mohlo být navázáno. V tabulce níže je uveden zjednodušený přehled vstupů a výstupu s jejich požadavky. [23]

Vstupní signály	Typ signálu	Výstupní signály	Typ signálu	Požadavky
Průtok x	Analogový napěťový	PWM střída fce y $y = f(x) + g(\Delta p)$ [ms]	PWM digitální	Řízení průtokem kalibrované diferencí výstupního tlaku
Tlak za měřidlem (pro určení Δp)	Analogový napěťový			
Signál z brzdy k Přepínání servopohonu	Digitální	Signál na relé spínací servopohon	Digitální	Plynulé vypínání/zapínání čerpadla tímto signálem a při nízkém tlaku přepnout na váhy



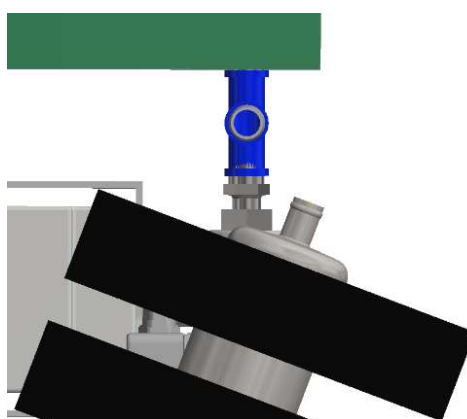
2.9 Skříně na uložení měřicí soustavy s elektronikou

V této kapitole bude nahlíženo na uložení měřicí soustavy do skříně společně s elektronikou, která bude uložena do této skříně rovněž, avšak odděleně. Elektronika bude však ve své vlastní skříňce, kdy případný únik kapaliny z měřicí soustavy nenaruší její chod. Prvotní návrh uložení, pro který byly nalezeny skříně na celou soustavu a elektroniku zvlášť je zobrazen na obrázku níže.



Obrázek 47: Návrh skříněk pro soustavu

U tohoto návrhu je problém s nedostatečným místem pro uložení hadice na vstup do čerpadla (viz obrázek výše). Tento problém bude eliminován natočením čerpadla tak, že vrchní vstup bude nad skříňkou s elektronikou (viz obrázek níže z boku).



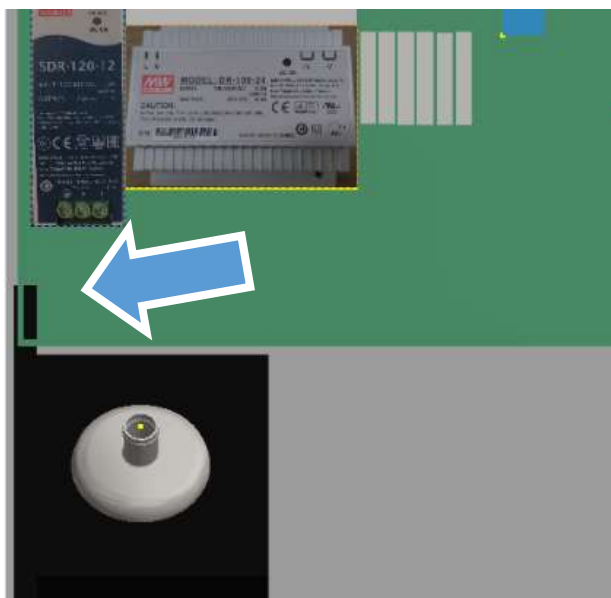
Obrázek 48: Pohled z boku na natočené čerpadlo



Výstup z třicestného ventilu bude umístěn dovnitř soustavy, jak již bylo uvedeno z důvodu úspory místa. U měřidla CF musí být nad pravým konektorem volné místo pro připojení konektoru, jenž by zasahoval do skříňky s elektronikou. Měřidlo CF je tak posunuto doprava od skříňky na elektroniku. Měřidlo CF je také umístěno vespod, a to zejména kvůli opatřením proti zavzdušnění měřidla.

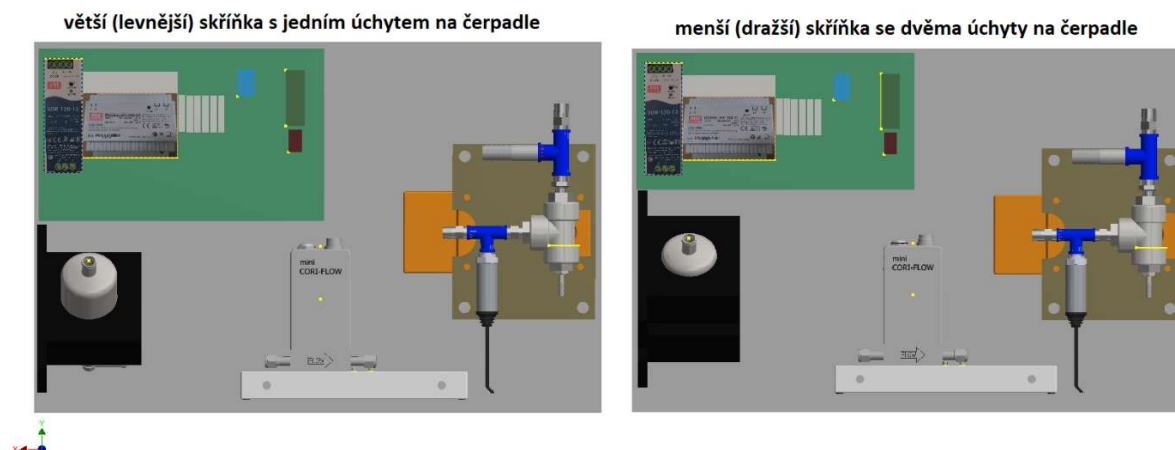
Čerpadlo je uchyceno přes pryžové úchyty na levou stěnu skříňky, z důvodu natočení čerpadla pro dostatečné místo na uložení hadice. Bez natočení čerpadla by taktéž mohlo dojít ke kontaktu hadice s měřidlem a ke vzniku nežádoucích vibrací narušující měření CF. Skříňka na elektroniku je zbytečně velká, jelikož komponenty v ní uložené nezabírají většinu prostoru.

Proto je použita menší skříňka na elektroniku, a tudíž i menší skříň celé soustavy. Použitím menší skříňky celé soustavy bude ušetřeno 200 mm místa na výšku. Na šířku je však stále potřeba přibližně 600 mm, a to zejména kvůli měřidlu, které musí mít přímé vedení vstupní a výstupní cesty, podobně jako je tomu u již uvedených průřezových průtokoměrů. Skříňky jsou dodávány v rozměrech 500 nebo 600 mm na šířku, tudíž je zvolen rozměr 600 mm. Na výšku je uspořeno již uvedených 200 mm, a to z původních 600 mm na 400 mm, a navíc jsou uspořeny peníze díky menší ceně.



Obrázek 49: Pohled na kolizi úchyty se skříňkou

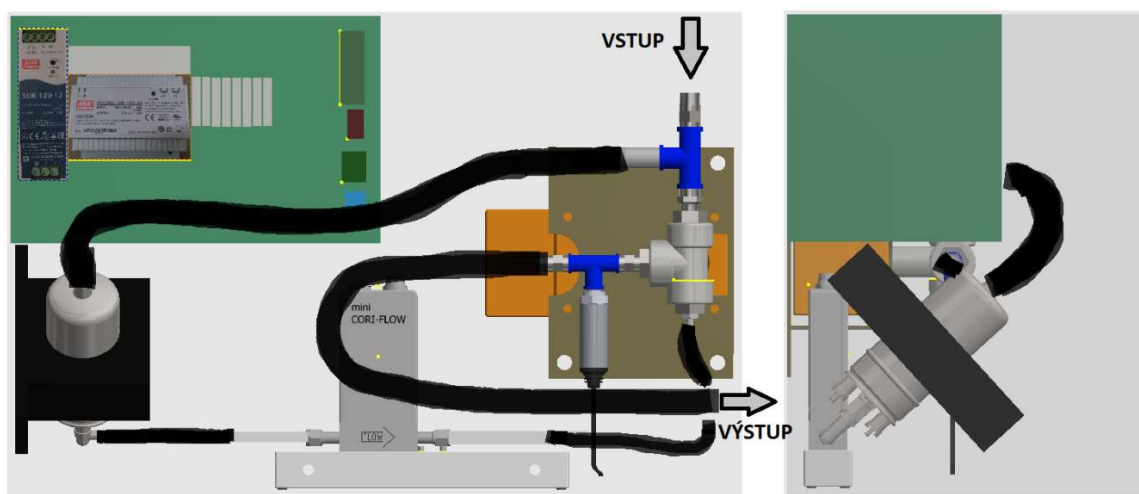
Jak je však vidět na obrázku výše, tak musí být učiněn kompromis v podobě menší krabičky na elektroniku, která je paradoxně dražší a použít dva úchyty na čerpadlo. Druhou možností je použít jeden úchyt na čerpadlo, který je lacinější než nákup dvou úchytů a větší krabičku na elektroniku, která je levnější.



Obrázek 50: Pohled na dvě finální varianty

U větší skříňky je výhodné mít více místa pro případné další elektronické komponenty, zatímco v menší skřínce je tato rezerva téměř nulová. Vybráním větší skříňky na elektroniku bude nutné použít pouze jeden úchyt na čerpadlo. Samotný úchyt by měl být bohatě dostačující díky své bytelné konstrukci z pryže a uchycení pomocí dvou šroubů.

Na hloubku je potřeba více místa kvůli hadici dosedající na vstup do čerpadla. Je zapotřebí přibližně 300 mm včetně hadice, kdy tento rozměr je běžně nabízen. Tento prostor bude dále využit pro kabely napájející čerpadlo a zároveň pro lepší přístup do skříňky s elektronikou. Místo navíc je výhodné pro libovolné umístění měřidla CF, buďto tedy do rohu či dál od zadní stěny, což platí i pro čerpadlo, kde bude dostatek místa pro vstupní hadici. Na obrázku níže je finální návrh měřicí soustavy i s představou pro umístění hadic a trubek. Možností je případné použití jednoduchých přichytek a spojek na hadice, aby bylo dosaženo příkladné organizace těchto hadic ve skříni.



Obrázek 51: Finální verze návrhu



3. Závěr

V této práci proběhl návrh měřicí soustavy, kdy tato soustava slouží k měření průtoku kapalného paliva u dvoupalivového motoru v kombinaci nafta-CNG či nafta-vodík, ale také dalších kombinací fosilních nebo obnovitelných paliv. Úkolem této práce však bylo navrhnout soustavu na měření spotřeby kapalného paliva v podobě motorové nafty. K samotnému měření průtoku a posléze spotřeby nafty bylo vybráno jedno z nejpřesnějších měřidel pracujících na principu Coriolisových sil. Bylo nutné nahradit stávající měřicí systém vah AVL 733s, za takový, který bude při malém průtočném množství paliva přesnější než systém stávajících vah. Váhy naopak umožňují měřit průtoky nad horním rozsahem CF.

Po výběru měřidla došlo i k výběru vhodných hydraulických komponent a jejich propojení. Požadavkem pro systém bylo, aby při větším průtoku či poruše, mohl průtok procházet i mimo měřidlo, a proto byla měřicí větev využita jako obtoková. K tomuto účelu bylo zapotřebí použití dalších komponent na rozvětvení těchto větví, jakožto i třicestný ventil s vlastním přestavovacím mechanismem. Byl použit servopohon, kterým bude ventil přestavován a tím také přepínány větve dle potřeby.

K měřidlu bylo doplněno čerpadlo na vyrovnání tlakových ztrát vzniklých na měřidle CF a také snímač výstupního tlaku ze soustavy. Na čerpadlu bylo zapotřebí měnit napětí v závislosti na velikosti tlakové ztráty. Proto je navrženo použití elektroniky pro řízení čerpadla na základě průtoku, kdy signál o průtočném množství dává měřidlo CF. Signál ze snímače tlaku bude sloužit pro výslednou korekci napájecího napětí čerpadla. Další použitý signál ze servopohonu udává, že čerpadlo musí být postupně vypínáno či naopak zapínáno při přepínání větví. K regulaci napětí čerpadla slouží regulátor otáček, který je řízen PWM signálem z modulu Arduino. K napájení elektronických komponent jsou použity dva samostatné zdroje uložené na DIN liště společně s DIN svorkovnicemi na rozvětvení elektrické sítě.

Měřidlo CF je uloženo níže než ostatní komponenty, tak aby nedošlo k zavzdušnění. Další poznatkem bylo, aby mělo tzv. uklidňovací vedení před a za měřidlem, podobně jako je tomu u průřezových průtokoměrů. Měřidlo je umístěno na obtokovou větev, kdy na přímou větev je umístěna přímá větev z vah pro co nejmenší odpor. Nakonec byli navrženy uchycení komponent a velikosti skříněk, které byly postupně zmenšovány, aby byla celková sestava co nejkompaktnější a také co možná nejlevnější.



Požadavkem do budoucna je, aby tato soustava mohla být používána pro měření v terénu. Soustava bude však muset být nejdříve sestavena a zprovozněna. Důležitým aspektem zprovoznění bude řízení čerpadla pro vyrovnaný tlak na výstupu i během přepínacího cyklu pro nepřerušovaný chod motoru. Naprogramování řízení bude zprostředkováno přes PC ve vývojovém prostředí Arduina, které obsahuje algoritmy používané v jazyku C.



Seznam použité literatury

- [1] PICEK T., MATOUŠEK V.: *Průtok, Přednášky Historie hydrauliky*. FSV ČVUT dostupné na:
<http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/prednasky.htm>
- [2] JEŽEK J., VÁRADIOVÁ B., ADAMEC J.: *Mechanika tekutin*. Vydavatelství ČVUT, 2000
- [3] HRADIL J.: *Měření průtoku kapalin*. Diplomová práce, VUT, Brno, 2011, dostupné na: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38539
- [4] ORLÍKOVÁ S.: *Měření průtoku tekutin – princip průtokoměrů*. Elektorevue.cz, 2001, dostupné na: <http://www.elektorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [5] *Měření průtoku kapalin*. Wikipedia, 2019, dostupné na:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Měření_průtoku_kapalin
- [6] MACH J.: *Systém nepřímé tvorby směsi pro vícepatlivový experimentální vznětový Motor*. Bakalářská práce, FS ČVUT, Praha, 2019
- [7] PÁTEK T.: *Měření průtoku tekutin*. Bakalářská práce, VUT, Brno, 2018
- [8] NEDĚLA J.: *Měření průtoku pro modelové zkoušky vodních turbín*. Bakalářská práce, VUT, Brno, 2017
- [9] *Rovnice kontinuity*. WikiSkripta, 2019, dostupné na:
https://www.wikiskripta.eu/w/Rovnice_kontinuity
- [10] *Coriolis mass flow measuring principle*. Bronkhorst, stránky výrobce dostupné na:
<https://www.bronkhorst.com/int/service-support-1/technologies/coriolis-mass-flow-measuring-principle/>
- [11] *mini CORI-FLOW, Coriolisův hmotnostní průtokoměr*. D-Ex Instruments, s.r.o., stránky českého dodavatele, dostupné na: <https://www.dex.cz/produkt/bronkhorst-mini-cori-flow/#totab3>
- [12] *BOSCH Pump 0 580 254 952, Product details*. Robert Bosch s.r.o., katalog, dostupné na: <https://www.bosch-automotive-catalog.com/en/product-detail/-/product/0580254952>
- [13] *ARDUINO – SHOP*. ECLIPSERA s.r.o, stránky dodavatele elektronických komponent a modulu Arduino, dostupné na: <https://arduino-shop.cz/>



- [14] *Specifikace paliv*. ČEPRO a.s., dostupné na:
<https://www.ceproas.cz/eurooil/sortiment-paliv>
- [15] *Průtokoměr*. Wikipedia, 2020, dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Průtokoměr>
- [16] *AVL 733s Dynamic Fuel Meter, Operating Manual*. AVL, Rakousko, 1996
- [17] *Měřicí, regulační a topenářská technika*. BOLA s.r.o., stránky výrobce, dostupné na:
<https://www.bola.cz/>
- [18] *Zubové čerpadlo*. Wikipedia, 2019, dostupné na:
https://cs.wikipedia.org/wiki/Zubové_čerpadlo
- [19] *Průmyslové snímače tlaku*. Profess s.r.o., český dodavatel snímačů Baumer, dostupné na: <https://www.profess.cz/pci/cs/produkty/prumyslove-snimace-tlaku>
- [20] *RCVR – příchytka trubek (celopryžové) série C*. Kovaz s.r.o., stránky dodavatele úchytů, dostupné na: <https://www.kovaz.cz/rcvr-prichytka-trubek-celopryzove-serie-c-c1745/>
- [21] *Spínané napájecí síťové zdroje*. MI6 s.r.o., český dodavatel zdrojů MW, dostupné na: <https://www.czech-meanwell.cz/>
- [22] *Modelářský elektronický obchod*. MODELCENTRUM s.r.o., dostupné na:
<https://www.modelcentrum.cz/>
- [23] *Návody Arduino, Začínáme s Arduinem*. ECLIPSEERA s.r.o, dostupné na:
<https://navody.arduino-shop.cz/zaciname-s-arduinem/>



Seznam obrázků

Obrázek 1: Srovnání průřezových průtokoměrů [3]	13
Obrázek 2: Princip funkce indukčního průtokoměru [3]	14
Obrázek 3: Lopatkové vs Turbinové průtokoměry [3]	15
Obrázek 4: Princip Coriolisových průtokoměrů [www.Bronkhorst.com].....	17
Obrázek 5: Útroby průtokoměru CORI-FLOW od Bronkhorst [www.Bronkhorst.com]	18
Obrázek 6: Schéma systému Common Rail a zakomponování naší soustavy do palivového systému [6].....	20
Obrázek 7: Schéma testovací kóje s experimentálním jednoválcem [6]	21
Obrázek 8: Pohled na experimentální vznětový jednoválcový motor.....	21
Obrázek 9: Vnitřek vah AVL 733S [16]	22
Obrázek 10: Schéma zapojení vah do palivového systému v laboratoři CVUM.....	23
Obrázek 11: Váhy v laboratoři CVUM	23
Obrázek 12: možnost zapojení č.1 vlevo a č.2 vpravo.....	24
Obrázek 13: měřicí systém na bypassu	25
Obrázek 14: Ventily na vstupu i výstupu	25
Obrázek 15: Ventil na vstupu	26
Obrázek 16: Ventil na výstupu	26
Obrázek 17: Zjednodušený profil kulového ventilu.....	26
Obrázek 18: Základní komponenty v měřicí soustavě.....	27
Obrázek 19: Přesnost měření a tlakový spád (růžová prostřední linka) na měřidle CF M13 [10]	28
Obrázek 20: Měřidlo CF M13 [10].....	28
Obrázek 21: Pohled na výstup z třicestného ventilu.....	29
Obrázek 22: Ventil připevněný k přestavovacímu servopohonu	29
Obrázek 23: Přestavovací servopohon Belimo NMQ 24 A [17]	30
Obrázek 24: Čerpadlo BOSCH 0 580 254 952 a princip funkce zubového čerpadla [12] [18]	31
Obrázek 25: Aktuální čerpadlo i s průtokovým okem.....	31
Obrázek 26: Varianta snímače Y91 s konektorem [19]	32
Obrázek 27: Schéma zapojení měřicího řetězce.....	33
Obrázek 28: Výstup z vah.....	23
Obrázek 29: Návrh vstupní dvoucestné armatury.....	23
Obrázek 30: Návrh armatury u třicestného ventilu.....	24
Obrázek 31: Znázornění výstupu čerpadla a vstupu CF	25
Obrázek 32: Soustava se znázorněním hadic a trubek.....	2536
Obrázek 33: Znázornění uchycení CF.....	2637
Obrázek 34: Pohled na celopryžové příchytky [20].....	2638
Obrázek 35: Vlevo zobrazení otvorů pro uchycení šroubů a vpravo komponenty pro uchycení.....	2639
Obrázek 36: Servopohon s ventilem a navrženým uchycením.....	2739
Obrázek 37: ARDUINO UNO R3 [13].....	2841
Obrázek 38: Vybraný regulátor otáček [22]	2842
Obrázek 39: Spínací relé modul [13].....	2943
Obrázek 40: Zdroj 12 V [21].....	2944
Obrázek 41: Zdroj 24 V [21].....	3044
Obrázek 42: Tlakový spád na měřidlech CF M12-M14 [10].....	3145
Obrázek 43: Schéma zapojení měřicí soustavy	3146
Obrázek 44: Náhled na algoritmus pro vstupy a výstupy.....	3148
Obrázek 45: Náhled na základní algoritmus pro řízení čerpadla	3149
Obrázek 46: Náhled na algoritmus přepínání za pomoci signálu z brzdy	3250
Obrázek 47: Návrh skříňek pro soustavu	3352
Obrázek 48: Pohled z boku na natočené čerpadlo	3052
Obrázek 49: Pohled na kolizi úchytu se skříňkou.....	3153
Obrázek 50: Pohled na dvě finální varianty.....	54
Obrázek 51: Finální verze návrhu.....	54



Seznam příloh

- 1) *Výkres sestavy*
- 2) *Kusovník k sestavě + odkazy ke kusovníku*
- 3) *Výkres chycení servopohonu*
- 4) *Výkres hadicového nástavce G1/4 na DN6*
- 5) *3D modely v Inventoru 2020 + 3D modely ve formátu STEP*
- 6) *Arduino algoritmy + odkazy s návody na programování Arduina*