



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

SENZOR MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU V ELEKTRICKÉM STROJI

SENSOR OF AIR VELOCITY MEASUREMENT IN ELECTRICAL MACHINES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Lavička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Jiří Lavička
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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

Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Principy měření rychlosti proudění jsou již celkem dobře známy. Problém nastává v elektrických strojích, kde je třeba měřit rychlost proudění vzduchu na velmi problematických místech a to zejména z prostorových důvodů. Cílem práce je navrhnout malý senzor rychlosti blížíící se svými rozměry MEMS. Pokud by to bylo možné tak i bezdrátový přenos udaje o rychlosti do PC. Určité reálné možnosti realizace již byly prováděny a bylo by možné z nich vycházet.

Cíle diplomové práce:

1. Rešeršní studie měření rychlosti proudění vzduchu
2. Návrh senzoru
3. Realizace senzoru
4. Testování navrženého senzoru

Seznam doporučené literatury:

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

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

IDELČÍK, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce je tvořena popisem návrhu a výroby zařízení k měření rychlosti vzduchu vytvořeného v rámci její praktické části. V úvodu jsou uvedeny základní teoretické informace vztahující se k dané problematice, v dalších kapitolách už je rozebírán návrh a výroba měřícího zařízení společně s popisem kalibračního procesu. Na závěr práce je umístěna kapitola popisující, jak bylo vyrobené zařízení pro měření rychlosti proudění vzduchu otestováno.

ABSTRACT

This thesis consists of description of design and construction of device for measuring air velocity created in its practical part. In introduction is mentioned basic theoretical information related to given problem, in the next chapters is described design and construction of measuring device along with description of calibration process. At the end is placed chapter about testing the final device.

KLÍČOVÁ SLOVA

drátková anemometrie, proudění vzduchu, měření rychlosti vzduchu, vynucená konvekce

KEYWORDS

hot wire anemometry, air flow, air velocity measuring, forced convection

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Lavička, J. *Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2018, 73 s., Vedoucí diplomové/bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu, doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za poskytnuté rady a informace vedoucí k řešení této diplomové práce. Dále také děkuji firmě Degree Controls, Inc. za poskytnutý senzor, který byl použit jako součást praktické části této diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Vlacha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....
Lavička Jiří

OBSAH

1	ÚVOD	15
1.1	Úvod do Anemometrie.....	15
1.2	Cíl práce.....	15
2	ANEMOMETRICKÉ METODY	17
2.1	Mechanické anemometry	17
2.2	Tlakové anemometry	18
2.3	Ultrazvuková anemometrie.....	19
2.4	Metoda LDA	19
2.5	Metoda PIV.....	20
2.6	Termické metody	21
3	HOT WIRE ANEMOMETRIE	23
3.1	Mechanismy přeměny tepla	23
3.1.1	Kondukce.....	23
3.1.2	Konvekce	24
3.1.3	Radiace	25
3.2	NTC termistor	26
3.2.1	Self-heating effect.....	27
3.2.2	Tepelná kapacita a další důležité parametry NTC.....	27
3.2.3	Aproximace R-T křivky.....	28
3.2.4	Typy NTC termistorů	28
3.2.5	Použitý NTC termistor.....	29
3.3	Typy zapojení senzoru	31
3.3.1	Constant Current Anemometry.....	31
3.3.2	Constant Temperature Anemometry	32
4	NÁVRH ELEKTRONICKÉHO ZAPOJENÍ	33
4.1	Wheatstonův můstek se zpětnovazební regulací	35
4.1.1	Wheatstoneův můstek.....	36
4.1.2	Komparátor	36
4.1.3	Tranzistor T2	37
4.2	Signálové přizpůsobení.....	37
4.2.1	Dělič napětí.....	38
4.2.2	Neinvertující OZ.....	38
4.2.3	Napěťová reference	38
4.3	Arduino Pro Micro.....	40
4.4	Zvyšující stejnosměrný měnič	42
5	NÁVRH, VÝROBA A OSAZENÍ DPS	44
6	KALIBRACE	47
6.1	Získání dat.....	48
6.1.1	Popis analytického přístupu	48
6.1.2	Popis experimentálního přístupu	50
6.2	Kalibrační soustava	51
6.3	Průběh kalibrace – pokojová teplota.....	52
6.4	Průběh kalibrace – tepelná komora.....	53
6.5	Kalibrace NTC _T termistoru.....	56

7	NÁVRH PC APLIKACE.....	59
7.1	Část Arduino.....	60
7.2	Část Python.....	60
8	OTESTOVÁNÍ VÝSLEDNÉHO ZAŘÍZENÍ	63
9	ZÁVĚR.....	65
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	67
11	SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	69
11.1	Seznam zkratek.....	69
11.2	Seznam tabulek.....	69
11.3	Seznam obrázků.....	70
12	SEZNAM PŘÍLOH.....	73
12.1	Přílohy na CD.....	73

1 ÚVOD

1.1 Úvod do Anemometrie

Původ slova anemometrie vychází z řeckého „anemos“, což znamená vítr. Je to vědní obor, který se zabývá prouděním v kapalinách, a to hlavně určováním rychlosti proudění, popřípadě i měřením směru proudění a tlaku v proudící kapalině.

V případě této práce je proudící kapalinou zmíněnou v předchozím odstavci vždy vzduch a tato práce se vztahuje pouze k měření rychlosti proudění, nikoli k měření tlaku nebo směru. V následující kapitole je uveden obecný přehled různých metod anemometrie, které se dnes používají běžně, či méně často. V dalších kapitolách jsou pak vysvětleny fyzikální podstaty a principy spojené s tepelnou přeměnou, detailní popis senzoru použitého v této práci, návrh elektronického obvodu, kalibrace, naměřená data a návrh jednoduché PC aplikace pro zobrazování naměřených dat.

1.2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat malý senzor pro měření rychlosti proudění vzduchu v elektrických strojích. Svou velikostí by se měl senzor blížit rozměrům MEMS, což je zkratka z anglického Micro Electro Mechanical System (Mikro Elektro Mechanický systém). Největší důraz má být kladen na rozměry výsledného senzoru z důvodu omezeného prostoru v elektrických strojích, ve kterých má být senzor primárně využit pro měření rychlosti proudění vzduchu v chladicích drážkách. Motivací vzniku této práce tedy bylo měřit rychlost vzduchu v omezeném prostoru uvnitř elektrického stroje.

2 ANEMOMETRICKÉ METODY

Existuje několik fyzikálních principů, na kterých anemometry pracují. Jejich výčet je proveden v následujících podkapitolách, spolu s konkrétními příklady anemometrů ke každému principu měření. Jedná se pouze o základní přehled, v práci se dále věnujeme pouze principu spojenému s její praktickou částí, tzn. principu v kapitole 2.6 Termické metody.

2.1 Mechanické anemometry

Podstatou měření mechanických anemometrů je přenášet rychlost proudění kapaliny, resp. vzduchu, ve většině případů na mechanický pohyb konstrukce anemometru. Roku 1846 vznikl první miskový anemometr sestavený J. T. R. Robinsonem, na obr. 2.1 vlevo. Obecný princip funkce miskového anemometru je založen na aerodynamickém odporu povrchu misky. Vnější povrch misky má totiž mnohem menší aerodynamický odpor než povrch vnitřní. Díky tomuto rozdílu aerodynamických odporů vnější a vnitřní strany misky se v proudícím vzduchu bude miskový anemometr otáčet, a to vždy jen jedním směrem podle směru proudícího vzduchu. Moment způsobený proudícím vzduchem se přenáší na rotor, který je roztáčen, a z jeho průměrné rychlosti lze jednoduchými výpočty určit průměrnou rychlost větru [1].

Oproti první Robinsonově čtyřlopatkové variantě se dnes pro větší efektivitu používají miskové anemometry se třemi lopatkami, jelikož poměr rychlosti otáčení rotoru anemometru a skutečné rychlosti proudění vzduchu závisí mimo jiné i na tvaru a velikosti ramen, na kterých jsou misky připevněny. S miskovým typem anemometru se ve velké míře můžeme setkat na letištích, kde je dodnes hojně využíván a velmi dobře slouží i vzhledem k jeho jednoduché konstrukci [1].

Dalším typem mechanického anemometru je vrtulový anemometr. Jeho princip je stejný jako u miskového anemometru velmi jednoduchý. Vrtule připevněná na osu rovnoběžnou s proudem vzduchu je jím roztáčena a hodnota rychlosti otáčení vrtule je přímo úměrná hodnotě rychlosti proudícího vzduchu. Pokud by však vektor rychlosti vzduchu nebyl rovnoběžný s osou vrtule, dostali bychom zkreslené výsledky [1]. Ukázka moderního digitálního vrtulového typu anemometru je na obr. 2.1 vpravo.



Obr. 2.1: Robinsonův lopatkový anemometr (vlevo), Digitální vrtulový anemometr (vpravo)

2.2 Tlakové anemometry

Jak už název sám napovídá, rychlost proudění kapaliny je v případě tlakových anemometrů měřena pomocí fyzikální veličiny – tlaku, resp. rozdílu dvou tlaků. Mezi anemometry fungující na tomto principu patří např. Pitotova trubice nebo Venturiho trubice. Pro pochopení základního principu tlakových anemometrů uvedeme, jak funguje Pitotova trubice.

Jak jsme již zmínili, princip měření spočívá v měření rozdílu dvou tlaků, a to statického tlaku a celkového tlaku. Konstrukce Pitotovy trubice je velmi jednoduchá, jak se lze přesvědčit z jejího nákresu na obr. 2.2. Je složena ze dvou do sebe vložených a na jednom konci spojených trubic. Do trubice o menším průměru proudí kapalina otvorem, jehož osa je rovnoběžná s vektorem rychlosti proudění kapaliny. Do trubice o větším průměru jsou udělány otvory kolmo na směr proudění. Z nákresu na obr. 2.2 je zřejmé, že otvory, které jsou vyvrtány kolmo na směr proudění, slouží pro měření statického tlaku p_s [Pa], jelikož nejsou přímo ovlivňovány rychlostí proudící kapaliny. Oproti tomu otvor rovnoběžný se směrem proudění slouží k měření celkového tlaku p_c [Pa], který je součtem tlaku statického a tlaku dynamického p_d [Pa], jelikož je přímo ovlivňován rychlostí proudícího vzduchu [2].

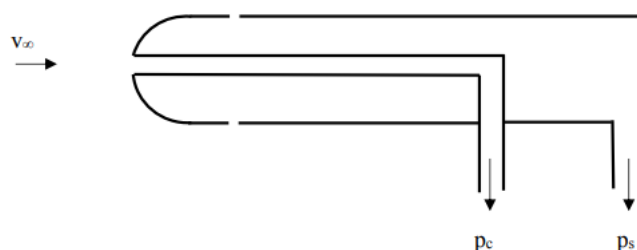
Z rovnice (1) vyplývá, že dynamický tlak, který je přímo úměrný rychlosti proudící kapaliny v [m/s], lze vypočítat jako rozdíl celkového a statického tlaku. Po dosazení do rovnice (2), která slouží pro výpočet dynamického tlaku, a po vyjádření rychlosti proudění kapaliny dojdeme k výsledku, že tato rychlost proudění kapaliny je úměrná hustotě kapaliny ρ [kg/m³] a rozdílu celkového a statického tlaku podle rovnice (3). Těmito třemi jednoduchými výpočty lze tedy při znalosti měřených tlakových veličin a hustoty proudící kapaliny získat informaci o rychlosti proudění této kapaliny [2].

Tlakového anemometru typu Pitotova trubice je hojně využíváno např. v letectví. Obecně je velkou výhodou tlakových anemometrů jejich jednoduchá mechanická konstrukce a velký rozsah rychlostí proudění, který jsou schopny změřit. Nevýhodou oproti tomu je, že jsou náchylné na teploty pod bodem mrazu, může na nich vznikat námraza, přičemž v takovém případě ztrácí schopnost měřit. Tento problém se běžně řeší vyhříváním stěn jejich trubek.

$$p_d = p_c - p_s \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$



Obr 2.2. Nákres tlakového anemometru typu Pitotova trubice

2.3 Ultrazvuková anemometrie

Tento typ měření rychlosti proudění kapaliny je založen na piezoelektrickém jevu. Tento jev je ve svém základním principu přeměna elektrické energie na mechanickou (vysílač), anebo naopak přeměna mechanické energie na elektrickou (přijímač). Mezi vysílačem a přijímačem šířící se ultrazvuková vlna je ovlivněna proudící kapalinou a tím lze změřit její rychlost. Využívá se závislosti mezi rychlostí proudící kapaliny a dobou šíření ultrazvukové vlny mezi vysílačem a přijímačem. Rychlost proudící kapaliny lze vyjádřit z rovnice (4), kde celková rychlost šíření ultrazvukového signálu c [m/s] je rovna součtu rychlosti šíření zvuku v dané kapalině w [m/s] a rychlosti proudění dané kapaliny v [m/s] [3].

$$c = w + v \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

Ukázka čtyřramenného ultrazvukového anemometru je uvedena na obr. 2.3. Obecnou nevýhodou ultrazvukových anemometrů je, že jejich konstrukce ovlivňuje vektor proudění kapaliny. Kolem ramen s piezoelektrickými měniči vznikají turbulence, které jsou úměrné rychlosti proudění. Proto je nutné ultrazvukové anemometry před používáním kalibrovat ve speciálním větrném tunelu. Naopak jejich velkou výhodou je robustní nepohyblivá konstrukce a při správně provedené kalibraci i vysoká přesnost měření [3].



Obr. 2.3: Čtyřramenný ultrazvukový anemometr výrobce Direct Industry

2.4 Metoda LDA

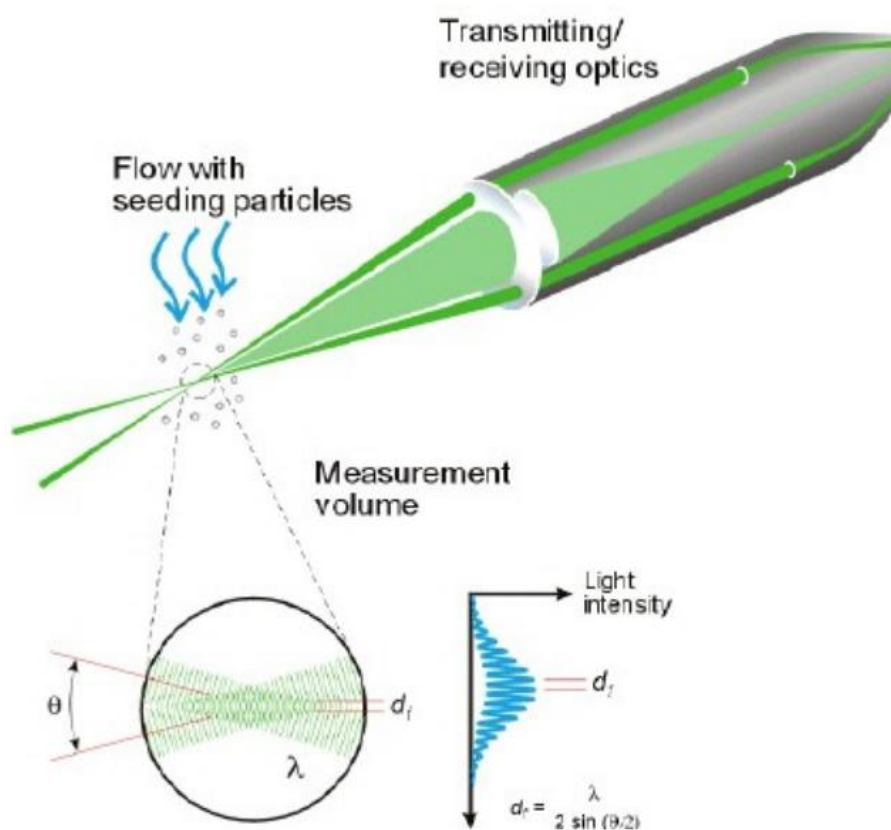
LDA neboli „Laser-Doppler Anemometry“, jak už z anglické zkratky vyplývá, je metodou založenou na Dopplerově jevu. Více o tomto jevu se lze dozvědět ze zdroje [4]. Funkčnost této metody je podmíněna tím, aby proudící kapalina obsahovala trasovací částice – malé částice v proudící kapalině se stejnou rychlostí a směrem, jako je rychlost a směr proudící kapaliny. Dva laserové paprsky se kříží v proudící kapalině a vytváří v daném místě interferenci (vzájemné prolínání). Pokud tímto místem prochází trasovací částice, laserové paprsky se od této částice odrazí směrem k detektoru snímajícímu frekvenci odraženého signálu. V momentu, kdy trasovací částice prolétává místem křížení paprsků, vytvoří tzv. Dopplerův zákmit, ze kterého lze s velkou přesností určit hodnotu rychlosti proudící kapaliny [2].

LDA metoda je neinvazivní, tzn., že měřicí řetězec nemá přímý vliv na měřenou veličinu, jako je tomu např. u mechanických metod anemometrie, a lze ji používat i v kapalinách o vysokých teplotách nebo s agresivním chemickým složením tam, kde jiné metody uplatnit nelze. Další výhodou LDA metody je, že kalibrace není nutná. Na obr. 2.4 je znázorněn měřicí řetězec této metody, vysvětlení bude následovat [2].

Vzdálenost mezi lokálními extrémy intenzity d_f [m] na obr. 2.4 v pravém dolním rohu lze vypočítat na základě znalosti hodnoty úhlu natočení mezi paprsky laseru a vlnové délky podle vztahu (5), kde λ [m] je vlnová délka laserových paprsků a θ [°] je úhel, jenž laserové paprsky mezi sebou svírají. Rychlost trasovací částice, resp. rychlost proudící kapaliny je pak dána vzdáleností mezi lokálními extrémy světelné intenzity a hodnotou detekované Dopplerovy frekvence f_D [Hz] podle vztahu (6) [2].

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad [\text{m}] \quad (5)$$

$$v = d_f \cdot f_D \quad [\text{m/s}] \quad (6)$$

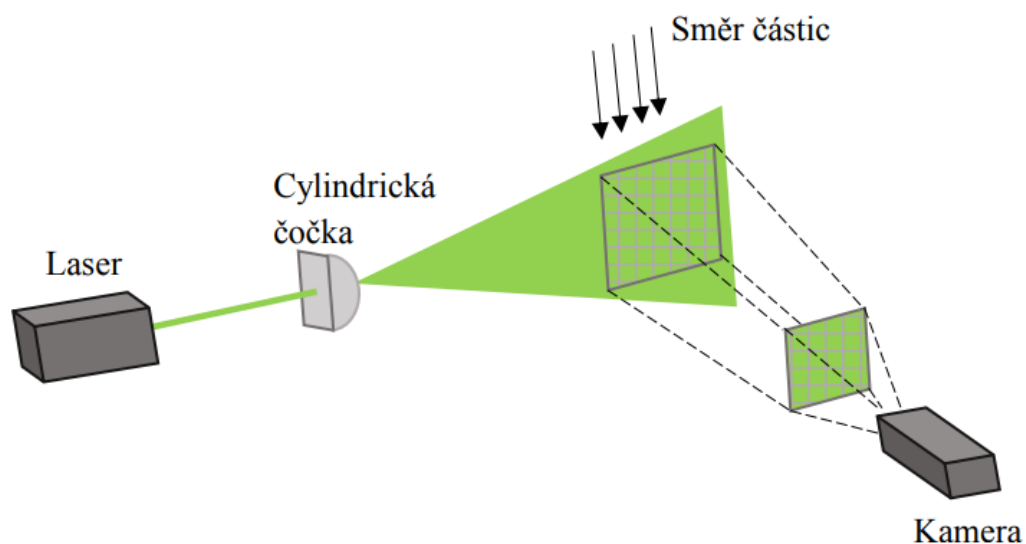


Obr. 2.4: Měřicí řetězec metody LDA

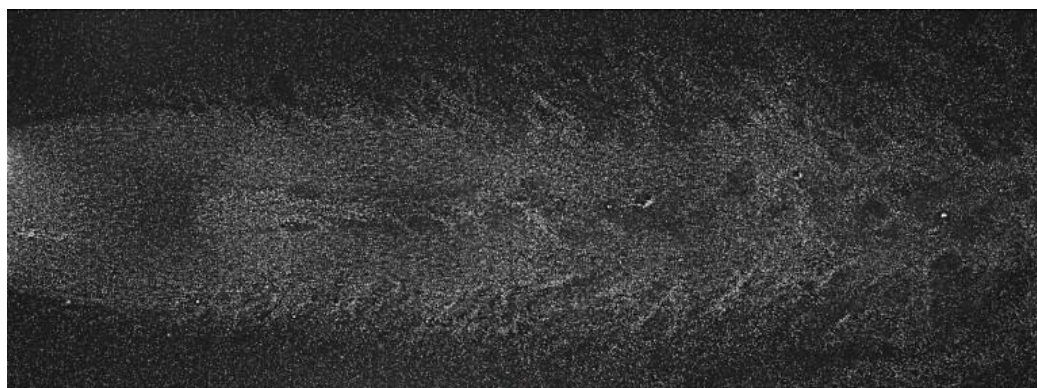
2.5 Metoda PIV

Metoda PIV, zkratka z anglického „Particle Image Velocity“, je další metodou pracující s laserovým paprskem. Pomocí optiky je paprsek transformován z 1D na 2D světelnou plochu, která je kolmá k vektoru rychlosti proudění kapaliny, jak lze vidět na obr. 2.5. Stejně jako v případě metody LDA je zapotřebí, aby proudící kapalina obsahovala trasovací částice. Na část zmíněné světelné plochy je namířena kamera s technologií CCD nebo CMOS, která v přesně daném časovém rozmezí vytvoří dva snímky. Vzájemným porovnáním těchto snímků, resp. porovnáním zachycené pozice trasovacích částic na jednotlivých snímcích lze jednoduchým výpočtem obsahující informaci o čase mezi zachycením snímků a vzdálenosti mezi pozicemi trasovacích částic na jednotlivých snímcích zjistit rychlost proudění kapaliny [2].

Z popisu metody v předchozím odstavci si lze odvodit, že metoda PIV je schopna měřit dvě složky rychlosti proudění kapaliny. Dále díky tomu, že na snímcích je zachyceno mnoho trasovacích částic, lze touto metodou určovat nejen jednotlivou hodnotu rychlosti, ale i celkový pohyb rychlostního pole. Další výhodou je velmi krátký měřicí čas a možnost měřit až do nadzvukových rychlostí. Nevýhodou je naopak potřeba před každým měřením provést kalibraci a také vysoká náročnost na kvalitu měřicí techniky. Na obr. 2.6 je ukázka snímku pořízeného kamerou během měření metodou PIV [2].



Obr. 2.5: Měřicí řetězec metody PIV



Obr. 2.6: Snímek zachycený při používání metody PIV

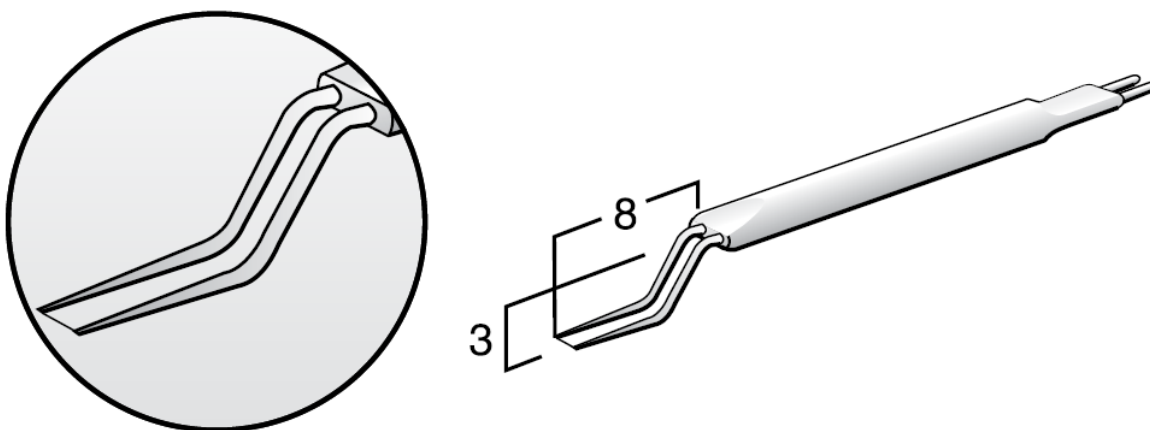
2.6 Termické metody

Jedná se o metodu fungující na principu změny elektrického odporu materiálu v závislosti na jeho teplotě. Nejčastěji se používá tenký kovový drátek, žhavený elektrickým proudem na teplotu několikanásobně vyšší, než je teplota okolí, resp. teplota proudící kapaliny. Z důvodu žhavení se pro tento princip anemometrie vžil název „hot wire“, což v překladu znamená žhavený drátek. Tím, že je žhavený element ofukován proudícím chladnějším vzduchem, jeho teplota má tendenci klesat a na tuto změnu reaguje elektronický obvod. Na základě změny některé z elektrických veličin elektronického obvodu, napětí nebo elektrického proudu, která je dána podle typu zapojení elektronického obvodu, lze určit závislost mezi změnou této elektrické veličiny a hodnotou rychlosti proudění kapaliny, kterou z pravidla bývá u termických metod vzduch [1].

Existují dva typy odporových materiálů v závislosti na tom, jakým způsobem převádějí změnu teploty na změnu elektrického odporu. První z nich je materiál s negativním teplotním koeficientem, což znamená, že na kladnou změnu teploty reaguje zápornou změnou elektrického odporu. Značí se zkratkou NTC z anglického „Negative Temperature Coefficient“, což v překladu znamená negativní teplotní koeficient, a pro praktickou realizaci této práce byl vybrán senzor právě tohoto typu. Podrobnějším popisem NTC se zabývá kapitola 3.2.

Druhým typem odporového materiálu je materiál s kladným teplotním koeficientem, což znamená, že na kladnou změnu teploty reaguje kladnou změnou elektrického odporu. Značí se zkratkou PTC z anglického „Positive Temperature Coefficient“, v překladu kladný teplotní koeficient. Příklad termoanemometrické sondy se žhaveným odporovým drátkem typu PTC vyrobeným z platiny od firmy Dantec je uveden na obr. 2.7.

Průměr měřícího elementu u typů sond, jako je ta na obr. 2.7, bývá několik mikronů, délka se uvádí v jednotkách milimetrů. Vzhledem k těmto rozměrům mají velmi malou tepelnou kapacitu a s tím související velmi rychlou odezvu. Hodí se proto i pro měření vyšších frekvencí proudící kapaliny, tzn. turbulencí a rychlých změn proudění. Na úkor rychlosti měření je jejich nevýhodou velmi špatná mechanická odolnost daná konstrukcí, proto se používají v laboratorních podmínkách, kde lze zaručit, že proudící kapalina nebude obsahovat částice prachu a nečistot, které by mohly mít za následek mechanickou destrukci měřícího elementu.



Obr. 2.7: Jednoosá termoanemometrická drátková sonda výrobce Dantec

Typ senzoru založený na drátkové anemometrii se používá např. v některých osobních automobilech pod označení MAF, z anglického „Mass Air Flow“, jako tzv. „váha vzduchu“, kdy vynásobením rychlosti proudění vzduchu s hodnotu průřezu přívodního potrubí lze získat informaci o množství nasávaného vzduchu do spalovacího motoru.

3 HOT WIRE ANEMOMETRIE

Předchozí princip měření vzduchu pomocí ochlazování žhaveného elementu je založen na termodynamickém jevu – přeměně tepla. Co přesně přeměna tepla znamená z hlediska fyzikální podstaty a jaké typy mechanismů přeměny tepla existují, je podrobněji vysvětleno v této kapitole. Dále je v této kapitole také více dopodrobna rozebrán princip funkce použitého NTC senzoru a typy elektronických zapojení, které se běžně pro drátkovou anemometrii používají.

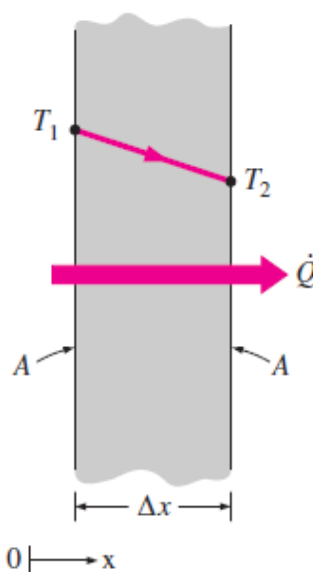
3.1 Mechanismy přeměny tepla

Teplu definujeme jako formu energie, kterou lze přeměnit z jednoho systému do druhého. Výsledkem této přeměny je pak rozdíl teplot. Přeměna tepelné energie, dále pouze tepla, vždy probíhá od systému s vyšší teplotou do systému s nižší teplotou, dokud systémy nedosáhnou rovnovážného stavu a jejich teploty se nevyrovnají. Tuto přeměnu si lze představit jako tok energie, která teče ve směru teplotního spádu, tzn. od systému (tělesa) s vyšší teplotou do systému (tělesa) s teplotou nižší [5]. Příkladem může být vánočka vložená do rozehřáté trouby. Energie teče ve směru od systému „trouba“ do systému „vánočka“, dokud se teploty obou nevyrovnají a my si po chvíli můžeme pochutnat.

Existují tři druhy přeměny tepla, tzn. tři principy, jakými si systémy mezi sebou mohou teplo vyměnit. Jedná se o kondukcii, konvekci a radiaci. V dalších podkapitolách je dopodrobna vysvětlen princip každé z nich.

3.1.1 Kondukcce

Přeměna, nebo také přenos tepla kondukcí, je založen na interakci mezi částicemi. Tím je míněno, že systémy, tělesa nebo látky, mezi nimiž přenos tepla kondukcí probíhá, musí být v přímém kontaktu, tzn. fyzicky se dotýkat. Jedná se o výměnu energie, resp. tepla mezi látkami, kterými mohou být buďto pevné látky, kapaliny nebo plyny. V kapalinách a plynech kondukcce probíhá díky kolizím a rozptylu molekul během jejich náhodného pohybu zatímco v pevných látkách je to díky kombinaci vibrací molekul v mřížce a energii volných elektronů [5].



Obr. 3.1: Přeměna tepla kondukcí

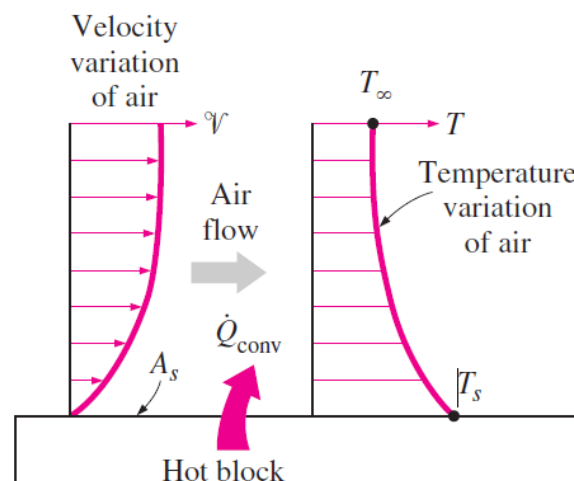
Jako příklad přeměny tepla kondukcí může sloužit plechovka vychlazeného nápoje položená uprostřed místnosti s pokojovou teplotou. Díky přenosu tepla mechanismem kondukce mezi místnostmi, resp. vzduchem v místnosti a hliníkovým obalem plechovky, se nápoj uvnitř plechovky za určitou dobu ohřeje na stejnou teplotu, jako je teplota vzduchu v místnosti. Míra přestupu tepla kondukcí z okolního vzduchu skrz plechovku k samotnému nápoji uvnitř je samozřejmě závislá na více faktorech. Jsou jimi materiál, ze kterého je plechovka vyrobena, tloušťka její stěny a ostatní její rozměry, stejně jako rozdíl teplot uvnitř a vně plechovky, tedy rozdíl teplot okolního vzduchu a nápoje v plechovce. Zobecněným příkladem přestupu tepla kondukcí je velká rovná deska o tloušťce L a ploše A s teplotou T_1 na jedné straně a T_2 na druhé straně desky podle obr. 3.1 [5].

Experimentálně bylo zjištěno, že hodnota Q_{cond} [W], vyjadřující množství přeneseného tepla, je přímo úměrná ploše desky A [m²], stejně jako rozdílu teplot T_1 [°C] méně T_2 [°C], a nepřímo úměrná tloušťce desky Δx [m] na základě vztahu (7), kde konstanta k [W/m·°C] značí termální konduktivitu daného materiálu, která vyjadřuje, jak moc je tento materiál schopen kondukovat, neboli vést teplo.

$$Q_{cond} = kA \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad (W) \quad (7)$$

3.1.2 Konvekce

Pokud se z povrchu pevného tělesa do jeho přilehlého plynného nebo kapalného okolí, které je v pohybu, uvolňuje energie formou tepla, je řeč o mechanismu přeměny tepla konvekcí. Konvekce je tedy kombinace kondukce a proudění okolní kapaliny. Čím větší bude rychlost proudění této kapaliny, tím větší bude hodnota vyjadřující míru konvekce. Obecně lze říci, že existují dva typy konvekce, přirozená a vynucená. Jelikož se tato diplomová práce zabývá měřením rychlosti proudění vzduchu, v dalším textu se budeme více věnovat principu vynucené konvekce, kdy pohyb okolní kapaliny je vynucen externí silou. Oproti tomu u přirozené konvekce pohyb okolní kapaliny vzniká pouze na základě vztlakových sil. Teplý vzduch totiž vždy stoupá vzhůru, resp. opačným směrem než působí gravitační zrychlení [5].



Obr. 3.2: Vynucená konvekce

Vynucená konvekce vzniká, pokud je kapalina nucena proudit přes povrch tělesa, na kterém tento jev vzniká, např. pomocí ofukování ventilátorem nebo prouděním větru. Pro vysvětlení vynucené konvekce je uveden příklad zahřátého tělesa, kolem něhož proudí studený

vzduch, na obr. 3.2. Nejprve je teplo z povrchu tělesa předáno tenké vrstvě vzduchu na povrchu tělesa mechanismem přeměny tepla kondukcí (kap. 3.1.1) a dále už je teplo z povrchu tělesa odvedeno mechanismem vynucené konvekce, který odvede teplý vzduch v okolí povrchu tělesa pryč, a ten je nahrazen novým, chladnějším proudícím vzduchem. Dokud je okolní vzduch nucen proudit, tento děj se neustále opakuje [5].

3.1.3 Radiace

Radiace je další z forem přeměny energie, resp. tepla. Jedná se o vyzařování tělesa ve formě elektromagnetických vln nebo fotonů, které je způsobeno změnami konfigurace atomů nebo molekul. V předchozích dvou kapitolách je uvedeno, že k uskutečnění přeměny tepla mechanismem konvekce nebo kondukcí je vždy zapotřebí obklopujícího média – kapaliny. Oproti tomu mechanismus radiace bude fungovat i ve vakuu, není tedy nijak vázán na prostředí, ale pouze na fyzikální vlastnosti daného tělesa. Jelikož se jedná u radiace ve fyzikální podstatě o elektromagnetické záření nebo fotony, má přenos tepla tímto mechanismem rychlost světla. Díky jevu radiace se např. dostává teplo ze slunce na povrch Země [5].

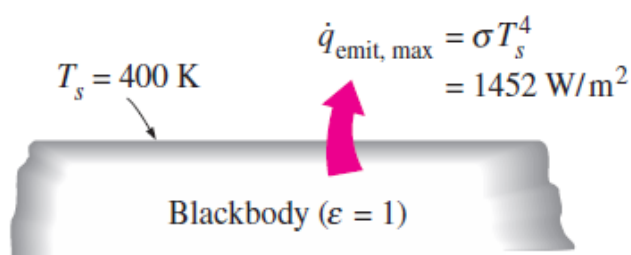
Dále se zaměříme pouze na termální radiaci, což je typ radiace spojený s teplotou těles a jejich teplotním vyzařováním. Každé těleso s teplotou vyšší, než je absolutní nula, tuto vyzařovací schopnost má. Existují totiž i další formy radiace, které nemají přímou spojitost s teplotou, jsou to např. elektromagnetická radiace, rentgenové paprsky, gamma záření, mikrovlny, rádiové vlny a další [5].

Maximální hodnota tepelné radiace $Q_{emit,max}$ [W], kterou těleso může vyzařovat ze svého povrchu o absolutní teplotě T_s [°C], je dána Stefan-Boltzmanovým zákonem podle vztahu (8), kde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ [W/m²·K⁴] je Stefan-Boltzmanova konstanta. Této hodnoty radiace dosahuje tzv. černé těleso. Všechna ostatní tělesa mají hodnotu termální radiace Q_{emit} menší, než je hodnota termální radiace černého tělesa při stejné teplotě, a tato hodnota je dána vztahem (9), kde ε [-] značí emisivitu povrchu tělesa, jejíž hodnota se pohybuje v rozsahu $0 \leq \varepsilon \leq 1$ a vyjadřuje, jak moc se daný povrch tělesa blíží černému tělesu, jehož emisivita je $\varepsilon = 1$ [5].

$$Q_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (8)$$

$$Q_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (9)$$

Další důležitou fyzikální vlastností povrchu tělesa je také jeho absorptivita, která se označuje symbolem α [-] a vyjadřuje schopnost povrchu tělesa termální radiaci naopak pohltnout. Stejně jako v případě emisivity je hodnota absorptivity $0 \leq \alpha \leq 1$ a u černého tělesa jakožto absolutního pohlcovače je tedy $\alpha = 1$. Na obr. 3.3 je znázorněna radiace černého tělesa při teplotě $T_s = 400$ [K] na ploše povrchu tělesa $A_s = 1$ [m²] [5].



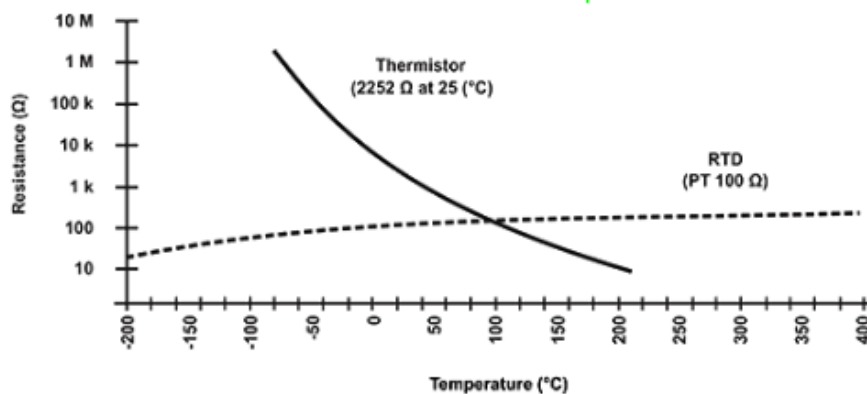
Obr. 3.3: Radiace černého tělesa

3.2 NTC termistor

Jelikož je jako hlavní funkční element, který slouží pro měření rychlosti vzduchu, v praktické realizaci této práce použit jako „žhavený drátek“ NTC termistor, jsou v této kapitole více dopodrobna popsány obecné fyzikální vlastnosti NTC termistoru a jeho základní charakteristiky v porovnání s jinými typy senzorů. Jedná se o nelineární součástku, proto zde uvádíme také příklady aproximací R-T křivky, popisující závislost mezi hodnotou elektrického odporu termistoru a hodnotou jeho teploty, které se běžně používají.

Jak už bylo zmíněno v kap. 2.6, zkratka NTC v překladu znamená záporný teplotní koeficient odporového materiálu. Nejvíce jsou NTC termistory používány jako odporové teploměry a také jako omezovače elektrického proudu. Velkou výhodou NTC termistorů je přibližně pětikrát větší citlivost než u silikonových teplotních senzorů (silistorů), jež se řadí mezi termistory typu PTC. Typický rozsah teplot, ve kterém se NTC termistory používají, je v rozmezí přibližně $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Již bylo zmíněno, že NTC termistor je nelineární součástka, tzn., že křivka závislosti elektrického odporu na teplotě nemá lineární průběh, nicméně s rozvojem digitální techniky (digitálního zpracování signálu) nevzniká s touto nelinearitou žádný zásadní problém. Pro výrobu NTC termistorů jsou jako materiály nejvíce používány keramika nebo polymery. Tyto materiály se od sebe vzájemně liší jinou teplotní odezvou a jinými materiálovými charakteristikami. Kromě NTC termistorů, které fungují ve zmíněném typickém rozsahu teplot, existují i speciální termistory pro použití v teplotách blízkých absolutní nule, což je hodnota $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Naopak existují i typy NTC termistorů pro měření v teplotách vyšších než je výše uvedený rozsah [6].

Důležitým a jedním z hlavních parametrů NTC termistoru je jeho teplotní citlivost, která se vyjadřuje jako procentuální změna hodnoty jeho elektrického odporu R na jednotku $^{\circ}\text{C}$. Typická hodnota teplotní citlivosti NTC termistoru se pohybuje v jednotkách procent na jeden stupeň Celsia. Na obr. 3.4 níže jsou znázorněny dvě křivky závislosti elektrického odporu na teplotě. Čárkovaná čára reprezentuje RTD senzor (Resistance Temperature Detector) PT 100 Ω vyrobený z materiálu platina, který je charakterizován kladným teplotním koeficientem. Plná čára reprezentuje NTC termistor, který je charakterizován záporným teplotním koeficientem.



Obr. 3.4: Charakteristická R-T křivka NTC vs. RTD

Vzájemným porovnáním křivek na obr. 3.4 lze vidět, že křivka NTC termistoru má přibližně pětikrát větší sklon v porovnání s křivkou teplotního senzoru PT 100 Ω , z čehož vyplývá, že NTC termistor má přibližně pětikrát větší teplotní citlivost než PT 100 Ω . Nicméně výhodou RTD senzorů oproti NTC termistorům je jejich mnohem větší rozsah pracovních

teplot, a to přibližně od - 200 °C až do 800 °C. Oproti tomu NTC termistory mají obecně menší velikost, rychlejší odezvu, jsou odolnější vůči otřesům a vibracím a lze je pořídit levněji.

3.2.1 Self-heating effect

Self-heating effect, v překladu (samoohřívací efekt) je jev, se kterým se u každého zapojení s termistorem bude uživatel potýkat, pokud termistorem teče elektrický proud. Jelikož je termistor ve své podstatě rezistor, který jak známo přeměňuje všechnu energii protékajícího elektrického proudu na teplo, toto uvnitř vznikající teplo termistor zahřívá a ovlivňuje tak přesnost měření. Do jaké míry měření ovlivňuje, závisí na množství termistorem protékajícího elektrického proudu, teplotním koeficientu termistoru, prostředí, v jakém je termistor umístěn, a na dalších parametrech. Skutečností, že elektrický odpor termistoru závisí na prostředí, v jakém je termistor umístěn, se využívá např. ve snímačích hladiny kapaliny v nádrži [6].

Self-heating effect je ve většině případů nežádoucí jev, který se uživatel snaží co nejlépe potlačit, nicméně v této diplomové práci je tohoto jevu právě naopak využito a je na něm založen princip funkce vyrobeného zařízení pro snímání rychlosti proudění vzduchu. Výpočtem a přidavnými elektrickými obvody je zajištěno, aby NTC termistor byl elektrickým proudem „žhaven“ na určitou konstantní teplotu, při níž ještě nehrozí jeho destrukce a zároveň je tato teplota vyšší, než je teplota okolního vzduchu. Proudící vzduch, který je chladnější, než je teplota žhaveného NTC termistoru, a jehož rychlost chceme měřit, přenosem tepla mechanismem vynucené konvekce zajistí ochlazování NTC termistoru tak, že jeho teplota má tendenci klesnout. Přídavné elektronické obvody, které mají za úkol udržet teplotu NTC termistoru na konstantní hodnotě, zvýší hodnotu elektrického proudu, resp. příkonu do NTC termistoru a „dožhaví“ NTC termistor na požadovanou konstantní hodnotu jeho teploty. Toto zapojení, při kterém je udržována teplota senzoru na konstantní, předem nastavenou hodnotu, se nazývá zapojení typu „Constant Temperature Anemometry“ (anemometrie s udržováním konstantní teploty) a značí se zkratkou CTA. Další typ zapojení, kterého se běžně využívá, se jmenuje „Constant Current Anemometry“ (anemometrie s udržováním konstantního elektrického proudu) a značí se zkratkou CCA. Ve výsledku jde o podobné principy s rozdílem toho, že u CTA přídavné elektronické obvody udržují na konstantní hodnotě teplotu senzoru, zatímco u CCA na konstantní hodnotě udržují elektrický proud senzorem protékající.

3.2.2 Tepelná kapacita a další důležité parametry NTC

Další důležitou vlastností, ať už NTC nebo jakéhokoliv jiného teplotního senzoru, je jeho tepelná kapacita. Vyjadřuje se většinou v jednotkách [mJ/°C] a vyjadřuje, kolik množství tepla je potřeba ke zvýšení teploty termistoru o 1 stupeň Celsia. Znat přesnou hodnotu tepelné kapacity senzoru je důležité zejména v aplikacích, kde je termistor použit jako omezovač proudu, jelikož údaj o tepelné kapacitě definuje také rychlost jeho odezvy. Dalšími faktory při výběru vhodného termistoru pro danou aplikaci jsou jeho parametry a to zejména [6]:

- nominální hodnota odporu (u NTC termistorů se udává pro teplotu 25 °C)
- teplotní časová konstanta
- konstanta tepelné disipace
- křivka závislosti hodnoty odporu na teplotě (R-T křivka)
- tolerance
- rozsah pracovních teplot
- materiálová konstanta β

3.2.3 Aproximace R-T křivky

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, vztah mezi elektrickým odporem termistoru a jeho teplotou je velmi silně nelineární a z tohoto důvodu je nutno v praxi použít nějaký druh aproximace. Nejjednodušší, ale také nejméně přesná aproximace je dána vztahem (10),

$$\Delta R = k \cdot \Delta T \quad (10)$$

kde k [$\Omega/^\circ\text{C}$] značí hodnotu záporného teplotního koeficientu, ΔT [$^\circ\text{C}$] značí teplotní rozdíl a ΔR [Ω] značí změnu elektrického odporu vyvolanou teplotním rozdílem ΔT . Jedná se o aproximaci 1. řádu, tudíž vzhledem k charakteru křivky teplotní závislosti aproximaci velmi nepřesnou, pokud je použita pro celý rozsah pracovních teplot. Pokud je však aproximace použita pouze pro velmi malý rozsah teplot, kde koeficient k je téměř konstantní, výsledek tohoto typu aproximace by mohl být uspokojivý. Nicméně vždy záleží na skutečnosti, o jakou aplikaci se jedná a jaký je požadavek na výslednou přesnost [6].

Další možná aproximace je podle vztahu (11) s materiálovou konstantou β [K], jejímž použitím lze dosáhnout přesnosti do $\pm 1^\circ\text{C}$ v rozsahu teplot od 0°C do 100°C . Materiálovou konstantu β většinou udává výrobce v produktové dokumentaci NTC termistoru a její hodnota se určuje experimentálně. Vztah pro aproximaci R-T křivky s použitím materiálové konstanty β je uveden níže (11),

$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (11)$$

kde $R(T)$ [Ω] značí elektrický odpor senzoru při teplotě T [K], $R(T_0)$ [Ω] značí elektrický odpor senzoru při teplotě T_0 [K], a e [-] značí Eulerovo číslo. Přes celý teplotní rozsah termistoru tato aproximace nedosahuje přesnosti větší než $\pm 5^\circ\text{C}$ [6].

Poslední používanou a zároveň nejpřesnější aproximací R-T křivky je Steinhart-Hart aproximace. Tato byla publikována v roce 1968 a její rovnice je uvedena ve vztahu (12),

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (12)$$

kde $\ln R$ značí přirozený logaritmus elektrického odporu R [Ω] při teplotě T [K], písmena A , B a C značí koeficienty získané z experimentálního měření a tyto koeficienty většinou výrobce udává v produktové dokumentaci. Steinhart-Hart aproximací lze zaručit přesnost okolo $\pm 0,15^\circ\text{C}$ v rozsahu teplot od -50°C do 150°C . Obecně lze dosáhnout i větší přesnosti, ale za předpokladu použití aproximace pro menší rozsah teplot [6].

3.2.4 Typy NTC termistorů

Existují tři typy NTC termistorů na základě rozdělení podle konstrukce. V dalším textu jsou krátce představeny hlavní parametry každého z nich. Na obr. 3.5 jsou pak pro porovnání ukázány všechny tři jednotlivé typy. Některé názvy nemají český ekvivalent, nebo by mohly znít zvláštěně při doslovném překladu, proto jsou pro výčet třech následujících typů termistorů použity originální názvy z anglického jazyka.

- Bead termistor

Přívodní vodiče z platinové slitiny tohoto typu termistoru jsou sintrovány, neboli spečeny s keramickým tělem termistoru. Obecně má tento typ termistoru rychlou odezvu, dobrou stabilitu a je schopen pracovat do vyšších teplot, než další uvedený typ termistoru Disk and Chip. Nevýhodou Bead termistorů je jejich křehkost, a proto se běžně zalévají do skla, aby se zabránilo mechanickému poškození. Vyrábí se ve velikostech zhruba 0.075 mm až 5 mm průměru [6]. Příklad termistoru typu Bead je uveden na obr. 3.5 vlevo.

- Disk and Chip termistor

Jejich přívodní vodiče jsou pokoveny. Díky větším rozměrům jsou pomalejší než typ Bead, ale tím pádem mají také vyšší disipační konstantu a snesou tedy větší proudové zatížení. Typickými rozměry jsou 0,25 mm až 25 mm v průměru [6]. Diskový termistor je uveden na obr. 3.5 v prostřední části.

- Glass encapsuled termistor

Tento typ termistoru je tvořen vzduchotěsným pouzdem, které zlepšuje časovou stabilitu senzoru a chrání jej před mechanickým poškozením samotného elementu. Glass encapsuled termistor je tedy v podstatě Bead termistor uzavřený ve skleněném pouzdře. Slouží pro měření při teplotách i nad 150 °C. Typické rozměry jsou od 0,4 mm do 10 mm v průměru [6]. Tento typ senzoru byl použit pro realizaci praktické části této diplomové práce a je uveden na obr. 3.5 v pravé části.



Obr. 3.5: 3 typy NTC termistorů rozděleny podle konstrukce, zleva: Bead, Disk and Chip, Glass encapsuled

3.2.5 Použitý NTC termistor

Snímací element, který přenáší rychlost proudícího vzduchu na elektrickou veličinu, je podstatou celého zařízení, a proto by při jeho výběru měly být zváženy všechny podstatné faktory ovlivňující výsledný produkt praktické části diplomové práce. Při teoretickém rozboru zabývající se podstatou této práce vznikla úvaha nechat si samotný snímač vyrobit. Po konzultaci s odborníky na problematiku drátkové anemometrie jsme však dospěli k závěru, že tato cesta není vhodná a přinesla by více komplikací než užitku, a proto bylo rozhodnuto pořídit již hotový snímač.

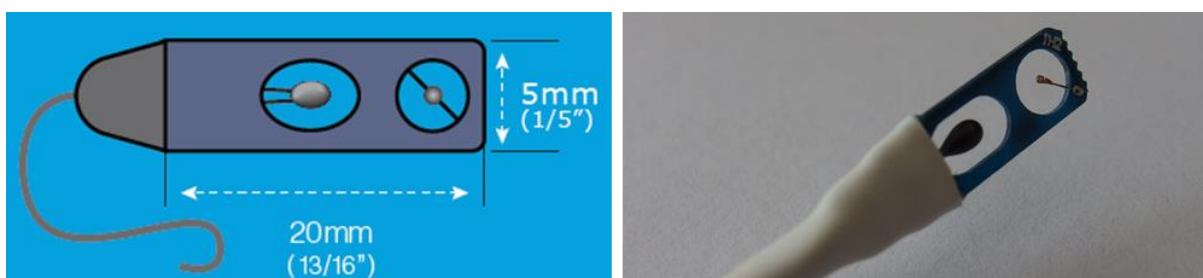
Na trhu dnes existuje několik firem zabývajících se problematikou měření proudění v kapalinách. Jedna z těchto firem má název Degree Controls, sídlí ve Spojených Státech a specializuje se na vývoj a výrobu zařízení pro snímání veličin v proudících kapalinách. Na webových stránkách této firmy byl nalezen typ senzoru, který svými vlastnostmi a parametry odpovídal požadavkům praktické části této diplomové práce. Žel firma tyto typy senzorů nabízí pouze jako součást celého zařízení a nebylo možné je koupit samostatně, nicméně po domluvě se zástupcem firmy pro prodej a marketing jsme obdrželi zmíněný senzor, který firma používá pro výrobu svých zařízení pro podobné aplikace jako je ta v této diplomové práci.

K samotným parametrům získaného senzoru: jedná se o PCB senzor (zkratka PCB je odvozena z anglického „printed circuit board“ což v překladu znamená „deska plošných spojů“, s českou používanou zkratkou DPS) na obr. 3.6, který je tvořen deskou plošných spojů s dvěma otvory, ve kterých jsou umístěny dva NTC termistory. Větší z nich slouží pouze k měření teploty proudícího vzduchu, kterou je pro vyhodnocování rychlosti proudění potřeba znát, a nominální hodnota jeho elektrického odporu udávaná výrobcem je 10 [kΩ]. Menší NTC termistor slouží pro měření rychlosti proudění vzduchu a výčet jeho fyzikálních parametrů daných výrobcem je proveden v tab. 1).

Tab 1) Parametry NTC termistoru sloužícího pro měření rychlosti proudění vzduchu

Parametr	Hodnota	Poznámka
Nominální hodnota odporu R (při 25°C)	10,74 kΩ ± 2,5 %	
Hodnota β	3450 K ± 2,0 %	z hodnoty odporu při 0°C a 100°C
Teplotní časová konstanta τ	0,6 až 1,5 s	v nehybném vzduchu
Teplotní disipační konstanta δ	0,2 až 0,3 mW/°C	v nehybném vzduchu
Operační teplotní rozsah	-50 až +250°C	

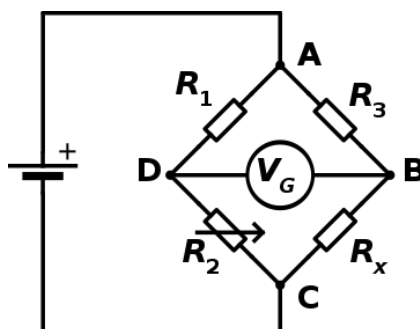
Na obr. 3.6 vlevo jsou uvedeny základní rozměry obdrženího PCB senzoru. Tloušťka desky plošných spojů, na které jsou oba NTC termistory umístěny, je přibližně 0.92 mm, průměr menšího NTC termistoru sloužícího pro měření rychlosti proudění vzduchu je přibližně 0.52 mm a průměr NTC termistoru sloužícího pro měření teploty proudícího vzduchu je přibližně 1.15 mm. Oba termistory jsou na desku plošných spojů připájeny. Součástí senzoru je stíněný přívodní kabel v délce 3 m, který obsahuje čtyři samostatné vodiče. Tři z těchto vodičů jsou izolovány, čtvrtý z nich je spojen se stíněním kabelu.



Obr. 3.6: PCB senzor výrobce Degree Controls, zleva: základní rozměry, fotografie senzoru

3.3 Typy zapojení senzoru

Běžně se lze setkat se dvěma hlavními typy elektrického zapojení měřícího elementu drátkové anemometrie. Obě dvě varianty byly již nastíněny v kap. 3.2.1. Zapojení typu CTA a CCA jsou obě můstková zapojení a popis jejich funkce si vysvětlíme v následujících dvou kapitolách. Můstkovým zapojením je myšleno zapojení měřícího elementu jako součásti Wheatstonova můstku na obr. 3.7, který se používá pro měření malých změn elektrického odporu (R_2), které převádí na změnu výstupního napětí (napětí mezi body B a D).

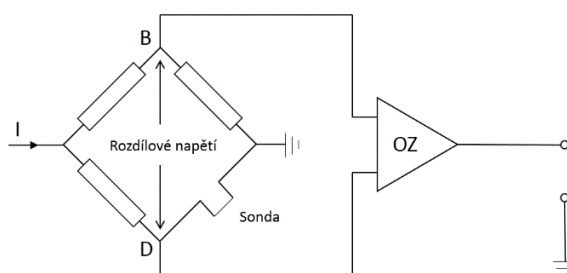


Obr. 3.7: Wheatstoneův můstek

3.3.1 Constant Current Anemometry

Princip tohoto typu zapojení podle obr. 3.8 je udržet elektrický proud protékající měřícím elementem na konstantní, předem stanovené hodnotě. Pokud je měřící element, kterým protéká elektrický proud, ochlazován proudícím vzduchem, toto proudění má za následek změnu jeho teploty, resp. změnu jeho elektrického odporu. Wheatstonův můstek, v němž je element zapojen, přestane být díky této změně elektrického odporu v rovnovážném stavu, tzn. napětí mezi body B a D (rozdílové napětí) je různé od nuly, což se projeví jako změna výstupního napětí operačního zesilovače, dále v textu pouze OZ, zapojeného jako komparátor.

Pomocí Ohmova zákona lze přepočítat tuto změnu napětí na výstupu OZ na změnu elektrického odporu měřícího elementu, kterou proudící vzduch způsobil a která je úměrná změně rychlosti proudícího vzduchu. Napětí na výstupu OZ lze na rozdíl od elektrického odporu jednoduše měřit a vyhodnotit tak rychlost proudícího vzduchu. Jak bylo již uvedeno, nutností u tohoto typu zapojení je měřit i teplotu proudícího vzduchu, jelikož tato teplota má vliv na to, jak moc se měřící element ochlazuje, a tedy na úroveň výstupního napětí OZ. Náčrt můstkového zapojení obvodu CCA je na obr. 3.8. Velkou nevýhodou tohoto typu zapojení je, že hrozí nebezpečí spálení měřícího elementu, protože zde není regulována jeho teplota a může dojít k přehřátí.

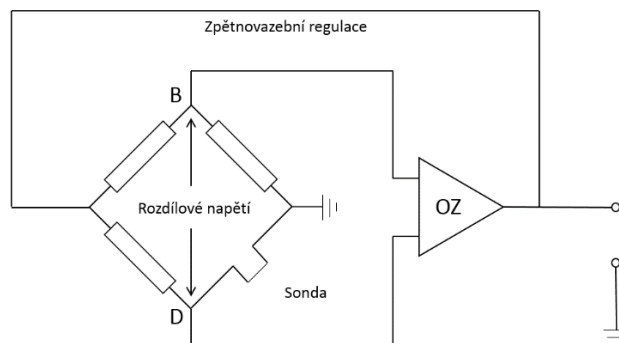


Obr. 3.8: Schéma můstkového zapojení metody CCA

3.3.2 Constant Temperature Anemometry

Druhým běžně používaným typem zapojení pro měření rychlosti proudění vzduchu je zapojení CTA na obr. 3.9, jehož princip je udržovat na konstantní hodnotě teplotu měřícího elementu, tzn. také konstantní elektrický odpor elementu, a měnící se veličina je tentokrát elektrický proud protékající měřícím elementem. Na základě teploty proudícího vzduchu a na základě rychlosti proudění tohoto vzduchu obvod typu CTA nastavuje takový elektrický proud měřícím elementem, aby byla zaručena jeho stálá teplota, tzn. jeho stálý elektrický odpor, přičemž následek tohoto udržování konstantní teploty je nulový rozdíl napětí mezi body B a D a tzv. vyvážený Wheatstonův můstek.

Rozdílové napětí OZ mezi body B a D je zpětnou vazbou udržováno na nulové hodnotě a tím je zajištěna konstantní teplota senzoru. Nastavení konkrétní hodnoty teploty, na jakou je měřící element žhaven, je provedeno pomocí rezistoru R_3 . Výhody zapojení CTA jsou vysoká frekvenční odezva a jednoduché použití, díky čemuž je upřednostňován před zapojením CCA. Nevýhodou je např. nutnost komplexnějšího elektrického obvodu nebo menší odolnost vůči šumu.



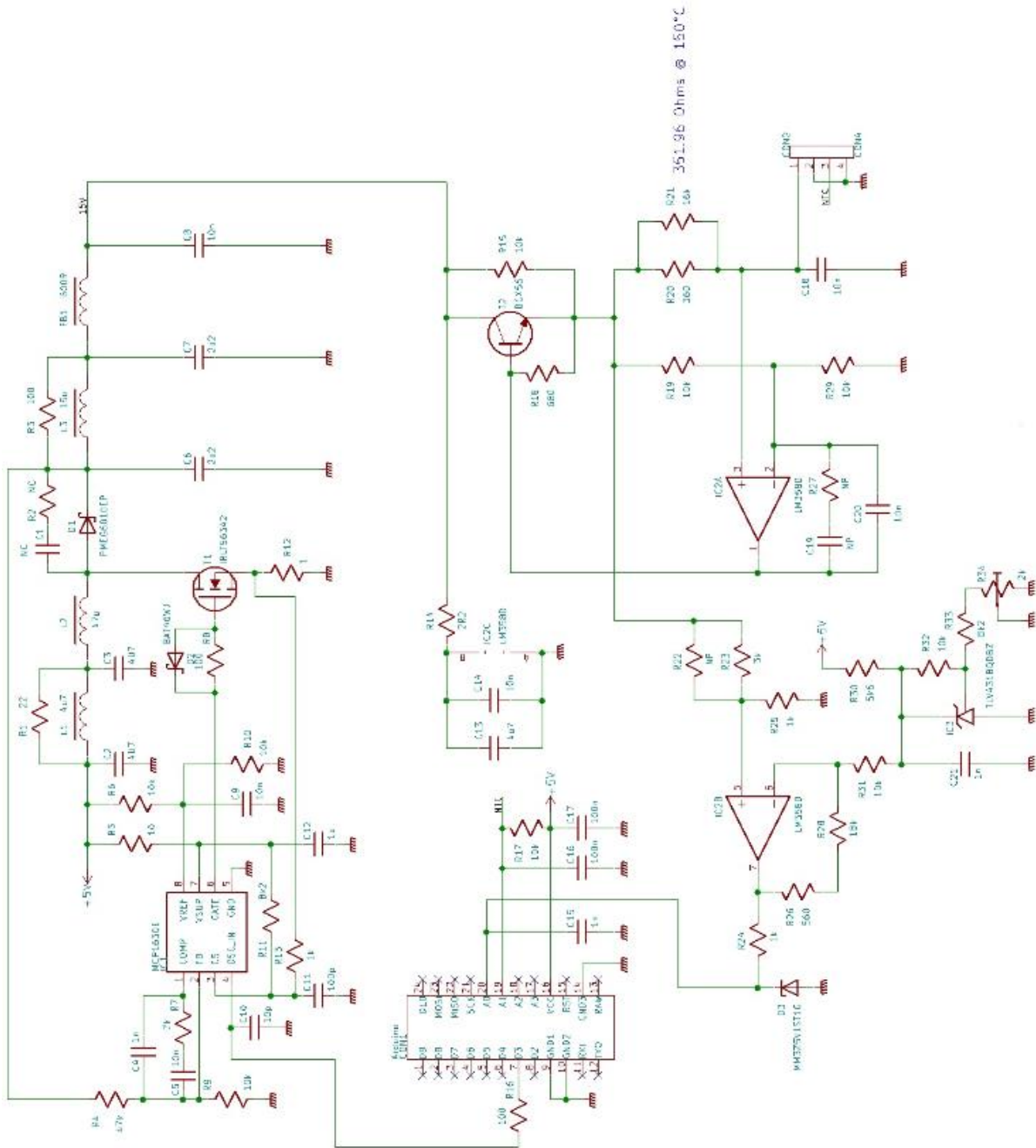
Obr. 3.9: Schéma můstkového zapojení metody CTA

4 NÁVRH ELEKTRONICKÉHO ZAPOJENÍ

V této kapitole je podrobněji rozebrán postup při návrhu elektronického schématu zapojení celého obvodu a je zde vysvětlena funkce dílčích částí elektronického obvodu rozdělených do jednotlivých podkapitol. Ke každé části jsou uvedeny nejdůležitější výpočty pro navržené řešení a v tomto krátkém úvodu jsou také zmíněny obecné informace o řešení elektronického obvodu, které bylo použito.

Při návrhu obvodu jsme se snažili o jednoduchost a zároveň požadovanou funkčnost, což je v praxi ten nejlepší možný přístup, který snižuje náklady na výrobu, ale ne na úkor kvality výrobku. Ať už při návrhu elektroniky, nebo jakékoliv části mechatronického zařízení, je třeba hledat takové řešení, které je nejjednodušší, ale zároveň vede k požadovanému cíli. Návrh elektronického schéma i DPS byl prováděn ve volně dostupném nástroji pro vytváření návrhu elektronických schémat a DPS pod názvem KiCAD. Jeho hlavní výhodou je uživatelská jednoduchost, široká komunita uživatelů a s tím spojené i široké portfolio dostupných knihoven elektronických součástek.

Jelikož nejcitlivější součástí na mechanické poškození u drátkové anemometrie bývá právě měřicí element, rozhodli jsme se vytvořit návrh elektronického obvodu, který bude fungovat na základě metody CTA, protože díky udržování konstantní teploty měřícího elementu je při správném návrhu u této metody potlačeno riziko jeho zničení příliš vysokou teplotou. Výstupem praktické části má být také jednoduchá softwarová aplikace zobrazující měřené údaje na obrazovce PC. Na základě požadavku na tuto softwarovou aplikaci zmíněnou výše, jsme zvolili Arduino, což je otevřená elektronická platforma, založená na uživatelsky jednoduchém hardware i software. Více k této platformě a k její implementaci v této práci je uvedeno v samostatné podkapitole. Napájení celého obvodu je řešeno USB kabelem, který zároveň slouží i pro přenos signálu z výsledného zařízení do PC aplikace. Na obr. 4.1 na další stránce je vyobrazeno elektronické schéma zapojení celého obvodu. Na dalších stránkách pak v jednotlivých podkapitolách následuje popis, výpočty a obrázky k jednotlivým dílčím částem elektronického obvodu.



Obr. 4.1: Celkové elektronické schéma zapojení obvodu

4.1.1 Wheatstoneův můstek

Nejprve se budeme věnovat samotnému Wheatsonovu můstku, který je tvořen rezistory R19, R20, R21, R29 a jako jeho poslední člen je použit NTC_V termistor zapojený mezi porty 1 a 2 konektoru CON2. Na základě vztahu mezi elektrickým odporem termistoru a jeho teplotou lze určit, jaké hodnotě odporu termistoru odpovídá teplota žhavení 150°C . Hodnota tohoto odporu byla určena z grafu závislosti $R = f(T)$, tzv. R-T křivky, na základě dat poskytnutých výrobcem senzoru uvedených v tabulce 1). Pokud je rozdíl napětí mezi body A a B Wheatsonova můstku označen U_{AB} , pak napětí $U_{AB} = 0$, pokud jsou si rovny hodnoty $R19 = R29$ a zároveň R20 paralelně s $R21 =$ odpor NTC_V termistoru. Teplota žhavení je nastavována pomocí hodnoty odporu rezistoru R20 a R21. Rezistor R21 zapojený paralelně s rezistorem R20 slouží pouze k přesnějšímu doladění požadované hodnoty odporu, resp. požadované hodnoty teploty žhavení NTC_V termistoru.

Předpokládejme stav, kdy odpor resp. teplota NTC_V termistoru je při konstantní teplotě okolního vzduchu a nulové rychlosti proudění tohoto vzduchu v ustáleném stavu. Teče jím ustálený elektrický proud, který způsobuje ohřátí termistoru díky jevu self-heating tak, že hodnota teploty žhavení je na konstantní hodnotě 150°C , které odpovídá elektrický odpor NTC_V termistoru 351.96Ω . V tomto případě je teplo z povrchu NTC_V termistoru uvolňováno přirozenou konvekcí.

Dále stanovme časový okamžik, při kterém začne být tento NTC_V termistor ofukován proudícím vzduchem o určité rychlosti. Díky proudícímu vzduchu a přeměně tepla vynucenou konvekcí má NTC_V termistor tendenci snížit svoji teplotu na hodnotu $<150^\circ\text{C}$, resp. zvýšit svůj elektrický odpor na hodnotu $>351.96\Omega$. Jakmile se hodnota elektrického odporu termistoru začne měnit, to způsobí nevyvážený poměr hodnot elektrických odporů R20 paralelně s R21 \neq odpor NTC_V , což má za následek, že rozdíl napětí mezi body A a B již není nulový, $U_{AB} \neq 0$. Změna rychlosti proudícího vzduchu má tedy za následek „nevyvážený“ Wheatstoneův můstek, který díky zapojení zpětnovazební regulace s OZ způsobí změnu napájecího napětí Wheatsonova můstku U_{OUT-WM} , které je přímo úměrné rychlosti proudícího vzduchu.

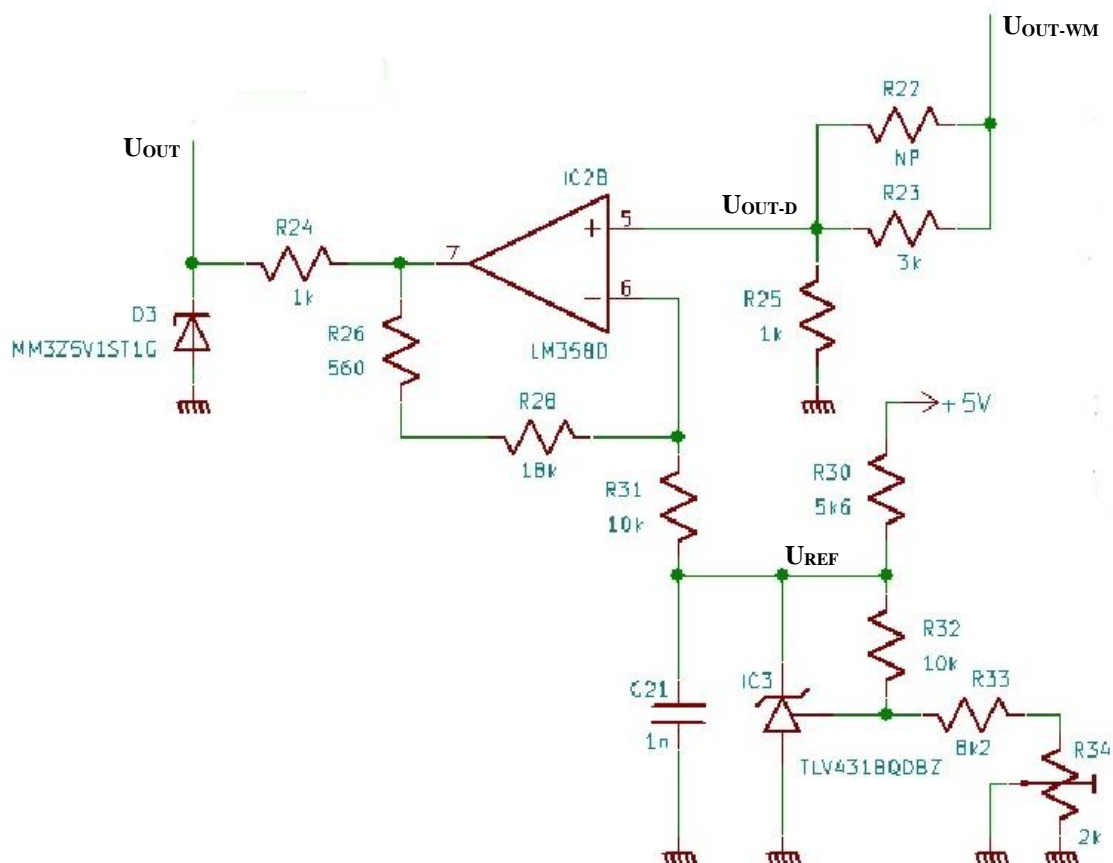
4.1.2 Komparátor

Na změnu napětí U_{AB} reaguje OZ. Ten je zapojený jako komparátor (porovnávač) a na základě rozdílu napětí mezi body A a B přivedeného na jeho vstupy 2 a 3 nastaví hodnotu napětí na jeho výstupu 1, která je úměrná rozdílu napětí U_{AB} a zároveň vnitřnímu zesílení OZ. Hodnotou výstupního napětí OZ je nastaven elektrický proud do báze tranzistoru T2, který reaguje na změnu zvýšením hodnoty elektrického proudu do Wheatsonova můstku a dorovnáním teploty NTC_V termistoru na požadovaných 150°C . Tranzistor T2 je popsán v další samostatné kapitole. Z předchozího textu vyplývá, že zapojení na obr. 4.2 funguje jako zpětnovazební regulace, která udržuje konstantní hodnotu teploty NTC_V na požadované hodnotě, nastavené pomocí hodnot odporů rezistorů R20 a R21. Na rychlost a přesnost regulace má vliv její typ. V tomto případě, vzhledem k charakteru měřené veličiny, byl použit zpětnovazební regulátor typu I, což znamená, že obsahuje pouze integrační složkou. Kondenzátor C20 ve zpětné vazbě OZ slouží jako zmíněná integrační složka, která má za následek omezení rychlosti regulace, tedy zásahu regulační smyčky. Akční veličina je v případě regulátoru s integrační složkou přímo úměrná integrálu regulační odchylky. Regulační odchylku tvoří rozdíl mezi výstupním napětím OZ a vstupním napětím na vstupu 2 OZ. Kondenzátor C19 a rezistor R27 nejsou na výsledné PCB osazeny. Do schématu byly však zahrnuty kvůli možnosti případného „doladění“ chování zpětnovazební regulace.

4.1.3 Tranzistor T2

Napětí z výstupu OZ je přivedeno na bázi tranzistoru T2. Pro shrnutí: pokud nastane změna okolních podmínek (rychlost nebo teplota proudícího vzduchu), nastane stav nevyváženého Wheatstonova můstku, což má za následek změnu výstupního napětí OZ a tím pádem změnu elektrického proudu do báze tranzistoru T2, který díky změně hodnoty emitujícího elektrického proudu „dožhaví“ NTCv termistor na požadovaných 150°C. Zvýšení elektrického proudu z emitoru tranzistoru T2 má za následek zároveň i změnu hodnoty výstupního napětí U_{OUT-WM} . Tímto způsobem, při kterém má změna rychlosti proudícího vzduchu za následek změnu elektrického proudu, který teče do Wheatstonova můstku, resp. změnu napětí na jeho horním uzlu, lze určit závislost mezi hodnotou této rychlosti a hodnotou tohoto výstupního napětí U_{OUT-WM} . Rezistor R15 slouží jako „START“ rezistor, aby při zapnutí obvodu došlo k počátečnímu nevyvážení Wheatstonova můstku a rozběhla se zpětnovazební regulace. Rezistor R18 slouží jako „proudová pomoc“ tranzistoru T2, kdy část elektrického proudu, který teče do Wheatstonova můstku, teče emitorem tranzistoru T2 a část rezistorem R18.

4.2 Signálové přizpůsobení



Obr. X: 4.3 2. část obvodu – Signálové přizpůsobení

Druhá část celého elektronického obvodu se nazývá „Signálové přizpůsobení“, protože přizpůsobuje úroveň výstupního napětí Wheatstonova můstku U_{OUT-WM} pro vstup A/D převodníku v další navazující části obvodu popsané v následující kapitole. Napěťový signál U_{OUT-WM} je totiž třeba přizpůsobit tak, aby se jeho minimální a maximální hodnota pohybovala co nejbližší rozsahu referenčního napětí A/D převodníku.

4.2.1 Dělič napětí

První část obvodu Signálového přizpůsobení na obr. 4.3 v pravém horním rohu tvoří odporový dělič napětí, který slouží ke snížení úrovně napětí signálu U_{OUT-WM} . Dělič je tvořen rezistory R22, R23 a R25. Rezistor R22 je zapojen paralelně s rezistorem R23 a slouží pouze k přesnějšímu nastavení dělicího poměru. Na výsledné DPS není rezistor R22 osazen. Dělicí poměr je tedy dán pouze hodnotou elektrického odporu rezistorů R23 a R25. Výstupní napětí děliče je označeno U_{OUT-D} a lze jej spočítat na základě hodnot jeho rezistorů podle vztahu (13):

$$U_{OUT-D} = U_{OUT-WM} \cdot \frac{R_{25}}{R_{23}+R_{25}} \quad [V] \quad (13)$$

$$Au = \frac{U_{AD-max}-U_{AD-min}}{U_{OUT-D-max}-U_{OUT-D-min}} \quad [-] \quad (14)$$

$$Au = 1 + \frac{R_{26}+R_{28}}{R_{31}} \quad [-] \quad (15)$$

Po dosazení hodnot rezistorů $R_{23} = 3k\Omega$ a $R_{25} = 1k\Omega$ do vztahu (13) je výsledkem, že výstupní napětí děliče U_{OUT-D} je se vstupním napětím děliče U_{OUT-WM} v poměru 1:4. Pokud je tedy např. na vstup děliče přivedeno napětí $U_{OUT-WM} = 5V$, výstupní napětí děliče bude rovno $U_{OUT-D} = 1.25 V$.

4.2.2 Neinvertující OZ

Výstupní napětí z Wheatstonova můstku U_{OUT-WM} , které se v celém měřicím rozsahu pohybuje mezi hodnotami přibližně 7 až 15V, jak jsme zjistili z experimentálního měření, bylo potřeba přizpůsobit na referenční napětí A/D převodníku, aby byl co nejlépe využit celý jeho rozsah.

Odporový dělič napětí, zmíněný v předchozí kapitole, z rozsahu výstupního napětí U_{OUT-WM} , který se pohybuje přibližně od 7 do 15 V, vytvoří rozsah napětí U_{OUT-D} přibližně od 1.75 do 3.75 V. Dále je tento rozsah napětí potřeba co nejvíce přiblížit rozsahu A/D převodníku 0 až 5 V. K tomu slouží neinvertující zapojení OZ s napěťovou referencí. Podíl těchto dvou rozsahů, jak je naznačeno ve vztahu (14), určí hodnotu zesílení OZ, kterou je potřeba nastavit, aby se výstupní napětí OZ U_{OUT} , vstupující do A/D převodníku v další části obvodu, pohybovalo v maximálním rozsahu přibližně 0 až 5V, tzn., že mezi maximální a minimální hodnotou napětí U_{OUT} , která se může objevit na vstupu A/D převodníku, nesmí být rozdíl větší jak 5V. Výpočet zesílení neinvertujícího zapojení OZ definuje vztah (15). Po dosazení hodnot rezistorů R26, R28 a R31 do vztahu (15) vyjde, že hodnota zesílení OZ je přibližně 2.8 [-].

4.2.3 Napěťová reference

Obvod s napěťovou referencí IC3 v pravém dolním rohu na obr. 4.3 zajišťuje udržování konstantního referenčního napětí U_{REF} pro OZ, což má za následek posunutí rozsahu výstupního napětí U_{OUT} přibližně od 0 do 5V. Např. pokud výstupní napětí děliče bude rovno minimální možné hodnotě $U_{OUT-D} = 1.75V$, výstupní napětí přivedené na vstup A/D převodníku bude posunuto na napěťovou úroveň $U_{OUT} = 0$ a takto analogicky pro celý rozsah výstupního napětí U_{OUT} . Pro rekapitulaci, celý možný rozsah napětí na Wheatsonově můstku U_{OUT-WM} 7 až 15V je nejdříve snížen odporovým děličem na hodnotu $U_{OUT-D} = 1.75$ až 3.75V, dále je zesílen OZ a posunut obvodem napěťové reference tak, aby se výstupní napětí U_{OUT} pohybovalo v celém měřicím rozsahu přibližně od 0 do 5V.

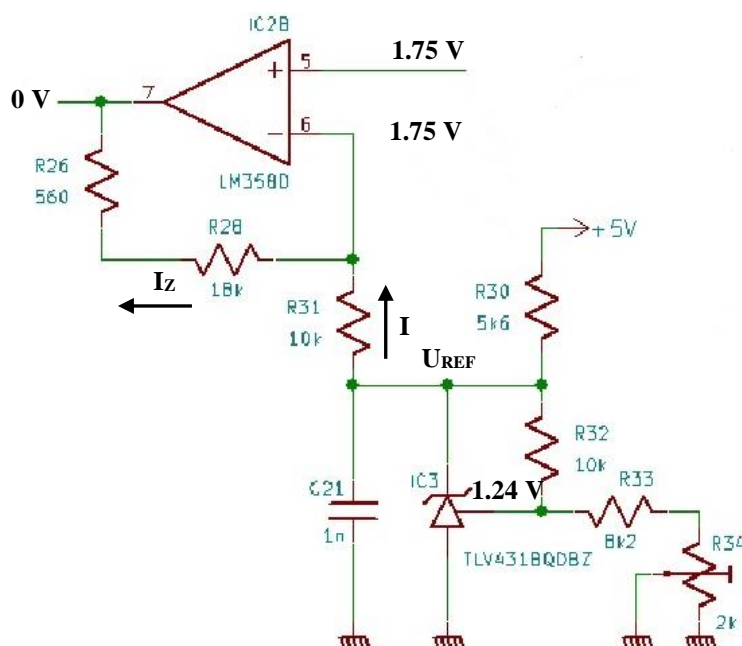
Rezistory R32, R33 a trimr R34 slouží k přesnému nastavení hodnoty napětí U_{REF} . Kondenzátor C21 slouží jako analogový filtr, který hodnotu referenčního napětí stabilizuje. Jaká hodnota napětí U_{REF} byla nastavena a podrobnější popis funkce obvodu s napěťovou referencí IC3 je vysvětlen na základě obr. 4.4. Pokud je napětí na neinvertujícím vstupu OZ minimální možné, tedy přibližně $U_{OUT-D} = 1.75 \text{ V}$, což odpovídá stavu, kdy má proudící vzduch nulovou rychlost a maximální dovolenou teplotu, jak bylo zjištěno z experimentálního měření, cílem je dostat na výstupu 7 OZ hodnotu $U_{OUT} = 0 \text{ V}$. Otázkou tedy zůstává, jakou hodnotu referenčního napětí U_{REF} nastavit, aby při této hodnotě a zároveň hodnotě napětí $U_{OUT-D} = 1.75 \text{ V}$ bylo na výstupu OZ napětí $U_{OUT} = 0 \text{ V}$.

Díky tomu, že vstupní elektrický odpor OZ je obrovský v porovnání s hodnotami elektrického odporu rezistorů ve zpětné vazbě OZ, je uvažováno, že elektrický proud na obr. 4.4 $I = I_Z$. Hodnota I_Z je vypočítána na základě vztahu (16), kdy při dosazení dostáváme $I_Z = 94 \mu\text{A}$. Tento elektrický proud musí vytvářet na základě Ohmova zákona úbytek napětí na rezistoru R31, který je $U_{R31} = 0,94 \text{ V}$. Hodnota referenčního napětí U_{REF} je pak dána součtem napětí na invertujícím vstupu OZ a hodnotou napětí na rezistoru R31 podle vztahu (17). Na základě předešlé úvahy byla získána hodnota referenčního napětí U_{REF} , kterou bylo nutno nastavit, aby se celý rozsah výstupního napětí U_{OUT} pohyboval v rozmezí přibližně 0 až 5V. Na základě této úvahy lze analogicky určit hodnotu výstupního napětí U_{OUT} pro jakékoliv vstupní napětí U_{OUT-D} .

$$I_Z = \frac{U_{OUT-D}}{R_{26} + R_{28}} \quad [\text{A}] \quad (16)$$

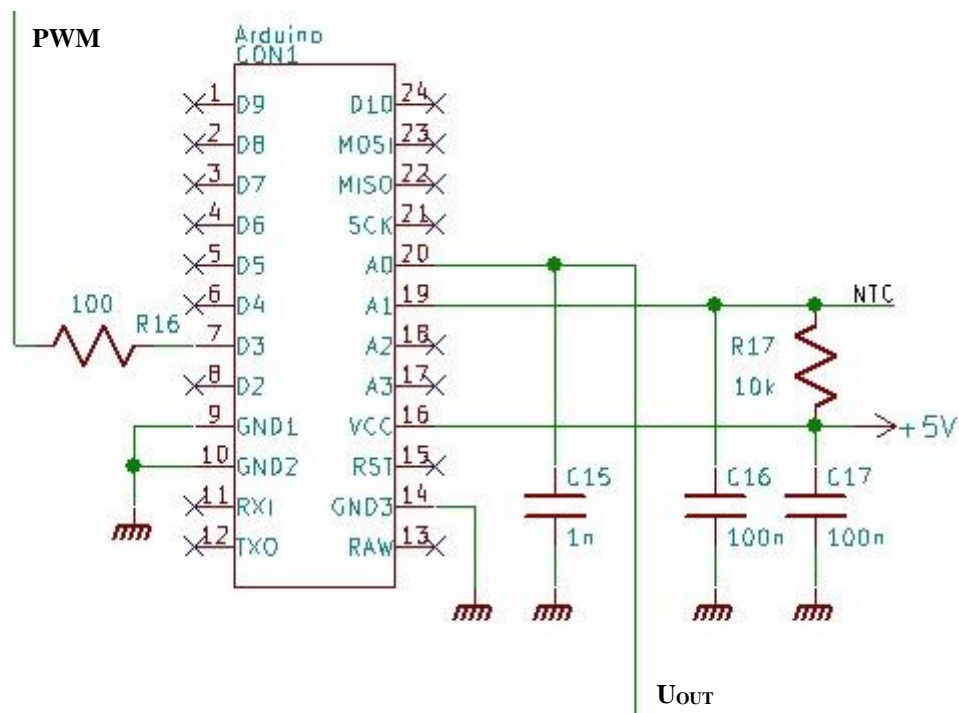
$$U_{REF} = U_{OUT-D} + R_{31} \cdot I_Z \quad [\text{V}] \quad (17)$$

Obvod napěťové reference IC3 TLV431BQDBZ slouží k tomu, aby udržoval na svém referenčním pinu napětí rovno 1.24 V s přesností 0.5 %.



Obr. 4.4: Funkce obvodu napěťové reference

4.3 Arduino Pro Micro



Obr. 4.5: 3. část obvodu – Arduino Pro Micro

Třetí část obvodu, na obr. 4.5, tvoří Arduino Pro Micro, které slouží jako A/D převodník pro analogový napěťový signál U_{OUT} , přivedený na pin A0, reprezentující rychlost proudícího vzduchu, a pro analogový napěťový signál z NTCt termistoru, přivedený na pin A1, reprezentující teplotu proudícího vzduchu. Dále Arduino Pro Micro slouží jako zdroj PWM signálu pro další, čtvrtou část obvodu popsanou v kapitole 4.4, stejnosměrný zvyšující měnič, která vytváří potřebnou úroveň napětí pro napájení Wheatstonova můstku a OZ. Jak už bylo zmíněno v úvodu 4. kapitoly, napájení celého obvodu je řešeno pomocí USB kabelu připojeného k PC, který slouží zároveň i k toku naměřených dat do vytvořené softwarové aplikace sloužící k zobrazování měřených hodnot v reálném čase na obrazovce PC.

Hlavním důvodem využití platformy Arduino v praktické části této práce je jeho jednoduchost, silná uživatelská podpora a cena za kterou jej lze pořídit, se zvážením dalších výhod, které tato platforma nabízí. K základním technickým parametrům desky Arduino Pro Micro: Obsahuje 8 bitový mikrokontrolér ATmega32U4 pracující na frekvenci 16MHz, jehož součástí jsou 4 kanály A/D převodníku s rozlišením 10 bitů, 5 digitálních PWM výstupů nebo např. hardwarovou sériovou komunikaci na pinech RX1 a TX1. Napájet jej lze dvěma způsoby, přímo z USB hodnotou napětí 5V, nebo externě na pinu RAW napětím maximálně do 12V. Jako poslední lze zmínit pin RST, který slouží k resetování desky Arduino Pro Micro. Resetování je zajištěno připojením pinu RST na zemnicí pin GND.

K potlačení self-heating efektu zmíněného v kap. 3.2.1 se běžně používá zapojení NTC termistoru do odporového děliče. K připojení NTC_T termistoru na kanál A1 A/D převodníku bylo tedy tohoto zapojení použito. Rezistor R17 je jedním koncem přiveden na pin napájecího napětí VCC a druhým koncem je připojen na NTC_T termistor, jehož druhý vývod je přiveden na společný zemnicí bod celé desky, jak je možno vidět na obr. 4.2 v kapitole 4.1. Nejvyšší možná hodnota elektrického proudu způsobující self-heating efekt poteče NTC_T termistorem

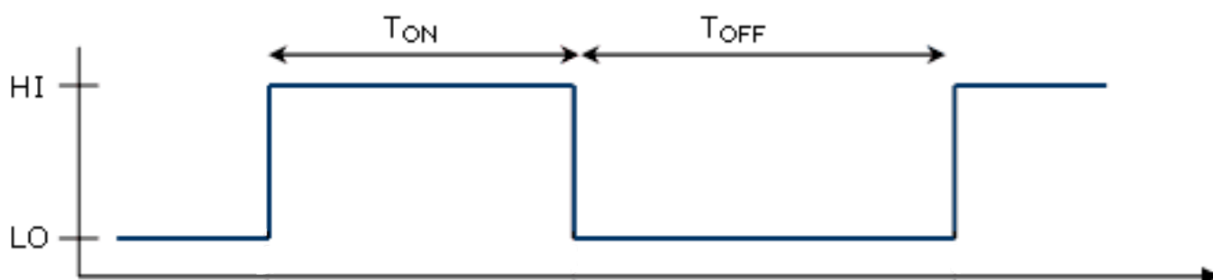
při minimální možné hodnot jeho elektrického odporu 4238Ω , který odpovídá stavu nejvyšší možné pracovní teploty proudícího vzduchu 50°C . Celkový elektrický odpor sériové kombinace rezistoru R17 a odporu NTC_T při této teplotě 50°C je podle vztahu (18) roven $R_{MIN} = 14\,238\ \Omega$ a z této hodnoty vyplývá maximální elektrický proud, který NTC_T termistorem při měření poteče. Hodnota tohoto proudu je dána podle Ohmova zákona vztahem (19), kdy po dosazení hodnot napájecího napětí a minimálního možné odporu R_{MIN} vychází $I_{MAX} = 0,351\ \text{mA}$, což je hodnota elektrického proudu, při které je self-heating efekt potlačen dostatečně na to, aby neovlivňoval průběhy měřených hodnot.

$$R_{MIN} = R_{17} + R_{\text{NTC}_T} \quad [\Omega] \quad (18)$$

$$I_{MAX} = \frac{V_{CC}}{R_{MIN}} \quad [\text{A}] \quad (19)$$

Kondenzátory C15 a C16 slouží pouze jako blokovací kondenzátory, které potlačí nežádoucí rušení o frekvencích vyšších, než jsou frekvence měřených signálů. Teplota je pomalu měnící se fyzikální veličina a hodnota C16 je vybrána tak, aby časová konstanta analogového filtru tvořeného blokovacím kondenzátorem neměla vliv na požadovanou rychlost měření a zároveň aby byly potlačeny v signálu objevující se náhodné záškuby a vyšší frekvence. Podobně je tomu u hodnoty kondenzátoru C15, sloužícího jako součást koncového analogového filtru pro napětí U_{OUT} . V případě měření rychlosti vzduchu, jež napětí U_{OUT} reprezentuje, změny v amplitudě signálu probíhají rychleji, než je tomu u měření teploty, a proto je hodnota kondenzátoru C15 stokrát menší než hodnota C16 a časová konstanta analogového filtru pro měření rychlosti vzduchu je tedy nastavena na 100krát menší hodnotu, než je tomu u měření signálu reprezentujícího teplotu. Kondenzátor C17 slouží jako blokovací kondenzátor pro rušení o vysokých frekvencích na napájecím napětí VCC.

Pin D3 slouží jako výstup PWM signálu pro vstup do obvodu v další, 4. části – stejnosměrného zvyšujícího měniče popsaného v kap. 4.4. Nákres průběhu PWM signálu generovaného Arduinem je na obr. 4.6. Frekvence PWM signálu je nastavena přibližně na hodnotu $f = 250\ \text{kHz}$, tzn. součet doby T_{ON} a T_{OFF} je roven hodnotě $1/f$. Střída je nastavena na přibližnou hodnotu 10%, tzn., že poměr doby T_{ON} vůči T_{OFF} je 1:10. V našem případě je hodnota PWM signálu HI rovna napájecímu napětí 5V a hodnota LO rovna napětí 0V, společnému uzemnění GND pro celou DPS. Kombinace rezistoru R16 s kondenzátorem C10 slouží jako analogový filtr, jehož časová konstanta je $\tau = 1\ \text{ns}$, který má za úkol odstranit přeskmy na nástupných a sestupných hranách PWM signálu.



Obr. 4.6: Ukázka PWM signálu

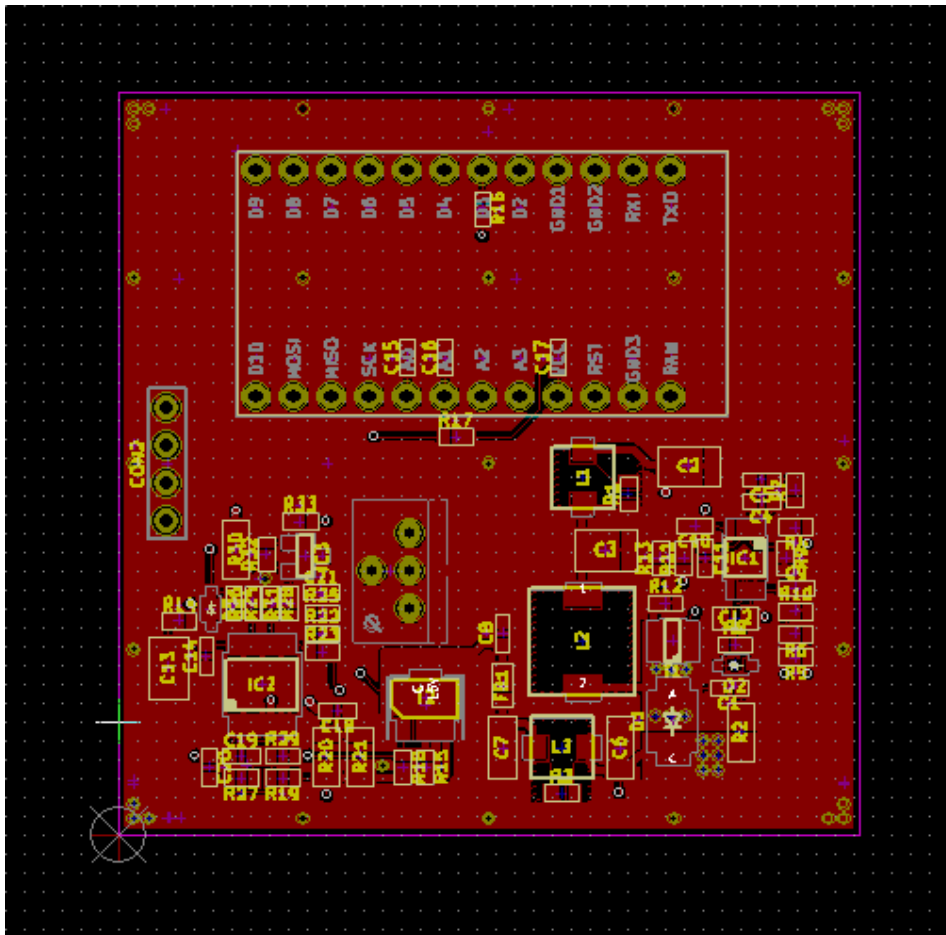
Řídící obvod IC1 je napájen také z USB hodnotou napětí 5V a toto napětí je pro napájecí vstup pin 7 filtrováno analogovým filtrem typu dolní propust' z důvodu nežádoucího rušení, které by mohl vytvářet, a zároveň aby nebyl sám rušen ostatními obvody.

Výkonová část zvyšujícího měniče neboli výkonové jádro, je tvořena indukčností L2, MOSFET tranzistorem T1, schottky diodou D1 a vstupním a výstupním kondenzátorem C3 a C6. Tato výkonová část je řídicím obvodem IC1 řízena metodou „peak current control“, tzn., že řídí špičkovou hodnotu elektrického proudu tekoucího indukčností L2, podle požadovaného výstupního výkonu měniče. K tomuto je potřebná smyčka řízení elektrického proudu, která je tvořena snímacím rezistorem R12, dále filtrem typu dolní propust' složeným z rezistoru R13 a kondenzátoru C11 a také rezistorem R11, který posouvá spolu s rezistorem R13 spodní hladinu signálu s cílem zmenšit napětí na snímacím rezistoru elektrického proudu R12 a tím i výkonové ztráty na tomto rezistoru. Dioda D2 a rezistor R8 řídí rychlost zapnutí a vypnutí tranzistoru T1 z důvodu omezení vyzařovaného rušení při spínání. Rezistor R8 umožňuje pozvolnější zapnutí a dioda D2 rychlé vypnutí tranzistoru T1.

Další obvody související s nežádoucím vyzařováním jsou vstupní filtr tvořený kondenzátory C2 a C3 a indukčností L1, a výstupní filtr tvořený kondenzátory C6 a C7 a indukčností L3. Filtr tvořený feritovou perlou FB1 a kondenzátorem C8 redukuje šum výstupního napětí na frekvencích řádově 10 až 100 MHz. Další obvod sloužící k redukci nežádoucího vyzařování je tzv. snubber, tvořený sériovou kombinací rezistoru R2 a kondenzátoru C1. Tyto součástky slouží k případnému dalšímu možnému potlačení nežádoucího vyzařování a na výsledné DPS nejsou osazeny.

5 NÁVRH, VÝROBA A OSAZENÍ DPS

Pro návrh designu desky plošných spojů, stejně jako pro návrh schématu, byl použit vývojový software KiCAD, ve kterém je možnost jednoduše přenést navrhnuté schéma do editoru plošných spojů. Ukázka hotového návrhu desky plošných spojů v editoru DPS v software KiCAD je níže na obr. 5.1.

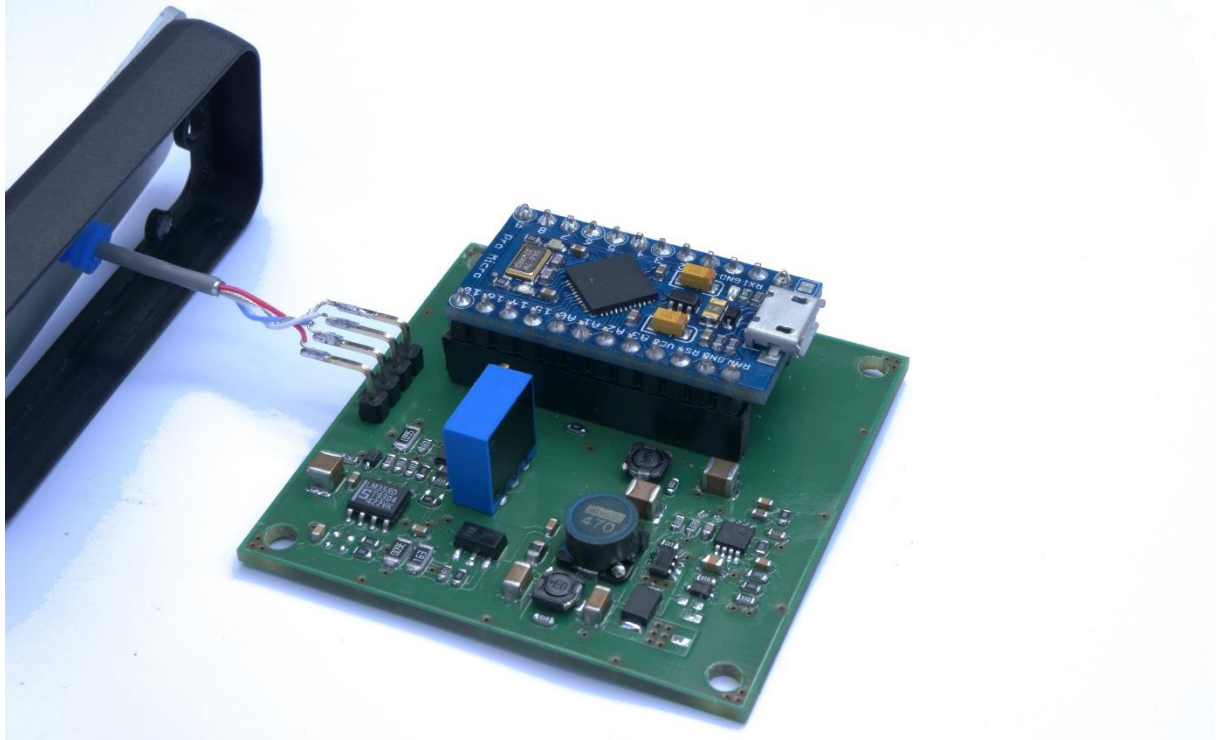


Obr. 5.1: Ukázka navrhnuté DPS v softwaru KiCAD

Při návrhu DPS byla zvažena zásadní kritéria ovlivňující výslednou funkci hotového obvodu, zejména bylo dbáno na umístění některých součástek, které mohlo negativně ovlivnit fungování výsledného zařízení. Např. se jedná o umístění kondenzátorů C15 a C16 – blokovacích kondenzátorů, které bylo potřeba umístit fyzicky co nejbližší vstupům do A/D převodníku, stejně jako kondenzátor C17 – blokový kondenzátor napájecího napětí VCC.

Na celé ploše desky je z obou stran „rozlita“ zemnicí plocha GND. Pro připojení 4 vodičů vedoucích k PCB senzoru s NTC_V a NTC_T termistorem byly na výsledné desce plošných spojů udělány 4 prokovené otvory se standardní roztečí 2.54 mm pro případ možného připojení konektoru nebo v opačném případě pro připájení vodičů PCB senzoru přímo. Na výsledné DPS jsme se rozhodli tyto 4 otvory osadit 4pinovým konektorem typu „kolíková lišta“, na jehož piny jsou vodiče PCB senzoru připájeny. Spojení destičky Arduino a vyrobené DPS je vyřešeno pomocí rozebíratelného spojení kolíkové a dutinkové lišty, aby byla ponechána možnost Arduino vyjmout a samostatně připojit k PC pro případnou úpravu nahraného kódu. Do výsledné DPS byly do rohů udělány 4 díry na distanční sloupky pro

případné připojení další elektroniky. Rozměry výsledné vyrobené DPS jsou 50 x 50mm, tloušťka je 1.9 mm. Výroba desky byla zadána firmě Gatema, specializující se na výrobu desek plošných spojů. Jak jsme mohli posoudit na základě zkušeností, DPS byla vyrobena velmi precizně. Fotografie vyrobené DPS osazené součástkami a s připojenou destičkou Arduino Pro Micro je na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Fotografie výsledné DPS osazené součástkami

DPS byla umístěna do hliníkové krabičky, v jejímž čele byl udělán otvor pro připojení USB kabelu. Z druhé strany krabičky byl pomocí gumové průchodky, zajišťující nepoškození přívodního stíněného kabelu senzoru, vyveden tento kabel. Jelikož bylo výsledné zařízení na obr. 5.2 kalibrováno pro konkrétní připojený PCB senzor, rozhodli jsme se použít nerozebíratelné spojení mezi vodiči senzoru a výslednou DPS, jak je vidět na obr. 5.2.

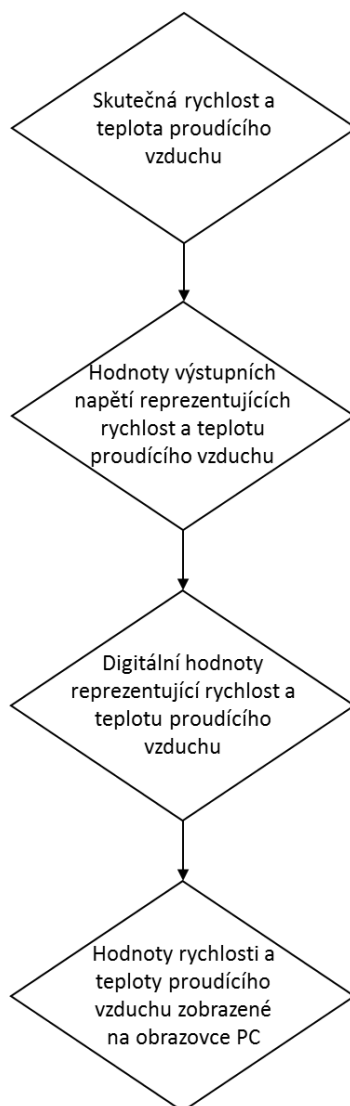


Obr. 5.3: Fotografie výsledného zařízení pro měření rychlosti vzduchu

6 KALIBRACE

Tato kapitola je věnována postupu při kalibraci zařízení. Bylo potřeba zjistit závislost mezi vstupem a výstupem soustavy, kterou tvoří celý měřicí řetězec znázorněný v blokovém diagramu na obr. 6.1. Vstupem do soustavy je v tomto případě skutečná teplota a rychlost proudícího vzduchu, výstupem je napětí U_{OUT} , jdoucí na kanál A0 A/D převodníku na obr. 4.5 v kap. 4.3, reprezentující hodnotu rychlosti vzduchu, resp. po digitálním zpracování je výstupem soustavy hodnota rychlosti vzduchu zobrazená v aplikaci na obrazovce PC.

Kalibrací tedy bylo potřeba určit hodnotu výstupního napětí U_{OUT} v závislosti na rychlosti a teplotě proudícího vzduchu, jímž je senzor ofukován, a získat tak rovnici této závislosti, aby mohlo dojít k digitálnímu zpracování pro použití dále v PC aplikaci. Existují dvě možnosti, jak data této závislosti pro výslednou aplikaci získat. První z nich je provést analytický výpočet, druhou možností je data získat experimentálně. V téměř všech případech, kdy to okolnosti dovolují, je lepší data získat z experimentálního měření. Experiment totiž automaticky zahrnuje všechny podmínky, které v některých případech do analytického výpočtu lze jen těžko zahrnout.



Obr. 6.1: Blokový diagram kalibračního řetězce

6.1 Získání dat

V následujících dvou podkapitolách je přiblížen analytický i experimentálního přístup získání kalibračních dat pro výsledné zařízení. Jelikož bylo k dispozici vybavení pro získání dat experimentálním přístupem, data pro výslednou PC aplikaci byla získána tímto způsobem.

6.1.1 Popis analytického přístupu

NTC_v termistor lze při zjednodušení z hlediska mechanismu přestupu tepla považovat za kuličku s teplotou 150°C, ochlazovanou proudícím vzduchem o rychlosti v rozmezí 0 až 10 m/s a teplotou tohoto vzduchu v rozmezí 10 až 50°C. Z principu mechanismu přeměny tepla se jedná o jev přestupu tepla vynucenou konvekcí přes povrch tělesa tvaru koule. Přenos tepla radiací má na výslednou hodnotu celkového přestupu tepla tak malý vliv, že jej lze v tomto případě zanedbat. Jelikož byly změřeny hodnoty výstupního napětí U_{OUT} , reprezentujícího hodnoty rychlosti proudění vzduchu pro pokojovou teplotu 23°C, v celém rozsahu rychlostí 0 až 10 m/s, zahrnuje analytický výpočet i část experimentálního měření. Nicméně je tento přístup stále považován za analytický, vzhledem k poměru hodnot získaných experimentálně a hodnot získaných analyticky. Postup analytického výpočtu vedoucího k získání hodnot výstupního napětí U_{OUT} je popsán v této kapitole na následujících řádcích.

Z důvodu toho, že pro kalibraci byl využíván průtokoměr měřící průtok vzduchu, který je přepočítán na rychlost proudění vzduchu až posléze v softwaru PC aplikace, bude dále uváděna v tabulkách a textu také hodnota průtoku STD [l/min], přičemž pro představu v souvislosti s touto prací hodnota STD = 10 l/min odpovídá přibližně rychlosti $v = 0.5$ m/s.

Nejprve byla vytvořena tabulka s hodnotami teplotního koeficientu přestupu tepla vynucenou konvekcí přes povrch tělesa koule v závislosti na rychlosti, resp. průtoku, a teplotě proudícího vzduchu. Číselná hodnota teplotního koeficientu h byla vypočítána pomocí vztahu (20), pro každou kombinaci hodnot rychlosti, resp. průtoku a teploty proudícího vzduchu, jak je naznačeno v tab. 2). Tímto způsobem vznikla matice hodnot teplotního koeficientu vynucené konvekce h v závislosti na rychlosti, resp. průtoku a teplotě proudícího vzduchu $h = f(STD, T)$. Ukázka části této matice s hodnotami teplotního koeficientu h je v tab. 2).

Tab 2) Závislost hodnoty teplotního koeficientu vynucené konvekce $h = f(STD, T)$

T [°C], STD[l/min]	0	10	20	30	40	50	v →
20	103,48	217,38	267,91	307,50	341,35	371,49	...
23	104,40	218,23	268,73	308,30	342,12	372,25	...
25	104,96	218,61	269,03	308,52	342,29	372,36	...
30	106,48	220,00	270,35	309,80	343,52	373,55	...
35	107,96	221,41	271,72	311,14	344,84	374,85	...
T ↓	...	...	...	...	...	...	...

Dále byla pro každou hodnotu v matici hodnot h v tab. 2) vypočítána průměrná hodnota přestupu tepla Q_{ave} [W], vyplývající z Newtonova ochlazovacího zákona pomocí vztahu (21),

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (20)$$

kde k je teplotní konduktivita vzduchu, D je průměr NTC_v termistoru a Nu je Nusseltovo číslo,

$$Q_{ave} = hA_S(T_S - T_{AMB}) \quad [W] \quad (21)$$

kde A_S je plocha povrchu NTC_V termistoru, T_S je teplota povrchu NTC_V termistoru a T_{AMB} je teplota proudícího vzduchu.

Jelikož je NTC termistor ve své fyzikální podstatě rezistor a protékajícím elektrickým proudem způsobené vznikající teplo se u rezistoru rovná jmenovité hodnotě jeho odporu R , vynásobené hodnotou druhé mocniny jím protékajícího elektrického proudu I podle vztahu (22), lze říci, že hodnota průměrného přestupu tepla se rovná $Q_{ave} = Q$,

$$Q = R \cdot I^2 \quad [W] \quad (22)$$

kde Q [W] je teplo způsobené NTC termistorem protékajícím elektrickým proudem.

Dalším krokem pro získání hodnoty výstupního napětí U_{OUT} analytickým výpočtem bylo použít již zmíněné rovnosti $Q_{ave} = Q$. Byla tedy vytvořena tab. 3) s hodnotami Q_{ave} pro celý rozsah rychlostí, resp. průtoku vzduchu 0 až 170 l/min a celý rozsah teplot proudícího vzduchu 10 až 50°C.

Tab 3) Závislost hodnoty průměrného přestupu tepla $Q_{ave} = f(STD, T)$

T [°C], STD[l/min]	0	10	20	30	40	50	v →
20	0,0106	0,0222	0,0273	0,0314	0,0348	0,0379	...
23	0,0104	0,0218	0,0268	0,0307	0,0341	0,0371	...
25	0,0103	0,0215	0,0264	0,0303	0,0336	0,0365	...
30	0,0100	0,0207	0,0255	0,0292	0,0324	0,0352	...
35	0,0097	0,0200	0,0245	0,0281	0,0311	0,0338	...
T↓	...	...	...	...	...	...	...

Dalším krokem bylo vytvoření tab. 4), která obsahuje matici hodnot odmocnin rozdílu sousedních hodnot Q_{ave} z tab. 3), vždy pro jeden konkrétní sloupec rychlosti, resp. průtoku proudícího vzduchu. Výpočet vychází z rovnosti $Q_{ave} = Q$, kterou po dosazení definuje vztah (23). Protože podle Ohmova zákona je napětí U [V] přímo úměrné elektrickému proudu I [A], podle rovnice (24), mezi rovnicemi (23) a (24) je úměra na základě hodnoty druhé mocniny elektrického proudu I . Z toho vyplývá, že vztah mezi napětím na NTC_V termistoru a hodnotou Q_{ave} . Napětí U_{OUT} na NTC_V termistoru bude úměrné odmocnině hodnoty Q_{ave} pro danou teplotu a danou rychlost, resp. průtok, $U \approx \sqrt{Q_{ave}}$.

Pro pochopení významu hodnot v tab. 4) je uveden příklad. Buňka v prvním řádku a prvním sloupci tab. 4) obsahuje hodnotu odmocniny rozdílu hodnot Q_{ave} pro teplotu 20°C méně Q_{ave} pro teplotu 23°C při hodnotě rychlosti, resp. průtoku vzduchu 0 l/min. Buňka v druhém řádku a prvním sloupci tab. 4) obsahuje hodnotu odmocniny rozdílu hodnot Q_{ave} pro teplotu 23°C méně Q_{ave} pro teplotu 25°C při hodnotě rychlosti, resp. průtoku vzduchu 0 l/min. Analogicky takto vznikla celá matice hodnot v tab. 4).

$$Q_{ave} = R \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (23)$$

$$U = R \cdot I \quad [\text{V}] \quad (24)$$

Posledním krokem bylo na základě procentuálního rozdílu sousedních hodnot odmocnin z tab. 4) vždy pro jeden konkrétní sloupec rychlosti, resp. průtoku proudícího vzduchu, vytvořit finální matici hodnot výstupního napětí U_{OUT} , získanou analyticky, reprezentující hodnoty rychlosti, resp. průtoku proudícího vzduchu v celém rozsahu jeho teplot 10 až 50°C. Část matice těchto hodnot výstupního napětí U_{OUT} je v tab. 5), přičemž při vytváření této tabulky byly uvažovány hodnoty výstupního napětí U_{OUT} naměřené experimentálně při teplotě 23°C jako reference, od které se odečetla nebo přičetla procentuální hodnota tak, aby hodnoty v tab. 5), ležící v sousedních buňkách ve stejném sloupci, byly ve stejném poměru, jako jsou hodnoty ležící v sousedních buňkách ve stejném sloupci v tab. 4).

Tab 4) Odmocnina rozdílu sousedních hodnot Q_{ave}

T [°C], STD[l/min]	0	10	20	30	40	50	v →
20	1,208	1,401	1,432	1,448	1,459	1,468	...
23	1,029	1,193	1,220	1,235	1,245	1,252	...
25	1,637	1,873	1,912	1,934	1,948	1,958	...
30	1,708	1,920	1,955	1,974	1,987	1,997	...
35	1,780	1,986	2,021	2,040	2,053	2,062	...
T↓	...	...	...	...	...	...	...

Tab 5) Hodnota výstupního napětí U_{OUT} získaná analyticky

T [°C], STD[l/min]	0	10	20	30	40	50	v →
20	0,8066	1,8232	2,2335	2,4916	2,7140	2,9223	...
23	0,7970	1,7980	2,2020	2,4560	2,6750	2,8800	...
25	0,7888	1,7765	2,1751	2,4257	2,6417	2,8439	...
30	0,7759	1,7433	2,1335	2,3788	2,5902	2,7882	...
35	0,7626	1,7098	2,0918	2,3318	2,5388	2,7326	...
T↓	...	...	...	...	...	...	...

6.1.2 Popis experimentálního přístupu

Druhou možností, jak zjistit závislost mezi vstupními a výstupními veličinami, bylo provést experiment, což znamenalo změřit pro celý rozsah pracovních teplot 10 až 50°C a celý rozsah rychlostí proudění, resp. průtoku vzduchu 0 až 170 l/min, hodnotu výstupního napětí U_{OUT} .

K nastavení přesné rychlosti proudění, resp. průtoku vzduchu byla vyrobena kalibrační soustava, která je popsána v kap. 6.2. Zajistit teplotu proudícího vzduchu, vždy udržovanou na konstantní hodnotě v celém rozsahu rychlosti by nebylo možné bez zařízení, které slouží k udržování konstantní hodnoty teploty vzduchu. Naštěstí byl tento problém vyřešen pomocí tepelné komory ve zkušebně nejmenovaného českého výrobce vnějšího osvětlení vozidel, ve které se testují nové série předních světlometů a zadních lamp na renomované značky vozidel. Vysvětlení celého průběhu experimentálního získávání dat je rozepsáno do následujících kapitol, včetně kapitoly 6.2, ve které je popsána kalibrační soustava.

6.2 Kalibrační soustava

Kalibrační soustava na obr. 6.1 je složena z několika částí, které jsou popsány v následujícím textu této kapitoly. Tato soustava zajišťuje známou hodnotu průtoku proudícího vzduchu nastavenou pomocí ventilátoru a měřenou pomocí průtokoměru od firmy TSI. Celá soustava byla v průběhu kalibračního měření uzavřena v izolované tepelné komoře společně s PCB senzorem, umístěným v otvoru kalibrační PVC trubice. Veškerá ostatní elektronika a měřicí zařízení byla během měření umístěna vně tepelné komory a nebyla tak teplotou ovlivňována.



Obr. 6.1: Kalibrační soustava

Kalibrační měřicí soustava na Obr. 6.1 výše je složena celkem z 5 částí, z levé strany to jsou:

- PVC trubice s otvorem pro PCB senzor
- přechodka PVC trubice – průtokoměr
- průtokoměr
- příruba na ventilátor
- ventilátor

PVC trubice s otvorem pro senzor

Délka PVC trubice je 0.5 m, vnitřní průměr 21 mm, tloušťka stěny 2 mm. Byla vybrána transparentní trubice pro lepší kontrolu přesného umístění PCB senzoru v trubici. Do trubice byl vyvrtán otvor a přizpůsoben tak, aby do něj šla lehce umístit hlavice PCB senzoru. K zafixování hlavice PCB senzoru v trubici v průběhu kalibračního měření v tepelné komoře sloužila obyčejná izolační páska.

Přechodka PVC trubice – průtokoměr

Tato plastová přechodka byla navržena tak, aby vnitřním průměrem navazovala na okolní části kalibrační soustavy, tzn. PVC transparentní trubice z levé strany a trubice průtokoměru ze strany pravé. Přechodka byla vytisknuta na 3D tiskárně z materiálu PLA, jehož teplota měknutí je okolo 60 °C a byla tedy zaručena stálá pevnost během celého kalibračního měření. Objem materiálu v celém 3D objemu přechodky je 20 %, zbytek tvoří vzduch.

Průtokoměr

Průtok proudícího vzduchu zaznamenaný průtokoměrem TSI byl považován za reálný průtok vzduchu, na základě kterého bylo zařízení kalibrováno. Na LCD displeji průtokoměru byly zobrazovány hodnoty aktuálního průtoku vzduchu STD v jednotkách [l/min]. Tento průtok byl posléze na základě hodnoty atmosférického tlaku, průřezu trubice průtokoměru a dalších veličin přepočítán na rychlost proudícího vzduchu v [m/s].

Příruba na ventilátor

Obdobným způsobem jako přechodka byla navržena a vytisknuta i příruba na ventilátor. Ten byl k přírubě připevněn pomocí 4 šroubů M4. Otvory pro šrouby byly upraveny závitníkem.

Ventilátor

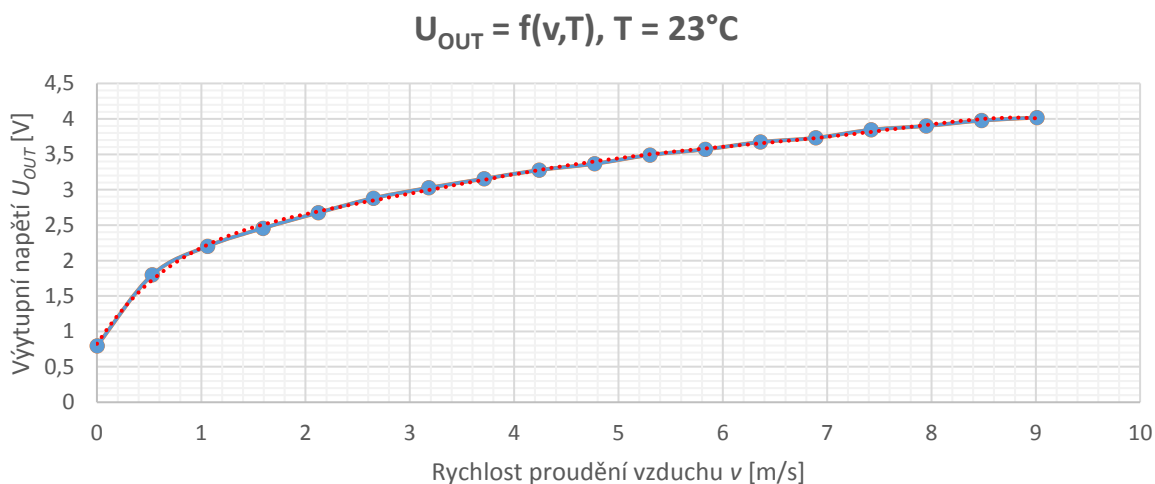
Pro realizaci proudění vzduchu byl použit stejnosměrný ventilátor od výrobce SANYO DENKI. Ovládání rychlosti otáčení lopatek ventilátoru bylo uskutečněno pomocí amplitudy stejnosměrného napětí regulovatelného zdroje. Druhou možností by bylo použití regulace otáček pomocí PWM signálu. Jmenovité napětí ventilátoru je 12 V, jmenovitý elektrický proud 1,52 A a maximální otáčky ventilátoru jsou udávány $25\,000\text{ min}^{-1}$, jak se lze přesvědčit v produktové dokumentaci výrobce. Pokrýt celý požadovaný rozsah rychlostí proudění vzduchu 0 až 10 m/s resp. průtoku 0 až 170 l/min tímto ventilátor tedy nebylo problémem.

6.3 Průběh kalibrace – pokojová teplota

Než začal samotný proces kalibrace v tepelné komoře, bylo provedeno zkušební měření při pokojové teplotě 23 °C , které je dále více popsáno v této kapitole a které již bylo zmíněno v kapitole 6.1.1 a bylo použito jako reference pro analytický přístup získání kalibračních dat.

Nejprve byla umístěna hlavice PCB senzoru do otvoru PVC transparentní trubice kalibrační soustavy tak, aby NTC_V senzor byl přibližně v polovině vnitřního průměru této trubice. Poté byl na výstupní pin s napětím U_{OUT} prototypové DPS, která sloužila k účelu kalibrace a testování, připojen voltmetr a paralelně k němu také digitální osciloskop pro sledování průběhu napětí hodnoty U_{OUT} v reálném čase a pro pozdější přesnější vyhodnocení měřených hodnot tohoto napětí. Jako poslední byl připojen zdroj napájecího napětí prototypového obvodu, jelikož napájení pomocí USB je řešeno až na finální vyrobené DPS.

Při nastavené nulové hodnotě rychlosti, resp. průtoku proudícího vzduchu a okolní teplotě 23 °C byla změřena a zaznamenána ustálená hodnota výstupního napětí na voltmetru $U_{\text{OUT}} = 0,771\text{ V}$. Zároveň byla také uložena data z průběhu napětí U_{OUT} na digitálním osciloskopu. Dále bylo postupováno zvýšením rychlosti, resp. průtoku vzduchu na hodnotu $\text{STD} = 10\text{ [l/min]}$, pomocí zvýšení hodnoty napětí na ventilátoru. Opět byla zaznamenána hodnota výstupního napětí na voltmetru, tentokrát $U_{\text{OUT}} = 1,798\text{ V}$ a znovu uložen průběh napětí U_{OUT} z osciloskopu. Postupným zvyšováním hodnoty rychlosti proudění, resp. průtoku vzduchu byly změřeny a zaznamenány hodnoty výstupního napětí U_{OUT} v celém požadovaném měřicím rozsahu rychlostí od 0, přibližně do 10 m/s, resp. průtoku od 0 do 170 l/min.



Obr. 6.2: Graf závislosti výstupního napětí U_{OUT} na rychlosti proudění vzduchu při teplotě proudícího vzduchu $T = 23\text{ °C}$

Hodnota výstupního napětí U_{OUT} z voltmetru sloužila pouze pro orientaci, protože při hodnotě rychlosti proudícího vzduchu větší než $v = 0$ m/s hodnota napětí na voltmetru lehce oscillovala, ale pouze přibližně do 1% rozdílu mezi maximální a minimální hodnotou. Oscilace byla pravděpodobně způsobena turbulencemi vzduchu. Z tohoto důvodu, pro větší přesnost, byl uvažován průměr hodnot výstupního napětí U_{OUT} , určený z průběhu naměřených a uložených dat z osciloskopu. Zmíněný průměr hodnot výstupního napětí U_{OUT} byl vytvořen pro ustálený stav výstupního napětí a časový okamžik v délce trvání $t = 10$ s. Z naměřených a zpracovaných dat byla vytvořena křivka závislosti změřeného výstupního napětí U_{OUT} na rychlosti, resp. průtoku proudícího vzduchu pro hodnotu teploty proudícího vzduchu $T = 23$ °C. Křivka této závislosti je uvedena v grafu na obr. 6.2. Naměřené hodnoty byly pro zajímavost proloženy polynomem, kterému odpovídá červená tečkovaná čára.

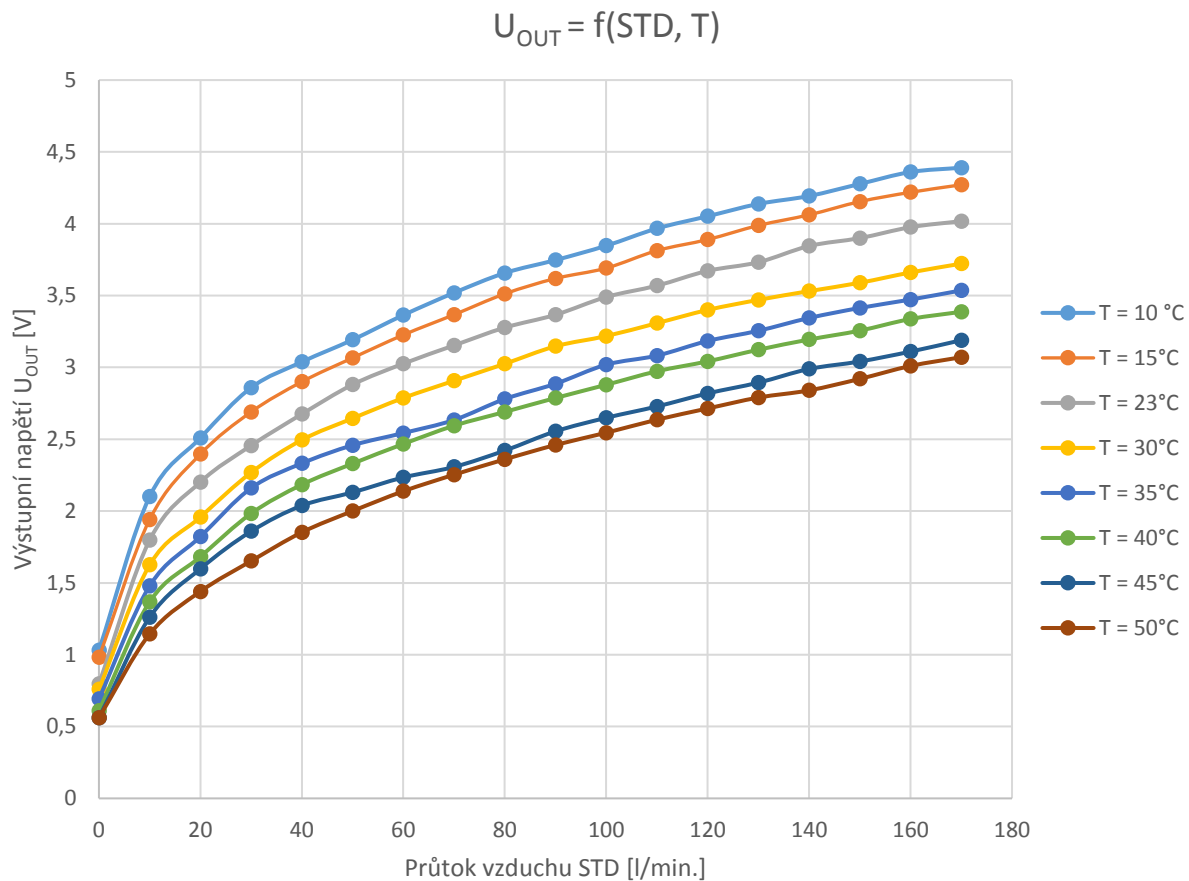
6.4 Průběh kalibrace – tepelná komora

V této kapitole je uveden postup a průběh měření v tepelné komoře, společně s naměřenými výsledky.

Celá měřicí soustava, na obr. 6.1, společně s PCB senzorem, byla vložena do tepelné komory, která sloužila k udržování požadované konstantní teploty vzduchu.

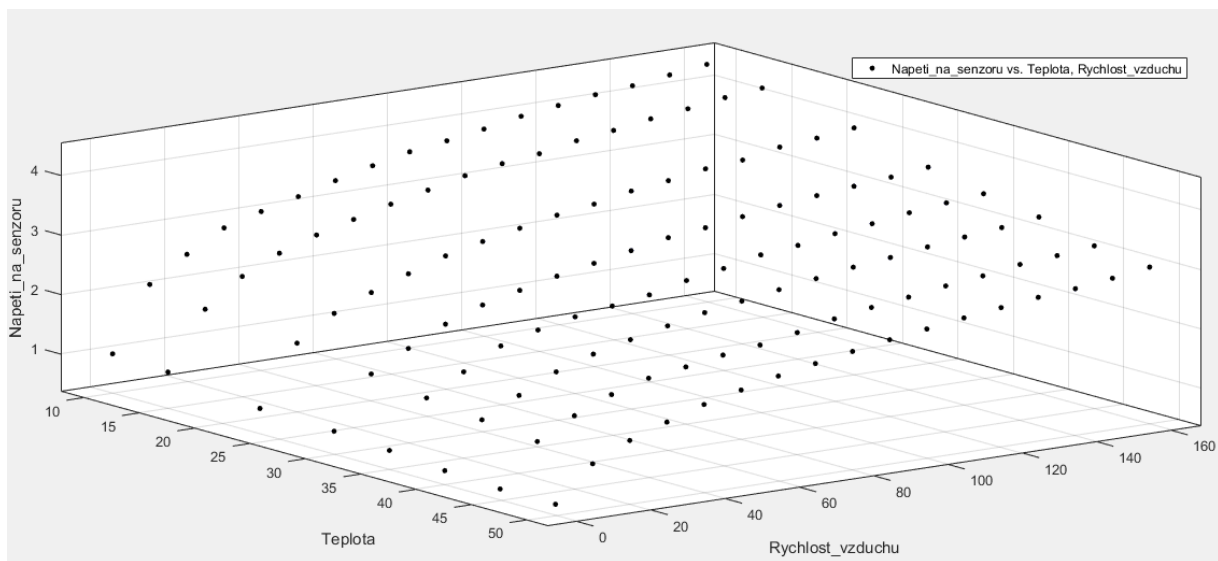
Jelikož měření v tepelné komoře bylo časově náročné, bylo rozhodnuto rozdělit celý rozsah teplot proudícího vzduchu na intervaly s délkou 5°C, přičemž bylo do tohoto rozdělení zahrnuto i měření při pokojové teplotě 23 °C. Vznikl tedy rozsah hodnot měřících teplot pro tepelnou komoru 10, 15, 23, 30, 35, 40, 45 a 50 °C. Rozdělení rozsahu rychlosti proudícího vzduchu, resp. hodnot průtoku proběhlo stejně jako u měření při pokojové teplotě, a to na intervaly o délce 10 l/min, tzn. 0, 10, 20, 30, 40 až 170 l/min.

Měření započalo uzavřením kalibrační soustavy a PCB senzoru do izolované tepelné komory s utěsněným otvorem pro vývody přívodních vodičů. Na displeji tepelné komory byla nastavena požadovaná hodnota teploty uvnitř tepelné komory na 10°C a počkalo se přibližně 3 minuty, než se teplota v tepelné komoře ustálila na požadovanou hodnotu. Poté byla změřena hodnota výstupního napětí U_{OUT} , uložen průběh dat z osciloskopu a zvýšen průtok vzduchu z hodnoty $STD = 0$ l/min na hodnotu $STD = 10$ l/min a opět uložen naměřený průběh napětí U_{OUT} . Analogicky se tímto způsobem pokračovalo pro celý rozsah rychlostí, resp. průtoku vzduchu. Po zpracování naměřených dat z osciloskopu, obdobným způsobem jak je uvedeno v kapitole 6.3, vznikla křivka závislosti výstupního napětí U_{OUT} na rychlosti, resp. průtoku vzduchu při teplotě tohoto vzduchu $T = 10$ °C. Stejným způsobem byla naměřena i křivka závislosti výstupního napětí U_{OUT} na rychlosti, resp. průtoku vzduchu při teplotě tohoto vzduchu $T = 15$ °C a pro další hodnoty teplot, až do maximální hodnoty teploty proudícího vzduchu $T = 50$ °C. Křivky závislosti výstupního napětí U_{OUT} na hodnotě průtoku vzduchu STD pro celý změřený interval teplot jsou zobrazeny v grafu na obr. 6.3, kde každá z hodnot teploty je reprezentována jinou barvou



Obr. 6.3: Graf závislosti výstupního napětí U_{OUT} na hodnotě průtoku vzduchu STD pro celý pracovní rozsah teplot od 10 do 50°C

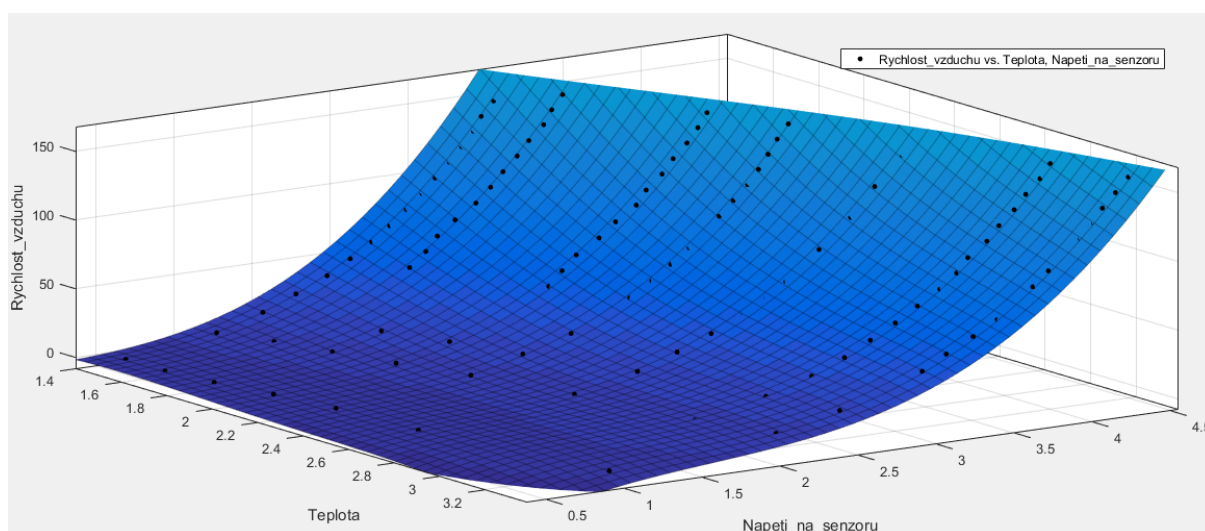
Pokud závislost hodnoty výstupního napětí U_{OUT} na teplotě a rychlosti, resp. průtoku vzduchu v grafu na obr. 6.3 bude vyjádřena pomocí třetí osy, vznikne 3D graf, s body reprezentujícími naměřené hodnoty výstupního napětí U_{OUT} v závislosti na průtoku vzduchu a na teplotě, který je uveden na obr. 6.4.



Obr. 6.4: 3D graf bodů reprezentujících závislost $U_{OUT} = f(STD, T)$

Body v grafu na obr. 6.4 reprezentují naměřené hodnoty napětí U_{OUT} z kalibračního měření v závislosti na průtoku a teplotě proudícího vzduchu $U_{OUT} = f(STD, T)$. Pro PC aplikaci bylo však potřeba získat rovnici funkce, kde výstupem bude rychlost, resp. průtok proudícího vzduchu závisující na teplotě tohoto vzduchu a výstupním napětí U_{OUT} , $STD = f(T, U_{OUT})$. Bylo tedy potřeba přetransformovat matici naměřených hodnot z tab. 5), aby pro každou hodnotu rychlosti, resp. průtoku vzduchu existovala odpovídající hodnota výstupního napětí U_{OUT} a odpovídající hodnota teploty proudícího vzduchu T . Tohoto bylo docíleno pomocí matematických úprav v matematickém programovacím softwaru Matlab, který mimo jiné slouží i pro práci z maticemi.

Vznikl tedy graf závislosti rychlosti, resp. průtoku proudícího vzduchu na teplotě tohoto vzduchu a na výstupním napětí U_{OUT} , $STD = f(T, U_{OUT})$, jehož body byly v softwaru Matlab s využitím nástroje cftool pro „fittování“ proloženy polynomickou plochou z důvodu získání matematické rovnice závislosti $STD = f(T, U_{OUT})$. Vzniklá polynomická plocha i s původními naměřenými body je na obr. 6.5 níže.



Obr. 6.5: Plocha reprezentující funkci $STD = f(T, U_{OUT})$

Více o nástroji cftool, který slouží pro hledání křivky nebo plochy nejlépe „pasující“ na naměřená data se lze dovědět na webových stránkách společnosti MathWorks, která software Matlab vyvíjí [8].

6.5 Kalibrace NTC_T termistoru

Pro vyhodnocení rychlosti proudění vzduchu v PC aplikaci je nutno znát teplotu tohoto proudícího vzduchu, jak již bylo několikrát zmíněno v předchozích kapitolách. K měření této teploty slouží NTC_T termistor umístěný na PCB senzoru v samostatném otvoru, jak lze vidět na obr. 3.6 v kapitole 3.2.5. Aby bylo možné teplotu vyhodnocovat, bylo nutno zjistit chování NTC_T termistoru v celém rozsahu pracovních teplot, resp. zjistit závislost hodnoty jeho elektrického odporu na okolní teplotě (R-T křivka). Jelikož na rozdíl od NTC_V termistoru nebyla obdržena od výrobce PCB senzoru k NTC_T termistoru téměř žádná data, nezbývalo, než R-T křivku NTC_T termistoru zjistit experimentálně, čehož bylo docíleno opět pomocí tepelné komory. Postup získání R-T křivky NTC_T termistoru je popsán v následujícím odstavci.

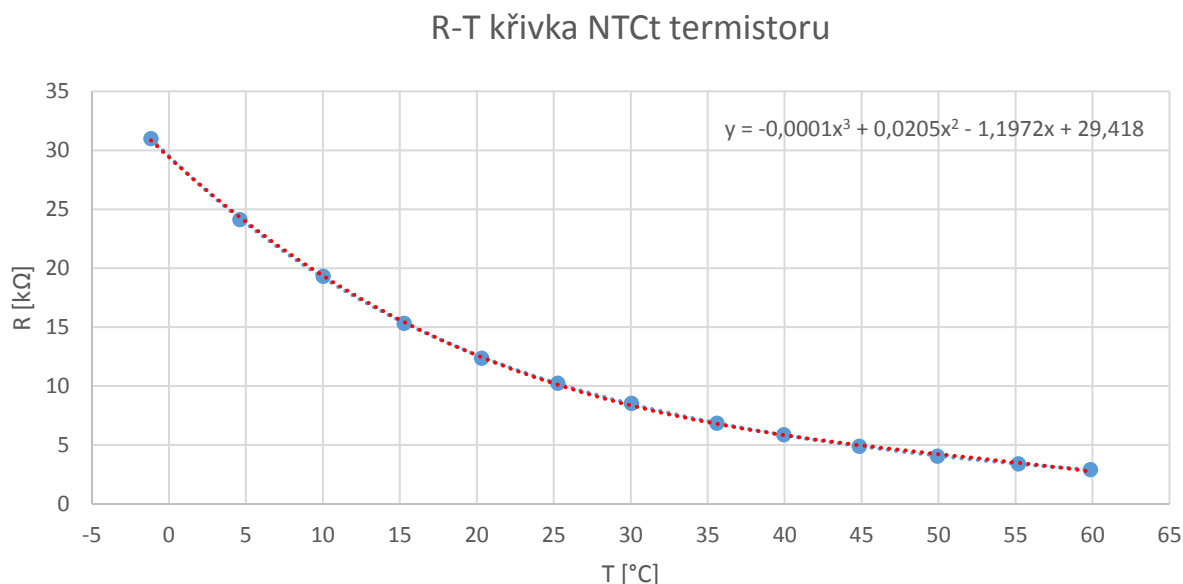
Nejprve bylo připraveno 5 termočlánků pro měření teploty, které byly rozmístěny v těsném okolí PCB senzoru s NTC_T termistorem, umístěným uvnitř tepelné komory. Konce termočlánků byly připojeny do měřicí karty zapojené do PC přes USB. Na konce vývodů NTC_T termistoru byl připojen ohmmetr. Protože byla známa jmenovitá hodnota elektrického odporu NTC_T termistoru $R = 10\text{k}\Omega$ (pro okolní teplotu vzduchu $25\text{ }^\circ\text{C}$), elektrický odpor přírodních vodičů je v porovnání s touto hodnotou tak malý, že je zanedbán. Na obrazovce PC v programu pro zobrazování dat z měřicí karty bylo nastaveno ukládání dat z termočlánků s periodou 10 s. Rozptyl pracovních teplot pro výsledné zařízení je dán hodnotami 10 až $50\text{ }^\circ\text{C}$, přesto při měření pro získání R-T křivky NTC_T termistoru bylo pro přesnější pozdější aproximaci měřeno od $0\text{ }^\circ\text{C}$ až do $60\text{ }^\circ\text{C}$. Tepelná komora byla nastavena na počáteční teplotu přibližně $0\text{ }^\circ\text{C}$. Počkali jsme, než se teplota v komoře ustálí na přibližně požadované hodnotě, a v té chvíli byla zaznamenána hodnota z displeje ohmmetru a také údaj o čase, aby bylo zřejmé, v jakém časovém okamžiku k zapsání hodnoty došlo, z důvodu následného vyhodnocování. Dále byla zvýšena hodnota teploty v tepelné komoře na přibližně $5\text{ }^\circ\text{C}$ a po jejím ustálení opět zaznamenány všechny potřebné údaje. Tímto způsobem bylo měření opakováno v celém rozsahu teplot až do $60\text{ }^\circ\text{C}$.

Z naměřených údajů o teplotě z 5 termočlánků byl vytvořen průměr a jeho hodnota byla považována za skutečnou hodnotu teploty T v tepelné komoře. Naměřená data jsou uvedena v tabulce 6). Z této tabulky naměřených hodnot byla vytvořena křivka závislosti elektrického odporu NTC_T termistoru na jeho teplotě, $R = f(T)$, která je uvedena v grafu na obr. 6.6.

Tab 6) Tabulka naměřených hodnot teplot z termočlánků, R-T závislost

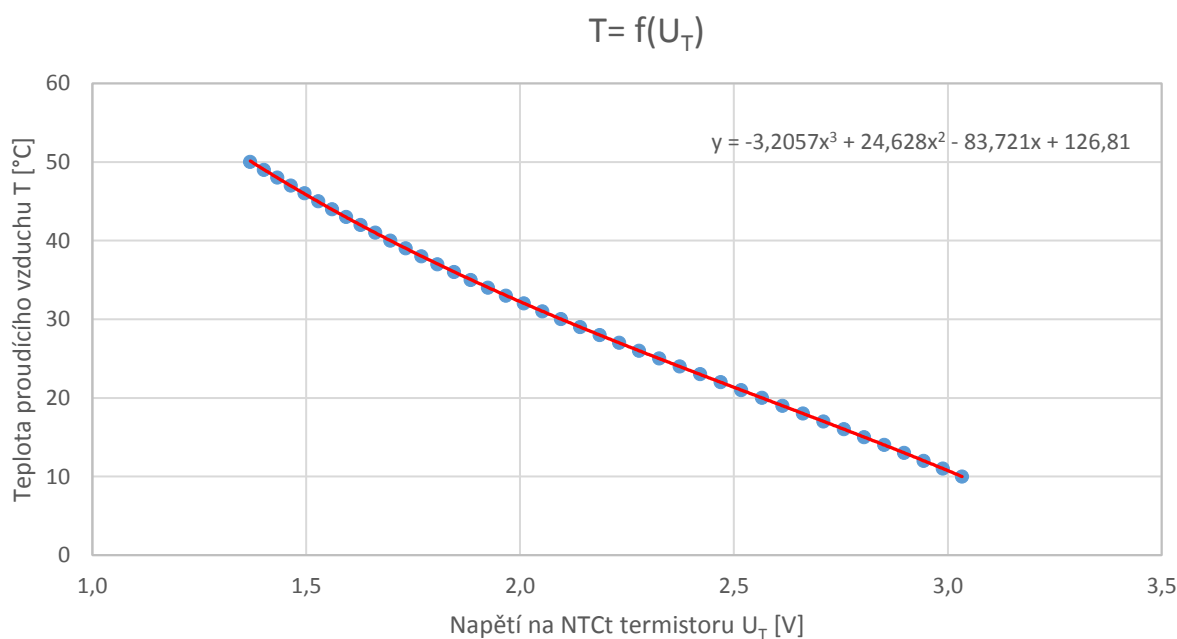
Teploty naměřené z termočlánků [$^\circ\text{C}$]					R [$\text{k}\Omega$] vs. T [$^\circ\text{C}$]	
T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T [$^\circ\text{C}$]	R [$\text{k}\Omega$]
-0,27	-1,23	-1,19	-1,7	-1,42	-1,162	30,99
4,94	4,76	4,65	4,37	4,34	4,612	24,13
10,5	10,19	10,08	9,71	9,69	10,034	19,33
15,79	15,45	15,36	14,91	14,95	15,292	15,33
20,87	20,49	20,42	19,86	19,99	20,326	12,37
25,75	25,43	25,37	24,8	24,97	25,264	10,24
30,66	30,23	30,24	29,48	29,69	30,06	8,54
36,2	35,79	35,86	34,92	35,21	35,596	6,86
40,29	40,26	40,42	39,38	39,43	39,956	5,87
45,64	45,3	45,41	44,3	43,59	44,848	4,91
50,83	50,58	50,75	49,62	47,87	49,93	4,07
56,35	55,94	56,11	54,76	52,85	55,202	3,42

Body v grafu na obr. 6.6, reprezentující naměřené hodnoty elektrického odporu NTC_T v závislosti na jeho teplotě, byly proloženy polynorem 3. řádu, jehož průběh je zobrazen tečkovanou červenou čarou a jeho rovnice zobrazená v pravém horním rohu grafu je považována za vztah definující závislost mezi hodnotou jeho elektrického odporu a teplotou.



Obr. 6.6: R-T křivka NTCT termistoru

Aby bylo možné zobrazit hodnotu teploty proudícího vzduchu v PC aplikaci, na základě závislosti $R = f(T)$ bylo nutné vypočítat hodnotu napětí na NTC_T termistoru vstupující do A/D převodníku na kanál A0, jak je zobrazeno na obr. 4.5 v kapitole 4.3, přičemž toto napětí je rovno $U_T = f(R, VCC)$, kde hodnota napětí VCC je konstantní a funkce $R = f(T)$ pro NTC_T termistor je definována rovnicí polynomu v grafu na obr. 6.6 výše.



Obr. 6.7: Závislost napětí na termistoru NTC_T , $U_T = f(T)$

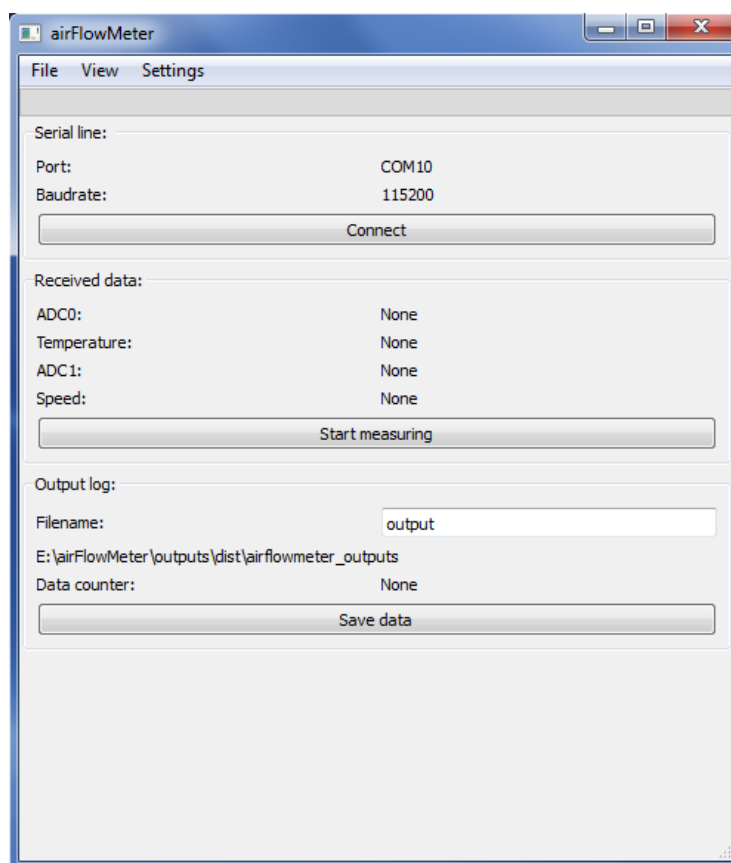
Termistor NTC_T je zapojený do odporového děliče s rezistorem R_{17} , jak je vidět na obr. 4.5 v kapitole 4.3. Na základě známé hodnoty napájecí napětí VCC , hodnoty elektrického odporu rezistoru R_{17} a známé funkce pro hodnotu elektrického odporu NTC_T termistoru, $R = f(T)$, kterou definuje polynom 3. řádu v grafu na obr. 6.7, byly podle vztahu (25) vytvořeny body závislosti napětí reprezentujícího hodnotu teploty proudícího vzduchu na teplotě proudícího vzduchu $U_T = f(T)$, které jsou zobrazeny v grafu na obr. 6.7.

$$U_T = \frac{VCC}{\frac{R(T)+R_{17}}{R(T)}} \quad [V] \quad (25)$$

Body v tomto grafu byly proloženy polynomem 3. řádu, jehož průběh je zobrazen červenou spojitou čarou. Rovnice tohoto polynomu byla použita pro návrh PC aplikace popsané v další kapitole.

7 NÁVRH PC APLIKACE

V této kapitole jsou uvedeny obecné informace o návrhu a funkci vytvořené PC aplikace, která primárně slouží k zobrazování měřených údajů o rychlosti a teplotě proudícího vzduchu v reálném čase. Dále také nabízí např. možnost ukládat obě tyto měřené hodnoty do souboru. Pro detailnější vysvětlení fungování aplikace je popis rozdělen na dvě části uvedené v následujících dvou podkapitolách. Uživatelské prostředí navržené aplikace je vidět na obr. 7.1 a vysvětlení dílčích prvků uživatelského okna je uvedeno pod tímto obrázkem.



Obr. 7.1: Uživatelské okno navržené PC aplikace pro zobrazování měřených hodnot rychlosti a teploty proudění vzduchu v reálném čase

Uživatelské okno obsahuje v horní části tři hlavní záložky a těmi jsou:

- „File“, pomocí které lze vybrat výstupní složku pro umístění uložených dat.
- „View“, pomocí které lze vybrat operační mód Info level nebo Debug level. Pro běžného uživatele stačí mód Info level. Mód Debug level slouží pro ladění aplikace.
- „Settings“ slouží pro připojení zařízení vybráním virtuálního COM portu, na kterém se zařízení nachází připojeno. V této záložce lze také zvolit znakovou rychlost tzv. Baudrate.

Po připojení zařízení přes USB a zapnutí aplikace nejprve uživatel v aplikaci vybere, na jakém COM portu se zařízení nachází. Znaková rychlost je automaticky předdefinována na hodnotu 115200 znaků za minutu, ale v případě potřeby tuto hodnotu lze měnit. Po nastavení těchto dvou zmíněných parametrů klikne uživatel na tlačítko „Connect“. Nyní je zařízení automaticky připojeno a komunikuje s PC aplikací.

Dalším krokem je zmáčknutí tlačítka „Start measuring“, které spustí začátek měření a v části aplikace s názvem „Recieved data“ se začnou zobrazovat průběžné hodnoty teploty a rychlosti proudícího vzduchu. Pokud si uživatel přeje měřená data ukládat, předtím než zmáčkne tlačítko „Start measuring“, zvolí název pro složku souborů v části aplikace s názvem „Output log“, který je automaticky předdefinován jako „output“, do které se budou měřená data ukládat. Umístění této složky může uživatel změnit v záložce „File“. Naměřená data se automaticky ukládají jako soubor s typu .csv, ve formátu čas, hodnota A0, teplota, hodnota A1, rychlost. Význam v běžící aplikaci zobrazovaných hodnot A0 a A1 jsou přepočítané napěťové úrovně vstupů na kanálu A0 a A1 A/D převodníku Arduina.

7.1 Část Arduino

V této kapitole je popsána část PC aplikace vztahující se k destičce Arduino Pro Micro. Hodnota úrovně napětí reprezentující rychlost, resp. průtok proudícího vzduchu U_{OUT} a hodnota napětí reprezentující teplotu U_T jsou jako analogové veličiny na výsledné DPS přivedeny na vstupní piny A/D převodníku A0 a A1 destičky Arduino Pro Micro. Do paměti mikroprocesoru na destičce Arduina je nahrán kód, který byl vytvořen a nahrán do destičky pomocí programu Arduino Software (IDE). Nahráný kód má dvě hlavní části. První z nich se váže ke kanálům A0 a A1 A/D převodníku, ze kterého jsou analogová napěťová data o rychlosti, resp. průtoku a teplotě proudícího vzduchu digitálně zpracována a poslána po sériové lince do PC aplikace. Druhá část kódu zajišťuje na výstupním pinu D3 signál PWM sloužící jako vstup pro zvyšující měnič popsáný v kapitole 4.4.

Napětí reprezentující rychlost, resp. průtok U_{OUT} a teplotu vzduchu U_T je po zpracování A/D převodníkem převedeno na bitovou hodnotu mezi 0 až 1024 bitů, jelikož se jedná o 10bitové rozlišení A/D převodníku. Tato bitová hodnota je dále poslána přes USB rozhraní do vytvořené PC aplikace, kde je dále zpracována a vyhodnocena. Jakým způsobem je tohoto docíleno, je popsáno v další kapitole.

7.2 Část Python

V této kapitole je popsána část navržené aplikace vztahující se k programu běžícímu na PC. Design okna grafického uživatelského rozhraní aplikace, který je vidět na obr. 7.1, byl vytvořen v nástroji pro návrh grafického uživatelského rozhraní, tzv. GUI, což je zkratka z anglického (Graphical User Interface), pod názvem Qt Designer. Samotný skript s příkazy, ve kterém jsou definovány rovnice polynomů, ze kterých se získávají hodnoty rychlosti proudícího vzduchu v jednotkách [m/s] a hodnoty teploty tohoto vzduchu v jednotkách [°C], zobrazované na obrazovce PC, byl vytvořen v programovacím jazyku Python a vygenerování binárního kódu bylo provedeno pomocí programu PyInstaller.

Vstupem do této části spuštěné aplikace jsou dvě digitální hodnoty v rozmezí 0 až 1024 bitů, reprezentující hodnoty napětí U_{OUT} a U_T . Na základě kalibračního měření byly získány rovnice dvou polynomů, definujících skutečnou rychlost, resp. průtok a skutečnou teplotu proudícího vzduchu na základě hodnot těchto napětí U_{OUT} a U_T . Pro připomenutí jsou znovu uvedeny obě rovnice pod čísly (26) a (27). Rovnice polynomu pro získání hodnoty skutečné hodnoty teploty proudícího vzduchu na základě napětí U_T reprezentujícího teplotu je (26),

$$y = -3,2057x^3 + 24,628x^2 - 83,721x + 126,81 \quad (26)$$

kde y je skutečná teplota proudícího vzduchu v jednotkách [°C], zobrazená v uživatelském okně PC aplikace a x je hodnota napětí U_T [V] přepočítána z binární hodnoty.

Protože do polynomu v rovnici (26) se dosazují hodnoty napětí U_T v jednotkách [V], nikoliv jejich digitální bitová reprezentace z A/D převodníku, ve skriptu vytvořeném v programu Python je definován přepočet této bitové hodnoty reprezentující naměřenou teplotu proudícího vzduchu zpět na hodnotu napětí U_T [V], která do A/D převodníku vstupuje, podle vztahu (27),

$$x = \frac{U_T(BIN)}{1024} \cdot U_{REF} \quad [V] \quad (27)$$

kde x je přepočítaná hodnota napětí U_T [V], $U_T(BIN)$ [bit] je binární hodnota reprezentující napětí U_T [V] a U_{REF} [V] je hodnota referenčního napětí A/D převodníku dána USB napětím.

Na základě přepočtu binární hodnoty z kanálu A1 A/D převodníku destičky Arduina zpět na vstupní napětí U_T podle vztahu (27) a po dosazení této hodnoty za x do rovnice (26) je výstupem hodnota teploty proudícího vzduchu v jednotkách [°C] na obrazovce PC.

Rovnice polynomu pro získání hodnoty skutečné rychlosti resp. průtoku proudícího vzduchu na základě napětí U_{OUT} a zároveň U_T je o něco složitější a je dána podle vztahu (28),

$$z = p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy + p02y^2 + p30 + p21x^2 y + p12xy^3 + p40x^4 + p31x^3 y + p22x^2 y^2 + p13xy^3 + p04y^4 \quad (28)$$

kde z je hodnota průtoku STD [l/min] získaná z kalibračního měření, x je hodnota napětí U_T [V] a y je hodnota napětí U_{OUT} [V].

Stejně jako u předchozího vztahu (27), napětí U_{OUT} reprezentující rychlost, resp. průtok proudícího vzduchu je nutno v PC aplikaci přepočítat z binární reprezentace A/D převodníku zpět na hodnotu napětí U_{OUT} [V]. Toho bylo dosaženo na základě rovnice (29),

$$y = \frac{U_{OUT}(BIN)}{1024} \cdot U_{REF} \quad [V] \quad (29)$$

kde y je přepočítaná hodnota napětí U_{OUT} [V], $U_{OUT}(BIN)$ [bit] je binární hodnota reprezentující napětí U_{OUT} [V], U_{REF} [V] je hodnota referenčního napětí A/D převodníku dána USB napětím.

Po dosazení hodnot napětí U_{OUT} a U_T získaných z rovnic (27) a (29) do rovnice (28) je výstupem z hodnota průtoku proudícího vzduchu STD v jednotkách [l/min], získaná z kalibračního měření. Hodnota STD [l/min] je hodnota průtoku vzduchu za standardních podmínek, jak napovídá samotná zkratka této veličiny, které jsou definovány: teplota 21.1 °C a atmosférický tlak 101.3 kPa. Hodnotu STD je tedy nutno přepočítat na objemový průtok VF [l/min] pomocí korekčního faktoru, který zahrnuje podmínky, za kterých kalibrační měření probíhalo. Rovnice pro přepočet STD [l/min] na VF [l/min] je definována vztahem (30),

$$VF = STD \cdot \left[\frac{273.15 + T_m}{273.15 + 21.11} \right] \frac{101.3}{P_m} \quad [l/min] \quad (30)$$

kde T_m je teplota proudícího vzduchu v jednotkách [$^{\circ}\text{C}$] a P_m je atmosférický tlak proudícího vzduchu v jednotkách [kPa].

Hodnota korekčního faktoru je tedy závislá na teplotě proudícího vzduchu, která je do vztahu (30) vždy dosazena jako výsledek rovnice (26), a na atmosférickém tlaku, jehož hodnota se po celou dobu kalibračního měření neměnila a byla $P_m = 97.7$ kPa.

Posledním krokem výpočtu je výpočet aktuální hodnoty rychlosti proudění vzduchu [m/s], zobrazované na obrazovce PC ve spuštěné aplikaci, z hodnoty objemového průtoku VF [l/min]. Ten musíme přepočítat na hodnotu objemového průtoku v jednotkách [m^3/s] podělením hodnotou 60, kdy dostaneme jednotku [l/s] a znovu podělením hodnotou 1000, abychom při dosazení do rovnice (31) dostali hodnotu rychlosti v v jednotkách [m/s]. Toho je docíleno jednoduchým přepočtem na základě průřezu potrubí vstupní trubice průtokoměru TSI na kterém kalibrační měření bylo prováděno, podle vztahu (31),

$$v = \frac{VF}{\pi R^2} \text{ [m/s]} \quad (31)$$

kde R [m] je poloměr vstupní trubice průtokoměru TSI.

Na základě vztahů (26) až (31) je docíleno toho, že uživatel může sledovat aktuální hodnoty rychlosti a teploty proudícího vzduchu v běžící aplikaci na obrazovce PC v reálném čase.

8 OTESTOVÁNÍ VÝSLEDNÉHO ZAŘÍZENÍ

Součástí zadání této práce je také úkol otestovat vyrobený senzor. Pomocí kalibrační soustavy jsme tedy vyzkoušeli porovnání hodnot rychlosti proudícího vzduchu a jeho teploty s hodnotami zobrazenými na průtokoměru TSI – součásti kalibračního zařízení. Jelikož už nebyla možnost změřit chování vyrobeného zařízení v celém rozsahu teplot, porovnání proběhlo pro různé hodnoty rychlosti proudění resp. průtoku vzduchu pro pokojovou teplotu. Naměřená data zobrazená v PC aplikaci jsou porovnána s daty z průtokoměru TSI v následující tabulce 7).

Na základě vztahu (30) a přepočtu jednotek hodnoty objemového průtoku VF na jednotku [m³/s] dosazením do rovnice (31) získáme hodnotu rychlosti vzduchu vyjádřenou pomocí objemového průtoku – údaje z průtokoměru, který je porovnán s hodnotou rychlosti – údajem z PC aplikace.

Tab 7) Porovnání výsledků zařízením naměřených hodnot s referenčními hodnotami

Data z průtokoměru TSI				Data z PC aplikace		Odchyłka	
T [°C]	STD [l/min]	VF [m ³ /s]	v [m/s]	T [°C]	v [m/s]	T [%]	v [%]
28,4	25	0,00044	1,45	29,1	1,5	2,4	3,4
28,1	53	0,00093	3,07	28,95	3,2	2,9	4,1
28,3	75	0,00132	4,35	28,8	4,25	1,7	2,2
28,5	100	0,00177	5,80	28,95	5,4	1,6	6,9
28,1	125	0,00220	7,24	28,85	7	2,6	3,3
28,1	150	0,00265	8,68	28,75	8,2	2,3	5,6

V tab 7) můžeme porovnat hodnoty naměřené pomocí průtokoměru, který sloužil jako reference při kalibrování výsledného zařízení. Červeně jsou označeny hodnoty procentuálních rozdílů teplot a rychlostí naměřené pomocí průtokoměru vs. naměřené pomocí zařízení, jež je výstupem praktické části této závěrečné práce. Lze vidět rozdíly naměřených a referenčních dat v jednotkách procent.

9 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na řešení problému měření rychlosti vzduchu. Nejprve je na začátku popisována problematika týkající se obecné anemometrie – tedy vědního oboru zabývající se prouděním vzduchu. Dále je v této práci popisován návrh a realizace zařízení pro měření rychlosti vzduchu, návrh softwarové aplikace pro zobrazování naměřených hodnot a kalibrační proces. Na konci práce jsou uvedeny výsledky z testování vyrobeného zařízení. Byly tedy splněny všechny body uvedené v zadání této diplomové práce.

Pokud by bylo možné zařízení pro měření rychlosti vzduchu vyrobené v rámci praktické části této práce v budoucnu vylepšit, uvedeme zde několik návrhů na zlepšení, které vyvstaly během výroby a testování zařízení. První z nich se týká mechanické části a umístění konektoru blíže k čelu krabičky, do které je zařízení umístěno. Další návrh se týká hardwarové a softwarové části. Napětí z USB se pohybuje v určité toleranci. Toto napětí je použito jako referenční napětí A/D převodníku destičky Arduino a tedy i do A/D převodu je tato tolerance zahrnuta. Bylo by tedy lepší použít pevnou externí referenci napětí pro A/D převodník, která by zaručila co nejmenší chybu A/D převodu způsobenou tolerancí referenčního napětí.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MALÍK, M., PRIMAS, J.: Anemometrické metody. [Učební text] Liberec, 2011.
VLACH, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009. Článek
- [2] PETERKA, Tomáš. Měření proudových polí v objemu. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Jakub Filipický.
- [3] HŮLKA, Jakub. Ultrazvukový anemometr. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Marie Havlíková.
- [4] Doppler efect. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2018 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect
- [5] ÇENGEL, Yunus A. a John M. CIMBALA. *Fundamentals of thermal-fluidsciences*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, c2012. ISBN 978-0-07-338020-9.
- [6] MRMAK, Nebojsa, Paul van OORCHOT a Jan-Willem PUSTJENS. PTC thermistor. *Resistorguide* [online]. University of Technology Eindhoven, 2018 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/ptc-thermistor/>
- [7] , Microchip technology Inc. Data sheet of MCP1630: High-Speed, Microcontroller-Adaptable, Pulse Width Modulator. USA, 2004.
- [8] *MathWorks: Curve Fitting* [online]. United States [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/curvefitting-app.html>

11 SEZNAM ZKRATEK, OBRÁZKŮ A TABULEK

11.1 Seznam zkratek

LDA	Laser doppler anemometry
PIV	Particle image velocity
MAF	Mass air flow
NTC	Negative temperature coeficient
PTC	Positive temperature coeficient
RTD	Resistance temperature detector
CTA	Constant temperrature anemometry
CCA	Constant current anemometry
PCB	Printed circuit board
OZ	Operační zesilovač
DPS	Deska plošných spojů
A/D	Analogově/ digitální
PC	Personal computer
STD	Standart flow rate
PVC	Polyvinylchlorid
PLA	Polyactic acid
USB	Universal Serial Bus
GND	Ground
GUI	Graphical User Interface
VF	Volumetric flow

11.2 Seznam tabulek

TAB 1) PARAMETRY NTC TERMISTORU SLOUŽÍCÍHO PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU	30
TAB 2) ZÁVISLOST HODNOTY TEPLOTNÍHO KOEFICIENTU VYNUCENÉ KONVEKCE $H = F(STD, T)$	48
TAB 3) ZÁVISLOST HODNOTY PRŮMĚRNÉHO PŘESTUPU TEPLA $Q_{AVE} = F(STD, T)$	49
TAB 4) ODMOCNINA ROZDÍLU SOUSEDNÍCH HODNOT Q_{AVE}	50
TAB 5) HODNOTA VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ U_{OUT} ZÍSKANÁ ANALYTICKY	50
TAB 6) TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT TEPLOT Z TERMOČLÁNKŮ, R-T ZÁVISLOST	56
TAB 7) POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZAŘÍZENÍM NAMĚŘENÝCH HODNOT S REFERENČNÍMI HODNOTAMI	63

11.3 Seznam obrázků

OBR. 2.1: ROBINSONŮV LOPATKOVÝ ANEMOMETR (VLEVO), DIGITÁLNÍ VRTULOVÝ ANEMOMETR (VPRAVO).....	17
OBR. 2.2. NÁKRES TLAKOVÉHO ANEMOMETRU TYPU PITOTOVA TRUBICE	18
OBR. 2.3: ČTYŘRAMENNÝ ULTRAZVUKOVÝ ANEMOMETR VÝROBCE DIRECT INDUSTRY	19
OBR. 2.4: MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC METODY LDA.....	20
OBR. 2.5: MĚŘÍCÍ ŘETĚZEC METODY PIV	21
OBR. 2.6: SNÍMEK ZACHYCENÝ PŘI POUŽÍVÁNÍ METODY PIV	21
OBR. 2.7: JEDNOOSÁ TERMOANEMOMETRICKÁ DRÁTKOVÁ SONDA VÝROBCE DANTEC	22
OBR. 3.1: PŘEMĚNA TEPLA KONDUKČÍ.....	23
OBR. 3.2: VYNUCENÁ KONVEKCE	24
OBR. 3.3: RADIACE ČERNÉHO TĚLESA	25
OBR. 3.4: CHARAKTERISTICKÁ R-T KŘIVKA NTC VS. RTD	26
OBR. 3.5: 3 TYPY NTC TERMISTORŮ ROZDĚLENY PODLE KONSTRUKCE, ZLEVA: BEAD, DISK AND CHIP, GLASS ENCAPSULED.....	29
OBR. 3.6: PCB SENZOR VÝROBCE DEGREE CONTROLS, ZLEVA: ZÁKLADNÍ ROZMĚRY, FOTOGRAFIE SENZORU	30
OBR. 3.7: WHEATSTONEŮV MŮSTEK	31
OBR. 3.8: SCHÉMA MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ METODY CCA	31
OBR. 3.9: SCHÉMA MŮSTKOVÉHO ZAPOJENÍ METODY CTA	32
OBR. 4.1: CELKOVÉ ELEKTRONICKÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ OBVODU	34
OBR. 4.2: 1. ČÁST OBVODU – WHEATSTONEŮV MŮSTEK.....	35
OBR. X: 4.3 2. ČÁST OBVODU – SIGNÁLOVÉ PŘIZPŮSOBENÍ	37
OBR. 4.4: FUNKCE OBVODU NAPĚŤOVÉ REFERENCE	39
OBR. 4.5: 3. ČÁST OBVODU – ARDUINO PRO MICRO	40
OBR. 4.6: UKÁZKA PWM SIGNÁLU.....	41
OBR. 4.7: 4. ČÁST OBVODU – STEJNOSMĚRNÝ ZVYŠUJÍCÍ MĚNIČ	42
OBR. 5.1: UKÁZKA NAVRHNUTÉ DPS V SOFTWARE KICAD.....	44
OBR. 5.2: FOTOGRAFIE VÝSLEDNÉ DPS OSAZENÉ SOUČÁSTKAMI	45
OBR. 5.3: FOTOGRAFIE VÝSLEDNÉHO ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ RYCHLOSTI VZDUCHU	45
OBR. 6.1: BLOKOVÝ DIAGRAM KALIBRAČNÍHO ŘETĚZCE.....	47
OBR. 6.1: KALIBRAČNÍ SOUSTAVA.....	51
OBR. 6.2: GRAF ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ U_{OUT} NA RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU PŘI TEPLOTĚ PROUDÍCÍHO VZDUCHU $T = 23\text{ °C}$	52

OBR. 6.3: GRAF ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ U_{OUT} NA HODNOTĚ PRŮTOKU VZDUCHU STD PRO CELÝ PRACOVNÍ ROZSAH TEPLOT OD 10 DO 50°C.....	54
OBR. 6.4: 3D GRAF BODŮ REPREZENTUJÍCÍCH ZÁVISLOST $U_{OUT} = F(STD, T)$	54
OBR. 6.5: PLOCHA REPREZENTUJÍCÍ FUNKCI $STD = F(T, U_{OUT})$	55
OBR. 6.6: R-T KŘIVKA NTCT TERMISTORU	57
OBR. 6.7: ZÁVISLOST NAPĚTÍ NA TERMISTORU $NTC_T, U_T = F(T)$	57
OBR. 7.1: UŽIVATELSKÉ OKNO NAVRŽENÉ PC APLIKACE PRO ZOBRAZOVÁNÍ MĚŘENÝCH HODNOT RYCHLOSTI A TEPLoty PROUDĚNÍ VZDUCHU V REÁLNÉM ČASE.....	59

12 SEZNAM PŘÍLOH

12.1 Přílohy na CD

Příloha A.....	Kalibrace
Příloha B.....	KiCAD
Příloha C.....	PC aplikace