ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

Katedra biomedicínské techniky

Přístroj pro měření distribuce rychlosti proudění plynu

Device for distribution of gas flow velocity measurement

Bakalářská práce

Studijní program:	Biomedicínská a klinická technika
Studijní obor:	Biomedicínský technik

Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Václav Ort
Autor bakalářské práce:	Filip Müller

Kladno 2019

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství

Katedra biomedicínské techniky

Akademický rok: 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Student:	**Filip Müller**
Obor:	Biomedicínský technik
Téma:	**Přístroj pro měření distribuce rychlosti proudění plynu**
Téma anglicky:	Device for distribution of gas flow velocity measurement

Zásady pro vypracování:

Navrhněte a realizujte prototyp malé sondy pro měření rychlosti proudění plynu. Dále realizujte prototyp měřicího přístroje využívajícího sítě těchto sond pro měření rozložení rychlosti proudění plynu při ergonomických měřeních osobních ochranných pomůcek, např. ochranných přileb do zamořeného prostředí. Určete přesnost měření realizovaného přístroje a sepište návod k jeho použití.

Seznam odborné literatury:

[1] Vobecký, J., Záhlava, V, Elektronika, součástky a obvody, principy a příklady, ed. 2, Grada Publishing s.r.o., 2001, ISBN 80-7169-884-9
[2] Husák, M., Senzorové systémy, ed. 1, ČVUT v Praze, 1993

Zadání platné do:	20.09.2019
Vedoucí:	Ing. Václav Ort
Konzultant:	Ing. Roman Matějka

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 19.02.2018

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Přístroj pro měření distribuce rychlosti proudění plynu“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k bakalářské práci.

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

V Kladně 14. 5. 2019 …..……..……...

Filip Müller

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Václavu Ortovi za cenné rady a odbornou pomoc při řešení vzniklých problémů. Dále bych chtěl poděkovat škole za poskytnutí prostor, potřebných měřících přístrojů, pomůcek a v neposlední řadě bych rád poděkoval grantu SGS16/258/OHK4/3T/17 za finanční podporu.

ABSTRAKT

Přístroj pro měření distribuce rychlosti proudění plynu.

Bakalářská práce se zaobírá návrhem prototypu zařízení schopného měřit rychlost proudění plynů v malých prostorech. Samotný senzor je založen na principu anemometru s žhaveným vláknem. Přístroj se skládá z boxu, ve kterém je umístěna elektronika a ven z něj vychází šest sond určených k umístění do měřících míst a datový výstup přístroje, na který se připojuje komunikační rozhraní arduino, přes které se přenáší požadovaná informace do PC

Klíčová slova

rychlost proudění plynu, anemometr, žhavené vlákno

ABSTRACT

Device for distribution of gas flow velocity measurement

The aim of the bachelor thesis is to design a prototype device capable of measuring the velocity of gas flow in small spaces. The sensor itself is based on the principle of anemometer with filament. The device consists of a box in which the electronics are placed. There are six probes coming out from the box and they are placed in the measuring points. The prototype communicates with the computer using the Arduino UNO communication interface.

Keywords

gas flow velocity, anemometer, hot-wire

Obsah

Seznam symbolů a zkratek **7**

Seznam obrázků **8**

1 Úvod **9**

1.1 Přehled současného stavu 10

1.2 Anemometrické metody 10

1.2.1 Mechanické anemometry 11

1.2.2 Tlakové anemometry 13

1.2.3 Tepelné anemometry 14

1.2.4 Bezkontaktní anemometry 15

1.3 Cíle práce 17

2 Realizace prototypu přístroje **18**

2.1 Návrh prototypu 18

2.1.1 Výběr měřicí metody 18

2.2 Schéma elektrického obvodu 19

2.2.1 Popis funkce obvodu 19

2.3 Testování navrženého obvodu na nepájivém kontaktním poli 22

2.4 Návrh a výroba desky plošných spojů 26

2.5 Konstrukce přístroje 27

2.6 Testování přístroje 29

2.6.1 Kalibrace 30

2.6.2 Stabilita měření přístroje 34

2.6.3 Určení třídy přesnosti přístroje 36

2.7 Software 38

3 Diskuse **40**

4 Závěr **42**

5 Seznam použité literatury **43**

6 Přílohy **44**

Seznam symbolů a zkratek

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
v_r	m/s	Rychlost otáčení konce misky
N	rpm	Počet otáček za minutu
L	m	Vzdálenost od středu vertikální hřídele po konec misky
v_p	m/s	Rychlost proudění média
P	Pa	Tlak
G	m/s^2	Gravitační zrychlení
Q	dm^3/s	Průtok
S	m^2	Průtočná plocha
R	Ω	Elektrický odpor
U	V	Elektrické napětí
I	A	Elektrický proud

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
CCA	Constant current anemometer
CVA	Constant voltage anemometer
CTA	Constant temperature anemometer
LDA	Laser doppler anemometry
PIV	Particle imaging velocimetry
DPS	Deska plošných spojů
CNC	Computeraized numerical control
OZ	Operační zesilovač
DPS	Deska plošných spojů

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 Lopatkový anemometr se stabilizátorem. Převzato z [2] 12
Obrázek 1.2 Schéma Prandtovy trubice. Převzato z [3] 13
Obrázek 2.1 Část elektrického schématu zapojení přístroje 19
Obrázek 2.2 Část elektrického schématu zapojení přístroje 20
Obrázek 2.3 Realizace měřicí sondy (detail) 21
Obrázek 2.4 Testovací sestava 22
Obrázek 2.5 Navržené DPS s rozmístěním součástek a vodivých cest 26
Obrázek 2.6 Realizace DPS 27
Obrázek 2.7 Pohled na přístroj z přední strany 28
Obrázek 2.8 Pohled na uspořádání přístrojové krabičce 29
Obrázek 2.9 Kalibrační sestava 31
Obrázek 2.10 Blokové schéma softwaru pro přístroj 38
Obrázek 6.1 Elektrické schéma přístroje ve větší velikosti z kapitoly 2.2. 44
Obrázek 6.2 Navržené DPS s rozmístěním součástek a vodivých cest ve větší velikosti z kapitoly 2.4. 45

1 Úvod

V dnešní době je měření rychlosti proudění vzduchu poměrně banální záležitostí. Metody jsou dobře prozkoumané a popsané. Toto platí pro prostorné oblasti s dobrým přístupem. Pokud se zaměříme na měření ergonomických parametrů ochranných pomůcek, jako je třeba ochranná helma do zamořeného prostředí, dostáváme se k problému, kdy potřebujeme měřit rychlost proudění vzduchu ve stísněných prostorách. V takovéto situaci, se kvůli potřebě malých rozměrů měřící sondy, musíme vyhnout většině klasických metod, jako je například použití miskového anemometru. Z tohoto důvodu je nutné realizovat prototyp přístroje, který by dokázal měřit proudění plynu i v těchto stísněných podmínkách a to i na více místech zároveň.

Práce je rozdělena na dvě části, kde první část se zaobírá obecnou teorií ohledně měření proudění plynu a smyslem této části bakalářské práce je seznámit čtenáře se základními i pokročilejšími metodami měření proudění plynů. Druhá část bakalářské práce popisuje výběr, odůvodnění výběru měřící metody a dále popisuje krok po kroku proces výroby jednotlivých částí prototypu přístroje pro měření rychlosti proudění plynu až po sestavení kompletního přístroje včetně softwaru pro navržený prototyp. A jeho ověření.

1.1 Přehled současného stavu

Proudění média je vlastně pohyb částic média ve směru tlakového gradientu, tedy z místa vyššího tlaku (místo s vyšší tlakovou potenciální energií) do místa s tlakem nižším (místo s nižší tlakovou potenciální energií). [1]

V medicínské praxi se nejčastěji uplatňuje metoda měření proudění vzduchu na základě rozdílných hodnot tlaku před a za škrtícím prvkem, následně se ze vzniklé tlakové diference dopočítává rychlost proudění média. Tato metoda je hojně využívána například u zdravotnické ventilační techniky.

Existuje značné množství dalších metod a postupů, jak lze měřit rychlost proudění vzduchu. Konkrétně se jedná například o lopatkové anemometry, ultrazvukové průtokoměry a v neposlední řadě průtokoměry s elektromagnetickým (indukčním) snímáním průtoku. [2] O těchto metodách, bude uvedeno více informací v kapitolách níže.

1.2 Anemometrické metody

Anemometr je zařízení, které dokáže měřit rychlost proudění vzduchu a lepší anemometry dovedou měřit i směr tohoto proudění. Název anemometr vznikl odvozením z řeckého slova anemos (vítr) tedy v doslovném překladu větroměr. [2]

Anemometrické přístroje mají velkou škálu využití, avšak nejčastěji se s nimi můžeme setkat v meteorologii, kdy nám dávají informace o rychlosti a směru proudění vzduchu nad krajinou. Déle se uplatňují v letectví, kde se na základě rychlosti obtékání vzduchu kolem letadla určuje rychlost samotného letadla. Anemometry také můžeme uplatnit v automobilovém průmyslu pro návrh karoserie, která by měla mít co nejmenší odporový koeficient a v neposlední řadě anemometry nacházíme na větrných elektrárnách, kde nastavujeme rotor elektrárny tak, abychom co nejefektivněji využili proudění vzduchu.

Podle fyzikálního principu určování rychlosti měřeného média můžeme anemometry rozdělit do těchto kategorií [2]:

- Mechanické anemometry
- Tlakové anemometry
- Tepelné anemometry
- Speciální anemometry

1.2.1 Mechanické anemometry

U mechanických anemometrů se kinetická energie proudícího média přenáší na konstrukci, která díky této přenesené energii rotuje, či je jinak vychylována z ustálené polohy. [2]

Mechanické anemometry se dále dají dělit na:

- Miskové anemometry
- Lopatkové anemometry
- Anemometry s výkyvnou deskou

Miskové anemometry

Princip tohoto anemometru je založen na proudění média, které naráží do konvexní i konkávní plochy misek stejnou kinetickou energií a díky rozdílným odporovým vlastnostem těchto ploch dochází k roztočení anemometru ve směru orientace konvexních ploch misek. Miskové anemometry jsou schopny určovat pouze rychlost větru v rovině uspořádaných misek, pro zjištění směru je nutná instalace například výkyvné korouhve.

Otáčky vertikální hřídele jsou přímo úměrné rychlosti proudění média. Tuto závislost nám znázorňuje vztah (1.1).[2]

$$v_r = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot L \tag{1.1}$$

Kde v_r je rychlost otáčení nejvzdálenějšího konce misky, n je počet otáček za minutu a L je vzdálenost od středu vertikální hřídele po nejvzdálenější konec misky.

Pro třímiskový anemometr platí že:

$$v_r = \frac{1}{3} \cdot v_p \tag{1.2}$$

Kde v_p je rychlost proudění média, v_r je rychlost otáčení nejvzdálenějšího konce misky.

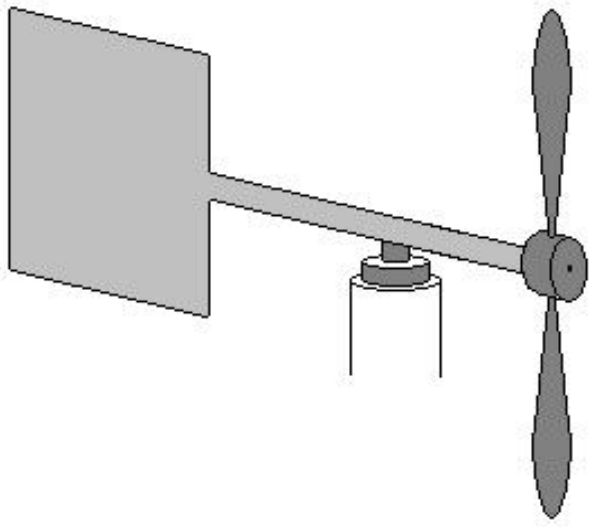
A po dosazení vztahu (1.2) do vztahu (1.1) dostáváme vztah pro přímí přepočet otáčení hřídele na rychlost proudění média.

$$v_p = 6 \cdot \pi \cdot n \cdot L \tag{1.3}$$

Kde v_p je rychlost proudění média, n je počet otáček za minutu a L je vzdálenost od středu vertikální hřídele po nejvzdálenější konec misky.

Lopatkové anemometry

Jde o vrtulový anemometr. Jeho konstrukce je opět velmi jednoduchá, skládá se z vrtule umístěné kolmo na směr proudění média, které způsobuje roztočení vrtule, a následně se přepočítávají otáčky na rychlost proudění. Oproti miskovému anemometru je zde nutná podmínka, a sice že vrtule musí být umístěna kolmo na vektor proudění média. To je zabezpečeno přidáním směrového stabilizátoru za vrtuli viz obr. 1.1. [2]



Obrázek 1.1 Lopatkový anemometr se stabilizátorem. Převzato z [2]

Anemometry s výkyvnou deskou

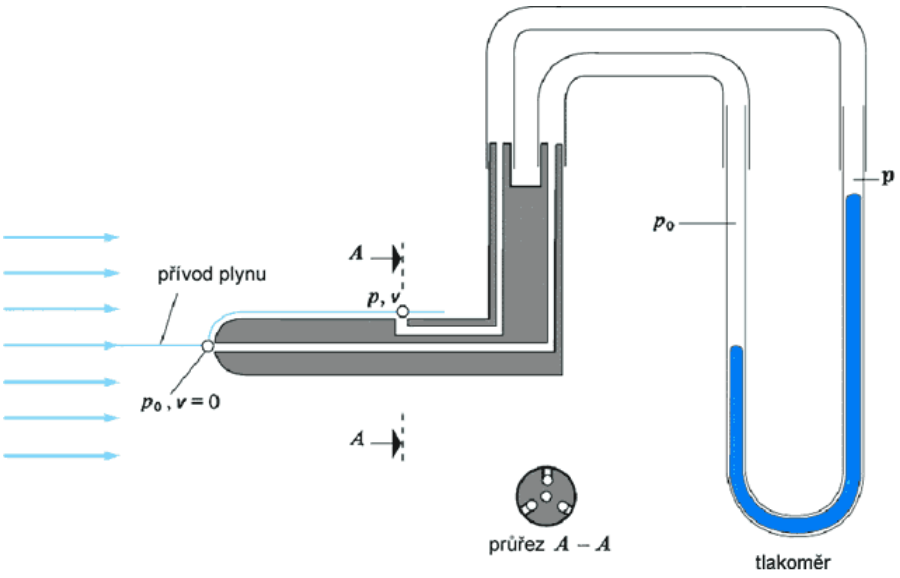
Pravděpodobně je tento typ anemometru úplně prvním designem. Je realizován lehkým kyvadélkem, které je vychylováno větrem. Vzdálenost vychýlení kyvadélka od neutrální polohy určuje rychlost proudění větru.[1]

1.2.2 Tlakové anemometry

Tlakové anemometry jsou založeny na principu měření rozdílu tlaků, které jsou způsobeny proudícím médiem a jejich velikost je závislá na rychlosti proudícího média. Většina anemometrů tohoto typu vychází z Prandltovy trubice. [1]

Prandtlova trubice

Nejčastěji se s anemometrem tohoto typu setkáme u letadel, kde slouží k měření rychlosti prouděn vzduchu okolo letadla a tím pádem i letadla samotného. Principiálně jde o trubici zahnutou do tvaru písmene U, kde jeden z konců je ohnutý přímo proti směru proudění média a druhý je kolmý k tomuto směru proudění viz obr. 1.2. [3]



Obrázek 1.2 Schéma Prandtovy trubice. Převzato z [3]

Trubice je v místě ohybu do tvaru písmene U napuštěna kapalinou a pohybující se médium přeměňuje svoji kinetickou energii v trubici, která je nasměrována přímo proti proudění, na dynamický tlak. V druhé z trubic je tento tlak vyrovnáván tlakem hydrostatickým. Díky rozdílu těchto tlaků lze vypočítat rychlost proudícího média. Tato závislost je popsána v rovnici (1.4) [3]

$$v_p = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p \cdot g \cdot (\rho_{kapalina} - \rho_{vzduchu})}{\rho_{vzduchu}}} \tag{1.4}$$

Kde v_p je rychlost proudění plynu, Δp, je rozdíl tlaků v trubicích, g je gravitační zrychlení, ρ_i jsou hustoty různých materiálů

Velmi používanou jednotkou pro určení vlastností pohybujícího se média je průtok, tato jednotka je popsána následujícím vztahem:

$$Q = v \cdot S \tag{1.5}$$

Kde *Q* je průtok, *v* je rychlost proudění média a *S* je plocha, kterou médium prochází

1.2.3 **Tepelné anemometry**

Tento typ anemometru je založen na principu ochlazování žhaveného prvku v obvodu proudícím plynem. Nejčastěji se používá wolframový drátek. Důvody použití wolframu jsou podobné jako u žárovek, tedy že wolfram lze zahřívat na poměrně vysoké teploty, aniž by ztratil své mechanické vlastnosti a wolframové vlákno za běžných teplot je zcela inertní vůči působení vody a atmosférických plynů.

U tepelných anemometrů je velmi důležitý kontrolní obvod, který udržuje jednu z veličin na konstantní hodnotě. Konkrétně se jedná o 3 způsoby kontroly žhaveného prvku. Způsob s konstantním proudem (CCA), napětím (CVA) a teplotou (CTA). [2]

Vlivem proudění média kolem žhaveného drátu dochází k změně jeho elektrických vlastností, konkrétně k změně odporu drátu. Protože u vodičů 1. třídy s klesající teplotou klesá i elektrický odpor, můžeme získat vztah mezi rychlostí proudícího média, které ochlazuje žhavený drát a elektrickým odporem drátu. Tyto změny odporu se dají počítat rovnou z Ohmova zákona, viz rovnice (1.6). [2]

$$R = \frac{U}{I} \tag{1.6}$$

Kde R je elektrický odpor žhaveného drátu, U je napětí a I je proud procházející žhaveným drátem.

Pro určení vlastností žhaveného drátu se využívá rovnice závislosti odporu na teplotě drátu, která je dána vztahem (1.7):

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \tag{1.7}$$

Kde R je výsledný elektrický odpor po změně teploty, R_0 je elektrický odpor vodiče před změnou teploty, ΔT je rozdíl teplot a α je teplotní součinitel pro daný kov.

1.2.4 **Bezkontaktní anemometry**

U bezkontaktních metod se snažíme nevkládat měřící zařízení do cesty proudícího média, jak tomu je u všech předchozích metod, protože tím ovlivňujeme samotné proudění a zkreslujeme tak naměřené výsledky. Takto zkreslené výsledky se často upravují a kompenzují takzvanými koeficienty přepočtu, které jsou závislé na mnoha faktorech, jako je například tvar a velikost měřící sondy. Bezkontaktní metody měření proudění vzduchu využívají především laserové technologie. [2]

- LDA (Laser Doppler Anemometry)
- PIV (Particle Image Velocimetry)

Laserová dopplerovská anemometrie (LDA)

Tato metoda jak již její název naznačuje, využívá k měření rychlosti proudění média Dopplerův jev. Základem je laserový paprsek vysílající elektromagnetický svazek o známé frekvenci, který se odráží od částic v proudícím médiu. Při tomto odrazu od pohybujících se částic dochází ke změně frekvence laserového paprsku. Porovnáním frekvence odraženého paprsku s frekvencí vysílaného paprsku lze vypočítat rychlost pohybujících se částic. Částice, které měříme, se uměle dodávají do média. Je zřejmé, že částice musí mít nízkou pádovou rychlost a díky tomu mohou sledovat trajektorii proudícího média. [2]

Integrální laserová anemometrie (PIV)

I metoda PIV využívá laser, ovšem jen k osvětlení. Laserový paprsek je opticky roztažen do plochy, kterou následně snímá vysokorychlostní kamera umístěná kolmo k osvětlené ploše. Následně software zpracovává umístění trasovacích částic na dvou po sobě jdoucích snímcích. Výstupem je dvourozměrný obraz, ve kterém jsou znázorněny vektory rychlosti proudění vzduchu. [2]

1.3 Cíle práce

Cílem práce je navrhnout a zkonstruovat přístroj, který by byl schopen měřit rozložení rychlosti proudění vzduchu při ergonomických měřeních osobních ochranných pomůcek. Skládající se z šesti sond, které jsou vhodné pro umístění do stísněných prostor. Dále navrhnout kalibrační sestavu a provést kalibraci jednotlivých sond. Zhotovit software pro tento přístroj, který by převáděl hodnoty naměřeného napětí z výstupu sond na rychlost proudění vzduchu v jejich okolí, provést ověření přístroje a sepsat návod k použití.

2 Realizace prototypu přístroje

V kapitolách níže je rozepsán postup výroby prototypu přístroje pro měření rychlosti proudění vzduchu.

2.1 Návrh prototypu

Návrh prototypu měřící sondy, byl rozložen do několika dílčích kroků. V prvním kroku byla vybrána anemometrická měřící metoda, tak aby plně vyhovovala požadavkům na měřící sondu, především tedy možnost vytvoření malých měřicích sond. Bližší popis měřících metod je uveden v kapitole 1.2. Po seznámení se s problematikou a úskalími vybrané metody byla přesunuta pozornost na návrh prototypu přístroje, kterému je věnována samostatná kapitola níže. Následně proběhlo testování navrženého elektrického schématu na nepájivém poli, poté došlo k návrhu desky plošných spojů a v posledních krocích proběhlo zkompletování prototypu přístroje, jeho otestování a vytvoření softwaru pro tento prototyp ve vývojovém prostředí Arduino IDE.

2.1.1 Výběr měřicí metody

Všechny z výše uvedených metod mají své plusy i určitá omezení a každá z měřících metod je vhodná k využití pro měření v jiné oblasti zájmu. Avšak pro měření rychlosti proudění vzduchu v ochranných pomůckách, jako je například ochranná přilba do zamořeného prostředí, je nutné zabezpečit malé rozměry přístrojové sondy a dostatečnou citlivost i při nárazových změnách rychlosti proudění vzduchu.

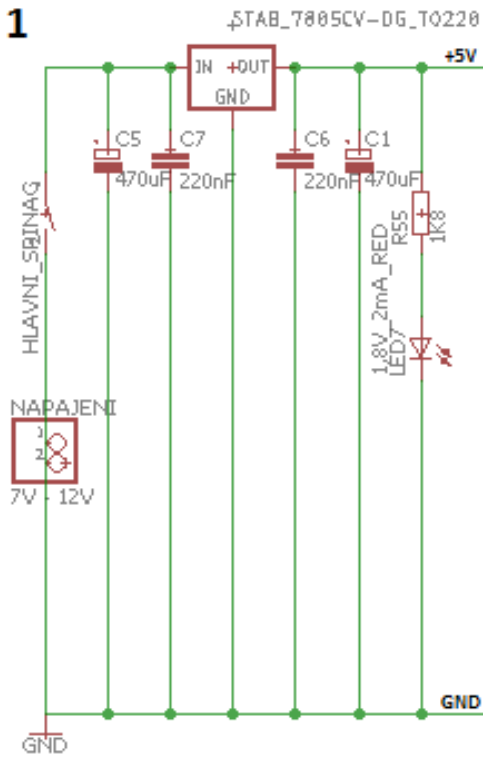
Po porovnání všech kladů a záporů bylo rozhodnuto, že nejlepší možnou variantou bude využít měřící metodu se žhaveným drátkem. Na rozdíl od tlakových a bezkontaktních metod, má tato metoda výhodu v tom, že je schopná přesného měření i při malých rozměrech měřící sondy. Dalšími výhodami této metody jsou absence jakýchkoliv pohyblivých částí a velmi malá setrvačnost měřicího systému. Z toho vyplývá i menší náročnost na údržbu a velmi dobrou citlivost při měření nárazových změn rychlosti proudění vzduchu.

2.2 Schéma elektrického obvodu

Tato část bakalářské práce se zaobírá návrhem elektrické struktury prototypu přístroje pro měření rychlost proudění vzduchu.

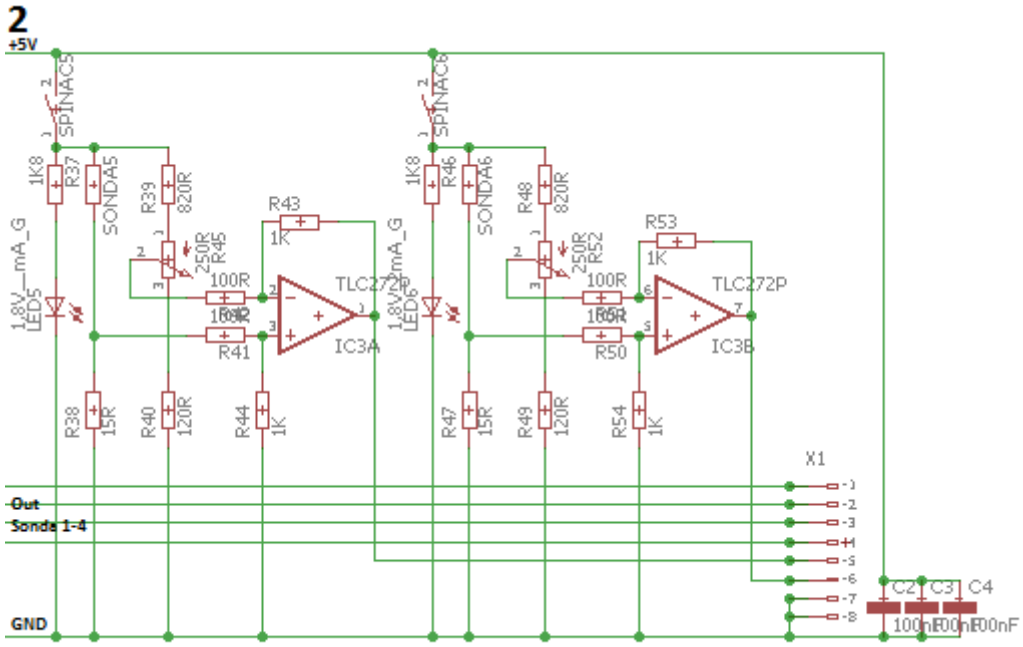
2.2.1 Popis funkce obvodu

Po provedení rešeršní studie bylo přikročeno k návrhu elektrické struktury prototypu přístroje pro měření rychlosti proudění vzduchu. Schéma desky tištěných spojů se skládá ze dvou funkčních bloků, jak je znázorněno na obrázku 2.1 a 2.2. Z důvodů zlepšení přehlednosti zapojení je na obrázku 2.1 a na obrázku 2.2 znázorněna jen část elektrického schématu. Kompletní obrázek ve větší velikosti je k dispozici na konci práce v přílohách (Příloha A) a v elektronické podobě na přiloženém CD (BP_obrázek_2.1).



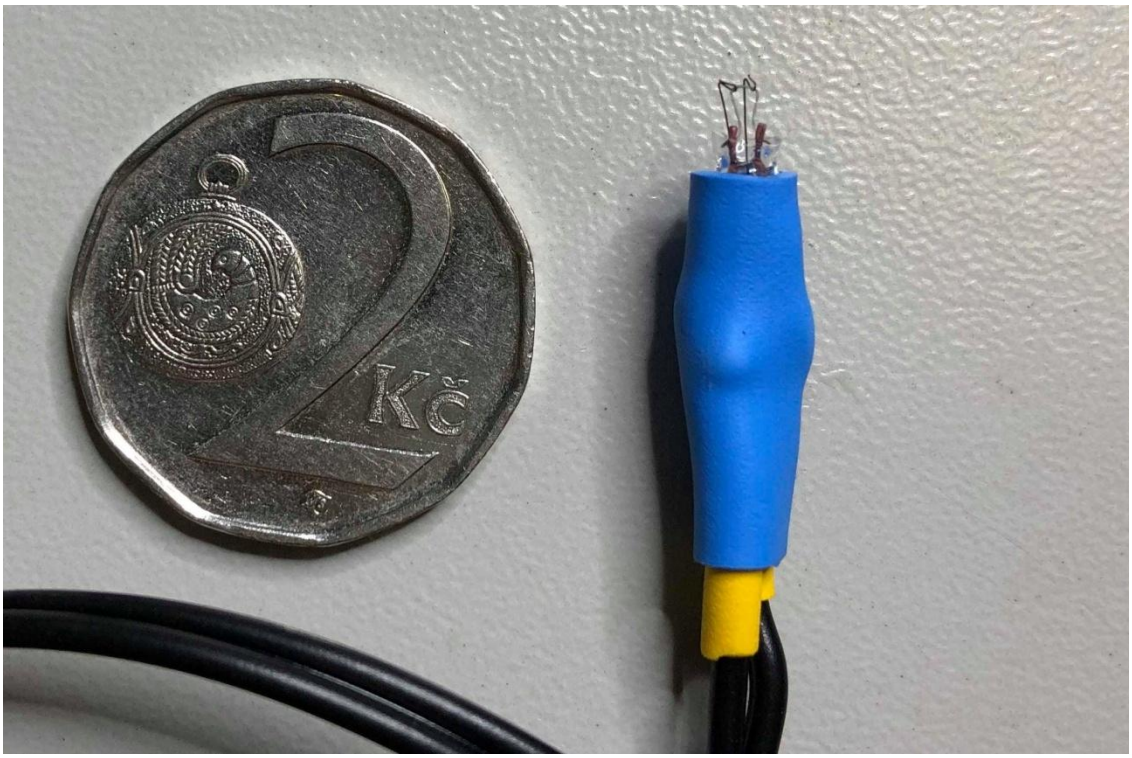
Obrázek 2.1 Část elektrického schématu zapojení přístroje

V prvním bloku schématu je možné vidět zapojení stabilizátoru pevného napětí STM 7805CV, který stabilizuje napájecí napětí v rozsahu od 7 do 12 V na úroveň 5 V, dále se v tomto bloku nachází několik blokovacích kondenzátorů zapojených okolo stabilizátoru, tak aby byl odfiltrován šum a rušení ve vedení a nedocházelo k rozkmitávání stabilizovaného napětí vlivem rychlých změn zatěžovacího proudu. Posledními prvky v tomto bloku jsou páčkový spínač, kterým se zapíná celý prototyp přístroje a červená indikační LED, která nás informuje, že je přístroj v provozu.



Obrázek 2.2 Část elektrického schématu zapojení přístroje

Druhá část schématu se skládá z šesti opakujících se zapojení, kde každé toto zapojení představuje obvod pro jednotlivou měřicí sondu. Každé z těchto zapojení se skládá z tří pevných rezistorů, potenciometru a samotného vlákna, fungujícího jako měřicí prvek (ve schématu označený jako SONDA). Potenciometr v zapojení slouží k možnosti vyvážení měřicího můstku. Dále se zde nachází spínač a zelená indikační LED, která informuje o provozu konkrétní sondy. Měřicím prvkem je malá žárovka, která byla zbavena ochranného skla, tak že v okolí vlákna žárovky může volně procházet vzduch, ochlazovat ji a tím měnit její elektrické vlastnosti. Detailní realizaci měřicího prvku je možné vidět na obrázku 2.3



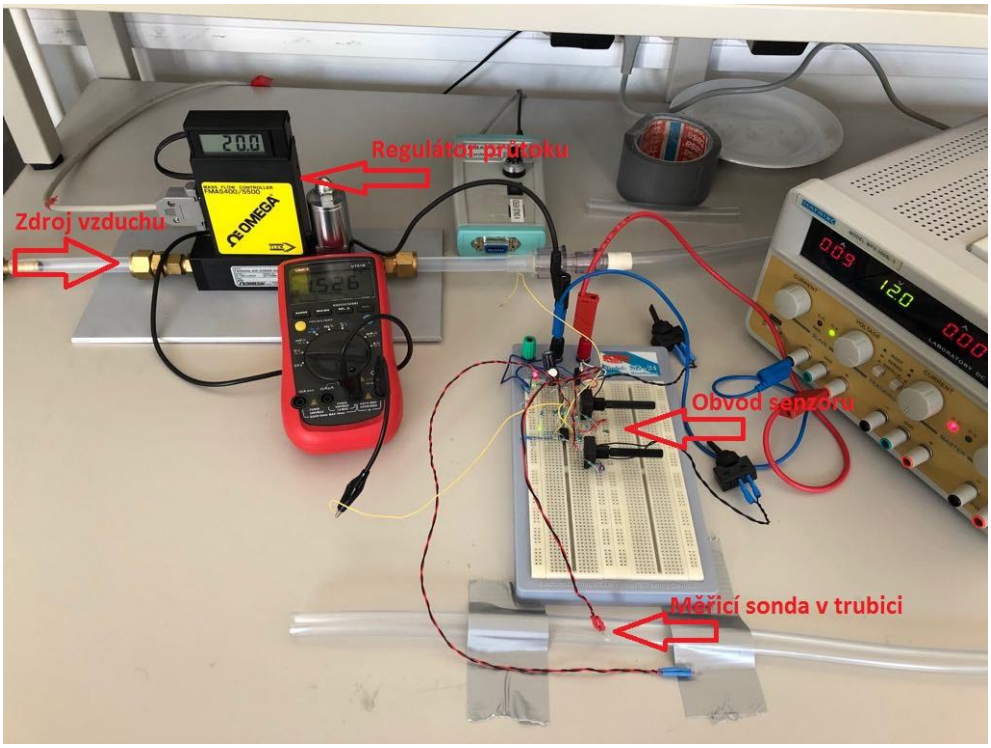
Obrázek 2.3 Realizace měřicí sondy (detail)

Následně se z měřicích bodů Wheatstoneova můstku snímá elektrické napětí. Nasnímané napětí je dále zesilováno pomocí operačního zesilovače TLC272CP, zapojeného v diferenčním zapojení. Operační zesilovač je napájen pomocí single supply režimu a v jednom pouzdře TLC272CP se nacházejí dva obvody, proto byla reálně využita jen tři pouzdra s operačními zesilovači, ke kterým je vždy připojen na napájecí a zemnící svorku jeden blokovací kondenzátor s kapacitou 100 *nF*. Zesílený signál z výstupů operačního zesilovačů byl přiveden na konektor wago 233-508, který zabezpečuje kvalitní spojení pro přenos signálu do vývojové desky arduino UNO, která zprostředkovávala převedení nasnímaných dat do PC.

2.3 Testování navrženého obvodu na nepájivém kontaktním poli

Před samotným zahájením výroby desky plošných spojů (DPS), bylo přikročeno k otestování navrženého elektrického schématu na nepájivém poli. Z důvodu repetitivnosti zapojení všech šesti sond proběhlo testování pouze se dvěma sondami a s jedním operačním zesilovačem. Testování tohoto necelého obvodu bylo dostatečné k ověření funkčnosti zapojení. K napájení byl použit laboratorní zdroj.

Pro samotné ověření funkčnosti zapojení bylo nutné vytvořit také testovací sestavu, viz Obrázek 2.4. Která se skládala z regulátoru průtoku OMEGA FMA5400/5500, plastové trubice o průměru 12 mm, v které byl z boku vytvořen drobný otvor pro umístění měřicí sondy. Jako zdroj proudění vzduchu posloužil centrální rozvod stlačeného vzduchu. Ze známého objemového průtoku vzduchu, odečteného na regulátoru průtoku a známém průřezu trubice, kterou vzduch proudil byla podle vzorce (1.5) dopočítána rychlost proudění vzduchu v trubici.

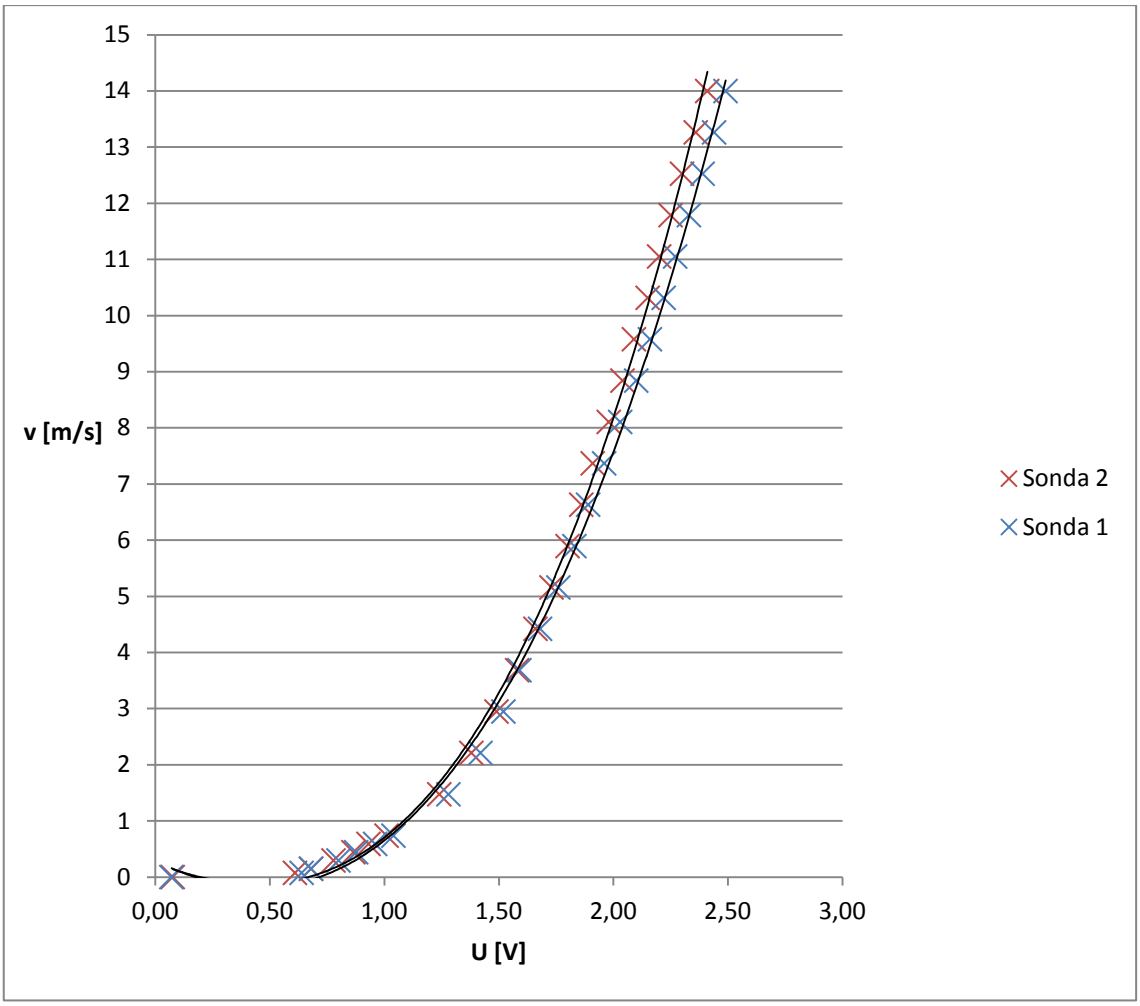


Obrázek 2.4 Testovací sestava

Po vytvoření testovací sestavy byl testovaný obvod připojen k laboratornímu zdroji a hodnota napětí na něm nastavena na 12V. Toto napětí splňuje podmínky pro napájecí napětí vývojové desky arduino UNO a zároveň podmínky napájení navrženého prototypu přístroje. Dále byla sonda zasunuta otvorem v boku trubice do jejího středu, na regulátoru průtoku se začal postupně zvyšovat průtok vzduchu trubicí s krokem 5 *L/min* a na multimetru připojeného k výstupu operačního zesilovače byly snímány hodnoty napětí. Toto měření se opakovalo i pro druhou sondu. Hodnoty průtoku, následně vypočtené rychlosti proudění vzduchu a hodnoty naměřeného napětí byly zaneseny do tabulky 2.1. a vyneseny do grafu 2.1.

Tabulka 2.1 Zaznamenané hodnoty při testování sond na nepájivém kontaktním poli

Průtok nastavený na regulátoru průtoku Q(L/min)	Vypočtená rychlost proudění vzduchu v trubici v(m/s)	Napětí naměření na výstupu $U_{SONDA\ 1}$(V)	Napětí naměřené na výstupu $U_{SONDA\ 2}$(V)
0	0,00	0,07	0,08
0,5	0,07	0,64	0,61
1	0,15	0,68	0,68
2	0,30	0,80	0,78
3	0,44	0,88	0,87
4	0,59	0,96	0,93
5	0,74	1,04	1,01
10	1,47	1,28	1,24
15	2,21	1,42	1,38
20	2,95	1,52	1,49
25	3,68	1,59	1,58
30	4,42	1,68	1,66
35	5,16	1,76	1,73
40	5,89	1,83	1,80
45	6,63	1,89	1,86
50	7,37	1,96	1,91
55	8,10	2,03	1,98
60	8,84	2,10	2,04
65	9,58	2,16	2,09
70	10,31	2,22	2,15
75	11,05	2,27	2,20
80	11,79	2,33	2,25
85	12,52	2,39	2,30
90	13,26	2,44	2,36
95	13,99	2,49	2,41



Graf 2.1 Závislost rychlosti proudění vzduchu na výstupním napětí

V grafu 2.1 je znázorněna závislost napětí naměřeného na výstupu sond na rychlosti proudění vzduchu v trubici okolo měřicích sond. Tuto závislost poměrně dobře popisuje polynom druhého stupně. K vynesení hodnot do grafu a vykreslení spojnice trendu byl použit program MS Excel.

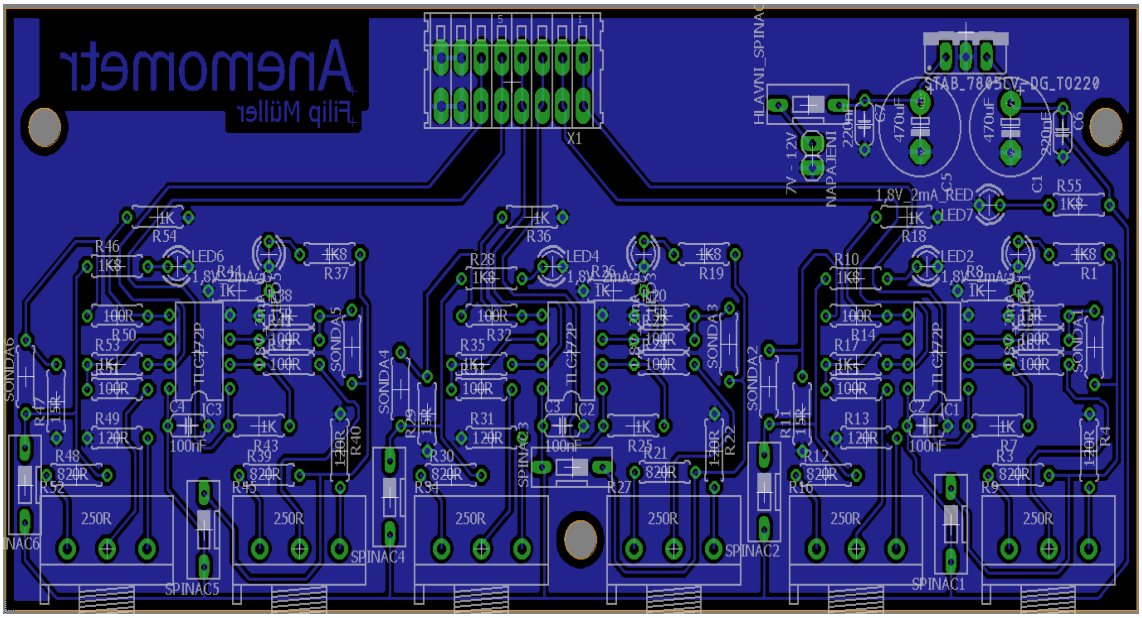
Měření bylo provedeno v rozsahu rychlostí proudění vzduchu od 0 *m/s* do 14 *m/s*, tento rozsah byl zvolen z důvodu předpokládaného využití přístroje pro rychlosti od 2 *m/s* do 10 *m/s*.

2.4 Návrh a výroba desky plošných spojů

Po otestování funkčnosti navrženého zapojení na nepájivém kontaktním poli bylo přikročeno k návrhu desky plošných spojů (DPS). Na velikosti jednotlivých součástek nezáleželo, cílem bylo miniaturizovat pouze měřicí sondy, proto byly při návrhu a následné výrobě DPS použity vývodové součástky.

Samotný návrh byl vytvořen za pomoci volně dostupného programu Eagle a je znázorněn na obrázku 2.5. Obrázek 2.5. ve větší velikosti je k dispozici na konci práce v přílohách (Příloha B) a v elektronické podobě na přiloženém CD (BP_obrázek 2.5.)

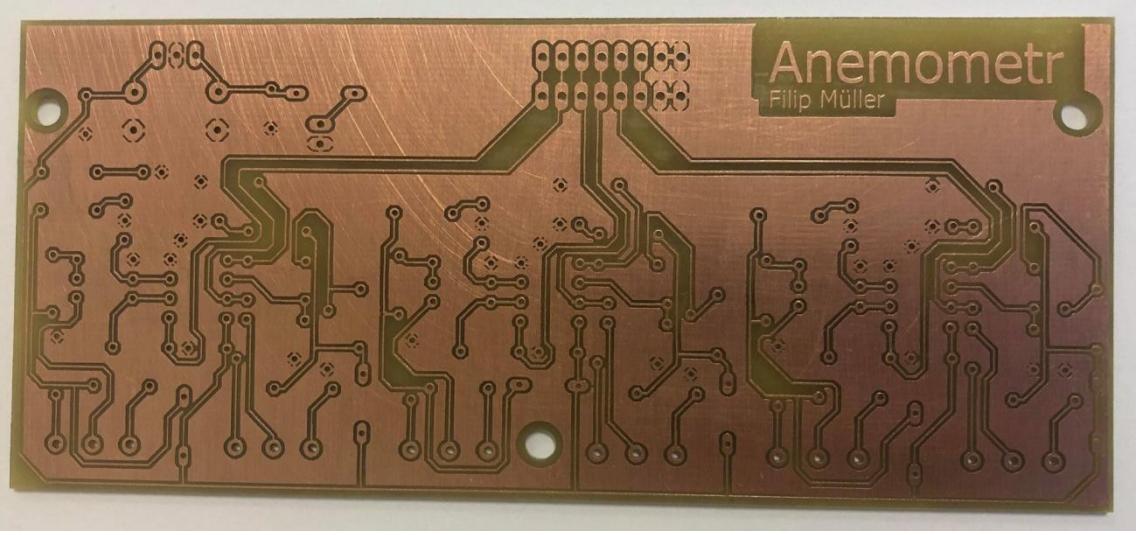
Seznam použitých součástek pro výrobu DPS je uveden na konci práce v přílohách (Příloha C)



Obrázek 2.5 Navržené DPS s rozmístěním součástek a vodivých cest

Po dokončení návrhu DPS v prostředí Eagle, Bylo přikročeno k samotné výrobě desky, kterou zhotovila externí firma (plošňáky.cz) zabývající se touto problematikou.

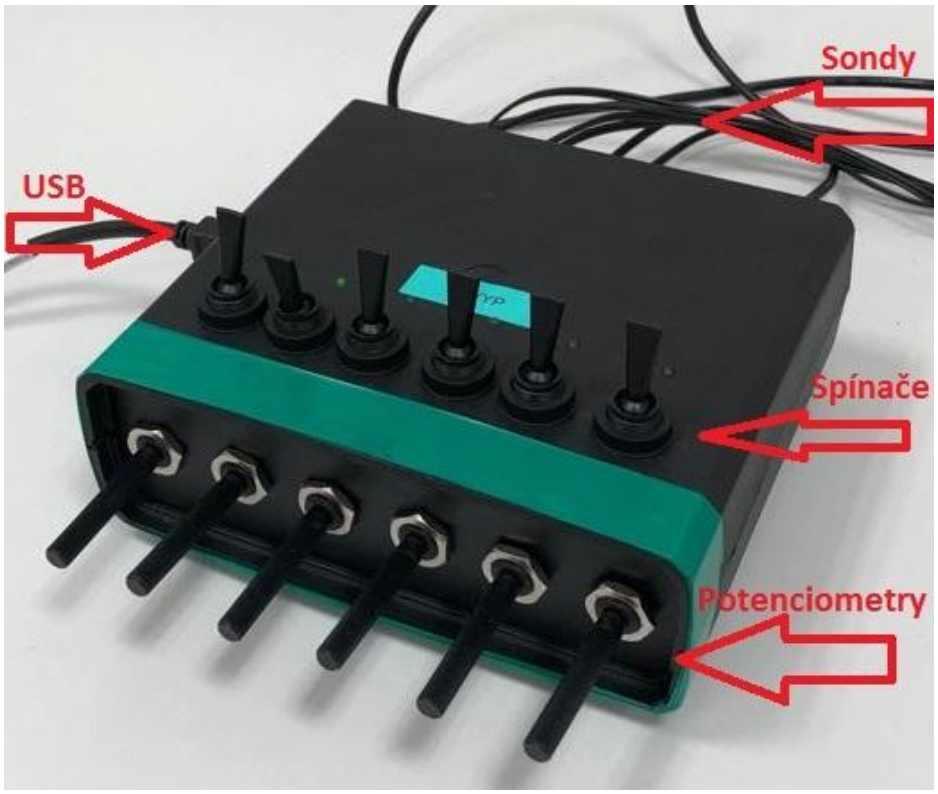
Zhotovenou desku plošných spojů je možné vidět na obrázku níže.



Obrázek 2.6 Realizace DPS

2.5 Konstrukce přístroje

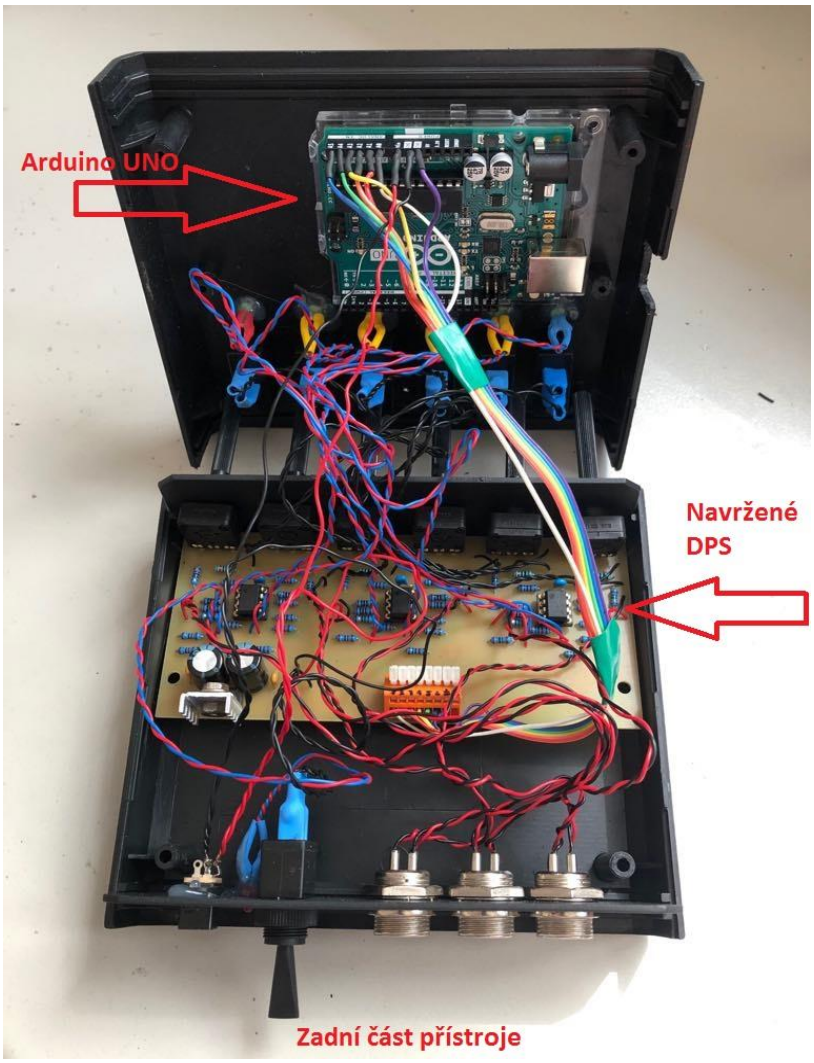
Při sestavování prototypu přístroje bylo potřeba vytvořit otvory v plastové krabičce pro mikrofonní konektory MIC 324, které zabezpečovaly spolu s konektory MIC 334 kvalitní přenos signálu ze sond. Tyto otvory byly umístěny v zadní části krabičky přístroje spolu s napájecím souosým konektorem PC-010C, páčkovým spínačem ASW-26-101, který slouží k sepnutí přístroje a červenou indikační LED zabezpečující indikaci, zda je přístroj napájen elektrickou energií. Dále byly vytvořeny otvory v přední části přístroje pro otočné osy potenciometrů, kterými se nuluje hodnota napětí naměřeného v měřicích bodech Wheatstonova můstku, při nulové rychlosti proudění vzduchu. Na vrchní straně přístroje byly umístěny páčkové spínače ASW-26-101, které sloužily k sepnutí jednotlivých sond. O tom zda je sonda v provozu, či nikoli informují zelené indikační LED, které byly umístěny hned vedle páčkových spínačů.



Obrázek 2.7 Pohled na přístroj z přední strany

Z boční strany krabičky přístroje byl vytvořen otvor pro USB port, kterým komunikovala vývojová deska arduino UNO s počítačem. Tyto úpravy krabičky přístroje je možné vidět na obrázcích 2.7. a 2.8.

Rozložení DPS, vývojové desky arduino UNO a ostatních součástek uvnitř prototypu přístroje je možné vidět na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8 Pohled na uspořádání přístrojové krabičce

2.6 Testování přístroje

Při testování přístroje bylo prvotním cílem zjistit, jaká je závislost naměřeného výstupního napětí na rychlosti proudění vzduchu v okolí sond při známé teplotě vzduchu. Dále podává-li přístroj časově stálé výsledky, tedy zjistit stabilitu přístroje. A také určit třídu přesnosti přístroje.

Snímání napětí probíhalo pomocí programu na vývojové desce arduino UNO, který načetl vstupní hodnotu z analogových pinů arduina a přepočetl ji na hodnotu napětí. Program je k dispozici na přiloženém CD (Müller_BP_program1) a metoda převodu je blíže popsána v kapitole 2.7.

2.6.1 **Kalibrace**

Kalibrační soustava se oproti sestavě určené k testování zapojení na nepájivém poli popsané v kapitole 2.3. mírně změnila. Z důvodu zlepšení přesnosti měření, zde byl použit místo regulátor průtoku OMEGA FMA5400/5500 škrtící ventil a přesný průtokoměr FLUKE VT MOBILE. K stabilizaci proudění, zde byla použita rigidní trubka z PVC o délce 1 m a vnitřním průměru 14 mm. U které byl 10 cm před jejím koncem vytvořen otvor pro vsunutí měřicí sondy. Napětí bylo zaznamenáváno pomocí vývojové desky arduino UNO a následně přenášelo pomocí USB portu do PC.

Přístroj byl kalibrován na rozsah měření od 2 *m/s* do 10 *m/s*. Při teplotě 21°C.

Ještě před samotným měřením jsme se ujistili, že v rigidní trubici opravdu dochází k turbulentnímu proudění, které zabezpečuje stejnou rychlost šíření vzduchu v každé části trubice. K tomu byl použit výpočet Reynoldsova čísla pro minimální a maximální hodnotu předpokládané rychlosti proudění, tedy pro hodnoty 2 *m/s* a 10 *m/s*. Reynoldsovo číslo nám určuje charaktery toku, které mohou v trubici nastat a vypočítá se podle následujícího vztahu.

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} \tag{2.1}$$

Kde *Re* je Reynoldsovo číslo, ρ je hustota proudícího média v [kg/m^3], *d* je charakteristický průměr v [*mm*], *v* je rychlost proudění média v [*m/s*] a η je dynamická viskozita látky udávaná v [*Pa·s*].

Pro minimální hodnotu :

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} = \frac{1{,}204 \cdot 14 \cdot 2}{0{,}000017} = 1983$$

Pro maximální hodnotu :

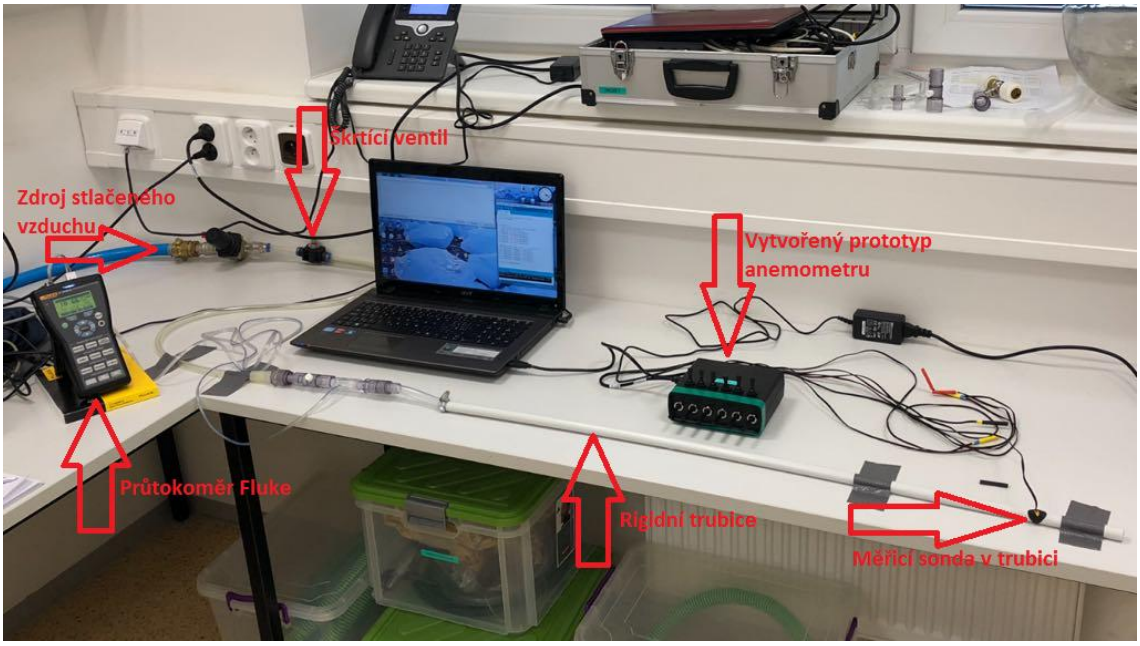
$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\eta} = \frac{1{,}204 \cdot 14 \cdot 10}{0{,}000017} = 9915$$

Pokud je hodnota tohoto čísla vyšší než kritická hodnota, lze považovat proudění v soustavě za turbulentní. Pokud je nižší pak považujeme proudění za laminární.

Pro rovné trubice s hladkou vnitřní stěnou se pohybuje kritická hodnota Reynoldsova čísla okolo 1000. [10]

Vypočtená hodnota Reynoldsova čísla jak pro maximální, tak i minimální rychlosti proudění překračuje kritickou hodnotu Re určenou pro rovné trubice s hladkou vnitřní stěnou. Proto bylo považováno proudění uvnitř trubice za turbulentní a bylo přikročeno k samotnému měření.

Kalibrační sestava je znázorněna na obrázku 2.9.



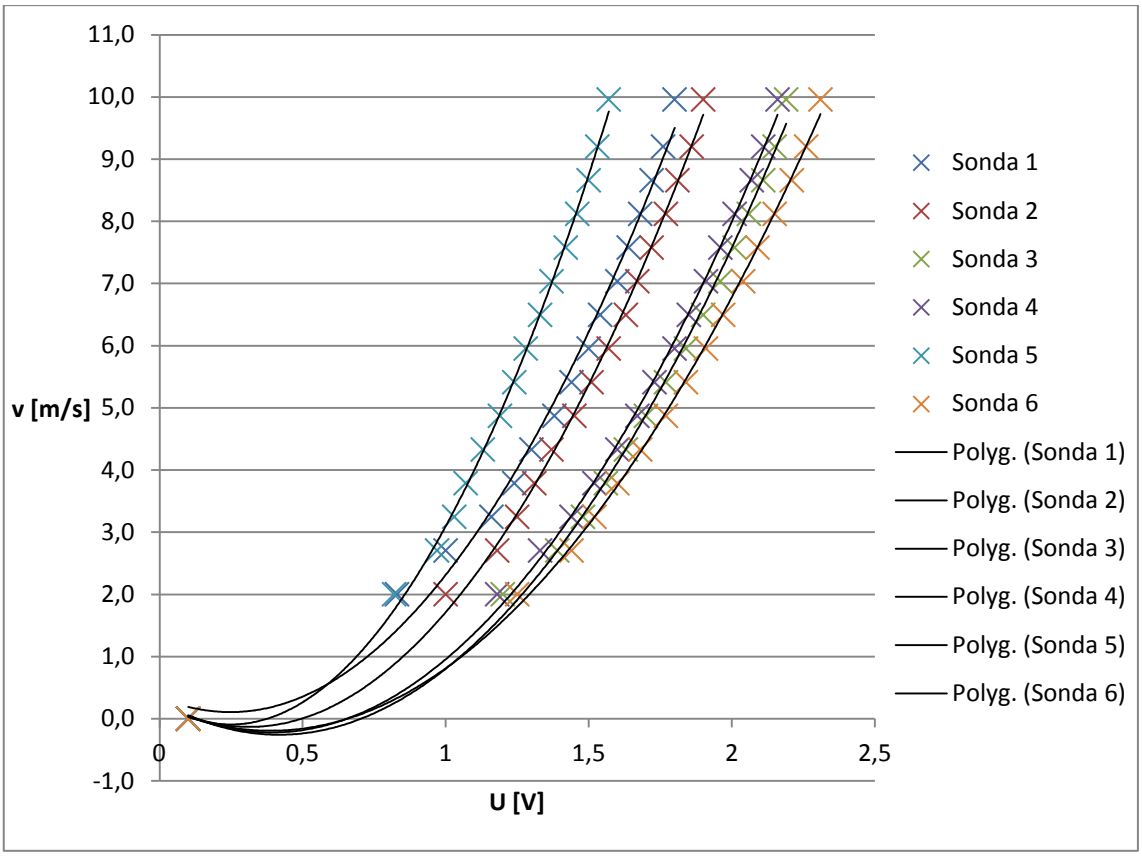
Obrázek 2.9 Kalibrační sestava

Zaznamenané hodnoty napětí, nastavených průtoků a následně vypočtených rychlostí podle vztahu (1.5) u všech šesti sond jsou zaneseny do tabulky 2.2 a následně do grafu 2.2

Tabulka 2.2 Zaznamenané hodnoty napětí při kalibraci sond

U_{Sonda1} (V)	U_{Sonda2} (V)	U_{Sonda3} (V)	U_{Sonda4} (V)	U_{Sonda5} (V)	U_{Sonda6} (V)	Q (L/min)	v (m/s)
0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0
0,83	1	1,2	1,18	0,82	1,25	18,5	2
1	1,18	1,39	1,33	0,97	1,44	25	2,71
1,16	1,25	1,48	1,44	1,03	1,52	30	3,25
1,24	1,31	1,56	1,52	1,07	1,6	35	3,79
1,3	1,37	1,63	1,6	1,13	1,68	40	4,33
1,38	1,45	1,7	1,67	1,19	1,77	45	4,87
1,44	1,51	1,77	1,73	1,24	1,84	50	5,41
1,5	1,57	1,84	1,8	1,28	1,91	55	5,95
1,54	1,63	1,9	1,85	1,33	1,97	60	6,50
1,6	1,67	1,96	1,91	1,37	2,04	65	7,04
1,64	1,72	2,01	1,96	1,42	2,09	70	7,58
1,68	1,77	2,06	2,01	1,46	2,15	75	8,12
1,72	1,81	2,11	2,07	1,5	2,21	80	8,66
1,76	1,86	2,15	2,11	1,53	2,26	85	9,22
1,8	1,9	2,19	2,16	1,57	2,31	92	9,96

Jelikož i po vynulování hodnoty napětí ve Wheatstonově můstku pomocí potenciometru, bylo naměřeno nenulové napětí na výstupu operačního zesilovače, byla zvolena alternativní nulová hladina na hodnotě 0,1 V



Graf 2.2 Závislost naměřeného výstupního napětí na rychlosti proudění vzduchu v okolí sond.

K vyhodnocení výsledků a jejich vynesení do grafu byl použit program MS Excel.

Závislosti naměřené na tomto rozsahu rychlostí proudění vzduchu poměrně dobře popisuje polynom druhého stupně.

Kalibrační rovnice vycházející z těchto naměřených hodnot pro jednotlivé sondy.

Sonda 1:

$$v_{Sonda1} = 3{,}8978 \cdot U_{Sonda1}^2 - 1{,}9293 \cdot U_{Sonda1} + 0{,}3468$$

Sonda 2:

$$v_{Sonda2} = 3{,}9072 \cdot U_{Sonda2}^2 - 2{,}4437 \cdot U_{Sonda2} + 0{,}2518$$

Sonda 3:

$$v_{Sonda3} = 3{,}1265 \cdot U_{Sonda3}^2 - 2{,}6803 \cdot U_{Sonda2} + 0{,}2877$$

Sonda 4:

$$v_{Sonda4} = 3{,}1745 \cdot U_{Sonda4}^2 - 2{,}4828 \cdot U_{Sonda4} + 0{,}2656$$

Sonda 5:

$$v_{Sonda5} = 5{,}6416 \cdot U_{Sonda5}^2 - 2{,}7995 \cdot U_{Sonda5} + 0{,}2559$$

Sonda 6:

$$v_{Sonda6} = 2{,}6855 \cdot U_{Sonda6}^2 - 2{,}0863 \cdot U_{Sonda6} + 0{,}2135$$

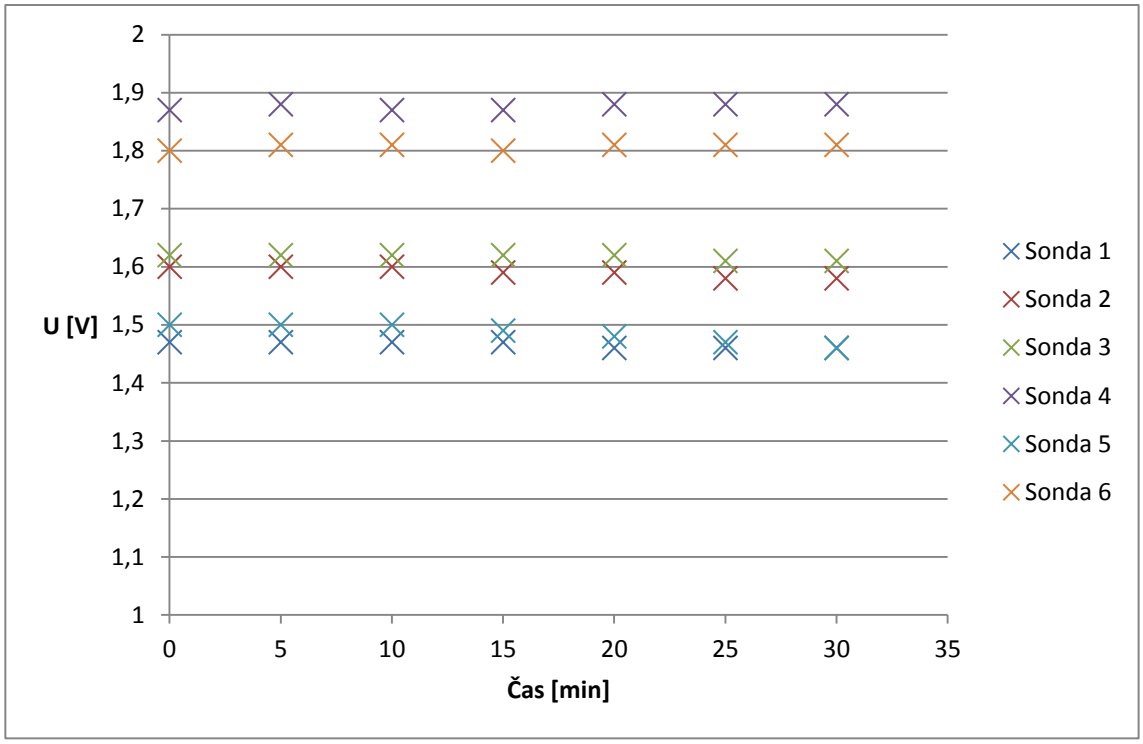
2.6.2 **Stabilita měření přístroje**

Stabilita měření přístroje, představuje velmi důležitou vlastnost přístroje, která nám udává, jak se mění naměřená hodnota přístrojem v čase, při konstantních podmínkách. Stabilita se testovala na stejné sestavě jako probíhala kalibrace popsané v kapitole 2.6.1.

Měřicí sonda se umístila na místo určené k měření, pomocí škrticího ventilu byl nastaven konstantní průtok 46,2 *L/min*, který odpovídá rychlosti proudění vzduchu v trubici 5 *m/s*. Hodnota napětí byla zaznamenávána každých 5 min a měření každé z šesti sond probíhalo po dobu 30 min. Hodnoty naměřené při testování stability přístroje je možné vidět v tabulce 2.3. a jsou vyneseny do grafu 2.3.

Tabulka 2.3 Naměřené hodnoty při testování stability přístroje

U_{sonda1} (V)	U_{sonda2} (V)	U_{sonda3} (V)	U_{sonda4} (V)	U_{sonda5} (V)	U_{sonda6} (V)	Čas (min)
1,47	1,6	1,62	1,87	1,51	1,8	0
1,47	1,6	1,62	1,88	1,5	1,81	5
1,47	1,6	1,62	1,87	1,5	1,81	10
1,47	1,59	1,62	1,87	1,49	1,8	15
1,46	1,59	1,62	1,88	1,48	1,81	20
1,46	1,58	1,61	1,88	1,47	1,81	25



Graf 2.3 Závislost změny měřeného napětí na době měření

Jak je možné vidět v tabulce 2.3. největší dosažená odchylka mezi hodnotou naměřenou na počátku a hodnotou naměřenou na konci testu činila 0.04 V.

2.6.3 **Určení třídy přesnosti přístroje**

Při určování třídy přesnosti prototypu bylo využito stejné sestavy, jako při kalibraci (kapitola 2.6.1) a stejných měřicích podmínek. Z přesně změřeného objemového průtoku pomocí průtokoměru FLUKE VT MOBILE byla vypočtena rychlost proudění vzduchu v trubici o známých rozměrech podle vztahu (1.5) a zároveň byla zaznamenávána rychlost proudění vzduchu za pomoci navrženého prototypu anemometru. Následně byl proveden výpočet absolutní chyby. Bylo provedeno celkem 12 měření, z kterých byla určena absolutní chyba. Výsledky je možné vidět v tabulce 2.4.

Tabulka 2.4 Naměřené a vypočtené hodnoty při určování třídy přesnosti přístroje

Rychlost proudění vzduchu vypočtená ze změřeného průtoku (m/s)	Rychlost proudění vzduchu naměřená prototypem přístroje (m/s)	Absolutní chyba (m/s)	Průměrná absolutní chyba (m/s)	Měřící rozsah přístroje (m/s)
3,25	3,18	0,07	0,12	8
6,50	6,37	0,13		
3,25	3,34	0,09		
6,50	6,77	0,27		
3,25	3,12	0,13		
6,50	6,39	0,11		
3,25	3,40	0,15		
6,50	6,43	0,07		
3,25	3,13	0,12		
6,50	6,57	0,07		
3,25	3,29	0,04		
6,50	6,27	0,23		

Třída přesnosti je určena podle vztahu (2.2).

$$\delta_{TP} = \frac{|\Delta_m|}{X_R} \cdot 100 \tag{2.2}$$

Kde δ_{TP} je třída přesnosti v procentech, Δ_m je absolutní chyba přístroje v metrech za sekundu a X_R je měřící rozsah přístroje v metrech za sekundu.

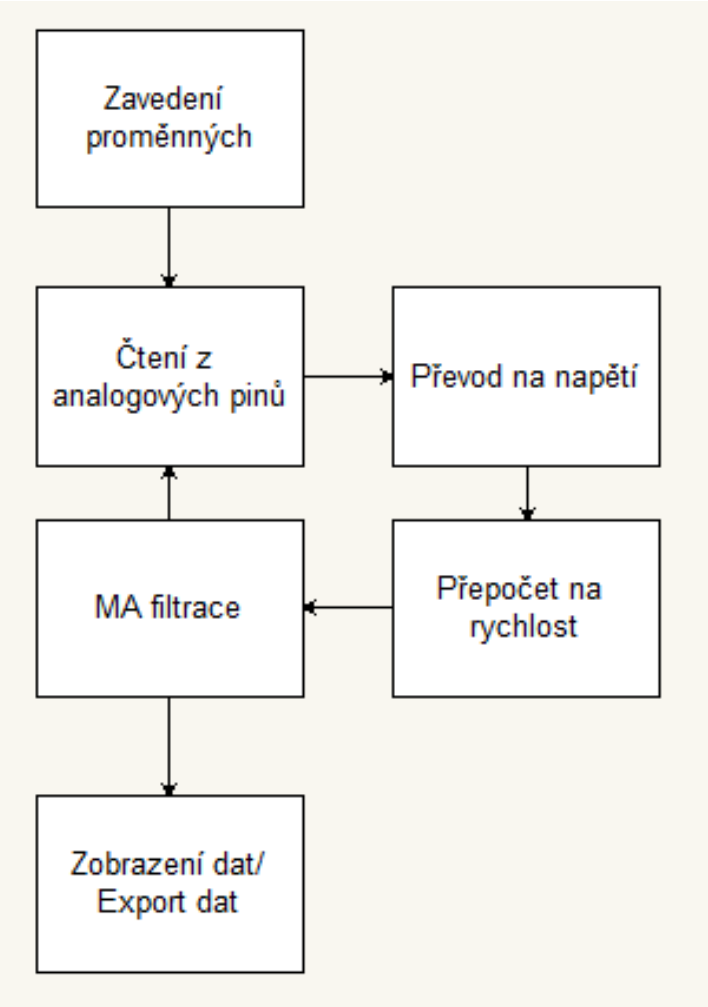
Měřicí rozsah přístroje byl určen v závislosti na intervalu rychlostí použitých pro kalibraci, tedy od 2 *m/s* do 10 *m/s*. Z čehož vyplývá měřicí rozsah přístroje 8 *m/s*.

Po dosazení konkrétních veličin do vztahu 2.2 dostáváme výslednou třídu přesnosti.

$$\delta_{TP} = \frac{0{,}12}{8} \cdot 100 = 1{,}5\%$$

2.7 Software

Posledním krokem bylo zhotovit software, který by signál převedený ze zhotovené DPS, za pomoci vývojové desky arduino UNO, přepočítal na rychlost proudění vzduchu, vykresloval ji v reálném čase do grafu na monitoru a v případě zájmu vyexportoval data do excelovské tabulky. Pro tento úkol bylo zvoleno vývojové prostředí arduino IDE, které je přímo určeno ke komunikaci s vývojovou deskou arduino UNO a pomocný podprogram PLX-DAQ. Výsledný kód je uveden v podobě blokového schématu na obrázku 2.10 a v elektronické podobě na přiloženém CD



Obrázek 2.10 Blokové schéma softwaru pro přístroj

V první části kódu, došlo k zavedení všech proměnných a polí potřebných k načítání analogových vstupů a filtraci pomocí MA filtru. Následně k načtení samotných dat z analogových pinů (A0-A5), která nabývají hodnot 0-1023. Přičemž tyto hodnoty odpovídaly vstupnímu rozsahu arduina 0 - 5 V a proto se dále tyto nasnímané hodnoty přepočítávaly na napětí, aby se mohly pomocí kalibračních rovnic převést na rychlost proudění vzduchu. Přepočtené rychlosti proudní vzduchu se dále filtrovali pomocí MA filtru k dosažení plynulejších změn. V poslední části kódu, byly vykreslovány grafy v reálném čase do sériového plotteru, který je v programu Arduino IDE k dispozici v záložce Nástroje. Pro export dat do excelovské tabulky, bylo zapotřebí stáhnout pomocný program PLX-DAQ, který je volně stažitelný z internetu a po nainstalování vytvořil na ploše excelovskou tabulku. Tuto tabulku stačilo pouze otevřít a nastavit do vyskakovacího okna správný sériový port, rychlost záznamu a pomocí tlačítka connect se program spojil s vývojovou deskou arduino UNO a začal zaznamenávat naměřené hodnoty rychlosti proudění vzduchu do tabulky. Bližší návod na nainstalování a nastavení programu PLX-DAQ je k dispozici v [11].

3 Diskuse

Hlavním výsledkem této bakalářské práce je prototyp přístroje se sítí šesti měřicích sond, určených k měření rozložení rychlosti proudění vzduchu při ergonomických měřeních ochranných pomůcek.

Pro realizaci tohoto prototypu byla zvolena měřící metoda založenou na principu ochlazování žhaveného drátu vzduchem proudícím v jeho okolí. Odůvodnění výběru této metody je k dispozici v kapitole 2.1.1. Dále bylo navrženo elektrické schéma přístroje ve volně dostupné verzi programu Eagle, které bylo nejprve otestováno na nepájivém kontaktním poli. Hodnoty napětí naměřené navrženým obvodem jsou zaneseny v tabulce 2.1 a vykresleny v grafu 2.1. Jako prvek reagující na změny rychlosti proudění vzduchu bylo zvoleno tenké vlákno z žárovky, která byla zbavena ochranného skla za pomoci stolní brusky. Detail měřicího prvku je zobrazen na obrázku 2.3 a bližší popis funkce navrženého obvodu je vysvětlen v kapitole 2.2. Následně po ověření funkčnosti navrženého zapojení na nepájivém kontaktním poli došlo k návrhu DPS, taktéž v programu Eagle a jeho realizaci za pomoci externí firmy (plošňáky.cz). Díky zhotovení DPS externí firmou bylo možné zvolit menší šířku vodivých cest než při vlastní výrobě. Zhotovená deska plošných spojů je zobrazena na obrázku 2.6.

Dále proběhla kompletace celého přístroje. Došlo k namontování konstrukčních prvků a zabudování vývojové desky arduino UNO do přístrojové krabičky. Tak aby byl přístroj samostatným funkční celkem. Přístroj je možné vidět na obrázcích 2.7 a 2.8.

Ověřování zhotoveného přístroje proběhlo na kalibrační sestavě popsané v kapitole 2.6.1. Hlavním cílem tohoto ověřovacího testu bylo stanovit závislost rychlosti proudění vzduchu na naměřeném napětí. Tato závislost se stanovila pro každou z šesti sond, viz graf 2.2 za pomoci programu MS Excel. Dalším z ověřovacích testů, kterým přístroj prošel byl test stability měření přístroje. Tento test se zaměřil na časovou stálost výsledků. U každé sondy probíhalo měření po dobu 30 *min*, kdy na sondu působil konstantní proud vzduchu o rychlosti 5 *m/s* a každých 5 *min* byla odečítána hodnota napětí naměřená navrženým přístrojem. Jak je možné vidět z tabulky 2.3, kam byly zaneseny výsledky z tohoto testu přístroje, nejvyšší rozdíl napětí mezi počátkem a koncem testu činil 0,04 *V*, což poukazuje na poměrně dobrou stabilitu přístroje.

V posledním kroku ověřování přístroje byla určena jeho třída přesnosti. Aby mohla být třída přesnosti přístroje určena bylo nutné nejprve zjistit průměrnou absolutní odchylku všech sond a měřicí rozsah přístroje. Následně byly tyto hodnoty dosazeny do vztahu (2.2) a byla určena třída přesnosti přístroje 1,5% oproti průtokoměru FLUKE VT MOBILE, který byl pro toto měření považován za absolutně přesný. Veškeré ověřování přístroje probíhalo při teplotě 21°C. Z důvodu absence přístrojů zajišťující stabilní ohřev vzduchu neproběhlo testování přístroje pro jiné teploty a tudíž nebyl stanoven teplotní rozsah přístroje. Proto je zaručena přesnost měření pouze při teplotě 21°C.

V závěrečných krocích byl zhotoven software k přístroji, blíže popsaný v kapitole 2.7 a sepsán návod k použití (příloha D).

Hlavním účelem zhotoveného přístroje je měření rozložení rychlostí proudění vzduchu pro využití v ergonomických měřeních pro ochranné pomůcky. Avšak tento přístroj může mít mnohem širší uplatnění. Od domácího využití, přes měření úniků vzduchu způsobených netěsností oken, až k akademickému použití, jako pomůcka při výuce. Limitace napájecího rozsahu byla určena limitací vývojové desky arduino UNO, která je napájena za pomoci stejného adaptéru, jako přístroj samotný a tudíž je tedy napájecí rozsah stanoven na 7 až 12 *V*. Další specifikace přístroje, jako je například rozsah měřených rychlostí proudění vzduchu, rozměry přístroje atp. jsou k dispozici v návodu (příloha D)

4 Závěr

V rámci této bakalářské práce byl navržen a zkonstruován prototyp přístroje pro měření rozložení rychlosti proudění vzduchu se šesti měřicími sondami, založenými na základě měřicí metody se žhaveným prvkem. Součástí konstrukce přístroje bylo i jeho ověření. Během ověřování přístroje došlo k vytvoření kalibrační sestavy a určení kalibrační rovnice pro každou z šesti sond. Dále v rámci ověřování přístroje proběhla zkouška časové stability měření přístroje a určení jeho třídy přesnosti. Následně byl zhotoven software pro vývojovou desku arduino UNO, který zajišťoval přepočet naměřených dat na rychlost proudění vzduchu a v případě zájmu uživatele nabízel možnost vykreslování změn rychlostí proudění vzduchu v reálném čase, či export dat. Také byl sepsán návod k použití, ve kterém jsou specifikovány technické parametry prototypu přístroje.

5 Seznam použité literatury

[1] FORMÁNEK, Doc Ing Josef. Výukové texty. Podklady k principu měření rychlosti a rychlosti proudění. [cit. 2017-12-14].]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/12-F.pdf

[2] MALÍK, M., PRIMAS, J. Anemometrické metody. [Učební text] Liberec, 2011.

[3] Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů [online]. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html

[4] Proudění, rychlost a průtok plynů. Průtoky. [Online] 2011. [cit. 2017-12-20] Dostupné z: <http://www.prutoky.cz/plyny/prandtlovy-trubice/>.

[5] Hyngar, Karel. „Amatérské Rádio,Elektrický anemometr", b.r.

[6] „Základy ergonomických studií - PDF". Viděno 19. duben 2018. http://docplayer.cz/16206225-Zaklady-ergonomickych-studii.html.

[7] „Zapojení s operačním zesilovačem". Wikipedie, 17. červen 2017. https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Zapojen%C3%AD_s_opera%C4%8Dn%C3%ADm_zesilova%C4%8Dem&oldid=15092146.

[8] Ďaďo, Stanislav, Ludvík Bejček, a Antonín Platil. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005.

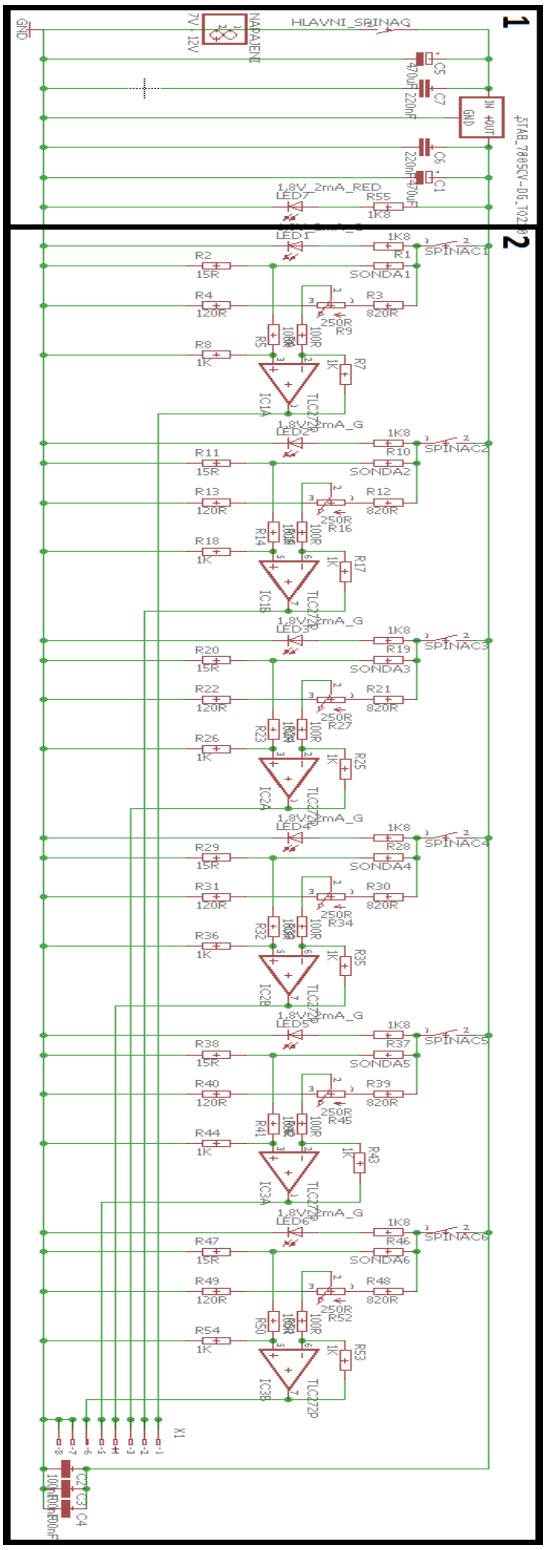
[9] Vobecký, Jan, a Vít Záhlava. *Elektronika, součástky a obvody, principy a příklady*. Praha: Grada, 2001.

[10] GUYTON, Arthur C a John E HALL. Textbook of Medical Physiology. 11. vydání. Elsevier, 2006. 0 s. 11; ISBN 978-0-7216-0240-0.

[11] Negm, Islam. „Quick Start to Simple DAQ System using PLX-DAQ Excel & Arduino". *medium.com* (blog), b.r. https://medium.com/@islamnegm/quick-start-to-simple-daq-system-using-plx-daq-excel-arduino-d2457773384b.

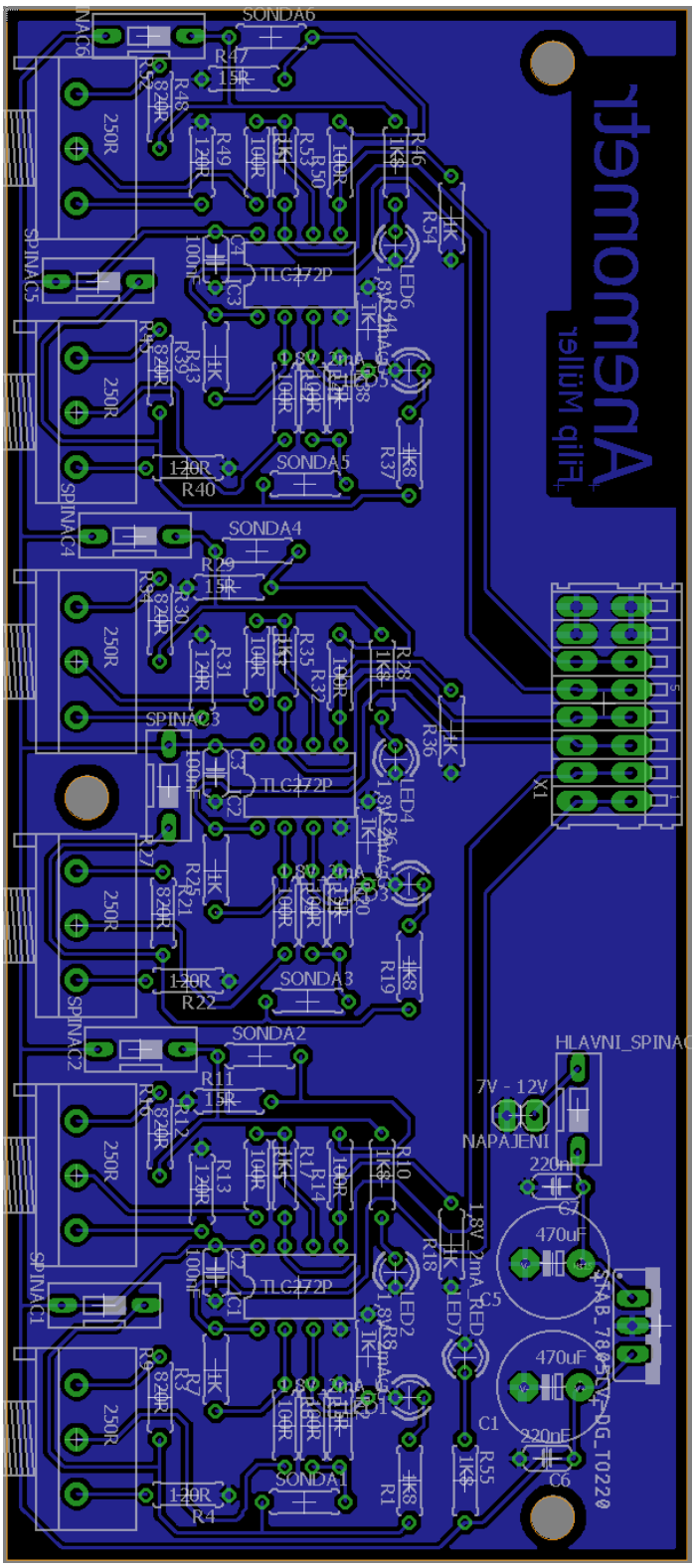
6 Přílohy

Příloha A:



Obrázek 6.1 Elektrické schéma přístroje ve větší velikosti z kapitoly 2.2.

Příloha B:



Obrázek 6.2 Navržené DPS s rozmístěním součástek a vodivých cest ve větší velikosti z kapitoly 2.4.

Příloha C:

Tabulka 6.1: Seznam použitých součástek

Název součástky	Počet
Stabilizátor pevného napětí 7805CV-DG-STM	1
OZ TLC272CP DIP8	3
Patice DIL08PZ	3
Elektrolytický kondenzátor 470u	2
Keramický kondenzátor 220n	2
Keramický kondenzátor 100n	3
Páčkový spínač ASW-26-101	7
LED 3mm red BL-B5141-L	1
LED 3mm green BL-B2141-L	6
Potenciometr PC16MLE250	6
Odpor RM0207 15R	6
Odpor RM0207 100R	12
Odpor RM0207 120R	6
Odpor RM0207 820R	6
Odpor RM0207 1K	12
Odpor RM0207 1K8	7
Konektor MIC334 do panelu	3
Konektor MIC324 na kabel	3
Žárovka ZG1 12V 50mA	6
Konektor WAGO 233-508	1
Distanční sloupek DA4M2X20	3
Distanční sloupek DI4M2x20	3
Krabička plastová KP06 (Z-4P)	1
Napájecí adaptér síťový 12V 2500mA 5,5/2,1m T3	1
Napájecí souosý konektor PC-010C	1
Hliníkový chladič DO3	1
Dvojlinka CYH 2x0,15 černorudý	5m

Příloha D:

Návod k použití

- **Technické specifikace**
  - Napájecí rozsah přístroje 7-12 V
  - Měřící rozsah 2 - 10 m/s
  - Třída přesnosti přístroje 1,5%
  - Hmotnost přibližně 150 g
  - Rozměry samotný přístroj 150x130x50
    délka sond 70cm
- **Obsluha**
  - Zasuňte sondy do konektoru MIC v zadní části přístroje, sondy jsou označeny číslicemi, stejně tak konektory.
  - Zbavte sondu ochranného pouzdra a umístěte ji na měřicí místo.
  - Na PC spusťte software k prototypu přístroje a v záložce Nástroje spusťte sériový plotter, či vyexportujte data do excelovské tabulky pomocí podprogramu PLX-DAQ.
  - Pomocí spínače v zadní části spusťte celý přístroj a následně pomocí spínačů v horní části spínače spusťte vybrané sondy.
- **Čištění a údržba**
  - Čištění přístroje provádějte pouze suchým hadrem, aby nevnikla voda do přístroje.
  - Při přetržení měřícího vlákna v žárovičce zbavené ochranného skla je nutné vyměnit celou žárovku.
  - Výměna se provádí odstřihnutím vadné žárovičky a napájením nového kusu na konec sondy.
- **Likvidace**
  - Přístroj nevhazujte do komunálního odpadu, ale odevzdejte jej na místo určené pro sběr elektroniky.