

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2022

Vladimír Flandera

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

MODULÁRNÍ PNEUMATICKÁ TRAŤ

Vladimír Flandera

Bakalářská práce
2022

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vladimír Flandera**
Osobní číslo: **I19023**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Téma práce: **Modulární pneumatická trať**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh a realizace konstrukčního řešení modulární pneumatické trati, pro možnost testování vybraných komponent akčních a měřicích členů pneumatických obvodů. Jedná se zejména o ventilátory, nízko výkonová (modelářská) dmyhadla, různé typy senzorů pro měření průtoku atd. Mechanická konstrukce bude navržena jako modulární, v podobě 3D modelu vybraného CAD software a realizována s využitím možnosti 3D tisku. Modulární koncepce bude zaměřena na snadnou možnost modifikace základního řešení. Základem elektronické řídicí jednotky bude použit vybraný vývojový kit s mikroprocesorem typu ATmega (např. Arduino UNO, Mega atp.). Součástí práce bude podrobný konstrukční a uživatelský manuál, včetně firmware mikroprocesoru a uživatelského software osobního počítače.

Rozsah pracovní zprávy: **40**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4
MATOUŠEK, D., Aplikace ATmega644, BEN – technická literatura, 2013, ISBN 978-80-7300-492-7
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4
MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání bakalářské práce: **17. prosince 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2022**

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D. v.r.
děkan

LS.

Ing. Daniel Honc, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 7. ledna 2022

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 13.5. 2022

Vladimír Flandera v. r.

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D., za velmi cenné rady a podporu. Také děkuji své rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost při psaní této práce.

V Pardubicích dne 13. 5. 2022

Vladimír Flandera v. r.

ANOTACE

Cílem této bakalářské práce je návrh a konstrukční realizace modulární pneumatické trati, pro možnost testování vybraných pneumatických akčních členů nebo senzorů. Zároveň bude obsahovat i podrobný manuál k této sestavě. Zejména se zde jedná o ventilátory, různé typy senzorů pro měření průtoků a v neposlední řadě modelářských dmychadel. Konstrukční řešení je zde realizováno za pomoci 3D tisku, dle vytvořeného modelu v CAD softwaru. Jako základem pro řízení je zde využit vývojový kit s mikropočítačem typu ATmega (Arduino UNO).

KLÍČOVÁ SLOVA

mikrokontrolér, mikropočítač, pneumatický akční člen, Venturiho trubice, průtok, senzor

TITLE

MODULAR PNEUMATIC TRACK

ANNOTATION

The purpose of this bachelor's thesis is the design and construction of a modular pneumatic track, for the possibility of testing selected pneumatic actuators and measuring members, as well as a detailed manual for this assembly. It's mainly about fans, various types of sensors for measuring flow and, last but not least, model blowers. The design solution is realized with the help of 3D printing, according to the created model in CAD software. As the base for control is there used the development kit ATmega microcomputer (Arduino UNO).

KEYWORDS

Microcontroller, Microcomputer, Pneumatic actuator, Venturi tube, Flow, Sensor

OBSAH

Seznam zkratk a značek	11
Seznam symbolů veličin a funkcí	13
Seznam ilustrací	14
Seznam tabulek	16
Úvod.....	17
1 Měření průtoků.....	17
1.1 Určení průtoků	17
1.2 Metody měření průtoků.....	18
1.3 Tlaková měřidla	18
1.3.1 Teoretický základ tlakových měřidel.....	18
1.4 Typy průřezových tlakoměrů.....	19
1.5 Kapalinové tlakoměry	19
1.5.1 Plovákové tlakoměry.....	20
2 Měření průtoku plynů.....	22
2.1 Fyzikální vlastnosti plynů	22
2.2 Průřezová měřidla	22
2.2.1 Pitotova trubice	22
2.3 Senzory.....	23
2.3.1 Senzory průtoků	23
2.3.2 Tlaková technika měření průtoku plynů	24
2.3.3 Čidlo diferenčního tlaku Premasgard 2111–U.....	24
3 Mikropočítače a Mikrokontrolery	26
3.1 Základní části mikropočítače	26
3.2 Mikropočítač Arduino.....	27
3.2.1 Typy vývojových kitů Arduina	27
3.2.2 Jednotlivé typy	27

3.3	Arduino UNO	28
3.3.1	Rozložení pinů Arduino UNO	28
3.4	A/D převodník	29
3.5	Architektura mikropočítače	30
3.6	Okruhy využití	31
3.7	Mikrokontrolery Atmel	31
3.8	Assembler pro mikrokontrolery Atmel	31
4	Venturiho trubice	32
4.1	Důležité parametry a části trubice	32
4.2	Výpočetní vztahy	32
5	Model modulární pneumatické trati	34
5.1	Model konstrukce trati pomocí objímek	34
5.2	Optimalizovaný mode konstrukce trati	35
5.2.1	Vstupní část potrubí	36
5.2.2	Konfuzor a difuzor	36
5.2.3	Výstupní potrubí	37
5.2.4	Hrdlo potrubí	38
5.2.5	Vnější příruba pro akční člen	38
5.3	Konstrukční sestavení potrubí	39
5.4	Kalibrace potrubí	39
5.5	Regulace výkonu akčního členu	40
5.6	Mechanická podpěra měřící trati	41
5.7	Optimalizované řešení podpěry trati	42
5.8	Akční členy a senzory	42
6	Elektornické obvody	43
6.1	Zapojení senzoru Premasgard 2111-U	43
6.2	Napájecí modul	43

6.3	Blokové schéma elektroniky	45
6.4	Schéma zapojení senzoru	45
6.5	Zapojení elektroniky	46
7	Software	47
7.1	Vývojové prostředí Arduino	47
7.1.1	Vývojový diagram kodu Arduino	47
7.2	Vývojové prostředí Visual Studio	48
7.3	Propojení aplikace s programem Arduino	49
8	Analýza dat	51
8.1	Teoretické tlakové poměry v potrubí	53
8.2	Tlakové ztráty v potrubí	53
8.2.1	Procentuální tlakové ztráty	54
8.3	Finální měření	55
8.4	Vyhodnocení výsledků testování	55
9	Závěr	56
	Použitá literatura	57
	Přílohy	59

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

3D	Three dimensional – třírozměrný
ADEN	Enable – povolení A/D převodníku.
ADIE	Interrupt enable – příznak, že má dojít k přerušení po dokončení převodu
ADIF	Interrupt flag – příznak dokončení převodu
ADSC	Start conversion – start převodu
A/D	Analog/Digital converter – analogový/digitální převodník
BIT	Binary digit – binární číslice
CAD	Computer-aided design – počítačem podporované projektování
COM	Communication port – komunikační port
DC	Direct current – stejnosměrný
GND	Ground – zem
LCD	Liquid Crystal Display – displej z tekutých krystalů
PC	Personal computer – osobní počítač
PWM	Pulse width modulation – pulzně šířková modulace
RPM	Revolutions per minute – otáčky za minutu
SFIOR	Special function I/O register – nastavení zdroje spuštění převodu
SCK	Clock. – hodiny
SI	The International System of Units – mezinárodní jednotkový systém
STL	Standart Triangle Language – standartní trojúhelníkový jazyk
USB	Universal serial bus – univerzální sériová sběrnice
Vin	Input voltage – vstupní napětí

SEZNAM SYMBOLŮ VELIČIN A FUNKCÍ

A	pracovní oblast, m.
D	vnitřní průměr, m.
G	průtočná tíha, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
g	zemská gravitační konstanta, $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$.
h	výška hladiny, m.
M	průtočná hmotnost, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$.
m	hmotnost, kg.
n	látkové množství, mol.
p	tlak, Pa.
R	plynová konstanta
Q	průtočný objem, $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.
T	teplota, $^{\circ}\text{C}$.
t	čas, s.
V	objem látky, m^3 .
v	rychlost, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
$v\gamma$	tíhová rychlost, m/s^2 .
$v\delta$	rychlost závislá na hmotnosti, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
y	váha výtlačku média, kg.
ρ	hustota, kg/m^3 .
ϱ	měrná hmotnost kapaliny, ρ .

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 - Nádobkový tlakoměr (Sedliský, Hlaváček, 1967)	19
Obrázek 2.1 - Pitotova trubice (Fyzmatik, 2009)	23
Obrázek 2.2 - Čidlo diferenčního tlaku Premasgard 2111-U (Domat Control System, 2013).24	
Obrázek 3.1 - Jednoduché schéma počítače (Pinkler, 2008)	26
Obrázek 3.2 - Komunitní Logo Arduino (Arduino, 2021)	27
Obrázek 3.3 - Mikropočítač Arduino UNO (vlevo) a jeho shield (Čížek, 2019)	28
Obrázek 3.4 - Rozdělení pinů Arduino UNO (Arduino® UNO R3, 2022)	29
Obrázek 3.5 - Jednoúčelový logický obvod (Sobotka, 1983)	30
Obrázek 3.6 - Systém se základem mikropočítače (Sobotka, 1983).....	30
Obrázek 4.1 - Venturiho trubice (Orlíková, 2001)	32
Obrázek 5.1 – Popis částí konstrukce trati.....	34
Obrázek 5.2 – Konstrukční řešení pomocí objímek	35
Obrázek 5.3 – Optimalizovaný model konstrukce trati	35
Obrázek 5.4 – Vstupní část potrubí	36
Obrázek 5.5 - Model konfuzoru (vlevo) a model difuzoru (vpravo)	37
Obrázek 5.6 – Výstupní potrubí.....	37
Obrázek 5.7 - Hrdlo potrubí.....	38
Obrázek 5.8 - Vnější příruba pro akční člen 80 mm.....	38
Obrázek 5.9 – Finální sestava pneumatické tratě.....	39
Obrázek 5.10 – Anemometr R136C	40
Obrázek 5.11 – Část kodu pro regulaci výkonu.....	40
Obrázek 5.12 – Výpočet na procenta výkonu a uložení do proměnné	41
Obrázek 5.13 – Mechanická podpora měřicí trati.....	41
Obrázek 6.1 - DC konektor se svorkovnicí.....	43
Obrázek 6.2 - Napájecí modul	44
Obrázek 6.3 - Blokové schéma elektroniky	45
Obrázek 6.4 – Schéma připojení senzoru a ovládání výkonu.....	46
Obrázek 7.1 – Vývojový diagram Arduino	48
Obrázek 7.2 – Návrh aplikace.....	49
Obrázek 7.3 – Část kodu pro ovládání tlačítek START a STOP	50
Obrázek 8.1 – Část kodu v C# pro vypisování hodnot do listBoxu1	51
Obrázek 8.2 – Graf závislosti proudění na diferenčním tlaku	52

Obrázek 8.3 – Výsledek měření k porovnání s datashetem55

SEZNAM TABULEK

Tabulka 6.1 - Převody napětí na vstupu a výstupu	44
Tabulka 8.1 - Naměřená data zvoleného ventilátoru	51
Tabulka 8.2 - Ideální data zvoleného ventilátoru	52
Tabulka 8.3 – Tlaková ztráta trati v %.....	54
Tabulka 8.4 - Průměrné tlakové ztráty v potrubí	55

ÚVOD

Cílem této práce je testování jednotlivých pneumatických akčních členů (ventilátorů, dmychadel apod.), zda se skutečně chovají tak, jak uvádí výrobce. Vždy lze akční člen odzkoušet ve více úrovních výkonu za pomoci PWM. Z následných naměřených hodnot lze vynést v tabulkovém procesoru Excel do grafu závislost, kde je rychlost proudění závislá na úrovni výkonu akčního členu či diferenčním tlaku. Následně se vypočítá průtočný objem a porovná s datasheetem výrobce.

Tuto práci jsem si vybral primárně z důvodu praktického využití v budoucnu, jelikož díky této Pneumatické modulární trati bude moci v podstatě každý vlastník, například ventilátoru do PC, otestovat správnou funkčnost jakéhokoliv akčního členu, jelikož je trať (realizována pomocí Venturiho trubice) plně modulární a každá část lze prakticky vyměnit za část, která bude vyhovovat uživateli. Jelikož je těchto akčních členů nespočet, tak jako přílohou práce budou veškeré modely, technické výkresy částí tratě a uživatel bude moci kdykoliv jednoduše zasáhnout do rozměrů tratě a přizpůsobit ji pro vlastní použití.

1 MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

Velikost průtoku daným potrubím definujeme jako množství látky proteklé za jednotku času při stacionárním průtoku (PREISLER, 1967).

1.1 URČENÍ PRŮTOKŮ

Dle způsobu vyjádření množství látky lze průtok určovat jako:

- Průtočný objem ve tvaru

$$Q = \frac{v}{t} = S_v, \quad (1.1)$$

kde v je rychlost, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

t je čas, s,

Q je průtočný objem, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

- Průtočná tíha

$$G = \frac{V_\gamma}{t}, \quad (1.2)$$

kde V_γ je tíhová rychlost, m/s^2 ,

t je čas, s,

G je průtočná tíha.

- Průtočná hmotnost

$$M = \frac{V_\delta}{t} = S_{v\delta}, \quad (1.3)$$

kde V_δ je rychlost závislá na hmotnosti, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

t je čas, s,

M je průtočná hmotnost, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Běžně se stává, že průtok daným potrubím nemusí být ustálený. Tudíž se rovnice mění do tvaru:

$$Q = \frac{dV}{dt}, \quad (1.4)$$

kde vzorec udává okamžitou hodnotu průtoku potrubím.

Poté objem látky, který proteče za určitý časový interval daným potrubím, je dán výrazem:

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt, \quad (1.5)$$

kde V je objem, m^3 ,

Q průtočný objem, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (PREISLER, 1967).

1.2 METODY MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

Metody pro měření průtoků jsou založeny na určování střední hodnoty rychlosti proudu nebo na určení tíhy, popřípadě objemu média, který proteče v určitém intervalu. Podle těchto metod a jejich základním principům měření průtoku můžeme rozdělit měřidla na:

- průřezová (tlaková),
- objemová,
- rychlostní,
- elektrická,
- udávající průtočnou hmotnost,
- na měřidla, která jsou založena na účinku změny směru proudu.

Při volbě metody se musí vždy zvážit její účel (PREISLER, 1967).

1.3 TLAKOVÁ MĚŘIDLA

Tlak je definován jako intenzita síly působící v kolmém směru na plochu. V systému SI je definován jako Newton na metr čtverečný $[\text{N}/\text{m}^2]$ (MILLER, 1989).

1.3.1 Teoretický základ tlakových měřidel

Měření průtoku (škrťácím orgánem) plyných nebo kapalných látek není přímé z důvodu vycházení z měření tlakového rozdílu před a za průměrem škrťacího orgánu. Tato tlaková

diference nebo také rozdílový tlak je mírou protékaného množství, což je ve své podstatě přeměna potenciální energie na kinetickou (PREISLER, 1967).

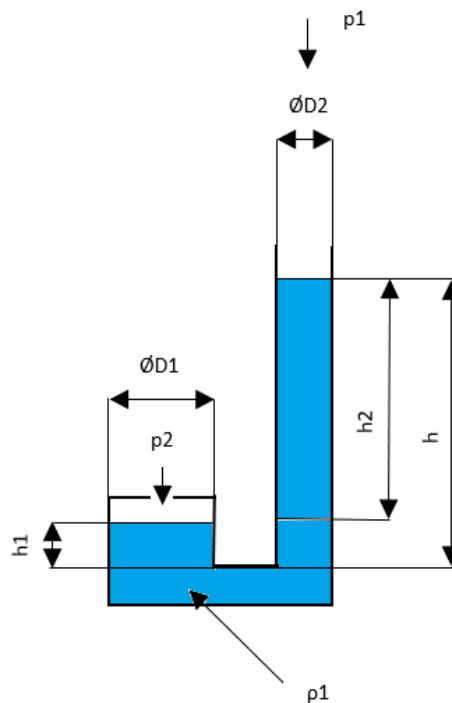
1.4 TYPY PRŮŘEZOVÝCH TLAKOMĚŘŮ

Tlaková měřidla můžeme rozlišit na:

- kapalinové tlakoměry,
- pístové tlakoměry,
- deformační tlakoměry (SEDLISKÝ, 1967).

1.5 KAPALINOVÉ TLAKOMĚRY

Jsou tlakoměry, u nichž se velikost tlaku, či tlakové diference, určuje z mechanického pohybu nebo ze silového účinku jejich částí. Mezi tyto tlakoměry patří mnoho nejrůznějších principů měření tlaku. V této práci budou uvedeny pouze ty nejvíce používané, jako jsou tlakoměry prstencové, plovákové a zvonové (SEDLISKÝ, 1967).



Obrázek 1.1 - Nádobkový tlakoměr (SEDLISKÝ, 1967).

1.5.1 Plovákové tlakoměry

Plovákové tlakoměry jsou specifické ve svisle postavené trubici ve tvaru U o stejném průměru ramen. Zde se jedná o takzvaný nádobkový tlakoměr, obrázek. 1.1, kde se pracuje s možností přesného určení tlaku, který je zde měřen, pomocí změny hladiny tzv. tlakové kapaliny v jednom ze dvou ramen tlakoměru (SEDLISKÝ, 1967).

Tlakový rozdíl je roven:

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2) * gh = (\rho_1 - \rho_2) * gh(h_1 - h_2), \quad (1.6)$$

kde h je rozdíl hladin, m,

h_1 je rozdíl hladiny v prvním rameni, m,

h_2 je rozdíl hladiny ve druhém rameni, m,

ρ_1 je měrná hmotnost kapaliny, ρ ,

ρ_2 je měrná hmotnost okolí, ρ .

Což je základní rovnice rovnovážného stavu (SEDLISKÝ, 1967).

Z rovnice následně vyplývá vztah pro rozdíl hladin, ke kterému je ale nejprve zapotřebí rovnice objemů tlakové kapaliny, která má tento tvar:

$$h_1 * D_1^2 = h_2 * D_2^2, \quad (1.7)$$

kde h_1 je změna hladiny od základní hladiny v prvním rameni, m,

h_2 je změna hladiny od základní hladiny v druhém rameni, m,

D_1 je vnitřní průměr prvního ramene, m,

D_2 je vnitřní průměr druhého ramene, m (SEDLISKÝ, 1967).

Následně pomocí rovnice objemů tlakové kapaliny a rovnicí rovnovážného stavu získáme rovnici pro celkový rozdíl hladin, kterou vyjadřuje rovnice (1.8).

$$h = h_1 + h_2 = h_1 * \left(1 + \frac{D_1^2}{D_2^2}\right), \quad (1.8)$$

kde h je celkový rozdíl hladin

h_1 je změna hladiny od základní hladiny v prvním rameni, m,

h_2 je změna hladiny od základní hladiny v druhém rameni, m,

D_1 je vnitřní průměr prvního ramene, m,

D_2 je vnitřní průměr druhého ramene, m (SEDLISKÝ, 1967).

Z rovnice rozdílu hladin získáme drobnou úpravou tento výsledný tvar pro rozdíl tlaků

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2) * g h_1 * \left(1 + \frac{D_1^2}{D_2^2} \right), \quad (1.9)$$

kde Δp je celkový rozdíl hladin, m,

ρ_1 je měrná hmotnost kapaliny, ρ ,

ρ_2 je měrná hmotnost okolí, ρ ,

h_1 je změna hladiny od základní hladiny v prvním rameni, m,

h_2 je změna hladiny od základní hladiny v druhém rameni, m,

D_1 je vnitřní průměr prvního ramene, m,

D_2 je vnitřní průměr druhého ramene, m (SEDLISKÝ, 1967).

2 MĚŘENÍ PRŮTOKU PLYNŮ

V prvé řadě je zapotřebí správně pochopit slovo plyn a definovat jej. Plyn je jedno ze třech skupenství látek, která se nachází v plynném stavu za pokojové teploty. Například vodní páru zařazujeme do skupenství kapalného, ale například kyslík do skupenství plynného (AUTOMA, 2016).

2.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI PLYNŮ

Nejdůležitější vlastností je stlačitelnost, která je využita v mnoha případech. Nejjednodušší zápis vlastností chování ideálního plynu je:

$$pV = n * R * T, \quad (2.1)$$

kde p je tlak, Pa,

V je objem, m³,

n je látkové množství, mol,

R je plynová konstanta, J·K⁻¹·mol⁻¹,

T je teplota, °C (AUTOMA, 2016).

Z rovnice si lze odvodit, že vlivem tlaku se bude objem měnit. A tímto lze jednoduše odvodit důvod, proč je hmotnost primární při měření průtoků plynů oproti například objemu (AUTOMA, 2016).

2.2 PRŮŘEZOVÁ MĚŘIDLA

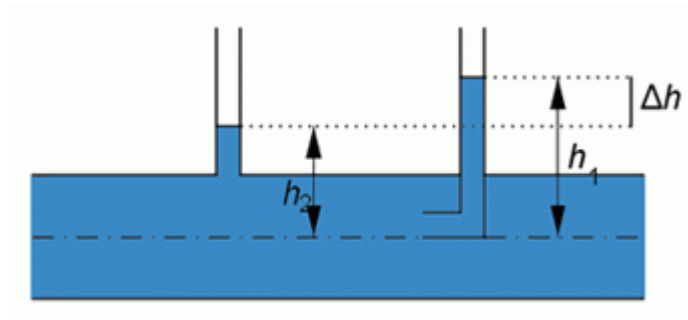
Průřezová neboli tlaková měřidla jsou řešením tzv. bez korekce a lze s nimi měřit diferenci (rozdíl tlaků) před překážkou a za překážkou. Překážkou může být například zúžení v potrubí. Tato měřidla měří rozdíl statických tlaků, kde se vždy uvažuje konstantní chování tlaku a teploty za celou dobu měření. Následně lze z výsledného tlaku určit objemový průtok, hmotnostní průtok a korigovaný objemový průtok. Nyní se jedná o nejvíce rozšířená měřidla průtoků plynů vůbec (AUTOMA, 2016).

2.2.1 Pitotova trubice

Tyto trubice mají v porovnání s trubicemi se clonou (zasouvateľné clony z různých

materiálů) menší ztrátovost a delší životnost, jelikož jsou méně náchylné na opotřebení (AUTOMA, 2016).

Princip této trubice, obrázek 2.1, spočívá v přivádění dvou rozdílných tlaků, kde jeden tlak je celkový a druhý statický. Dynamický tlak se určí právě rozdílem těchto dvou tlaků a tím se identifikuje rychlost, která je přímo úměrná dynamickému tlaku. Nejčastější poruchou systému pro měření rychlosti (například u letadel) je právě zablokování Pitotovy trubice, například z důvodu námrazy (FYZMATIK, 2009).



Obrázek 2.1 - Pitotova trubice (FYZMATIK, 2009)

2.3 SENZORY

Senzory jsou obvodové prvky a je možné je rozdělit dle nejrůznějších hledisek. Podle základního kritéria je lze rozdělit do dvou skupin:

- elektrické senzory (s elektrickým výstupním signálem),
- neelektrické senzory (pneumatické apod.).

Tyto dvě skupiny lze dále dělit například dle snímané veličiny, dále také například elektrické senzory lze dělit na:

- elektronické,
- polovodičové,
- mikro elektrické (GULDAN, 1987).

2.3.1 Senzory průtoků

Můžeme dělit na:

- rychlostní,
- objemové.

Mezi objemové zařazujeme zvonové, bubnové a pístové. Proudící tekutina dodává potřebnou energii, čehož využívají spojitě pracující senzory (MAIXNER, 2006).

Mezi rychlostní zařazujeme nejružnější typy senzorů, jako například:

- hmotností,
- tepelné,
- průřezové apod.

Tyto vyjmenované se používají i pro plyny a speciálně u průřezových se využívá Venturiho trubice, dýza a clona. Jedná se tedy o škrtící orgány (MAIXNER, 2006).

2.3.2 Tlaková technika měření průtoku plynů

Tlaková měřidla vycházejí striktně z Bernoulliho rovnice, která ale může být aplikovaná pouze na stabilní, neviskózní a nestačitelné látky (FRADEN, 2015).

Bernoulliho rovnici lze vyjádřit tímto tvarem

$$p + \rho \left(\frac{1}{2} v_a^2 + gy \right) = \text{const}, \quad (2.2)$$

kde p je tlak v trubici, Pa,

g je zemská gravitační konstanta, $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$,

y je váha výtlaku média,

v je rychlost proudění, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (FRADEN, 2015).

2.3.3 Čidlo diferenčního tlaku Premasgard 2111-U

Toto čidlo, obrázek 2.2, je určené pro měření rozdílu tlaku (je použit v praktické části), přetlaku a podtlaku. Jedná se o čidlo bez LCD displeje.



Obrázek 2.2 - Čidlo diferenčního tlaku Premasgard 2111-U (DOMAT CONTROL SYSTEM, 2013)

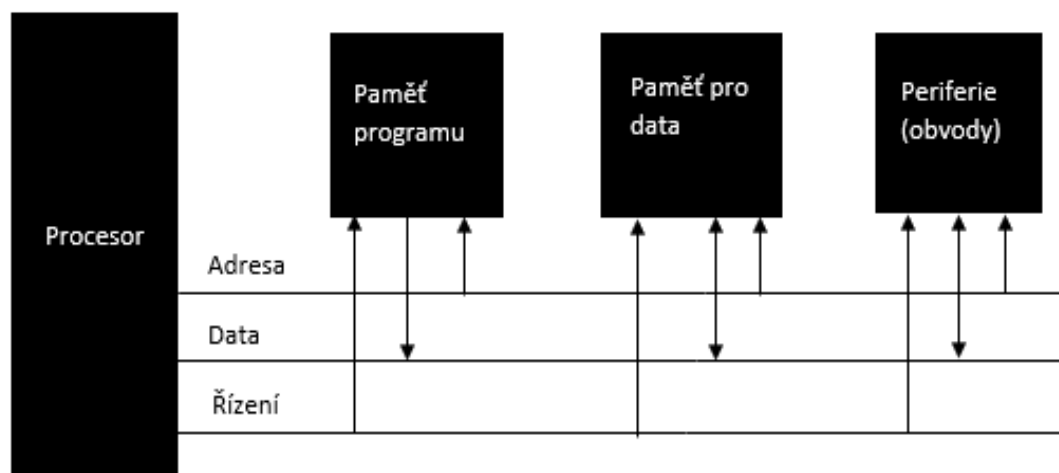
Výstupní napětí je o velikosti od 0 V do 10 V. Jedná se o čidlo pro nehořlavé plyny a lze nastavit rozsah měřeného tlaku (například od -100 Pa do 100 Pa). Výstupní proud má velikost od 4 mA do 20 mA.

3 MIKROPOČÍTAČE A MIKROKONTROLÉRY

„Vliv elektroniky je patrný v mnoha oblastech života. Postupně pronikla i do takových zařízení, o kterých by to byl nikdo nepředpokládal“ (PINKLER, 2008, s. 11).

3.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI MIKROPOČÍTAČE

V zásadě rozdělujeme části počítače do čtyř základních funkčních bloků. Jedná se zde o procesor, periferie a paměť pro data a program. Tyto jednotky vzájemně komunikují mezi sebou, obrázek 3.1, pomocí sběrnic (PINKLER, 2008).



Obrázek 3.1 - Jednoduché schéma počítače (PINKLER, 2008)

Adresová sběrnice se využívá k adresování obvodů, ale zejména k adresování paměti. Následně je adresová sběrnice prioritní pro rozlišení mezi určitými jednotkami. Velmi důležitá je zde i šířka této sběrnice, jelikož právě její šířka určuje maximální počet adres. Nejobvyklejší variantou šířky této sběrnice je 16 bitů pro osmibitové počítače. Dalším standardem je zde i šířka sběrnice 20 bitů, ale tato šířka bývá u šestnáctibitových počítačů (PINKLER, 2008).

Datová sběrnice se primárně využívá pro předání dat. Počet vodičů neboli její šířka by měla být násobkem jednoho bytu (8 bitů). Funkční blok, který je zdrojem dat, se na datovou sběrnici vždy zapojuje pomocí třístavových členů (PINKLER, 2008).

Řídicí sběrnice je určena primárně pro čtení a zápis, ale i pro další aktivity. Řídicí signály, nebo alespoň jejich většinu, řídí procesor. Šířka této řídicí sběrnice je velice subjektivní a závisí na celkové architektuře počítače. Většinou bývá řídicích signálů větší počet (PINKLER, 2008).

3.2 MIKROPOČÍTAČ ARDUINO

Arduino je jedním z nejrozšířenějších vývojových desek na celém světě. Arduino dosáhlo tohoto rozšíření zejména díky sdílení všech schémat a návodů celému světu. Jak je již z předešlého konstatování nejspíše jasné, jedná se o Open Source. Celá programová část mikropočítače Arduino je postavena na tzv. knihovnách pro jazyk Java, což má za následek zjednodušení programování (VODA, 2017).



Obrázek 3.2 - Komunitní Logo Arduino (ARDUINO, 2021)

3.2.1 Typy vývojových kitů Arduina

Téměř veškeré vývojové kity Arduino mají procesor, který je od firmy Atmel. Samozřejmě mají tyto kity i spoustu dalších komponent. Arduino má nespočet typů a následných verzí daných typů desek. Jednou z hlavních komponent je převodník, který je na kitu Arduina zabudován pro komunikaci mezi PC a čipem pomocí USB. Tento převodník obsahují téměř veškeré desky, pokud je převodník pro uživatele potřebný. Pokud není převodník zabudovaný, tak je nutností použít převodník externí, což je výhodou místa na desce. Poté může mít samozřejmě čip desky zabudovaný převodník v sobě (VODA, 2017).

3.2.2 Jednotlivé typy

Jednotlivé vývojové desky Arduina lze rozdělit následovně:

- Arduino Mini,
- Arduino Nano,
- Arduino Micro,
- LilyPad Arduino,
- Arduino Fio,

- Arduino Uno,
- Arduino Yún,
- Arduino Leonard,
- Arduino Mega2560,
- Arduino Due,
- Arduino Esplora,
- Arduino Galileo,
- Arduino Tre (STRÍŽ, 2017).

3.3 ARDUINO UNO

Na této vývojové desce se nachází procesor ATmega328. Tato deska je přímý nástupce prvního Arduina a je doposud nejprodávanější. Z verze Arduino UNO, obrázek 3.3, se následně vyvíjely další verze těchto mikropočítačů, ale na rozdíl od USB komunikace jsou na těchto následujících deskách pouze porty na ethernet (Arduino ethernet). Nebo se může místo USB komunikace nacházet na desce pouze Bluetooth modul pro tzv. bezdrátovou komunikaci Arduino Bluetooth (VODA, 2017).

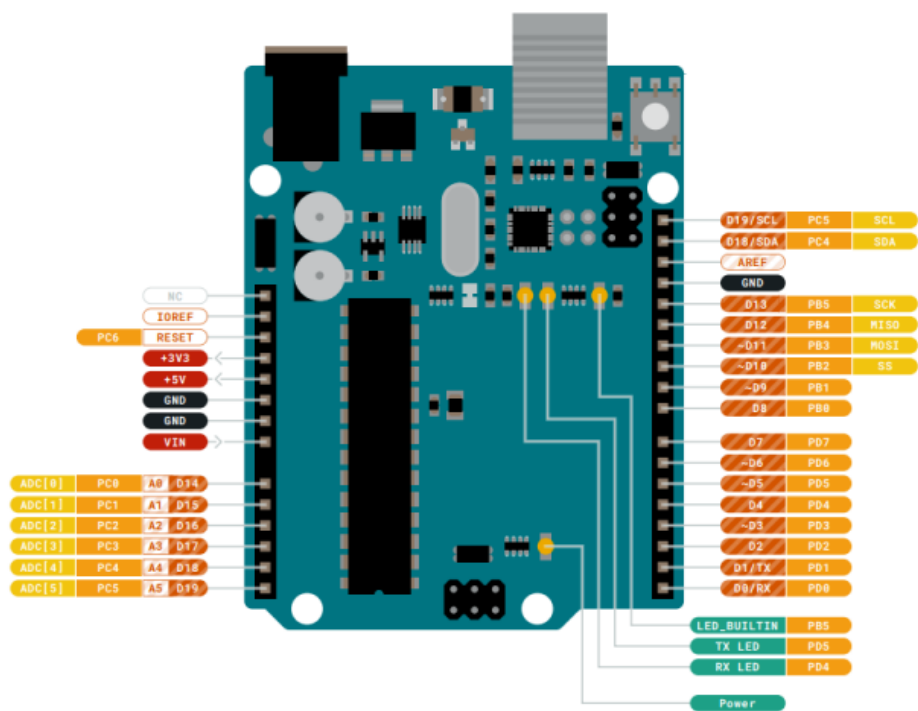


Obrázek 3.3 - Mikropočítač Arduino UNO (vlevo) a jeho shield (ČÍŽEK, 2019)

Poté jsou dokonce verze, které nemají žádnou náhradu za USB komunikaci, kterou postrádají (Arduino Pro) a musejí se programovat externím převodníkem (VODA, 2017).

3.3.1 Rozložení pinů Arduino UNO

Na kitu Arduino UNO se nacházejí jak digitální, tak analogové piny, obrázek 3.4, pro nejrůznější druhy využití. Nadále jsou zde zdroje napětí 5 a 3,3 V a nechybějí ani 3 piny pro GND. Dále se zde nacházejí i piny SCK (clock) a podobně (ARDUINO® UNO R3, 2022).



Obrázek 3.4 - Rozdělení pinů Arduino UNO (ARDUINO® UNO R3, 2022)

3.4 A/D PŘEVODNÍK

Tento převodník má nespočet funkcí (zejména na moderních AVR). Jeho plné rozlišení je 10 bitů a měl by bez problémů zvládnout tisíc převodů za vteřinu (115 ksp/s). Lze také pracovat v modu 8 bitů s redukovaným rozlišením (DUDKA, 2019).

Pomocí A/D převodníku lze měřit elektrické i neelektrické veličiny. Základní vlastnosti A/D převodníku jsou:

- 8 multiplexovaných vstupů,
- 10 bitové rozlišení,
- nastavitelná vnitřní reference 2,56 V,
- nastavitelné rozlišení (KARAS, 2007).

Pro práci s A/D převodníkem se využívají nejrůznější speciální registry, z nichž některé budou nyní popsány:

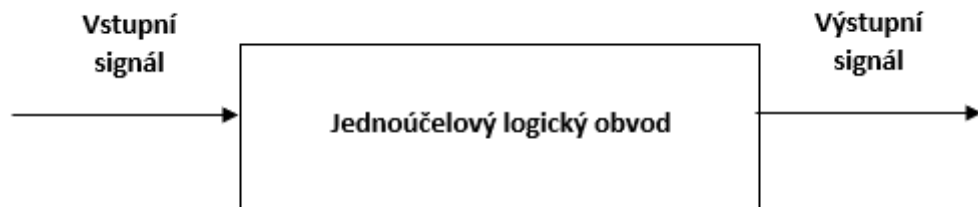
- ADLAR – zarovnání výsledku,
- ADEN – zapnutí/ vypnutí převodníku,
- ADSC – začátek převodu na vybraném kanálu,

- ADIE – identifikace a povolení přerušení,
- ADIF – příznak dokončení převodu,
- SFIOR – nastavení zdroje spuštění převodu (KARAS, 2007).

3.5 ARCHITEKTURA MIKROPOČÍTAČE

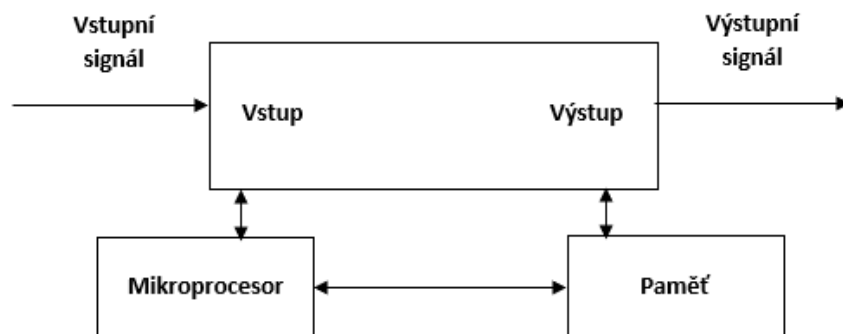
Mikropočítače pro jednotlivé aplikační oblasti lze rozdělit podle dvou základních kritérií. Pokud je mikropočítač samostatný funkční blok a systémy, ve kterých mikropočítač plní pouze funkci zapojení logického obvodu, který je jednoúčelový.

Pro oblast, která plní pouze funkci logického obvodu, obrázek 3.5, jsou v reálném čase vstupující signály (jako jsou data), které jsou opět v reálném čase vyvolané, dle funkce mikropočítače, jako například výpočty (SOBOTKA, 1983).



Obrázek 3.5 - Jednoúčelový logický obvod (SOBOTKA, 1983)

Systém, který je znázorněn na funkčním bloku, obrázek 3.6, obsahuje mikroprocesor a paměť. Tento blok lze vytvořit pomocí jedné či více variací programů (SOBOTKA, 1983).



Obrázek 3.6 - Systém se základem mikropočítače (SOBOTKA, 1983)

3.6 OKRUHY VYUŽITÍ

Využívají se v podstatě ve všech odvětvích elektrotechniky a používá se především jako náhrada jednoúčelových logických obvodů, obrázek 3.5. Pokud ovšem provedeme tuto změnu, tak musíme mít programové zázemí. Jeho využití v praxi můžeme nalézt například u:

- u číslicově řízených průmyslových procesů,
- automatických dávkovacích strojů,
- automatických zámků,
- automatické volby rádio stanice v autě,
- nejrůznějších druhů automatů apod. (SOBOTKA, 1983).

3.7 MIKROKONTROLERY ATMEL

Mikrokontroler neboli mikroprocesor AVR Atmel má oddělenou paměť pro data a pro program, z čehož plyne, že využívá Harvardskou architekturu. Většina instrukcí je provedena v hodinovém cyklu, jelikož pro zpracování instrukce se využívá zřetězené zpracování neboli pipeline. Jako základ pro většinu těchto registrů je 32 osmibitových registrů. Následně řada AVR umožňuje při následném programování následujících třech adresových módů:

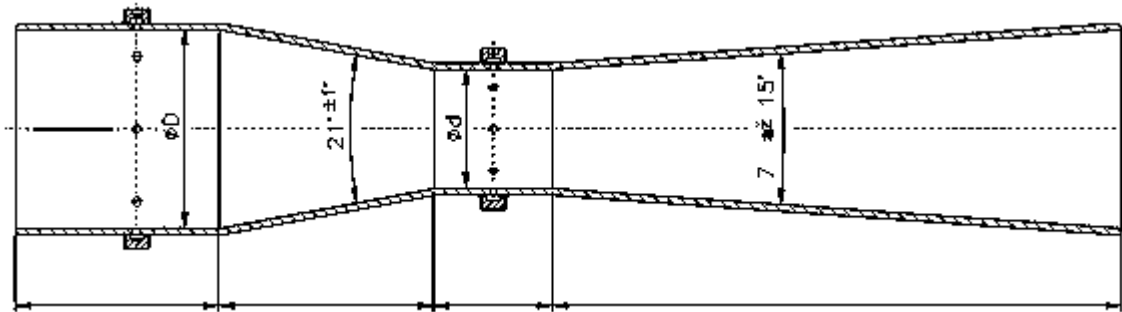
- přímé adresování,
- nepřímé adresování (s posunutím, s dekrementací ukazatele),
- nepřímé adresování (ŠUBRT, 2002).

3.8 ASSEMBLER PRO MIKROKONTROLERY ATMEL

Assembler neboli jazyk symbolické adresy se využívá již od počátků prvních generací počítačů. Než se objevil, tak se první počítače programovaly přímo ve strojovém kodu, kde byl ve velké míře využit binární kód, ale i kódy hexadecimální a oktalové (VÁŇA, 2003).

4 VENTURIHO TRUBICE

Tato trubice, obrázek 4.1, se nejčastěji využívá pro měření průtoků plynů či kapalin. Venturiho trubice využívá nízkou tlakovou ztrátu, která činí od 4 % do 20 % z právě měřeného diferenčního tlaku (MATTECH, 2016).



Obrázek 4.1 - Venturiho trubice (ORLÍKOVÁ, 2001)

4.1 DŮLEŽITÉ PARAMETRY A ČÁSTI TRUBICE

Nejdůležitější částí jsou difuzor a konfuzor, kde je pevně stanoven úhel pro konfuzor 21° a úhlové rozmezí pro difuzor od 7° do 15° . Obě tyto části jsou propojeny tzv. hrdlem, kde se odebrává nízký tlak pro následnou diferenci s tlakem odebíraným na vstupním válci trubice (MATTECH, 2016).

Nevýhodou této trubice je její vysoká cena oproti jiným principům, ale z hlediska funkčnosti je například oproti cloně efektivnější z důvodu menší tlakové ztráty (ORLÍKOVÁ, 2001).

4.2 VÝPOČETNÍ VZTAHY

Vzorce proudění lze takto odvodit:

$$Q = v_1 * A_1 = v_2 * A_2, \quad (4.1)$$

kde Q je průtočný objem, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,

v_1 je rychlost proudění v oblasti A_1 , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,

A_1 je první oblast (například kruhová), m^2 ,

A_2 je druhá oblast (opět kruhová), m^2 ,

v_2 je rychlost proudění v oblasti A_2 , $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, (ENGINEERS EDGE, 2000-2022).

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2), \quad (4.2)$$

kde p_1 je tlak v oblasti A_1 , m,

p_2 je tlak v oblasti A_2 , m,

ρ je hustota média, kg/m³,

v_1 je rychlost proudění v oblasti A_1 , m·s⁻¹,

v_2 je rychlost proudění v oblasti A_2 , m·s⁻¹, (ENGINEERS EDGE, 2000-2022).

Z čehož vyplývají tyto finální vzorce

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} + \frac{(p_1 - p_2)}{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2 - 1}}, \quad (4.3)$$

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2}{\rho} + \frac{(p_1 - p_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}, \quad (4.4)$$

kde Q je průtočný objem, m³·s⁻¹,

p_1 je tlak v oblasti A_1 , Pa,

p_2 je tlak v oblasti A_2 , Pa,

ρ je hustota média, kg/m³,

v_1 je rychlost proudění v oblasti A_1 , m·s⁻¹,

v_2 je rychlost proudění v oblasti A_2 , m·s⁻¹ (ENGINEERS EDGE, 2000-2022).

A také hmotnostní průtok

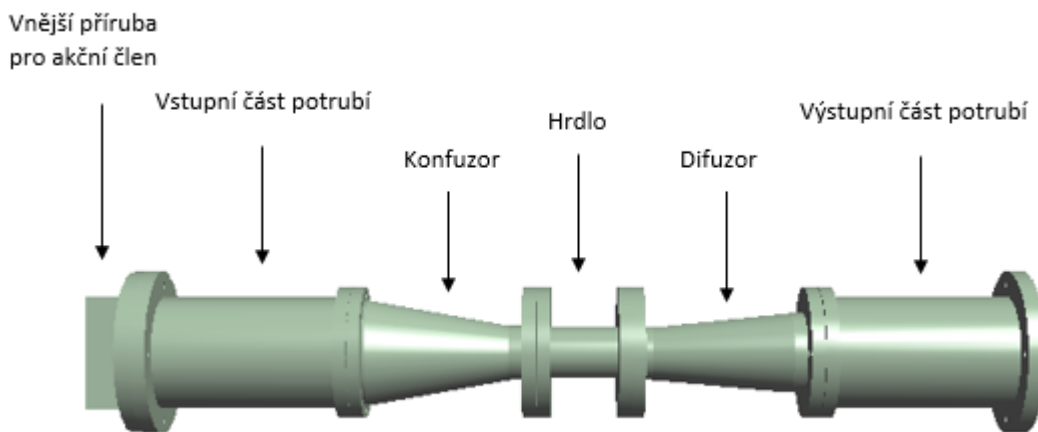
$$Q_m = \rho * Q, \quad (4.5)$$

kde Q_m je hmotnostní průtok, kg·s⁻¹,

ρ je hustota média, kg/m³ (ENGINEERS EDGE, 2000-2022).

5 MODEL MODULÁRNÍ PNEUMATICKÉ TRATI

Pro vytvoření modulární pneumatiké trati, obrázek 5.1, je zde využit CAD software DesignSpark Mechanical 5.0, ve kterém jsou modelovány veškeré části tratě. Tento software je zvolen z důvodu praktické funkčnosti modelování, skvělému přenosu do souboru STL pro následný tisk součástí. V neposlední řadě také z důvodu licence, která je v tomto softwaru bezplatná (tzv. pouze za registraci).



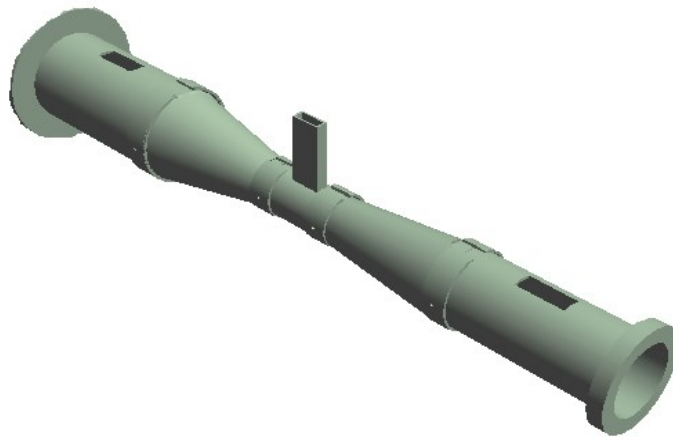
Obrázek 5.1 – Model částí trubice

5.1 MODEL KONSTRUKCE TRATI POMOCÍ OBJÍMEK

Konstrukční řešení, které je zde zvoleno při základním testování funkčnosti, je konstruováno a realizováno pomocí tzv. redukčních kroužků, obrázek 5.2, které měly vždy stáhnout dvě části tratě a následně měly být staženy podobně jako při spojování dvou hadic (objímkou), což se ve výsledku ukázalo jako neúplně optimální řešení a model musel být předělán.

Také zde byl oproti optimalizované trubici v místě pro snímání tlaku obdélníkový výstupek, což se také bohužel ukázalo jako neefektivní z důvodu větší plochy odběru tlaku. Po vytisknutí trati na 3D tiskárně a odzkoušení jsem došel k závěru, že je nutné trať zoptimalizovat a vytvořit znovu, kde bude tvořena kruhovými přírubami, jelikož v tomto řešení byla tlaková ztráta 90 % a model musel být předělán. Také zde byl oproti optimalizované trubici v místě pro snímání tlaku obdélníkový výstupek, což se také bohužel ukázalo jako neefektivní z důvodu větší plochy odběru tlaku. Po vytisknutí trati na 3D tiskárně a odzkoušení jsem došel k závěru,

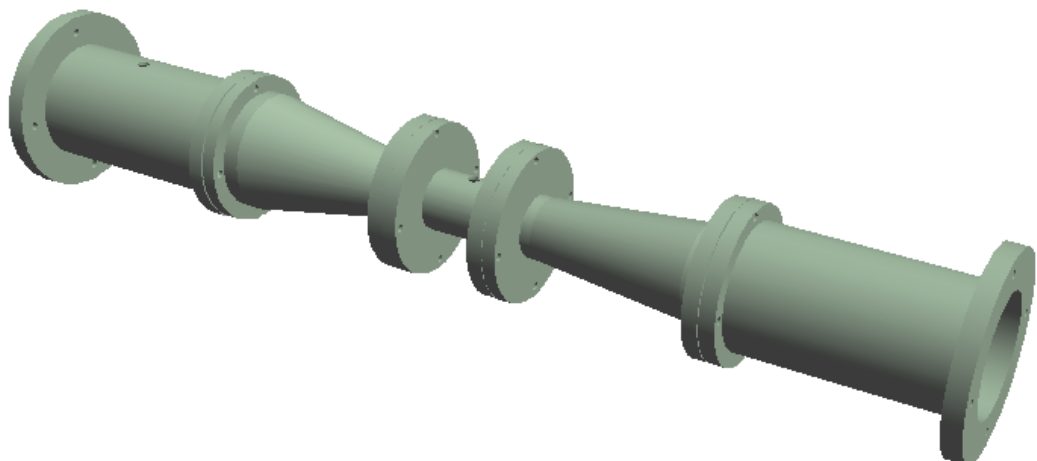
že je nutné trať zoptimalizovat a vytvořit znovu, kde bude tvořena kruhovými přírubami, jelikož v tomto řešení byla tlaková ztráta 90 %.



Obrázek 5.2 – Model konstrukce trati pomocí objímek

5.2 OPTIMALIZOVANÝ MODEL KONSTRUKCE TRATI

Celá trať je rozdělena do několika částí pro její modularitu a celá konstrukce je tvořena tak, aby byla co nejlépe rozebíratelná a následně opět seskupena. Je tomu tak z důvodu různých rozměrů ventilátorů a dmychadel, tudíž bude trať univerzální.



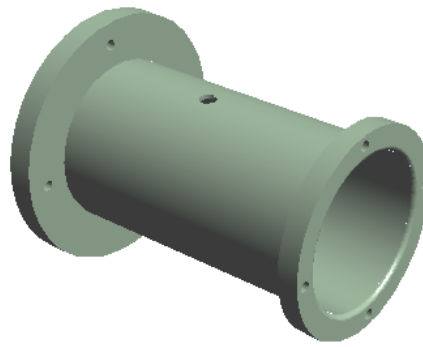
Obrázek 5.3 – Optimalizovaný model konstrukce trati

Její modularita je vyřešena tzv. přírubami, obrázek 5.3, které jsou na sebe napojeny a připevněny za pomoci šroubků, podložek a matic.

5.2.1 Vstupní část potrubí

Je zde vytvořena vstupní část potrubí, obrázek 5.4, kde se snímá vyšší tlak pro následný výpočet difference tlaku. Tlak se odebírá z otvoru o průměru 8 mm. Nadále jsou uvažovány různé průměry pneumatických akčních členů (80 mm, 90 mm apod.). Jelikož jsou na tento průměr připojeny (dle zvoleného průměru ventilátoru) příruby pro připojení akčního členu k trati. K začátku tohoto průměru je také stejně připevněna i příruba pro vnější akční člen, obrázek 5.7.

Základní seskupení trati je určeno pro pneumatické akční členy o velikosti 80 mm v průměru, jelikož se využívají velmi často. Vnitřní otvor je tedy o velikosti 80 mm v průměru.



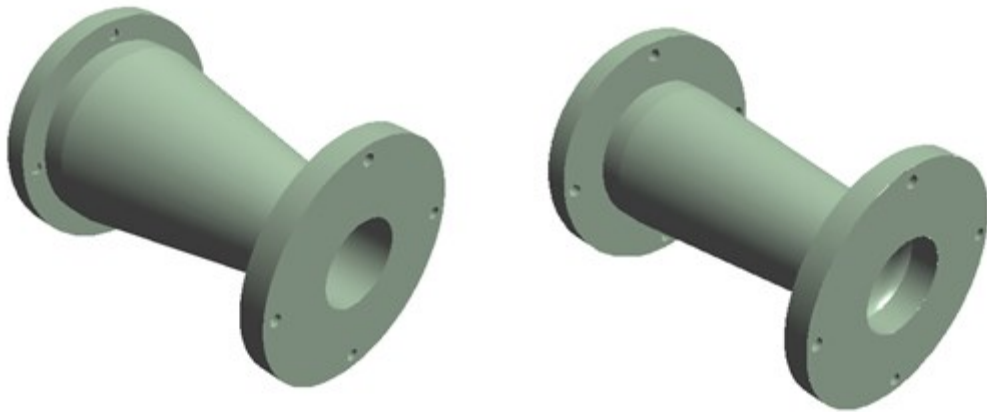
Obrázek 5.4 – Vstupní část potrubí

Pokud bude potřebné otestovat člen jiné velikosti, tak stačí pouze vnitřní otvor zvětšit na požadovaný průměr akčního členu a průměr vnější zvolit o 2 mm větší. Následně lze dle potřeby zvětšit přírubu pro upevnění (musí být stejná na každé části trati). Samozřejmě také lze změnit rozměr otvoru pro snímání vyššího tlaku pro výpočet.

5.2.2 Konfuzor a difuzor

Tyto část trati jsou nejdůležitější z pohledu principu Venturiho trubice, jelikož části, obrázek 5.5, mají pevně stanovený úhel pro zúžení (konfuzor) a pro rozšíření (difuzor). Pro konfuzor je to 21° a pro difuzor je to rozmezí od 7° do 15° , kde je zvoleno 12° . Tyto úhly musí být bezpodmínečně dodrženy, jelikož v trubici budou (při nedodržení úhlů) vznikat zpětné proudy a měření by bylo velmi nepřesné, jelikož by v potrubí byla vysoká ztráta tlaku.

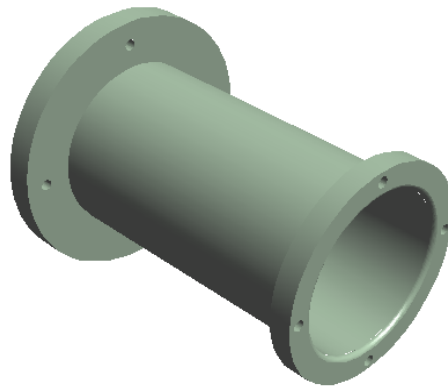
Jak již bylo uvedeno výše, jsou veškeré části tvořeny pro průměr ventilátoru 80 mm. Pokud bude zapotřebí změna velikosti otvoru, tak stačí větší část otvoru „vytáhnout“ do požadovaného rozměru a požadovaný úhel (21° či 12°) bude zachován beze změny a není třeba jej z důvodu náročnosti upravovat. Menší otvor zůstane také zachován a tím nevznikne potřeba upravovat další část trati jako hrdlo.



Obrázek 5.5 - Model konfuzoru (vlevo) a model difuzoru (vpravo)

5.2.3 Výstupní potrubí

Výstupní potrubí trati, obrázek 5.6, je obdobný jako vstupní potrubí, s tím rozdílem, že v tomto potrubí už není zapotřebí otvor pro snímání tlaku.

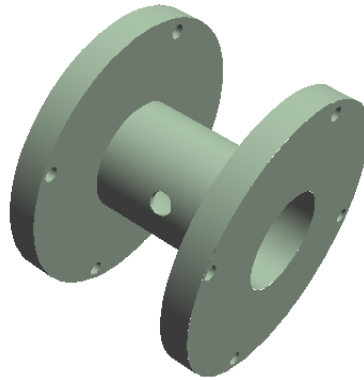


Obrázek 5.6 – Výstupní potrubí

Konstrukčně je tato část méně významná než ostatní části potrubí. Výstupní potrubí je zde použito pro měření celkové tlakové ztráty pomocí anemometru.

5.2.4 Hrdlo potrubí

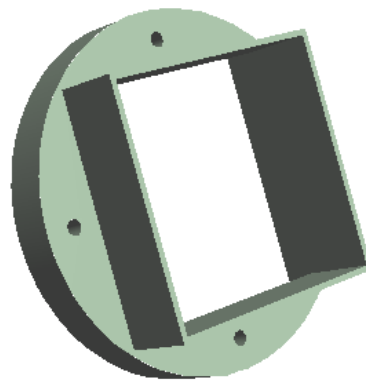
Hrdlo, obrázek 5.7, je zde mezi konfuzorem a difuzorem a spojuje je. Využívá se zde ke snímání nižšího tlaku pro následný výpočet diference tlaků. Jeho velikost je neměnná a při modulaci se mění pouze prvotní průměr a větší průměr konfuzoru a difuzoru.



Obrázek 5.7 - Hrdlo potrubí

5.2.5 Vnější příruba pro akční člen

Příruba pro akční člen, obrázek 5.8, je určena pro ventilátory o průměru 80 mm, které jsou velmi často využívány v PC sestavách. Tato příruba je použita v základní verzi trubice.



Obrázek 5.8 - Vnější příruba pro akční člen

Ventilátor se jednoduše zavede do otvoru pro akční člen nebo jej stačí přiložit k jejímu obvodu a následně zatěsnit.

5.3 KONSTRUKČNÍ SESTROJENÍ POTRUBÍ

Části trubice jsou na sebe připevněny pomocí šroubových spojů 5 mm a prostor mezi přírubami je utěsněn izolační pryží, jejíž schopnost těsnit je zaručena šroubovým spojem, který prostor utěsní. Izolační pryž je také použita pro utěsnění přírubových prostor pro bezpodmínečné utěsnění a estetické vlastnosti.

Pryž je využita i na částech, kde není tisk na 100 % čistý a hladký, aby nedocházelo k tlakovým ztrátám v potrubí právě povrchem 3D tisku. Samozřejmě je ale nutné říct, že ke ztrátám tlaku v potrubí docházet bude, a to zejména kvůli povrchovým vadám, jako je například vnitřní povrch částí trubice. Celou sestavenou trať ve finální podobě lze vidět na obrázku 5.9.



Obrázek 5.9 – Finálně sestavená trať

5.4 KALIBRACE POTRUBÍ

Potrubí se musí vždy před každým měřením zkalibrovat, jelikož zde může docházet k únikům plynu z trubice nebo k nelineárnímu proudění. Průtočný objem a rychlost proudění, které dostaneme měřením, by se právě kvůli tlakovým ztrátám, neshodovaly s daty relevantními. Ke zmíněné kalibraci je zde využit tzv. anemometr, obrázek 5.10, který se vždy připevní k danému akčnímu členu bez trubice a ukáže na digitálním displeji rychlost proudění daného média a například i jeho teplotu.

Po změření anemometrem bez trubice se připevní akční člen k začátku potrubí a přivedeme k němu zdroj napětí. Na konec potrubí se připevní anemometr, a změří samý údaj znovu (tedy myšleno rychlost proudění, m/s). Tyto hodnoty se porovnají a případně lze určit tlakovou ztrátu v potrubí, která by měla být co možná nejmenší a v ideálním případě žádná. Rovnice kontinuity říká, že co do potrubí vstoupí, musí také vystoupit. Z toho plyne, že by k tlakovým ztrátám (v ideálním případě) docházet nemělo. Ale to, jak již bylo řečeno, je pouze v ideálním případě, který je v reálném světě těžko (a velmi často nelze) proveditelný.



Obrázek 5.10 – Anemometr R16C

5.5 REGULACE VÝKONU AKČNÍHO ČLENU

Pro regulaci výkonu je zde zvolen PWM signál, který je ovládán pomocí externího potenciometru 5 k Ω . Programově je nastaveno, obrázek 5.11, aby při otočení potenciometru byl zaručen, co nejpřesnější procentuální údaj. Hodnota potenciometru je ukládána do proměnné „output“ a čtena z analogového pinu A0.

```
//OVLÁDÁNÍ PWM-----  
cas1 = millis();  
while ((millis() - cas1) < 1000) {  
  output = analogRead(potentiometer);  
  hodnota = map(output, 0, 1023, 0, 255);  
  analogWrite(PWM_PIN, hodnota);  
  delay(1);  
}
```

Obrázek 5.11 – Část kodu pro regulaci výkonu akčního členu

A následně hodnoty od 0 do 255 jsou převáděny z jednotek z A/D převodníku na procenta, obrázek 5.12.

```
hodnota_procento_1 = (hodnota / 255) * 100; ,  
hodnota_procento_zaokr = hodnota_procento_1;
```

Obrázek 5.12 – Výpočet na procenta výkonu a uložení do proměnné

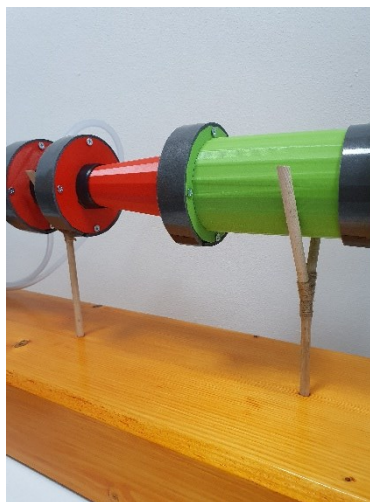
5.6 MECHANICKÁ PODPĚRA TRATI

Základna pro Modulární pneumatickou trať měla být konstruována pomocí 3D tisku, ale opět se po vytisknutí a sestrojení ukázalo, že pro tento účel nebude 3D tisk ideální, a to z několika důvodů:

- pevnost,
- složitost výroby,
- velikost.

Jako největší problém se jeví pevnost, ačkoliv trať sama o sobě je poměrně lehká (přibližně 0,5 kg), ale po přidělení jednotlivých komponentů pro měření (jako senzor a akční člen) váha trati poměrně vzroste. Problém je také, že se s trati stále manipuluje (přípevnění akčního členu), a proto musí být konstrukce robustní.

Problémem byla složitost výroby, jelikož některé části by byly pro 3D tisk zbytečně složité a cenově poměrně náročné (hodně materiálu).



Obrázek 5.13 – Mechanická podpora měřicí trati

Asi největší překážkou byla velikost konstrukce, jelikož délka stojanu je 70 cm, jeho šířka je 20 cm a výška 25 cm. Sestavu podpěry by nebylo možné vytisknout uceleně.

5.7 OPTIMALIZOVANÉ ŘEŠENÍ PODPĚRY TRATI

Z důvodu, že 3D tisk není ideální řešení pro mechanickou podporu trati, tak je zvoleno provedení ze dřeva. Sám jsem si naměřil rozměry trati a držák vyrobil. Jedná se o jednoduché provedení, kde jsem vytvořil kvádr o velikosti $70 \times 20 \times 20$ cm a do něho vytvořil otvory pro podstavy, které jsou 8 mm. Podstavy jsou voleny tři, přičemž jedna je kratší a podpírá středový průměr. Zbylé dvě jsou delší a podpírají krajní průměry trati, obrázek 5.13.

5.8 AKČNÍ ČLENY A SENZORY

Trat' v základním sestavení je určena pro akční členy typu 80 mm PWM. Samozřejmě zde lze testovat i ostatní typy akčních členů, a to od libovolného průměru, ale v tom případě se jednoduchým způsobem vymění části tratě, za větší či menší (šroubovým spojem) a testování probíhá stále stejně. Také lze použít nejrůznější diferenční senzory pro diferenci tlaku, kde je v základní verzi využít Premasgard 211. Lze použít i jiné typy tohoto senzoru či jiných senzorů.

6 ELEKTRONICKÉ OBVODY

V této části budou rozebírány jednotlivé součástky, ať už senzor pro měření tlaku nebo jednotlivé komponenty (napájecí modul, DC konektor, potenciometr apod.) a následné schéma jejich zapojení, které je vytvořeno v softwaru Eagle 7.0.

Celý obvod bude zapájen, jelikož nepájivé pole, které je zde využito, je efektivní pouze pro testování a případní změny zapojení, ale konečné zapojení, které je odzkoušené a funkční, by mělo být zapájené na desce.

6.1 ZAPOJENÍ SENZORU PREMASGARD 2111-U

Senzor Premasgard 2111-U pro měření difference tlaku musí být napájen 24 V stejnosměrného napětí pro jeho správnou funkčnost. Prvotně jsem chtěl senzor napájet například z baterií, aby byla celá trať co nejsnáze přenositelná a nezávislá na zdroji ze sítě. Avšak toto řešení (po nastudování datasheetu) jsem nakonec nezvolil a volil jsem napájení ze sítě přes síťový adaptér z 230 V na 24 V se zakončením DC konektoru (samec).

Bohužel nelze tento konektor připojit přímo k senzoru Premasgard, který má výstupy plus, minus a data odděleně, a proto jsem musel volit redukci pro DC konektor se svorkovnicí, obrázek 6.1, díky které je následně napájen senzor.



Obrázek 6.1 - DC konektor se svorkovnicí

6.2 NAPÁJECÍ MODUL

Napájecí modul napětí je využíván pro změnu napětí na akčním členu (na ventilátoru), jelikož je napájen přímo z mikropočítače Arduino UNO, které má výstupní napětí 5 V, ale pro optimální napájení ventilátoru je zapotřebí 12 V.

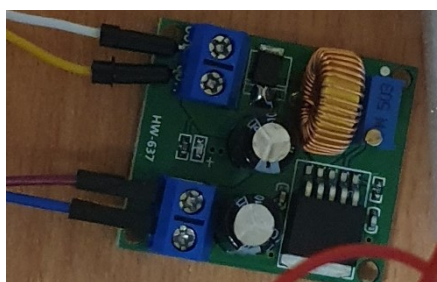
Napájecí modul lze plynule nastavit na požadovanou hodnotu napětí. Z tabulky 1 lze vyčíst, že vstupní napětí může být v rozmezí od 3 V do 30 V, přičemž je zvolen převod z 5 V na 12 V (zvýrazněno v tabulce 6.1).

Tabulka 6.1 - Převody napětí na vstupu a výstupu

Vstupní napětí	Výstupní napětí
3 V	5 V
5 V	12 V
5 V	9 V
9 V	12 V
12 V	24 V
19 V	24 V
24 V	30 V
30 V	35 V

Do vstupní svorkovnice je přiváděno napětí z mikropočítače 5 V a dle tabulky v datasheetu napájecího modulu na výstupní svorkovnici je získáno 12 V, které lze nastavit potenciometrem, který je zabudovaný v modulu napájení, obrázek. 6.2. Nejprve je přivedeno napětí 5 V na vstupní svorkovnici a voltmetrem změřeno napětí na výstupní svorkovnici, kde bylo 15,5 V. Z tohoto důvodu se potenciometrem musí změnit hodnota napětí na 12 V a znovu proměřit.

Tento napájecí modul doporučuji použít pouze pro měření, které netrvá déle než maximálně pár minut, jelikož kvůli odběru proudu a napětí z Arduina může docházet k přehřívání mikropočítače a může dojít k jeho poškození. Při delším testování akčního členu doporučuji napájet ventilátor přímo ze zdroje na 12 V a odběr max 1 A.

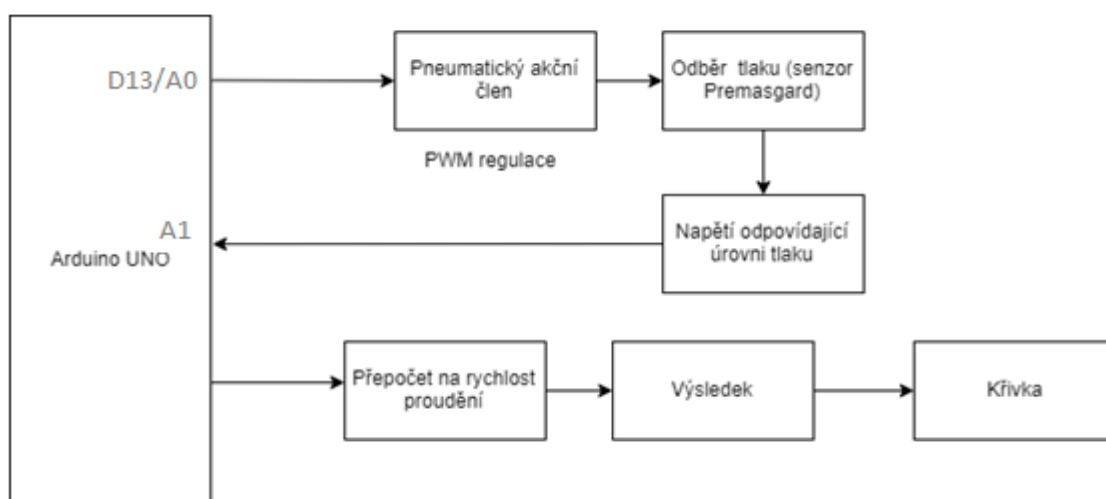


Obrázek 6.2 – Napájecí modul

6.3 BLOKOVÉ SCHÉMA ELEKTRONIKY

Na obrázku 6.3 je jednoduše, pomocí blokového schématu, naznačen princip funkčnosti modulární pneumatické trati. Je zde regulace akčního členu pomocí PWM signálu, následuje odběr nižšího a vyššího tlaku pomocí senzoru Premasgard 211x a určení jejich diference.

Následně má senzor na výstupu hodnotu napětí (od 0 V do 10 V), která odpovídá jednotlivým tlakovým úrovním. Přes odporový dělič (kvůli velikosti výstupního napětí do Arduino) je přivedena hodnota na analogový vstup do mikropočítače Arduino. Následuje programový výpočet na rychlost proudění a výsledek, který se zobrazí v počítačové aplikaci. Z naměřených dat lze v tabulkovém procesoru Excel následně vytvořit graf.



Obrázek 6.3 - Blokové schéma elektroniky

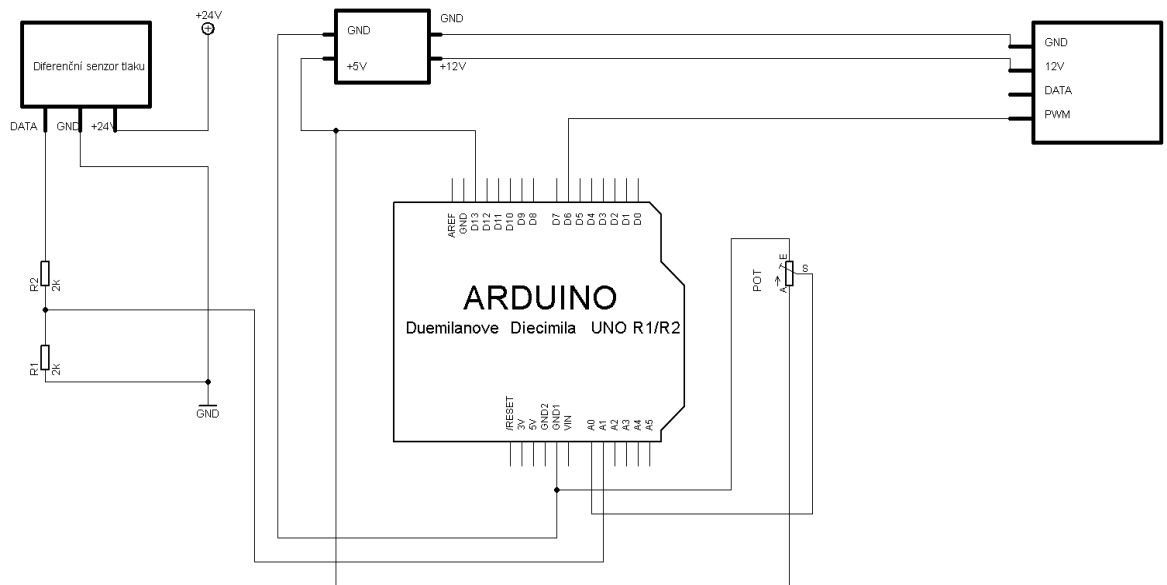
6.4 SCHÉMA ZAPOJENÍ SENZORU

Schéma zapojení, obrázek 6.4, je vytvořeno v programu Eagle 7.0, kde jsem si některé součástky musel nakreslit a uložit do knihovny sám, jelikož v knihovně součástky nejsou. V celém zapojení je nejdůležitější opět Arduino UNO a rozložení jeho pinů ve smyslu připojení analogových údajů na analogové vstupy (napětí ze senzoru diferenčního tlaku Premasgard).

Jelikož jsou data ze senzoru v napěťových úrovních 0 – 10 V, tak je zde využit odporový dělič, který je umístěn před analogovým vstupem do Arduino. Pokud by bylo napětí přiváděné na analogový pin (tzv. velikost napětí ze senzoru) větší jak přibližně 5 V, tak by došlo k poškození a v nejhorším případě zničení mikropočítače. Jako odporový dělič jsou zde využity dva odpory, které mají stejnou hodnotu 2 kOhm a dle vzorce dělí napětí na plovinu. Zároveň je

velmi důležité s tímto údajem počítat v následném programování (vynásobení výsledku dvojkou).

V zapojení je také vidět potenciometr, který je zvolen 5 kΩ kvůli citlivosti regulace. Je zvolen se zdvojenými vstupy z důvodu pevnosti uzasení v plošném spoji.



Obrázek 6.4 – Schéma zapojení senzoru

6.5 ZAPOJENÍ ELKETRONIKY

Zapojení bylo prováděno na nepájivém poli pro lepší modifikaci v případě nefunkčnosti. Byl zde problém v napájení jednotlivých komponentů. Například u akčního členu a senzoru. Akční člen, jak je již uvedeno výše, je vyřešen napájecím modulem na 12 V, kapitola 6.2, ale jedná se pouze o krátkodobé měření z důvodu odběru z Arduina. Následně byl řešen větší problém pro napájení senzoru na 24 V, kde nezbylo jiné řešení (které by bylo optimální) než senzor napájet externě, a to zdrojem DC 24 V a 1 A, které je řešeno pomocí redukce, obrázek 6.1.

7 SOFTWARE

Software této práce je vytvářen v různých typech vývojového prostředí. Samotný kód pro regulaci otáček, přepočítání dat ze senzoru, výpočty jsou realizovány v prostředí Arduino.

Aplikace pro ovládání (zapínání, vypínání apod.) je realizována v jazyce C# ve vývojovém prostředí Visual Studio 2019.

7.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ ARDUINO

Nejdříve byl vytvořen kód pro regulaci otáček pomocí pulzně šířkové modulace (PWM), kde pomocí analogového vstupu Arduina je čtena a ukládána aktuální hodnota. Následně se hodnota z A/D převodníku (0 – 255) přepočítává na procenta výkonu ventilátoru. Každá hodnota byla pro ověření funkčnosti vypsána pomocí sériové komunikace do okna, kde se zobrazují hodnoty, které jsou požadovány.

Veškeré tyto řádky jsou vyřazeny z chodu programu z důvodu následné nepotřebnosti a vypisuje se pouze aktuální hodnota výkonu v procentech. Hodnota se vypíše každou jednu sekundu pomocí funkce millis. Poté se vypisuje hodnota napětí (tzv. přepočítání – hodnota z tlakoměru násobená pěti, dělená hodnotou 1023 a následně vynásobená dvojkou, kde násobení dvojkou je z důvodu odporového děliče, který dělí napětí na polovinu) ze senzoru, která je vyváděna na analogový vstup mikropočítače Arduino a vypsána. Poměr výstupního napětí a tlaku se vypisuje do konzole a následně je dle vzorců proudění přepočítávána na rychlost proudění v trubici a opět je vypsána do konzole.

7.1.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM KODU ARDUINO

Na obrázku 7.1 lze vidět chod programu v prostředí Arduino v jednoduchém zobrazení pomocí vývojového diagramu.



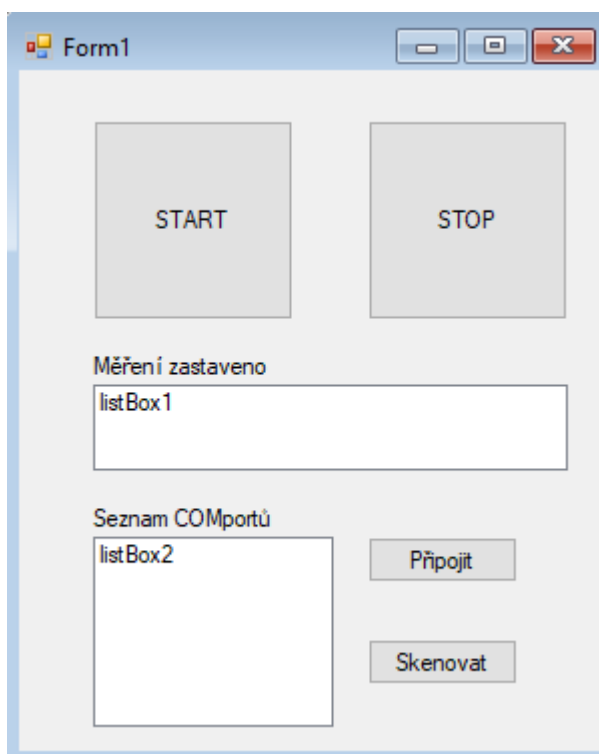
Obrázek 7.1 – Vývojový diagram Arduino

7.2 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ VISUAL STUDIO

V tomto vývojovém prostředí je vytvářena aplikace pro základní ovládání trati externě, jelikož ne vždy bude možné ovládat trať přímo pomocí například tlačítek či dotykového displeje umístěného přímo u trati. Z praktického hlediska je daleko účinnější ovládání externí pomocí PC. Jedná se zde zejména o zapínání a vypínání zdroje k ventilátoru, vypisování dat do textového pole, ze kterého se data už jen jednoduše zkopírují do tabulkového procesoru Excel

a dále zpracují. A také připojení COM portů pro komunikaci s Arduinem. Na obrázku 7.2 lze vidět vytvořený design aplikace pro ovládání trati.

Na obrázku 7.2 lze vidět několik tlačítek pro ovládání jako je START, které je naprogramováno pro zapnutí otáček ventilátoru a celkové oživení aplikace. Tlačítko STOP celou aplikaci ukončí. Následně je zde tlačítko Skenovat, které je využito pro kontrolu a výpis COM portů, které jsou k dispozici pro připojení. Tudíž vždy při připojení Arduina k PC je důležité stisknout tlačítko skenovat a v seznamu COM portů se zobrazí požadovaný port ke komunikaci. Následně stačí vybrat port, který vyžadujeme (port k Arduinu) a poté stisknout tlačítko připojit, které zprostředkuje navázání komunikace s připojenou periferií. Následně v listBoxu1 bude výpis veškerých změřených dat (diferenční tlak, rychlost proudění).



Obrázek 7.2 – Návrh aplikace pro ovládání trati

7.3 PROPOJENÍ APLIKACE S PROGRAMEM ARDUINO

Tato část byla jedna z nejsložitějších při programování této aplikace, jelikož jsem tuto situaci řešil poprvé. Je zde vytvořen seznam COM portů, do kterých se lze připojit tlačítkem připojit, které se následně vymění za nápis odpojit. Funkčnost připojení COM portů byla otestována tím, že pokud jsem si otevřel sériovou komunikaci v prostředí Arduino a následně se snažil připojit přes Aplikaci, tak mi zde vyskočila hláška, která říkala, že je COM port

využíván. Následně je naprogramován chod tlačítek START a STOP, u kterých bylo nutné upravit program několika řádky navíc, obrázek 7.3, přes digitální pin 13, aby program v Arduino správně reagoval na tlačítka.

Nakonec se pouze vypíšu data (průtočný objem, rychlost proudění) do listBoxu1, kde s daty lze jakkoliv dále pracovat, jako například označit a nakopírovat do tabulkového procesoru Excel, kde je dále zpracovávat. Pro výpis dat byla zapotřebí následující část kódu v C#, obrázek 8.1.

```
if (Serial.available() > 0) {  
  // read the incoming byte:  
  incomingByte = Serial.read();  
  
  if(incomingByte == '1'){  
    digitalWrite(13,HIGH);  
    zacniMerit = true;  
  }  
  
  if(incomingByte == '0'){  
    digitalWrite(13,LOW);  
    zacniMerit = false;  
  }  
}
```

Obrázek 7.3 – Část kódu pro ovládání tlačítek START a STOP

8 ANALÝZA DAT

V této kapitole budou vyhodnocena data, která byla naměřena pomocí Modulární pneumatické trati. Testování proběhlo na PC ventilátoru, a to na jednom, který měl maximálně 2000 otáček. Analyzuje se zde ventilátor nejmenované značky s průměrem 80 mm, který má zmíněných 2000 RPM v maximálním výkonu. Hodnoty jsou snímány po 10 %, které se nastavují pomocí PWM signálu na potenciometru. Každá hodnota byla zaznamenána a uložena do tabulkového procesoru Excel, kde je dále zpracovávána a analyzována.

Poté je opět po 10 % proměřený samotný ventilátor pomocí anemometru a díky tomu mohl analyzovat tlakovou ztrátu, kapitola 8.2.

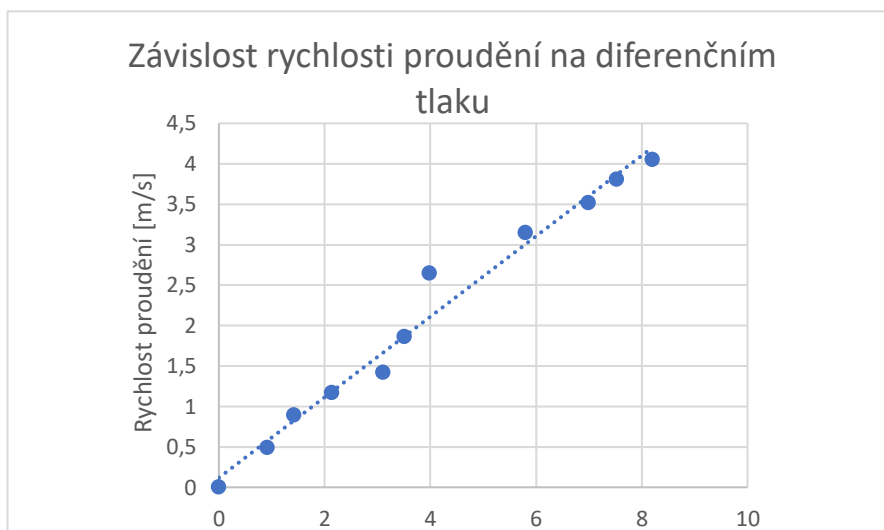
```
private void VypisData(string hodnota)
{
    if (this.TextData.InvokeRequired)
    {
        SerialCallback scb = new SerialCallback(VypisData);
        this.Invoke(scb, new object[] { hodnota });
    }
    else
    {
        if (druhHodnoty == 0)
        {
            TextData.Text = TextData.Text.Insert(0, "Rychlost proudění: " + hodnota + "\n");
            druhHodnoty = 1;
        }
        else if (druhHodnoty == 1)
        {
            TextData.Text = TextData.Text.Insert(0, "Průtočný objem: " + hodnota + "\n");
            druhHodnoty = 0;
        }
    }
}
```

Obrázek 8.1 – Část kodu v C# pro vypisování hodnot do listBoxu1

Tabulka 8.1 - Naměřená data zvoleného ventilátoru

Výkon ventilátoru , %	Naměřená data, Pa	Naměřená data, m/s
96	8,2	4,05
90	7,53	3,81
80	6,99	3,52
70	5,8	3,15
60	3,99	2,65
50	3,51	1,86
40	3,11	1,42
30	2,14	1,17
20	1,42	0,89
10	0,92	0,49

V tabulce 8.1 je patrné, že čím větší je diferenční tlak, tak tím je rychlejší rychlost proudění. Tato závislost je vyobrazena v obrázku 8.2, kde se data zobrazují v grafu pro větší pochopitelnost a následně aproximují. Z obrázku 8.2 je patrné, že naměřené hodnoty nejsou ideálně lineární, a tudíž jsou aproximovány přímkou. V tabulce 3 můžeme vidět ideální stav proudění ventilátoru a porovnat jej s daty naměřenými.



Obrázek 8.2 – Graf závislosti proudění na diferenčním tlaku

Zde v tabulce 3 jsou vidět rozdílné hodnoty od naměřených, jelikož zde vznikla tlaková ztráta v trati od 5 % do 10 %.

Tabulka 8.2 - Ideální data zvoleného ventilátoru

Výkon ventilátoru [%]	Naměřená data [m/s]
100	4,38
90	3,86
80	3,59
70	3,21
60	2,72
50	1,94
40	1,51
30	1,22
20	0,99
10	0,57
0	0

8.1 TEORETICKÉ TLAKOVÉ POMĚRY V POTRUBÍ

Před změřením tlaku přímo pomocí diferenciálního tlakoměru zde bylo nutné dopočítat přibližnou hodnotu tlaku v potrubí (pro ověření naměřených hodnot). Vše vyplývá z rovnice pro diferenci tlaku, kde je nutné znát veličiny jako hustota média, rychlost proudění v počátečním průměru a rychlost proudění v zúžení. Hustota vzduchu činí $1,275 \text{ kg/m}^3$. Následně je za pomoci anemometru změřena rychlost proudění v počátečním průměru a v zúžení. V počátečním průměru byla maximální rychlost proudění $4,5 \text{ m/s}$, což už se o $0,45 \text{ m/s}$ rozchází s naměřenou hodnotou rychlosti proudění, tabulka 3.

Následně je opět za pomoci rovnice kontinuity a znalosti prvního, druhého průměru a rychlosti v_1 vypočítána rychlost proudění v zúžení, které vyšlo 9 m/s , přičemž bylo reálně pomocí anemometru naměřeno 6 m/s . Tyto údaje byly dosazeny do vzorce a vypočítán rozdíl tlaku, rovnice (8.1), v měřícím potrubí

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} * (v_1^2 - v_2^2) = 10,23 \text{ Pa} \quad (8.1)$$

kde Δp je rozdíl tlaku, Pa,

ρ je hustota vzduchu, kg/m^3 ,

v_1 je rychlost proudění média v počátečním průměru, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

v_2 je rychlost proudění média v zúžení, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Z vypočítaných hodnot je patrné, že se neshodují s naměřenými hodnotami o $2,03 \text{ Pa}$, jelikož v maximálním výkonu ventilátoru bylo programově naměřeno $8,2 \text{ Pa}$ a výpočtem $10,23 \text{ Pa}$. Tato chyba ve fyzické podobě oproti teorii je zapříčiněna ztrátovostí v trubici, což je patrné při měření rychlosti proudění, kde se údaje rozchází o $0,45 \text{ m/s}$. Tuto tlakovou ztrátu bohužel již nelze eliminovat, kapitola 8.2.

8.2 TLAKOVÉ ZTRÁTY V POTRUBÍ

Z výpočtů, které jsou zmíněny v kapitole 8.1, je patrné, že dochází k určité ztrátě tlaku, což může být z několika příčin, u kterých byla snaha je eliminovat a pokud byly chyby stále aktivní, tak jsem se je snažil odůvodnit na následujících parametrech:

- chybovost 3D tiskem,
- těsnění potrubí,
- špatná konstrukce,
- zpětné víry,
- špatné mechanické spoje.

Všechny tyto jevy, které mají vliv na chod, měly být eliminovány na minimum. Některé eliminace se povedly a byly splněny, ale bohužel některé jevy jsou zde v trati stále aktivní. V první řadě zde byla vysoká tlaková ztráta z důvodu těsnění potrubí, kde jsem zjistil, že plocha u spoje přírub po 3D tisku není úplně ideální. Povrch byl hrubý a celkově nedokonalý, tudíž bylo vymyšleno co nejlepší těsnění, které by odpovídalo tomuto problému.

Z tohoto důvodu byla zvolena izolační pryž, jelikož její vlastnosti jsou ideální pro tento případ. Před zavedením pryže byla tlaková ztráta okolo 60 %, což se muselo ihned vyřešit. Po zavedení izolační pryže do přírub trati se tlaková ztráta snížila na 35 %. Následně bylo zapotřebí eliminovat i tlakovou ztrátu 35 %, jelikož by zde být neměla. Tudíž byla optimalizována konstrukce, kapitola 5.2, kde byla změněna spojení jednotlivých částí tratě a řešení takto bylo optimalizováno (konstrukce, spoje). Po tomto kroku tlaková ztráta klesla na 20 %, což bylo opět přijatelnější číslo. Poté byla snaha eliminovat zpětné víry, které by v trubici při správné konstrukci být neměly.

Konstrukce byla několikrát zkontrolována (jednotlivé průměry, úhly, otvory apod.) a zjištěno, že jsou špatně zatěsněné otvory pro odběr tlaku, tudíž byly ihned utěsněny. Následná tlaková ztráta činila od 5 % do 10 %. Bohužel po dalších pokusech o eliminaci nebylo možné tlakovou ztrátu od 5 % do 10 % eliminovat, která je dle mého úsudku zapříčiněna chybovostí 3D tisku (povrch, nedokonalosti tisku apod.).

8.2.1 Procentuální tlakové ztráty

Tlakové ztráty v potrubí, kapitola 8.2, jsou vyobrazovány pro každou hodnotu zvlášť a následně převedeny na hodnotu procent pro lepší orientaci. Veškeré tyto hodnoty jsou vyobrazeny v tabulce 4.

Tabulka 8.3 – Tlaková ztráta trati v %

Tlaková ztráta [Pa]	Tlaková ztráta [%]
0,05	5
0,05	5
0,07	7
0,06	6
0,07	7
0,08	8
0,09	9
0,05	5
0,10	10
0,08	8

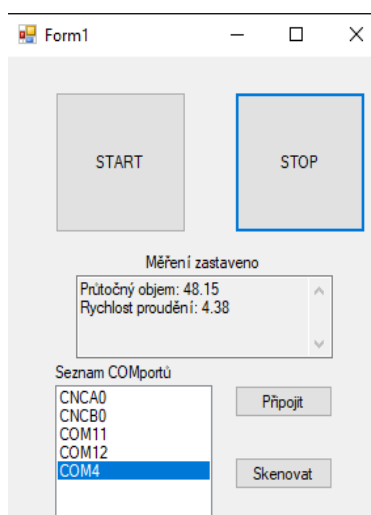
Následně byla vypočítána i průměrná tlaková ztráta ze všech naměřených hodnot, která činí 6 %, tabulka 5.

Tabulka 8.4 - Průměrné tlakové ztráty v potrubí

Průměr	0,06	6
--------	------	---

8.3 FINÁLNÍ MĚŘENÍ

V poslední části měření data ukázala, že při rychlosti proudění 4,38 m/s je průtočný objem 48,15 m³/h, obrázek 8.3), což se s datasheetem o přibližně 8 % neshoduje, kapitola 8.2.



Obrázek 8.3 – Výsledek měření ventilátoru na 100% výkon

8.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TESTOVÁNÍ

V datasheetu těchto akčních členů se vždy uvádí průtok vzduchu, a ne rychlost proudění. Ale díky znalosti rychlosti proudění a základních vzorců pro výpočet průtočného objemu lze tuto hodnotu spočítat a následně porovnat. Nejmenovaný výrobce pro ventilátor s průměrem 80 mm PWM udává, že průtočný objem se rovná 52,7 m³/h. Poté jsou využity vzorce v teoretické části a programově vypočítán průtočný objem z mých naměřených dat, který činil 48,15 m³/h.

Tento údaj není stejný jako udává výrobce, ale chyba, která zde vznikla, je nejspíše na mé straně, a to z důvodu tlakových ztrát, které činí od 5 % do 10 %, což právě odpovídá rozdílu mezi údaji výrobce a mými. Z toho důvodu mohu říct, že výrobce udává správné hodnoty proudění. Tento stejný princip lze využít pro veškeré typy pneumatických akčních členů (od nejmenších velikostí po ty maximální) samozřejmě v závislosti na konstrukci trati (velikost).

9 ZÁVĚR

Měření rychlosti proudění a průtočných objemů je v dnešní době velmi využívané, a to od snímání rychlostí letadel až po vzduchotechniku. A je nyní nedílnou součástí každodenního života.

Tato bakalářská práce měla za cíl vytvořit a realizovat konstrukční řešení Modulární pneumatické trati (za pomoci 3D tisku) pro testování pneumatických akčních členů a senzorů k měření diferenčního tlaku. Trať je ovládána za pomoci PC aplikace a vypočítává jednotlivé prvky, které jsou důležité pro určení průtočného objemu (primárně rychlost proudění). Vše, co bylo zadáním práce je splněno a funkční.

Tuto práci lze samozřejmě dále optimalizovat, a to hlavně z hlediska 3D tisku neboli z konstrukčního hlediska trati, jelikož 3D tisk není tolik efektivní oproti jiným technologiím, které by se daly pro tuto práci využít (a to hlavně z hlediska ztrát v potrubí). Ale to je už pouze dodatek pro případné další práce na toto téma.

POUŽITÁ LITERATURA

- ARDUINO. ©2021. *Arduino Community Logo* [online]. [Cit. 27.11. 2021]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Trademark/CommunityLogo>
- ARDUINO UNO R3. ©2022. *Product Reference Manual* [online]. [Cit. 11.4. 2022]. Dostupné z: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
- AUTOMA. ©2016. *Měření průtoků plynů – vše z jednoho zdroje* [online]. [Cit.16.2. 2022]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/mereni-prutoku-plynu-vse-z-jednoho-zdroje-2006_10_31404_1151/
- ČÍŽEK, Jakub. ©2019. *Pojďme programovat elektroniku: Bezdrátové Arduino UNO s baterií a Wi-Fi* [online]. [Cit. 29.11. 2021]. Dostupné z: <https://www.zive.cz/clanky/pojdme-programovat-elektroniku-bezdratove-arduino-uno-s-baterii-a-wi-fi/sc-3-a-197765/default.aspx>
- Domat Control Systém. ©2013. *PREMASGARD 2111-U ČIDLO DIFERENČNÍHO TLAKU VZDUCHU -1000...1000 PA* [online]. [Cit. 18.2. 2022]. Dostupné z: <http://products.domat-int.com/cs/cidla-tlaku/547-cidlo-diferencniho-tlaku-vzduchu-2525-pa.html>
- DUDKA, Michal. ©2019. *ADC1* [online]. [Cit. 18.2. 2022]. Dostupné z: http://www.elektromys.eu/clanky/avr1_adc1/clanek.html
- ENGINEERS EDGE. ©2022. *Venturi Flow Equation and Calculator*[online]. [Cit. 18.2. 2022]. Dostupné: https://www.engineersedge.com/fluid_flow/venturi_flow_equation_and_calculator_14001.htm
- FRADEN, Jacob. 2016. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Fifth edition. Cham: Springer. ISBN 978-3-319-19302-1
- FYZMATIK. ©2009. *Pitotova trubice* [online]. [Cit. 16.2. 2022]. Dostupné z: <https://fyzmatik.pise.cz/930-pitotova-trubice.html>
- GULDAN, Arnošt. 1987. *Mikroelektronické senzory*. Bratislava: Alfa.
- KARAS, Ondřej. ©2007. *AVR a AD převodník* [online]. [Cit. 18.2. 2022]. Dostupné z: <http://programujte.com/clanek/2007041902-avr-a-ad-prevodnik/>
- MAIXNER, Ladislav. 2006. *Mechatronika: učebnice*. Brno: Computer Press. Učebnice (Computer Press). ISBN 80-251-1299-3.
- MATTECH. ©2016. *Klasická Venturiho trubice* [online]. ©2016 [Cit. 13.2. 2022]. Dostupné z: <https://mattech.cz/produkty/klasicka-venturiho-trubice-152/>
- MILLER, R. W. 1992. *Flow measurement engineering handbook*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-042046-7.
- ORLÍKOVÁ, Soňa. ©2001. *Měření průtoku tekutin – principu průtokoměrů* [online]. [Cit. 13.2. 2022]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- PINKER, Jiří. 2004. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN – technická literatura. ISBN 80-7300-110-1.
- PREISLER, Vlastimil, Zdeněk KROUPA a Marcela MIKYŠKOVÁ. 1967. *Měření množství a průtoků v automatizaci*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

- SEDLISKÝ, Otakar a Jaroslav HLAVÁČEK. 1967. *Měření tlaku a hladiny v automatizaci*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.
- SOBOTKA, Zdeněk. 1983. *Otázky a odpovědi z mikroprocesorov a mikropočítačov: návrh mikropočítačov*. 2. vyd., uprav. Bratislava: Alfa.
- ŠUBRT, Vladimír. 2002. *Mikrokontroléry ATMEL AVR: vývoj aplikací*. Praha: BEN. ISBN 80-7300-055-5. 2002.
- VÁŇA, Vladimír. 2003. *Mikrokontroléry Atmel AVR - assembler*. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-7300-093-8.
- VODA, Zbyšek. 2017. *Průvodce světem Arduina*. Vydání druhé. Bučovice: Martin Stříž. ISBN 978-80-87106-93-8.

PŘÍLOHY

Příloha A – CD

Příloha B – Uživatelská příručka

Příloha C – Technická dokumentace

Příloha k bakalářské práci

Modulární pneumatická trať

Vladimír Flandera

CD

OBSAH

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF.
- 2 Uživatelská příručka ve formátu PDF.
- 3 Zdrojový kód programu (Arduino).
- 4 Zdrojový kód aplikace (Visual Studio).
- 5 Modely částí trati ve 3D formátu (DS Mechanical, STL).
- 6 Technická dokumentace

Příloha k bakalářské práci

Modulární pneumatická trať

Vladimír Flandera

**UŽIVATELSKÁ PŘÍRUČKA K ZAŘÍZENÍ
MODULÁRNÍ PNEUMATICKÁ TRATĚ**

OBSAH

Úvod	3
Seznam obrázků	4
Seznam zkratk	5
1 Modulární části trati a jejich výměna	6
1.1 Konstrukční modely částí trati	6
1.1.1 Postup rozebrání a spojení trati	6
1.2 Kalibrace potrubí	7
2 Elektro hardware	8
2.1 Připojení tlakoměru	8
2.2 Připojení ačnického členu	8
3 Software	9
3.1 Arduino IDE	9
3.2 Visual Studio	9
4 Oživení	11
4.1 Regulace akčnického členu	11
5 Naměřená data	12
6 Ukázkový příklad	13
6.1 Postup měření na maximální výkon	13
6.2 Výsledky měření	13
7 Závěr	14

ÚVOD

Tato uživatelská příručka je vytvořena za účelem seznámení uživatele s chodem trati včetně nároků na hardware a software pro jeho ovládání od úplných začátků. Následně je zde uvedeno oživení aplikace a její chod a v neposlední řadě práce s naměřenými daty a jejich zpracování.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 – Konstrukční model trati.....	6
Obrázek 2.1 – DC redukce se svorkovnicí pro napájení senzoru	8
Obrázek 3.1 – Otevření souboru Aplikace.sln	9
Obrázek 3.2 – Spuštění a načtení aplikace tlačítkem Spustit	10
Obrázek 4.1 – Uživatelské rozhraní.....	11
Obrázek 6.1 – Vyobrazení hodnot do grafu (osa x je tlak, Pa, osa y rychlost, m/s).....	13

SEZNAM ZKRATEK

COM Communication port – komunikační port

DC Direct current – stejnosměrný

GND Ground – zem

PWM Pulse width modulation – pulzně šířková modulace

RPM Revolutions per minute – otáčky za minutu

USB Universal serial bus – univerzální sériová linka

V_{in} Input voltage – vstupní napětí

PC Personal computer – osobní počítač

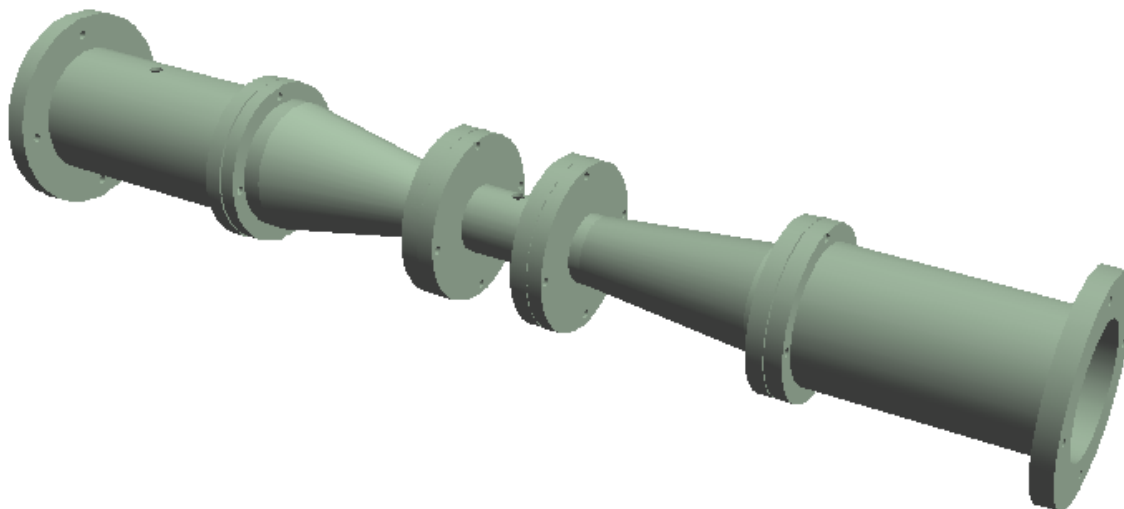
1 MODULÁRNÍ ČÁSTI TRATI A JEJICH VÝMĚNA

Modulární pneumatická trať se skládá celkem ze šesti částí, které lze dle potřeby uživatele vyměnit. Jedná se o prvotní a koncový průměr, difuzor a konfuzor, hrdlo a příruba pro akční člen trati. Trať je v základu vytvořena pro PC ventilátory, které mají průměr 80 mm.

V příloze souborů lze nalézt modely pro modulaci trati pro jiný typ ventilátoru. Tudiž je za potřebí první software DC Spark Mechanical. Tento software je bezplatný (tzv. pouze za registraci), ale potřebný pouze pro uživatele, kteří budou testovat jiný velikostní typ ventilátoru, či dmyhadla. Veškeré manuály na tento software jsou dostupné online a program není nijak složitý.

1.1 KONSTRUKČNÍ MODELY ČÁSTÍ TRATI

Každou část trati lze vyměnit za jinou pomocí šroubových spojů, které jsou na přírubách trati, obrázek 1.1. Také doporučuji vždy aplikovat těsnící pryž pro utěsnění trati a přesnější měření průtočných objemů a rychlosti proudění.



Obrázek 1.1 – Konstrukční model trati

1.1.1 Postup rozebrání a spojení trati

Zapotřebí bude základní nářadí (šroubovák, klíč), které většina lidí zcela jistě vlastní. Také základní spojovací materiál (těsnící pryž, šroubky, podložky, matky). Následně je už pouze na řadě slícování děr, které jsou vždy naproti sobě a jsou celkem čtyři pro každý spoj. Otvory jsou vytvořeny pro závit M5.

Pro celé sestavení trati bude zapotřebí 24 šroubků M5, 24 matic pro závit M5 a 24 podložek pro lepší uchycení spoje. Před kompletací pomocí šroubového spoje je vždy lepší plochy utěsnit, tedy vždy na plochu, kde se nachází spoj nalepit těsnící pryž a až následně spoj slícovat a dotáhnout (dotahování opatrně, z důvodu plastového materiálu).

1.2 KALIBRACE POTRUBÍ

Před každým měřením je nutné zkalibrovat trať neboli určit její tlakovou ztrátu. Proveďte se to jednoduchým způsobem za pomoci anemometru, který se přiloží na konec potrubí a následně se přiloží bezprostředně před akční člen. Poté se vypočítá rozdíl a procentuální tlaková ztráta.

2 ELEKTRO HARDWARE

Nároky na hardware jsou zde minimální a není potřebné je nijak obtížně měnit během používání. Veškeré součástky, které není potřebné měnit, jsou zapájené a uloženy v kryté krabici, společně s Arduino UNO, které se stará o výpočty a podobně.

2.1 PŘIPOJENÍ TLAKOMĚRU

Diferenciální tlakoměr má 3 vývody, které jsou GND (zem), Vin (napětí) a data. První dva vývody se pouze zasunují do redukční svorkovnice, obrázek 2.1. Poslední kabel, který je datový, se vyvede k napojení s kabelem, který je následně směřován přes odporový dělič do analogového pinu Arduina.



Obrázek 2.1 – DC redukce se svorkovnicí pro napájení senzoru

2.2 PŘIPOJENÍ AKČNÍHO ČLENU

Akční člen je v tomto případě 4 pinový ventilátor PWM, jakéhokoliv průměru. Vždy jsou na kabelu vedoucím do něho 4 piny (GND, Vin, PWM, Data), kde se pro tento účel využijí pouze 3 piny (GND, Vin, PWM). Každý kabel, který je připojen ke trati, je označený právě těmito zkratkami, tudíž uživateli stačí pouze každý kabel dle označení připojit (u každého ventilátoru je datasheet, který udává, na jaké pozici se který vývod nachází). Pro krátké měření pouze na 100 % výkonu ventilátoru stačí postupovat pomocí zdrojového modulu, ale pro měření, které bude probíhat delší dobu a uživatel bude například proměřovat hodnoty po 10 %, je nutné postup změnit a napájet ventilátor ze sítě. Pro pin PWM je postup totožný a pro GND a Vin stačí pouze zapojit do zdroje pro 12 V.

3 SOFTWARE

Nároky na software zde nejsou nijak veliké, ale jsou zde zapotřebí určité programy, které běžný uživatel ve svém PC nemá.

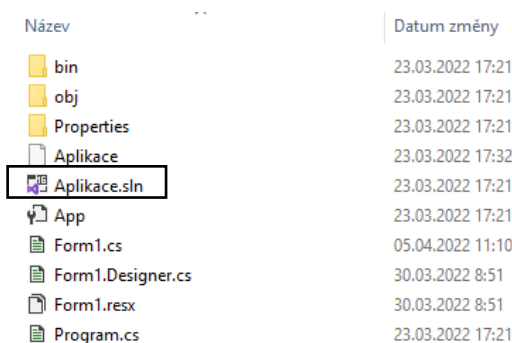
3.1 ARDUINO IDE

V prvé řadě je zapotřebí mít v počítači nainstalovaný program Arduino IDE, dostupný na internetových stránkách Arduina, kde je volně ke stažení. Následně je pouze důležité otevřít program pojmenovaný „Program Arduino“ a nahrát jej do mikropočítače Arduino UNO (pouze pokud by došlo k chybě a program nebyl v základní verzi nahrán).

Ovšem pokud je program již v mikropočítači nahráný, tak jej stačí připojit ke zdroji napájení 5 V (tzv. přes PC USB).

3.2 VISUAL STUDIO

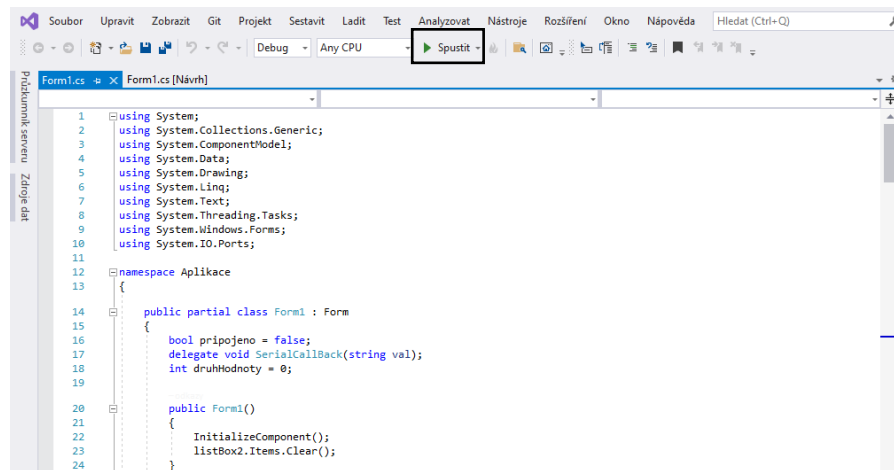
Program Visual Studio zde uživatel používá pouze jako rozhraní pro ovládání pomocí předem naprogramované aplikace. Uživatel jednoduše otevře soubor pojmenovaný Aplikace.sln a spustí jej, obrázek 3.1.



Název	Datum změny
bin	23.03.2022 17:21
obj	23.03.2022 17:21
Properties	23.03.2022 17:21
Aplikace	23.03.2022 17:32
Aplikace.sln	23.03.2022 17:21
App	23.03.2022 17:21
Form1.cs	05.04.2022 11:10
Form1.Designer.cs	30.03.2022 8:51
Form1.resx	30.03.2022 8:51
Program.cs	23.03.2022 17:21

Obrázek 3.1 – Otevření souboru Aplikace.sln

Následně pouze stačí aplikaci jednoduše spustit. Stačí pouze stisknout tlačítko Spustit, obrázek 3.2, a vyčkat na spuštění a načtení aplikace.

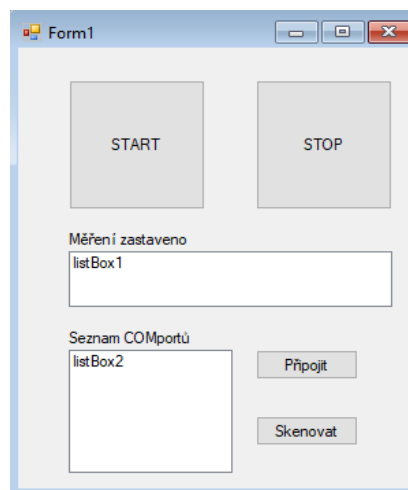


Obrázek 3.2 – Spuštění a načtení aplikace tlačítkem Spustit

4 OŽIVENÍ

Po spuštění aplikace je připraveno oživení trati, které začíná tlačítkem Skenovat, díky kterému se do seznamu COM portů zobrazí dostupné porty pro komunikaci (po připojení Arduina například COM4). Abychom věděli, ke kterému COM portu se připojit, tak se musí otevřít správce zařízení a zkontrolovat porty, které jsou přístupné (zpravidla COM4, COM8 apod.). Po následném vybrání COM portu je nutné stisknout tlačítko připojit a následně stisknout tlačítko START pro spuštění akčního členu a celkového měření.

Pro ukončení měření musí uživatel stisknout tlačítko STOP a poté lze pracovat s naměřenými daty, které se vypisují do listBoxu1, obrázek 4.1.



Obrázek 4.1 – Uživatelské rozhraní

4.1 REGULACE AKČNÍHO ČLENU

K regulaci výkonu ventilátoru je zde využít externí potenciometr zabudovaný v krycí krabici. Regulovat lze jakkoliv od 0 do 100 %. V sestavě se nachází potenciometr, který má velikost 5 k Ω a poskytuje velmi přesnou regulaci za pomoci PWM signálu. Pro regulaci jednoduše zavedeme kabel z pinu A2 do pinu ventilátoru pro PWM a pomocí otáčení hřídele lze regulovat soustavu.

5 NAMĚŘENÁ DATA

S naměřenými daty následně uživatel může libovolně pracovat, jelikož se data načítají do listBoxu1 a lze je kamkoliv přesunout (například statická charakteristika po určitých stupních měření). Nejlepší je data nakopírovat do tabulkového procesoru Excel a tam je následně zpracovávat.

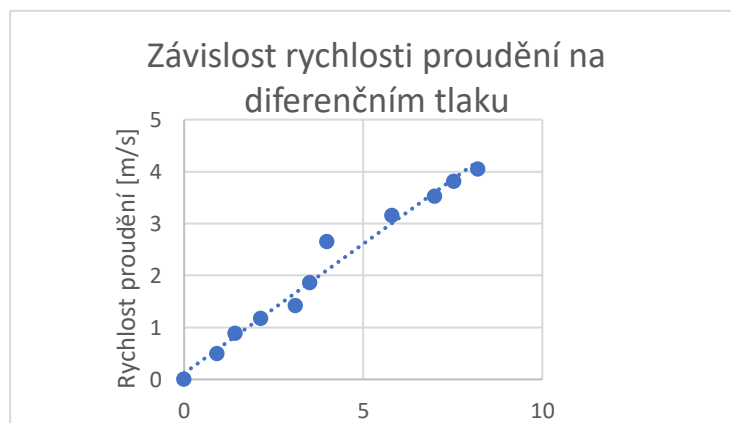
První hodnota, která je v listBoxu1 zobrazena, je rychlost proudění v závislosti na diferenci tlaku (lze zpracovat statickou charakteristiku) a druhá hodnota je průtočný objem, který je právě důležitý pro srovnání dat s datasheetem a určení správné funkčnosti akčního členu.

6 UKÁZKOVÝ PŘÍKLAD

Ukázkový příklad bude probíhat například na ventilátoru nejmenované značky o průměru 80 mm, který má maximální RPM 2000.

6.1 POSTUP MĚŘENÍ NA MAXIMÁLNÍ VÝKON

V první řadě se připevní ventilátor k přírubě trati. Následně se vše zapojí, viz kapitola 2. Poté se spustí program v Arduino IDE v kapitole 3.1 a poté zapne aplikace, viz kapitola 3.2. Následná data, která uživatel získá, mohou porovnat s datasheetem nebo je například zpracovat do grafu, obrázek 6.1.



Obrázek 6.1 – Vyobrazení hodnot do grafu (osa x je tlak, Pa, osa y rychlost, m/s)

6.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

V každém datasheetu těchto součástek se udává průtočný objem akčního členu, který u nejmenovaného ventilátoru činí 52,7 m³/h. Z naměřených dat (rychlost proudění) je patrné, že v trubici je tlaková ztráta od 5 % do 10 %, což odpovídá i naměřenému výsledku 48,4 m³/h.

7 ZÁVĚR

Cílem této uživatelské příručky bylo seznámit běžného uživatele s chodem a ovládním trati, aby jej mohl kdykoliv bez obtíží použít. Tuto uživatelskou příručku jsem otestoval na nejmenovaném uživateli, který se v této oblasti neorientuje. Uživateli se měření dle příručky povedlo a zpracovaná data odpovídala skutečnosti.

Tudíž považuji tuto uživatelskou příručku za velmi přínosnou pro každého uživatele, který bude s touto tratí v budoucnu pracovat.

Příloha k bakalářské práci

Modulární pneumatická trať

Vladimír Flandera

TECHNICKÝ POPIS

Modulární pneumatická trať

OBSAH

	Úvod	3
	Seznam obrázků	4
1	Vstupní část potrubí	5
2	Konfuzor	6
3	Difuzor	7
4	Hrdlo potrubí	8
5	Výstupní část potrubí	9
6	Vnější příruba pro akční člen	10
7	Závěr	11

ÚVOD

Tato příloha k bakalářské práci má za cíl názorně ukázat parametry Modulární pneumatické trati na technických výkresech. Jedná se zde o každou část trati, která je odborně okótována. Také je zde u všech částí popis, který vždy seznámí čtenáře s částí trati.

V tomto případě se bude jednat o základní verzi, tudíž pro akční členy (ventilátory, dmyhadla) o průměru 80 mm.

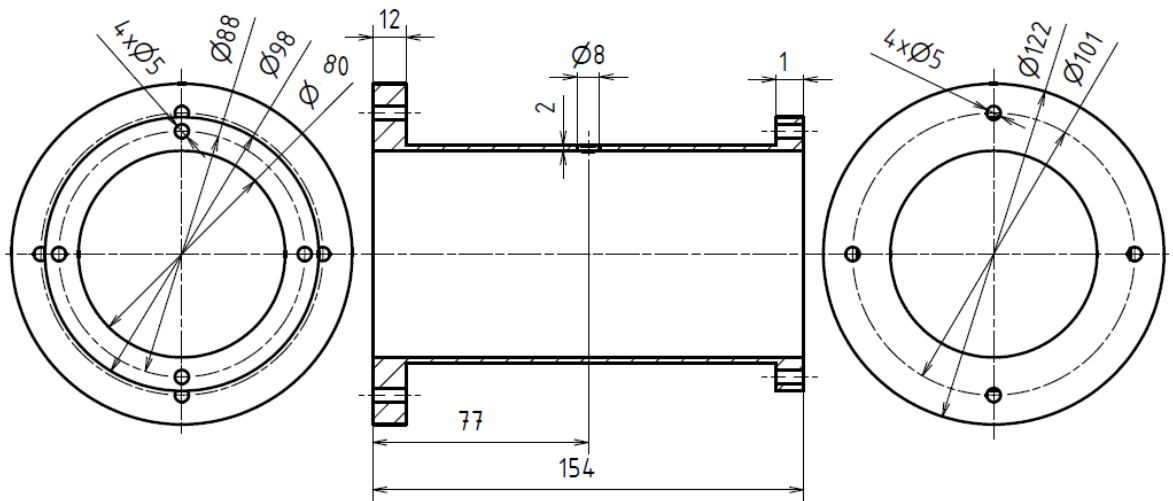
Veškeré výkresy jsou v měřítku 1:2.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 - Výkres vstupní části potrubí	5
Obrázek 2.1 – Výkres konfuzoru	6
Obrázek 3.1 – Výkres difuzoru	7
Obrázek 4.1 – Výkres hrdla potrubí	8
Obrázek 5.1 – Výkres výstupní části potrubí	9
Obrázek 6.1 – Výkres příruby pro akční člen	10

1 VSTUPNÍ ČÁST POTRUBÍ

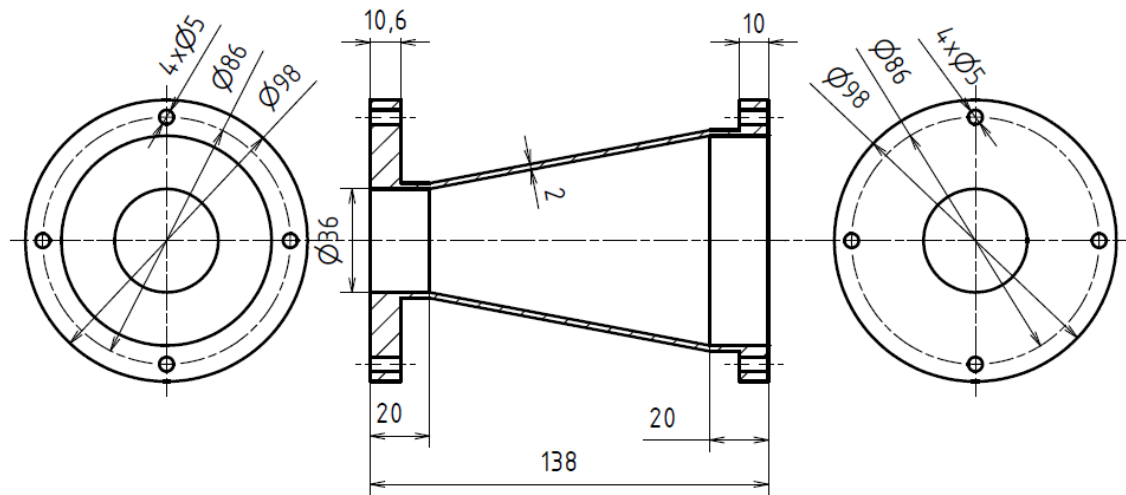
Tato část potrubí, obrázek 1.1, se zde využívá k připevnění vnější příruby pro akční člen a také pro snímání vyššího tlaku otvorem, který má v průměru 5 mm. Přičemž otvor pro snímání tlaku je zde prioritní.



Obrázek 1.1 - Výkres vstupní části potrubí

2 KONFUZOR

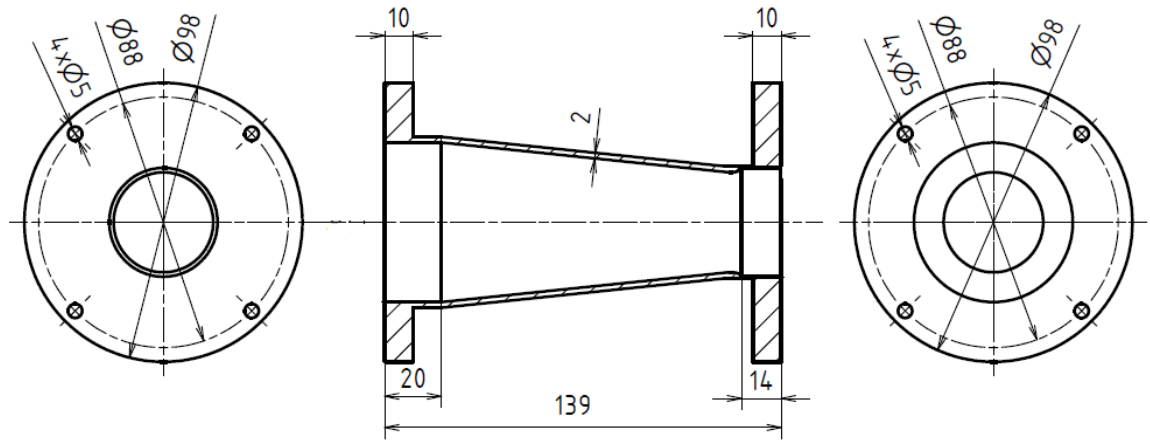
V tomto případě se jedná o část zúžení, obrázek 2.1, která je velmi důležitá z pohledu úhlu klesání součástky.



Obrázek 2.1 – Výkres konfuzoru

3 DIFUZOR

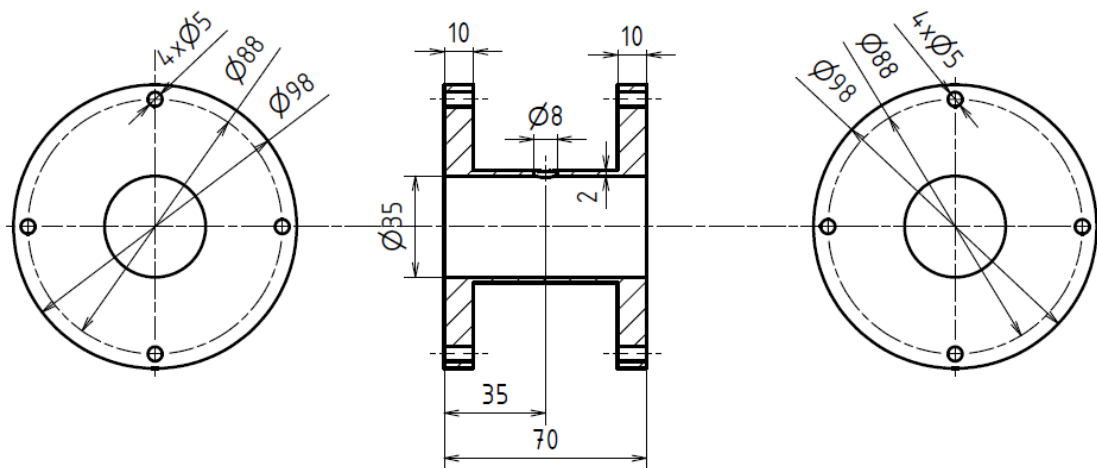
Zde se jedná o část, která má opačný účel od konfuzoru, tedy rozpínání do výstupního průměru 80 mm, obrázek 3.1.



Obrázek 3.1 – Výkres difuzoru

4 HRDLO POTRUBÍ

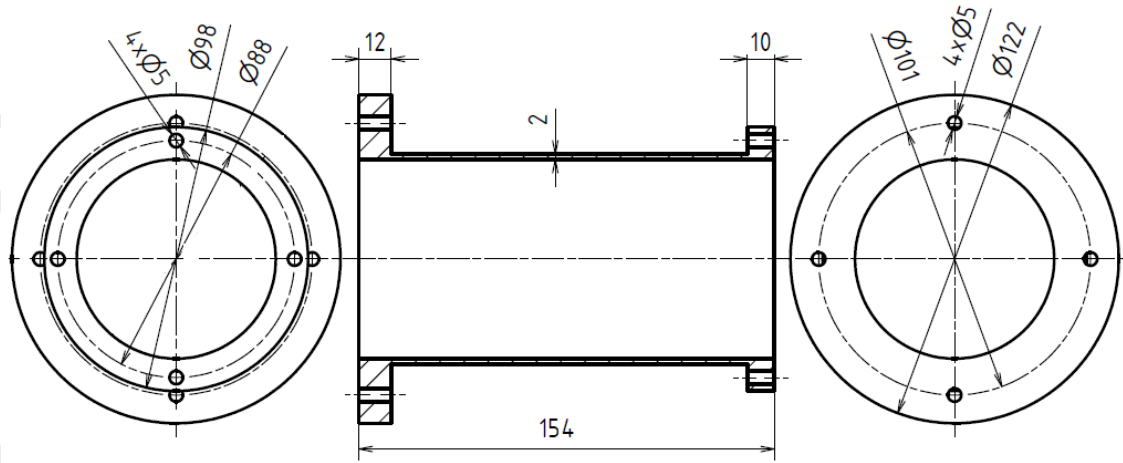
V tomto případě se hrdlo, obrázek 4.1, využívá k odběru nižšího tlaku pro výpočet tlakové difference. Opět se tlak snímá otvorem, který má průměr 8 mm.



Obrázek 4.1 – Výkres hrdla potrubí

5 VÝSTUPNÍ ČÁST POTRUBÍ

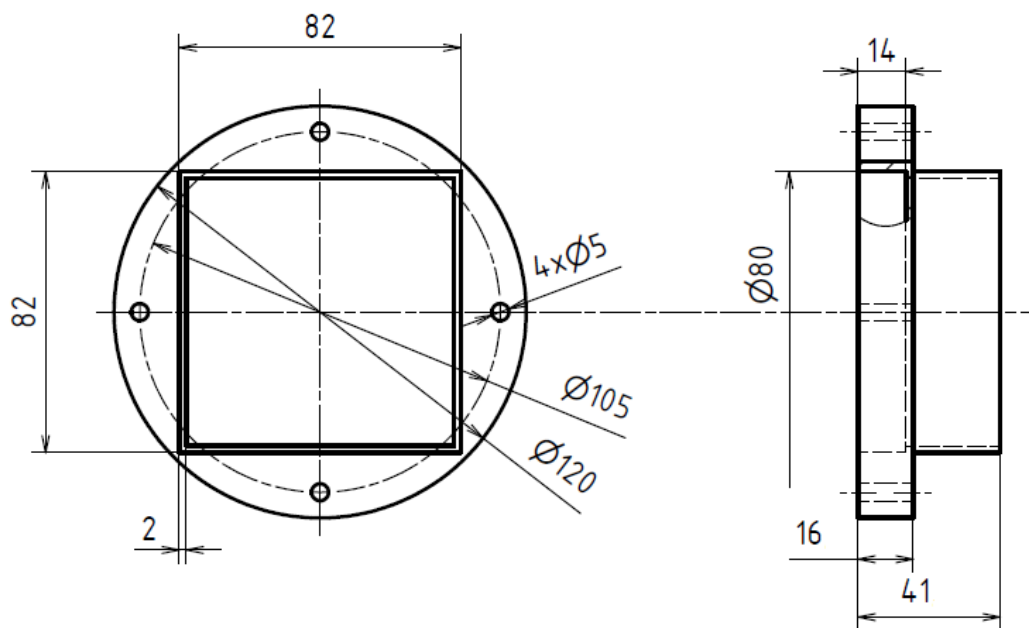
Zde se jedná o jednu z poměrně významných částí, jelikož je využita pouze k výstupu plynu, ale zároveň také k případně kalibraci akčního členu. Zde už není otvor pro snímání tlaku, obrázek 5.1.



Obrázek 5.1 – Výkres výstupní části potrubí

6 VNĚJŠÍ PŘÍRUBA PRO AKČNÍ ČLEN

Zde se jedná o část, která je určena pro akční člen. Akční člen se pouze zasune do předem připraveného čtvercového tvaru, obrázek 6.1, a zaizoluje pryží.



Obrázek 6.1 – Výkres příruby pro akční člen

7 ZÁVĚR

Tato příloha bakalářské práce měla za cíl přiblížit čtenáři technické parametry trati pro jejich případnou modifikaci u jiných akčních členů.

Jednalo se o každý rozměr, i když modifikace rozměrů by probíhala pouze na pár primárních částech (průměry, délky).

Doufám, že práce se čtenáři líbila a přiblížila mu princip trati trochu z jiného, techničtějšího pohledu a pomohla s případnou modifikací.