VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

PŘENOSNÉ AUTOMATIZOVANÉ PRACOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ VZDUCHOTECHNICKÝCH VELIČIN
AUTOMATIZED WORKING PLACE FOR MEASURING OF AIRFOW PARAMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. David Pozdíšek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	**Bc. David Pozdíšek**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.**
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Přenosné automatizované pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnou a realizovat plně automatizované pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin elektrických strojů, ventilátorů a ostatních zařízení.

Cíle diplomové práce:

1. Literární průzkum.
2. Návrh vzduchotechnické komory.
3. Návrh a realizace senzoriky.
4. Realizace vzduchotechnické komory.
5. Návrh zpracování měření v PC.
6. Ověřovací měření.

Seznam doporučené literatury:

ONDRUŠKA, E.; MALOUŠEK, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha, 1985.

YUNUS, A.; TURNER, H.; CIMBALA, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3nd edition. McGraff Fill: Anstralia & New Zeland, 2008.

VLACH, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá přenosným pracovištěm pro automatizované měření charakteristik závislosti tlaku na průtoku vzduchu u ventilátorů a závislosti tlakových ztrát na průtoku vzduchu u elektrických strojů a jiných zařízení. Cílem práce je návrh a realizace tohoto pracoviště s provedením ověřovacího měření.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with a portable working place for automated measuring of pressure characteristic dependence on ventilator air flow and dependence of pressure loss on air flow for electrical machines and other devices. The goal of this thesis is to design and create the working place with performance validation measure.

KLÍČOVÁ SLOVA

Automatické měření, charakteristika ventilátoru, tlaková ztráta, tlakové senzory SDP, Wilsonova mříž, Arduino DUE R3, Python

KEYWORDS

Automatic measuring, Ventilator characteristic, Pressure loss, Pressure sensors SDP, Wilson grid, Arduino DUE R3, Python

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POZDÍŠEK, David. *Přenosné automatizované pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin.* Brno, 2020. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125637. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radek Vlach.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě chci poděkovat doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za odborný dohled při vedení této diplomové práce, přínosnou spolupráci a cenné rady při řešení problémů v průběhu práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Čestně prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod dohledem vedoucího diplomové práce doc. Ing. Radka Vlacha, Ph.D. s využitím informací uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne 26. 6. 2020 ……

David Pozdíšek

OBSAH

1 ÚVOD 13

2 REŠERŠE 15

2.1 Charakteristika přenosného automatizovaného pracoviště 15

2.2 Měření průtoku 17

2.2.1 Objemové průtokoměry 17

2.2.2 Rychlostní průtokoměry 19

2.2.3 Hmotnostní průtokoměry 20

2.2.4 Průtokoměry s měřením rozdílu tlaků 22

2.3 Měření statického tlaku 27

2.4 Norma ČSN 12 3061 28

2.5 Regulace pomocného ventilátoru 28

2.6 Diferenciální senzory tlaku 29

2.6.1 Diferenciální tlakový senzor DPS 300 29

2.6.2 Diferenciální tlakové senzory Sensirion SDP 30

2.7 Rešerše řídicí jednotky 31

2.7.1 Raspberry PI 4 model B 31

2.7.2 Arduino UNO REV3 32

2.7.3 Arduino DUE R3 33

3 NÁVRH AUTOMATIZOVANÉHO PRACOVIŠTĚ 35

3.1 Ovládání a zpracování dat v PC 35

3.2 Řídicí jednotka 35

3.3 Komponenty vzduchotechnického pracoviště 35

3.3.1 Pomocný ventilátor 37

3.3.2 Usměrňovač proudění 38

3.3.3 Wilsonova mříž 38

3.3.4 Element pro měření statického tlaku 39

3.3.5 Diferenciální tlakové senzory 40

3.3.6 Závěrná klapka 41

4 REALIZACE VZDUCHOTECHNICKÉ APARATURY 43

4.1 3D tisk dílů 43

4.1.1 Wilsonova mříž 43

4.1.2 Usměrňovač proudění 46

4.1.3 Závěrná klapka 46

4.1.4 Kryty elektroniky 47

4.2 Sestava vzduchotechnického pracoviště 49

4.3 Zapojení řídicí jednotky 50

5 OVLÁDÁNÍ VZDUCHOTECHNICKÉHO PRACOVIŠTĚ 52

5.1 Regulace pomocného ventilátoru 52

5.2 Uživatelské rozhraní 55

5.2.1 Připojení k řídicí jednotce 56

5.2.2 Nastavení parametrů 56

5.2.3 Manuální ovládání 57

5.2.4 Automatické měření 57

5.2.5 Zpracování dat 58

5.3 Zpracování měřených veličin 58

5.4 Komunikace řídicí jednotky Arduino s počítačem 59
5.4.1 Program řídicí jednotky 59
5.4.2 Program Python 60
6 OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ 63
6.1 Měření charakteristiky ventilátoru 63
6.2 Měření tlakové ztráty vzduchového filtru 65
7 ZÁVĚR 67
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 68
9 SEZNAM OBRÁZKŮ 70
10 SEZNAM ZKRATEK 72
11 SEZNAM PŘÍLOH 73

1 ÚVOD

V době 21. století letí věda a technika mílovými kroku kupředu, kdy se každým dnem zrodí nový nápad, realizují se stále více fascinující projekty nebo dochází například díky masové výrobě ke stále se snižujícím pořizovacím cenám elektroniky. To má ovšem i negativní dopad na kvalitu a dlouhodobou použitelnost těchto zařízení.

Malé i velké elektrické stroje mají nezřídka problém se správným dimenzováním chladícího systému. Příčin této skutečnosti je samozřejmě více, ale podstatným základem pro správnou konstrukci jakéhokoliv systému je dobrá znalost jednotlivých komponent a celku jako takového.

Cílem této diplomové práce je návrh přenosného automatizovaného pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin, jehož úkolem bude určování základních fyzikálních charakteristik ventilátorů a jiných zařízení. Bude se jednat o měřící aparaturu, kterou bude možné stanovit závislost vyvíjeného statického tlaku na průtoku média u ventilátoru. Zároveň půjde touto aparaturou analyzovat i zařízení, které bude součástí ventilačního systému, kdy bude určena jeho charakteristika tlakové ztráty v závislosti na průtoku média. Tímto způsobem budou objasněny podstatné vlastnosti dimenzované sestavy umožňující návrh optimálního řešení.

2 REŠERŠE

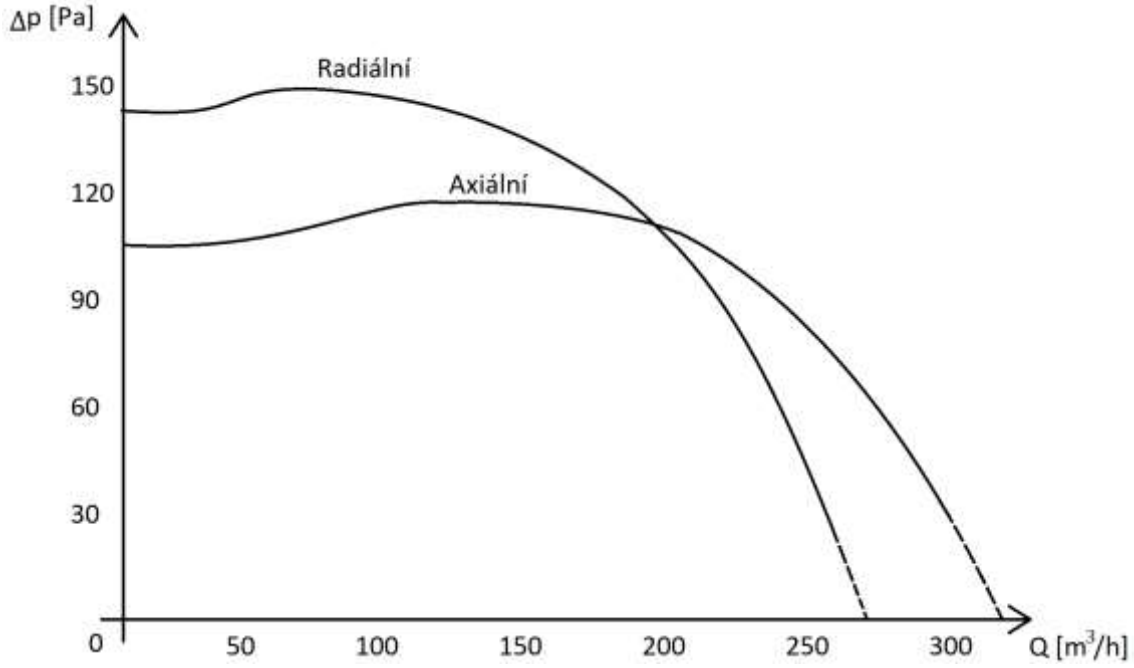
Před samotnou realizací přenosného automatizovaného pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin se bude tato práce zabývat stručnou rešerší toho, co má být obsahem žádaných výstupních charakteristik a jakým způsobem budou získána data k jejich vytvoření.

Bude kladen důraz na zpracování obecného přehledu současně možných způsobů měření průtoku vzduchu v potrubí. Dále se rešerše bude zabývat měřením statického tlaku, použitím a regulací pomocného ventilátoru, popisem vybraných tlakových diferenciálních senzorů a komerčně dostupných malých řídicích jednotek.

2.1 Charakteristika přenosného automatizovaného pracoviště

Výsledkem této práce má být realizace navrženého automatizovaného pracoviště, které má sloužit k měření vzduchotechnických veličin elektrických strojů, ventilátorů a ostatních zařízení.

Konkrétně se jedná o určení charakteristik závislosti statického tlaku na průtoku vzduchu u ventilátoru. Jde o jednu ze základních charakteristik ventilátorů pro určení jejich fyzikálních vlastností. Na Obrázku 1 je zobrazena typická charakteristika axiálního a radiálního ventilátoru.

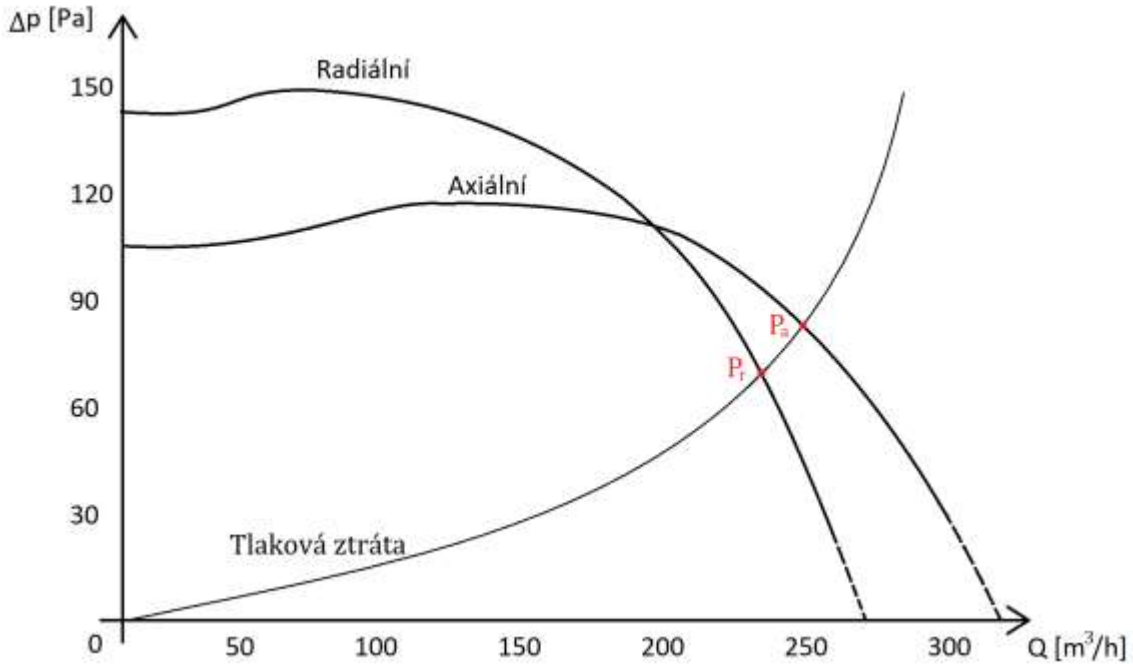


Obrázek 1 - Typické charakteristiky ventilátorů

Z výše uvedeného grafu vyplývá základní rozdíl mezi axiálním a radiálním ventilátorem. Axiální většinou dosahuje vyšších hodnot maximálního průtoku vzduchu za cenu nižšího maximálního statického tlaku. U obou typů se může, ale nemusí,

v charakteristice projevovat sedlo neboli pokles maximálního tlaku při malém průtoku vzduchu. Případně se může sedlo projevit i v jiné části charakteristiky, kdy dochází ke krátkodobé stagnaci tlaku při zvyšujícím se průtoku.

Další použití automatizovaného pracoviště spočívá v určení tlakových ztrát různých zařízení použitých v kanále proudícího vzduchu. Nejčastěji se jedná například o chladiče a filtry. Tato charakteristika bude opět stanovena v závislosti na průtoku média. Její typický průběh je zobrazen na Obrázku 2. Tyto dvě standartní charakteristiky se používají ke stanovení pracovního bodu ventilátoru. Jedná se o průsečík obou křivek znázorněný bodem P_a respektive P_r, kde P_a je pracovní bod použitého axiálního a P_r radiálního ventilátoru pro konkrétní tlakovou ztrátu.



Obrázek 2 - Typická charakteristika tlakové ztráty

U navrženého pracoviště je požadována variabilita velikosti měřených zařízení. Cílem je vytvořit vzduchotechnické potrubí o kruhovém průměru 100 mm s využitím elektroniky, kterou bude možno použít i pro větší průměry a případně i pro kanály obdélníkového průřezu.

Při návrhu pracoviště je potřeba určit, jakým způsobem budou získávány potřebné vzduchotechnické veličiny. Je nutné použít zařízení pro stanovení průtoku a statického tlaku vzduchu, navrhnout metodu pro získání celého průběhu charakteristik a vybrat vhodnou řídicí jednotku. Ta bude zajišťovat sběr dat, ovládání jednotlivých zařízení automatizovaného pracoviště a komunikaci s připojeným počítačem.

2.2 Měření průtoku

Existuje několik způsobů pro stanovení průtoku média daným kanálem, přičemž pojem průtok je užíván pro označení rychlosti proudění nebo hmotnostního a objemového průtoku.

Objemový průtok Q_v udává objem média, které proudí potrubím za jednotku času. Předpokladem správného měření je zaplnění celého potrubí tekutinou o známé ploše jeho průřezu. Při měření plynů je vhodné provádět korekce kvůli stlačitelnosti proudícího média. Hmotnostním průtokem Q_m je označována hmotnost média, které projde potrubím za jednotku času.

V následují části jsou uvedeny vybrané způsoby měření průtoku vzduchu, které jsou rozděleny na základní typy měřidel. Patří mezi ně: [1]

- objemové průtokoměry
- rychlostní průtokoměry
- hmotnostní průtokoměry
- průtokoměry využívající rozdílu tlaků

2.2.1 Objemové průtokoměry

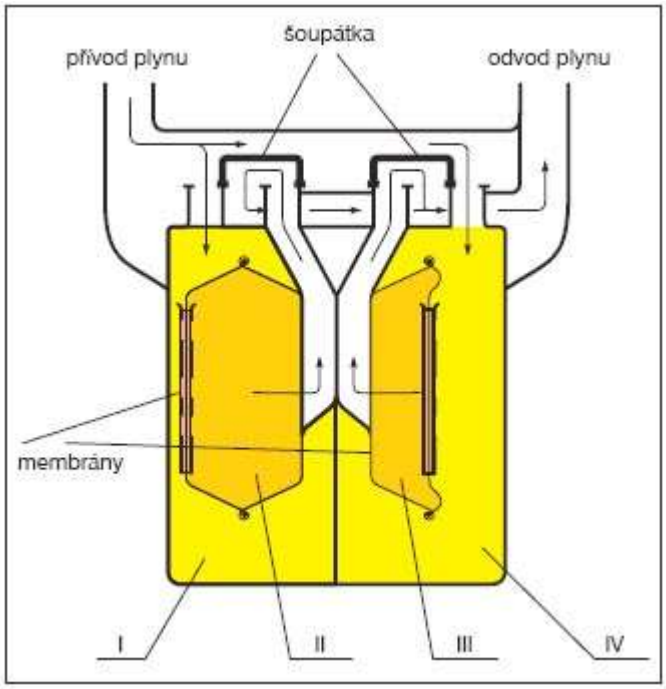
Princip objemových průtokoměrů je založen na odměřování postupně naplňovaných prostor o stejném objemu. Součtem celkového počtu těchto prostor je získán celkový objem proudící potrubím za jednotku času. Průtok je poté obecně vypočítán následujícím vztahem: [2,3]

$$Q_V = \frac{dV}{dt} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (1)$$

, kde Q_V je objemový průtok, V je celkový objem kapaliny a t je čas.

Membránový plynoměr

Je využíván například u přívodů zemního plynu do domácností. Jeho konstrukce se skládá ze dvou skříní, které jsou dále rozděleny na dvě komory. Oddělení komor je zajištěno koženými membránami, tak vznikají prostory I až IV se shodným objemem. Šoupátkovými rozvody je zajištěno postupné plnění a vyprazdňování prostor. Tímto mechanismem je zajištěno počítání cyklů, respektive měření celkového průtoku plynu. Průtokoměry tohoto typu je možno měřit rozsah od 0,1 až po 75 $\mathrm{m^3/h}$ s přesností přibližně 2 %. [2,4]

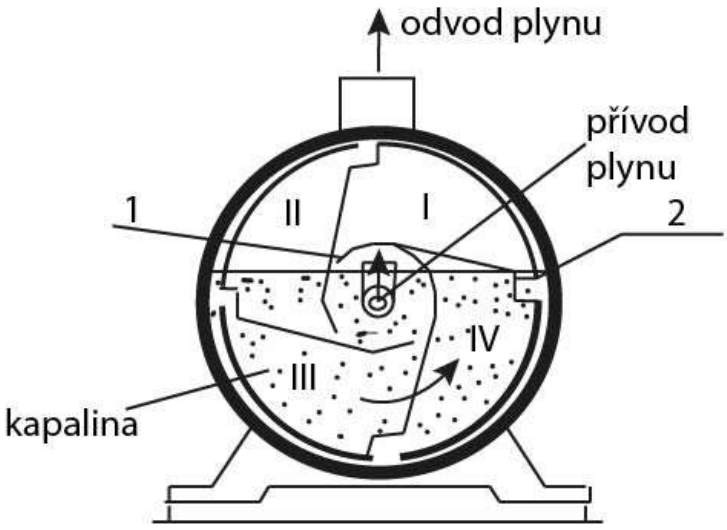


Obrázek 3 - Membránový průtokoměr [4]

Bubnový plynoměr

Využívá se většinou v laboratořích pro přesná ověřovací měření. Vysoká přesnost je zajištěna kapalinou, která z části vyplňuje válcovou nádobu, čímž jsou přesně utěsněny komory I až IV o stejném objemu.

Přívod plynu je realizován v ose otáčení bubnu s lopatkami, které jsou tvarovány tak, aby se ve stejný moment uzavřela kapalinou štěrbina 1 a otevřela štěrbina 2. Odtud se postupně plní jednotlivé komory plynem, který ústí ven z bubnu štěrbinou umístěnou nad hladinou kapaliny. Jako kapalina může být využita například voda nebo olej. [2]



Obrázek 4 - Bubnový plynoměr [2]

2.2.2 Rychlostní průtokoměry

Způsob měření průtoku rychlostními průtokoměry je založen na nepřímé metodě, kdy je nejprve změřena rychlost proudícího média a při znalosti průřezu potrubí je následně vypočten samotný průtok. Výpočet je dán vztahem: [3]

$$Q_v = v \cdot S \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (2)$$

, kde Q_v je objemový průtok, v je střední rychlost a S je průřez potrubí.

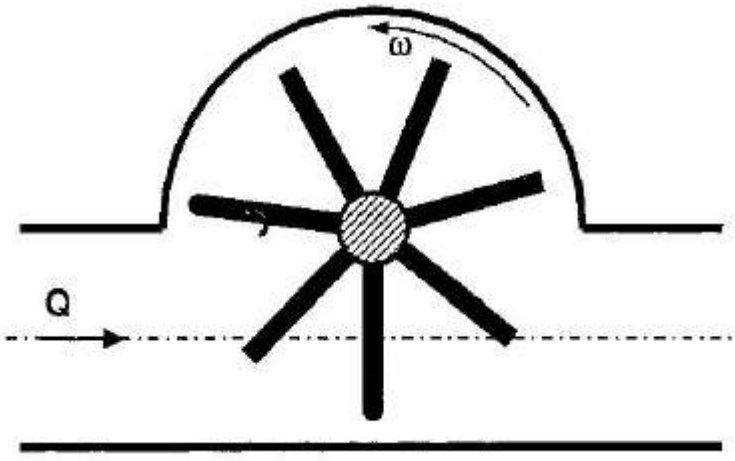
Turbínové a lopatkové průtokoměry

Skládají se z rotoru s lopatkami, který může volně rotovat. Turbínové průtokoměry mají axiální uložení a lopatkové jsou naopak uloženy radiálně. V potrubí dochází vlivem proudění média k roztočení rotoru, jehož otáčky se snímají bezdotykovým například indukčním čidlem. Takto je získán signál s napěťovými pulzy, který reprezentuje frekvenci otáčení a je přímo úměrný střední rychlosti proudění. Nevýhodou je vysoká nepřesnost při malých rychlostech proudícího média. [2,3]

Schéma radiálního lopatkového průtokoměru je znázorněno na Obrázku 5. Výpočet objemového průtoku je dán Eulerovou turbinovou rovnicí, která je upravena do následujícího vztahu: [1]

$$Q_v = \frac{f - s}{k} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (3)$$

, kde Q_v je objemový průtok, f je frekvence otáčení, k je konstanta úměrnosti a s je skluz, který je úměrný zatěžovacímu momentu rotoru.



Obrázek 5 - Radiální lopatkový průtokoměr [1]

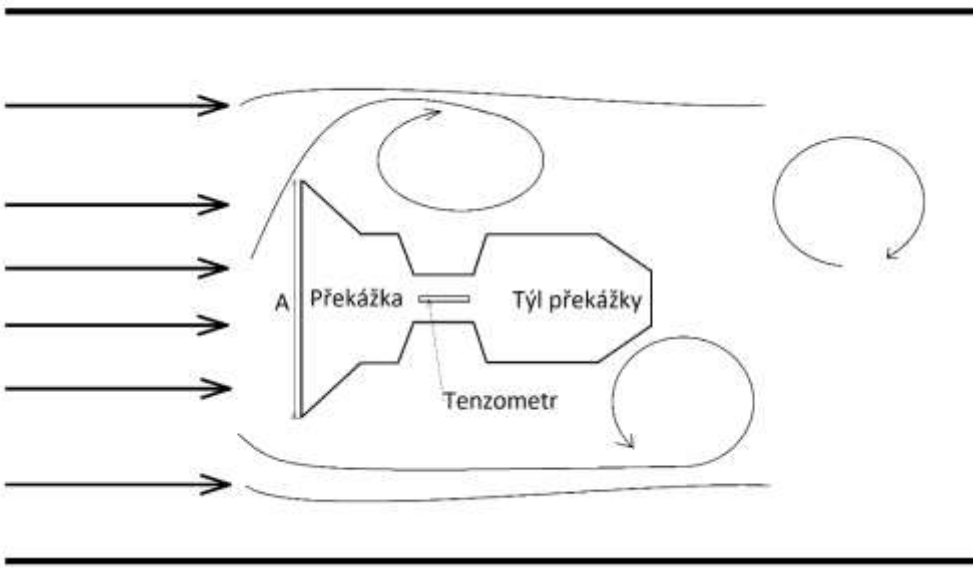
Vírové průtokoměry

Princip vychází z Karnamových vírů, kdy je do potrubí vložena překážka neaerodynamického tvaru. Ta může mít různé tvary například překážka ve tvaru T, která je zobrazena na Obrázku 6. Proudící médium kolem ní střídavě vytváří víry na obou

stranách, které způsobují deformaci překážky. Deformace lze měřit pomocí tenzometru, čímž je získána frekvence vzniku vírů. Rychlost průtoku média je dána vztahem: [2]

$$v = f \cdot \frac{A}{Sr} \qquad \text{[m/s]} \qquad (4)$$

, kde *f* je frekvence kmitání týlu překážky, *A* je šířka překážky a *Sr* je Strouhalovo číslo. To je závislé na poměru šířky překážky a průměru potrubí a na tvaru překážky.



Obrázek 6 - Překážka vírového průtokoměru

Výhody použití vírových průtokoměrů spočívají v lineární závislosti rychlosti průtoku na snímané frekvenci a v absenci pohyblivých částí. Nevýhodou je velikost tlakové ztráty a špatná přesnost měření při malých rychlostech průtoku média.

2.2.3 Hmotnostní průtokoměry

Hmotností průtok lze stanovit nepřímo výpočtem z dat naměřených rychlostními nebo objemovými průtokoměry. Je-li znám objemový průtok a hustota proudícího média potrubím, lze hmotnostní průtok vypočítat následujícím vztahem: [1]

$$Q_m = Q_v \cdot \rho \qquad \text{[kg/s]} \qquad (5)$$

, kde Q_m je hmotnostní průtok, Q_v je objemový průtok a ρ je hustota proudícího media.

Tímto způsobem je ovšem ovlivněna hodnota měřené veličiny změnami hustoty, tlaku, viskozity a teploty média. Z tohoto důvodu se v současné době začaly využívat i přímé metody měření hmotnostního průtoku. Jedná se zejména o užití Coriolisova průtokoměru a tepelného hmotnostního průtokoměru, který stanovuje hmotnostní průtok měřením rozložení tepla mezi dvěma místy potrubí. [2,3]

Coriolisův průtokoměr

Zařízení se skládá z jedné nebo více trubic nejčastěji ve tvaru písmene U. Tyto trubice jsou rozkmitány externím budičem a díky proudícímu médiu, na které působí Coriolisova síla, dochází k jejich zkroucení a k fázovému posuvu kmitů. Z deformace snímané dvěma senzory je později určen moment působící na trubici. Nejčastěji se využívají magnetické a optické polohové senzory. Fázový posuv a moment působící na trubici jsou přímé veličiny hmotnostního průtoku, jedná se tedy o přímou metodu. Působící moment je dán následujícím vztahem: [2,5]

$$M = 2 \cdot \omega \cdot Q_m \cdot \int_0^L l \cdot dl = \omega \cdot Q_m \cdot L^2 \qquad [\mathrm{N} \cdot m] \qquad (6)$$

, kde ω je úhlová rychlost kmitání, Q_m je hmotnostní průtok, l je vzdálenost trubice od osy rotace a L je celková délka trubice.

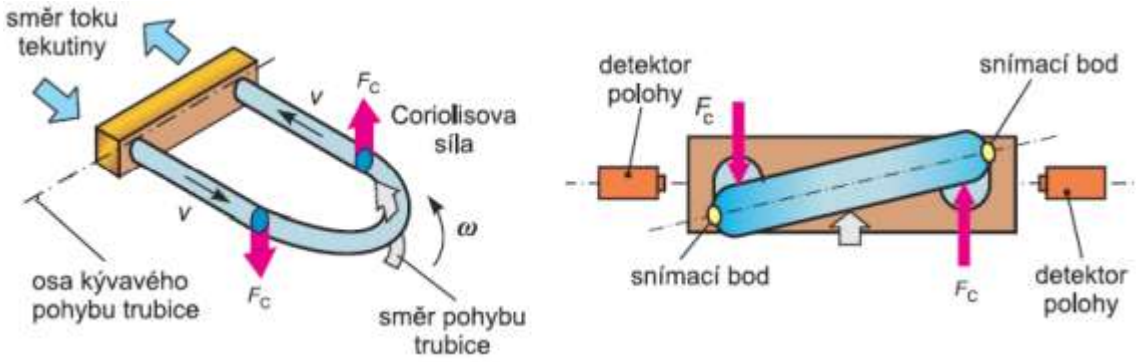
Výsledný hmotnostní průtok je získán ze vztahu: [5]

$$Q_m = \frac{M}{\omega \cdot L^2} \qquad [\mathrm{kg/s}] \qquad (7)$$

, kde M je moment působící na trubici, ω je úhlová rychlost kmitání a L je celková délka trubice. Dále lze přes hustotu média spočítat objemový průtok.

Trubice průtokoměru jsou nejčastěji vyrobeny z nerezové oceli. Mohou mít i jiný tvar než zmíněný tvar písmene U, ale způsob snímání je stále stejný. Výhodou je vysoká přesnost až ± 0,1 %, možnost měření dalších fyzikálních veličin (hustota, viskozita a teplota), univerzální použití pro kapaliny i plyny a velký rozsah pracovních podmínek. Měření lze provádět při tlaku až do $3 \cdot 10^7$ Pa měřeného média v prostředí od -240 do 200 °C. Měření není závislé na profilu proudění.

Používá se v řadě technických odvětví pro měření kapalin, od tekutých paliv, silikonových olejů, zubní pasty až po nejrůznější plyny. Obzvláště důležité je měření zkapalněných plynů, které dosahují nízkých teplot. [2,6]



Obrázek 7- Coriolisův průtokoměr [5]

Tepelný hmotnostní průtokoměr

Měření vychází ze závislosti přechodu tepla mezi zdrojem tepla a okolím na hmotnostním průtoku. Okolím je myšleno médium proudící potrubím.

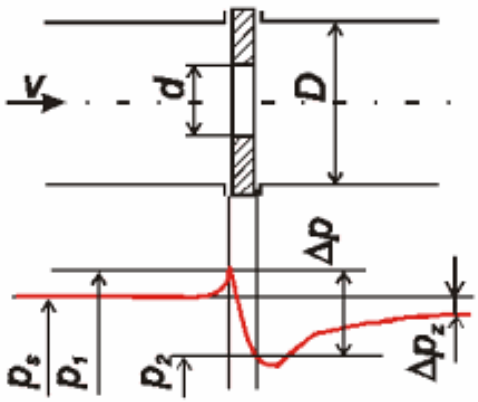
Typicky se využívá termoanemometr, což je elektricky vyhřívaná sonda, která bývá tvořena platinovým drátkem do průměru 1 mm. Drátek je standardně zahříván na teplotu 200 až 500 °C. Je měřena teplota proudícího média, které přijímá teplo ze sondy závislé na hustotě, tepelné vodivosti, rychlosti proudění a na samotné teplotě tekutiny.

Existují dva způsoby měření termoanemometrem. Sondu lze napájet konstantním proudem, kde je měřena teplota média, nebo je udržována konstantní teplota sondy a je měřen proud. V obou případech jsou teplota i napájecí proud přímo závislé na hmotnostním průtoku. [3]

2.2.4 Průtokoměry s měřením rozdílu tlaků

Častými průtokoměry používanými v průmyslu jsou právě zařízení založená na snímání tlakového rozdílu před a za škrtícím elementem. Jedná se například o clony, dýzy a Venturiho dýzy. Další často využívané průtokoměry jsou založené na měření rozdílu celkového a statického tlaku, například Pitotova trubice, Prandtlova trubice, kolenový průtokoměr, Wilsonova mříž a další.

Na Obrázku 8 je zobrazen průběh statického tlaku v okolí škrtícího elementu. Při použití těchto průtokoměrů je měřen vyšší tlak p_1 před clonou nebo dýzou a nižší tlak p_2 za tímto elementem. Statické tlaky p_1 a p_2 jsou měřeny použitím standartních diferenčních tlakových senzorů. Každé zařízení tohoto typu vykazuje určitou tlakovou ztrátu. [3]



Obrázek 8 - Průběh statického tlaku v okolí škrtícího elementu [3]

Popis fyzikálních veličin z Obrázku 8:

v … rychlost proudění média
d … průměr průduchu škrtícího elementu
D … vnitřní průměr použitého potrubí
p_s … počáteční statický tlak
p_1 … měřený zvýšený statický tlak před škrtícím elementem
p_2 … měřený snížený statický tlak za škrtícím elementem
Δp … rozdíl mezi měřenými tlaky p_1 a p_2
Δp_z … tlaková ztráta použitého škrtícího elementu

Výsledný objemový průtok je vypočten z naměřených statických tlaků p_1 před a p_2 za škrtícím elementem. K výpočtu lze použít následující vztah: [2]

$$Q_v = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho}} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (8)$$

, kde α je průtokový součinitel, ε je expanzní součinitel, S je průřez potrubí a ρ je hustota proudícího media.

Průtokoměry měřící rozdíl mezi celkovým a statickým tlakem lze považovat za rychlostní sondy. Celkový tlak je složen ze statického a dynamického tlaku, proto je při rozdílu celkového a statického tlaku získán tlak dynamický, ze kterého je následně vypočtena rychlost proudění média podle následujících vztahů: [2]

$$p_c = p_s + p_d = p_s + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \qquad [\mathrm{Pa}] \qquad (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} \qquad [\mathrm{m/s}] \qquad (10)$$

, kde p_c je celkový tlak, p_s je statický tlak, p_d je dynamický tlak, ρ je hustota a v je rychlost proudícího média. Výsledný objemový průtok je získán použitím rovnice (2).

Clona

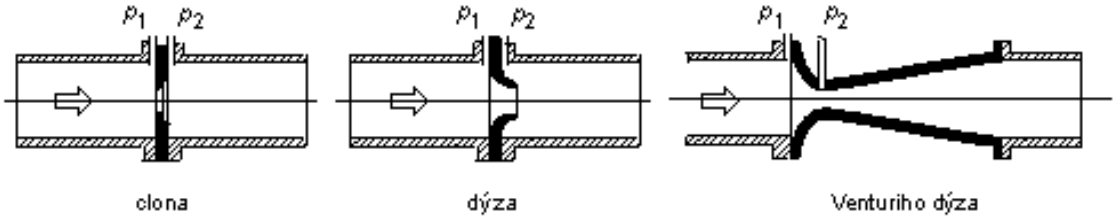
Existuje několik základních typů, mezi které se řadí například normalizovaná soustředná clona. Jde o kruhový škrtící element s otvorem, jehož střed leží na ose potrubí. Průměr škrtícího otvoru se volí podle charakteru měřeného média, musí ale vždy být menší než průměr samotného potrubí. Clony se používají pro potrubí o průměru minimálně 50 mm, kdy jsou kladeny vysoké požadavky na hladké stěny kanálu a na přímost určité délky před i za měřícím elementem kvůli eliminaci vírového proudění.

Vyznačuje se relativně velkou tlakovou ztrátou, jelikož se před i za samotnou clonou tvoří víry. Z tohoto důvodu je výhodnější použití Venturiho dýzy, u které nedochází v proudícím médiu k nežádoucímu víření. Rozdíl mezi clonou a Venturiho dýzou je patrný z Obrázku 9. [2,3]

Venturiho dýza

Podobně jako u clony se i u Venturiho dýzy snímá vyšší statický tlak p_1 před měřícím elementem a nižší tlak p_2 ve zúženém kuželovém konfusoru. Po zúžení následuje difuzor, ve kterém se tlak postupně vrací na téměř shodnou hodnotu, kterou měl před Venturiho dýzou. Nedochází k vytváření vírů, čímž je zajištěna menší tlaková ztráta.

Objemový průtok lze získat pomocí vztahu (7). Výhodou je velká přesnost měření, problémem je ovšem vysoká pořizovací cena. Z tohoto důvodu nebývá použití Venturiho dýzy častým řešením pro zjištění průtoku média potrubím. [3]



Obrázek 9 - Porovnání clony, dýzy a Venturiho dýzy [2]

Dýza

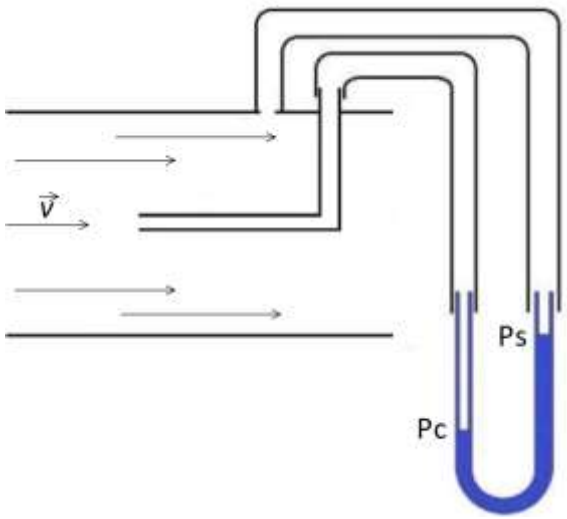
Škrtící element tohoto typu je střední cestou mezi clonou a Venturiho dýzou. Měření je přesnější než při použití clony. Nicméně není tak přesné jako při použití Venturiho dýzy a zároveň tlaková ztráta je vyšší, jelikož dýza nedisponuje difuzorem.

Výhodou pro její použití je možnost měření tekutin s obsahem pevných částic, také pořizovací cena je nižší než v případě Venturiho dýzy. Objemový průtok je vypočten opět použitím rovnice (7) při měření tlaku p_1 a p_2. [3]

Pitotova trubice

Pitotova trubice se skládá z tenké trubičky zahnuté do pravého úhlu, která je otočena ústím kolmo proti směru proudění média. Rychlost proudění média se v ústí trubičky zastaví téměř na nulu, čímž dochází ke změně kinetické energie na energii potenciální. Uvnitř zahnuté trubičky odpovídá potenciální energie celkovému tlaku p_c. Statický tlak p_s je snímán na okraji dále od ústí.

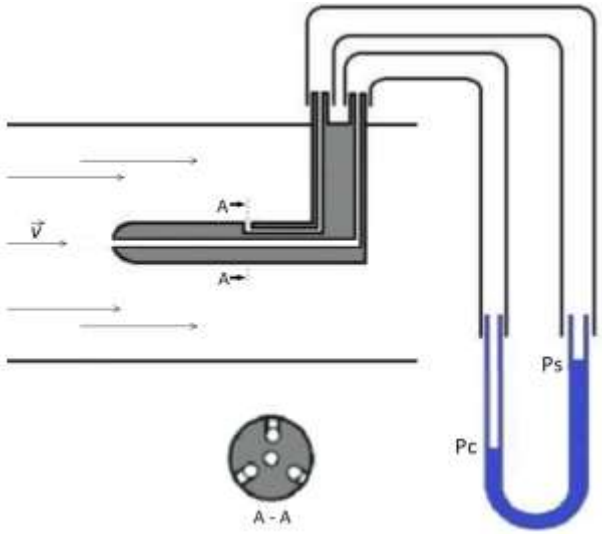
Jedná se o jeden z nejstarších a nejjednodušších způsobů měření průtoku média. Nevýhodami jsou rozdílná místa snímání celkového a statického tlaku, kdy může docházet k nepřesnostem, dále je možné měřit pouze tekutiny bez pevných částic, jinak by mohlo dojít k zanesení trubičky. [2,3]



Obrázek 10 - Schéma Pitotovy trubice

Prandtlova trubice

Hlavním rozdílem oproti Pitotově trubici je snímání celkového tlaku p_c a statického tlaku p_s v jednom místě. Prandtl zjistil, že na povrchu válce s kulovitým koncem umístěným proti směru proudění média se dynamický tlak blíží nule. To umožňuje snímat celkový tlak otvorem v kulovém konci a statický tlak štěrbinami v těle jedné válcové sondy. [3]



Obrázek 11 - Schéma Prandtlovy trubice

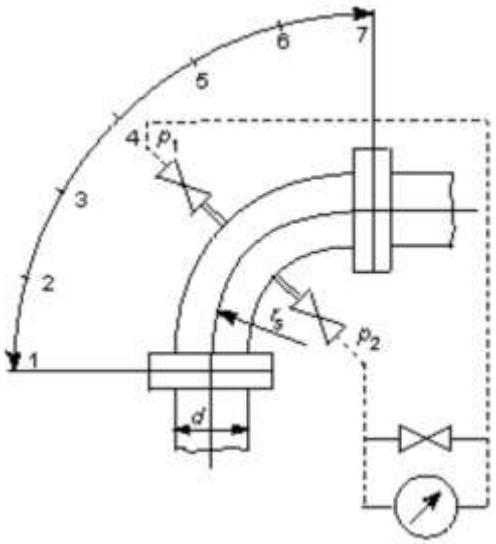
Kolenový průtokoměr

Při průtoku média zakřiveným kanálem vzniká vlivem změny směru proudu vzduchu rozdílu statických tlaků a rychlostí v radiálním směru zakřivení. V části většího oblouku kolene vzniká vyšší tlak a v části menšího oblouku naopak menší tlak. K největšímu rozdílu tlaku oproti přímým částem potrubí dochází v ose souměrnosti kolena, čemuž odpovídá pozice 4 na Obrázku 12, kde je zobrazen způsob snímání diference tlaků p_1 a p_2. Výsledný objemový průtok je vypočten ze vztahu: [2]

$$Q_v = \alpha_K \cdot S \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (11)$$

, kde α_K je empirický průtokový součinitel kolena, S je plocha průřezu potrubí a ρ je hustota proudícího média. Hodnota α_K je závislá na geometrii kolena a je zjišťována experimentálně. Uvedený vztah platí pro Reynoldsovo číslo Re > 65 000.

Rozdíl měřených tlaků je menší než u ostatních metod, výhodou ale je menší tlaková ztráta. Mezi další výhody patří možnost měření nejrůznějších nehomogenních látek, pěnících kapalin a jiných médií nevhodných u ostatních metod. [2]

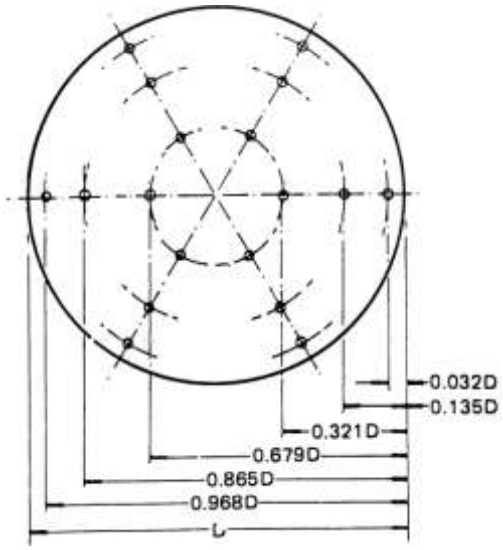


Obrázek 12 - Schéma kolenového průtokoměru [2]

Wilsonova mříž

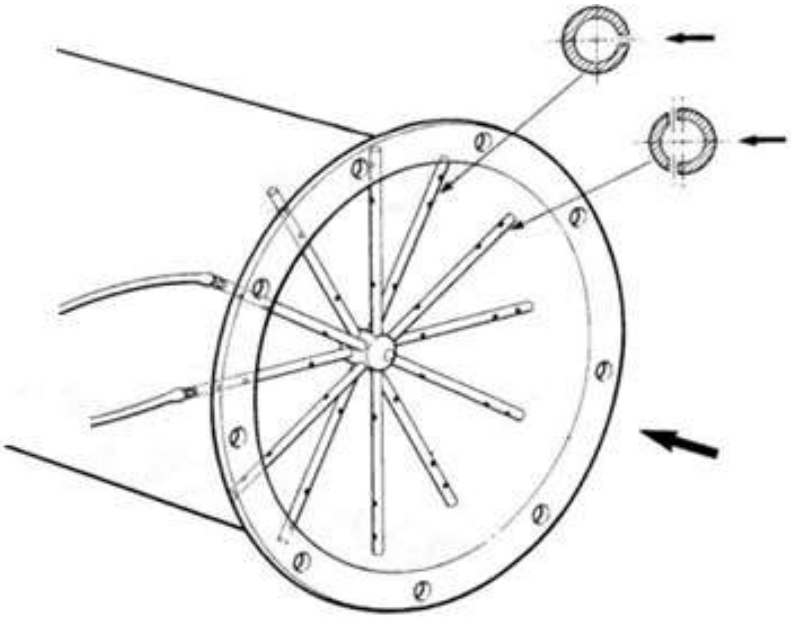
Mříž je složena nejčastěji z kulatých trubek, které jsou na koncích zaslepeny a jsou rovnoměrně uspořádány, může být použita v potrubí kruhového i obdélníkového průřezu. Trubky obsahují vstupní otvory pro měření celkového tlaku, které jsou umístěny proti směru proudění, a otvory pro měření statického tlaku, které jsou umístěny po směru nebo kolmo k proudícímu médiu. Výsledný diferenční tlak je obdobou dynamického tlaku, který slouží k výpočtu objemového průtoku.

Je nutné, aby vstupní otvory byly správně v mříži rozmístěny, aby se hodnoty dílčích tlaků průměrovaly ve spojovacích bodech mříže obdélníkového průřezu, případně ve středovém náboji mříže kruhového průřezu. Používá se rozdělení odpovídající pravidlům Log-linear, které je znázorněno na Obrázku 13. Takto rozmístěnými otvory lze ve výsledku získat přesnou střední hodnotu rychlosti proudění. [7]



Obrázek 13 - Pravidla rozložení Log-linear [8]

Výhodou Wilsonovy mříže je velmi malá tlaková ztráta a zprůměrování měřených tlaků z více bodů rovnoměrně rozdělených v celém průřezu potrubí. Nevýhodou je možnost měření pouze čistých médií ideálně bez pevných částí, jelikož by mohlo dojít k ucpání vstupních otvorů. [7]



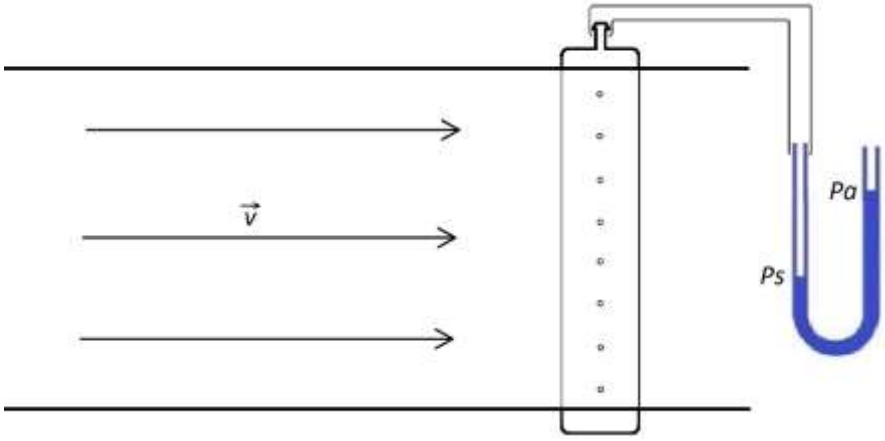
Obrázek 14 - Kruhová Wilsonova mříž [1]

2.3 Měření statického tlaku

Žádanou veličinou charakteristiky ventilátorů a jiných zařízení je právě statický tlak, který je nutno stanovit v závislosti na průtoku média. K měření průtoku vzduchu bude využita jedna z výše uvedených metod, ovšem statický tlak musí být měřen nezávisle, aby bylo dosaženo co největší přesnosti.

Snímat statický tlak je možné pouze v jednom bodě pomocí diferenčního tlakového senzoru, který odčítá nižší atmosférický tlak od vyššího tlaku z potrubí. Tímto způsobem je získán relativní tlak v potrubí vzhledem k okolí. Pro vyšší přesnost je doporučeno snímat statický tlak v potrubí ve více bodech a z naměřených hodnot udělat aritmetický průměr.

Jednou z metod, jak toho lze dosáhnou pomocí jediného diferenčního senzoru, je využití více štěrbin ve stejném místě po obvodu potrubí. Štěrbiny jsou souměrně rozděleny po obvodu potrubí kolmo ke směru proudění média. Z vnějšku je umístěn dutý prstenec s jediným vyústěním, na který je připojena hadička vedoucí do tlakového senzoru. V dutém prstenci jsou průměrovány hodnoty tlaků z jednotlivých štěrbin. Schéma elementu pro měření statického tlaku je zobrazeno na Obrázku 15.



Obrázek 15 - Element pro měření statického tlaku

2.4 Norma ČSN 12 3061

Během měření ventilátorové charakteristiky dochází k problému stanovení dílčích hodnot pro malé tlaky. Kompletní charakteristika by měla začínat z bodu, kde je hodnota průtoku média na ose x nulová a zároveň hodnota tlaku na ose y maximální. Konečný bod by měl být při nulovém tlaku na ose y a maximálním průtoku na ose x. Vlivem například třecích tlakových ztrát v potrubí a tlakových ztrát měřících elementů není možné změřit část charakteristiky blížící se nulovým hodnotám tlaku.

Technická norma ČSN 12 3061 stanovuje možnost kompenzace tlakových ztrát v potrubí použitím pomocného ventilátoru. Na Obrázku 1 a 2 si lze všimnout částí charakteristik, které jsou zobrazeny čerchovanou čarou. Navržené automatizované pracoviště bude využívat pomocný ventilátor ke stanovení právě těchto částí ventilátorových charakteristik.

2.5 Regulace pomocného ventilátoru

Automatizované pracoviště bude využívat pomocný ventilátor dvěma způsoby. Bude sloužit ke kompenzaci tlakových ztrát při měření ventilátorových charakteristik a také k určení závislosti tlakových ztrát jiných elektrických zařízení na průtoku média.

Tato studie navazuje na předcházející práce, které využívaly pomocný asynchronní jednofázový ventilátor s kondenzátorem. Zároveň má být navržená elektronika vhodná i pro větší potrubí s výkonnějšími ventilátory, kde nelze využít například stejnosměrných motorů u nichž je možná regulace pomocí PWM. Požadavkem bylo využití dříve zakoupených pomocných ventilátorů, jejichž otáčky byly řízeny triakovým regulátorem s potenciometrem.

Regulace otáček jednofázových asynchronních motorů s kondenzátorem je obtížná právě kvůli přítomnosti kondenzátoru. K regulaci otáček třífázových asynchronních motorů je nejčastěji využíván frekvenční měnič, ten ovšem v případě jednofázových motorů s kondenzátorem není vhodné používat. Parametry kondenzátoru

jsou přizpůsobeny frekvenci sítě 50 Hz. Změna frekvence pomocí měniče má po speciálních úpravách v lepším případě za následek nestabilitu řízení, a to jen v omezeném rozsahu, poloviční účinnost a kroutící moment. [9]
Regulace otáček pomocného ventilátoru je podle výrobce možná elektronickou nebo transformátorovou změnou napájecího napětí. Elektronický způsob využívá výše zmíněný triakový regulátor s potenciometrem. [10]

V případě automatizovaného pracoviště je nutné ovládat triakový regulátor elektronicky z řídicí jednotky. Jedním ze způsobů je nahrazení potenciometru optočlenem, kterým se bude napájet řízení triaku. Dalším nepřímým způsobem může být řízení krokového motoru, který bude mechanicky otáčet samotným potenciometrem. V obou případech se počítá s využitím triakové regulace, která spočívá v kontrolovaném spínání napájecího sinusového signálu, respektive ve změně efektivního napětí.

2.6 Diferenciální senzory tlaku

Ke stanovení statického i dynamického tlaku v potrubí automatizovaného pracoviště je třeba zvolit vhodné měřící zařízení. V obou případech bude využito snímání rozdílných tlaků. Statický tlak bude měřen elementem popsaným v kapitole 2.3 a dynamický tlak bude získán pomocí Wilsonovy mříže popsané v kapitole 2.2. Z dynamického tlaku bude vypočtena střední rychlost proudění a dále samotný objemový průtok.

Diferenciální senzory tlaku byly opět převzaty z předcházejících nebo současných projektů. Z důvodu navazujícího zpracování signálu řídicí jednotkou musí mít použité senzory analogový nebo digitální výstup.

2.6.1 Diferenciální tlakový senzor DPS 300

Keramický senzor zařízení DPS 300 slouží pro diferenciální měření tlaku suchých a neagresivních plynů. Byl navržen na snímání tlaku vzduchu pro aplikace v oblasti ventilace, vytápění a klimatizace. Vyznačuje se možností nastavení až čtyř různých analogových výstupů. Mezi další vlastnosti senzoru patří volitelnost provedení jednoho nebo dvou spínacích výstupů, odmocněný výstup a automatické nulování. Zařízení obsahuje dvouřádkový LC displej, který zobrazuje hodnotu měřeného tlaku, zvolenou jednotku a stav spínacích výstupů. [11]

Technické parametry

- rozsah měření: od 0-1,6 mbar do 0-1000 mbar
- rozměry: 132 × 68,5 × 50 mm
- výstupní signál: 0 až 5 V, 0 až 10 V, 0 až 20 mA, 4 až 20 mA
- napájení: 11 až 32 V_{DC}
- přesnost: $\leq \pm$ 0,5 % FSO BFSL pro PN < 6 mbar
  $\leq \pm$ 1 % FSO BFSL pro PN $\geq$ 6 mbar

Funkce

- nastavení spínacích výstupů
- výběr jednotky
- výběr signálu (lineární, odmocněný)
- funkce cut-off (pouze při odmocněném výstupu)
- zobrazení minimální/maximální hodnoty
- rekalibrace
- funkce automatické nulování

Obrázek 16 - Diferenciální tlakový senzor DPS 300 [11]

2.6.2 Diferenciální tlakové senzory Sensirion SDP

Výrobce Sensirion nabízí několik řad diferenciálních senzorů tlaku s označením SDP, které byly navrženy pro průmysl a zdravotnictví. Používají se k regulaci průtoku vzduchu a měření tlaků v automotivu, u plynových kotlů, topení, ventilace, klimatizace a dalších zařízení. Vyznačují se přijatelnou cenou a malými rozměry.

Řady SDP800 a SDP600 jsou založeny na patentované technologii CMOSens senzorového čipu. Vlivem rozdílu tlaku proudí malé množství měřeného média přes vyhřívaný element, což způsobuje rozdíl teploty média, který je snímán dvěma teplotními senzory. Teplotní rozdíl je přímo závislý na hmotnosti proudícího média.

Výhodou těchto senzorů je teplotní kompenzace měřeného tlaku, dlouhotrvající vysoká přesnost, citlivost při měření tlakových rozdílů i pod 1 Pa, absence driftů, hystereze, offsetu a možnost teplotního výstupu. Výběrem modelu lze zvolit analogový nebo digitální výstup, který je zprostředkován pomocí I2C sběrnice. [12,13]

Technické parametry

- rozsah měření: -25 až 25 Pa, -125 až 125 Pa nebo -500 až 500 Pa
- rozměry: 29 × 26 × 18 mm
- výstupní signál: digitální – I2C nebo analogový – 10 až 90 % V_{DD}
- napájení: 2,7 až 5 V_{DC} v závislosti na konkrétním typu senzoru
- přesnost: 0,2 %

Funkce

- měření průtoku
- měření diferenčního tlaku
- snímání teploty
- průměrování hodnot do dalšího čtení
- kontinuální měření

Obrázek 17 - Diferenciální tlakový senzor Sensirion SDP [12]

2.7 Rešerše řídicí jednotky

Požadavkem k ovládání vzduchotechnického pracoviště je snadné řízení pomocí počítače. Veškeré procesy regulace, sběru a zpracování dat budou zprostředkovány externí řídicí jednotou připojenou k počítači. Vhodnou a zcela postačující řídicí jednotkou může být jedna z komerčně dostupných vývojových mikrokontrolerových platforem, které se využívají k nejrůznějšímu projektování z důvodu přijatelné ceny, snadného programování s existencí širokého spektra dostupných knihoven a vstupních i výstupních periferií.

2.7.1 Raspberry PI 4 model B

Jedná se téměř o plnohodnotný miniaturní počítač, který se vyznačuje vysokým výpočetním výkonem srovnatelným s levným stolním počítačem nebo notebookem. V podstatě jde o desku plošných spojů osazenou 1,5 GHz čtyřjádrovým procesorem ARM Cortex-A72, grafikou VideoCore VI a například konektory USB, micro HDMI, Ethernet, a digitálními GPIO piny. Oficiálním operačním systémem je Raspbian, ale Raspberry PI podporuje i spoustu alternativních operačních systémů, mezi kterými bývá nejčastěji využíván například Linux. [14]

Výhodami je vysoký výpočetní výkon, kompatibilita s myší, klávesnicí a monitorem, takže by bylo možné využít Raspberry PI jako primární počítač a zároveň jako řídicí jednotku k ovládání vzduchotechnického pracoviště. Nevýhodou je absence analogových vstupních a výstupních pinů, vyšší cena v porovnání s platformami Arduino a časté přehřívání procesoru.

Technické parametry

- procesor: 1,5 GHz quad-core ARM Cortex-A72, 64-bit
- paměť RAM: 1 až 4 GB
- konektivita:
  - 2,4 GHz a 5 GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac Wi-Fi
  - Bluetooth 5.0 (BLE)
  - Gigabit Ethernet (1000 Mbit/s)
  - 2 × USB 2.0 a 2 × USB 3.0
  - Standardní GPIO - 40 pinů
  - 2 × microHDMI 2.0
  - MIPI DSI – připojení displeje
  - MIPI CSI – připojení kamery
  - čtyřpólový 3,5mm jack
- napájení:
  - 5 V DC přes USB-C konektor (minimálně 3 A)
  - 5 V DC přes GPIO header (minimálně 3 A)

Obrázek 18 - Raspberry PI 4 model B [14]

2.7.2 Arduino UNO REV3

Mikrokontroler Arduino UNO je jednou ze základních vývojových platforem značky Arduino, která je poháněna 16-bitovým procesorem ATmega328. Jedná se o jednu z nejčastěji používaných platforem, která je vhodná pro začátečníky, jelikož většina dostupných návodů je zaměřena právě na tento model a celkové provedení je dostatečně robustní. Přes programovací prostředí Arduino (IDE) používající jazyk C lze na desku nahrát z počítače vytvořený kód pomocí kabelu USB.

Platforma obsahuje vstupní a výstupní analogové i digitální piny, kterými lze připojit nejrůznější periferie. Důležitým aspektem je možnost použití PWM signálů u digitálních výstupů. Dále obsahuje například piny pro komunikaci I2C sběrnicí. [15]

Technické parametry

- procesor: ATmega328
- pracovní napětí: 5 V
- napájecí napětí: 7 až 12 V
- vstupy a výstupy:
    - Digitální piny: 14 (z toho 6 použitelných jako PWM výstup)
    - Analogové vstupy: 6
    - DC proud na 3,3 V pinu: 50 mA
    - DC proud na digitální pinu: 20 mA
- Paměť:
    - Flash: 32 kB (ATmega328)
    - SRAM 2 kB (ATmega328)
    - EEPROM 1 kB (ATmega328)
- frekvence hodin: 16 MHz
- rozměry: 68,6 × 53,4 mm

Obrázek 19 - ArduinoUNO REV3[15]

2.7.3 Arduino DUE R3

Jedná se o první Arduino mikrokontroler, který je postaven na základě 32-bitového procesoru Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 s vyšším výkonem. Zvláštností tohoto procesoru je, že běží na napětí 3,3 V, takže připojením vyššího napětí na jeden ze vstupních pinů může být nenávratně poškozen.

Podobně jako Arduino UNO lze připojit k počítači pomocí mikro USB, přes které lze s deskou komunikovat a nahrávat na ni zdrojové kódy. Další zvláštností této platformy je přítomnost druhého procesoru Atmel mega16U2, ke kterému se lze připojit pomocí druhého mikro USB portu (programing port) pro rychlejší odladění programu.

Mikrokontroler disponuje více vstupními a výstupními analogovými i digitálními piny než Arduino UNO a dále obsahuje SPI piny, dvě sady pinů pro I2C komunikaci, z nichž jedna je již osazena Pullup rezistory. Součástí jsou dva 12-bitové DAC převodníky a 4 UART porty. [16]

Technické parametry

- procesor: Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3
- pracovní napětí: 3,3 V
- napájecí napětí: 7 až 12 V
- vstupy a výstupy:
    - Digitální piny: 54 (z toho 12 z nich použitelných jako výstupy PWM)
    - Analogový vstupní piny: 12
    - Analogový výstupní DAC piny: 2
    - Celkový proud na všech digitálních pinech: 130 mA
    - DC proud na 3.3 V pinu: 800 mA
    - DC proud na 5 V pinu: 800 mA
- paměť:
    - Flash: 512 kB
    - SRAM: 96 kB
- frekvence hodin: 84 MHz
- rozměry: 101,52 × 53,3 mm

Obrázek 20 - Arduino DUE R3 [16]

3 NÁVRH AUTOMATIZOVANÉHO PRACOVIŠTĚ

Systém automatizovaného pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin bylo třeba navrhnout tak, aby byl univerzální pro použití více variant velikostí a tvarů potrubí i senzorů tlaků s různými rozsahy. Dalším požadavkem bylo snadné přestavení komponent pro stanovení charakteristik závislosti tlaku na průtoku vzduchu ventilátorů a tlakových ztrát v závislosti na průtoku u jiných zařízení. Těmto požadavkům bylo také potřeba přizpůsobit samotný software, který měl být navržen tak, aby se co nejjednodušeji dal použít u jiných potrubí.

Zadaný projekt byl ovšem vymezen pouze na pracoviště s kruhovým průřezem potrubí o průměru 100 mm. Počítá se s navázáním další bakalářské nebo diplomové práce na tento projekt, která se bude věnovat implementaci a případnému rozšíření funkcí pro jiné tvary a velikosti potrubí s využitím odpovídajících pomocných ventilátorů.

3.1 Ovládání a zpracování dat v PC

Základní vlastností pracoviště má být snadné ovládání pomocí běžného počítače. V něm by také mělo probíhat prvotní zpracování naměřených veličin. Cílem tedy je vytvořit uživatelské rozhraní, pomocí kterého bude probíhat komunikace s řídicí jednotkou.

Obsahem uživatelského rozhraní budou ovládací panely pro připojení počítače k řídicí jednotce, manuální ovládání všech komponent vzduchotechnického pracoviště a samozřejmě sekce pro ovládání automatického měření. Mezi základní zpracování dat bude patřit zaznamenávání naměřených hodnot do grafu závislosti tlaku na průtoku v reálném čase a exportování získaných dat do textového souboru.

3.2 Řídicí jednotka

Jako řídicí jednotka byla zvolena vývojová platforma Arduino DUE R3. Důvodem byla přijatelná cena, která nad rámec odpovídá vybavení a technickým parametrům vývojové platformy. Mezi jedny z rozhodujících parametrů patří vybavení platformy 12-bitovým DAC, plně připravené piny pro I2C komunikaci a vyšší výpočetní výkon.

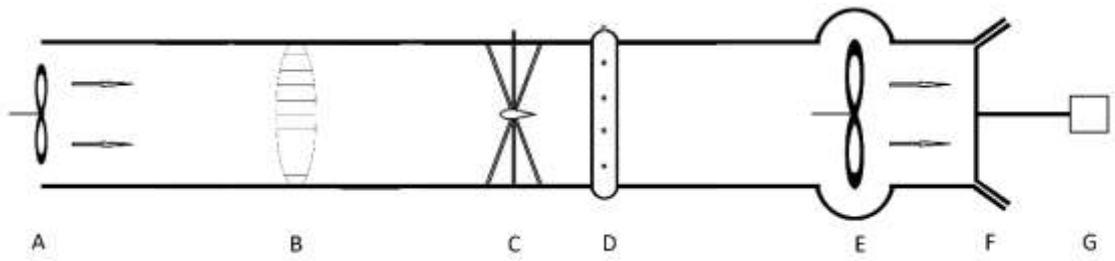
Samotná komunikace s počítačem bude zprostředkována přes sériovou linku USB kabelem. Hlavní program běžící na počítači bude zasílat konkrétní příkazy do řídicí jednotky, která bude sloužit k samotnému sběru dat, regulaci pomocného ventilátoru a nastavení úrovně koncové škrtící klapky.

3.3 Komponenty vzduchotechnického pracoviště

Celé přenosné automatizované pracoviště bude sestávat z počítače uživatele, který bude připojen k řídicí jednotce Arduino DUE R3 ovládající elektronické prvky

vzduchotechnické aparatury. Ta bude složena z několika samostatných elementů, které bude možno v případě potřeby přeskládat do požadovaného pořadí.

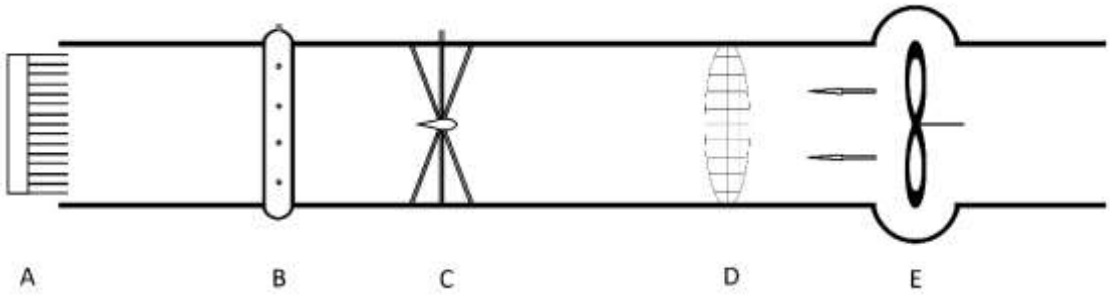
Mezi tyto elementy patří Wilsonova mříž pro měření dynamického tlaku, prstenec pro měření statického tlaku, usměrňovač proudění, pomocný ventilátor a v případě měření charakteristiky ventilátoru i koncová škrtící klapka. Schéma navrženého výchozího sestavení pro měření charakteristik závislosti tlaku na průtoku vzduchu ventilátoru je zobrazeno na Obrázku č. 21 a pro stanovení tlakových ztrát v závislosti na průtoku vzduchu ostatních zařízení lze vidět na Obrázku č. 22.



Obrázek 21 - Komponenty aparatury pro měření charakteristiky ventilátoru

Popis schématu aparatury pro měření charakteristiky ventilátoru

A – měřený ventilátor
B – usměrňovač proudění
C – Wilsonova mříž pro měření dynamického tlaku
D – prstencový element pro snímání statického tlaku
E – pomocný ventilátor
F – koncová škrtící klapka
G – krokový motor ovládající klapku



Obrázek 22 - Komponenty aparatury pro měření tlakové ztráty

Popis schématu aparatury pro měření tlakové ztráty

A – měřené zařízení, například chladič
B – prstencový element pro snímání statického tlaku
C – Wilsonova mříž pro měření dynamického tlaku
D – usměrňovač proudění
E – pomocný ventilátor

3.3.1 Pomocný ventilátor

Jak už bylo popsáno v kapitolách 2.4 a 2.5, pomocný ventilátor je součástí vzduchotechnické aparatury ze dvou důvodů. Při měření charakteristiky závislosti statického tlaku na průtoku média slouží k vyrovnání tlakových ztrát způsobených například třením v potrubí, přítomností Wilsonovy mříže a usměrňovače proudění. Při měření charakteristiky závislosti tlakové ztráty na průtoku jiných zařízení, například chladičů a filtrů, slouží pomocný ventilátor jako tlakový zdroj. Umístěním elementu pro snímání statického tlaku těsně před měřené zařízení, viz Obrázek 22, je zajištěn minimální vliv statických ztrát prvků vzduchotechnické aparatury.

Právě kvůli měření tlakové ztráty je nutné použít pomocný ventilátor o dostatečném výkonu, aby byla získána charakteristika s co možná největším rozsahem. U měření ventilátorové charakteristiky stačí pro kompenzaci tlakových ztrát prvků vzduchotechnické aparatury minimální výkon pomocného ventilátoru.

Pro navrženou aparaturu s trubkou o průměru 100 mm je použit potrubní radiální ventilátor výrobce Östberg. Model s označením CK 100C je navržen pro vzduchotechnické rozvody na dopravu čistého vzduchu bez mastnot, výparů chemikálií, prachu a jiných nečistot. Díky svému vysokému výkonu je vhodný pro rozvody větších délek. Skříň ventilátoru je vyrobena z pozinkované oceli. Lopatky oběžného kola jsou z plastu a náboj rotoru je vyroben opět z pozinkované oceli. Je použit asynchronní motor se stíněnou kotvou nakrátko, u kterého je rotor uložen v kuličkových ložiscích pro stálý provoz v jakékoliv pracovní poloze. V samotném motoru je integrovaná tepelná ochrana. Použitá plastová svorkovnice umístěná na těle ventilátoru má krytí IP55, přičemž samotný motor má krytí IP44. Výrobce uvádí možnost plynulé nebo krokové regulace otáček pomocí elektronických nebo transformátorových regulátorů změnou napětí. [10]

Obrázek 23 - Radiální ventilátor Östberg CK100C [17]

Technické parametry

- průměr napojení: 100 mm
- materiál: pozinkovaná ocel, plast
- lopatky: radiální
- ložiska: kuličková
- krytí: IP 44
- napětí: 230 V
- průtok: 317 m^3/h
- statický tlak: 366 Pa

3.3.2 Usměrňovač proudění

Z důvodu možného vzniku vírů za pomocným nebo měřeným ventilátorem je před měřícími elementy umístěn usměrňovač proudění. Tím je teoreticky zajištěno laminární proudění, čímž se zvyšuje celková přesnost měření.

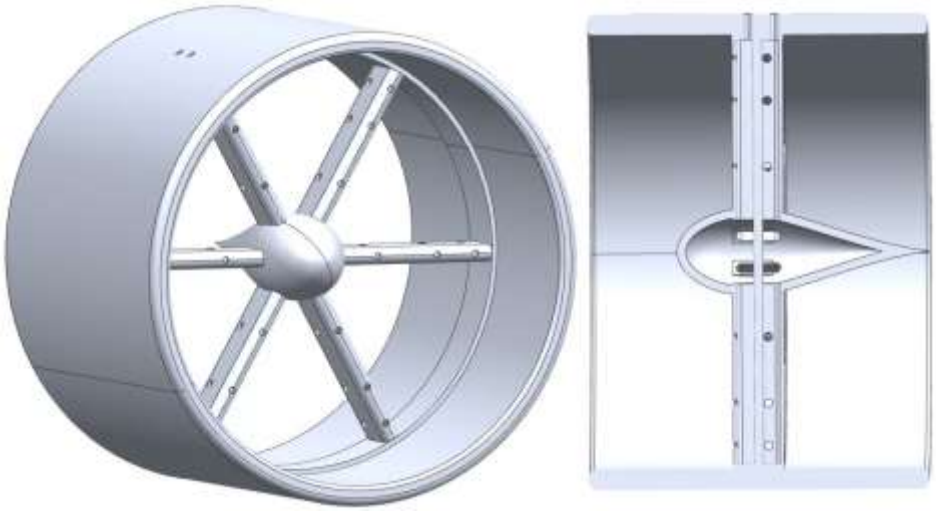
Usměrňovač proudění je navržen jako čtvercová mřížka s velikostí ok jeden centimetr, která je uložena v kruhové obruči o délce pěti centimetrů s vnějším průměrem 100 mm. Stěny obruče jsou mírně zkoseny pro snadnou montáž do potrubí. Aby usměrňovač proudění kladl co nejmenší tlakový odpor, jsou stěny mřížky široké pouze 0,2 mm.

3.3.3 Wilsonova mříž

Jako element pro měření dynamického tlaku byla zvolena Wilsonova mříž z důvodu malého tlakového odporu, vysoké přesnosti střední hodnoty z celého průřezu vzduchového kanálu a možnosti měření proudění teoreticky již od 1,5 m/s. Tato tlaková sonda je patentem společnosti Airflow Lufttechnik GmbH, která vyrábí mříže do čtvercových potrubí od 200 × 200 mm do 2000 × 2000 mm a do kruhových potrubí od průměru 200 mm do 2000 mm. V nabídce je ale i možnost objednávky na míru pro jiné velikosti potrubí. Použitým materiálem pro kruhové kanály bývá nerezová ocel, kdy je garantovaná možnost vysoké provozní teploty až 450 °C. [18]

Z důvodu nutnosti objednávky mříže na zakázku pro potrubí o průměru 100 mm a vysoké ceny v řádu několika desítek tisíc Kč i při standardně vyráběných rozměrech, je měřící sonda navržena a vyrobena vlastním způsobem. Model mříže byl vytvořen v CAD programu Solidworks. Navržené řešení je zobrazeno na Obrázku 24.

Výhodou navržené mříže je další snížení tlakového odporu díky středovému náboji dokonalého aerodynamického tvaru. Další výhodou je umístění mříže v kruhové objímce s vnitřním průměrem 102,5 mm. Tím je docíleno maximální tuhosti celé sondy a také snadné montáže na potrubí. Za zmínku stojí i minimální pořizovací náklady a možnost snadné výroby dalších kusů v případě náhodného poškození elementu.



Obrázek 24 - Navržený model Wilsonovy mříže

Na Obrázku 24 lze vidět, že se navržená mříž skládá z šesti ramen. Každé rameno i středový náboj je rozdělen na dvě samostatné komory. Předními otvory umístěnými proti směru proudění vzduchu je v první komoře měřen celkový tlak a bočními otvory, které jsou z obou stran ramen, je měřen statický tlak. Ze středu náboje obou komor jsou poté plastovými trubičkami vyvedeny střední hodnoty tlaků ven k ústím, na které je možné připojit hadičky spojující Wilsonovu mříž s diferenciálním tlakovým senzorem.

3.3.4 Element pro měření statického tlaku

Jak již bylo dříve zmíněno, tak tato studie navazuje na předcházející práce, a právě element pro měření statického tlaku byl převzat z dřívějšího projektu. Jeho konstrukce je velmi jednoduchá, jde o plastovou obruč, která je zvnějšku nasazená na potrubí. Jejím přilepením bylo dosaženo dokonalého utěsnění od vnějšího okolí, čímž vznikla malá komora s jedním výstupním ústím, na které je nasazena hadička vedoucí do diferenciálního tlakového senzoru. Vstupem do komory je šest kruhových štěrbin o průměru 3 mm, které jsou rovnoměrně rozděleny kolmo ke směru proudění vzduchu po obvodu potrubí.

Obrázek 25 - Element pro měření statického tlaku

3.3.5 Diferenciální tlakové senzory

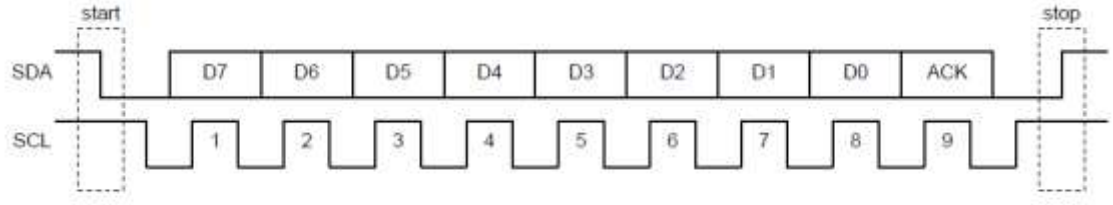
Byly vybrány diferenciální tlakové senzory společnosti Sensirion s označením SDP. Přenosné pracoviště disponuje celkem dvěma tlakovými senzory. První slouží k měření dynamického tlaku za použití diference celkového tlaku a statického tlaku proudícího vzduchu v potrubí, které jsou získány pomocí Wilsonovy mříže. Druhý diferenciální senzor snímá rozdíl statického tlaku ve vzduchotechnické aparatuře a atmosférického tlaku kolem ní. Takto je získán relativní tlak v potrubí vzhledem k jeho okolí.

Senzory řady SDP811 a SDP810 byly zvoleny kvůli jejich digitálnímu výstupu, který umožňuje funkci průměrování měřeného tlaku mezi jednotlivými čteními dat. Zároveň kvůli přítomnosti výkonové elektroniky pro pomocný ventilátor je výhodnější použití digitálního přenosu dat ze senzorů k minimalizaci rušení signálu. Kladnou vlastností je také napájecí napětí senzorů, které se pohybuje od 3 do 5,5 V. Lze je proto napájet přímo z řídicí jednotky, takže není nutno používat externí zdroj. Další výhodou jsou řádově nižší pořizovací náklady oproti senzoru DPS 300. Pracoviště bude navrženo pro snadnou výměnu jednotlivých řad senzorů, kdy bude možné použít i senzory ze starší řady SDP610.

Komunikace přes I2C sběrnici

V případě navrženého automatizovaného pracoviště půjde pouze o komunikaci mezi jednou řídicí jednotkou a dvěma senzory SDP, ovšem přenos dat pomocí I2C sběrnice je možný až mezi 128 řídicími jednotkami a dalšími zařízeními. Komunikace je zprostředkována dvěma vodiči, které musí být připojeny přes tzv. pull-up rezistory na napájecí napětí. Sběrnice funguje oběma směry, ovšem v jeden okamžik lze vysílat pouze z jednoho zařízení, přičemž každé z nich má svou unikátní adresu. Tu lze vyčíst z technické specifikace zařízení, případně je u některých zařízení volně volitelná.

Ke sběrnici je vždy připojeno jedno řídicí zařízení tzv. master a jedno nebo více podřízených obvodů označovaných jako slave. Komunikace probíhá po vodičích SDA sloužící pro přenos dat a SCL pro synchronizační pulzy o frekvenci 10 až 400 kHz. Na Obrázku 26 je názorná ukázka části průběhu dat na vodičích SDA a SCL. Pro přenos dat jednomu z podřízených obvodů master nejprve v sedmi bitech vyšle adresu slave zařízení následovanou osmým bitem s logickou jedničkou a poté čeká na potvrzovací ACK bit. Následně je možné, aby master zaslal data po SDA vodiči. Pro příjem dat ze slave zařízení následuje po zaslané adrese osmý bit v logické nule. Tak slave pozná, že může zaslat svá data do master jednotky. [19]



Obrázek 26 - Ukázka I2C komunikace [19]

3.3.6 Závěrná klapka

Měření charakteristiky ventilátoru je prováděno při využití jeho maximálního výkonu. Otáčky během celého testu nejsou nijak regulovány, proto je nutné, aby navržená aparatura automatizovaného pracoviště měla jinou možnost řízení průtoku vzduchu potrubím. Součástí aparatury je elektronicky ovládaná závěrná klapka, kterou jsou ovlivňovány podmínky uvnitř potrubí. Je-li klapka zcela uzavřená, je v potrubí vyvinut maximální statický tlak při nulovém průtoku vzduchu. Je-li naopak plně otevřená, dochází v potrubí k maximálnímu průtoku média a statickému tlaku blížícímu se nule.

Závěrná klapka je navržena tak, aby při maximálním otevření měla co nejmenší tlakový odpor. Jelikož je při druhé aplikaci pracoviště zjišťována tlaková ztráta měřeného zařízení, je možnost klapku z potrubí demontovat, jak je zobrazeno na Obrázku 22. Z toho důvodu je tedy nutné, aby byla výměna škrtícího elementu snadná a aby při časté manipulaci nedocházelo k opotřebení součástí navrhovaného pracoviště.

Míru uzavření škrtícího elementu je možno nastavit lineárním posuvem klapky pomocí závitové tyče, kterou je otáčeno krokovým motorem s označením HY 200-1713 od výrobce MAE. Tento hybridní bipolární motor byl také převzat z dřívějších prací. Pohon má následující parametry: [20]

Technické parametry HY 200-1713

- krokový úhel: 1,8 °
- maximální provozní napětí: 36 V
- fázový proud: 330 mA
- přídržný krouticí moment: 140 Nmm
- rozměry:
    - délka hřídele: 20 mm
    - průměr hřídele: 5 mm
    - délka: 54 mm
    - šířka a výška: 42,2 mm

Krokový pohon je ovládán motor driverem s označením A4988. Pomocí dvou pinů lze tímto zařízením řídit rychlost a směr otáčení. Dalšími piny je možné nastavit šestnáctinový, osminový, čtvrtinový, poloviční nebo plný krok, případně přivést driver do úsporného módu. [21]

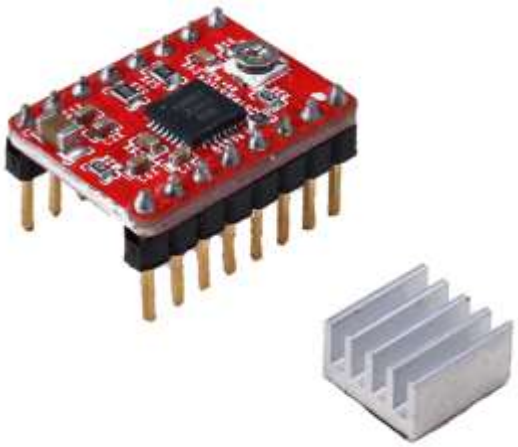
Zařízení škrtícího elementu je dále vybaveno koncovým spínačem. Při úplném uzavření klapky je spínač sepnut, čímž dochází v algoritmu k nastaví výchozí pozice.

Technické parametry A4988

- maximální napětí zátěže: 35 V
- maximální proud zátěže: 2 A
- napájecí napětí: 5 V
- pracovní teplota: -20 až 80 °C

Funkce A4988

- ochrana zkratu
- nastavitelný maximální proud
- ochrana proti přehřátí
- ochrana proti podpětí



Obrázek 27 - Motor driver A4988 [22]

4 REALIZACE VZDUCHOTECHNICKÉHO PRACOVIŠTĚ

V předcházející kapitole byl řešen návrh kompletního řešení vzduchotechnického pracoviště a tato část práce se již bude zabývat výslednou realizací jednotlivých komponent, jejich výrobou a finálním rozložením.

U spousty použitých komponent se jedná o prototypy, které nejsou běžně komerčně dostupné. Jejich pořizovací nebo výrobní cena by se tak pohybovala ve vysokých číslech, a proto bylo využito současně čím dál tím více používané technologie výroby prototypů pomocí 3D tisku.

4.1 3D tisk dílů

Veškeré níže popsané díly byly vyrobeny na tiskárně Creality Ender 3 technologií FDM. Jedná se o metodu postupného nanášení roztaveného materiálu v tenkých vrstvách. V tomto případě se jedná o plastové materiály typu například PLA, ABS, PET, PETG, Nylon nebo TPU. Tento technologický postup je možno použít pro výrobu dílů jakýchkoliv tvarů i těch, kterých nelze běžnými například obráběcími metodami dosáhnout. Tak lze například vytisknout níže popsaná Wilsonova mříž s dutými prostory jako jeden celistvý díl. Nevýhodou této technologie je horší přesnost v tolerancích kolem 0,1 mm a delší doba výroby.

4.1.1 Wilsonova mříž

Pro 3D tisk modelu Wilsonovy mříže popsaný v kapitole 3.3.3 byl zvolen materiál ABS, jehož výhodou je možnost jeho leptání pomocí acetonu. Této vlastnosti bylo využito pro úpravu vytištěného dílu, kdy bylo díky leptání středního náboje a ramen mříže dosaženo hladkého povrchu. Při výrobě dílů technologií 3D tisku je kvůli nanášení jednotlivých vrstev výsledný povrch hrubý. I v případě použití malé výšky vrstvy může docházet při proudění vzduchu kolem dílu k vytváření malých vzduchových vírů, což by mohlo negativně ovlivnit výsledky měření. Dále bylo leptáním docíleno dokonalého spojení jednotlivých vrstev, což zaručuje vzduchotěsnost mezi komorami.

Před samotným leptáním byl povrch nejdříve vybroušen jemným smirkovým papírem. Dále byly vstupní otvory v ramenech provrtány na průměr 2 mm. Takto bylo u všech děr docíleno dokonale kruhovitého tvaru a stejné velikosti.

Na Obrázku 28 je zobrazen vytištěný díl Wilsonovy mříže. Vlevo je pohled na přední část ve směru proudění vzduchu a vpravo na část zadní. Oproti modelu popsaném v kapitole 3.3.3 jsou do výstupních otvorů vsazeny trubičky směřující do středu mříže, které jsou zakončeny kolíky pro připojení silikonových hadiček vedoucích k tlakovým senzorům.

Obrázek 28 - Vytištěný díl Wilsonovy mříže

Měření ztrátového součinitele *M*

Pro použití Wilsonovy mříže k výpočtu průtoku vzduchu je nutné znát její ztrátový součinitel *M*. Ten byl změřen experimentálně pomocí jiného vzduchotechnického pracoviště s potrubím o průměru 150 mm. Toto pracoviště disponovalo zakoupenou Wilsonovou mříží od společnosti Airflow, pomocným ventilátorem Östberg CK 150C a tlakovými senzory DSP300. Na potrubí tohoto pracoviště byla připojena redukce na průměr 100 mm s vytištěnou Wilsonovou mříží. Byla naměřena data dynamických tlaků na zakoupené Wilsonově mříži se ztrátovým součinitelem M = 2,7 a vytisknuté mříži, u které je součinitel M zjišťován. Výpočet vychází ze vztahu pro výpočet průtoku vzduchu v potrubí:

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{\Delta p}{M}} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (12)$$

, kde S je průřez potrubí, ρ je hustota vzduchu, Δp je rozdíl celkového a statického tlaku na Wilsonově mříži a M je ztrátový součinitel. Platí, že dynamický tlak p_d je roven Δp a zároveň musí být průtok Q stejný v potrubí o průměru 150 mm i 100 mm. Z toho vyplývá následující rovnost:

$$Q = S_{150} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{\Delta p_{150}}{M_{150}}} = S_{100} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{\Delta p_{100}}{M_{100}}} \qquad [\mathrm{m^3/s}] \qquad (13)$$

Úpravou a vyjádřením ztrátového součinitele M_{100} pro Wilsonovu mříž o průměru 100 mm z rovnice 13 vznikne následující vztah:

$$M_{100} = M_{150} \cdot \frac{\Delta p_{100}}{\Delta p_{150}} \cdot \frac{d_{100}^2}{d_{150}^2} = 2{,}7 \cdot \frac{\Delta p_{100}}{\Delta p_{150}} \cdot 2{,}25 \qquad [-] \qquad (14)$$

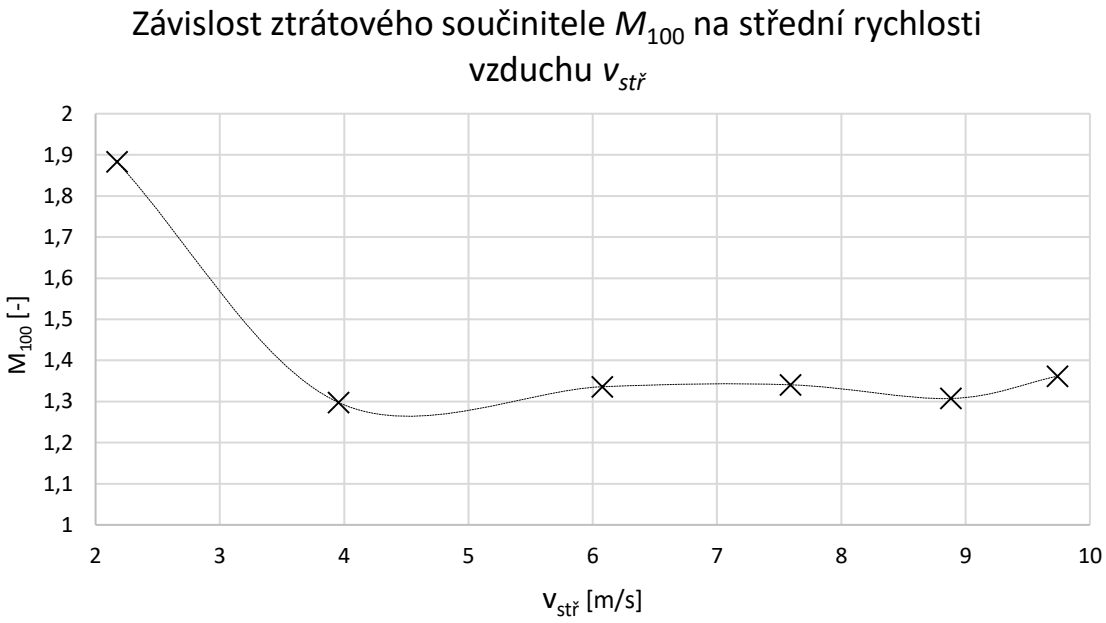
, kde d_{100} a d_{150} jsou průměry potrubí.

Byla naměřena data dynamických tlaků p_d pro šest různých hodnot průtoku Q, z nichž byl vytvořen graf závislosti ztrátového součinitele M_{100} na střední rychlosti vzduchu $v_{stř}$, který je možno vidět na Obrázku 29. Hodnoty středních rychlostí byly vypočteny z naměřených dat pomocí vztahu:

$$v_{stř} = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho_{25\,°C}}} \quad \text{[m/s]} \tag{15}$$

$$v_{stř} = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{1{,}1845}} \quad \text{[m/s]} \tag{16}$$

, kde p_c je celkový a p_s statický tlak na Wilsonově mříži o průměru 100 mm, jejichž rozdílem je získán dynamický tlak p_d a $\rho_{25\,°C}$ je hustota vzduchu při normální teplotě 25 °C, která je rovna 1,1845 kg/m^3.



Obrázek 29 - Graf závislosti ztrátového součinitele na střední rychlosti vzduchu

Z grafu vyplývá použitelnost vyrobené Wilsonovy mříže pro střední rychlosti proudění vzduchu o hodnotě 4 m/s a více. Průběh naměřené závislosti odpovídá charakteristikám mříží prodávaných společností Airflow. Stanovená hodnota ztrátového součinitele M_{100} byla vypočtena jako průměr z posledních pěti bodů měření a je rovna hodnotě:

$$M_{100} = 1{,}34$$

4.1.2 Usměrňovač proudění

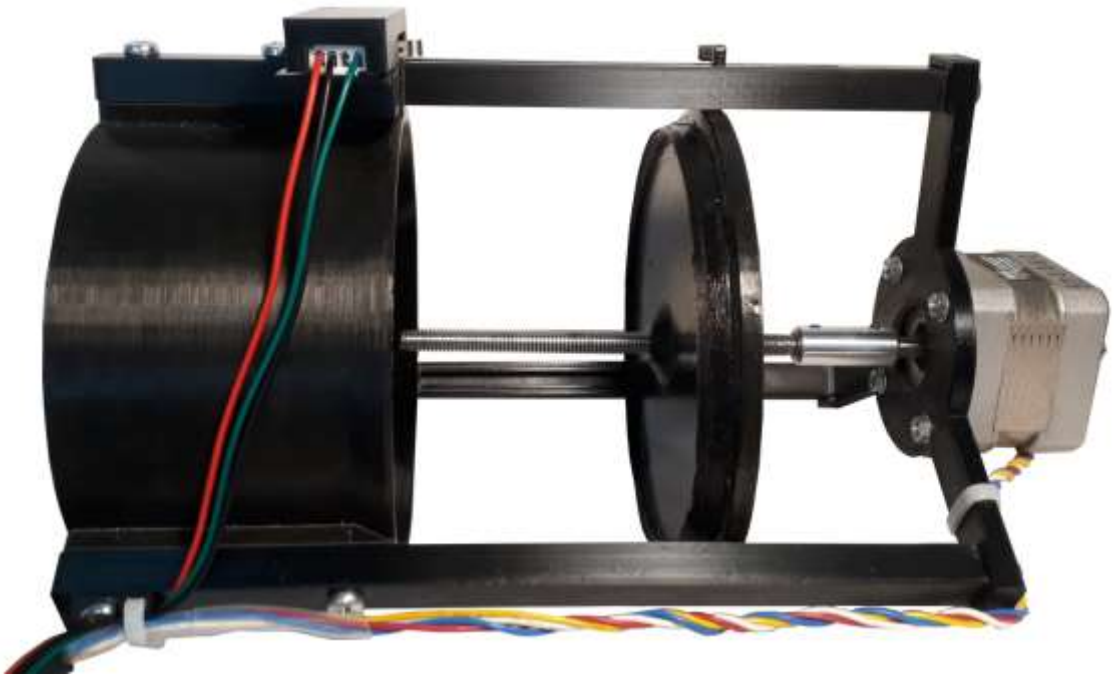
Na Obrázku 30 je zobrazen usměrňovač proudění, který byl popsán v kapitole 3.3.2. Jak již bylo zmíněno, navržený usměrňovač má mřížku o tloušťce stěn pouze 0,2 mm, aby měl co nejmenšího tlakový odpor. Při použití trysky 3D tiskárny o průměru 0,2 mm bylo nutné nastavit výšku vrstvy na pouhých 0,12 mm, čímž bylo zároveň dosaženo relativně hladkých stěn mřížky. Byl použit materiál PLA, u kterého nedocházelo ke kroucení tenkých stěn mřížky na rozdíl od materiálu ABS. Usměrňovač má po obvodu ve středu lem, který funguje jako zarážka pro potrubí, ve kterém je mřížka umístěna.

Obrázek 30 - Usměrňovač proudění

4.1.3 Závěrná klapka

Zařízení popsané v kapitole 3.3.6 lze vidět na Obrázku 30. Kruhová část, která je nasazovaná na potrubí, a samotná škrtící klapka byly vyrobeny z materiálu ABS. Důvodem byla povrchová úprava vyhlazením vnitřní strany kruhové části pomocí leptání pro snadné a přitom těsné upevnění na potrubí. Zbylé části byly vyrobeny z materiálu PLA pro jeho vyšší pevnost.

Na škrtící klapku byla nanesena vrstva černého silikonu pro zajištění dokonalého utěsnění potrubí při maximálním uzavření. Na kruhovou část byl umístěn koncový spínač, jehož polohu pro správný okamžik sepnutí lze nastavit pomocí upevňovacích šroubů umístěných v podlouhlých drážkách.



Obrázek 31 - Závěrná klapka s krokovým motorem a koncovým spínačem

4.1.4 Kryty elektroniky

Veškeré kryty elektroniky byly vyrobeny z materiálnu PLA kvůli jeho vlastnosti snadného tisku a žádným specifickým nárokům tisknutých dílů. Přímo na krytech jsou vytištěny popisky pro správné zapojení jednotlivých kabelů do řídicí jednotky a silikonových hadiček do tlakových senzorů.

Obrázek 32 - Kryt diferenciálních senzorů tlaku Sensirion SDP

Kryt diferenciálních senzorů tlaku Sensirion SDP je navržen pro snadnou výměnu jednotlivých typů čidel. Je tak možno libovolně zvolit čidla různých výrobních řad a měřitelných rozsahů. Důležité je správné zapojení vodičů během výměny, kdy šedý vodič patří na pin SDA, fialový vodič na GND, modrý vodič na VDD a zelený vodič na SCL. Na víku krytu je nad každým senzorem písmeno určující jeho použití. Senzor s označením písmenem D je určen pro snímání dynamického tlaku a písmenem S pro snímání tlaku statického.

Kryt řídicí jednotky má celkem devět vstupů pro jednotlivé konektory, jednu mřížku zespodu a druhou nahoře pro lepší odvádění tepla vznikající na Arduinu a na driveru krokového motoru. Součástí jsou i otvory pro signalizační LED diody a otvor

vedoucí k resetovacímu tlačítku Arduina. Konkrétní zapojení jednotlivých konektorů je popsáno níže v kapitole 4.3.

Obrázek 33 – Kryt řídicí jednotky

Původní triakový regulátor jednofázového asynchronního motoru s ventilátorem byl rozšířen o relé a optočlen, které je možné ovládat pomocí řídicí jednotky. Ty jsou dále popsány v kapitole 5.1.

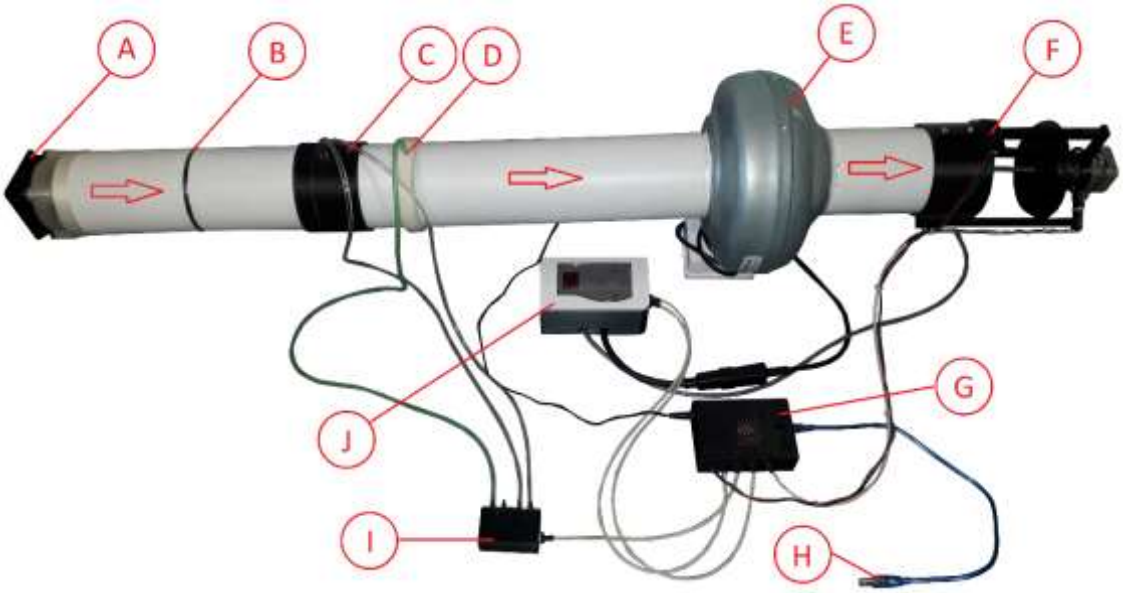
Požadavkem bylo zachování možnosti nadále regulovat otáčky pomocného ventilátoru manuálně pomocí otočného potenciometru. Přidáním komponent bylo třeba zvětšit kryt regulátoru. Nově vytištěná černá část z materiálu PLA obsahuje otvory pro vstupní napájecí kabel ze sítě, výstupní napájecí kabel ventilátoru a dva konektory pro připojení regulátoru k řídicí jednotce. Bílé víko je zachováno z původního krytu.

Obrázek 34 - Kryt regulátoru pomocného ventilátoru

4.2 Sestava vzduchotechnického pracoviště

Rozložení jednotlivých komponentů vzduchotechnického pracoviště popsané v kapitole 3.3 je zobrazeno na Obrázku 35 v zapojení pro měření ventilátorové charakteristiky a na Obrázku 36 v zapojení pro měření tlakové ztráty jiných zařízení. Na obrázcích je možné vidět kompletní řešení včetně zapojení regulátoru pomocného ventilátoru, diferenciálních tlakových senzorů a řídicí jednotky s připojovacím USB kabelem. Dále je v obou případech šipkami naznačen směr proudění vzduchu skrz potrubí.

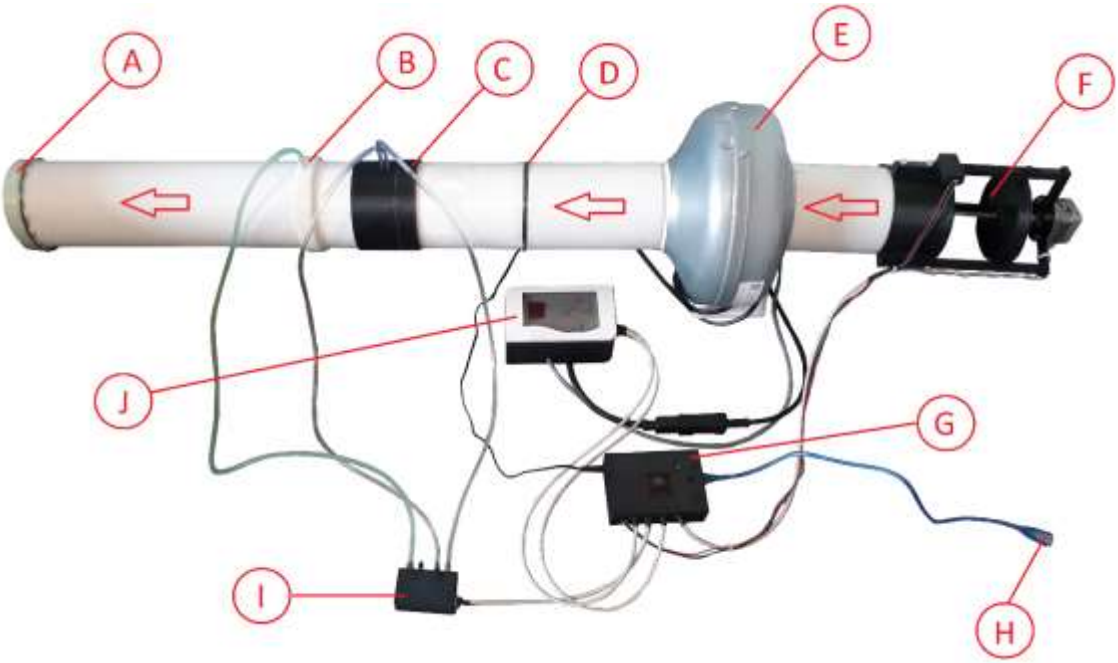
Při změně sestavy z měření charakteristiky ventilátoru na měření tlakové ztráty je nutné změnit orientaci pomocného ventilátoru a části potrubí obsahující Wilsonovu mříž, element pro měření statického tlaku a usměrňovač proudění. Závěrnou klapku není třeba sundávat.



Obrázek 35 - Sestava pro měření ventilátorové charakteristiky

Popis komponent sestavy pro měření ventilátorové charakteristiky

- A – měřený ventilátor
- B – usměrňovač proudění
- C – Wilsonova mříž
- D – element pro měření statického tlaku
- E – pomocný ventilátor
- F – závěrná klapka
- G – řídicí jednotka
- H – připojovací USB kabel
- I – diferenciální tlakové senzory SDP
- J – regulátor pomocného ventilátoru



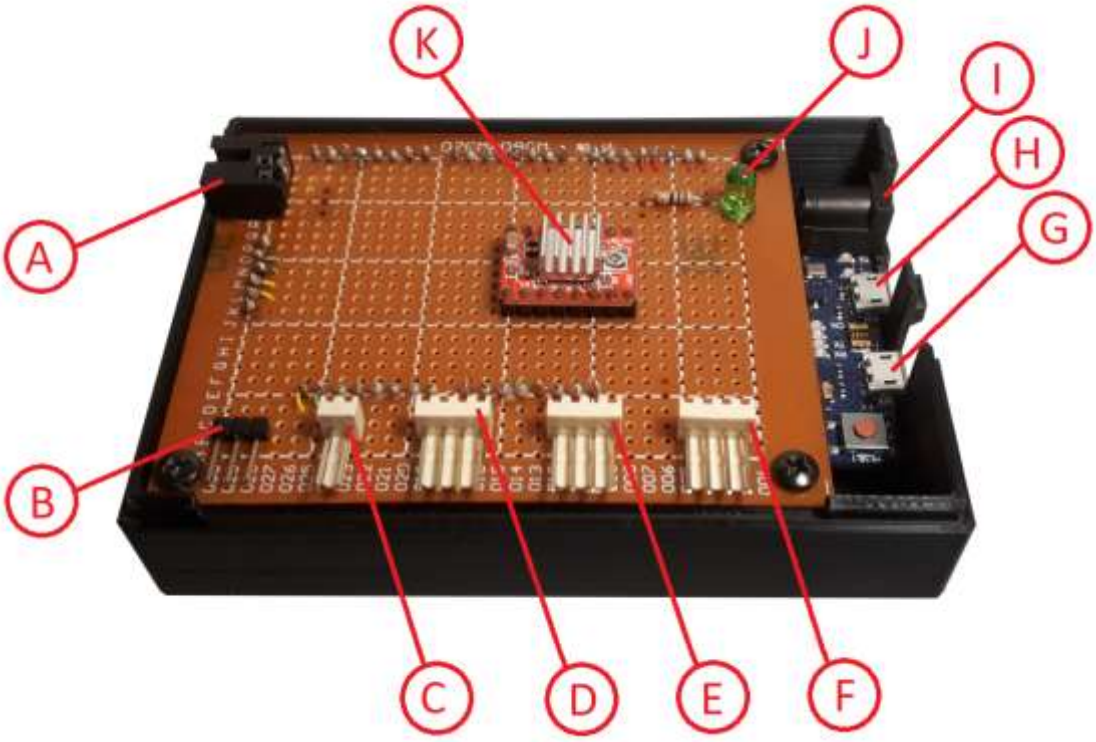
Obrázek 36 - Sestava pro měření tlakové ztráty

Popis komponent sestavy pro měření tlakové ztráty

- A – měřené zařízení, v tomto případě molitanový filtr
- B – element pro měření statického tlaku
- C – Wilsonova mříž
- D – usměrňovač proudění
- E – pomocný ventilátor
- F – závěrná klapka
- G – řídicí jednotka
- H – připojovací USB kabel
- I – diferenciální tlakové senzory SDP
- J – regulátor pomocného ventilátoru

4.3 Zapojení řídicí jednotky

Na Obrázku 37 lze vidět zapojení univerzální desky plošných spojů osazenou konektory, driverem pro krokový motor a signalizační LED diodou do platformy Arduino DUE R3. Konektory D, E a F jsou shodné a pro jejich zapojení je nutné se řídit popisy na víku krytu, případně popisem na Obrázku 37. V opačném případě hrozí nebezpečí zničení připojených tlakových senzorů nebo řídicí elektroniky regulátoru pomocného ventilátoru. Pro připojení řídicí jednotky k počítači slouží mikro USB konektor, který je na krytu označen písmenem P (programing port).



Obrázek 37 - Zapojení řídicí jednotky

Popis konektorů a ostatních komponent

- A – napájení driveru A4988, max. 35 V, souosý konektor 5,5/2,1 mm
- B – konektor koncového spínače, zleva VDD 3,3 V, GND, pin 35
- C – konektor optočlenu regulátoru, zleva pin DAC0, GND
- D – konektor tlakových senzorů, zleva VDD 3,3 V, pin SDA, pin SCL, GND
- E – konektor relé regulátoru, zleva VDD 5 V, pin 37, pin 39, GND
- F – konektor krokového motoru, připojeno na A4988, zleva 2B, 2A, 1A, 1B
- G – native mikro USB port
- H – programing mikro USB port
- I – napájení Arduina DUE R3, 7 až 12 V, není nutné při připojení USB
- J – LED dioda signalizující připojení k počítači, pin 41
- K – driver krokového motoru A4988, krok: pin 3, směr otáčení: pin 4

5 OVLÁDÁNÍ VZDUCHOTECHNICKÉHO PRACOVIŠTĚ

V následující kapitole je podrobně popsáno celkové ovládání přenosného automatizovaného pracoviště, které se skládá ze vzduchového kanálu, měřících elementů, tlakových senzorů, řídicí jednotky a připojeného počítače.

Je zde popsána výsledná regulace pomocného ventilátoru a jednotlivé části uživatelského prostředí. Dále je popsán proces zpracování naměřeného statického a dynamického tlaku, ze kterých se v reálném čase aktualizuje výsledný graf závislosti statického tlaku na průtoku ventilátoru, respektive závislost tlakové ztráty měřeného zařízení na průtoku vzduchu potrubím.

Podkapitola 5.4 shrnuje funkce nahraného programu v řídicí jednotce a spustitelnou aplikaci naprogramovanou v jazyce Python, která je ovládána skrze uživatelské prostředí v připojeném počítači. Součástí jsou zjednodušené vývojové diagramy popisující hlavní části programů.

5.1 Regulace pomocného ventilátoru

Z dříve popsaných možností řízení jednofázových asynchronních ventilátorů s kondenzátorem v kapitole 2.5 byla vybrána regulace pomocí optočlenu. Nutnost navržení regulace pro tento typ motoru vychází z konceptu využitelnosti použité elektroniky k ovládání vzduchotechnických pracovišť jiných velikostí a tvarů potrubí. U větších vzduchových kanálů odpadá možnost zvolení pomocného ventilátoru s jednoduchým DC motorem, který lze snadno ovládat pomocí PWM.

Bylo rozhodnuto upravit dostupný triakový regulátor otáček s potenciometrem. Ten je nově možné ovládat výstupním analogovým signálem z řídicí jednotky, přičemž je zachována původní funkce regulace přes potenciometr.

Rozšíření funkce spočívá v přidání dvoukanálového relé modulu, kterým je spínána fáze a nulový vodič původního regulátoru. Spínání relé je ovládané Arduinem přes digitální piny 37 a 39.

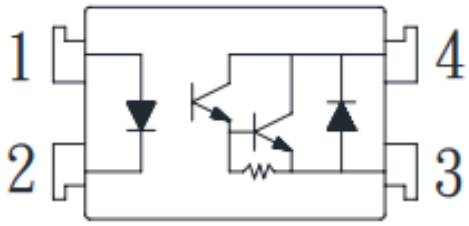
Obrázek 38 - Dvoukanálový relé modul [23]

Technické parametry relé modulu [23]

- počet kanálů: 2
- napájecí napětí: DC 5 V
- minimální proudové buzení: 15 až 20 mA
- maximální spínané napětí: AC 250 V
- maximální spínaný proud: 10 A

Původní deska obsahuje dva potenciometry, jedním z nich jsou trvale nastaveny minimální otáčky ventilátoru a druhý slouží pro samotnou regulaci. Mimo relé modul byl také přidán optočlen s darlingtonovým tranzistorem, který podle přiděleného napětí postupně spíná vodič paralelně umístěn vedle obou potenciometrů. Při maximálním uzavření obou potenciometrů jsou nastaveny minimální otáčky motoru. Tomuto stavu odpovídá odpor potenciometrů 360 kΩ, respektive nulové napětí na optočlenu. Opakem je maximální otevření alespoň jednoho z potenciometrů, čemuž odpovídá nulový odpor, respektive napětí alespoň 1,082 V na optočlenu.

Přidané komponenty jsou na Obrázku 40 zobrazeny v červených rámečcích. Součástí schématu jsou i popisy svorek, které odpovídají připojením k pinům Arduina.



Obrázek 39- Schéma optočlenu THT KP40101B DIP4 [24]

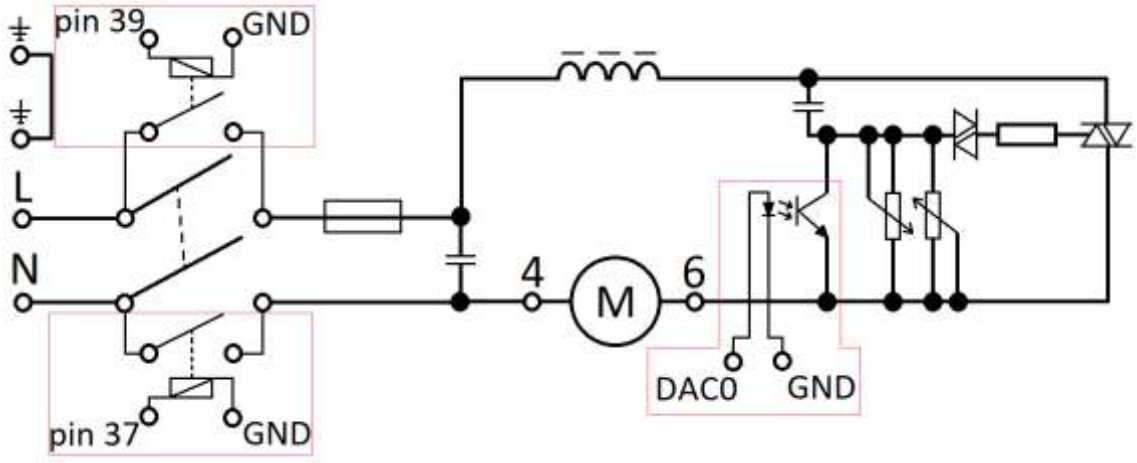
Technické parametry optočlenu THT KP40101B DIP4 [24]

- maximální vstupní napětí: 1,4 V
- požadované proudové buzení vstupu: 50 mA
- maximální spínané napětí: 300 V
- maximální výkon na vstupu: 0,07 W
- izolační pevnost: 5 kV (maximálně 1 minutu)
- provozní teplota: -55 až 115 °C
- maximální výstupní proud: 150 mA
- maximální výstupní výkon: 0,2 W

Na zjednodušeném schématu regulátoru pomocného ventilátoru lze vidět vlevo svorkovnici pro připojení fáze L, nulového vodiče N napájení ze sítě 230 V a zemnících vodičů. Svorkovnice dále obsahuje svorku pro připojení fáze ventilátoru označenou

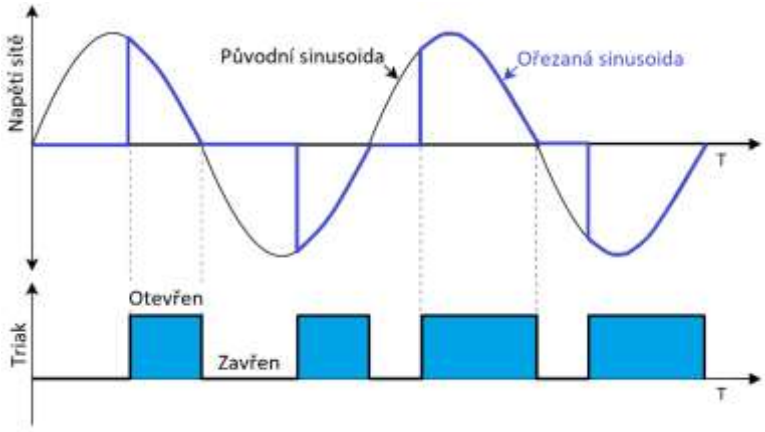
číslem 6. Číslem 4 je označena svorka nulového vodiče a slot s číslem 5 je volný, proto ani není ve schématu zaznačen.

Na obě strany duálního spínače je připojen jeden kanál relé modulu. Oba kanály jsou spínány logickou jedničkou na pinech 37 a 39 oproti zemi Arduina. Digitálně analogovým převodníkem lze na pin označený na platformě jako DAC0 přivádět napětí 0,5 až 3,3 V. Pro navržené řízení je na optočlen přiváděno napětí 1,002 až 1,082 V, což u 12-bitového DAC odpovídá hodnotám 835 až 915. Regulace ovládaná řídicí jednotkou je možná pouze pokud jsou oba potenciometry nastaveny na minimální otáčky.



Obrázek 40 - Schéma regulátoru pomocného ventilátoru

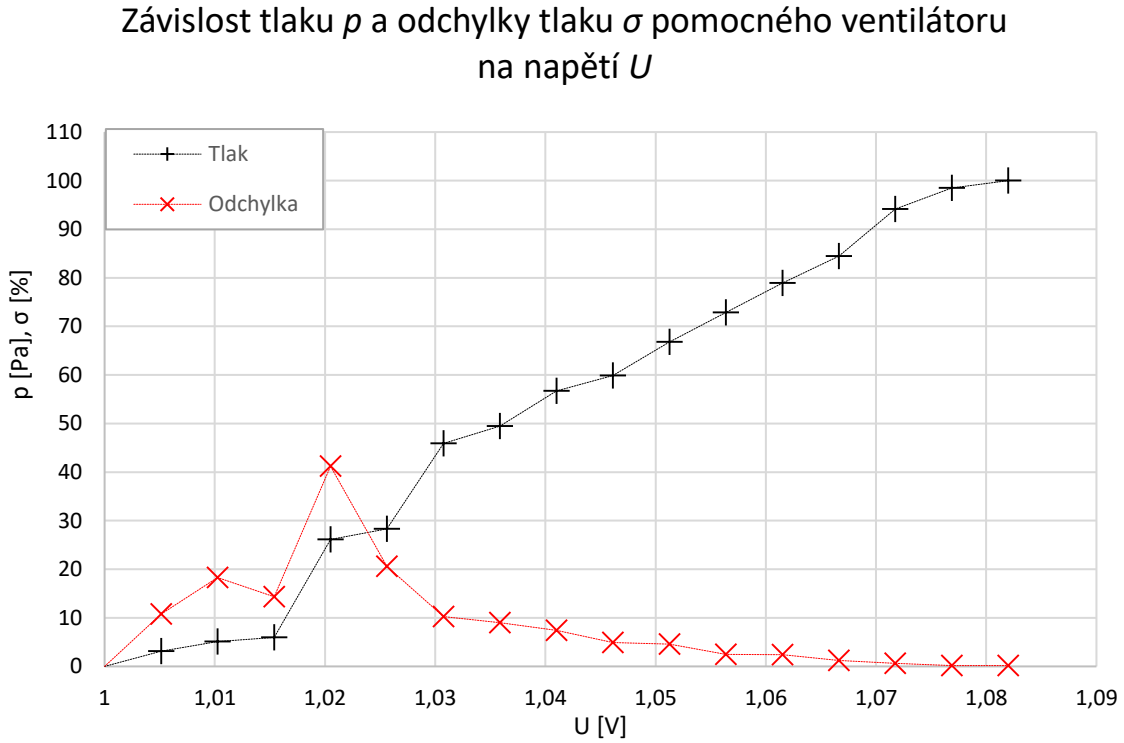
Princip triakového řízení otáček spočívá ve spínání určitých úseků napájecího sinusového signálu, jejichž velikost je dána odporem použitých potenciometrů, respektive propustností přidaného optočlenu. Čím je opor menší, respektive propustnost optočlenu větší, tím se rychleji nabije sériově zapojený kondenzátor. Při nabitém kondenzátoru sepne diak řídicí napětí vedoucí na gate triaku. Čím dříve je triak sepnut, tím je na pomocný ventilátor připojeno větší efektivní napětí.



Obrázek 41 - Princip spínání sinusového signálu triakem

Velkou nevýhodou regulace jednofázových asynchronních motorů s kondenzátorem je nestabilita při nízkých otáčkách. Na Obrázku 42 jsou zobrazeny výsledky testovacího měření regulace pomocného ventilátoru, kdy byla závěrná klapka nastavena tak, aby maximální dosažený statický tlak odpovídal hodnotě 100 Pa. Za těchto podmínek lze na grafu teoreticky pozorovat vykonaný tlak ventilátoru od 0 do 100 % v závislosti na spínacím napětí přivedené na optočlen. Z grafu je také patrná nelinearita regulace.

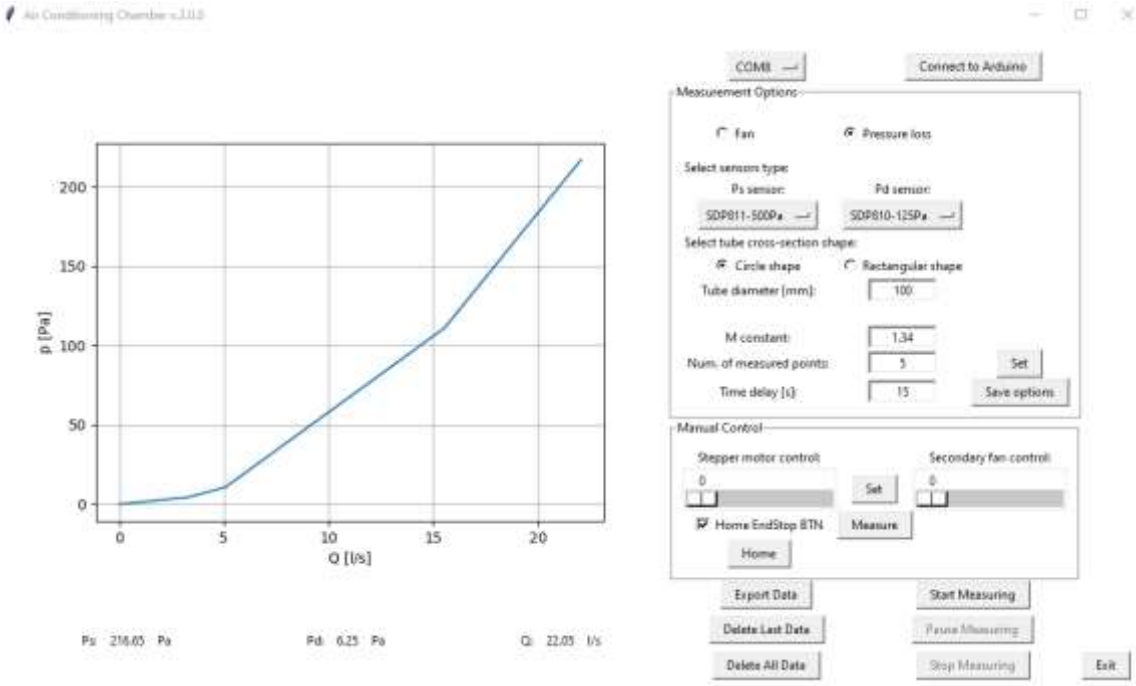
Během testu bylo pro jednotlivé úrovně napětí naměřeno deset hodnot statického tlaku. Do grafu tak bylo možné zobrazit také směrodatnou odchylku pro konkrétní hodnoty řídicího napětí na optočlenu. V grafu je tato odchylka vynesena v procentech. Dalším měřením bylo zjištěno, že regulace pomocí potenciometru vykazuje přibližně poloviční míru nestability. Nicméně tato nestabilita má na měřené charakteristiky automatizovaného pracoviště zanedbatelný vliv, jelikož je statický tlak snímán téměř ve stejném okamžiku jako tlak dynamický. Měřené veličiny jsou tak snímány za stejných podmínek.



Obrázek 42 – Graf závislosti tlaku a odchylky tlaku pomocného ventilátoru na napětí

5.2 Uživatelské rozhraní

Na Obrázku 43 je zobrazeno okno uživatelského rozhraní, které je rozděleno na několik částí. Tento snímek byl pořízen během měření charakteristiky tlakové ztráty. Okno rozhraní je rozděleno na část s grafem aktuálně naměřených dat a na druhou sekci, kterou je možno ovládat automatizované pracoviště. V kapitolách níže jsou blíže popsány veškeré funkce jednotlivých částí uživatelského rozhraní.



Obrázek 43 - Okno uživatelského rozhraní

5.2.1 Připojení k řídicí jednotce

V pravé horní části se nachází sekce pro navázání komunikace s řídicí jednotkou. Nejprve je nutné připojit Arduino k počítači přes USB kabel. Přes Správce zařízení v záložce Porty (COM a LPT) je možné zjistit k jakému číslu COM portu bylo Arduino připojeno. Po zvolení stejného čísla portu v nabídkovém menu uživatelského rozhraní a kliknutí na tlačítko *Connect to Arduino* je navázání komunikace potvrzeno vyskakovacím oknem a rozsvícením zelené LED diody na řídicí jednotce s popisem *Com.*

V opačném případě dojde k zobrazení chybového vyskakovacího okna. To upozorňuje na chybu v navázání komunikace s doporučením zkontrolovat připojení USB kabelu a čísla COM portu.

5.2.2 Nastavení parametrů

Sekce *Measurement Options* slouží k nastavení veškerých vstupních informací, které jsou nutné ke správné funkci pracoviště. Na prvním řádku lze zvolit měření ventilátorové charakteristiky zaškrtávacím políčkem *Fan*, nebo zvolit měření tlakové ztráty zaškrtnutím *Pressure Loss*.

Následuje volba konkrétních typů použitých tlakových senzorů SDP pro měření statického a dynamického tlaku. Podmínkou výběru je zvolení dvou různých výrobních řad například SDP610 a SDP810. Nelze zvolit dva senzory stejné řady, i když mají jiný rozsah měření, jelikož mají tato čidla stejnou adresu pro I2C sběrnici.

Dalšími zaškrtávacími políčky lze zvolit mezi kruhovým nebo obdélníkovým tvarem průřezu vzduchového kanálu. Při konkrétních volbách se přepínají možnosti

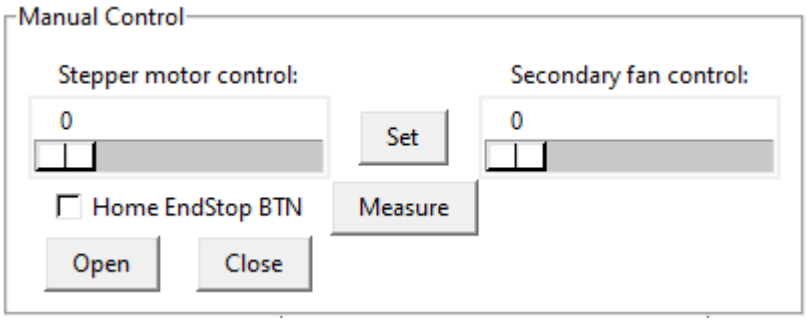
vstupů pro zadání průměru nebo šířky a výšky potrubí v mm. Konstantou *M* je myšlen ztrátový součinitel použité Wilsonovy mříže.

Do pole počtu měřených bodů (*Num. of measured points*) je zadáváno požadované množství bodů při měření tlakové ztráty a minimální počet bodů při měření ventilátorové charakteristiky během automatizovaného procesu snímání. Celkové množství bodů u ventilátorové charakteristiky je dáno počtem opakování měření při snaze dosáhnout nulového tlaku a maximálního průtoku při zapnutí pomocného ventilátoru. Pole *Time delay* udává čas pro ustálení proudění v potrubí.

V této části je také tlačítko *Set*, kterým je pokaždé nutné potvrdit vložené informace. V případě vložení nevyhovujících informacích dojde k otevření vyskakovacího okna s příslušnou chybovou hláškou. Tlačítkem *Save options* jsou vstupní informace uloženy do textového souboru *OptionsSave.txt*. Při navázání komunikace počítače s řídicí jednotkou dochází k automatickému obnovení těchto uložených vstupních hodnot. Není proto třeba při každém zapnutí programu znovu vypisovat všechna nastavení.

5.2.3 Manuální ovládání

V případě potřeby je možné ovládat automatizované pracoviště i manuálně. Základním nastavením je zvolení přítomnosti koncového spínače na závěrné klapce. Tlačítkem *Home* dojde k nastavení a uložení výchozí pozice. V případě absence spínače je možné posouvat klapkou pomocí tlačítek *Open* a *Close* viditelných na Obrázku 44. Posuvnými panely lze nastavit pozici klapky od 0 do 100 a otáčky pomocného ventilátoru od 0 do 80. Nastavení je nutné potvrdit tlačítkem *Set*. Manuální měření dat je provedeno kliknutím na tlačítko *Measure*.



Obrázek 44 - Manuální ovládání závěrné klapky bez koncového spínače

5.2.4 Automatické měření

Automatické měření vychází ze zadaných parametrů v sekci *Measurement Options*. Po spuštění je naměřena kompletní charakteristika ventilátoru případně tlakové ztráty jiného zařízení. Algoritmus měření je popsán v kapitole 5.4 spolu s vývojovým diagramem. Kdykoliv v běhu programu je možné měření pozastavit stisknutím tlačítka *Pause Measuring*. Pokračovat lze kliknutím na tlačítko *Resume Measuring*, které se po pozastavení měření objeví místo tlačítka *Start Measuring*. Měření jde kdykoliv zrušit tlačítkem *Stop Measuring*, čímž ovšem dojde ke smazání doposud získaných dat.

5.2.5 Zpracování dat

Naměřená data, která jsou zobrazena v grafu uživatelského rozhraní lze uložit do textového souboru tlačítkem *Export Data*. Během práce jsou automaticky ukládána všechna data do textového souboru *DataAutosave.txt* a to i ta, která jsou smazána pomocí tlačítek uživatelského prostředí. Jedná o pojistku proti neúmyslnému smazaní dat, případně při poruše běhu celé aplikace. Jedinou možností přemazání tohoto souboru je právě při exportu dat zobrazených v grafu okna rozhraní.

Užitečnou funkcí převážně při manuálním měření je tlačítko *Delete Last Data*, které smaže poslední bod získaných dat. Stisknutím *Delete All Data* jsou vymazána všechna data zobrazená v grafu uživatelského rozhraní.

5.3 Zpracování měřených veličin

Data statického a dynamického tlaku snímané diferenciálními tlakovými senzory Sensirion SDP jsou po sběrnici I2C zaslány do řídicí jednotky, kde jsou dále zpracovány a přepočítány na skutečné hodnoty obou tlaků. Přepočet závisí na rozsahu použitého senzoru, kdy pro rozsah 25 Pa je získaná hodnota podělena číslem 1200 Pa^{-1}, u rozsahu 125 Pa se jedná o hodnotu 240 Pa^{-1} a pro rozsah 500 Pa jde o dělení číslem 60 Pa^{-1}. Přepočet naměřených dat na teplotu není závislý na použitém rozsahu senzoru. U senzoru SDP810 a SDP811 je získaná hodnota dále dělena číslem 200 $°C^{-1}$.

Po sériové komunikací řídicí jednotky s počítačem jsou naměřená data dále použita pro stanovení hledaných charakteristik. Hodnota statického tlaku pro ventilátorovou charakteristiku a tlakovou ztrátu jiných zařízení je brána přímo bez nutnosti dalších výpočtů. V obou případech měření je třeba vypočítat průtok vzduchu. Vychází se ze zákona zachování hmotnosti, ze kterého po úpravě získáme následující vztah:

$$Q = S \cdot v = S \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \frac{p_d}{M}} \qquad [m^3/s] \qquad (17)$$

, kde S je průřez potrubím, v je střední rychlost proudění vzduchu, p_d je dynamický tlak, ρ je hustota vzduchu a M je ztrátový součinitel použité Wilsonovy mříže.

Hustota vzduchu je závislá na teplotě a absolutním tlaku. Právě pro výpočet hustoty vzduchu je snímána řídicí jednotkou i teplota vzduchu v potrubí. Okamžitou hodnotu hustoty lze spočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{p_a}{T \cdot R_s} \qquad [kg/m^3] \qquad (18)$$

, kde p_a je absolutní tlak, T [K] je teplota vzduchu a Rs je specifická konstanta pro suchý vzduch, která je rovna 287,058 $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Hodnota absolutního tlaku je uvažována jako 101325 Pa. Výsledný výpočet průtoku vzduchu je získán z rovnice:

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot T \cdot R_s}{p_a} \cdot \frac{p_d}{M}} \cdot 1000 \qquad [\mathrm{l/s}] \qquad (19)$$

Naměřená hodnota statického tlaku je dále vynášena do grafu v závislosti na vypočítaném průtoku vzduchu potrubím. Pro dosažení co největší přesnosti měření je důležité snímat hodnoty tlaků a teploty v jednom časovém okamžiku.

5.4 Komunikace řídicí jednotky Arduino s počítačem

V následující kapitole jsou na vývojových diagramech popsány hlavní části řídicího algoritmu vytvořeného v programovacím jazyce Python. Tento program je ovládán skrze vytvořené uživatelské rozhraní v jazyce C.

5.4.1 Program řídicí jednotky

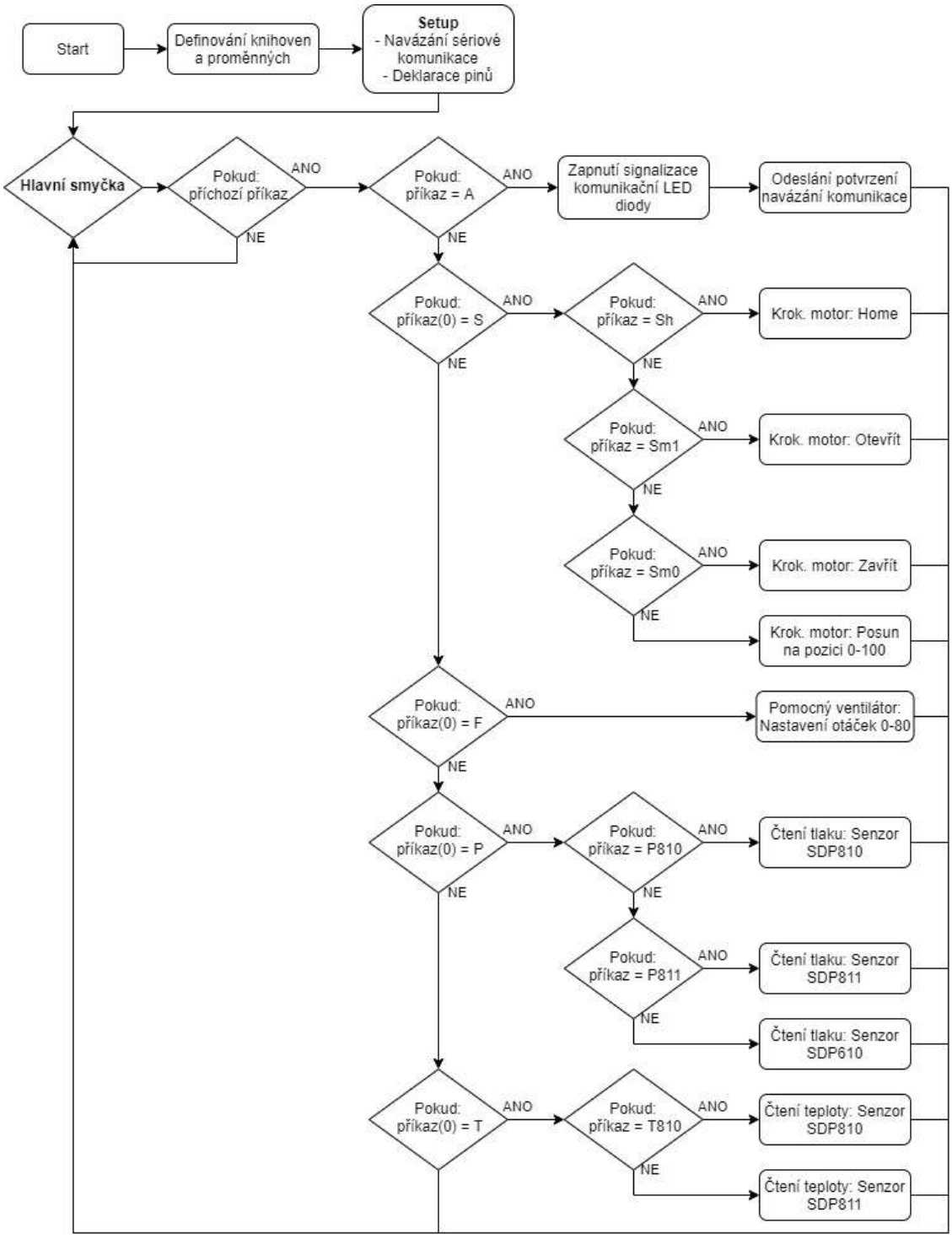
Úkolem nahraného algoritmu v řídicí jednotce je sledování a vykonávání příchozích příkazů po sériové lince. Samotný program začíná definováním použitých knihoven a proměnných. Dále jsou nastaveny používané piny Arduina a je započata sériová komunikace skrze USB kabel připojený do počítače.

Hlavní smyčka neustále dokola sleduje příchozí zprávy a podle struktury obdrženého příkazu je dále vykonán příslušný úkol. Níže je popsán výčet používaných příkazů zasílaných řídicím algoritmem z připojeného počítače.

Seznam příkazů

- A – příkaz pro odeslání zpětné vazby pro potvrzení funkčnosti komunikace
- Sh – příkaz pro uložení výchozí pozice krokového motoru závěrné klapky
- Sm1 – příkaz pro otevírání závěrné klapky
- Sm0 – příkaz pro zavírání závěrné klapky
- Sxxx – příkaz pro nastavení konkrétní polohy klapky (xxx: polohy 0 až 100)
- P-SDPxxx-yyyPa – příkaz pro snímání tlaku (xxx: řada senzoru, yyy: rozsah)
- T-SDPxxx-yyyPa – příkaz pro snímání teploty (xxx: řada senzoru, yyy: rozsah)
- Fxx – příkaz pro nastavení otáček pomocného ventilátory (xx: hodnoty 0 až 80)

Zahájení běhu programu a rozhodovací logika obsažená v hlavní smyčce je zobrazena na zjednodušeném vývojovém diagramu na Obrázku 45. Jednotlivé příkazy jsou zavolány jako externí funkce mimo hlavní smyčku.



Obrázek 45 - Vývojový diagram programu řídicí jednotky

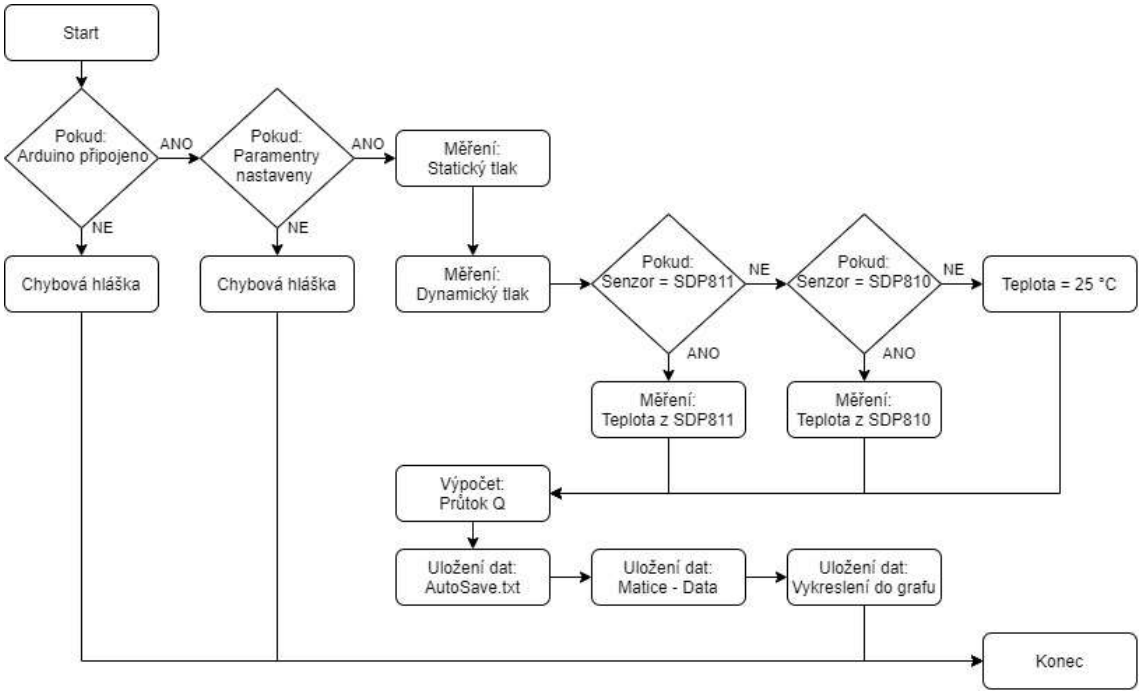
5.4.2 Program Python

K naprogramování uživatelského rozhraní v jazyce Python byla využita knihovna *tkinter*. Ta obsahuje veškeré komponenty typu tlačítek, polí pro zadávání textu, popisová pole, menu s možností výběru, zaškrtávací políčka a další prvky. Pro vykreslování naměřených dat v grafu byla využita knihovna *matplotlib*.

Na následujícím vývojovém diagramu je popsána funkce pro manuální měření dat, která má název *MeasureBtn_Fcn*. Tato funkce je spouštěna tlačítkem *Measure*

v sekci manuálního ovládání popsaného v kapitole 5.2.3. Tuto funkci dále pro získání dat využívá i algoritmus automatizovaného měření, jehož vývojový diagram je na Obrázku 47.

Na začátku funkce *MeasureBtn_Fcn* je nejprve zkontrolováno připojení komunikace k řídicí jednotce a nastavení vstupních parametrů. Dále jsou v krátkém sledu postupně za sebou zaslány příkazy pro snímání dat statického i dynamického tlaku a teploty podle konkrétních typů použitých senzorů. Dále dochází k výpočtu průtoku vzduchu *Q* popsaném v kapitole 5.3, uložení dat do textového souboru *AutoSave.txt* a do matice dat, ze které jsou vykreslovány naměřené veličiny.

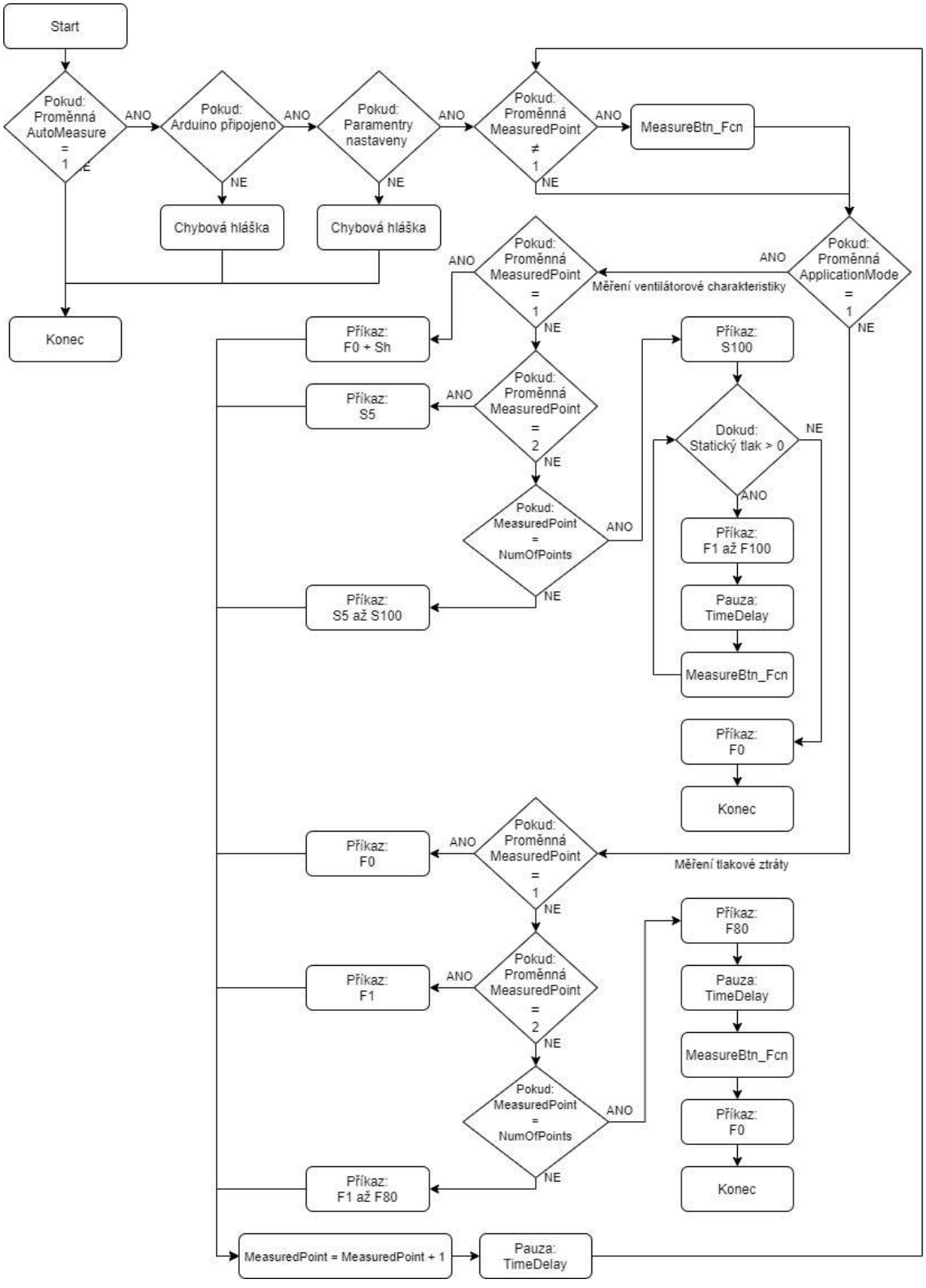


Obrázek 46 - Vývojový diagram manuálního měření dat

Automatizované měření začíná kontrolou proměnné *AutoMeasure*, která nese informaci pro pokračování běhu algoritmu. Dále je kontrolováno navázání komunikace s řídicí jednotkou a nastavení vstupních parametrů. U prvního cyklu je vynecháno počáteční měření dat a následuje rozhodnutí pro měření ventilátorové charakteristiky, nebo tlakové ztráty podle nastavených vstupních parametrů.

U stanovení ventilátorové charakteristiky je v prvním kroku úplně zastaven pomocný ventilátor, dojde k uložení výchozí pozice krokového motoru závěrné klapy, čímž zároveň dojde k úplnému uzavření potrubí. Následuje inkrementace proměnné počítající změřené body a časová pauza pro ustálení proudění vzduchu. Dochází k prvnímu měření pomocí funkce *MeasureBtn_Fcn.* Ve druhém kroku je nastavena závěrná klapka na fixní hodnotu 5, kdy dochází k malému pootevření klapky. V následujících krocích je postupně klapka více a více otevíraná, přičemž se pokaždé čeká na ustálení podmínek v potrubí a následnému měření dat. Posledním krokem je klapka maximálně otevřena a pomalým zvyšováním otáček pomocného ventilátoru dochází ke snížení statického tlaku do záporných hodnot a ke konci měření.

Měření tlakové ztráty začíná při nulových otáčkách pomocného ventilátoru a v dalších krocích dochází k postupnému zvyšování otáček. Po nastavení maximálních otáček v posledním bodě měření jsou po ustálení podmínek v potrubí načtena poslední data, čímž končí automatizované měření tlakové ztráty.



Obrázek 47 - Vývojový diagram automatizovaného měření dat

6 OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ

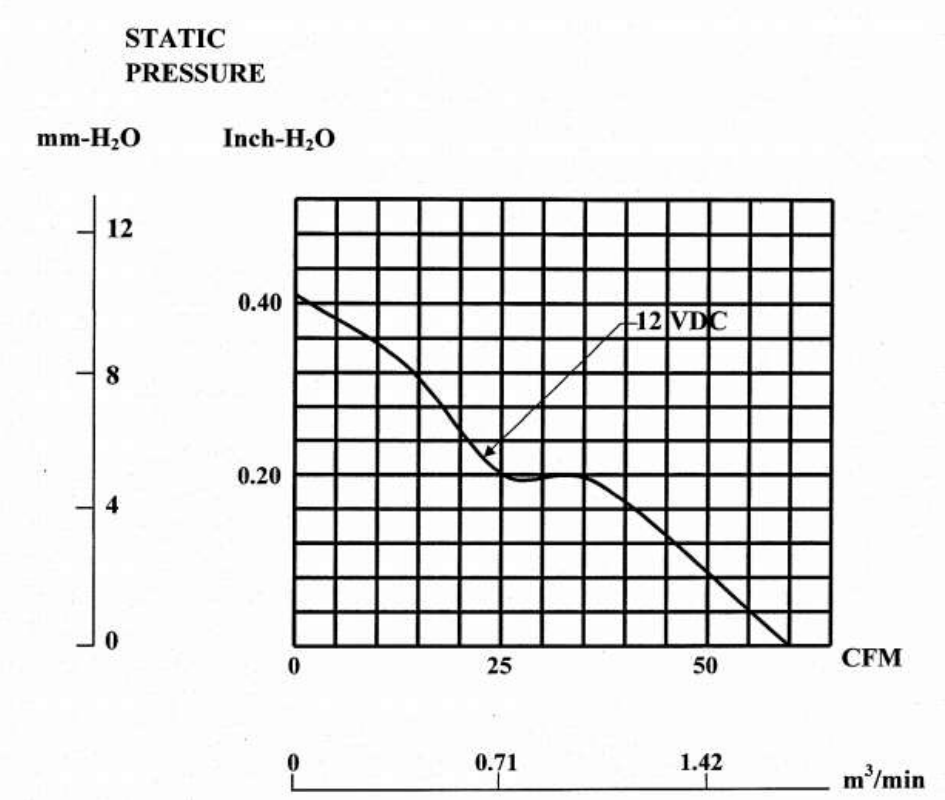
Pro určení funkčnosti navrženého přenosného automatizovaného pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin byla provedena dvě ověřovací měření. V posledních kapitolách jsou porovnána naměřená data s charakteristikou ventilátoru od výrobce a s měřením tlakové ztráty filtru na dříve popsaném vzduchotechnickém pracovišti s kanálem o průměru 150 mm se zakoupenou Wilsonovou mříží.

6.1 Měření charakteristiky ventilátoru

Charakteristika ventilátoru byla měřena na zařízení s označením PF80251B1-000U-A99 čínského výrobce SUNON. Technická specifikace a charakteristika závislosti statického tlaku na průtoku vzduchu byla převzata z technické dokumentace výrobce.

Technická specifikace [25]

- průměr: 80 mm
- napětí: DC 12 V
- proud: 341 mA
- příkon: 4,1 W
- otáčky: 4800 RPM ± 10 %,
- průtok vzduchu: 102 m^3/h,
- hlučnost: 47,5 dB

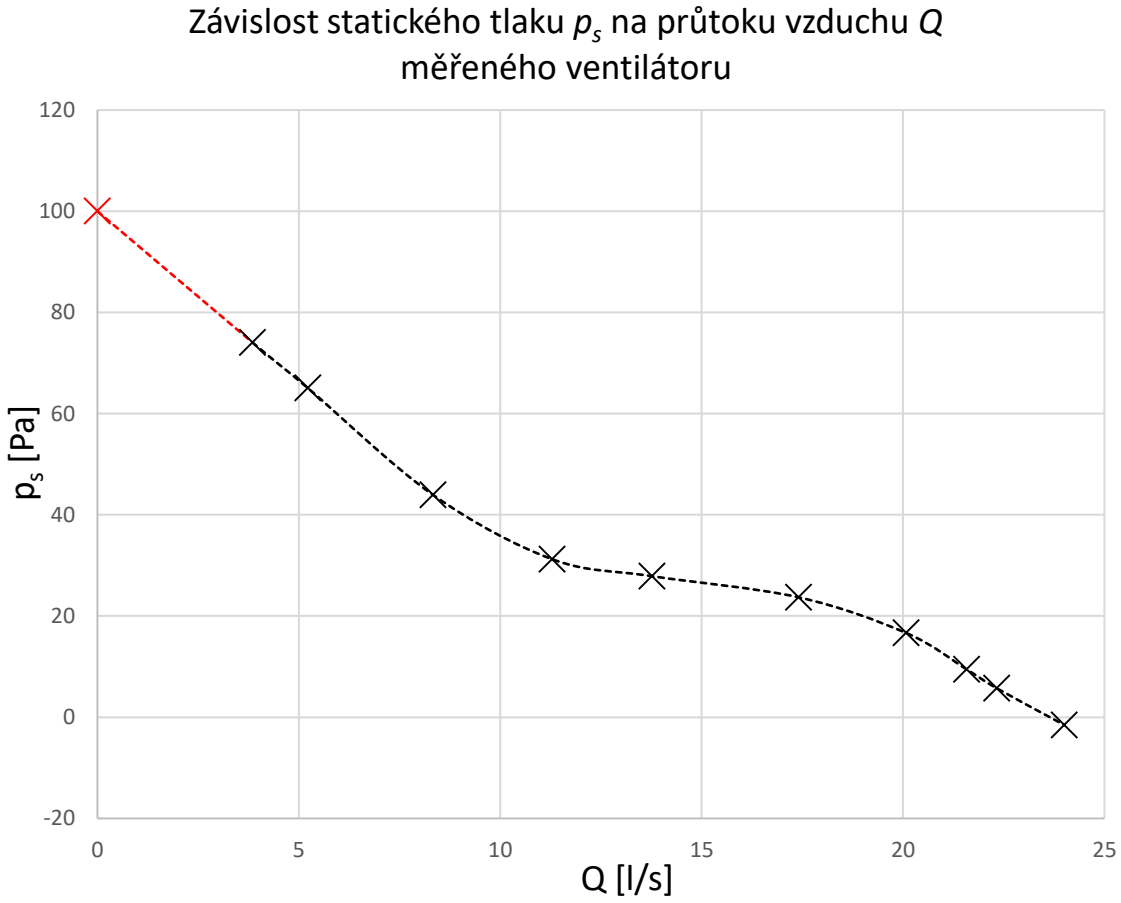


Obrázek 48 - Ventilátorová charakteristika udávaná výrobcem [25]

Získaná charakteristika na Obrázku 49 byla měřena v deseti bodech, přičemž první červený bod byl přidán navíc k doplnění dat při nulovém průtoku. Tento bod není možné navrženým pracovištěm změřit, jelikož u něj při úplném uzavření klapky dochází k mírným únikům vzduchu z potrubí převážně přes kryt pomocného ventilátoru, proto nelze naměřit nulový průtok. Přidaný bod byl zvolen v souřadnicích pro nulový průtok a statický tlak 100 Pa, což by mělo odpovídat charakteristice od výrobce.

Na první pohled je vidět jasná podobnost v naměřené charakteristice oproti té od výrobce. Nicméně poloha sedla je výrobcem udávaná přibližně v polovině maximálního statického tlaku. Zde sedlo naměřené charakteristiky odpovídá spíše poloze v jedné třetině maximálního tlaku. Navíc naměřený maximální průtok vzduchu se pohybuje kolem hodnoty 24 litrů za sekundu. Přepočtená data průtoku od výrobce odpovídají hodnotě 28 litrů vzduchu za sekundu.

Maximální hodnoty statického tlaku 102 Pa udávané výrobcem by bylo možné teoreticky dosáhnout, ale vzhledem ke snižujícímu se trendu charakteristiky od výrobce směrem k nulovému průtoku je dosažení této hodnoty tlaku nepravděpodobné. Nicméně sám výrobce udává rychlost otáček ventilátoru s ± 10 % tolerancí. Vzhledem k teoretické přímé závislosti průtoku na otáčkách ventilátoru a hodnotě tlaku závislé na kvadrátu otáček se dá provedené měření považovat za úspěšné.

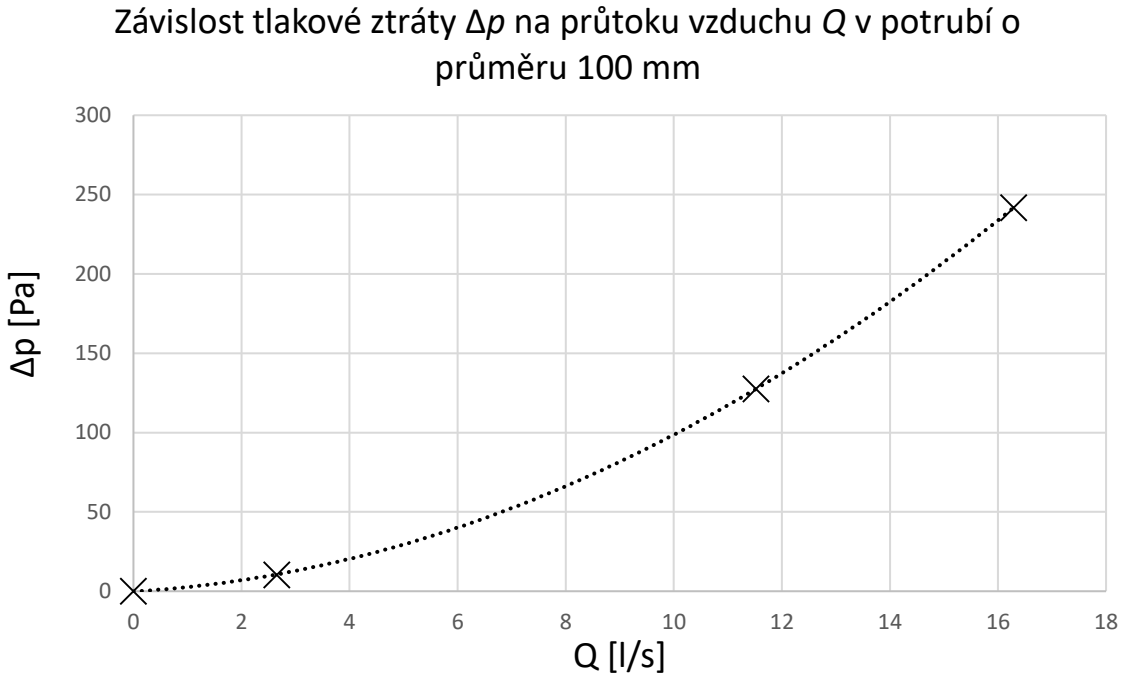


Obrázek 49 - Naměřená ventilátorová charakteristika

6.2 Měření tlakové ztráty vzduchového filtru

Vzhledem ke špatné dohledatelnosti charakteristik tlakové ztráty běžně dostupných malých vzduchových filtrů byla zvolena reference dat naměřených jiným pracovištěm s průměrem potrubí 150 mm a zakoupenou certifikovanou Wilsonovou mříží. Jako měřené zařízení byl zvolen běžný molitanový filtr o tloušťce jednoho centimetru.

Stanovení tlakové ztráty v závislosti na průtoku vzduchu je v praxi snadnější, něž je měření ventilátorové charakteristiky. Tato závislost má kvadratický průběh a k jejímu stanovení stačí tedy znát teoreticky jen nulový a další dva body. Pro přesnější charakteristiky byly v obou případech vždy měřeny čtyři body.



Obrázek 50 - Graf tlakové ztráty vzduchového filtru na 100 mm potrubí

Závislost tlakové ztráty vychází z předpisu kvadratické funkce:

$$y = k \cdot x^2 \tag{20}$$

, kdy dosazením tlakové ztráty Δp, aerodynamického odporu K_{filtr} a průtoku vzduchu Q do rovnice 20 vznikne rovnice odpovídající Atkinsonovu zákonu:

$$\Delta p = K_{filtr} \cdot Q^2 \qquad [\text{Pa}] \tag{21}$$

Aerodynamický odpor K_{filtr} je přímo závislý na ztrátovém součiniteli ξ, který je přitom konstantní pro použité potrubí o průměru 100 mm i 150 mm. Teoretický výpočet je dán následujícím vztahem:

$$K_{filtr} = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{1}{S^2} \qquad [\text{m}^2] \tag{22}$$

, kde ρ je hustota vzduchu a S je průřez potrubí.

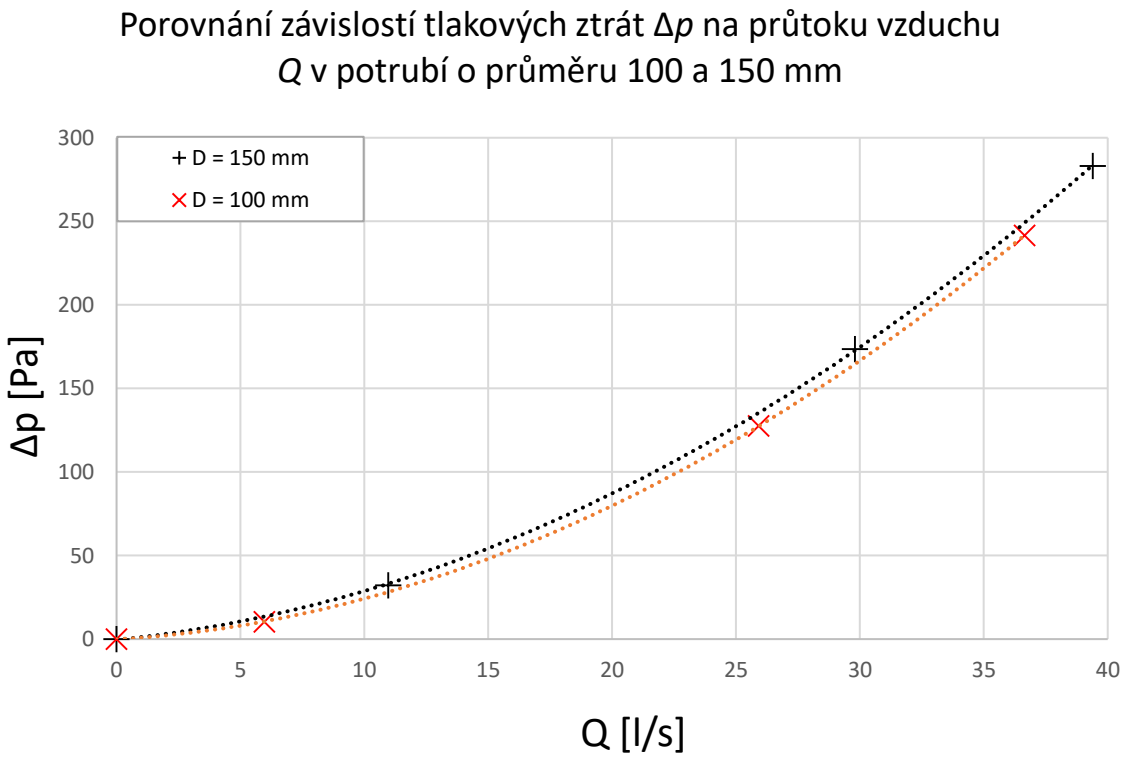
Graf na Obrázku 50 ukazuje závislost tlakové ztráty měřeného filtru, jejichž hodnoty průtoku je ovšem třeba přepočítat na větší průřez potrubí, aby bylo možné charakteristiky porovnat. Při předpokladu zachování střední rychlosti proudění musí platit rovnost:

$$v = \frac{Q_{100}}{S_{100}} = \frac{Q_{150}}{S_{150}} \qquad [\mathrm{m/s}] \qquad (23)$$

$$Q_{150} = \frac{S_{150}}{S_{100}} Q_{100} = 2{,}25 \cdot Q_{100} \qquad [\mathrm{l/s}] \qquad (24)$$

, kde Q_{100} je průtok a S_{100} průřez v potrubí o průměru 100 mm, Q_{150} je nově vypočtený průtok pro porovnání s potrubím o průřezu S_{150} s průměrem 150 mm.
Na Obrázku 51 je černou barvou zobrazen naměřený průběh tlakové ztráty v potrubí o průměru 150 mm s certifikovanou Wilsonovou mříží a červenou barvou jsou zaznamenány přepočtené hodnoty z grafu na Obrázku 50 podle rovnice 24. Černá charakteristika má zaznamenán delší průběh křivky, jelikož je u potrubí o průměru 150 mm použit výkonnější pomocný ventilátor.

Obě zaznamenané charakteristiky mají téměř identické průběhy. Tímto ověřovacím měřením bylo dokázáno, že navržené přenosné automatizované pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin pracuje správně.



Obrázek 51 - Graf porovnání tlakových ztrát filtru na 100 a 150 mm potrubí

7 ZÁVĚR

Byla provedena rešerše současných metod pro měření průtoku vzduchu v potrubí, kdy byla vybrána rychlostní sonda známá jako Wilsonova mříž. Součástí rešerše byla také studie komerčně dostupných diferenciálních senzorů tlaku a vhodné řídicí jednotky. V návaznosti na tento průzkum byly vybrány senzory SDP811 a SDP810 od výrobce Sensirion, které jsou vhodné pro použití v kombinaci s vývojovou platformou Arduino DUE R3. Dále byly zkoumány možnosti regulace jednofázového asynchronního ventilátoru s kondenzátorem. Zvolené řízení zajišťuje regulaci efektivní hodnoty napětí pomocí triaku, který je elektronický spínán přes optočlen přímo z řídicí jednotky.

Cílem této práce byl návrh a realizace přenosného automatizovaného pracoviště pro měření vzduchotechnických veličin, které se skládá z potrubí s elementy pro měření statického a dynamického tlaku, pomocného ventilátoru a závěrné klapky ovládané krokovým motorem. Elektronické komponenty jsou ovládány řídicí jednotkou, která je připojena k počítači.

Využitím současné technologie 3D tisku byl vyroben element pro měření statického tlaku, který byl ovšem převzat z předcházejících projektů. Z důvodu absence Wilsonovy mříže pro potrubí o průměru 100 mm na trhu bylo nutné tento element navrhnout a vyrobit pomocí 3D tisku a následně provést měření odporového součinitele, které je popsané v kapitole 4.1.1. Dále byla vytisknuta závěrná klapka potrubí, usměrňovač proudění a téměř veškeré kryty elektroniky.

Bylo vytvořeno uživatelské rozhraní, přes které lze snadno manuálně i automaticky ovládat celé pracoviště. Z počítače jsou zasílány příkazy do řídicí jednotky, která je následně vykonává a případně posílá naměřená data zpět do počítače. Hlavním algoritmem vytvořeného programu je automatizované měření ventilátorové charakteristiky a tlakové ztráty jiných zařízení. Využitím tohoto algoritmu byla provedena dvě ověřovací měření, která měla za úkol zkontrolovat správnou funkčnost navrženého systému. Výsledky těchto měření lze vidět v kapitole 6.1 a 6.2. Hlavně u druhého měření tlakové ztráty bylo dosaženo velice přesných výsledků.

Do budoucna je počítáno s dalšími projekty, které naváží na tuto práci a použijí navrženou elektroniku a řídicí algoritmy pro automatizované měření u pracovišť s jinými velikostmi a tvary potrubí. Dále je určitě prostor pro zlepšení současného způsobu řešení regulace pomocného ventilátoru s možností využívat u potrubí s průměrem 100 mm stejnosměrný motor řízený pulzní šířkovou modulací.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] VLACH, Radek. Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009 [cit. 2020-06-1].
[2] Měření průtoku a proteklého množství. VŠCHT [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k451
[3] ING. ORLÍKOVÁ, Soňa. Měření průtoku tekutin. Tzbinfo [online]. 4. 2. 2008 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://voda.tzb-info.cz/teorie-voda-kanalizace/4624-mereni-prutoku-tekutin-principy-prutokomeru
[4] Distribuce zemního plynu - 2. část. E-on [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.eon-distribuce.cz/clanek/distribuce-zemniho-plynu-2-cast
[5] KADLEC, K. Coriolisovy průtokoměry. AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku, listopad 2010, roč. 16, č. 11, s. 40-45. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42308.pdf. ISSN 1210- 9592.
[6] Coriolisovy hmotnostní průtokoměry. Endress+Hauser [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/coriolisovy-hmotnostni-prutokomery
[7] Wilsonova mříž (návod k montáži a použití). AIRFLOW [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: http://www.airflow.cz/pdf/wilsonovy_mrize.pdf
[8] MATTHEWS, G. J. How to determine air flow [online]. s. 22 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: https://www.tsi.com/getmedia/668b4c26-9783-4bc8-9dd3-c921b557bf71/how_to_determine_air_flow?ext=.pdf
[9] NOVÁK, Jaroslav. Vlastnosti frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory. Elektro časopis pro elektrotechniku [online]. ČVUT Praha, 2010 [cit. 2020-06-1]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vlastnosti-frekvencne-rizenych-pohonu-s-jednofazovymi-asynchronnimi-motory--10255
[10] Potrubní radiální ventilátor CK 100C. Ventila vzduchotechnika [online]. [cit. 2020-06-1]. Dostupné z: https://www.ventila-vzduchotechnika.cz/ventilator/ventilatory/potrubni-ventilatory/radialni-ventilatory-do-potrubi/radialni-potrubni-ventilatory-ostberg/radialni-potrubni-ventilatory-ostberg-ck/produkt/potrubni-radialni-ventilator-ck-100c
[11] DPS 300. BD sensors tlakoměrná technika [online]. [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://www.bdsensors.cz/fileadmin/user_upload/Download/kat_listy_datasheets/DPS300_CS.pdf
[12] Differential Pressure Sensors SDP800 Series. Sensirion [online]. [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://www.sensirion.com/en/flow-sensors/differential-pressure-sensors/sdp800-proven-and-improved/
[13] Senzory Sensirion SDP změří tlak ale i průtok. SOS electronic [online]. 2013 [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://www.soselectronic.cz/articles/sensirion/sensirion-senzory-sensirion-sdp-zmeri-tlak-ale-i-prutok-1440

[14] Raspberry Pi 4 Model B - 2GB RAM. Arduino-Shop [online]. [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/7591-raspberry-pi-4-model-b-2gb-ram.html
[15] ARDUINO UNO REV3. Arduino [online]. [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3
[16] ARDUINO DUE. Arduino [online]. [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://store.arduino.cc/arduino-due
[17] Duct fan CK 100 C. Elgra [online]. [cit. 2020-06-3]. Dostupné z: https://elgracool.pl/product-eng-664-Duct-fan-CK-100-C.html
[18] Wilsonovy mříže. Airflow [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://www.airflow.cz/produkty/pristroje/wilson.php
[19] I2C (TWI) – sériová komunikace po dvou vodičích s adresací. Zavavov [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: http://www.zavavov.cz/cz/elektrotechnika/komunikacni-sbernice/68-i2c-twi-seriova-komunikace-po-dvou-vodicich-s-adresaci/
[20] HY200-1713. Distrelec [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://www.distrelec.cz/cs/hybridni-krokovy-motor-140nmm-nema-17-mae-hy200-1713-0033-bx04/p/15422338
[21] A4988 Datasheet (PDF) - Allegro MicroSystems. ALLDATASHEET [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/338780/ALLEGRO/A4988.html
[22] Motor driver A4988 Pro Reprap 3D Tiskárny. Arduino-Shop [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/1133-motor-driver-a4988-pro-reprap-3d-tiskarny.html
[23] 2-kanály relé modul 5VDC 250VAC 10A. Arduino-Shop [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/834-arduino-rele-2-kanaly.html
[24] KP4010 Series 4PIN PHOTODARLINGTON PHOTOCOUPLER. GME [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.523-150.2.pdf
[25] Sunon. GME [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.625-330.1.pdf

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Typické charakteristiky ventilátorů 15
Obrázek 2 - Typická charakteristika tlakové ztráty 16
Obrázek 3 - Membránový průtokoměr [4] 18
Obrázek 4 - Bubnový plynoměr [2] 18
Obrázek 5 - Radiální lopatkový průtokoměr [1] 19
Obrázek 6 - Překážka vírového průtokoměru 20
Obrázek 7- Coriolisův průtokoměr [5] 21
Obrázek 8 - Průběh statického tlaku v okolí škrtícího elementu [3] 22
Obrázek 9 - Porovnání clony, dýzy a Venturiho dýzy [2] 24
Obrázek 10 - Schéma Pitotovy trubice 24
Obrázek 11 - Schéma Prandtlovy trubice 25
Obrázek 12 - Schéma kolenového průtokoměru [2] 26
Obrázek 13 - Pravidla rozložení Log-linear [8] 26
Obrázek 14 - Kruhová Wilsonova mříž [1] 27
Obrázek 15 - Element pro měření statického tlaku 28
Obrázek 16 - Diferenciální tlakový senzor DPS 300 [11] 30
Obrázek 17 - Diferenciální tlakový senzor Sensirion SDP [12] 31
Obrázek 18 - Raspberry PI 4 model B [14] 32
Obrázek 19 - ArduinoUNO REV3[15] 33
Obrázek 20 - Arduino DUE R3 [16] 34
Obrázek 21 - Komponenty aparatury pro měření charakteristiky ventilátoru 36
Obrázek 22 - Komponenty aparatury pro měření tlakové ztráty 36
Obrázek 23 - Radiální ventilátor Östberg CK100C [17] 37
Obrázek 24 - Navržený model Wilsonovy mříže 39
Obrázek 25 - Element pro měření statického tlaku 39
Obrázek 26 - Ukázka I2C komunikace [19] 40
Obrázek 27 - Motor driver A4988 [22] 42
Obrázek 28 - Vytištěný díl Wilsonovy mříže 44
Obrázek 29 - Graf závislosti ztrátového součinitele na střední rychlosti vzduchu 45
Obrázek 30 - Usměrňovač proudění 46
Obrázek 31 - Závěrná klapka s krokovým motorem a koncovým spínačem 47
Obrázek 32 - Kryt diferenciálních senzorů tlaku Sensirion SDP 47
Obrázek 33 – Kryt řídicí jednotky 48
Obrázek 34 - Kryt regulátoru pomocného ventilátoru 48
Obrázek 35 - Sestava pro měření ventilátorové charakteristiky 49
Obrázek 36 - Sestava pro měření tlakové ztráty 50
Obrázek 37 - Zapojení řídicí jednotky 51
Obrázek 38 - Dvoukanálový relé modul [23] 52
Obrázek 39- Schéma optočlenu THT KP40101B DIP4 [24] 53
Obrázek 40 - Schéma regulátoru pomocného ventilátoru 54

Obrázek 41 - Princip spínání sinusového signálu triakem 54
Obrázek 42 – Graf závislosti tlaku a odchylky tlaku pomocného ventilátoru na napětí 55
Obrázek 43 - Okno uživatelského rozhraní 56
Obrázek 44 - Manuální ovládání závěrné klapky bez koncového spínače 57
Obrázek 45 - Vývojový diagram programu řídicí jednotky 60
Obrázek 46 - Vývojový diagram manuálního měření dat 61
Obrázek 47 - Vývojový diagram automatizovaného měření dat 62
Obrázek 48 - Ventilátorová charakteristika udávaná výrobcem [25] 63
Obrázek 49 - Naměřená ventilátorová charakteristika 64
Obrázek 50 - Graf tlakové ztráty vzduchového filtru na 100 mm potrubí 65
Obrázek 51 - Graf porovnání tlakových ztrát filtru na 100 a 150 mm potrubí 66

10 SEZNAM ZKRATEK

PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
I2C	Inter-Integrated Circuid
SPI	Serial Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
DAC	Digital Analog Converter (digitálně analogový převodník)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmiter (univerzální asynchronní přijímač-vysílač)
SDA	Serial Data (sériová data)
SCL	Serial Clock (sériové hodiny)
FDM	Fused Deposition Modeling (fúzované depoziční modelování)
PLA	Polylactic acid (polymléčná kyselina)
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene (Akrylonitrilbutadienstyren)
PET	Polyethylene terephthalate (polyethylentereftalát)
PETG	Polyethylene terephthalate glycol (polyethylentereftalátglykol)
TPU	Thermoplastic polyurethane (termoplastický polyuretan)
LED	Light Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
COM	Communication port (sériový port)
LPT	Line Printer Terminal (paralelní port)

11 SEZNAM PŘÍLOH

Elektronické přílohy:

- Programy
  - ACWPv2.0.0.py
  - MainCv2.0.0.ino
- Textové soubory
  - DataAutosave.txt
  - OptionsSave.txt
- CAD modely
  - DrzakKabeluZaverneKlapky.stp
  - DrzakMotoruZavernelapky.stp
  - HorniKrytRidiciJednotky.stp
  - HorniKrytTlakomeru.stp
  - HorniRamenoZaverneKlapky.stp
  - KrytKoncovehoSpinace.stp
  - KrytPinuRidiciJednotky.stp
  - KrytZavituKlapky.stp
  - PrirubaZaverneKlapky.stp
  - SpodniKrytRegulatoru.stp
  - SpodniKrytRidiciJednotky.stp
  - SpodniKrytTlakomeru.stp
  - VodiciRamenoZaverneKlapky.stp
  - WilsonovaMriz.STEP
  - ZavernaKlapka.stp