



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

SENZOR MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU V ELEKTRICKÉM STROJI

SENSOR OF AIR VELOCITY MEASUREMENT IN ELECTRICAL MACHINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ VRBICKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jiří Vrbický

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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 bakalářské práce:

Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji

v anglickém jazyce:

Sensor of air velocity measurement in electrical machines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Principy měření rychlostí 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 navrhnou malý senzor rychlosti blížíící se svými rozměry MEMS. Pokud by to bylo možné tak i bezdrátový přenos údaje o rychlosti do PC. Určité možnosti realizace již byly prováděny a bylo by možné z nich vycházet.

Cíle bakalářské práce:

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

Seznam odborné literatury:

- [1] □ Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.
- [2] □ Idelčik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.
- [3] □ Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3nd edition. McGraff Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a realizací senzoru pro měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji. Senzor musí být schopen měřit i na místech s nedostatkem prostoru.

ABSTRACT

This thesis describes the design and realization of a sensor for measuring of air velocity in electrical machine. The sensor must be able to measure also in places with lack of space.

KLÍČOVÁ SLOVA

Anemometr, Senzor, Rychlost vzduchu, Elektrický stroj, Tranzistorové čidlo

KEYWORDS

Anemometer, Sensor, Air velocity, Electric machine, Transistor probe

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRBICKÝ, J. Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Senzor měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji“ vypracoval samostatně pod vedením svého vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu literatury.

24. května 2013

.....

Jiří Vrbický

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji mému vedoucímu doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce, a Ing. Josefu Vejlupekovi za jeho odbornou pomoc.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. CÍL PRÁCE	8
3. ANEMOMETRICKÉ METODY.....	9
3.1 Mechanické Anemometry	10
3.1.1 Miskové anemometry	10
3.1.2 Lopátkové anemometry.....	11
3.1.3 Kyvadlové anemometry	11
3.2 Tlakové anemometry	13
3.2.1 Pitotova trubice	13
3.2.2 Venturiho trubice	14
3.3 Tepelné anemometry	16
3.3.1 Anemometr se žhaveným drátkem.....	16
3.3.2 Anemometr s tranzistorovým čidlem	17
3.4 Speciální druhy anemometrů.....	18
3.4.1 Ultrazvukový anemometr.....	18
3.4.2 Rezonanční anemometr	19
3.4.3 Laser-Dopplerův anemometr	19
3.4.4 Metoda PIV a PTV	20
4. REALIZACE SENZORU	21
4.1 Výběr typu senzoru.....	21
4.2 Porovnání vlastností senzorů	21
4.2.1 Senzor s mechanickým čidlem.....	21
4.2.2 Senzor s tlakovým čidlem	22
4.2.3 Senzor s tepelným čidlem	23
4.3 Rozhodnutí o výsledné konstrukci senzoru	24
4.4 Schéma obvodu	25
4.5 Popis funkce.....	26
4.6 Testování obvodu	27

4.7	Návrh DPS	30
4.8	Konstrukce čidla	32
4.9	Testování senzoru	34
4.9.1	Kalibrace senzoru.....	34
4.9.2	Testování stability měření senzoru.....	36
4.10	Software senzoru.....	37
5.	ZÁVĚR	39
6.	POUŽITÁ LITERATURA	40

1. ÚVOD

Průběh proudění vzduchu ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem elektrického stroje je poměrně dobře zmapovaný, mnoha praktickými měřeními. Díky tomu byl vytvořený poměrně přesný matematický model takového proudění. Pro proudění na těžko dostupných místech stroje s nedostatkem prostoru, jako jsou například drážky mezi rotorovými plechy, již toto neplatí. To, jakým způsobem se vzduch v těchto místech pohybuje, je známé pouze na základě teoretických výpočtů, které vycházejí z matematických modelů již zmapovaných proudění.

Vzduch, protékající těmito těžko přístupnými místy, elektrický stroj ochlazuje. Pokud bychom věděli, jakým způsobem v těchto místech vzduch proudí, bylo by možné tato místa účelně navrhovat, aby docházelo k lepšímu chladicímu účinku uvnitř stroje.

Ke zmapování proudění vzduchu je potřeba dostatečně malý senzor. Ten by měl být schopen měřit dlouhodobě. Jeho konstrukce musí umožňovat měření i na více různých místech. Často se bude nacházet na rotujících částech stroje, proto data bude odesílat bezdrátově do počítače, nebo do mikrokontroléru, k dalšímu zpracování. Naštěstí v současné době jsou principy měření rychlosti proudění dobře známy a existuje mnoho různých principů měření, které lze k těmto účelům využít.

2. CÍL PRÁCE

Hlavním cílem této práce je realizace senzoru pro měření rychlosti proudění vzduchu v elektrickém stroji na místech s nedostatkem prostoru.

Jednotlivé body, které je potřeba splnit:

- Rešeršní studie měření rychlosti proudění vzduchu
- Návrh senzoru
- Realizace senzoru
- Testování navrženého senzoru

3. ANEMOMETRICKÉ METODY

Anemometr je přístroj, který slouží k měření rychlosti a případně i směru proudění tekutiny. Samotný název *anemometr* je odvozen z řeckého slova *anemos*, které v češtině znamená *vítr*. V doslovném překladu tedy anemometr znamená *větroměr*.

Nejčastěji jsou anemometry využívány v meteorologii, kde slouží k měření rychlosti a směru větru. Využití anemometrů je však mnohem širší. Například v letectví jsou anemometry využívány k měření rychlosti letu letadla vzhledem k větru, který na letadlo působí. Dále se využívají k výzkumu různých jevů v proudící tekutině, nebo k výzkumu proudění ve vodních strojích. Pomocí anemometrických senzorů lze zjistit, jak proudící vzduch obtéká karoserii auta, křídlo a trup letadla, atd. U větrných elektráren anemometry zjišťují rychlost a směr větru. Na základě těchto informací se může rotor natáčet do co nejefektivnější polohy, případně lze rotor zastavit, pokud by byla naměřená rychlost větru příliš vysoká a mohlo by tedy dojít k poškození elektrárny.

Anemometry lze rozdělit do skupin podle fyzikálního principu, pomocí kterého je rychlost tekutiny měřena, na:

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

Po různých úpravách a případné kalibraci jsou anemometry schopné měřit rychlost proudění jakékoliv tekutiny.

3.1 Mechanické Anemometry

Jsou to nejstarší používané anemometry. Energie proudění se přenáší na mechanickou konstrukci, která rotuje nebo se vychyluje z ustálené polohy. Do této skupiny patří například:

- Miskové anemometry
- Lopátkové anemometry
- Kyvadlové anemometry

3.1.1 Miskové anemometry

Robinsonův kříž

Tento typ anemometru byl vynalezen v roce 1846 Thomasem Romney Robinsonem a dnes je využíván hlavně v meteorologii pro měření rychlosti větru.

Anemometr je tvořený čtyřmi polokulovitými miskami, které jsou namontované na čtyři horizontální ramena, mezi kterými je úhel 90° . Ramena jsou připevněna k vertikální hřídeli, se kterou horizontální ramena mohou volně otáčet.

Proudění vzduchu může otáčet ramena anemometru proto, že konkávní kulová plocha vytváří proudění větší odpor než konvexní. Díky tomu mohou být všechny čtyři misky vystaveny působení vzduchu. Tento anemometr může měřit pouze rychlost proudění, nikoliv jeho směr, protože ramena anemometru se budou otáčet vždy stejným směrem, bez ohledu na směr proudění, a to vždy ve směru orientace konvexní plochy misky. Pokud bychom chtěli změřit i směr proudění, stačí například přidat na anemometr výkyvnou korouhev. [1]

Anemometr je schopen měřit pouze rychlost takového proudění, které působí na ramena anemometru ve stejné rovině. Otáčky vertikální hřídele jsou přímo úměrné rychlosti proudění. Rychlost konců horizontálních ramen v_R je rovna jedné třetině rychlosti proudění vzduchu v_P . Rychlost v_R lze vyjádřit:

$$v_R = 2\pi nL \quad (3.1)$$

kde n jsou otáčky vertikální hřídele a L je délka horizontálního ramene

Po dosazení $v_R = \frac{1}{3}v_P$ do rovnice (3.1), získáme rychlost proudění tekutiny v závislosti na otáčkách anemometru a tato rovnice má tvar:

$$v_P = 6\pi nL \quad (3.2)$$

Tří-miskový anemometr

Tří-miskový anemometr vyvinul Kanadčan John Patterson v roce 1926.

Konstrukce tohoto anemometru je podobná jako u Robinsonova kříže, ale místo čtyř misek má tři.

Každá miska anemometru vytváří maximální točivý moment, když horizontální rameno svírá s proudem vzduchu úhel 45° . Díky tomu má tří-miskový anemometr konstantní točivý moment a rychleji reaguje na změny proudění. Poměr mezi rychlostí otáčení vlastních ramen a rychlosti proudění závisí na velikosti i tvaru misek a na délce ramen, na které jsou připevněny. Proto je u každého anemometru tento poměr různý. [2]



THE ROBINSON ANEMOMETER.

Obrázek 3.1: Robinsonův kříž. Převzato z [1]



Obrázek 3.2: Tří-miskový anemometr. Převzato z [3]

3.1.2 Lopátkové anemometry

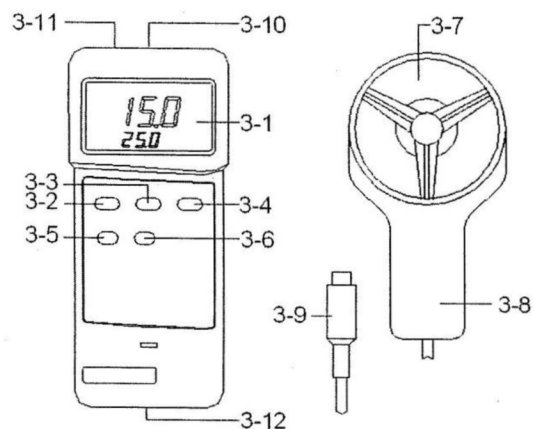
Proudící vzduch rozpohybuje lopátkové kolo, které roztáčí horizontální osu.

Aby tento anemometr měřil skutečnou rychlost proudění, musí rotující osa neustále udržovat stejnou orientaci se směrem proudění. Správného natáčení osy lze dosáhnout například přidáním směrového stabilizátoru.

Rychlost proudění je opět úměrná otáčkám horizontální hřídele. Převod otáček na rychlost proudění běžně provádí elektronika anemometru, která rovnou zobrazí hodnotu rychlosti. Oproti miskovým anemometrům jsou citlivější a přesnější. Tento anemometr je díky udržování správné orientace lopátkového kola schopný měřit i směr proudění. [1]

3.1.3 Kyvadlové anemometry

Nejstarší konstrukce anemometru. Hlavní částí je lehké kyvadlo, které proud vzduchu vychyluje. Z vychýlení je možné určit velikost rychlosti proudění. Převod tohoto vychýlení na rychlost závisí na hmotnosti, velikosti a tvaru kyvadla. [1]



- 3-1 Displej
- 3-2 Napájecí tlačítko
- 3-3 Tlačítko zmražení
- 3-4 Nastavení °C/°F
- 3-5 Záznam MAX/MIN hodnot rychlosti
- 3-6 Nastavení jednotky rychlosti
- 3-7 Lopatkové kolo senzoru
- 3-8 Rukojeť senzoru
- 3-9 Zástrčka senzoru
- 3-10 Vstupní zásuvka anemometru
- 3-11 RS-232 výstupní konektor
- 3-12 Kryt baterií

Obrázek 3.3: Schéma ručního digitálního lopatkového anemometru.
Převzato z manuálu lopatkového anemometru Lutron AM-4203

3.2 Tlakové anemometry

Tlakové anemometry měří rychlost proudění vzduchu na základě porovnávání rozdílů tlaků, které způsobuje proudící vzduch.

Existuje mnoho různých provedení, ale většina z nich funguje na principech:

- Pitotovy trubice
- Venturiho trubice

3.2.1 Pitotova trubice

Pitotova trubice se často používá v letadlech, kde měří rychlost letu.

Skládá se ze dvou vzájemně spojených trubic. Konec jedné z trubic je zahnutý proti směru proudu vzduchu, zatímco konec druhé zůstává kolmý na směr proudění. Při vstupu proudícího vzduchu do zahnuté trubice se jeho kinetická energie přemění na tlakovou, protože vzduch se snaží udržet stejnou celkovou energii. Uvnitř této trubice pak vzroste tlak. Tento tlak se označuje jako dynamický tlak p_d . Uvnitř druhé trubice vzniká statický tlak p_s , který udává hodnotu hydrostatického tlaku uvnitř nepohybujícího se vzduchu. Celkový tlak p_c je pak dán součtem dynamického a statického tlaku.

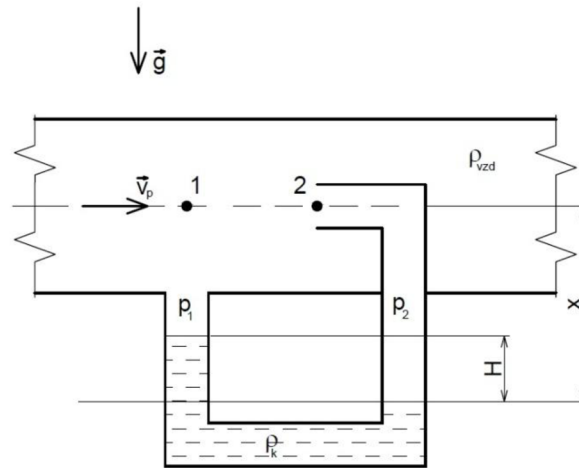
$$p_c = p_s + p_d \quad (3.3)$$

Obě trubice jsou spojeny do tvaru písmene U. V místě spojení obou trubic je nalitá kapalina, která zobrazuje rozdíl tlaků prostřednictvím rozdílné výšky hladin. Z rozdílu tlaků v obou trubicích je možné spočítat rychlost proudění vzduchu.

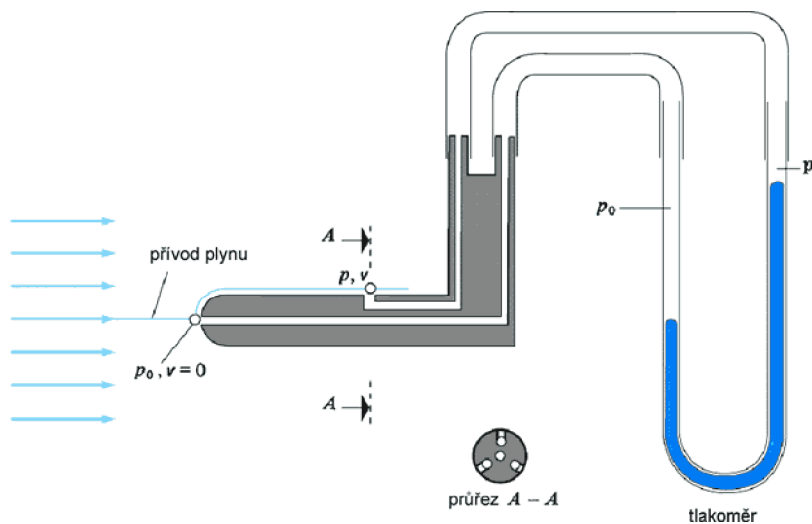
Po odvození se získá závislost rychlosti proudění v_p na rozdílné výšce hladin H , viz rovnice 3.4.

$$v_p = \sqrt{\frac{2Hg(\rho_k - \rho_{vzd})}{\rho_{vzd}}} \quad (3.4)$$

kde v_p je rychlost proudění, g tíhové zrychlení, H je rozdíl výšek hladin, ρ_k hustota měřicí kapaliny a ρ_{vzd} hustota vzduchu



Obrázek 3.4: Principiální schéma Pitotovy trubice



Obrázek 3.5: Reálné provedení Pitotovy trubice. Převzato z [4]

3.2.2 Venturiho trubice

Venturiho trubice je trubice, která má na části své délky zúžení.

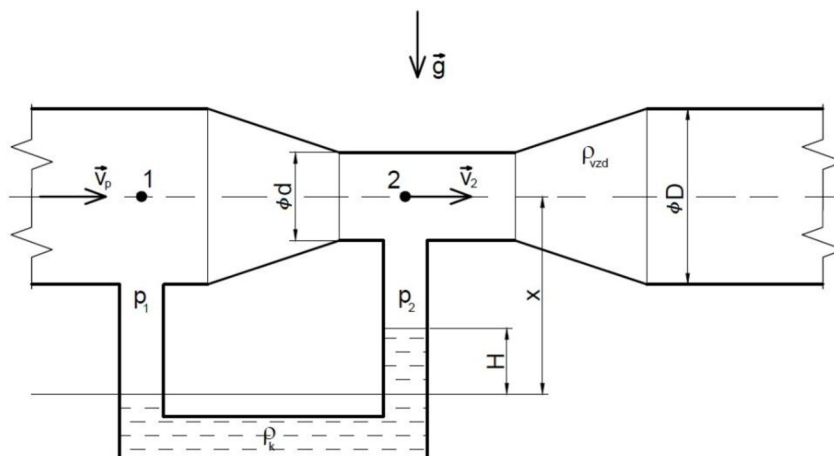
Rychlost proudícího vzduchu lze opět odvodit z rozdílných hodnot tlaků ve dvou trubicích spojených do tvaru písmene U. Volné konce těchto trubic jsou kolmé na směr proudění. U venturiho trubice dochází k porovnávání dvou statických tlaků. První je statický tlak v nezúžené části a druhý v zúžené části. Rozdílná hodnota těchto tlaků je způsobena tím, že v zúžení trubky se zvýší rychlost proudění, ale zároveň dojde k poklesu tlaku, aby si proudící vzduch zachoval stejnou celkovou energii.

Nevýhodou Venturiho trubice je, že díky zúžené části vytváří tlakové ztráty.

Závislost rychlosti proudění na rozdílné výšce hladin znázorňuje rovnice 3.5.

$$v_p = \sqrt{\frac{2Hg(\rho_k - \rho_{vzd})}{\left[\left(\frac{D}{d}\right)^4 - 1\right]\rho_{vzd}}} \quad (3.5)$$

kde v_p je rychlost proudění, g tíhová síla, H rozdíl výšek hladin, D a d jsou velký a malý průměr trubice, ρ_k hustota měřící kapaliny a ρ_{vzd} hustota vzduchu



Obrázek 3.6: Principiální schéma Venturiho trubice

3.3 Tepelné anemometry

Tepelné anemometry určují rychlost proudění z ochlazování žhaveného tělíska vlivem proudícího vzduchu.

Řídící obvod se snaží udržovat jednu z veličin (elektrické napětí, elektrický proud, teplota) konstantní, proto existuje několik provedení těchto anemometrů. CCA (constant-current anemometer) elektronika anemometru udržuje konstantní proud procházející čidlem. CVA (constant-voltage anemometer) u tohoto typu je zase udržovaný konstantní úbytek napětí na čidle. CTA (constant-temperature anemometer) jak už název napovídá, elektronika senzoru bude udržovat konstantní teplotu čidla bez ohledu na rychlost proudění.

Existují také anemometry, u kterých dochází k udržování jedné z veličin prostřednictvím pulzní šířkové modulace (PWM). Daná veličina kolísá mezi horní a dolní mezí.

Vlivem proudění vzduchu kolem tělíska dochází ke změně jeho vlastností (změna elektrického odporu, apod.). Řídící obvod musí na tyto změny reagovat a musí do tělíska dodávat více nebo méně energie. Změny dodávek energie jsou úměrné rychlosti proudění. [2]

Tepelné anemometry lze rozdělit podle typu žhaveného tělíska, na:

- Se žhaveným drátkem
- S tranzistorovým čidlem

3.3.1 Anemometr se žhaveným drátkem

Anemometry se žhaveným drátkem fungují na principu ohřevu velmi tenkého drátku o průměru několika mikrometrů na teplotu vyšší, než je teplota okolí.

Pro výrobu drátku se nejčastěji používá wolfram. Důvody použití wolframu jsou podobné jako u vláken žárovek. Wolfram má obtížnou tavitelnost a při rozehrátí na vysoké teploty si částečně zachovává i svoji pevnost. Další výhodou wolframu je, že za běžných teplot je zcela chemicky netečný vůči působení vody, atmosférických plynů a odolává působení většiny běžných anorganických kyselin.

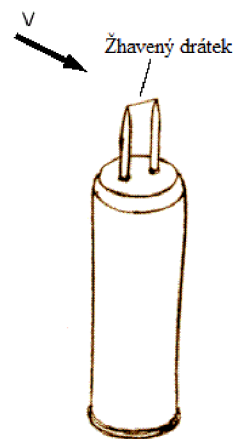
Drátek je ohříván průtokem elektrického proudu. Proudění vzduchu okolo drátku má za následek jeho ochlazování. Protože u většiny kovů s klesající teplotou klesá elektrický odpor, můžeme získat vztah mezi rychlostí proudění vzduchu a elektrickým odporem drátku. Tyto změny odporu se dají počítat přímo z Ohmova zákona.

$$R = \frac{U}{I} \quad (3.6)$$

kde I je proud procházející drátkem a U je úbytek napětí na drátku.

V praxi však řídící obvod udržuje jednu ze tří veličin na konstantní hodnotě a podle dodávek energie do drátku pak stanoví velikost rychlosti proudění.

Největší slabinou tohoto anemometru je samotný drátek, který se snadno přetrhne. Tyto anemometry jsou citlivé i na další fyzikální veličiny (např. teplota, tlak) a nejsou schopné měřit směr proudění. [1]



Obrázek 3.7: Čidlo anemometru se žhaveným drátkem [5]

3.3.2 Anemometr s tranzistorovým čidlem

Princip funkce tohoto anemometru je stejný jako u předchozího typu, ale drátek je nahrazen párem tranzistorů.

Jeden tranzistor slouží jako referenční, tzn., že jeho teplota je udržovaná na teplotě okolí. Díky tomuto tranzistoru může řídicí obvod na druhém tranzistoru, udržovat vyšší teplotu, než je teplota okolí.

Teplota ohřívaného tranzistoru se vlivem obtékajícího vzduchu snižuje, případně zvyšuje. Změny teploty mají za následek, že se tranzistor vlivem vlastní vodivosti polovodičů samovolně přivírá, případně otevírá. Tyto změny jsou pak úměrné velikosti rychlosti proudění.

Senzor, který tvoří dva tranzistory je odolný, má dlouhou životnost a může být velmi malý.

3.4 Speciální druhy anemometrů

Kromě výše popsaných druhů anemometrů existují ještě další, které určují rychlost proudění například pomocí Dopplerova jevu nebo ultrazvuku.

- Ultrazvukový anemometr
- Rezonanční anemometr
- Laser-Dopplerův anemometr
- Metoda PIV a PTV

3.4.1 Ultrazvukový anemometr

Ultrazvukové anemometry využívají ultrazvuk k měření rychlosti proudění vzduchu.

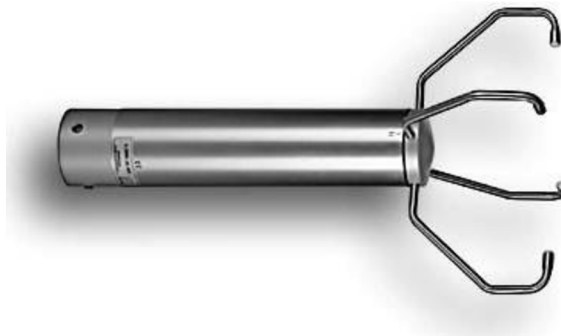
Rychlost vzduchu je určena z doby, za kterou ultrazvukové pulzy urazí vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem. Pokud se vzduch mezi vysílačem a přijímačem pohybuje, tato doba se mění. Každý pár vysílač-přijímač dokáže měřit proudění pouze v jedné ose. Pokud bude senzor anemometru vybavený třemi páry, potom je schopný měřit rychlost prostorového proudění.

Citlivost tohoto anemometru záleží na vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem. Tato vzdálenost se běžně pohybuje mezi 10 až 20 cm.

Díky tomu, že tento anemometr nemá žádné pohyblivé části, je vhodný pro dlouhodobé měření, kdy nepotřebuje stálou údržbu. Jsou velmi citlivé na rychlé změny rychlosti proudění.

Nevýhodou je, že samotná konstrukce čidla velmi ovlivňuje proudění vzduchu, proto je nutné ho nejprve kalibrovat ve větrném tunelu. Další nepřesnosti vyvolává přítomnost cizích látek v proudu vzduchu (např. voda, prach).

V současnosti se Ultrazvukové anemometry využívají v letectví, při navigaci lodí a v meteorologických stanicích. [1]



Obrázek 3.8: Čidlo ultrazvukového anemometru. Převzato z [6]

3.4.2 Rezonanční anemometr

Jedná se o druh ultrazvukového anemometru, který vynalezl Dr. Savvas Kapartis.

Zatímco klasické ultrazvukové anemometry měří dobu letu ultrazvukových pulzů, rezonanční anemometr využívá rezonanci ultrazvukových vln uvnitř malé vestavěné dutiny. Uvnitř dutiny je seskupení ultrazvukových transduktorů, které slouží k vytvoření stojaté vlny. Jak vzduch prochází skrz dutinu, dojde k fázovému posunu stojaté vlny. Po změření velikosti fázového posunu v přijatých signálech od každého transduktoru dochází k matematickému zpracování dat. Senzor tak může poskytnout přesné hodnoty rychlosti a směru proudění.

Technologie akustického anemometru umožňuje výrazné zmenšení čidla oproti ostatním ultrazvukovým čidlům. [2]



Obrázek 3.9: Čidlo rezonančního anemometru. Převzato z [2]

3.4.3 Laser-Dopplerův anemometr

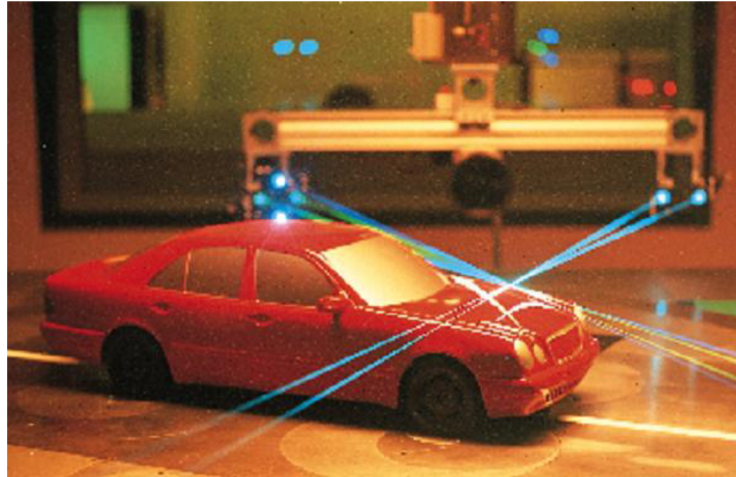
Laser-Dopplerův anemometr využívá Dopplerův jev v laserovém paprsku k měření rychlosti proudění v průhledné nebo polopřůhledné tekutině.

Požívají se lasery s vlnovými délkami ve viditelném spektru (390nm až 750nm). Nejčastěji se používá Helium-neonový, Argon-iontový laser nebo laserová dioda.

Paprsek vystupující z anemometru je nasměrovaný tak, aby procházel proudem tekutiny, ve kterém chceme měřit rychlost. Když pevné částice, které se nacházejí uvnitř tekutiny, procházejí paprskem, částečně ho rozptýlí. Tyto částice se buď v tekutině přirozeně vyskytují, nebo jsou do ní záměrně přidávány. U rozptýleného světla dochází vlivem Dopplerova jevu ke změně frekvence. Při jejím porovnání s frekvencí vysílaného paprsku je možné zjistit rychlost pohybujících se částic a zároveň i rychlost proudění.

U uměle přidávaných částic je potřeba si dávat pozor, aby se správně pohybovali po proudnicích. Velikost částic závisí na vlnové délce použitého laserového paprsku.

Jeden paprsek měří rychlost proudění pouze v jedné ose. Pokud je nutné měřit rychlost prostorového proudění, jsou potřeba tři paprsky, každý o jiné vlnové délce. [1]



Obrázek 3.10: Měření rychlosti proudění vzduchu pomocí Laser-Dopplerova anemometru. Převzato z [7]

3.4.4 Metoda PIV a PTV

Metoda PIV (Particle Image Velocimetry) využívá na plochu opticky roztažený laserový paprsek k osvětlení proudu tekutiny.

I při této metodě měření je nutné do tekutiny přidat trasovací částice. Osvětlený prostor je nasnímaný rychlokamerou s vysokou snímkovací frekvencí. Rychlost částic pohybujících se v proudu se získá ze známého času a z posunutí trasovacích částic mezi jednotlivými snímky. Vznikne dvojrozměrný obraz s vykresleným polem vektorů, kde směr vektorů udává směr proudění a velikost vektorů zase značí rychlost proudění v daném místě.

Snímací a osvětlovací vybavení lze nastavit tak, aby bylo možné získat třírozměrný záznam proudění. Vyhodnocování takových snímků je však velmi náročné.

Metoda PTV (Particle Tracking Velocimetry) je obdobou metody PIV. Rozdíl mezi nimi je následující. U metody PIV vznikne série snímků, zatímco u metody PTV video záznam proudění.

I metodu PTV jde rozšířit o třetí rozměr. [1]

4. REALIZACE SENZORU

4.1 Výběr typu senzoru

Prvním krokem při konstrukci senzoru je výběr vhodné konstrukce senzoru. Z výše uvedených druhů anemometrů není možné pro senzor využít fyzikálních principů, na kterých se zakládají speciální druhy anemometrů. Čidla ultrazvukových a rezonančních anemometrů nelze dostatečně zmenšit a další typy anemometrů jsou nepoužitelné už z jejich samotného principu. Musí zůstat v klidu a rychlost proudícího vzduchu mohou měřit pouze přes průhlednou stěnu. Navíc se do vzduchu musí přidávat trasovací částice, jejichž přidávání by bylo velmi složité. Tyto částice by také mohly elektrický stroj poškodit. Další nevýhodou je jejich pořizovací cena, která je poměrně vysoká. Z toho vyplývá, že výsledná konstrukce senzoru se bude zakládat na některém z principů mechanického, tlakového nebo tepelného anemometru.

4.2 Porovnání vlastností senzorů

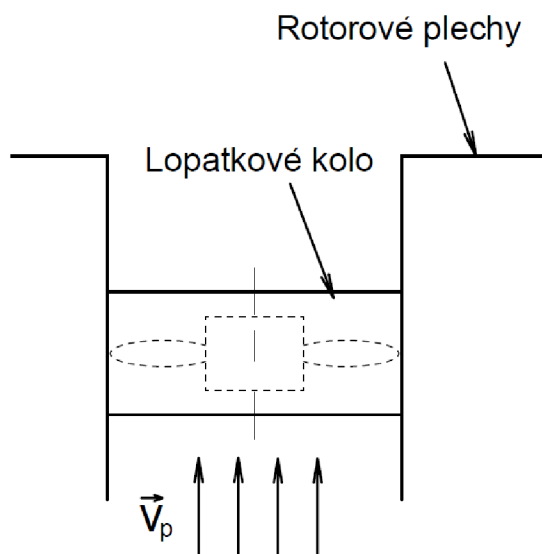
Na následujících odstavcích dojde k porovnání vlastností jednotlivých druhů senzorů. Budou připomenuty výhody a nevýhody jejich využití, dále dojde k seznámení s jejich teoretickou konstrukcí.

4.2.1 Senzor s mechanickým čidlem

Kvůli své konstrukci a nižší přesnosti není možné použít miskové anemometry. Tyto anemometry jsou schopné měřit rychlost pouze takového proudění, které působí na misky v rovině, v jaké se otáčejí. Dalším problémem by bylo zmenšení celé konstrukce tak, aby se vešla do mezery mezi rotorovými plechy. Tato mezera je velká 8 až 12 mm. Použit lze tedy pouze princip lopatkového anemometru.

Senzor by se skládal ze dvou částí. Lopatkového kola a elektroniky. Lopatkové kolo by bylo celé zasunuté do mezery mezi plechy. Snímat otáčky by bylo možné pomocí optického senzoru, hallové sondy nebo snímáním napětí z výstupu malého generátoru. Toto napětí by se měnilo v závislosti na rychlosti lopatkového kola. Generátor by však mohl kolo brzdít a zkresloval by tím měření. Elektronická část senzoru by se připevnila k jednomu z plechů za lopatkové kolo. Napájení by mohl obstarat například termoelektrický generátor nebo malá baterie. Elektronika by měla za úkol bezdrátově odeslat získaná data do počítače. Bezdrátové vysílání a vlastní napájení už však nejsou součástí této práce.

Nevýhodou tohoto senzoru tvoří jeho mechanická část. Lopatkové kolo by ovlivňovalo proudění, bylo by náchylné na opotřebení a nečistoty ve vzduchu, které by mohly lopatkové kolo ucpat, zablokovat nebo v krajním případě i zničit. Mazání ložisek lopatkového kola by mělo být schopno správně plnit svojí funkci i při teplotách kolem 80°C. Výhodou je, že měření není závislé na teplotě nebo na tlaku proudícího vzduchu.



Obrázek 4.1: Teoretická konstrukce senzoru fungujícího na principu mechanických anemometrů

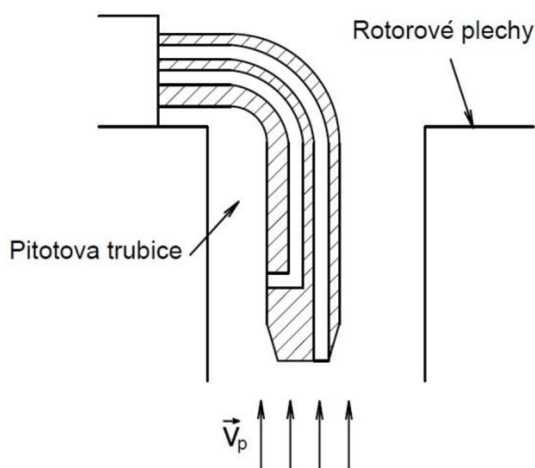
4.2.2 Senzor s tlakovým čidlem

Z tlakových anemometrů by bylo vhodnější využít principu Pitotovy trubice, protože jí nemusí proudící vzduch procházet. Stačí, když na ní bude pouze působit. U Venturiho trubice by bylo nutné, aby proudící vzduch procházel trubicí, která má na části své délky zúžení. Zúžení však vytváří proudícímu vzduchu odpor, který by snižoval průtok. To by mělo za následek, že vzduch by uvnitř trubice proudil pomaleji, než okolo ní.

Senzor by se opět skládal ze dvou částí. Pitotovy trubice a elektroniky. Elektronika by mohla být umístěna na vnější straně rotoru společně s částí trubice, kde dochází k porovnávání tlaků. Elektronika musí být schopná odečítat rozdíly hladin a následně odesílat tyto informace do počítače, kde dojde k dalšímu zpracování dat.

Nevýhodou je, že trubice se může snadno ucpat nečistotami. Na sloupec kapaliny bude působit odstředivá síla, která bude ovlivňovat měření. Rovnice 3.6 ukazuje závislost rychlosti proudění na hustotě vzduchu a kapaliny, která se mění s teplotou a tlakem okolí.

Naopak výhodou je, že senzor nepotřebuje žádnou údržbu, dokáže změřit velký rozsah rychlostí a zvládne pracovat při vysokých teplotách. Maximální možnou teplotu, při které lze senzor provozovat, limituje pouze teplota varu měřící kapaliny a materiál, ze kterého je trubice vyrobena. Minimální provozní tlak je teoreticky tlak nasycených par měřící kapaliny.



Obrázek 4.2: Teoretická konstrukce senzoru fungujícího na principu tlakových anemometrů

4.2.3 Senzor s tepelným čidlem

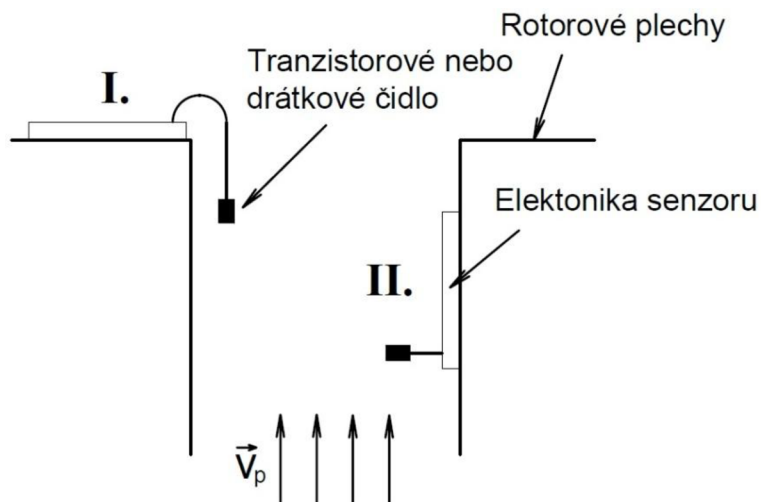
Pro měření rychlosti proudění v mezeře mezi rotorovými plechy je možné použít jak drátkové, tak i tranzistorové čidlo. Obě čidla mají přibližně stejnou přesnost i citlivost a jsou dostatečně malé. Tento druh senzoru však velmi limituje teplota okolí. Běžné elektronické součástky vydrží teplotu pouze do 150°C. Měření je také závislé na teplotě okolního vzduchu.

Drátkové čidlo má několik nevýhod. Je křehké. Prolétající nečistoty ho mohou poškodit. Časem může dojít i k jeho samovolnému přerušení. Problém nastává kvůli teplotní závislosti metody, kdy v průběhu měření teplota výrazně kolísá.

Některé z těchto nevýhod odstraňuje tranzistorové čidlo. Prolétající nečistoty tranzistor nepoškodí, a pokud nedojde k přehřátí, tak takové čidlo má i dlouhou životnost. Čidlo však obsahuje referenční tranzistor, se kterým přichází problém. Je totiž potřeba ho udržovat na teplotě okolního vzduchu, ale nesmí být vystaven proudícímu vzduchu, který by ho ochlazoval, nebo druhému tranzistoru, který by ho naopak mohl zahřívát.

Celý senzor má v obou případech poměrně jednoduchou konstrukci. Je tvořen pouze řídicím elektronickým obvodem a malým čidlem, které je vystaveno proudu vzduchu. Elektronický obvod zpracuje signál z čidla a výsledné údaje bezdrátově pošle do počítače, případně mikrokontroléru. K napájení senzoru je opět možné využít termoelektrický generátor, případně baterii.

Na obrázku 4.3 jsou vidět dva možné způsoby umístění senzoru. V případě umístění I, je deska s elektronikou připevněna k rotoru z vnější strany pomocí šroubů. V případě nutnosti výměny čidla lze jednoduše senzor odšroubovat. Umístění I je však limitováno vzduchovou mezerou mezi rotorem a statorem stroje. Při realizaci umístění II by bylo nutné elektroniku k rotorovému plechu přilepit. Z toho vyplývá, že následná výměna čidla by byla složitější.



Obrázek 4.3: Teoretická konstrukce senzoru fungujícího na principu tepelných anemometrů

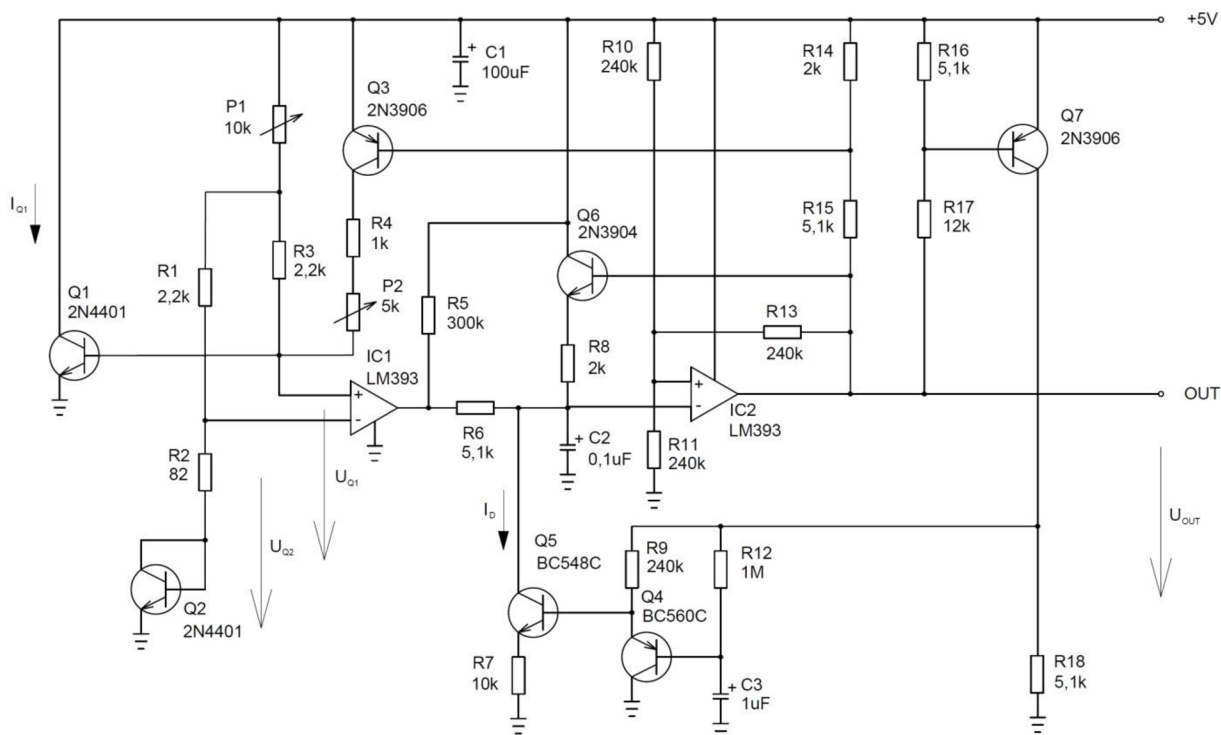
4.3 Rozhodnutí o výsledné konstrukci senzoru

Po zvážení všech faktorů bylo rozhodnuto, že nejvýhodnější a zároveň nejjednodušší bude využít konstrukci senzoru s tranzistorovým čidlem. Oproti sensorům s tlakovými a mechanickými čidly má velmi jednoduchou konstrukci. Nemá žádné pohyblivé části, ani ho není možné poškodit nečistotami ve vzduchu. Není nutné složitě vyrábět dostatečně malé čidlo, aby se vešlo do vzduchové mezery, která má šířku 8 až 12 mm. Standardní velikosti SMD tranzistorů těmto požadavkům vyhovují. Konstrukce tohoto senzoru je levná. Cena samotných součástek nepřekročí 100 Kč. Z celého senzoru bude nejnákladnější výroba desky plošných spojů (DPS), ta ale při výrobě více kusů klesne.

4.4 Schéma obvodu

Elektronický obvod je nejdůležitější součástí senzoru. Jeho zapojení a použité součástky rozhodnou o většině jeho vlastností. Jako např. citlivost, přesnost, rozlišení, rozsah měření a teplotní rozpětí, ve kterém může být senzor provozován.

Při konstrukci senzoru jsou v podstatě dvě možnosti. Buď celý obvod navrhnout, nebo využít schéma z nějaké publikace, nebo z internetu. V tomto případě byla zvolena ta druhá možnost a zrealizoval se obvod od Steva Woodwarda z Univerzity v Severní Karolíně. Tento obvod je zveřejněný na stránkách *edn.com* pod názvem **Transistor linearly digitizes airflow**. [8] Obrázek tohoto schématu je v lepší kvalitě uložen na příloženém CD.



Obrázek 4.4: Schéma obvodu

4.5 Popis funkce

Tranzistory Q_1 a Q_2 (na obrázku 4.4) slouží jako čidlo senzoru. Tranzistor Q_1 musí být tedy vystaven proudícímu vzduchu. Q_2 funguje jako referenční tranzistor, proto musí být umístěn tak, aby ho proudící vzduch co nejméně ovlivňoval.

Obvod senzoru se neustále snaží dodržovat podmínku $U_{Q1} = U_{Q2}$. Díky tomu obvod neustále udržuje tranzistor Q_1 přibližně o 50°C teplejší, než Q_2 . Tento rozdíl teplot je způsoben tím, že kolektorem Q_1 protéká přibližně stokrát větší proud, než kolektorem Q_2 .

Potenciometr P_1 umožňuje nastavení nulového bodu. Při nulové rychlosti proudění se změnou hodnoty odporu na P_1 nastaví $U_{Q1} = U_{Q2}$.

Proudící vzduch způsobuje na Q_1 zvýšení tepelných ztrát. Vlivem teplotní závislosti PN přechodu, se napětí U_{Q1} zvýší, protože se tranzistor Q_1 vlivem snížení teploty přivře. To způsobí nárůst napětí na výstupu komparátoru IC_1 , které vybíjí kondenzátor C_2 . V tom okamžiku na výstupu komparátoru IC_2 poklesne napětí a to způsobí přotevření tranzistoru Q_3 , čímž se více otevře tranzistor Q_1 a více se zahřeje. V okamžiku, kdy teplota povrchu Q_1 dosáhne nastavené hodnoty, se obvod vlivem teplotní závislosti PN přechodu opět vrátí do původního stavu. Protože je však Q_1 nadále ochlazovaný, tak se všechny změny v obvodu neustále opakují. Komparátor IC_2 tedy odesílá do Q_1 přes Q_3 řídicí pulzy, kterými je Q_1 ohříván. Ohřívání tranzistoru Q_1 je způsobeno jeho neustálým spínáním, kdy v něm vzniká ztrátový výkon, který se přeměňuje v teplo. Ohřev tedy nezávisí na délce pulzu, protože v otevřeném stavu má tranzistor minimální ztrátový výkon, ale na počtu pulzů. S rostoucí rychlostí proudění, kdy je Q_1 více ochlazován, roste počet pulzů.

Potenciometr P_2 ovlivňuje kolektorový proud I_{Q1} , který Q_1 ohřívá. V podstatě P_2 ovlivňuje citlivost senzoru a zároveň jeho rozsah.

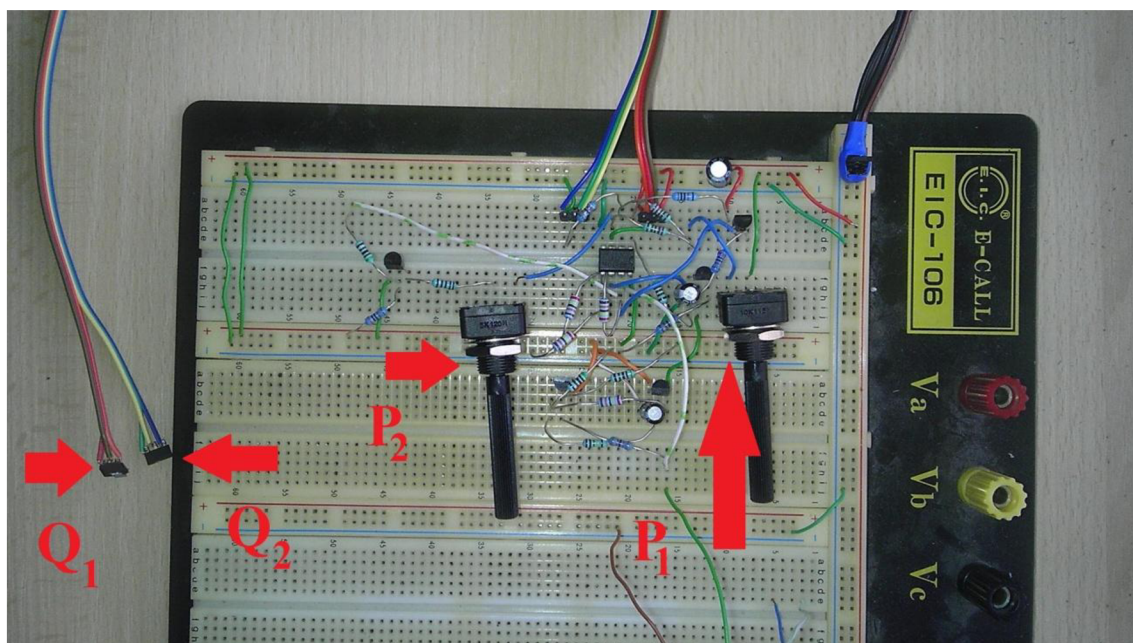
Vybíjecí proud I_D umožňuje vyrovnávání napětí U_{Q1} a jeho velikost ovlivňuje délku pulzu.

Tranzistory Q_4 , Q_6 a Q_7 vytváří řídicí napětí pro tranzistor Q_5 , čímž ovlivňují velikost proudu I_D , tedy i délku pulzu. Výstupní napětí senzoru je snímáno z výstupu komparátoru IC_2 , kde s narůstající rychlostí proudění klesá absolutní hodnota napětí.

4.6 Testování obvodu

Před vytvořením desky plošných spojů (DPS) je nutné zjistit, jestli vybraný obvod správně plní svoji funkci.

Obvod byl sestavený na nepájivém poli, viz Obrázek 4.5. K napájení senzoru je potřeba zdroj s výstupním napětím 5V. Takový požadavek splňuje zařízení USB, které bylo také k napájení senzoru použito. USB zařízení v počítači je navíc vybaveno ochranou proti zkratu.



Obrázek 4.5: Obvod senzoru na nepájivém poli

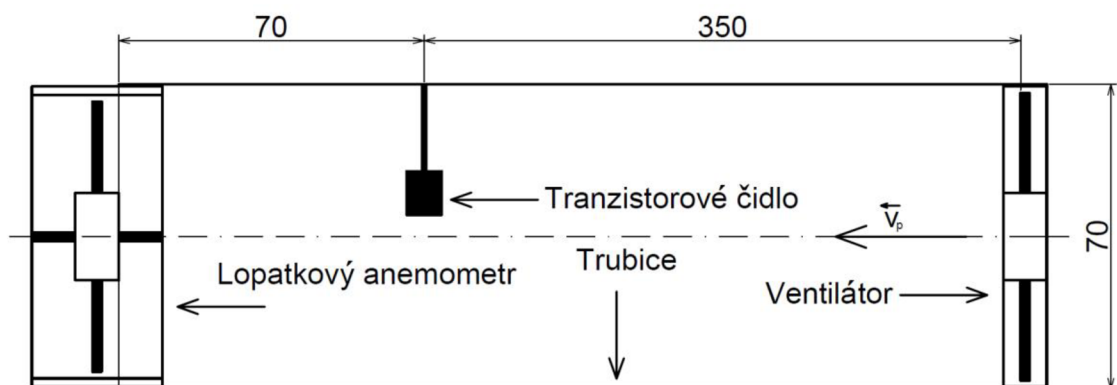
Nejprve bylo nutné postavit testovací sestavu, viz Obrázek 4.6 a 4.7. Trubice byla slepená z tvrdého papíru. Jako zdroj proudění posloužil obyčejný ventilátor, který původně v počítači pracoval jako chladič procesoru. Ventilátor byl napájený ze starého počítačového zdroje, senzor z USB zařízení. Ventilátor i senzor byly napájeny z různých zdrojů, aby nedocházelo ke vzájemnému ovlivňování. K měření rychlosti proudění byl použit ruční digitální lopatkový anemometr Lutron AM-4203, jehož čidlo se připevnilo ke druhému konci trubice.

Když byla měřící sestava kompletní, byly do trubice vyřezány dva otvory pro tranzistorové čidlo senzoru. Tranzistor Q_2 , fungující jako referenční tranzistor, musel být navíc schovaný do krabičky, vyrobené z papíru, aby nebyl ochlazovaný proudem vzduchu.

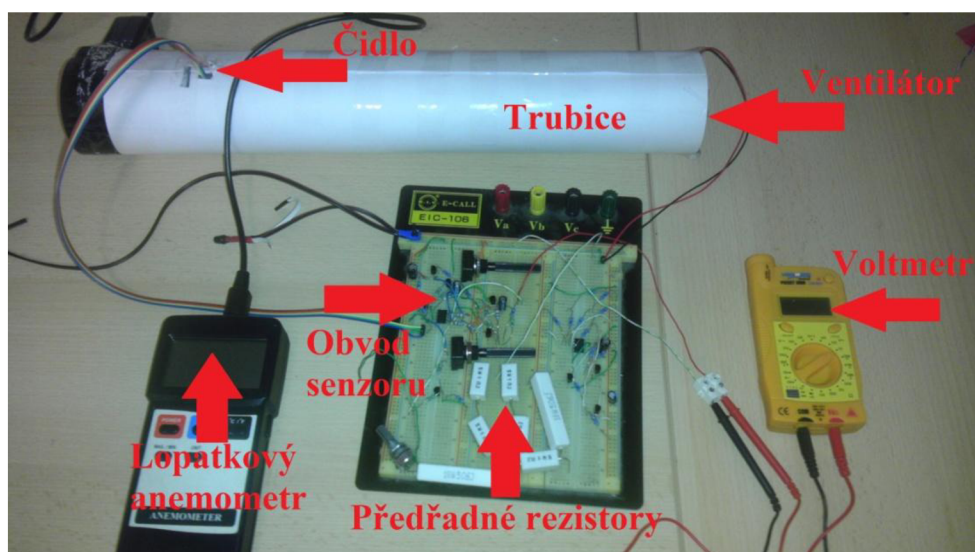
Senzor byl připojen na zdroj, kdy po chvíli došlo k ustálení hodnoty výstupního napětí na hodnotu 4,98V. Vhodným nastavením potenciometru P_1 byla splněna podmínka $U_{Q1} = U_{Q2}$. Obě tato napětí měla hodnotu 0,6V. Po každé změně hodnoty odporu na potenciometru P_1 je nutné chvíli počkat, než se tranzistor Q_1 ohřeje, případně ochladí na nastavenou hodnotu. Na potenciometru P_2 se nastavila hodnota odporu 0Ω . Nyní se mohla z voltmetru LM-801, který měřil hodnotu výstupního napětí, odečíst první hodnota. Potom se zapnul ventilátor a připojováním sériových rezistorů (každý o odporu 1Ω) se snižovaly jeho otáčky, docházelo tedy ke snižování rychlosti vzduchu. Po každém připojení sériového odporu se z voltmetru odečetla hodnota výstupního napětí senzoru a hodnota rychlosti proudění z anemometru. Obě hodnoty byly zaneseny do tabulky. Tabulka naměřených hodnot se nachází na přiloženém CD.

Když byl proměřen celý rozsah rychlostí, které byl ventilátor schopen vytvořit, na potenciometru P_2 se změnil odpor na $2,5k\Omega$ a celý postup se opakoval. Následně se ještě provádělo měření pro hodnotu odporu $4k\Omega$.

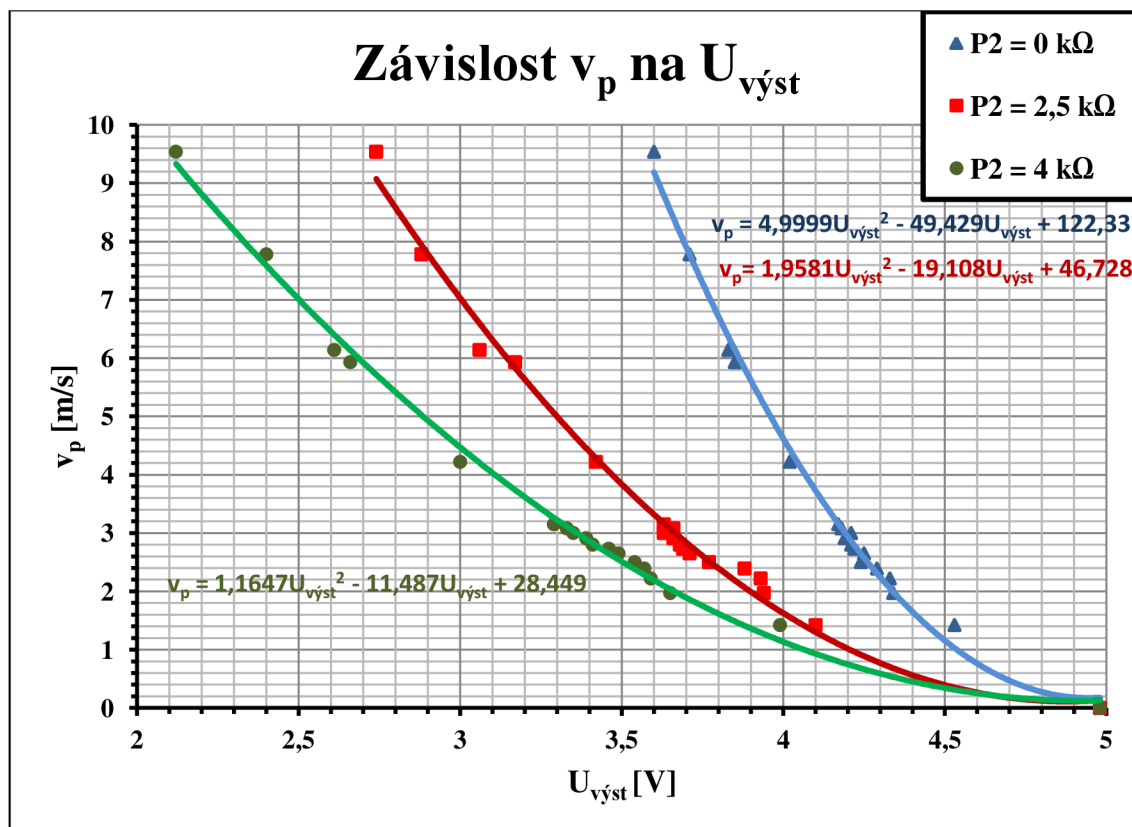
Už v průběhu testování se projevila první výhoda tranzistorového senzoru rychlosti. Hodnoty na senzoru se ustalovali mnohem dříve, než na lopatkovém anemometru. Občas však docházelo k nestabilitě senzoru, avšak tato nestabilita vymizela při vyšších rychlostech proudění (při rychlostech nad 3 m/s).



Obrázek 4.6: Schéma trubice



Obrázek 4.7: Testovací sestava



Graf 4.1: Závislost rychlosti proudění v_p na výstupním napětí senzoru $U_{výst}$

Závislost znázorněná v grafu 4.1 sice není lineární, ale velice dobře jí popisuje polynom druhého stupně (parabola). Rovnice paraboly jsou uvedeny ve stejném grafu. K proložení naměřených hodnot polynomem byl použit program MS Excel.

Senzor nedokáže na výstupu vytvořit nulovou hodnotu napětí. Minimální hodnota je 1,1V. Po jejím dosáhnutí, už s rostoucí rychlostí proudění výstupní napětí neklesá. Graf také ukazuje, jak hodnota odporu P_2 ovlivňuje naměřenou závislost. S rostoucím odporem na P_2 sice klesá rozsah, ale zvětšuje se citlivost. Senzor dokáže zaznamenat menší rozdíly v rychlosti vzduchu.

Maximální rychlosti proudění pro uvedené velikosti odporů na P_2 , vzniklé dosažením minimálního výstupního napětí do rovnic polynomů, jsou pro zajímavost v Tabulce 4.1.

P_2 [kΩ]	v_{pmax} [m/s]
0	74
2,5	28
4	17,2

Tabulka 4.1: Maximální rychlosti proudění

4.7 Návrh DPS

Cílem je vytvořit co nejmenší DPS. Proto musely být použity pouze SMD součástky.

Návrh DPS probíhal ve volně dostupné verzi programu Eagle. V Eaglu probíhá návrh ve třech krocích. Nejdříve je nutné nakreslit schéma, poté vhodně rozmístit součástky na desku a nakonec vše pospojovat.

Před návrhem je potřeba si vybrat vhodné SMD náhrady za součástky, které byly použité v původním obvodu. Součástky byly vybírány z katalogu GM Electronic (viz Tabulka 4.2).

Součástka	Původní	SMD
IC ₁ / IC ₂	LM393	LM393SMD
Q ₁ , Q ₂	2N4401	BCP55-16SMD
Q ₃ , Q ₇	2N3906	BC807-25SMD
Q ₄	BC560C	BC857C
Q ₅	BC548C	BC848C
Q ₆	2N3904	BC817-16SMD
P ₁	10k	TS53YJ-10k
P ₂	5k	TS53YJ-5k
C ₂ , C ₃	Elektrolyt.	Tantal. - pouzdro A
C ₁	Elektrolyt.	Tantal. - pouzdro B
R ₁ – R ₁₈	Metalizovaný - pouzdro 0207	Pouzdro 0603

Tabulka 4.2: Použité SMD součástky

Protože se senzor po dokončení bude připojovat na měřicí kartu MF624, bylo potřeba zjistit, jestli ho je nutné galvanicky oddělit od vstupu do karty. Nadměrný odběr proudu z karty by mohl mít za následek zkreslování výsledků, nebo by jí mohl poškodit. K tomu opět posloužil obvod sestavený na nepájivém poli. Než se tento obvod připojil ke kartě, bylo potřeba změřit jeho spotřebu. Ukázalo se, odebírá 60 až 200mA v závislosti na rychlosti proudění (čím větší rychlost, tím větší spotřeba). Z uživatelského manuálu bylo zjištěno, že maximální odběr z karty při napětí 5V je 250mA. Senzor tedy může být připojený přímo ke kartě.

Na Obrázcích 4.8 a 4.9 je vidět finální návrh DPS. Otvory na obou koncích desky jsou určeny pro šrouby, kterými bude deska připevněná k rotoru. Tranzistory Q₁ a Q₂ se nebudou nacházet přímo na desce, proto byly nahrazeny pouze vývody.

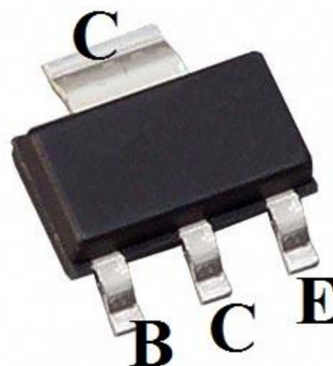
4.8 Konstrukce čidla

Jak již bylo zmíněno výše, konstrukce čidla musí splňovat následující:

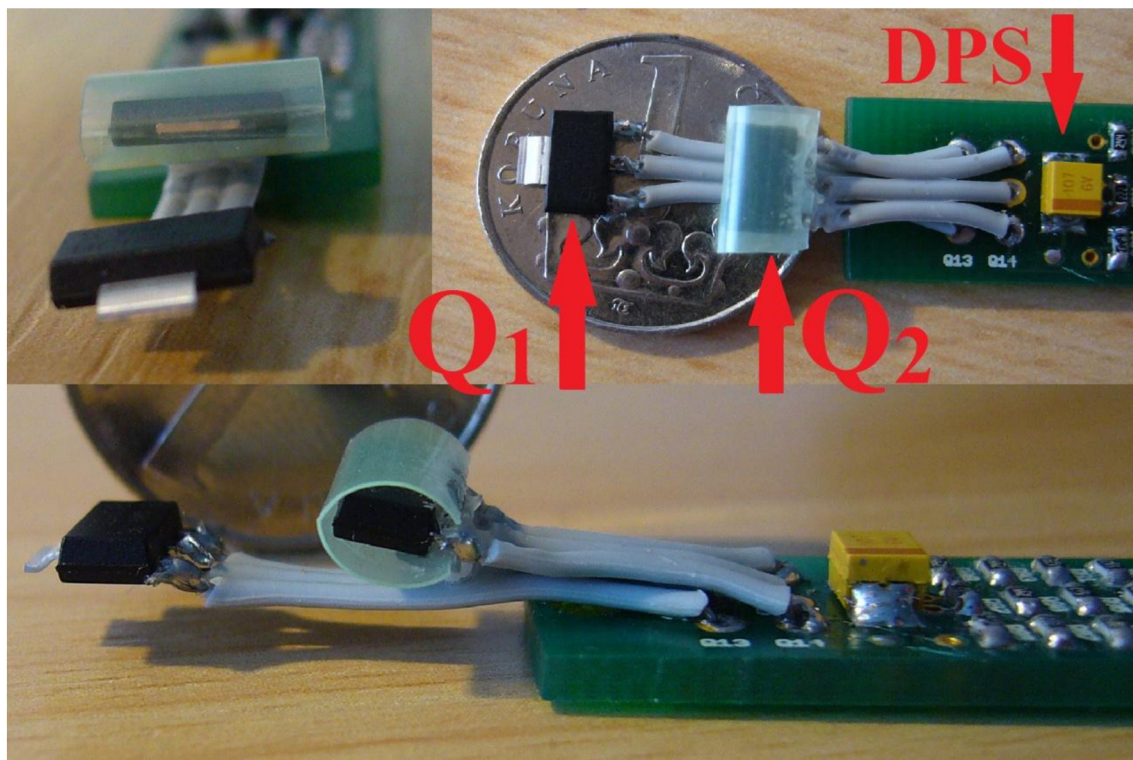
- Tranzistor Q_1 musí být vystavení proudu vzduchu
- Tranzistor Q_2 nesmí být ochlazován proudícím vzduchem
- Tranzistor Q_2 nesmí být ohříván tranzistorem Q_1
- Čidlo by mělo co nejméně ovlivňovat okolní proudění

Na obrázku 4.10 je vidět rozložení kontaktů tranzistorů BCP55-16SMD, které byly použity jako tranzistory Q_1 a Q_2 . Velký kontakt tvoří část kolektoru tranzistoru. Tranzistor může být připojen pouze za jednu část kolektoru a jeho funkci to přitom neovlivní.

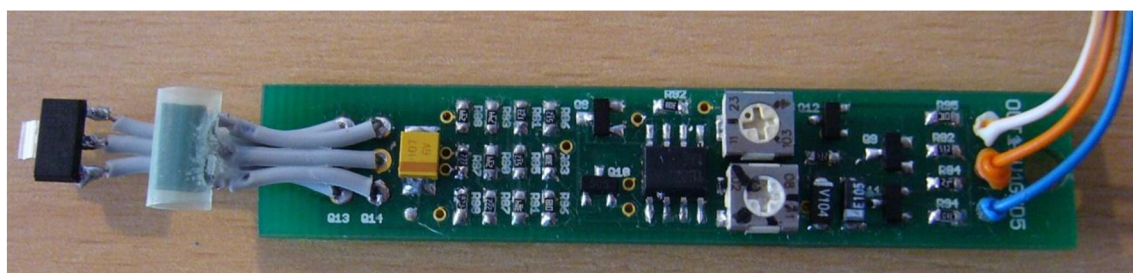
Na obrázku 4.11 je znázorněna konstrukce čidla. Nejvíce vzdálený tranzistor od DPS je Q_1 , který bude proudu vystaven užší částí s velkým kolektorovým kontaktem. Vzduch bude sice působit pouze na malou plochu pouzdra tranzistoru, ale kontakt kolektoru bude fungovat jako chladič, takže tranzistor by měl být dostatečně ochlazován. Tranzistor Q_2 je od Q_1 odsazen směrem k desce a neleží přímo na vodičích, aby ho Q_1 nezahřival. Byl mu navíc odstraněn velký kolektorový kontakt, protože funkce chladiče je v případě Q_2 nežádoucí. Q_2 je vůči směru proudění orientován stejně jako Q_1 . Aby proudící vzduch neovlivňoval Q_2 , je umístěný uvnitř plastové trubičky. Vrstva vzduchu mezi tranzistorem a trubičkou, bude sloužit jako izolant, ale zároveň se uvnitř trubičky bude udržovat teplota okolí.



Obrázek 4.10: Kontakty tranzistorů BCP55-16SMD



Obrázek 4.11: Konstrukce čidla



Obrázek 4.12: Konečná podoba senzoru

4.9 Testování senzoru

Nyní, když je senzor hotový, je potřeba najít závislost mezi výstupním napětím a rychlostí proudění. Také se musí zjistit, jak okolní teplota ovlivňuje výstupní data a jak je senzor při měření stabilní.

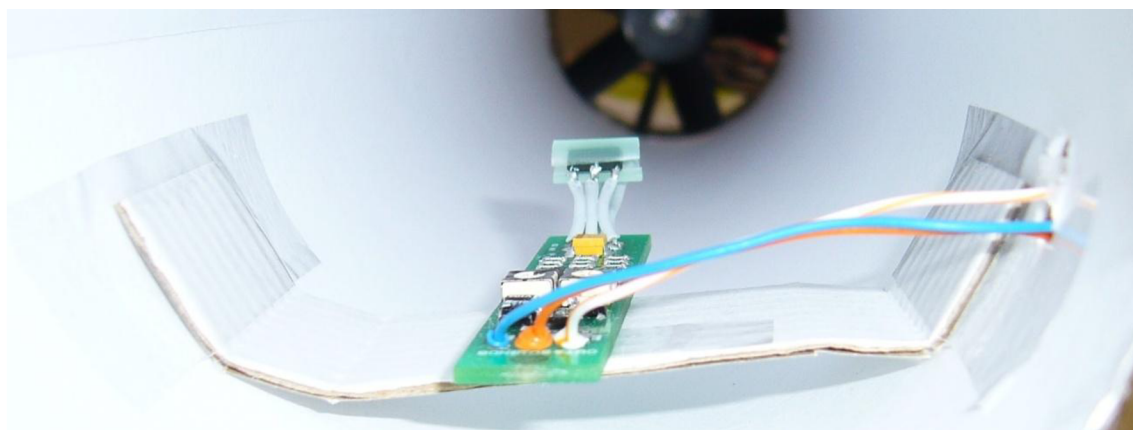
4.9.1 Kalibrace senzoru

Postup a sestava celého měření byly stejné, jako v kapitole 4.5. Ale při tomto měření je uvnitř trubice celý senzor. Umístění senzoru v trubici je znázorněno na obrázku 4.13. Výstupní (Bílý) a napájecí (Oranžový = +5V, Modrý = GND) vodiče jsou vyvedeny ven bokem trubice.

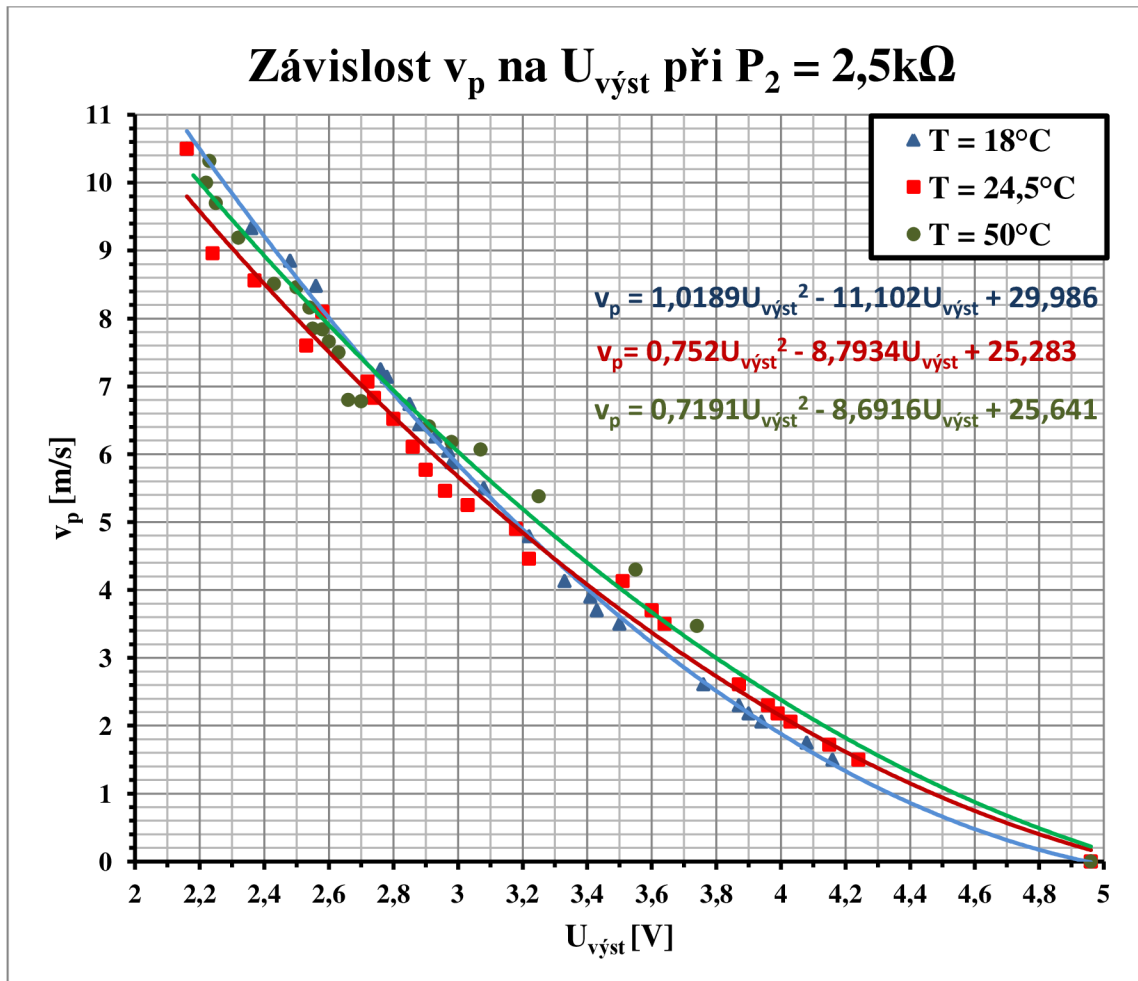
Měření probíhalo při třech různých teplotách: 18, 24,5 a 50°C, a pro tři hodnoty odporu na potenciometru P_2 : 0, 4 a 2,5k Ω . Kalibrace probíhala pro rozsah rychlostí od 2 do 11m/s. Všechny tabulky s naměřenými hodnotami a grafy v lepším rozlišení jsou uloženy na příloženém CD.

Výsledky ukazují, že se senzor chová stejně jako obvod na nepájivém poli, proto stejně jako při předchozím testu, je nejvhodnější proložit naměřená data parabolou, viz graf 4.2.

Senzor vykazuje jistou závislost měření na teplotě, ale rozdíly nejsou velké.



Obrázek 4.13: Umístění senzoru v trubici



Graf 4.2: Závislost rychlosti proudění na výstupním napětí senzoru při různých teplotách

P_2 [k Ω]	$T = 18^\circ\text{C}$	$T = 24,5^\circ\text{C}$	$T = 50^\circ\text{C}$
	v_{pmax} [m/s]	v_{pmax} [m/s]	v_{pmax} [m/s]
0	59,6	75,3	82,1
2,5	19,2	16,7	17,1
4	10,9	11,2	10,5

Tabulka 4.3: Maximální možné měřitelné rychlosti proudění za daných podmínek

Nejnižší napětí, které se na výstupu může objevit, je 1,07V. Z toho po dosazení do rovnice kalibrační křivky získáme maximální rychlost proudění v_{pmax} , kterou senzor dokáže za daných podmínek změřit. Tyto rychlosti jsou v Tabulce 4.3.

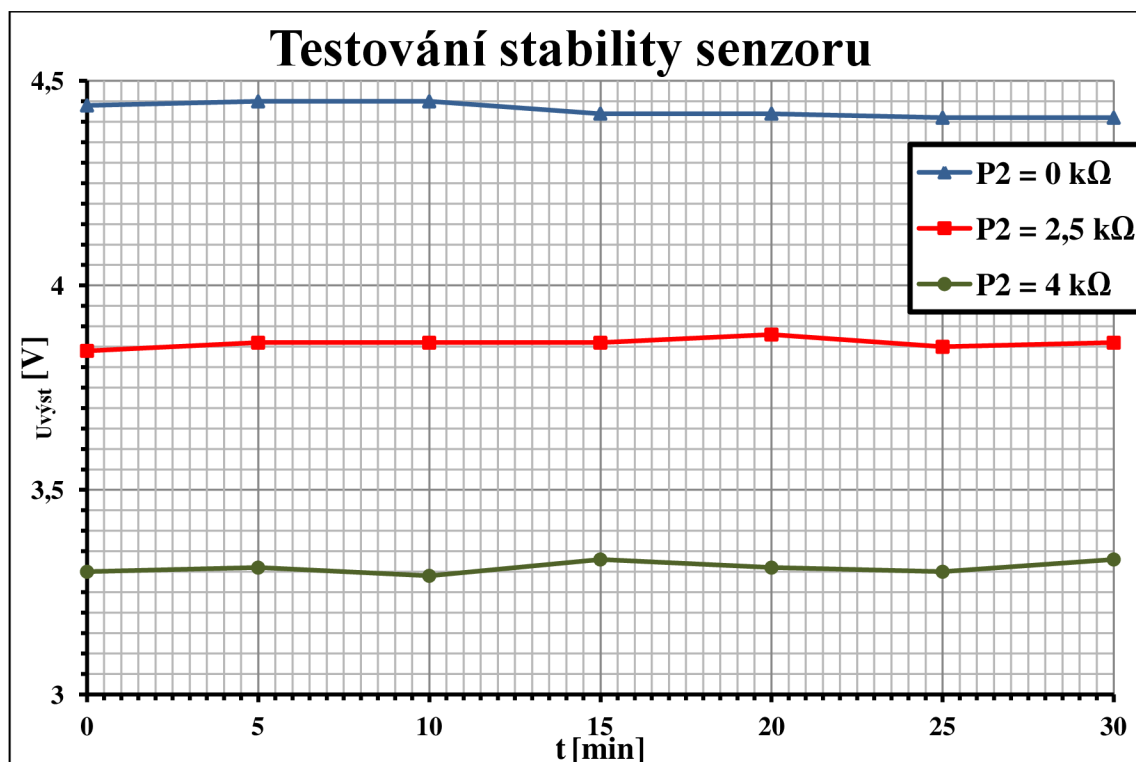
Naše požadavky na rozsah měření (2 až 20m/s) nejlépe splňuje $P_2 = 2,5k\Omega$. Je tedy nutné, aby odpor na potenciometru P_2 byl nastaven na hodnotu mezi 0 až 2,5k Ω .

4.9.2 Testování stability měření senzoru

Další důležitá vlastnost senzoru je, jak se jeho výstupní data mění v čase při konstantní rychlosti proudění, tedy jak je jeho měření stabilní.

Schéma měření a umístění senzoru v trubici bylo opět stejné jako při předchozím měření. Na ventilátoru byly nastaveny konstantní otáčky, při kterých mělo proudění vzduchu uvnitř trubice rychlost 2,62m/s. Měření probíhalo po dobu 30min, kdy každých 5min došlo k odečtení hodnoty výstupního napětí ze senzoru. Výsledky jsou zobrazeny v grafu 4.3. Tabulka hodnot je uložena na příloženém CD.

Pro všechny tři měření je rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou napětí 0,04V. To znamená, že senzor udává poměrně stabilní naměřené hodnoty.



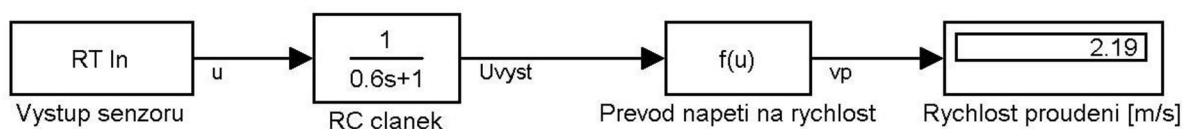
Graf 4.3: Stabilita měření senzoru

4.10 Software senzoru

Software senzoru má za úkol převést výstupní napětí na hodnotu rychlosti proudění. V konečné verzi senzoru by se signál ze senzoru měl bezdrátově přenášet do mikrokontroléru. V tomto případě prozatím stačí jednoduchý model v Simulinku, viz obrázek 4.14.



AirFlowSensor
Humusoft
MF624 (auto)



Obrázek 4.14: Model pro výpočet rychlosti proudění

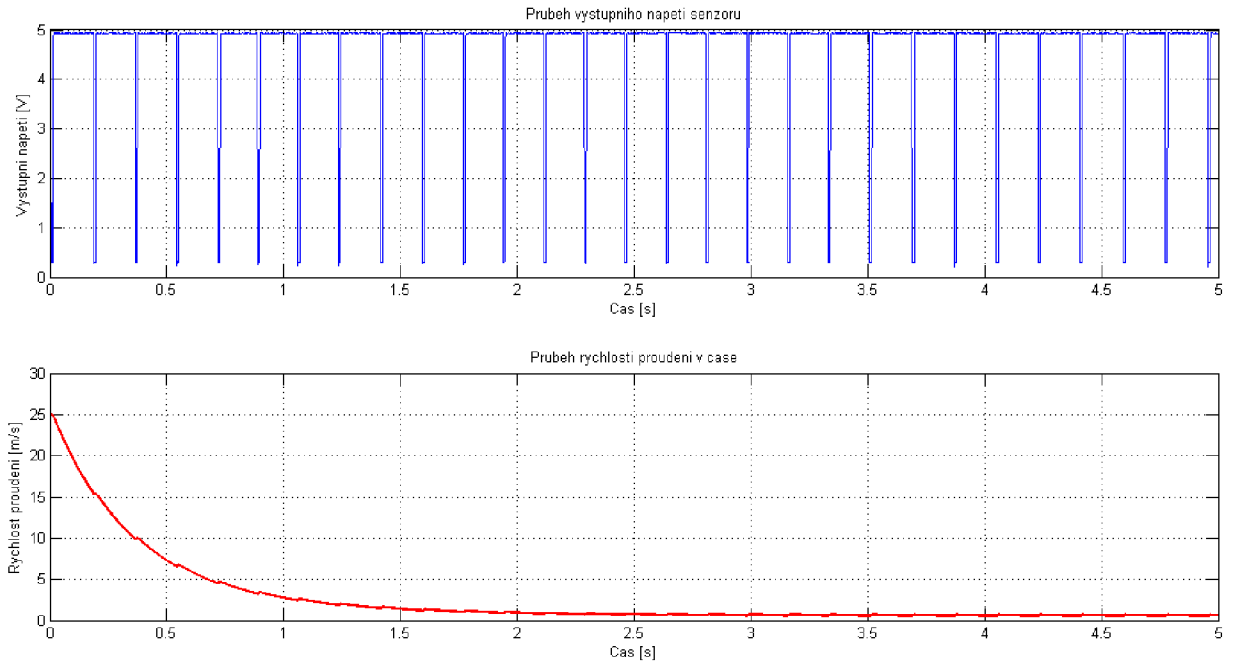
Pro realizaci modelu, byl využit RealTime Toolbox. Blok *RT In* umožňuje přenášení výstupního signálu ze senzoru přes kartu MF624 do Simulinku.

Výstupem senzoru však není spojitě se měnící napětí, ale obdélníkový signál. Abychom získali stejné hodnoty napětí, jako z voltmetru, je potřeba vypočítat střední hodnotu výstupního signálu. Tu lze získat přefiltrováním signálu přes integrační RC článek, který je v modelu nahrazen přenosovou funkcí. Je sice pravda, že by mohl být umístěný přímo na DPS senzoru, ale takto je možné měnit časovou konstantu článek τ podle potřeby. Časová konstanta τ je dána součinem odporu R rezistoru a kapacitou C kondenzátoru ($\tau = RC$ [s]). Větší časová konstanta sice způsobuje hladší průběh výstupního signálu, ale zároveň trvá delší dobu, než signál dosáhne ustálené hodnoty. Protože to snižuje citlivost senzoru, musíme najít kompromis mezi přesností a rychlostí RC článek. V našem případě se nejlépe osvědčilo $\tau = 0,6s$.

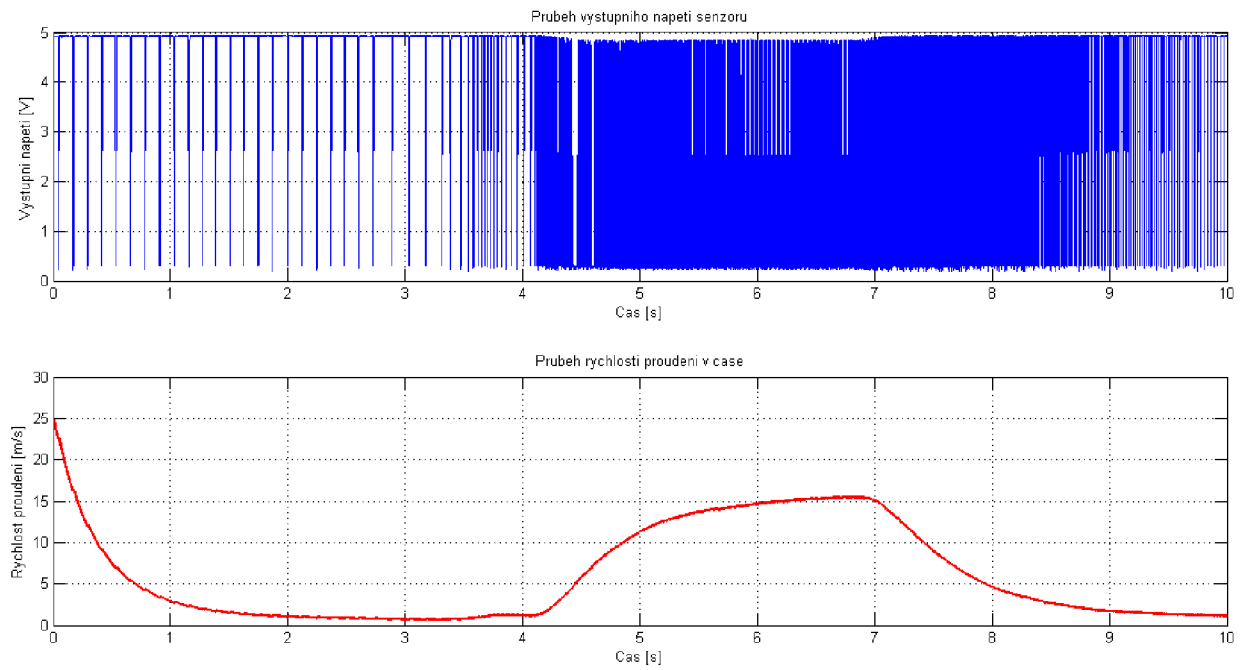
Rychlost proudění v_p se získá dosazením střední hodnoty napětí U_{vyst} do rovnice kalibrační křivky, získané v kapitole 4.9.1, a výsledek se následně zobrazí na displeji.

Graf 4.4 ukazuje, jak se senzor chová při nulové rychlosti proudění a graf 4.5 znázorňuje reakci senzoru na změny rychlosti (prudký nárůst a pokles rychlosti). Náhlý pokles rychlosti z 25 m/s na nulu, byl dán spuštěním měření, kdy se výstupní signál z RC článek musel nejprve dostat na svou ustálenou hodnotu. Průběh střední hodnoty napětí je přesně opačný, tzn., že pokud rychlost roste, tak napětí klesá.

Model je uložený na příloženém CD.



Graf 4.4: Senzor při nulové rychlosti proudění



Graf 4.5: Senzor při měnící se rychlosti proudění

5. ZÁVĚR

Celá práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První popisuje různé metody měření rychlosti vzduchu. Druhá detailně popisuje postup konstrukce senzoru a jeho testování.

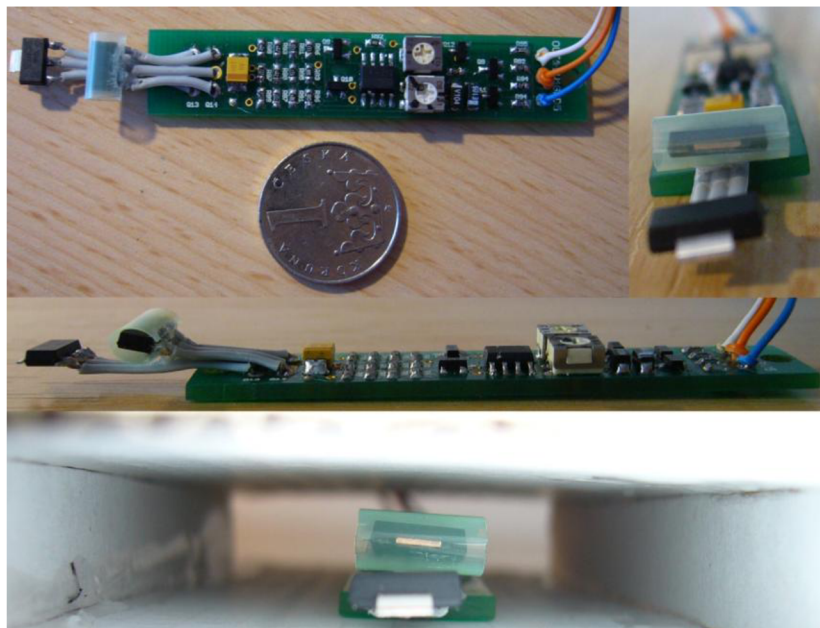
Hlavním cílem práce bylo postavit senzor pro měření rychlosti vzduchu v elektrickém stroji a jeho následné testování. Tento cíl byl splněn a na obrázku 5.1 je možné si prohlédnout konečnou podobu senzoru.

Senzor se zakládá na principu tepelného anemometru s tranzistorovým čidlem. Důvody tohoto výběru jsou popsány v kapitolách 4.2 a 4.3.

Rozměry senzoru jsou 12x80x6mm. Při měření se musí celý senzor nacházet v proudu vzduchu, viz obrázek 4.3 umístění II. Z výsledků měření se ukázalo, že senzor je schopný proměřit požadovaný rozsah rychlostí 2 až 20m/s a také bez problémů zvládá i rychlosti nižší a zřejmě by dokázal změřit i vyšší rychlosti. Nejlepší vlastnosti má senzor při rychlostech vzduchu nad 3m/s. Měření je sice závislé na teplotě a zřejmě i na tlaku okolního vzduchu, ale tyto vlivy se příliš neprojevují a nezpůsobují velké rozdíly výsledných dat. Kvůli teplotním omezením elektronických součástek, dokáže senzor měřit pouze do maximální provozní teploty 100°C, pak dojde ke zničení čidla. Naopak minimální provozní teplota je do -65°C, viz datasheety součástek.

Senzor je možné propojit s počítačem přes kartu MF624. V kapitole 4.10 byla popsána tvorba jednoduchého modelu v Simulinku, který převádí výstupní signál senzoru na rychlost proudění.

I když hlavní cíle této práce byly splněny, senzor lze dále vylepšovat a doplňovat. Do budoucna je potřeba k senzoru přidat bezdrátové propojení s počítačem, případně s mikrokontrolérem. Dále se musí ověřit účinky proměnného magnetického pole, které se v elektrickém stroji nachází, a případně vymyslet ochranu před nežádoucími účinky. Referenční tranzistor může být využit jako čidlo teploty pro zpřesnění měření. Možná je samozřejmě i další miniaturizace.



Obrázek 5.1: Senzor

6. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MALÍK, M., PRIMAS, J. *Anemometrické metody*. [Učební text] Liberec, 2011.
- [2] Anemometer. *Wikipedia*. [Online] 20. únor 2013. [Cit. 4. březen 2013].
Dostupné z: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>>.
- [3] Anemometry. [Online] 2013. [Cit. 1. duben 2013].
Dostupné z: <<http://ctmpraha.cz/rychlost-a-smer-vetru.html>>.
- [4] Proudění, rychlost a průtok plynů. *Průtoky*. [Online] 2011. [Cit. 18. duben 2013].
Dostupné z: <<http://www.prutoky.cz/plyny/prandtlovy-trubice/>>.
- [5] efunda. [Online] 2013. [Cit. 18. duben 2013]. Dostupné z:
<http://www.efunda.com/designstandards/sensors/hot_wires/hot_wires_intro.cfm>.
- [6] Příklady měřících metod průtoků. *prutoky*. [Online] 2012. [Cit. 18. duben 2013].
Dostupné z: <<http://www.prutoky.cz/kapaliny/teorie/priklady-mericich-metod/>>.
- [7] Fluid Mechanics. *vidix*. [Online] 2011. [Cit. 18. duben 2013].
Dostupné z: <http://www.vidix.se/Fluid_Mech.htm>.
- [8] WOODWARD, S. *Transistor linearly digitizes airflow*. [Online] Chapel Hill, 2002.
Dostupné z: <<http://m.eet.com/media/1140613/17997-91902di.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

C	Kapacita kondenzátoru	[F]
d	Malý průměr Venturiho trubice	[m]
D	Velký průměr Venturiho trubice	[m]
g	Tíhové zrychlení	[m/s ²]
H	Rozdíl výšek hladin měřící kapaliny v U-trubici	[m]
I	Proud procházející žhaveným drátkem	[A]
I_{Q1}	Kolektorový proud procházející tranzistorem Q ₁	[A]
I_{Q2}	Kolektorový proud procházející tranzistorem Q ₂	[A]
I_D	Vybíjecí proud	[A]
L	Délka ramene miskového anemometru	[m]
n	Otáčky	[1/s]
p_c	Celkový tlak	[Pa]
p_d	Dynamický tlak	[Pa]
p_s	Statický tlak	[Pa]
R	Elektrický odpor	[Ω]
T	Teplota okolního vzduchu	[°C]
U	Úbytek napětí na žhaveném drátku	[V]
U_{Q1}	Napětí mezi bází a emitorem na tranzistoru Q ₁	[V]
U_{Q2}	Napětí mezi bází a emitorem na tranzistoru Q ₂	[V]
$U_{výst}$	Střední hodnota výstupního napětí senzoru	[V]
v_p	Rychlost proudění vzduchu	[m/s]
v_{pmax}	Maximální rychlost proudění vzduchu měřitelná senzorem	[m/s]
v_R	Tečná rychlost konců ramen miskového anemometru	[m/s]
ρ_k	Hustota měřící kapaliny	[kg/m ³]
ρ_{vzd}	Hustota vzduchu	[kg/m ³]
τ	Časová konstanta RC článku	[s]

SEZNAM PŘÍLOH NA CD

Příloha 1	Schéma obvodu
Příloha 2	Testování obvodu na nepájivém poli
Příloha 3	Kalibrace senzoru
Příloha 4	Stabilita senzoru
Příloha 5	Model v Simulinku
Příloha 6	Návrh DPS v Eaglu
Příloha 7	Elektronická verze této práce