



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**Katedra biomedicínské techniky**

**Zařízení pro automatické proměření tlakově-průtokové  
charakteristiky částí ventilačních okruhů**

**Equipment for automatic measurement of pressure-flow  
characteristics of parts of ventilation circuits**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Vedoucí práce: Ing. Václav Ort

**Kateřina Heranová**

---

**Kladno 2023**



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Heranová** Jméno: **Kateřina** Osobní číslo: **483898**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**  
Studijní obor: **Biomedicínský technik**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Zařízení pro automatické proměření tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Equipment for automatic measurement of pressure-flow characteristics of parts of ventilation circuits**

Pokyny pro vypracování:

Sestavte zařízení pro automatické proměření tlakově-průtokových charakteristik částí ventilačních okruhů. Zařízení se bude skládat z univerzálního modulu pro připojení diferenčního tlakového senzoru využívajícího proudovou smyčku 4-20 mA, řídicího modulu umožňujícího ovládat nastavitelný zdroj průtoku plynu pomocí signálu 0-5 V a proudovou smyčku 4-20 mA a pneumatické části pro připojování měřených prvků. Dále připravte software umožňující komunikaci zařízení s počítačem, export dat do textového souboru, kalibraci tlakového senzoru a nastavení parametrů signálu řídicího průtok plynu. Ověřte funkčnost celé sestavy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] West, Tom; Pholou, Alexander, Measurement of gas volume and gas flow, ANAESTHESIA AND INTENSIVE CARE MEDICINE, ročník 19, číslo 4, 2018, 183-188 s.
- [2] Vobecký, J., Záhlava, V, Elektronika, součástky a obvody, principy a příklady, ed. 2, Grada Publishing s.r.o., 2001, ISBN 80-7169-884-9
- [3] ČSN EN ISO 5356-1 (852111), Anestetické a respirační přístroje - Kuželové konektory - Část 1: Kuželové zástrčky a zásuvky, 2014
- [4] Penhaker M., Imramovský M., Zdravotnické elektrické přístroje, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava,, 2013, ISBN 978-80-248-3107-7

Jméno a příjmení vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Václav Ort**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Ladislav Bíš**

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2024**

doc. Ing. Martin Rožánek, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
děkan

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Zařízení pro automatické proměření tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne

.....

Kateřina Heranová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Ing. Václavu Ortovi za odborné a trpělivé vedení, cenné rady a celkovou pomoc při realizaci této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat fakultě biomedicínského inženýrství za poskytnutí prostor a veškerého potřebného vybavení.

## **ABSTRAKT**

### **Zařízení pro automatické proměření tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů:**

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout zařízení pro automatické proměření tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů. Zařízení je složeno z univerzálního modulu, který zajišťuje komunikaci s diferenčním tlakovým senzorem, a řídicího modulu, který je schopen spustit regulátor hmotnostního průtoku. Součástí vývoje zařízení je navrhnutý software, pomocí kterého je řízeno celé zařízení z vývojové desky Arduino Uno. Navrhnutý software byl vyvinut v prostředí MATLAB GUI. Výstupem této práce je vytvořená kalibrační trať umožňující proměřování tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů, jako jsou například patientské filtry, kuželové spojky, clonky a další.

### **Klíčová slova**

Tlakově-průtoková charakteristika, obstrukční prvky, tlaková diference, Arduino Uno, MATLAB GUI

## **ABSTRACT**

### **Equipment for automatic measurement of pressure-flow characteristics of parts of ventilation circuits:**

The aim of this bachelor's thesis was to design a device for automatic measurement of pressure-flow characteristics of parts of ventilation circuits. The device consists of an universal module that ensures the communication with the differential pressure sensor and a control module that is able to trigger the mass flow controller. Part of the development of the device is also designed software with which the entire device is controlled from the Arduino Uno development board. The proposed software has been developed using MATLAB GUI. The output of this work is a manufactured calibration track enabling the measurement of the pressure-flow characteristics of parts of ventilation circuits, such as patient filters, dampers, etc.

### **Keywords**

Pressure-flow characteristic, obstruction elements, pressure difference, Arduino Uno, MATLAB GUI

# Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Přehled současného stavu</b> .....	<b>11</b>
2.1 Proudění plynu .....	11
2.1.1 Laminární proudění .....	11
2.1.2 Turbulentní proudění .....	12
2.2 Měření průtoku a objemu plynu .....	12
2.2.1 Pneumotachografie .....	12
2.3 Princip vzniku tlakové difference v okolí odporového prvku .....	14
2.3.1 Rovnice kontinuity .....	14
2.3.2 Bernoulliho rovnice .....	15
2.4 Druhy odporových prvků .....	15
2.4.1 Tlakově-průtokové charakteristiky odporových prvků .....	15
2.5 Inteligentní převodníky tlaku .....	16
2.6 Proudová smyčka .....	16
<b>3 Cíle práce</b> .....	<b>18</b>
<b>4 Metody</b> .....	<b>19</b>
4.1 Návrh a realizace hardware .....	19
4.1.1 Obvodové schéma univerzálního modulu .....	20
4.1.2 Realizace univerzálního modulu .....	20
4.1.3 Použité přístroje.....	21
4.1.4 Návrh a realizace řídicího modulu .....	23
4.2 Návrh a realizace pneumatické části .....	24
4.3 Princip měření tlakově-průtokové charakteristiky .....	25
4.3.1 Použitý senzor pro měření malých diferenčních tlaků .....	26
4.4 Návrh a realizace software .....	27
4.4.1 Panel pro připojení vývojové desky Arduino Uno .....	28
4.4.2 Panel pro kalibraci tlakového senzoru a regulátoru průtoku .....	29
4.4.3 Panel pro nastavení ručního měření .....	30
4.4.4 Panel pro nastavení automatického měření .....	31

4.5	Metody kalibrace zařízení .....	32
4.5.1	Kalibrace diferenčního tlakového senzoru .....	33
4.5.2	Kalibrace regulátoru průtoku.....	33
4.6	Statistické vyhodnocení dat.....	33
4.6.1	Nejistota měření.....	34
<b>5</b>	<b>Výsledky.....</b>	<b>35</b>
5.1	Realizace zařízení pro měření P–Q charakteristik .....	35
5.1.1	Výsledná realizace kalibrační trať .....	36
5.2	Vyhodnocení kalibrace diferenčního tlakového senzoru .....	37
5.3	Vyhodnocení kalibrace regulátoru průtoku.....	37
5.4	Ověření funkčnosti přístroje.....	38
5.4.1	Srovnání s komerčním rezistorem Rp20 .....	38
5.4.2	Srovnání s odporovým prvkem AvaLite .....	39
<b>6</b>	<b>Diskuse.....</b>	<b>41</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>43</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>44</b>
	<b>Příloha A: Tabulky s naměřenými rozměry.....</b>	<b>46</b>
	<b>Příloha B: Obsah přiloženého ZIP souboru .....</b>	<b>47</b>



# Seznam symbolů a zkratek

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$Q_v$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	Objemový průtok
$\Delta V$	$\text{m}^3$	Změna objemu
$\Delta t$	s	Změna časového intervalu
$Q_m$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	Hmotnostní průtok
$\Delta m$	kg	Změna hmotnosti
$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Hustota proudící látky
$v$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Rychlost proudění
$g$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	Tíhové zrychlení
$h$	m	Výška
$p$	Pa	Statický tlak
$Re$	-	Reynoldsovo číslo
$D$	m	Průměr potrubí
$U$	V	Napětí
$\Delta p$	Pa	Diferenční tlak
$\nu$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	Kinematická viskozita proudící látky

## Seznam zkratek

Zkratka	Význam
GND	Uzemnění ( <i>ground</i> )
HART	komunikační protokol kompatibilní s proudovou smyčkou ( <i>Highway Addressable Remote Transducer</i> )
IDE	Vývojové prostředí ( <i>Integrated Development Environment</i> )
GUI	Grafické rozhraní
COM	Hardwarové rozhraní

# 1 Úvod

V dnešní době je měření průtoku a změny tlaku plynu poměrně jednoduchou záležitostí. Metody jsou dobře prozkoumané a popsané. Z tohoto důvodu je důležitější zamyslet se nad správnou volbu metody a přístroje pro měření průtoku a změny tlaku.

V rámci laboratorního a klinického prostředí nalézají přístroje pro měření průtoku a tlaku široké uplatnění v oblasti provádění ventilačních experimentů a plicní ventilace, při které je životně důležité sledovat parametry plicní ventilace a vliv jejich změn na lidský organismus. Měření parametry a jejich změny poskytují informace o kvalitě a účinnosti prováděné plicní ventilace, a zároveň dotvářejí představu o stavu dýchacích cest pacienta.

Přesné měření průtoku a objemu plynu umožňuje exaktní dodávání směsí plynů a monitorování dechových objemů u ventilovaných pacientů. Jelikož jsou plyny tekuté, stlačitelné a často neviditelné, je celkem obtížné realizovat přímé měření v klinické praxi. Z tohoto důvodu došlo k vývoji metod, které umožňují měření jiných měřitelných vlastností plynu, měnících se v závislosti na změně průtoku. [1].

Měření průtoku lze realizovat pomocí několika různých zařízení, např. mechanických, elektrických či ultrazvukových průtokoměrů. V současné době se u ventilačních přístrojů nejčastěji používají elektrická zařízení, přesněji pak průtokoměry se žhaveným odporovým drátkem (tzv. anemometry) a průtokoměry s vloženým odporovým členem (tzv. pneumotachografy) [3].

Pneumotachograf je průtokový senzor založený na měření úbytku tlaku na odporovém členu. Odporový člen může být realizován mnoha způsoby. Obecně by měl být vytvořen tak, aby zajišťoval laminární proudění v systému. Měření tlakového úbytku je realizováno pomocí diferenčního snímače tlaku. Hodnota tlakového úbytku je poté prostřednictvím tlakově-průtokové charakteristiky senzoru přepočítávána na hodnotu objemového průtoku plynu v systému. Následně jsou dopočítány i dechové objemy [2].

Motivací k vytvoření tohoto zařízení je zjednodušení práce v laboratoři při určování tlakově-průtokových charakteristik. Při tvorbě ventilačních okruhů dochází k používání částí, u kterých neznáme jejich tlakově-průtokové charakteristiky. Z tohoto důvodu musíme některé ventilační části jako jsou patientské filtry, kuželové spojky, clonky apod., zkalibrovat. Za tímto účelem bude v této práci vytvořena kalibrační trať, která bude složena z redukčního ventilu, regulátoru průtok, vrapované trubky. Nad vrapovanou trubku bude poté umístěno zkonstruované zařízení s použitým senzorem.

## 2 Přehled současného stavu

Plyn může být chápán jako látka bez specifického tvaru, která se vyznačuje velmi řídké rozptýlenými volně pohyblivými částicemi v prostoru. Vzhledem k tomuto uspořádání jsou plyny schopny snadno měnit svůj tvar i objem a vynikají svou stlačitelností. Z toho vyplývá, že je plyn po umístění do jakékoli uzavřené nádoby schopen rovnoměrně vyplnit celý její objem. Další důležitou vlastností plynu je způsob jeho proudění, který je ovlivněn rozložením setrvačných a třecích sil [8].

### 2.1 Proudění plynu

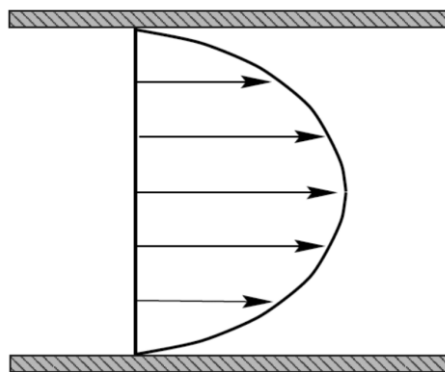
V mechanice tekutin je možné rozlišit proudění plynu na laminární a turbulentní. Druh proudění je ovlivněn rozložením setrvačných a třecích sil v daném plynu. Při posouzení druhu proudění je důležitým prvkem Reynoldsovo číslo. Podle hodnoty čísla lze určit, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. Reynoldsovo číslo je dáno poměrem setrvačné a třecí síly a je vyjádřeno rovnicí [1]:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (2.1.1)$$

Kde  $Re$  je Reynoldsovo číslo,  $v$  je střední rychlost proudění,  $D$  je průměr potrubí,  $\nu$  je kinematická viskozita proudící látky.

#### 2.1.1 Laminární proudění

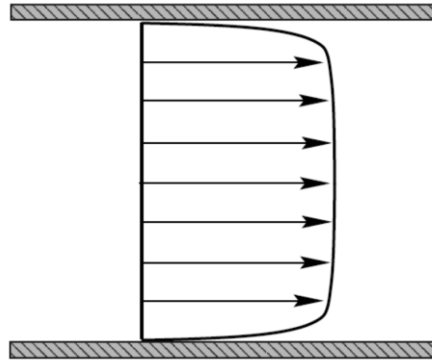
Laminární proudění je charakterizováno prouděním částic v drahách, které se vzájemně nekříží a odpovídá  $Re < 2000$ . Rychlostní profil proudění odpovídá rotačnímu paraboloidu. Z toho vyplývá, že nejvyšší rychlosti proudění dosahuje kapalina v ose potrubí. Směrem ke stěnám se pak rychlost snižuje k nule [3].



Obrázek 2.1.1: Rychlostní profil laminárního proudění

### 2.1.2 Turbulentní proudění

U turbulentního proudění dochází ke křížení částic. Vznikají zde víry, které zapříčiňují zpětné proudění částic. Ryze turbulentní proudění odpovídá  $Re > 4000$ . Rychlostní profil je podobný jako u laminárního proudění, ale dochází zde k zploštění [3].



Obrázek 2.1.2: Rychlostní profil turbulentní proudění

## 2.2 Měření průtoku a objemu plynu

Způsoby měření průtoku plynu lze obecně rozdělit do dvou skupin, na přímé a nepřímé měření. Přímé měření je umožněno po naplnění komory o známém objemu. Oproti tomu nepřímé měření průtoku, vyžaduje použití dalších fyzikálních vlastností plynu, které se mění s průtokem.

Přímé měření lze realizovat pomocí zařízení s názvem vitalograf. Tato zařízení však v klinické praxi nenalézají tak velké uplatnění, z důvodu jejich objemnosti a nevhodnosti pro měření kontinuálního průtoku [1].

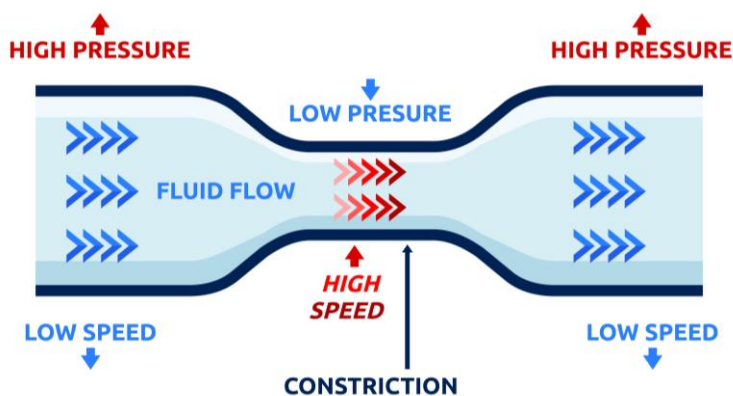
Nepřímé měření zahrnuje použití mechanických zařízení, jako je například plovákový průtokoměr (rotametr). Dále pak užití elektrických zařízení, jako jsou pneumotachografy, průtokoměry s Venturiho trubicí, průtokoměry s Pitotovou trubicí, anemometry s horkým drátem nebo ultrazvukové průtokoměry [4].

### 2.2.1 Pneumotachografie

Pneumotachografie je metoda, zabývající se určováním rychlosti proudění plynu a měřením jeho objemu. Je založena na konstrukci předdefinovaného průtokového senzoru, který se nazývá pneumotachograf. Tato metoda se ve velké míře využívá v klinické praxi při vyšetření průběhu dýchání nebo při plicní ventilaci, kdy zajišťuje měření dechových objemů [5].

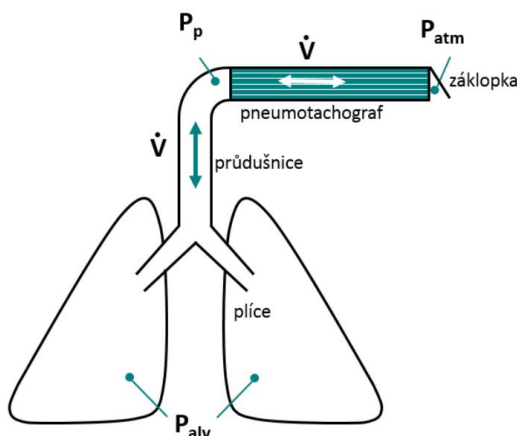
## Pneumotachograf

Pneumotachografy jsou zařízení, které v sobě mají zabudovaný fixní pneumatický odporový prvek. Tento prvek způsobuje vznik tlakového rozdílu, který je měřen před a za odporovým členem. Na odporovém členu vzniká Venturiho efekt, který spočívá ve zvýšení rychlosti proudění plynu v místě zúžení, aby nedocházelo k hromadění tekutiny před obstrukčním prvkem. K Venturiho efektu dochází z důvodu platnosti zákona o zachování energie. Při zvýšení rychlosti proudící tekutiny, dochází ke ztrátě kinetické energie. Aby došlo k vyrovnání hladin energií musí poklesnout tlak [7].



Obrázek 2.2.1: Schématické zobrazení Venturiho efektu (převzato z [7])

Údaj o vzniklém tlakovém rozdílu je následně snímán diferenčním tlakovým senzorem, který je schopen informaci převést na elektrický signál. Tento signál je pak dále zpracováván. Tlakový rozdíl, který vzniká na odporovém členu, je úměrný rychlosti proudění plynu skrze senzor, proto lze pomocí naměřené tlakově-průtokové charakteristiky zpětně, prostřednictvím tlakové difference, určovat průtok plynu skrze daný průtokový senzor [5], [6].



Obrázek 2.2.2: Schéma využití pneumotachografu (převzato z [5])

## 2.3 Princip vzniku tlakové diference v okolí odporového prvku

Průtokoměry na principu tlakové diference využívají principu zachování energie v proudící tekutině. Tento princip je formulován pomocí Bernoulliho rovnice (2.1.2). Funkce průtokoměrů na principu diference tlaků je založena na měření statického tlaku před a za překážkou. Z tohoto rozdílu lze následně určit dynamický tlak, který slouží k výpočtu rychlosti proudění tekutiny. Statický tlak je měřen pomocí senzorů tlaku kolmo na směr proudění. [1],[7].

### 2.3.1 Rovnice kontinuity

U stlačitelných tekutin dochází ke změnám hustoty, proto je pro popis vzniku tlakové diference využíván vztah se zachováním hmotnostního toku. Z tohoto důvodu mluvíme o nutné podmínce zákona o zachování hmotnosti při proudění plynů.

Tvar rovnice kontinuity:

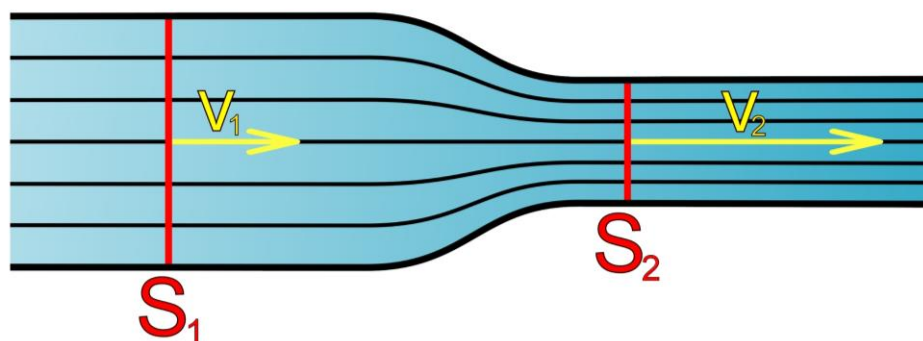
$$Q_m = Q_v \cdot \rho = S \cdot v \cdot \rho = konst \quad (2.3.1)$$

Kde  $Q_m$  je hmotnostní průtok dané tekutiny,  $Q_v$  je objemový průtok dané tekutiny,  $\rho$  je hustota tekutiny,  $S$  je průtočný průřez,  $v$  je rychlost proudění.

Z rovnice kontinuity dále plyne, že se změnou průřezu daných míst, dochází ke změně rychlosti proudění plynu, ale dochází k zachování objemového průtoku [3], [8].

Rovnice popisující změny v průtočných průřezech a rychlosti proudění:

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (2.3.2)$$



Obrázek 2.3.1: Schéma znázorňující rovnici kontinuity (převzato z [9])

Jelikož je v této práci s plynem pracováno s rychlostí proudění plynu daleko menší, než je rychlost zvuku, je možné zanedbat měnící se hustotu plynu. Z tohoto důvodu lze uplatnit Bernoulliho rovnici.

### 2.3.2 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice vyjadřuje rovnováhu tlakové, kinetické a polohové energie dokonalé tekutiny v jedné proudové trubici a představuje aplikaci zákona o zachování energie na proudící tekutinu. Může být využita především pro výpočty rychlostí a dynamických tlaků v jednotlivých částech trubice pro dané proudění [8].

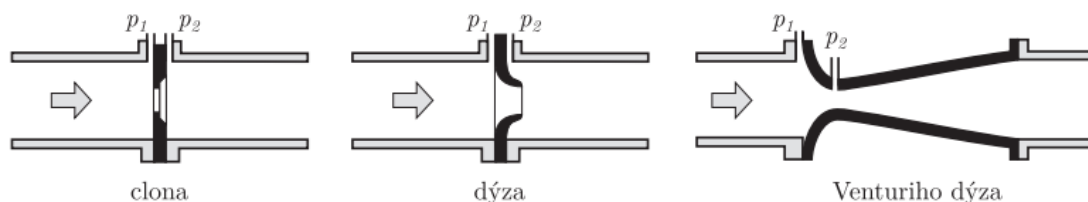
Tvar Bernoulliho rovnice:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = konst \quad (2.3.3)$$

Kde  $\rho$  je hustota proudící látky,  $v$  je rychlost proudění,  $g$  je tíhové zrychlení,  $h$  je výška,  $p$  je statický tlak, člen  $\frac{1}{2}\rho v^2$  je dynamický tlak.

## 2.4 Druhy odporových prvků

Při konstrukci průtokoměrů na principu difference tlaků jsou využity škrťací prvky jako clona, dýza, Venturiho trubice nebo, v případě měření rozdílu statického a celkového tlaku, rychlostní senzory jako Pitotova nebo Prandtlova trubice [10].



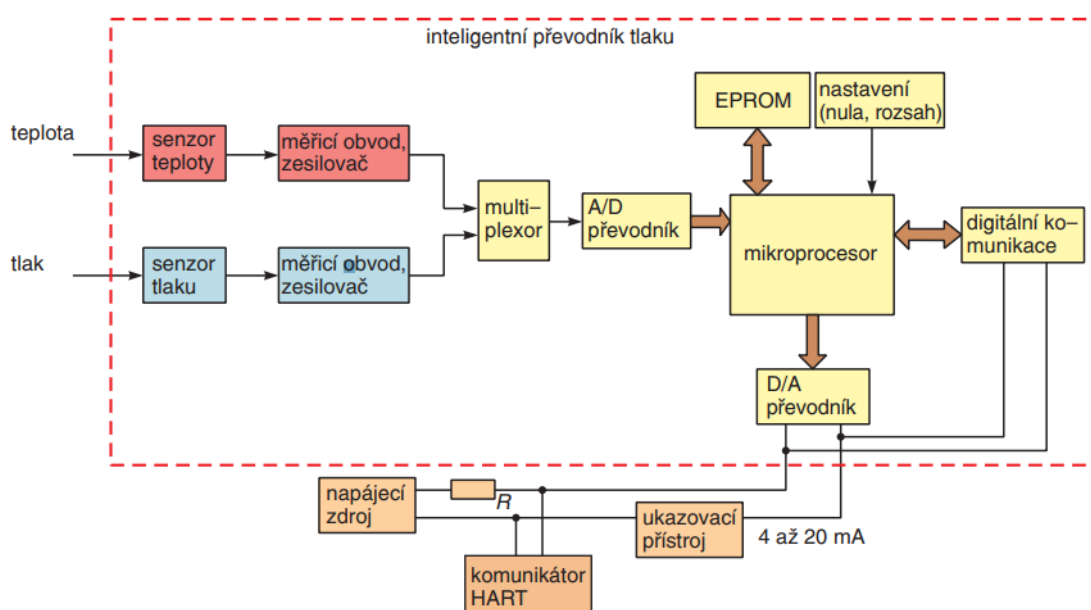
Obrázek 2.4: Schémata škrťacích prvků (převzato [10])

### 2.4.1 Tlakově-průtokové charakteristiky odporových prvků

Tlakově-průtokové charakteristiky slouží především pro popis dynamických vlastností škrťacích prvků. Jedná se o sestrojený graf, kdy je na vodorovnou osu vynesena hodnota průtoku, na svislou pak hodnota difference tlaku. Z tohoto grafu lze zároveň určit rovnici křivky, pomocí které je vyjádřena náležitost jednotlivých hodnot průtoků k hodnotám difference tlaků. Z této rovnice lze následně získat inverzní funkci, do které jsou dosazovány informace o zjištěné diferencii tlaků a dopočítány aktuální hodnoty objemových průtoků [6].

## 2.5 Inteligentní převodníky tlaku

Inteligentní převodníky tlaku využívají senzory s elektrickým principem převodu. Zpracování signálu je zajištěno pomocí mikroprocesorů a miniaturních obvodů. Tato zařízení pak ukládají údaje o měřicím rozsahu, kalibraci, nastavení mezních hodnot pro signalizaci atd. Použitím mikroprocesoru je dosaženo vyšší přesnosti a flexibility přístroje. Obecně inteligentní převodníky dosahují zlepšení metrologických parametrů například nejistoty měření, která dosahuje hodnot menších než  $\pm 0,1 \%$ . Zároveň disponují téměř nulovým driftem a časové intervaly mezi jednotlivými kontrolami jsou výrazně delší než u klasických přístrojů [11].



Obrázek 2.5: Blokové schéma inteligentního převodníku tlaku (převzato [11])

Popis funkce inteligentního převodníku tlaku zobrazuje blokové schéma (obrázek 2.5). Senzor tlaku reaguje na změnu tlaku v závislosti na principu např. změnou odporu nebo kapacity. Tato změna je převedena na změnu napětí, která je následně zesílena na požadovanou úroveň. Pomocí A/D převodníku jsou napěťové signály upraveny na číslicový, který vstupuje do mikroprocesoru. Výstup z mikroprocesoru je veden do D/A převodníku, který poskytuje výstup 4 až 20 mA [11].

## 2.6 Proudová smyčka

Proudovou smyčku je možné realizovat dvěma různými způsoby. Prvním způsobem je vytvoření proudové smyčky v analogové formě. U analogové proudové smyčky lze využít celého rozsahu proudů od 4 do 20 mA. Tento rozsah slouží k reprezentaci změny měřených veličin. Toto využití můžeme najít právě u inteligentních převodníků tlaku,

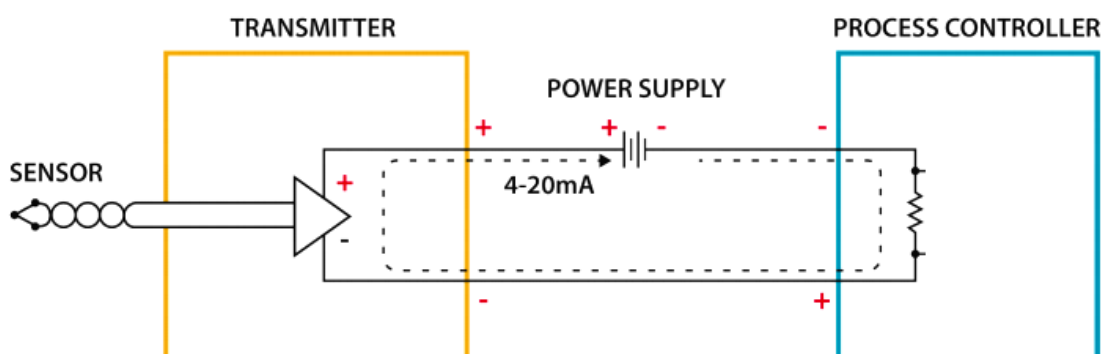


Druhým způsobem je realizace proudové smyčky v digitální formě. U digitální proudové smyčky je vyjádřena log 0 hodnotou proudu 4 mA a log 1 hodnotou proudu 20 mA [12].

Výhodami proudové smyčky jsou odolnost vůči elektromagnetickému rušení, přenos na velké vzdálenosti a využití proudu jako signálové veličiny. Další předností je snadná detekce přerušení smyčky, v případě že hodnota proudu poklesne k 0 mA. Odolnost proti rušení je dána nízkým vstupním odporem proudových vstupů připojených zařízení. Pokud je proudová smyčka napájena z dostatečně dimenzovaného zdroje napětí, nemá nenulový odpor vodičů přímý vliv na přenášenou hodnotu. U systémů založených na počítačích se nejčastěji využívá napájecí napětí s hodnotou +12 V [13].

Proudová smyčka je složena z těchto komponent:

- senzor – zajišťuje převod měřené neelektrickou veličinu na napěťový signál
- převodník napětí – provádí převod napětí na proud v rozsahu 4 až 20 mA
- napájecí zdroj smyčky – napájení pro vysílač a přijímač, případně ostatní komponenty zapojené ve smyčce vyžadující stejnosměrné napájecí napětí
- přijímač – provádí zpětný převod proudu na napětí, případně i vyhodnocení a zobrazení



Obrázek 2.6: Příklad zapojení proudové smyčky (převzato [12])

### 3 Cíle práce

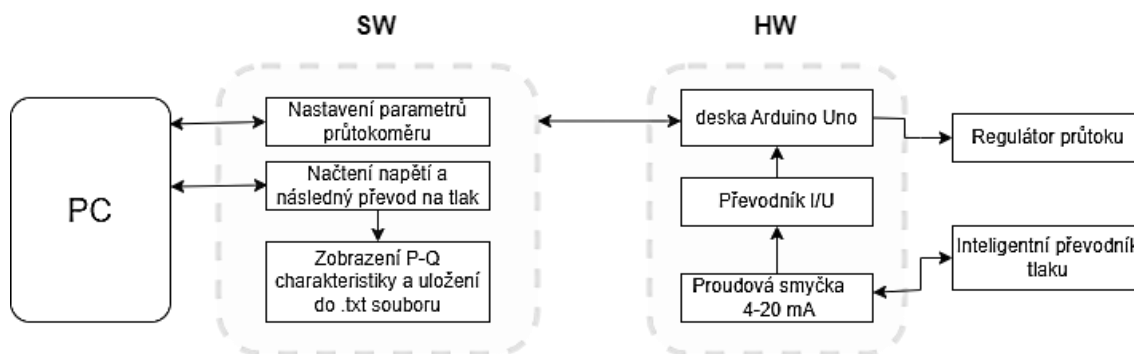
V rámci této práce bude vytvořeno zařízení pro automatické proměřování tlakově-průtokových charakteristik částí ventilačních okruhů.

Zařízení se bude skládat z univerzálního modulu pro připojení diferenčního tlakového senzoru využívajícího proudovou smyčku 4–20 mA, řídicího modulu umožňujícího ovládat nastavitelný zdroj průtoku plynu pomocí signálu 0–5 V a pomocí proudové smyčky 4–20 mA a z pneumatické části pro připojování měřených prvků.

Dalším cílem této práce je vytvoření software v podobě aplikace vytvořené v prostředí MATLAB GUI. Tato aplikace bude zajišťovat komunikaci zařízení s počítačem. Dále bude umožňovat export dat do textového souboru, kalibraci tlakového senzoru, nastavení parametrů signálu řídicího průtok plynu a kalibraci regulátoru průtoku. Následně bude provedeno ověření celé sestavy a sepsán návod k použití zařízení.

## 4 Metody

V této části je popsán návrh s následným způsobem realizace zařízení pro měření tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů. Zařízení je složeno ze softwarové, hardwarové a pneumatické části. Z požadavků bylo vytvořeno následující blokové schéma přístroje, které je znázorněno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Blokové schéma návrhu zařízení pro měření tlakově-průtokové charakteristiky

Principem zařízení je společné zapojení inteligentního převodníku tlaku, snímajícího tlak před a za odporovým prvem, a vývojové desky Arduino Uno, pomocí které jsou zaznamenávány změny napětí. Tyto změny jsou dále softwarem převáděny na diferenční tlak. Hodnotě diferenčního tlaku je přiřazena odpovídající hodnota průtoku. Z této závislosti je vytvořena tlakově-průtoková charakteristika daného prvku či části ventilačního okruhu.

### 4.1 Návrh a realizace hardware

Hardwarová část zařízení je složena z univerzálního modulu pro připojení diferenčního tlakového senzoru využívajícího proudovou smyčku 4–20 mA a řídicího modulu umožňujícího ovládat regulátor průtoku plynu pomocí signálu 0–5 V nebo pomocí proudové smyčky 4–20 mA. Univerzální modul zahrnuje ochranu proti přepětí a ochranu proti přepólování. Zároveň je složen z navrhnutého obvodu a převodníku proudové smyčky na napětí v rozsahu 0–5 V. Tento převodník je využit, z důvodu použití vývojové desky Arduino Uno, pomocí které lze číst pouze zmíněný rozsah napětí. Řídicí modul se skládá z převodníku napětí 0–5 V na proudovou smyčku 4–20 mA a přepínače. Přepínač umožňuje použití, buďto rozsahu napětí 0–5 V přímo z digitálního pinu desky Arduino Uno, nebo výše zmíněný převod napětí na proudovou smyčku.

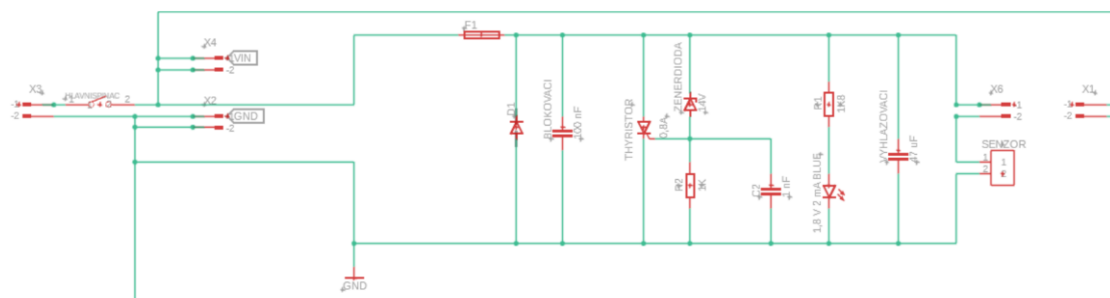
### 4.1.1 Obvodové schéma univerzálního modulu

Obvodové schéma univerzálního modulu bylo navrženo v prostředí Fusion 360 a je zobrazeno na obrázku 4.1.1.1. Jak již bylo zmíněno výše, univerzální modul zahrnuje ochranu proti přepólování a přepětí a byl dimenzován pro vstupní napětí 12 V.

Ochrana proti přepólování je realizována paralelně připojenou diodou v závěrném směru. Pokud je na katodu přivedeno kladné napětí, tak proud neprochází. Pokud by došlo k prohození polarity, vytvořil by se na diodě zkrat. Vytvoření zkratu následně přetaví pojistku a ochranní obvod.

Ochrana proti přepětí je tvořena Zenerovou diodou (14 V), tyristorem (0,8 A) a odporem (1k8). Hodnota pojistky je 0,63 A. Při vzrůstu napětí dochází k otevření Zenerovy diody, která propustí napětí na řídicí elektrodu tyristoru. Tyristor zkratuje svorky a dochází k přepálení pojistky. Hodnota tyristoru byla zvolena tak, aby hodnota přípustného proudu byla větší než proud odebíraný ze zdroje.

Dále je v obvodu umístěn blokovací kondenzátor, který zajišťuje blokování proti rušivým střídavým napětím, a vyhlazovací kondenzátor, který slouží jako ochrana proti stoupnutí výstupního napětí při odpojení zátěže.

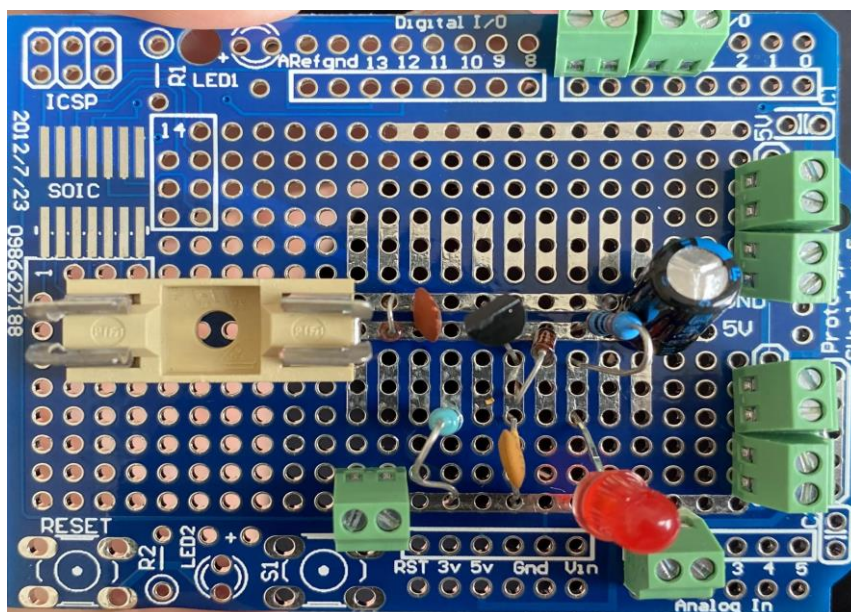


Obrázek 4.1.1.1: Obvodové schéma univerzálního modelu

Svorkovnice X4 a X2 jsou určeny k dalšímu rozvodu napětí 12 V a GND, např. pro využití převodníku napětí 0–5 V na proudovou smyčku 4–20 mA. Do svorkovnic označených jako X6 a X1 byl připojen převodník proudové smyčky na napětí.

### 4.1.2 Realizace univerzálního modulu

Univerzální modul byl realizován na desce plošných spojů Prototype Shield v.5. Tato deska je určena přímo pro tvorbu projektů spojených s použitím desky Arduino Uno, proto se hodí pro tuto realizaci. Na desce byl vytvořen navržený obvod (obrázek 4.1.2). Poté byl obvod, skládající se pouze z ochrany, otestován. Cílem testu bylo ověření, zda dojde ke zkratu a k tavení pojistky. Po ověření funkčnosti byl k obvodu připojen převodník proudové smyčky na napětí, Arduino Uno a samotný senzor.



Obrázek 3.1.2: Ukázka desky plošných spojů a ochranné části obvodu

### 4.1.3 Použité přístroje

#### Vývojová deska Arduino Uno

Vývojová deska Arduino Uno obsahuje mikroprocesor ATmega328P z rodiny AVR. Osmibitový mikroprocesor poskytuje 32 kB paměti Flash, 2 kB paměti SRAM, 1 kB paměti EEPROM a pracuje na hodinovém kmitočtu 16 MHz. Na Arduino Uno můžeme nalézt 14 digitálních vstupně-výstupních pinů a 6 analogových vstupních pinů. Vstupní doporučení napětí se pohybuje v rozmezí od 7 do 12 V. Mezní hodnota vstupního napětí je dána mezi 6–20 V [19].

Digitální piny označené vlnovkou jsou piny, které mohou vracet výstup na základě pulzně šířkové modulace (PWM). PWM výstup lze označit jako přechod mezi digitálním a analogovým výstupem. Jelikož deska Arduino Uno nedisponuje žádným pouze analogovým výstupem, tak lze využít právě PWM. V případě PWM se jedná o cyklické přepínání digitálního výstupu mezi stavy LOW a HIGH. Podle šířky pulzu vysoké úrovně (HIGH) ku šířce pulzu nízké úrovně (LOW) dochází k výslednému stavu na daném výstupu. I když se tedy jedná o digitální výstup, kdy na výstupu jsou jen stavy LOW (0 V) a HIGH (5 V), ve svém důsledku se výstup chová, jako kdyby se na něm měnilo napětí analogově [19].



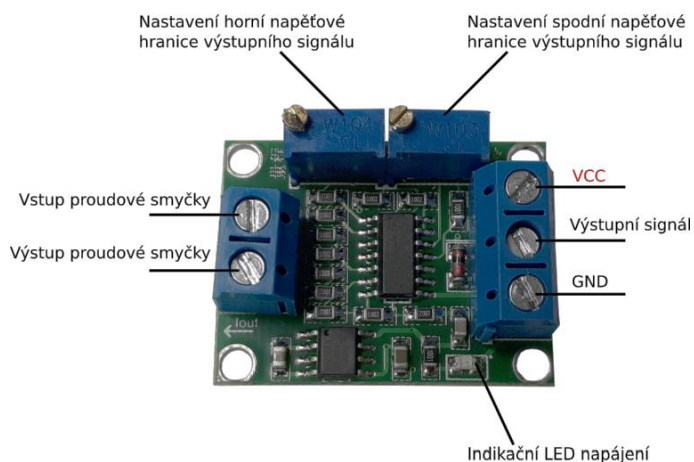
Obrázek 4.1.3.1: Vývojová deska Arduino Uno

### Převodník proudové smyčky 4–20 mA na napětí 0–5 V

Převodník je navržen pro použití především s průmyslovými senzory. Základní vlastností, jak může vyplynout z názvu, je převod proudové smyčky 4–20 mA na napětí 0–5 V. Spodní i horní napěťovou hranici lze nastavit pomocí umístěných potenciometrů. Otáčením proti směru hodinových ručiček se hranice snižuje, při otáčení po směru hodinových ručiček se naopak zvyšuje. Základní specifikace je uvedena v tabulce 4.1.3.1.

Tabulka 4.2.3.1: Specifikace převodníku proudu na napětí

Napájecí napětí	7–35 VDC	Proudový rozsah vstupního signálu	4–20 mA
Napětí vstupního signálu	7–35 VDC	Napěťový rozsah výstupního signálu (při 12 VDC)	0–10 VDC



Obrázek 5.1.3.2: Popis převodníku proudové smyčky na napětí

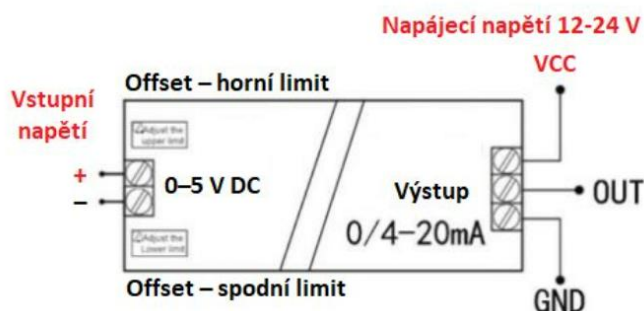
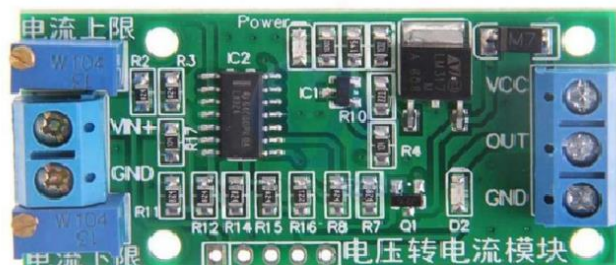
### Převodník napětí 0–5 V na proudovou smyčku 4–20 mA

Převodník napětí na proudovou smyčku lze využít především ke komunikaci s průmyslovými senzory. V této práci byl využit pro komunikaci s regulátorem průtoku Omega FMA5400/5500 (Omega Engineering Inc., Connecticut, USA), který je schopen přijímat informace, jak na bázi proudové smyčky, tak i pomocí rozsahu napětí. Důvodem použití je rozšíření desky Arduino Uno, která umožňuje přenos signálu pouze v rozsahu napětí 0–5 V.

Základní specifikace jsou uvedeny v tabulce číslo. Strana s měřením proudu je galvanicky oddělena. Zároveň lze u převodníku napětí na proud upravovat rozsah pomocí dvou trimů.

4.3.3.1: Specifikace převodníku napětí na proud

Napájecí napětí	12–24 VDC
Napětí vstupního signálu	0–5 V
Výstupní proud	4–20 mA



Obrázek 6.1.3.3: Popis převodníku napětí na proudovou smyčku

### 4.1.4 Návrh a realizace řídicího modulu

Řídicí modul je založen na komunikaci regulátoru průtoku a vývojové desky Arduino Uno. Komunikace je realizována pomocí digitálních pinů D6 a D7. Digitální pin D7 vrací

pouze hodnoty LOW/HIGH, proto je na něm zapojen Omega pin 12. Pin 12 slouží k vypnutí/zapnutí regulátoru průtoku Omega. Své využití nalezne při rychlém vypnutí regulátoru průtoku z důvodu bezpečnosti například při překročení rozsahu daného senzoru. Digitální pin D6 je pin s takzvanou pulzní šířkovou modulací. Tento pin dokáže číst celá čísla v rozsahu 0–255. Za pomoci této funkce lze na tento pin posílat převedené napětí a měnit nastavení regulátoru průtoku.

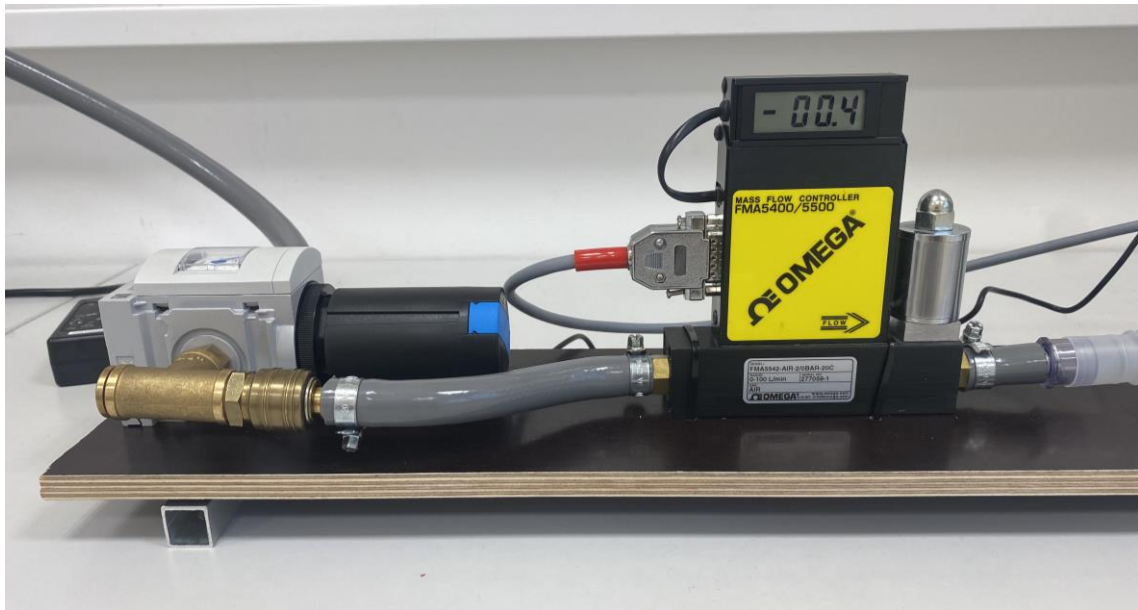
## 4.2 Návrh a realizace pneumatické části

Pneumatická část je tvořena přívodní hadicí, která je připojena ke zdroji vzduchu, poté následuje redukční ventil, regulátoru hmotnostního průtoku Omega FM5400/5500 (Omega Engineering Inc., Connecticut, USA), a vrapovaná trubka. Na konci je umístěna snímatelná koncovka pro připojení odporových prvků.

Při realizaci pneumatické části kalibrační trati byl použit redukční ventil MS6-LR-1/4-D5-AS (Festo, Esslingen am Neckar, Německo). Úkolem redukčního ventilu je snížení tlaku v daném rozvodu na požadovanou hodnotu, v našem případě 2 bary, a zajistit stabilizaci při kolísání tlaku z rozvodu. Zvolený redukční ventil MS6-LR-1/4-D5-AS umožňuje regulaci tlaku v rozsahu 0,3–4 barů. Zároveň disponuje otočnou hlavicí s aretací, která je plně uzamykatelná a slouží k nastavení tlaku.

Součástí kalibrační trati je také regulátor průtoku Omega FM5400/5500, který zajišťuje požadovaný průtok. Omega FM5400/5500 je určena pro regulaci průtoků v rozmezí 0–100 L/min. Je vybavena vestavěným elektromagnetickým ventilem pro udržení konstantního průtoku bez ohledu na změny vstupního nebo výstupního tlaku. Omega lze ovládat buďto lokálně potenciometrem přístupným přes okýnko v pouzdře, nebo dálkově analogovým signálem 0–5 V nebo 4–20 mA. Přesnost měření je dána dle rozsahu, ve kterém je měřeno. Pokud je Omega použita pro rozsahy 0–20 L/min, pohybuje se přesnost  $\pm 3 \%$ . Při měření v rozsahu 20–100 L/min dochází ke zvýšení přesnosti na  $\pm 1,5 \%$  [20].



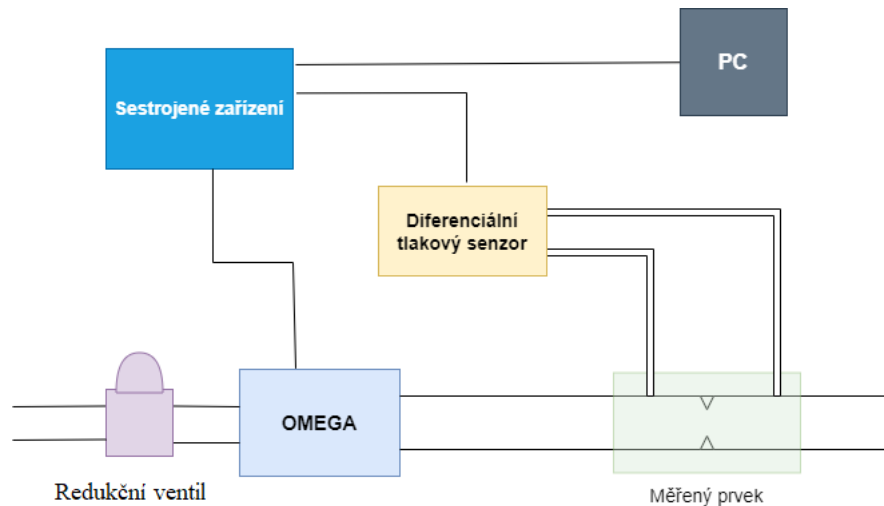


Obrázek 4.2.1: Ukázka zapojení redukčního ventilu a regulátoru průtoku Omega FM5400/5500

### 4.3 Princip měření tlakově-průtokové charakteristiky

Při spojení pneumatické části a senzoru pro měření diferenčních tlaků se dostáváme k návrhu kalibrační trati, která se využívá právě pro měření tlakově-průtokových charakteristik odporových členů.

Kalibrační trať je navržena dle schématu na obrázku 4.3.1. Na této trati lze ovládat průtok pomocí regulátoru hmotnostního průtoku Omega FM5400/5500. Dále je možné snímat diferenční tlak na odporovém prvku. Redukční ventil, regulátor průtoku Omega a měřený prvek jsou v trati řazeny do série. Mezi nimi je použita vrapovaná hadice, která je umístěna ve vodorovném směru, aby byla trať co nejrovnější. Mezi regulátorem průtoku a měřeným prvkem je umístěno minimálně 20 centimetrů vrapované hadice pro ustálení nesymetrických a turbulentních proudů. Senzor tlakové difference se připojuje pomocí hadiček na výstupy měřeného prvku.



Obrázek 4.3.1: Navržené schéma kalibrační trati

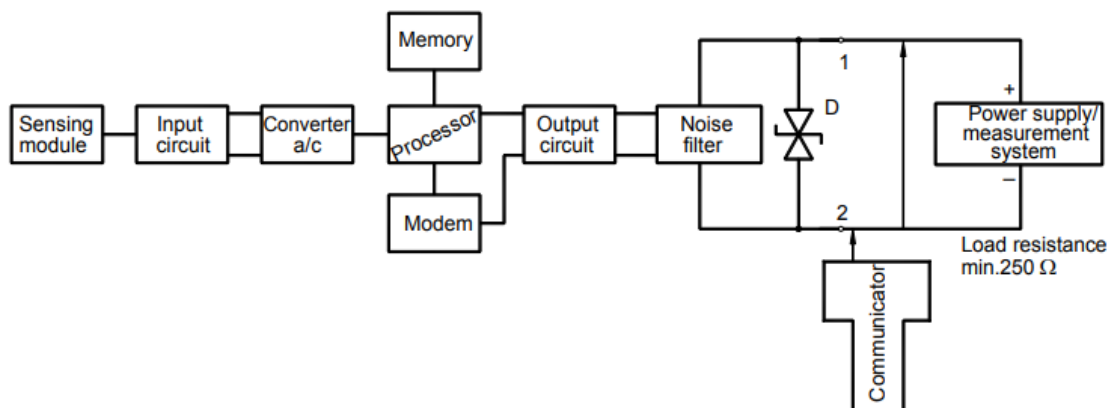
### 4.3.1 Použitý senzor pro měření malých diferenčních tlaků

#### Senzor Aplisens APRE 2000G

Senzor Aplisens APRE–2000G (Aplisens, Polsko) je určen k měření diferenčního tlaku nereaktivních plynů. Senzor lze využít i pro měření malých tlaků ve vodním sloupci nebo pro měření výšky vodního sloupce v nádobě. [2]

Senzor je složen z elektronického převodníku tlaku, který funguje na principu převodu změn na piezorezistenčním můstku, které jsou úměrné změnám měřeného diferenčního tlaku na proudový signál. Aktivním snímacím prvkem je silikonová membrána se čtyřmi piezorezistory, která je oddělena těsnící membránou a manometrickou kapalinou. Elektronický systém digitálně zpracovává měřený signál a generuje výstupní signály. Signál je generován buďto jako analogový, který funguje na principu změn proudové smyčky 4–20 mA, nebo jako digitální komunikační signál HART [18].

Senzor je možné napájet vstupním napětím v rozsahu 7,5–55 VDC. Rozsah měřeného tlaku senzorem se pohybuje v rozmezí –2,5–2,5 mbar. Maximální přípustný tlak se rovná 350 mbar [18].



Obrázek 4.3.1.1: Blokový diagram senzoru Aplisens APRE 2000G (převzato z [12])



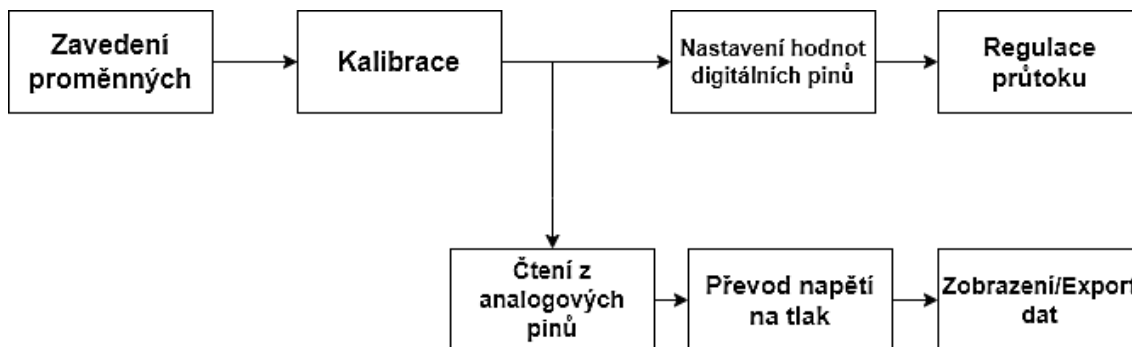
Obrázek 4.3.1.2: Senzor Aplisens APRE 2000G (převzato [12])

## 4.4 Návrh a realizace software

Posledním krokem byl vývoj grafického rozhraní, které by umožňovalo ovládání nastavitelného zdroje průtoku plynu. Zároveň tento software umožňuje kalibraci použitého senzoru a regulátoru průtoku, převod snímaného napětí na diferenční tlak, nastavení rozsahu proměřovaných průtoků, export naměřených dat do souboru .txt a automatickou tvorbu grafu závislosti tlaku na zvoleném průtoku.

Software byl realizován v prostředí MATLAB GUI. Toto prostředí bylo zvoleno z důvodu jednoduché realizace panelu grafického rozhraní a intuitivního způsobu programování. Zároveň toto prostředí disponuje knihovnou pro přímou komunikaci s Arduino Uno. Další výhodou je uživatelská dostupnost vytvořené aplikace, kterou lze spustit nejen v prostředí MATLAB, ale i jako webovou nebo samostatnou desktopovou aplikaci.

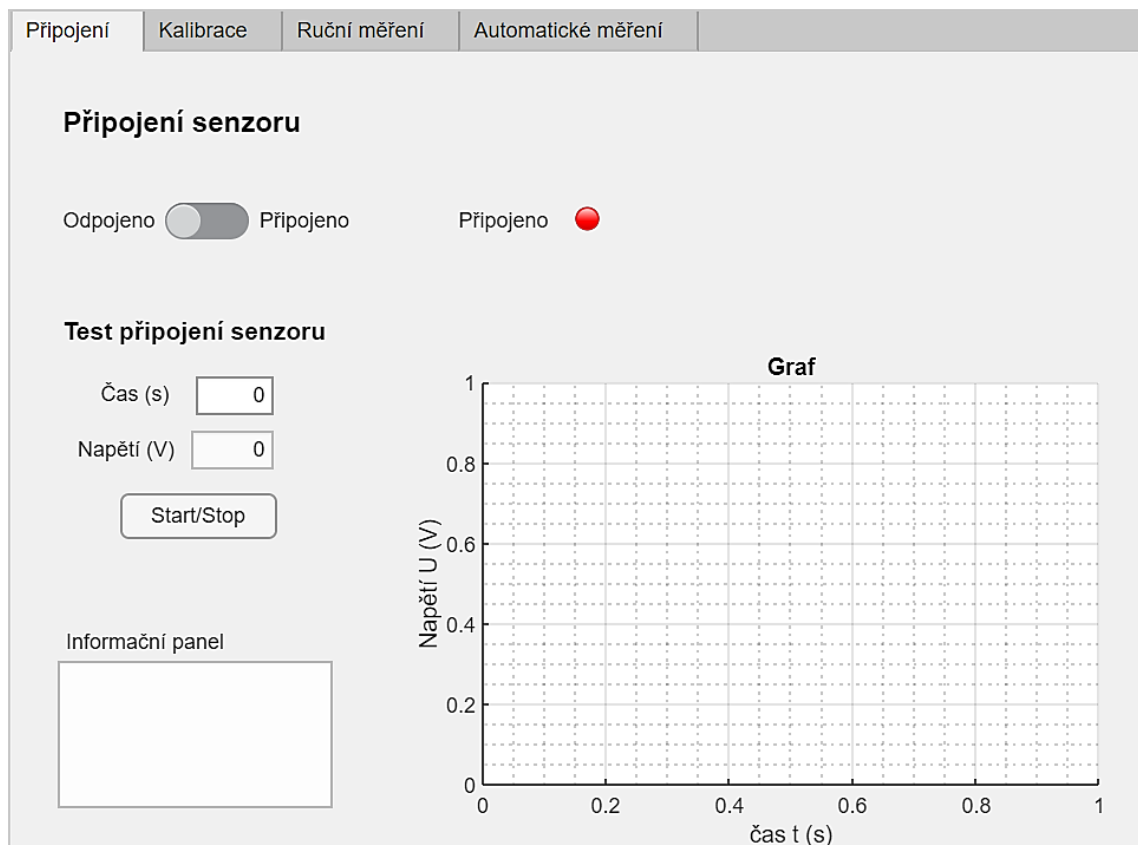
Vytvořené grafické rozhraní je složeno ze 4 záložek, které slouží pro připojení vývojové desky Arduino Uno, kalibraci tlakového senzoru a regulátoru průtoku, ruční a automatické měření tlakově-průtokové charakteristiky. Na základě požadavků bylo vytvořeno následující blokové schéma přístroje, které je zobrazeno na obrázku 4.1.1.



Obrázek 4.1.1: Blokové schéma vytvořeného software

#### 4.4.1 Panel pro připojení vývojové desky Arduino Uno

Úvodní záložka slouží pro připojení vývojové desky Arduino Uno. V horní části je umístěn spínač pro připojení či odpojení. V případě polohy připojení dochází k načtení knihovny funkce, pomocí které zahájí software komunikaci s vývojovou deskou. Zároveň tento panel disponuje funkcí testu připojení. Pomocí tohoto testu lze sledovat hodnotu napětí na analogovém pinu A0, které bude nulováno a poté převáděno na tlak. Hodnota napětí je zároveň zobrazována i graficky pomocí grafu umístěného na praví polovině panelu. Součástí této záložky je informační panel, který zobrazuje informace ohledně prováděných úkonů v rámci aplikace. Uspořádání záložky pro připojení vývojové desky Arduino Uno je zobrazeno na obrázku 4.4.1.1.



Obrázek 4.4.1.1: Úvodní záložka pro připojení Arduino Uno

## 4.4.2 Panel pro kalibraci tlakového senzoru a regulátoru průtoku

Druhá záložka byla vytvořena za účelem kalibrace senzoru tlaku a regulátoru průtoku. V horní polovině jsou umístěny dva oddíly pro kalibraci senzoru. Senzor lze kalibrovat pomocí vodního sloupce, dále lze zadat uváděnou přesnost tlakového senzoru dle datasheetu. Součástí kalibrace senzoru je převod změřeného napětí na diferenční tlak, který dále slouží k vytvoření tlakově-průtokové charakteristiky.

Dolní polovina panelu je vytvořena za účelem kalibrace regulátoru průtoku. Skládá se z tlačítka pro nastavení průtoku na regulátoru a okénka pro zadání naměřeného průtoku na kalibrátoru. Z těchto údajů vytvoří software kalibrační křivku. Zavedením této funkce dochází ke zvýšení přesnosti měření pomocí daného regulátoru průtoku. Uspořádání záložky pro kalibraci tlakového senzoru a regulátoru průtoku je zobrazeno na obrázku 4.4.2.1.

Připojení	Kalibrace	Ruční měření	Automatické měření
<b>Kalibrace senzoru</b>			
1.	Hloubka (cm)	<input type="text" value="0"/>	<input type="button" value="Scan"/>
	<input type="button" value="Převod napětí na tlak"/>	tlak (mbar)	<input type="text" value="0"/>
-----			
2.	Přesnost senzoru (%)*	<input type="text" value="0"/>	*(k vyhledání v datasheetu)
-----			
<b>Kalibrace regulátoru průtoku</b>			
	Nastavený průtok	<input type="text" value="0"/> L/min	<input type="button" value="Nastavit"/>
	Průtok na kalibrátoru	<input type="text" value="0"/> L/min	
	<input type="button" value="Scan"/>	<input type="button" value="Kalibrace"/>	<input type="text" value="Informační panel"/>

Obrázek 4.4.2.1.: Záložka pro kalibraci tlakového senzoru a regulátoru průtoku

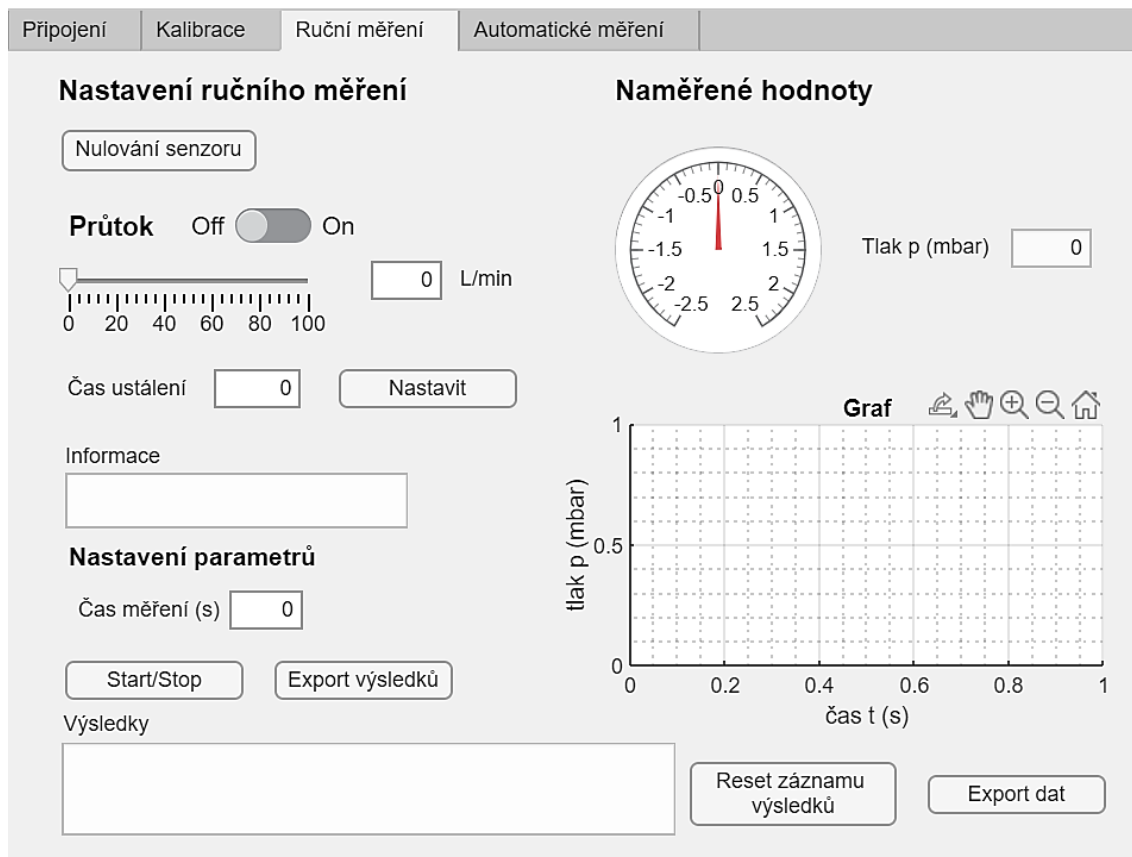
### 4.4.3 Panel pro nastavení ručního měření

Třetí panel byl navrhnout pro ruční proměřování tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů. V horní části je umístěna ikona pro nulování senzoru. Nulování senzoru by mělo být provedeno před každým měřením za účelem zvýšení přesnosti. Nulování senzoru je závislé na kalibraci senzoru. Pokud kalibrace byla provedena při jiném používání aplikace, je potřeba disponovat .txt souborem s uloženými daty nebo kalibraci provést znovu.

Pod touto ikonou lze najít oddíl využitelný k ovládání regulátoru průtoku. V našem případě se jedná o regulátor hmotnostního průtoku Omega FMA 5400/5500. Součástí oddílu je on/off přepínač, pomocí kterého lze zapnout/vypnout regulátor průtoku ručně. Dále zde lze najít číselnou osu pro nastavení hodnoty průtoku. Hodnotu průtoku je také možné vepsat ručně do příslušného políčka. Pro zvýšení výpovědní hodnoty měření je součástí oddílu také políčko pro určení času, který je potřeba k ustálení regulátoru průtoku. Zadaná hodnota času musí být vyšší než 5 s. Tato podmínka je zavedena právě kvůli zvýšení přesnosti měření.

Dalším oddílem, který je součástí panelu pro nastavení ručního měření, je část pro nastavení parametrů a zobrazování výsledných hodnot. Nastavitelným parametrem je čas měření. Hodnoty jsou zobrazovány, jak v informačním panelu, který je určen pouze pro zobrazení

výsledků, tak graficky pomocí grafu tlak v čase. Zároveň lze pomocí tlačítek export uložit naměřená data do .txt souborů. Uspořádání záložky pro nastavení ručního měření je zobrazeno na obrázku 4.4.3.1.



Obrázek 4.4.3.1: Záložka pro nastavení ručního měření

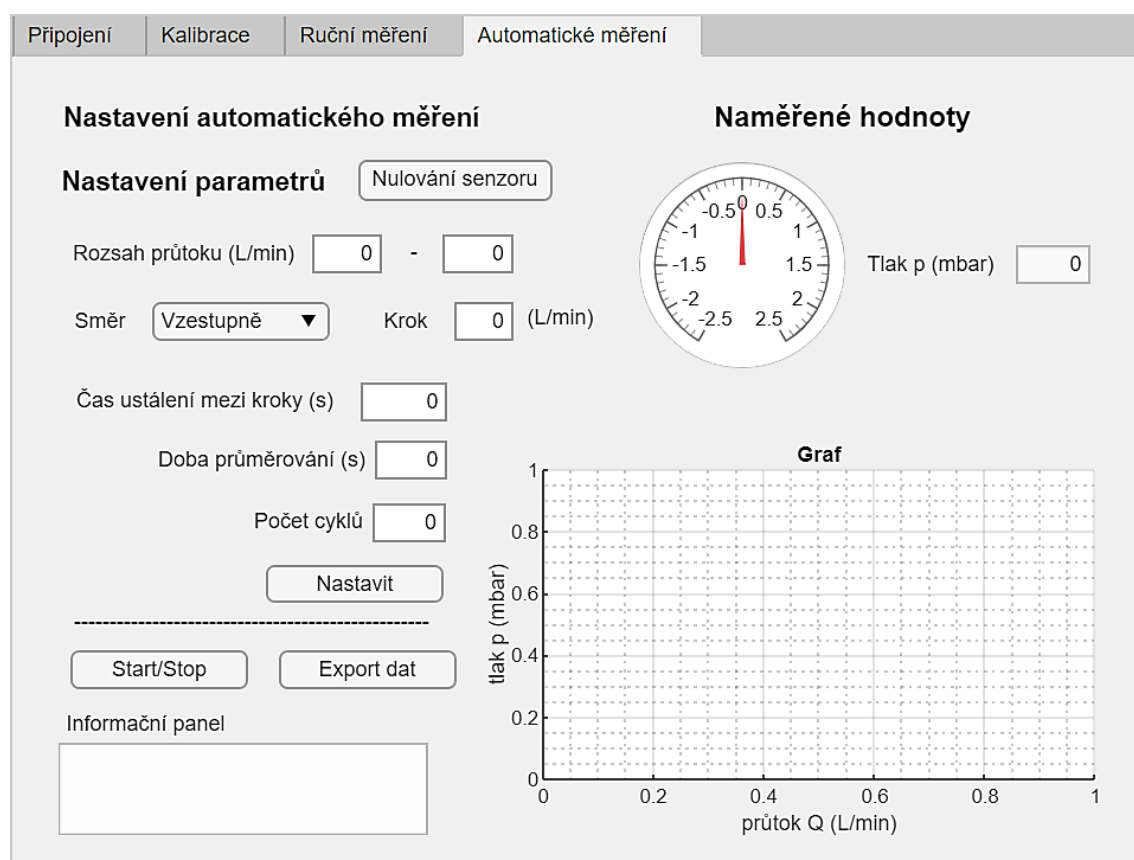
#### 4.4.4 Panel pro nastavení automatického měření

Poslední panel je určen pro automatické proměřování. Tato záložka byla vytvořena především pro zjednodušení tvorby tlakově-průtokové charakteristiky. V horní části lze najít tlačítko pro nulování senzoru, které by mělo být použito před každým měřením (viz kapitola 4.4.3). Pod tímto tlačítkem se nachází oddíl pro nastavení proměřování parametrů.

Prvním nastavitelným parametrem je rozsah průtoku, který bude proměřován. Dále lze nastavit s jakým krokem bude proměřování uskutečněno, či jakým směrem bude charakteristika měřena. U nastavení směru můžeme naleznou dvě možnosti, jedná se o proměření vzestupně nebo sestupně. Možnost měření sestupně je doporučeno použít až po prvním proměření dané části ventilačního okruhu. Toto doporučení je zavedeno, z důvodu ochrany senzoru a regulátoru průtoku. V případě špatného zapojení by mohlo při vysokých hodnotách průtoku dojít k poškození.

Dále musí být zadán čas ustálení mezi jednotlivými kroky. Tento čas slouží k ustálení regulátoru průtoku a zvýšení přesnosti měření (viz kapitola 4.4.3). Součástí nastavitelných parametrů je zároveň čas průměrování. Tento čas vyjadřuje dobu, po kterou senzor snímá hodnoty diferenčního tlaku. Následně z nich software udělá průměrnou hodnotu, kterou zobrazí do grafu. Graf je umístěn v pravé části panelu. Poslední pole je určeno k zapsání počtu cyklů, které chce uživatel nechat provést. Počet cyklů je limitován fixní barevnou škálou. Z tohoto důvodu lze zadat pouze 7 cyklů.

Součástí panelu je dále tlačítko start/stop, tlačítko pro export dat, informační panel a grafická reprezentace manometru.



Obrázek 4.4.4.1: Panel pro automatické měření

## 4.5 Metody kalibrace zařízení

Součástí vytvořeného zařízení je senzor pro měření malých diferenčních tlaků Aplisens APRE 2000G a regulátor průtoku Omega FM5400/5500, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.2 a 4.3. Z tohoto důvodu je nutné zařízení pravidelně kalibrovat, aby nedocházelo k nepřesnostem v měření. Pomocí vytvořeného GUI je možno kalibrovat, jak připojený senzor, tak regulátor průtoku.



### 4.5.1 Kalibrace diferenčního tlakového senzoru

U diferenčního tlakového senzoru byla zvolena kalibrace vodou. Kalibrace vodou se provádí pomocí vodního sloupce s mm stupnicí. Hadička senzoru je ponořena do určité hloubky vodního sloupce a poté je odečítána výstupní hodnota proudové smyčky 4–20 mA, která je vytvářena tlakovým senzorem. Pomocí tohoto měření je experimentálně zjištěna kalibrační rovnice senzoru, které je využívána při přepočtu převedeného napětí na tlak.

### 4.5.2 Kalibrace regulátoru průtoku

Kalibrované hodnoty průtoku byly zjištěny pomocí kalibrátoru průtoku plynů CalTrak XL. Průtoková cela kalibrátoru je opatřena skleněnými písty z nízkohmotnostního borosilikátu, které oscilují mezi dvěma detektory. To zajišťuje poměrně rychlé a přesné měření průtoku plynu. Realizace CalTraku XL umožňuje zvýšenou flexibilitu a rychlost čtení. Kalibraci měřeného průtoku lze provádět ručně (jedno čtení najednou), nebo automaticky v nepřetržitém režimu.

## 4.6 Statistické vyhodnocení dat

Data byla vyhodnocována pomocí výpočtu nejistoty typu A, B, C. Naměřená kalibrační data byla zaznamenána do proměnných. Následně pomocí knihovní funkce (polyfit) v prostředí MATLAB GUI byly zjištěny exponenty kalibrační rovnice pro výpočet tlaku.

### Aritmetický průměr

Hodnota aritmetického průměru udává průměrnou hodnotu ze série měřených hodnot a lze ji vypočítat dle rovnice 4.6.1:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (4.6.1)$$

Kde  $n$ ...počet měření,  $x_i$ ...naměřená hodnota

### Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka určuje míru podobnosti hodnot v souboru. Čím menší má směrodatná odchylka hodnotu, tím více jsou si prvky podobné. Směrodatnou odchylku lze vypočítat dle rovnice 4.6.2:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.6.2)$$

Kde  $n$ ...počet měření,  $x_i$ ...naměřená hodnota,  $\bar{x}$ ...aritmetický průměr

### 4.6.1 Nejistota měření

Nejistota měření udává rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření. Nejistotu měření lze určovat u výsledku měření, měřicích přístrojů hodnot použitých konstant apod. Mírou nejistoty měření je směrodatná odchylka udávané veličiny. Označuje se jako standartní nejistota typu  $u$  a charakterizuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty. Standartní nejistoty se dále dělí na nejistotu typu A a typu B [12].

#### Standartní nejistota typu A

Tato standartní nejistota je způsobena náhodnými chybami, jejíž příčiny se považují za neznámé, je stanovována z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek a lze jí vypočítat z rovnice 4.6.1.1.

$$u_a = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.6.1.1)$$

Kde  $n$ ...počet měření,  $x_i$ ...naměřená hodnota,  $\bar{x}$ ...aritmetický průměr

#### Standartní nejistota typu B

Nejistoty typu B jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku, vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota typu B je dána jejich sumací.

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=0}^n u_{z_j}^2} \quad (4.6.1.2)$$

Kde  $u_{z_j}$ ...složky nejistoty měřené veličiny

#### Kombinovaná nejistota typu C

Kombinovaná nejistota je součtem nejistot typu A a B. Kombinovaná standartní nejistota dává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. Kombinovaná nejistota typu C je vypočítávána z rovnice 4.6.1.2.

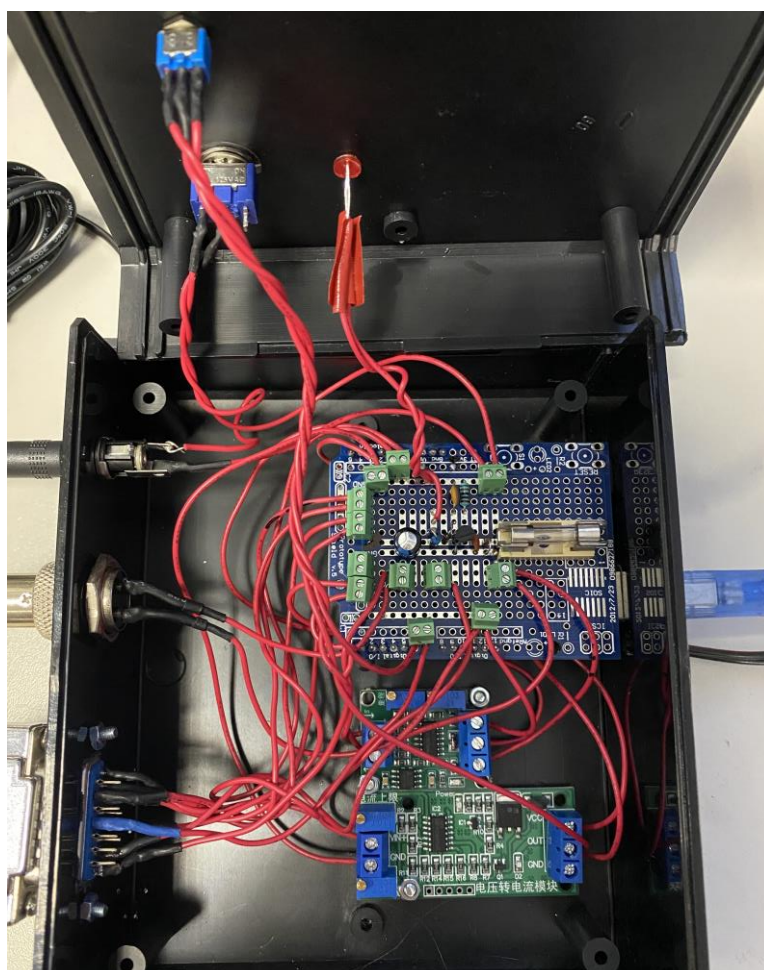
$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (4.6.1.3)$$

## 5 Výsledky

### 5.1 Realizace zařízení pro měření P–Q charakteristik

Zařízení bylo sestaveno z hardwarové, pneumatické a softwarové části. Elektronická část byla složena z univerzálního a řídicího modulu. Univerzální modul skládající se z Prototype Shield v.5, vývojové desky Arduino Uno a převodníku proudové smyčky 4–20 mA na napětí 0–5 V, byl umístěn do elektrické krabičky. Do této krabičky byl dále umístěn řídicí modul v podobě převodníku napětí 0–5 V na proudovou smyčku 4–20 mA. Uspořádání přístrojové krabičky je uvedeno na obrázku 5.1.1.

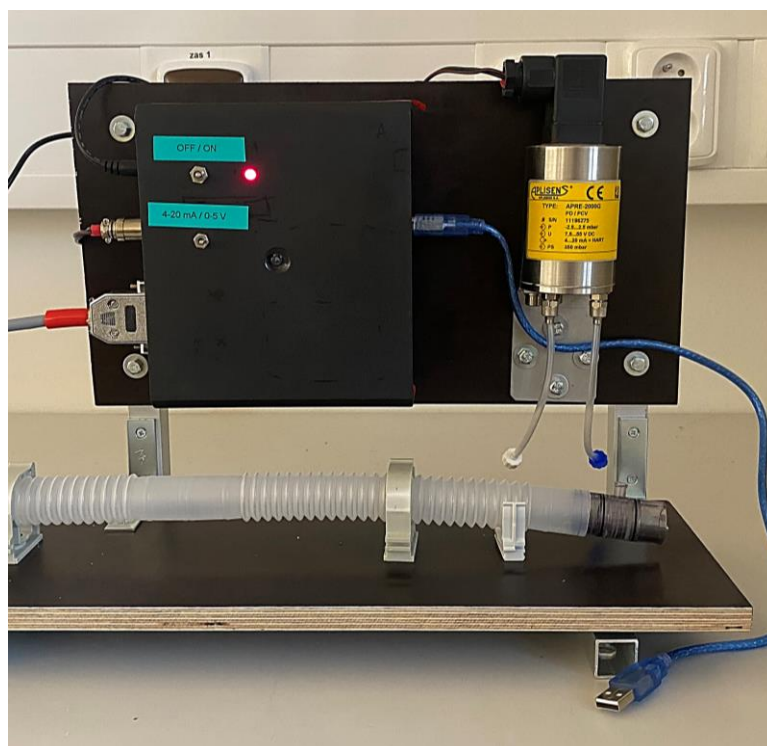
Na levé straně krabičky lze najít panel s konektory pro dané kabely. Na této straně je umístěn konektor pro napájení, pro komunikaci se senzorem a konektor pro komunikaci s Omegou FM5400/5500. Z druhé strany je umístěn konektor USB 2.0 A-B pro propojení desky Arduino Uno s počítačem.



Obrázek 5.1.1: Uspořádání přístrojové krabičky

Napájení zařízení je realizováno pomocí síťového zdroje, s požadovanou hodnotou napětí 12 VDC a je uskutečněno prostřednictvím souosého konektoru 5,5/2,1mm. Komunikace se senzorem je zajištěna pomocí kabelu dvojlinky s konektorem 20 mm GX20 - 2 piny.

Na čelním panelu přístrojové krabičky jsou umístěné dva přepínače. Horní přepínač slouží k vypnutí či zapnutí. Druhý přepínač je součástí řídicího modulu a slouží k přepnutí ovládacího signálu vstupujícího do Omegy, a to buďto napětím nebo proudovou smyčkou. Čelní panel je zároveň vybaven indikační červenou LED diodou.

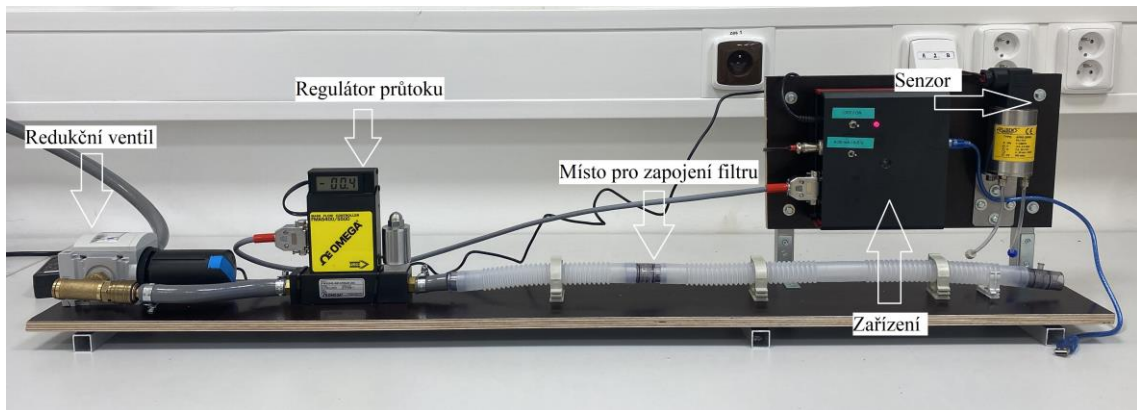


Obrázek 7.1.2: Ukázka čelního panelu zařízení spolu se senzorem Aplisens APRE 2000G

### 5.1.1 Výsledná realizace kalibrační trať

Kalibrační trať je složena z redukčního ventilu, regulátoru průtoku, vrapované hadice, proměřovaného odporového prvku, diferenčního senzoru tlaku, sestaveného zařízení, jak již bylo zmíněno výše (kapitola 4.3). To vše je ovládáno skrze počítač pomocí vytvořeného GUI.

Kalibrační trať je uchycena na překližkových deskách, které jsou přichyceny a podloženy hliníkovými profily. Takto vytvořená konstrukce zajišťuje lepší stabilitu, jednodušší přesun zařízení nebo zvýšení přesnosti měření. Zvýšené přesnosti bylo docíleno dodržením rozstupů minimálně 20 centimetrů mezi regulátorem průtoku a odporovým prvkem. V pneumatické části bylo vytvořeno místo pro zapojení akustického filtru v případě potřeby. Výsledná realizace je zobrazena na obrázku 5.1.1.1.



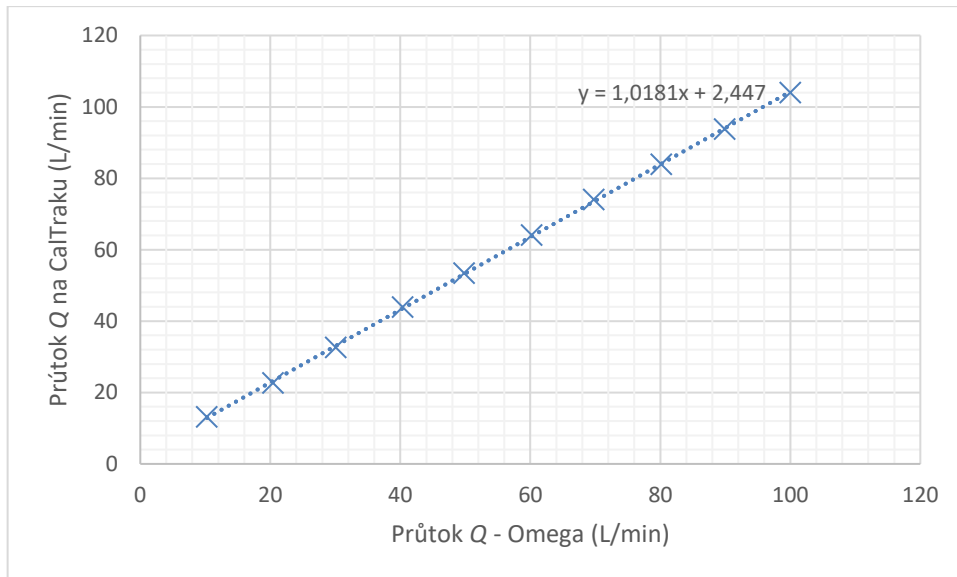
Obrázek 5.1.1.1: Sestrojená kalibrační trať

## 5.2 Vyhodnocení kalibrace diferenčního tlakového senzoru

Jak již bylo zmíněno více, senzor byl kalibrován pomocí vodního sloupce. Měření proběhlo třikrát v různých časech. U každého měření nejdříve byly experimentálně naměřeny hodnoty napětí v určité hloubce vodního sloupce, která odpovídala hodnotě tlaku. Z těchto naměřených hodnot byly vypočítány aritmetické průměry, z nichž byla vytvořena kalibrační rovnice pro dané měření. Z této rovnice byl následně vypočítán tlak, který byl porovnán s odpovídajícím tlakem, ve kterém se hadička reálně nacházela.

## 5.3 Vyhodnocení kalibrace regulátoru průtoku

Kalibrace regulátoru průtoku byla provedena jednou pomocí kalibrátoru CalTrak XL (Sierra, California, USA). Na regulátoru průtoku byl nastaven požadovaný průtok a pomocí zpětného signálu 0–5 V byla znovu vrácena hodnota průtoku protékajícího Omegou. Tyto hodnoty průtoku naměřené regulátorem průtoku a hodnoty z kalibrátoru byly proti sobě položeny a porovnány (viz. Obrázek tedy). Poté bylo z naměřených hodnot možné vytvořit kalibrační rovnici, která byla využita při přesnějším určení průtoku. Graf 5.3.1 zobrazuje hodnoty měření pomocí CalTraku XL



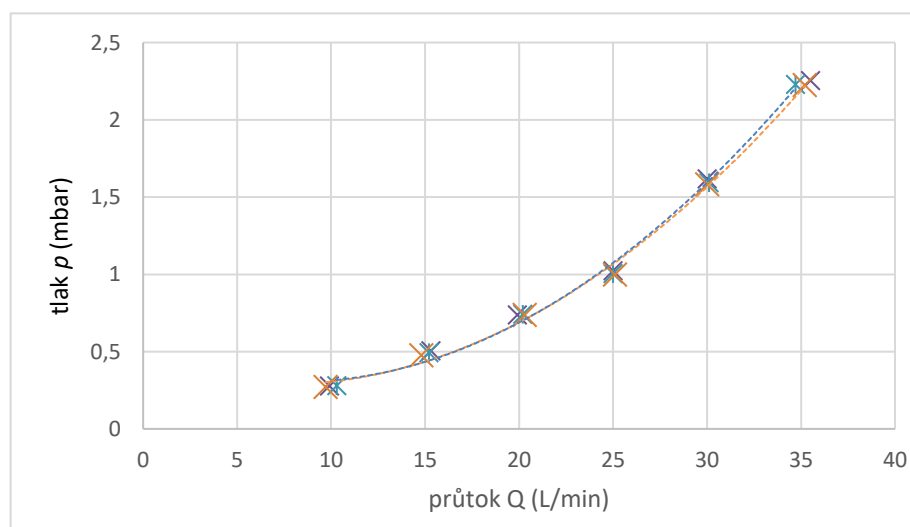
Graf 5.3.1: Zobrazení závislosti mezi snímaným průtokem na Omega a kalibrátorem CalTrakXL

## 5.4 Ověření funkčnosti přístroje

### 5.4.1 Srovnání s komerčním rezistorem Rp20

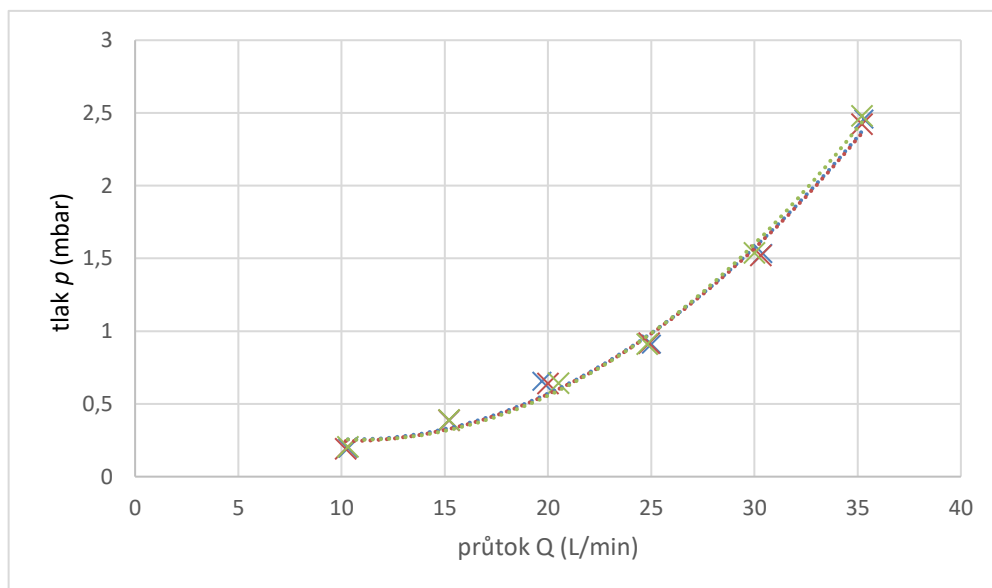
Funkčnost přístroje byla ověřena za použití komerčního kalibračního rezistoru. Tlakově-průtoková charakteristika u Pneuflo rezistoru Rp20 byla proměřena pouze do rozsahu průtoku 35 L/min, z důvodu překročení tlakového rozsahu senzoru Aplisens APRE 2000G. Pneuflo rezistor je parabolický rezistor vyrobený od společnosti Michigan Instruments.

Na grafu 5.4.1.1 je zobrazena tlakově-průtoková charakteristika parabolického rezistoru Rp20.



Graf 5.4.1.1: PQ charakteristiky pro odporový prvek Rp20, proměřováno vzestupně

Tlakově-průtoková charakteristika tohoto rezistoru Rp20 byla následně proměřena i ve směru sestupně. Hodnoty byly zaznamenány do grafu 5.4.1.2.

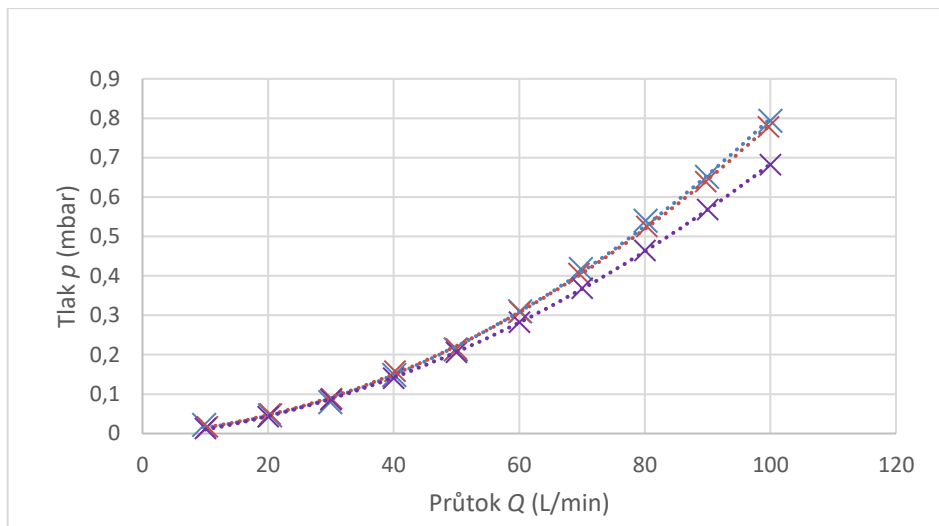


Graf: 5.4.1.2: PQ charakteristiky pro odporový prvek Rp20, proměřováno sestupně

Z uvedených grafů lze vidět, že tlakově-průtokové charakteristiky se velmi podobají.

## 5.4.2 Srovnání s odporovým prvkem AvaLite

Jako poslední srovnání byl proměřen odporový prvek AvaLite. AvaLite je průtokoměr na bázi odporu, u kterého byla provedena kalibrace již dříve na fakultě biomedicínského inženýrství. Proto může být označen jako odporový prvek se známou tlakově-průtokovou charakteristikou. Z tohoto důvodu lze využít jako prvek pro ověření správné funkce kalibrační trati. Na grafu 5.4.2 můžeme vidět dvě křivky, které byly naměřeny pomocí zkonstruovaného zařízení. Fialová křivka je pak původní naměřená kalibrace odporového prvku AvaLite.



Graf 5.4.2: Tlakově-průtoková charakteristika odporového prvku AvaLite



## 6 Diskuse

Výstupem bakalářské práce je realizované zařízení pro proměrování tlakově-průtokových charakteristik částí ventilačních obvodů. Součástí celého zařízení je kalibrační trať, která zahrnuje redukční ventil, regulátor průtoku Omega FM5400/5500. Dále zahrnuje místo pro případné připojení akustického filtru a je ukončena vrapovanou trubkou.

Zařízení umožňuje kalibrovat diferenční tlakové senzory, které pracují s proudovou smyčkou 4–20 mA. Pomocí zařízení je také možné kalibrovat regulátor průtoku Omega FM5400/5500 (Omega Engineering inc., Connecticut, USA). Ke kalibraci regulátoru průtoku se využívá zařízení CalTrackXL (Sierra, California, USA).

Hardware zařízení je tvořen vývojovou deskou Arduino Uno, na kterou je nasazena deska plošných spojů Prototype Shield v.5. Tuto desku lze rovnou spojit s vývojovou deskou Arduino Uno, za předpokladu připájení pinů. Výhodou připravené desky plošných spojů je snad manipulace a umístění součástek. Na desku plošných spojů byla připájena ochrana proti přepětí a přepólování dle vytvořeného schématu, které zajišťují ochranu především pro umístěný senzor Aplisens APRE 2000G (Aplisens, Polsko). K připravené desce byl dále připojen převodník proudové smyčky na napětí. Pomocí tohoto převodníku byla proudová smyčka převedena na napětí v rozsahu 0–5 V. Toto napětí bylo přivedeno na analogový pin A0 a dále bylo převáděno pomocí software na tlak.

Software pro zařízení byl vytvořen v prostředí MATLAB GUI. Součástí software jsou 4 záložky. První záložka slouží pro připojení vývojové desky Arduino Uno. Deska Arduino Uno zajišťuje veškerou komunikaci s uživatelem, snímání veličin a plnění příkazů. Z tohoto důvodu bylo pro připojení desky a pro její testování vytvořena samostatná záložka. Druhá záložka je vytvořena za účelem kalibrace tlakového senzoru a regulátoru průtoku a je rozdělena na dva oddíly. Třetí záložka umožňuje pracovat v rámci ručního měření tlakově-průtokových charakteristik. Poslední záložka je pro tuto práci nejdůležitější, jelikož umožňuje automatické proměrování tlakově-průtokových charakteristik.

Následně byla vytvořena kalibrační trať pomocí pneumatických komponentů uvedených výše. Poté byla kalibrační trať umístěna na vytvořenou konstrukci z překližkových desek a hliníkových profilů. Hardware zařízení byl umístěn do přístrojové krabičky a připevněn na čelo desky vedle senzoru Aplisens APRE 2000G.

Po dokončení konstrukce zařízení bylo nutné zařízení ověřit z hlediska funkčnosti, opakovatelnosti a přesnosti. Nejprve byla ověřena správnost kalibrace tlakového senzoru a proveditelnost kalibrace průtoku. Kalibrace tlakového senzoru byla prováděna pomocí vodního sloupce a opakována třikrát v různém časovém intervalu. Dále byla provedena kalibrace pomocí kalibrátoru průtoku s názvem CalTrak XL. Z naměřených dat byla

vytvořena kalibrační rovnice, pomocí které byl vypočítán kalibrovaný průtok. Kalibrovaný průtok je jedním z exportovatelných údajů.

Ověření zařízení bylo provedeno pomocí dvou obstrukčních prvků se známými tlakově-průtokovými charakteristikami. První ověření bylo realizováno pomocí Pneuflo rezistoru s hodnotou  $R_{p20}$ . Tlakově-průtoková charakteristika byla dohledána v datasheetu. Poté byly pomocí zařízení naměřeny vzestupné hodnoty a pak sestupné hodnoty. Hodnoty mohly být měřeny v rozsahu průtoku pouze od 10–35 L/min. Toto omezení bylo dáno překročením hodnoty rozsahu senzoru, která nesmí být větší než 2,5 mbar [19]. Po naměření byly následně oba grafy porovnány.

Tento postup byl opakován i u odporového prvku AvaLite. U odporového prvku AvaLite byly proměřovány hodnoty v celém rozsahu průtoku od 10–100 L/min. Při proměření hodnot pod hranicí průtoku 10 L/min ztrácí regulátor průtoku Omega FM5400/5500 danou přesnost, a proto hodnoty nebyly zahrnuty do mého měření [20].

Limitace sestaveného zařízení byly v softwarové části, kdy Arduino Uno občas vypsal chybu při přetížení hardware Arduina. Tato chyba šla jednoduše odstranit po restartování aplikace.

Další vývoj tohoto řešení bych směřovala k vylepšení kalibrační trati i softwaru zařízení. Z pohledu konstrukčních vylepšení by byla možnost přidání druhého senzoru s vyšším rozsahem měření. Mezi těmito senzory by pak mohla být možnost přepínače v hardwarovém rozhraní. Dalším vylepšením by mohlo být zvýšení uživatelské bezpečnosti a přívětivosti pomocí vytisknutí např. krytek na hliníkové profily pomocí 3D tiskárny, nebo přidání krabičky na nepoužívané součástky např. na odporové prvky.

Současné zařízení lze využít pro plně automatické měření tlakově-průtokových charakteristik částí ventilačních okruhů a mělo by naleznout svoje využití v běžné praxi.

## 7 Závěr

V rámci této práce vzniklo nové zařízení založené na kalibrační trati, na které lze měřit tlakově-průtokové charakteristiky částí ventilačních okruhů.

Univerzální modul zařízení byl vytvořen pomocí vývojové desky Arduino Uno, která umožňuje komunikaci mezi zařízením, senzorem a regulátorem průtoku. K řídicímu modulu byl přidán převodník napětí na proudovou smyčku, kterou lze použít jako jednu z variant ovládní regulátoru průtoku Omega FM5400/5500. K zařízení byla vytvořena softwarová aplikace v prostředí MATLAB GUI, která umožňuje plné ovládní zařízení a kalibraci připojeného senzoru a regulátoru průtoku.

Ověření senzoru proběhlo pomocí dvou odporových prvků s předem známou tlakově-průtokovou charakteristikou.

V současné podobě lze zařízení využívat v běžné praxi pro zrychlení procesu tvorby tlakově-průtokových charakteristik.

## Seznam použité literatury

- [1] West, Tom; Photiou, Alexander, Measurement of gas volume and gas flow, ANAESTHESIA AND INTENSIVE CARE MEDICINE, ročník 19, číslo 4, 2018, 183-188 s.
- [2] CHMELÍKOVÁ, Lucie. Srovnání přesnosti spirometrických přístrojů. Brno, 2014. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [3] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-x.
- [4] Kadlec, K., Snímače tlaku – principy, vlastnosti a jejich využití. AUTOMA [online]. 2007, (10) [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36290.pdf>
- [5] HRUŠKOVÁ, Jana, Juraj JAKUBÍK a Michal HENDRYCH. Pneumotachografie [online]. In: Brno: Masarykova univerzita v Brně, s. 7 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/www/345402/2018/Pneumotachografie\\_\\_spirometrie.pdf](https://is.muni.cz/www/345402/2018/Pneumotachografie__spirometrie.pdf)
- [6] BÍŠ, Ladislav. Návrh vysokoprůtokové clony pro ventilační experimenty. Kladno, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické.
- [7] Venturi effect. In: Shutterstock [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-vector/venturi-effect-flow-pressure-vector-illustration-1650326851>
- [8] NOSKIEVIČ, Jaromír. Mechanika tekutin. Bratislava: Alfa, 1987.
- [9] The graphical representation of the continuity equation. In: Shutterstock [online]. [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/image-vector/graphical-representation-continuity-equation-flow-ideal-2045171297>
- [10] KORF, Filip. Měřič průtoku plynu. Praha, 2022. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Jan Novák, Ph.D.
- [11] Kadlec, K., Snímače tlaku – principy, vlastnosti a jejich využití. AUTOMA [online]. 2007, (10) [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36290.pdf>
- [12] VOJÁČEK, Antonín. Proudová smyčka 4-20 mA – obecný popis. Automatizace [online]. 2014 [cit. 2022-11-07]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/proudova-smycka-4-20-ma-obecny-popis>

- [13] VOJÁČEK, Antonín. HART – Digitální komunikace po proudové smyčce. Automatizace [online]. 2014 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/hart-digitalni-komunikace-po-proudove-smycce>
- [14] POLÁK, Jiří. Hodnocení dechové práce. 2017. Master's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [15] JONES, Deric P. (ed.). Biomedical sensors. Momentum press, 2010.
- [16] Nejistoty měření [online]. In: . Vysoká škola Báňská, s. 10 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/Podklady/AT/nejistoty1.pdf>
- [17] PANOŠ, Miroslav. PROGRAMOVÁNÍ MODULU ARDUINO V PROSTŘEDÍ MBLOCK [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <http://mblock.fyzika.net/kontakt.php>
- [18] SMART DIFFERENTIAL PRESSURE TRANSMITTER [online]. [cit. 2023- 01- 22]. Dostupné z: <https://aplisens.com/apr-2000g.html>
- [19] Arduino A000066 Arduino Uno, Evaluation Board [online]. [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: [https://cz.farnell.com/arduino/a000066/arduino-uno-evaluation-board/dp/2075382?gclid=CjwKCAiA2rOeBhAsEiwA2PI7Q-Wd1Xn1y2wDLedbpOZ2QYQblxviN8VnxAmpKkm2X5jLXGCvqZRMxoC0QgQAvD\\_BwE&mckv=s\\_dc|pcrid|621552844967|plid||keyword||match||slid||product|2075382|pgrid|138503362942|ptaid|pla-890193361835|&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-PLA&gross\\_price=true](https://cz.farnell.com/arduino/a000066/arduino-uno-evaluation-board/dp/2075382?gclid=CjwKCAiA2rOeBhAsEiwA2PI7Q-Wd1Xn1y2wDLedbpOZ2QYQblxviN8VnxAmpKkm2X5jLXGCvqZRMxoC0QgQAvD_BwE&mckv=s_dc|pcrid|621552844967|plid||keyword||match||slid||product|2075382|pgrid|138503362942|ptaid|pla-890193361835|&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-PLA&gross_price=true)
- [20] OMEGA FMA 5400/FMA 5500 Mass Flow Controllers. Kanada: omega.com.
- [21] Pneuflo Parabolic Airway Resistors. Michigan Instruments [online]. Grand Rapids: Michigan Instruments, c2017 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.michiganinstruments.com/training-test-lung-simulators/ttl-technical-information/pneuflo-parabolic-airway-resistors/>
- [22]

## Příloha A: Tabulky s naměřenými rozměry

Průtok z regulátoru Omega (L/min)	Tlak (mbar)	Průtok z regulátoru Omega (L/min)	Tlak (mbar)	Průtok z regulátoru Omega (L/min)	Tlak (mbar)	Sestupně	Průtok z regulátoru Omega (L/min)	Tlak (mbar)	Průtok z regulátoru Omega (L/min)	Tlak (mbar)
9,9	0,279	10,3	0,280	9,7	0,271		35,2	2,423	35,2	2,481
15,3	0,506	15,2	0,494	14,8	0,477		30,3	1,521	30,0	1,538
19,9	0,737	20,2	0,743	20,3	0,739		24,9	0,917	24,8	0,911
25,0	1,023	25,0	1,006	25,1	1,000		20,0	0,641	20,5	0,642
30,0	1,618	30,1	1,593	30,1	1,583		15,2	0,387	15,2	0,390
35,5	2,254	34,7	2,229	35,2	2,226		10,2	0,192	10,3	0,205

## **Příloha B: Obsah přiloženého ZIP souboru**

- 1) 17PBBBBP\_483898\_Kateřina\_Heranová.pdf
- 2) Abstrakt.pdf
- 3) Abstract.pdf
- 4) Klíčová\_slova.pdf
- 5) Keywords.pdf
- 6) SW MATLAB GUI – uživatelské rozhraní
- 7) Zadání\_bakalářské\_práce.pdf