



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

NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ STŘEDNÍ TEPLoty PROUDÍCÍHO VZDUCHU V KANÁLE LIBOVOLNÉHO PRŮŘEZU

DESIGN OF DEVICE FOR DETERMINATION OF AIR MEAN TEMPERATURE IN THE CHANNEL WITH VARIOUS
CROSSECTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Hindrich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|----------------------------------------------------|
| Ústav: | Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky |
| Student: | Tomáš Hindrich |
| Studijní program: | Aplikované vědy v inženýrství |
| Studijní obor: | Mechatronika |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2021/22 |

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:

Návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnout zařízení pro měření teploty vystupujícího vzduchu z elektrického stroje. Tato hodnota je velice důležitá pro stanovení celkové tepelné bilance elektrického stroje. Doposud používaný přístup spočívající v měření teploty v jednom bodě průřezu je dosti nepřesný pro stanovení tepelné bilance. Zařízení by mělo být navrženo tak, aby stanovilo střední teplotu na výstupném otvoru elektrického stroje. Jde o poměrně jednoduchý princip, který je však potřebné zpracovat pomocí elektroniky, kterou je třeba navrhnout.

Cíle bakalářské práce:

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

Seznam doporučené literatury:

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

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem zařízení pro měření střední teploty a rychlosti proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu. Návrh využívá inovativního senzoru průtoku, fungujícího na principu CTA (anglicky Constant Temperature Anemometry), který využívá kompenzaci teploty.

Abstract

This bachelors thesis deals with the design of device for determination of air mean temperature in the channel with various crosssection. The design uses an innovative flow sensor operating on the principle of CTA (Constant Temperature Anemometry) that is using temperature compensation.

Klíčová slova

Žárový anemometr, měření rychlosti proudění vzduchu, Kingův zákon, CTA, senzor průtoku

Key words

Hot wire anemometer, air velocity measurement, King's law, CTA, thermal mass flow sensor

Bibliografická citace

HINDRICH, Tomáš. *Návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139759>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Radek Vlach.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Tomáš Hindrich

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat Dipl.Ing. Tomáši Hornému z firmy Innovative Sensor Technology s.r.o., který mi zdarma zaslal náhradní senzor průtoku, poté co jsem tento senzor dva týdny před odevzdáním bakalářské práce omylem zničil. Také chci poděkovat Ing. Pavlu Tomíčkoví a doc. Ing. Radku Vlachovi za cenné rady a připomínky.

Obsah

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------|----|
| 1 | Úvod | 10 |
| 2 | Teorie | 11 |
| 2.1 | Tekutina..... | 11 |
| 2.2 | Tlak | 11 |
| 2.2.1 | Statický tlak | 11 |
| 2.2.2 | Dynamický tlak | 11 |
| 2.3 | Proudění tekutin | 12 |
| 2.3.1 | Rovnice kontinuity..... | 12 |
| 2.3.2 | Bernoulliho rovnice | 12 |
| 2.4 | Laminární proudění a turbulentní proudění | 12 |
| 2.5 | Měření teploty | 13 |
| 2.5.1 | Mechanické teploměry | 13 |
| 2.5.2 | Elektrické teploměry | 13 |
| 2.6 | Tepelná konvekce..... | 14 |
| 2.6.1 | Přirozená konvekce | 14 |
| 2.6.2 | Nucená konvekce | 14 |
| 2.7 | Součinitel přestupu tepla | 15 |
| 2.8 | Měření průtoku | 15 |
| 2.8.1 | Průřezové průtokoměry | 15 |
| 2.8.2 | Turbínové a lopatkové průtokoměry | 16 |
| 2.8.3 | Kalorimetrické měření..... | 16 |
| 2.8.4 | Žárový anemometr..... | 16 |
| 2.9 | Měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále | 17 |
| 3 | Analýza řešeného problému | 18 |
| 3.1 | Měření teploty a průtoku..... | 19 |
| 3.2 | Teplotní čidlo..... | 19 |
| 3.3 | Tepelný snímač hmotnostního průtoku | 19 |
| 3.4 | Volba motorku | 23 |
| 3.5 | Návrh mechanické konstrukce | 24 |
| 3.6 | Návrh elektrického zapojení | 27 |
| 3.6.1 | Mikrokontroler | 28 |
| 3.6.2 | Driver pro krokový motor | 28 |
| 3.6.3 | Koncové spínače..... | 28 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------|----|
| 3.6.4 | Displej a ovládání displeje | 29 |
| 3.7 | Program..... | 29 |
| 4 | Kalibrační měření | 30 |
| 5 | Závěr..... | 33 |
| | Seznam použitých symbolů a zkratk | 34 |
| | Seznam použitých zdrojů | 35 |
| | Seznam příloh..... | 36 |

1 Úvod

Díky neustálému vývoji elektroniky a snaze o vytvoření rychlejších, menších a úspornějších čipů, vzniká spousta jednodušších a cenově přístupnějších možností pro implementaci různých řídicích algoritmů. Za velmi podstatný pak lze považovat i rozmach takzvaných vývojových desek. S jejich využitím je možné naprogramovat řízení téměř jakéhokoli robota, popřípadě zautomatizovat řadu repetitivních úkonů. Vzhledem ke stoupající popularitě vývojových desek a mikrokontrolérů se rozrůstá i komunita lidí, která je využívá. Díky těmto lidem pak vzniká celá řada knihoven a funkcí, což ve výsledku ještě více zjednodušuje programování vývojových desek a mikrokontrolérů a vzniká tak velmi cenný nástroj pro řadu inženýrů, programátorů a elektrotechniků. Tato bakalářská práce do značné míry těží z možností, které nám tyto mikropočítače nabízejí. Jejím cílem je návrh a konstrukce zařízení pro automatizaci procesu měření střední teploty proudícího vzduchu. Využívat se přitom bude velmi zajímavého senzoru průtoku, který vás třeba také zaujme a aplikujete jej pro řešení vašeho problému.

2 Teorie

2.1 Tekutina

Pod názvem tekutina se zahrnují společně kapaliny a plyny, případně i plazma. Společnou vlastností tekutin je tekutost, která je způsobena snadnou vzájemnou pohyblivostí částic, v důsledku toho se tekutina přizpůsobí tvaru nádoby, do níž je umístěna. [1]

V technické praxi je často potřeba znát termo-hydrmechanické veličiny jako je například teplota a průtok proto, aby bylo možné optimalizovat řadu technologických procesů.

2.2 Tlak

Tlak v tekutinách vzniká v důsledku tepelného pohybu molekul a atomů. Je pozorovatelný díky narážení těchto částic do stěn nádoby, v níž je tekutina uzavřena. Nárůstu tlaku uvnitř tekutin lze pak analogicky dosáhnout působením vnějších sil na stěnu nádoby, v níž je uzavřena. Pokud vnější síla F působí kolmo na stěnu nádoby o ploše S , lze velikost tlaku p popsat následujícím vzorcem.

$$p = \frac{F}{S} \quad (2.1)$$

2.2.1 Statický tlak

Statický tlak je způsoben tíhou tekutiny, tedy tím, že se molekuly a atomy tekutiny nachází v gravitačním poli a toto pole uděluje částicím zrychlení g . Velikost statického tlaku p_s je přímo úměrná hloubce h pod hladinou a hustotě tekutiny ρ . Lze jej měřit pouze v místech, kde nedochází k proudění tekutiny.

$$p_s = h \cdot \rho \cdot g \quad (2.2)$$

2.2.2 Dynamický tlak

Dynamický tlak vzniká při proudění tekutin přeměnou kinetické energie proudících částic v důsledku narážení do překážek, na energii tlakovou. Dynamický tlak p_d je úměrný druhé mocnině rychlosti proudění tekutiny v . Součtem dynamického a statického tlaku se získá tlak celkový.

$$p_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.3)$$

2.3 Proudění tekutin

Pojmem proudění tekutin se myslí pohyb částic tekutiny v určitém směru, tento pohyb se popisuje pomocí proudnic. Proudnice je taková myšlená čára, že tečna sestavená v jejím libovolném bodě určuje směr rychlosti pohybující se částice tekutiny. [2]

Pokud je rychlost proudění závislá na čase, jedná o nestacionární proudění. Pakliže je rychlost proudění v závislosti na čase neměnná, jedná se o proudění stacionární.

2.3.1 Rovnice kontinuity

Tato rovnice je odvozena ze zákona zachování hmotnosti. Popisuje, jak se změní rychlost proudění při změně průřezu potrubí, ve kterém tekutina proudí. Pro vztah objemového průtoku je třeba uvažovat tekutinu za nestlačitelnou a s konstantní hustotou. Pro objemový průtok Q_v pak platí rovnice.

$$Q_v = v \cdot S \quad (2.4)$$

Reálné tekutiny však nejsou dokonale nestlačitelné a jejich hustota není vždy zcela konstantní. Proto existuje i tvar rovnice pro hmotnostní průtok.

$$Q_m = \rho \cdot v \cdot S \quad (2.5)$$

2.3.2 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice je odvozena ze zákona o zachování mechanické energie. Popisuje přeměnu kinetické energie na energii potenciální tlakovou. Pro ideální nestlačitelnou kapalinu má následující tvar.

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + p_s = konst. \quad (2.6)$$

Kde v je rychlost proudění a p_s je statický tlak.

2.4 Laminární proudění a turbulentní proudění

Za laminární se proudění považuje tehdy, když jednotlivé vrstvy tekutiny proudí vedle sebe, nepromíchávají se a posouvají se po sobě. Laminární proudění vytváří rychlostní profil, který je typický tím, že ve středu tohoto profilu mají částice nejvyšší rychlost. Ta klesá se snižující se vzdáleností od stěny, u té je pak rychlost minimální. Obraz proudnic se s časem nemění. Se zvyšující se rychlostí proudění se však z laminárního proudění postupně stává proudění turbulentní. Obrazy proudnic turbulentního proudění se rozpadají, víří a zamotávají se do sebe.

K tomu, aby bylo možné rozpoznat, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění se používá Reynoldsovo číslo, jehož velikost nás informuje o charakteru proudění.

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\vartheta} \quad (2.7)$$

Kde v_s je střední hodnota rychlosti proudění kapaliny, d je hydraulický průměr potrubí a ϑ je kinematická viskozita. Pokud je Reynoldsovo číslo $Re < 2300$, je proudění v hladkém kruhovém potrubí laminární. Z praktického hlediska však nelze přesnou hranici přechodu z laminárního na turbulentní proudění posoudit, a proto je považováno následující pásmo jako přechodné $1800 < Re < 4000$.

2.5 Měření teploty

Pro měření teploty byla vytvořena široká škála snímačů, u kterých se teplota odvozuje z citlivosti na změnu fyzikální veličiny. Dělí se na mechanické a elektrické.

2.5.1 Mechanické teploměry

Mezi nejznámější teploměry patří teploměr rtuťový, který náleží do skupiny dilatačních teploměrů. Dilatační teploměry fungují na principu teplotní roztažnosti pevných látek. Dříve jmenovaný rtuťový teploměr je založený na objemové teplotní roztažnosti kapalin ve skle.

Dále se používají pro měření teploty bimetalické teploměry, které se skládají ze dvou pásků z rozdílných materiálů s odlišným teplotním součinitelem délkové roztažnosti. Tyto pásky jsou podélně svařeny a vlivem měnící se teploty dochází k zakřivení tohoto pásku.

2.5.2 Elektrické teploměry

Patří mezi ně odporové snímače teploty, termoelektrické články, polovodičové odporové senzory teploty a další měřidla. Polovodičové odporové senzory využívají teplotní závislost odporu na teplotě a jsou nelineární. V případě že jejich elektrický odpor pouze klesá s rostoucí teplotou, jedná se o NTC termistory. Existují však i polovodičové senzory, jejichž elektrický odpor s rostoucí teplotou mírně klesá, a poté, při takzvané Curieově teplotě, jejich elektrický odpor strmě vzroste a následně opět mírně klesá, v takovém případě se jedná o PTC termistory.

Termoelektrické články fungují na principu Seebeckova jevu. Při něm vzniká elektrické napětí, pokud se rozpojí obvod dvou vodičů z různých materiálů, kterým prochází elektrický proud a rozpojené konce mají rozdílné teploty. Pokud je však teplotní rozdíl velký, není velikost elektrického napětí mezi konci rozpojených vodičů lineárně závislá na teplotě.

Odporové snímače teploty mají pro rozsah teplot od 0 °C až do 100 °C, s určitou odchylkou, lineární závislost hodnoty elektrického odporu kovu na teplotě a lze proto využít vztahu

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t) \quad (2.8)$$

Kde R_0 je elektrický odpor snímače při 0 °C a α je teplotní součinitel elektrického odporu. Nejčastější volbou materiálu pro tento typ odporového snímače je platina. Takovýto snímač se nejčastěji vyskytuje v zapojení se zdrojem konstantního proudu, procházejícího přes odporový snímač. Pokud dojde ke změně teploty, změní se elektrický odpor snímače a dojde tím k napětíovému úbytku na snímači teploty.

2.6 Tepelná konvekce

Tepelná konvekce je přestup tepla z povrchu jednoho na povrch jiného tělesa, nebo do chladícího prostředí. Dělí se na volnou a nucenou. Pro tepelnou konvekci platí Newtonův ochlazovací zákon.

$$q_k = \alpha_{vl} \cdot (t_w - t_o) \quad (2.9)$$

Kde q_k je tepelný tok, α_{vl} je součinitel přestupu tepla, t_w teplota chlazeného tělesa, t_o je pak teplota chladícího tělesa.

2.6.1 Přirozená konvekce

Přirozená neboli volná konvekce je způsobena rozdílnou hustotou molekul v tekutinách. Rozdílná hustota molekul pak vyvolává jejich pohyb v důsledku vztlakových sil. Tento jev lze pozorovat v meteorologii, kde molekuly vzduchu, které jsou teplejší vůči okolním molekulám, stoupají vzhůru v důsledku nižší hustoty. S rostoucí nadmořskou výškou se pak znovu ochlazují a klesají zpátky k zemi.

2.6.2 Nucená konvekce

Nucená konvekce nastává, pokud je pohyb molekul tekutiny vynucený vnějším tlakovým rozdílem. Tento jev lze pozorovat například u ventilátorů.

2.7 Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla je závislý na mnoha parametrech, jako jsou například viskozita, typ proudění, tvar obtékané plochy a rychlost proudění. Proto se musí určovat experimentálně. V této bakalářské práci, při využití v žárové anemometrii, je součinitel přestupu tepla dán následujícím vztahem.

$$\alpha_{vl} = A + B \cdot v^n \quad (2.10)$$

Kde A a B jsou konstanty, $n \in \langle 0.3 \dots 0.5 \rangle$.

2.8 Měření průtoku

Existuje celá řada způsobů, kterými lze měřit velikost průtoku. Průtok existuje jak v objemovém, tak i hmotnostním tvaru. Označuje buď objem tekutiny protékající určitým průřezem za jednotku času, nebo je dán hmotností tekutiny protékající průřezem za jednotku času. Pokud se vynásobí objemový průtok hustotou protékající tekutiny, jde o průtok hmotnostní. Pro získání střední rychlosti proudění tekutiny je třeba vydělit objemový průtok obsahem průřezu, kterým tekutina protéká. Většina průtokoměrů funguje na principu měření pomocí úbytků tlaku, nicméně tyto metody nelze použít vždy, a proto byly vyvinuty i způsoby měření využívající kalorimetrické či elektronické prvky, tohoto způsobu měření bude využívat tato bakalářská práce. Nejprve budou popsány průtokoměry využívající principy odvozené z Bernoulliho rovnice, fungující na základě přeměny tlakové energie proudící tekutiny na energii kinetickou.

2.8.1 Průřezové průtokoměry

Do potrubí, kterým protéká tekutina, se vloží překážka. Změřením velikosti tlaku za překážkou vůči tlaku před překážkou se zjistí napěťový úbytek, z něhož lze následně vypočítat změnu kinetické energie, tedy i rychlost proudění. Nejznámější průtokoměr fungující na tomto principu je Venturiho trubice. Nevýhodou tohoto měřicího prvku je tlaková ztráta a požadavky na konstrukční provedení. Dalším druhem měřidel průtoku jsou rychlostní sondy, které měří celkový a statický tlak. Z rozdílu těchto tlaků se vypočítá tlak dynamický a ten je přímo závislý na rychlosti proudění. Nejjednodušší rychlostní sonda je takzvaná Pitotova trubice, jejímž zdokonalením vznikla Prandtlůva trubice a Willsonova mříž. Nevýhoda Pitotovy a Prandtlůvy trubice spočívá v tom, že tyto sondy jsou schopny měřit rychlost jen v bodě, ve kterém se nachází. Pro získání celkového rychlostního profilu tekutiny proudící potrubím, z něhož lze vypočítat střední rychlost, je třeba změřit rychlost ve více místech průřezu. U Wilsonovy mříže je tento problém vyřešen umístěním mříže tvořené několika trubičkami, kolmo na směr proudění tekutiny. Trubičky jsou vzájemně propojeny ve středu průřezu a nalézají se na nich symetricky rozmístěné otvory. Otvory umístěné proti směru proudění, snímají celkový tlak a ty co se nachází v úplavu trubiček měří tlak statický. Celkově pak Wilsonova mříž měří rozdíl těchto tlaků, což je dynamický tlak, z něhož se dá přímo vypočítat střední rychlost proudění.

2.8.2 Turbínové a lopatkové průtokoměry

Tyto typy průtokoměrů mají oběžné kolo, které je roztáčeno silovým účinkem proudící tekutiny. Aby bylo oběžné kolo uvedeno do pohybu, musí průtok překonat statické pasivní odpory kola. Tím vzniká chyba měření, jelikož takovýto průtokoměr nezměří slabé průtoky. Poté co hodnota průtoku překoná tuto počáteční hranici, je rychlost otáčení kola úměrná střední rychlosti průtoku.

2.8.3 Kalorimetrické měření

Princip kalorimetrického průtokoměru již nevychází z měření dynamického tlaku, ale využívá závislosti výměny tepla mezi zdrojem tepla a proudící tekutinou. Ve středu průřezu trubky, kterou proudí tekutina, se umístí zdroj tepla a poté se měří teplota před a za tímto zdrojem ve směru proudění. Rozdílem snímaných teplot před a za zdrojem tepla se zjistí oteplení toku, hmotnostní tok je pak přímo úměrný danému příkonu tepelného zdroje a nepřímo úměrný součinu rozdílu teplot a měrné tepelné kapacity ohřívané tekutiny.

2.8.4 Žárový anemometr

Tento senzor průtoku využívá závislosti součinitele přestupu tepla na rychlosti proudění. Existuje několik druhů měření s použitím žárového anemometru. Mezi dvě hlavní metody se řadí CTA (Constant Temperature Anemometer) a CCA (Constant Current Anemometer).

Při metodě CTA se žhavený drát zahřeje a udržuje na konstantní teplotě. Teplo ze žhaveného drátu se přenáší do kolem proudící tekutiny, na jejíž rychlosti proudění závisí součinitel přestupu tepla. S využitím operačních zesilovačů lze elektronicky vytvořit zpětnou vazbu, která kompenzuje tepelné ztráty na drátu tak, aby byla jeho teplota konstantní. Tepelná kompenzace zobrazená v měřených elektrických veličinách pak obsahuje informaci o rychlosti proudění. Metoda CTA má tu výhodu, že při malých rychlostech proudění není riziko zničení drátku tak vysoké jako při metodě CCA, kde vlivem konstantního proudu hrozí, že se drátek spálí. [3]

2.9 Měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále

Toto měření se realizuje kupříkladu na ventilaci a chlazení elektrických strojů. K tomuto měření se nejčastěji používá teleskopická sonda, kterou musí uživatel ručně vytahovat. Na displeji přístroje, k němuž je sonda připojena, je pak možné číst výsledky měření. Takovýto přístroj nabízí například firma AIRFLOW pod názvem Air-Pro – anemometr AP500 (lze vidět na obrázku 2.2.1). [4]



| Parametr | Hodnota | Jednotka |
|-----------|-------------------|----------|
| vmin-max | 0 až 30 ±3 % | m/s |
| Tmin-max | -10 až 65 ± 0.3 % | °C |
| Lmax | 0.3 | m |
| Automat | NE | - |
| Měří tlak | ANO | - |
| Cena | 17022.00 | Kč |

Obrázek 2.2.1: anemometr Air-Pro

Tabulka 1 Parametry anemometru Air-Pro

Z parametrů produktu Air-Pro lze vidět, že přístroj dosahuje vysoké přesnosti měření a disponuje také senzorem tlaku. Za negativní pak lze považovat fakt, že při měření musí uživatel jednou rukou sondu vysouvat a druhou rukou držet přístroj. Pokud by se uživatel snažil pomocí přístroje změřit střední teplotu proudícího vzduchu v kanále o určitém průřezu, výsledky měření by byly ovlivněny faktory jako třes rukou a odhadování vzdáleností jednotlivých bodů měření. Z toho důvodu je vhodné celý proces automatizovat a sondu vysouvat motorkem.

3 Analýza řešeného problému

Úkolem této bakalářské práce je návrh zařízení pro měření střední teploty proudícího vzduchu v kanále libovolného průřezu.

Jednotlivé body problému:

- Volba senzorů
- Volba motorku
- Návrh mechanické konstrukce
- Návrh elektrického zapojení
- Vytvoření programu pro regulaci motorku
- Zpracování dat měření a uživatelské prostředí

3.1 Měření teploty a průtoku

Jako první je třeba vyřešit volbu senzorů, protože právě pro ně je nutné vytvářet mechanickou konstrukci a návrh desky plošných spojů.

3.2 Teplotní čidlo

Pro měření teploty byl zvolen analogový teplotní senzor LM35DZ, který je vhodný díky své malé velikosti, protože se nachází v pouzdře TO-92. Jeho měřicí rozsah, od 0 °C do 100 °C je optimální, jeho převodní charakteristika výstupního napětí na měřené teplotě je lineární, s převodním koeficientem 10mV/°C. Rozsah velikostí možných napájecích napětí je od 4V do 20V. [5]

| Parametr | Typická hodnota | Maximální hodnota | Jednotka |
|----------------------|-----------------|-------------------|----------|
| U _{cc} | 4 až 20 | 35 | V |
| T _{min-max} | 0 až 100 | -60 až + 150 | °C |
| koeficient | +10 | +9.8 až +10.2 | mV/°C |
| Odchylka | ±0.6 | ±2.0 | °C |

Tabulka 2 Parametrů analogového teplotního senzoru

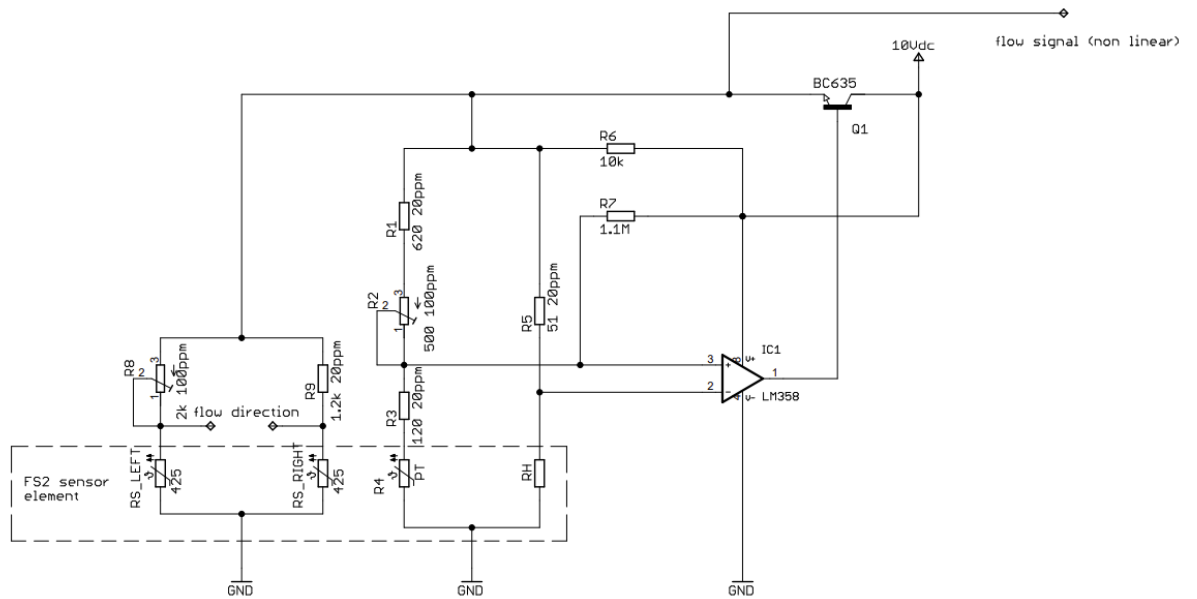
3.3 Tepelný snímač hmotnostního průtoku

K měření rychlosti proudění vystupujícího vzduchu z elektrického stroje byl využit tepelný snímač hmotnostního průtoku FS2T.0.1E.025 od firmy IST INNOVATIVE SENSOR TECHNOLOGY. Tento senzor funguje na principu žárového anemometru a je vylepšen o referenční rezistor, který kompenzuje chybu měření způsobenou neznámou, nebo proměnnou teplotou proudícího média. Pro tento senzor je však třeba vytvořit speciální elektrické zapojení, které musí být následně zkalibrováno. Schéma elektronického zapojení je převzato z datasheetu výrobce. [6]

| Parametr | Hodnota | Jednotka |
|----------------------|------------|----------|
| U _{cc} | 2 až 10 | V |
| T _{min-max} | -20 až 150 | °C |
| v _{min-max} | 0 až 100 | m/s |
| Přesnost | ± 2 | % |

Tabulka 3 Parametry tepelného hmotnostního průtokoměru

Z tabulky 3 lze vidět, že senzor je vhodný díky svým parametrům a rozměrům.



Obrázek 3.1: Schéma zapojení senzoru průtokoměru do elektrického obvodu

| Odpor | Hodnota | Jednotka |
|-----------------------|---------|----------|
| R ₁ | 620 | Ω |
| R ₂ | 500 | Ω |
| R ₃ | 120 | Ω |
| R ₄ | 710 | Ω |
| R ₅ | 51 | Ω |
| R ₆ | 10 | kΩ |
| R ₇ | 1.1 | MΩ |
| R ₈ | 2 | kΩ |
| R ₉ | 1.2 | kΩ |
| R _H (25°C) | 34 | Ω |
| R _{LEFT} | 425 | Ω |
| R _{RIGHT} | 425 | Ω |

Tabulka 4 Hodnoty odporů na obrázku 3.1

Z Obrázku 3.1 schéma je patrné, že je využíváno typické zapojení pro žárový anemometr. Schéma obsahuje Wheatstoneův můstek tvořený pasivními odpory R_1 a R_5 . Dále se v něm ladící trimmer R_2 , topný odpor R_H , referenční odpor měřící teplotu proudícího média R_4 a odpor R_3 zajišťující teplotní rozdíl (cca 30 °C) mezi proudícím médiem a topným odporem. Úkolem elektrického zapojení je udržení konstantní teploty topného odporu R_H vůči teplotě proudícího média. To také znamená poměru velikosti elektrického odporu R_H vůči referenčnímu odporu R_4 . Závislost elektrického odporu topného rezistoru na teplotě lze vyjádřit tímto vztahem.

$$R_H = R_{H0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (3.1)$$

Zapojení funguje následujícím principem, jakmile je obvod (obrázek 3.1) připojen ke zdroji elektrického napětí $U_{cc} = 10 \text{ V}$, vytvoří se na plusovém (neinvertujícím) vstupu operačního zesilovače větší napětí než na minusovém (invertujícím) vstupu. Díky tomu se výstup operačního zesilovače překlápí do kladného napájecího napětí. K výstupu operačního zesilovače je připojena báze NPN bipolárního tranzistoru BC635. Tento tranzistor je zapojen se společným kolektorem jako emitorový sledovač. Jeho úkolem je poskytnout téměř stejné napětí na zátěži jako na svém vstupu, ale zároveň umožnit tok většího proudu do zátěže, než jaký by byl schopen poskytnout pouze operační zesilovač LM 358.

Vzhledem k tomu, že smyčka obsahující odpory R_5 a R_H má řádově menší odpor než ostatní smyčky, protéká jí největší elektrický proud. Se zvyšujícím se proudem, který prochází přes rezistor R_H , kvadraticky narůstá ztrátový výkon na rezistoru, který je popsán rovnicí níže.

$$P_H = R_H \cdot I_H^2 \quad (3.2)$$

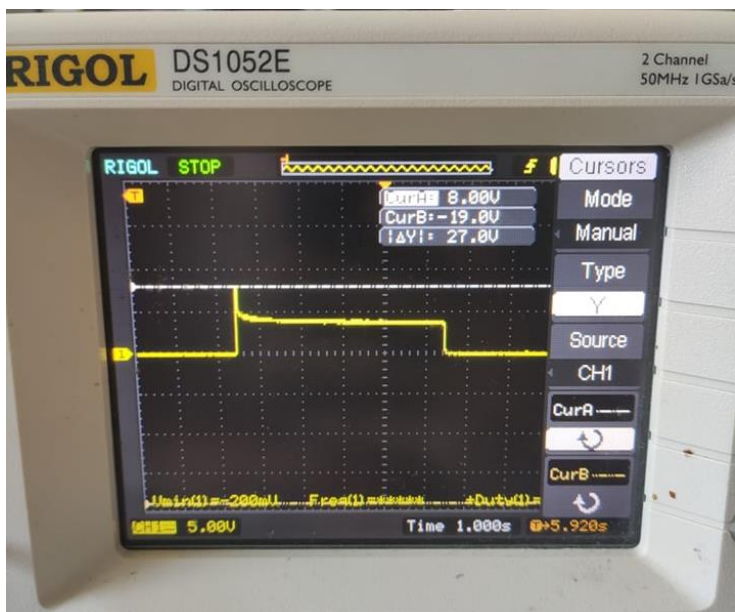
S velkým ztrátovým výkonem na odporu vzrůstá jeho teplota a tím i elektrický odpor. Z toho vyplývá, že nárůstem elektrického odporu se následně zvětší úbytek napětí na odporu R_H , a to do takové míry, dokud není napětí na invertujícím vstupu do operačního zesilovače stejné jako napětí na neinvertujícím vstupu.

Tohoto stavu rovnováhy dosáhne obvod poté co vzroste teplota topného rezistoru vůči okolí o zhruba $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento teplotní rozdíl vůči okolí byl doporučen výrobcem a lze jej upravit vhodnou volbou odporu R_3 , pomocí následující rovnice.

$$\frac{U_{out} \cdot (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{U_{out} \cdot R_{H0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)}{R_5 + R_{H0} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)} \quad (3.3)$$

Kde U_{out} je výstupní napětí obsahující informaci o rychlosti proudění a α je teplotní součinitel elektrického odporu, ten má pro platinu hodnotu $0,0039 \text{ K}^{-1}$. Velikost odporu R_3 pro $\Delta T = 30$ pak vychází 124Ω , nejbližší odpor nalezneme v přesné řadě E24 o hodnotě 120Ω .

Rezistor R_6 připojený ke zdroji napětí, funguje jako malý zdroj proudu. Ze začátku, když tranzistorem ještě neprotéká žádný proud je totiž potřeba vytvořit na rezistorech počáteční napěťové úrovně. Je třeba dát pozor na napěťový překmit výstupního napětí U_{out} , po připojení ke zdroji napětí. Tento překmit (lze vidět na obrázku 3.2) má při napájecím napětí $U_{cc} = 10 \text{ V}$ amplitudu 8 V a může nám zničit analogový vstup analogově digitálního převodníku mikrokontroléru, pokud využívá 5 V logiku. Z toho důvodu je potřeba výstupní napětí U_{out} snížit například napěťovým děličem. Tím je však o něco zhoršena přesnost měření, protože Arduino NANO využívá 10-ti bitový analogově digitální převodník.



Obrázek 3.2: Napěťový překmit napětí U_{out} po připojení ke zdroji

Rezistor R_7 byl doporučen výrobcem pro stabilitu obvodu anemometru.

Obvod měří rychlost proudění vzduchu pomocí následujícího principu. Po připojení ke zdroji napětí se ustálí vstupy operačního zesilovače v rovnovážném stavu a senzor může být umístěn do potrubí, v němž proudí vzduch. Následně vzduch obtékající senzor začne odvádět teplo z topného rezistoru R_H a to v závislosti na rychlosti proudění okolního vzduchu. Tento jev je popsán Kingovým zákonem.

$$P_H = (A + B \cdot v^n) \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

A , B jsou kalibrační konstanty, n je konstanta, která závisí na prostředí a pro vzduch náleží intervalu 0,3 až 0,5. Hodnota ΔT je obvodem udržována přibližně na 30°C.

Pokud je Kingova rovnice v rovnosti s rovnicí pro ztrátový výkon na rezistoru R_H . A je bráno v potaz, že je potřeba od sebe odečíst stav vyvolaný prouděním chladícího média (v rovnici zastoupené napětím U_{out}) a stav počáteční, kdy byl obvod v rovnováze (napětí U_{out0}), vznikne rovnice v následujícím tvaru.

$$(A + B \cdot v^n) \cdot \Delta T = (U_{out}^2 - U_{out0}^2) \cdot \frac{R_H}{R_5 + R_H} \quad (3.5)$$

Z této rovnice lze získat matematickými úpravami rovnicí v následujícím tvaru.

$$U_{out} = U_{out0} \cdot \sqrt{1 + B \cdot v^n} \quad (3.6)$$

Po úpravě tvaru vhodného pro měření rychlosti. Je závislost změřené rychlosti proudění v na výstupním napětí U_{out} následující.

$$v = \sqrt[n]{\frac{\left(\frac{U_{out}}{U_{out0}}\right)^2 - 1}{B}} \quad (3.7)$$

Vliv na chlazení topného rezistoru R_H má však kromě rychlosti proudícího média i proměnná teplota média, která by vnášela do měření chybu. Pokud by například byla teplota média vyšší (jiná velikost ΔT), než na jakou hodnotu jsou navrženy hodnoty rezistorů, vycházela by rychlost proudění nižší, než jaká je ve skutečnosti. Z tohoto důvodu se na senzoru nachází referenční rezistor R_4 .

V případě že byl topný odpor R_H ovlivněn proměnou teplotou okolního proudícího média, je touto změnou ovlivněn i referenční odpor R_4 . Napěťový úbytek na odporu R_H je kompenzován napěťovým úbytkem na odporu R_4 , díky tomu jsou při konstantní rychlosti proudění a proměnné teplotě proudícího vzduchu napěťové vstupy operačního zesilovače v rovnováze a výstupní napětí U_{out} je konstantní.

Na elektronickém schématu zapojení se nachází i druhé Wheatstoneovo zapojení, které však není používáno. Toto zapojení využívá toho, že topný rezistor se nalézá mezi dvěma rezistory, v momentě, kdy proud vzduchu obtéká senzorek, je jeden rezistor ohříván od topného rezistoru více. Jeho zahřívání se projeví na elektrickém odporu, tudíž i na napěťovém úbytku na něm vytvořeném. Z napěťových rozdílů pak lze vyvodit směr a velikost rychlosti proudění, ale jen pro malé rychlosti.

3.4 Volba motorku

Hlavními faktory při výběru krokového motorku byly jeho přesnost, řiditelnost, dostupnost, velikost, cena, kroutící moment na hřídeli, proudová spotřeba a potřebné napětí.

Požadovaný kroutící moment motorku byl zvolen s ohledem na to, že má po převodování za úkol zmáčknout tlačítko koncového spínače, které potřebuje pro jisté sepnutí minimální přítlačnou sílu 3 N. Dále z konstrukčních parametrů krabičky, v níž bude motorek uložen, plyne, že síla potřebná na zmáčknutí tlačítka bude působit na rameni dlouhém zhruba 10 mm. Z toho vyplývá, že minimální kroutící moment potřebný na stisknutí tlačítka je zhruba 3Ncm. Je však třeba brát v potaz, že hřeben, kterým bude pastorek ve vedení krabičky posouvat a na jehož konci se nachází koncový spínač, bude při svém posuvném pohybu přicházet do styku s velkými nerovnostmi způsobenými výrobou 3D tiskem. Obecně je doporučeno při výběru krokových motorů volit takový

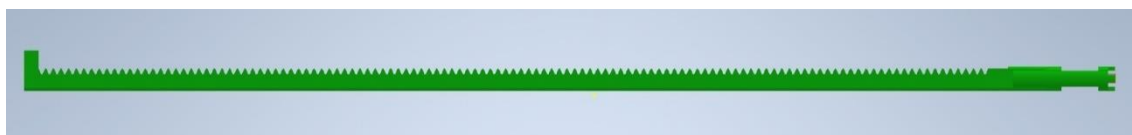
krokový motor, který má minimálně dvojnásobný kroutící moment oproti požadovanému momentu při cílové provozní rychlosti. Z toho důvodu byl zvolen minimálně čtyřnásobný kroutící moment motoru oproti momentu nutnému ke spolehlivému stisknutí tlačítka. S přihlédnutím na potřebné parametry byl zvolen krokový motor NEMA 17 17HS4023

| Parametr | Hodnota | Jednotka |
|----------|---------|----------|
| Ucc | 9 až 35 | V |
| If | 0.7 | A |
| Mmot | 14 | Ncm |
| Steps | 200 | - |

Tabulka 5 Parametry krokového motoru NEMA 17 17HS4023 [7]

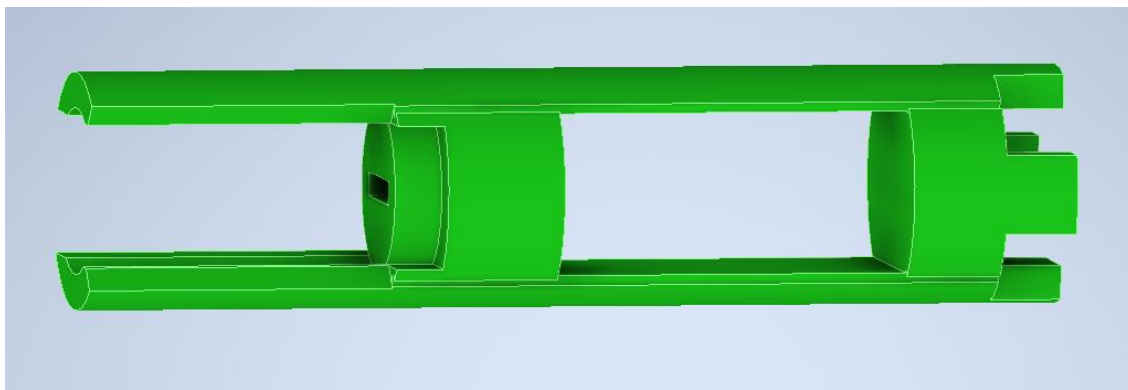
3.5 Návrh mechanické konstrukce

Hlavní parametry, kterým bylo potřeba přizpůsobit konstrukční provedení, byly maximální průměr kanálu, v němž bude měření probíhat, a maximální možný průměr otvoru v kanálu pro zasunutí sondy. Maximální průměr kanálu, byl stanoven vedoucím bakalářské práce na 0.3 m. Maximální možná velikost průměru otvoru pro zasunutí sondy byla stanovena na 12 mm. Materiál, ze kterého byla celá konstrukce vyrobena, a to včetně sondy, je PETG filament od firmy Prusa Research. Nejprve se zdála pevnost této sondy poněkud problematická kvůli malému průřezu, a proto bylo z počátku zvažováno využití ocelového jádra, na které by byly nasunuty plastové segmenty sondy. Tento nápad vycházel z výpočtů ověřujících bezpečnost při vzpěrné stabilitě. Ovšem po vytisknutí plastových segmentů bylo zjištěno, že materiálové vlastnosti použitého filamentu byly lepší, než bylo předpokládáno a plastový model sondy mohl být zcela jistě i bez ocelového jádra. To bylo způsobeno také tím, že výsledná pevnost závisí na kvalitě tisku. Také nebylo možné najít přesné hodnoty materiálových vlastností daného plastu.



Obrázek 3.3: Model všech segmentů spojených dohromady tvořících sondu

Po několika verzích modelu sondy vznikla sonda s dutinou ve svém středu, kterou prochází dráty spojující senzory s deskou plošných spojů. Výsledný model sondy, složený ze tří částí, lze vidět na obrázku 3.3 níže. Dvě části jsou tvořeny hřebenem s dutinou ve středu průřezu, třetí část (obrázek 3.3 a 3.4) má v sobě uložené senzory průtoku, teploty a také koncový spínač. Tyto části jsou spojeny sekundovým lepidlem, jelikož nebyla k dispozici tiskárna s dostatečně velkou tiskovou plochou a proto nebylo možné vytisknout sondu vcelku.

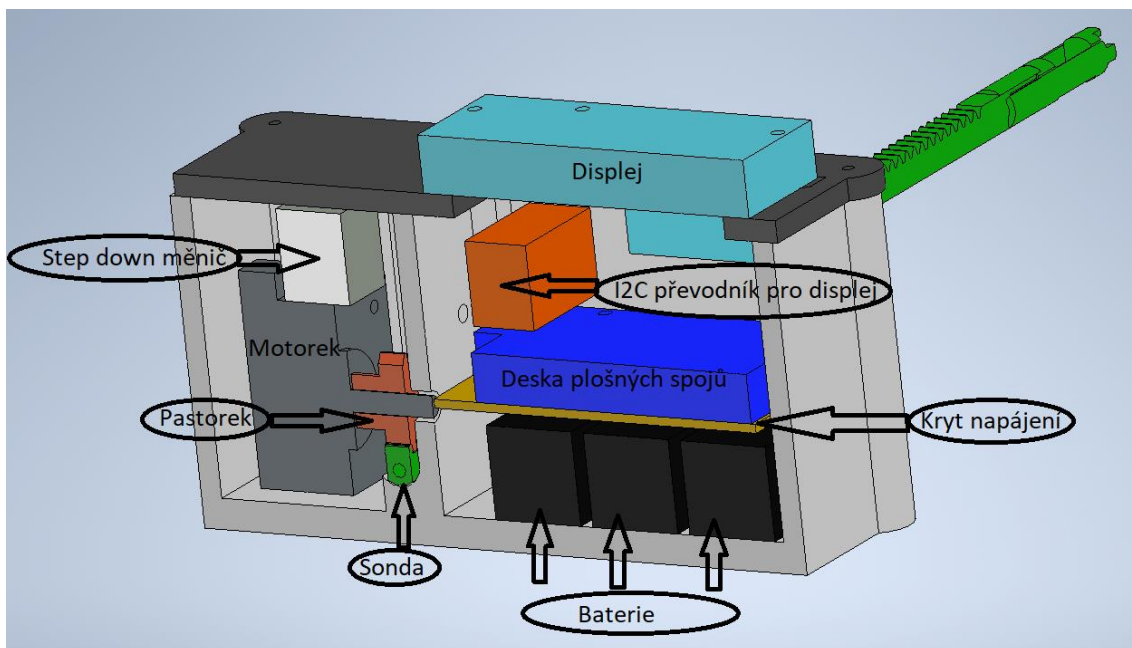


Obrázek 3.4: Model segmentu pro uložení senzorů



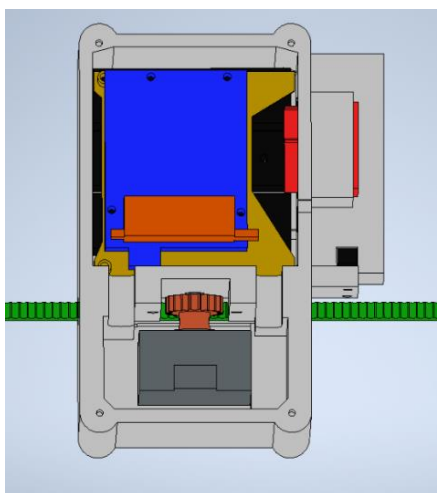
Obrázek 3.5: Koncový segment osazený senzory

Aby bylo možné měřit teplotu a rychlost proudění ve více bodech je třeba se senzory relativně přesně pohybovat. Lineární pohyb zajišťuje pastorek a hřeben s přímým ozubením. Pastorek je nasazený na hřídeli krokového motorku a je k ní pevně přichycen dvěma protilehlými stavěcími šrouby (červíky) s imbusovou hlavou. Pro dokonalé připevnění pastorku pomocí stavěcích šroubů byly nejdříve hrotem trafo pájky červíci prohřáty a poté zašroubovány do děr plastového pastorku, nasazeného na hřídel motorku. Při montáži motorku do krabičky byly využity pružné podložky, které pomohly snížit vibrace sondy při jejím vysouvání.



Obrázek 3.6: Řez modelem krabičky s komponenty

Dále pak bylo zapotřebí vytvořit krabičku do níž bude uložen motorek, veškerá elektronika a ke které bude připojen displej. Krabičku s motorkem a mechanismem lze vidět na obrázku 3.7, řez krabičkou včetně pojmenování komponent uvnitř je na obrázku 3.6 a výslednou podobu přístroje uvidíme na obrázku 3.8.



Obrázek 3.7: Mechanismus uvnitř krabičky



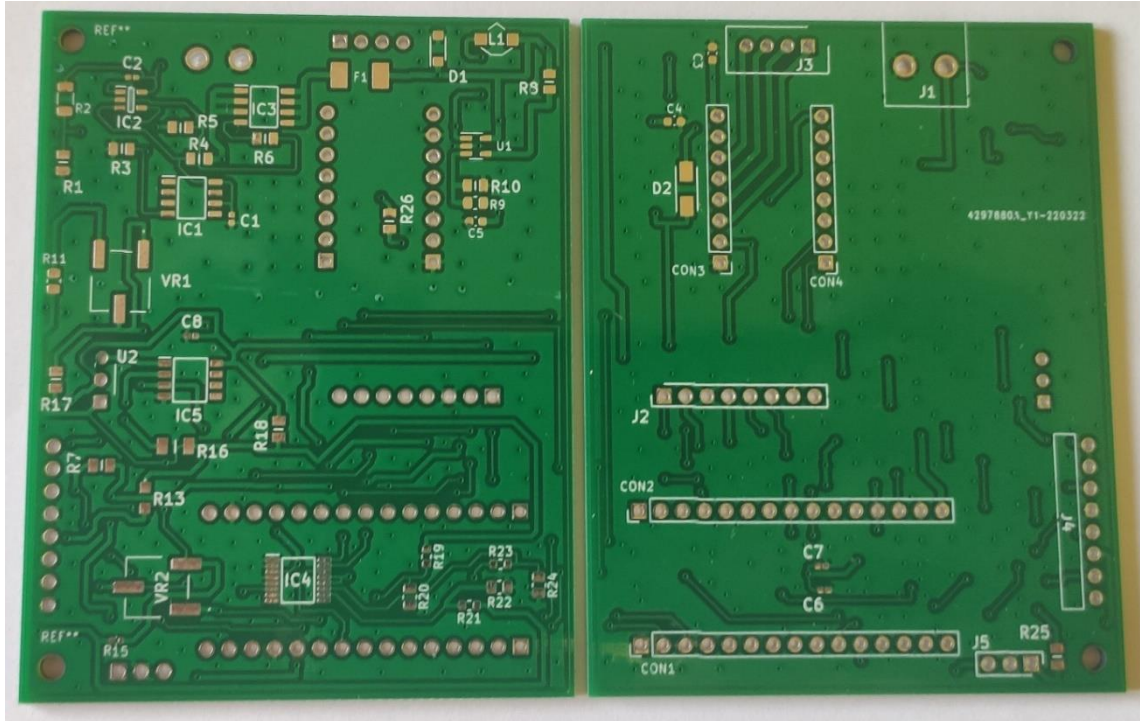
Obrázek 3.8: Kompletní přístroj

3.6 Návrh elektrického zapojení

Návrh desky plošných spojů (obrázek 3.9) vychází především z elektronického obvodu pro senzor průtoku a také z obvodů pro ovládání krokového motoru pomocí mikrokontroleru. Napájení elektronického obvodu je realizováno čtyřmi dobíjecími lithium-iontovými bateriemi. Celkové napětí těchto baterií zapojených v sérii se pohybuje v rozmezí od 12 V do 16.8 V. Podle toho, jak moc jsou baterie vybité.

Za zdrojem napětí je zapojený step-down měnič, který snižuje napětí z baterií na vstupu a udržuje napětí 10 V na svém výstupu. Tento step-down měnič má v sobě zabudovaný integrovaný obvod LM2596, který pomocí zpětné vazby mění střihu tak, aby na výstupu měniče bylo stabilní napětí 10 V. [8]

Následně je napětí z výstupu měniče přivedeno na desku plošných spojů, kde se jím napájí mikrokontroler, driver krokového motoru a obvod senzoru průtoku. Velikost napájecího napětí byla určena tím, že obvod pro senzor průtoku potřebuje napětí právě 10 V. Původní návrh desky obsahoval i podpěťovou ochranu, která kontrolovala, aby velikost napětí na bateriích nekleslo pod určitou minimální úroveň, ale vzhledem k následné úpravě přidáním jedné baterie a step-down měniče je tato část obvodu nepotřebná, ačkoliv do jisté míry stále chrání obvod před úplným vybitím. Podpěťová ochrana je na desce tvořena komparátorem a napěťovou referencí. Komparátor porovnává konstantní napětí na napěťové referenci s napětím na děliči napětí. Pokud by napájecí napětí desky kleslo pod zhruba 9 V, výstup komparátoru by se překlopil do nuly, což by vypnulo tranzistor, přes který je zbytek obvodů napájen.



Obrázek 3.9: Deska plošných spojů

3.6.1 Mikrokontroler

Programovatelný prvek desky tvoří Arduino NANO. Předností tohoto mikrokontroleru je jeho malá velikost a relativně snadná programovatelnost, jelikož je velmi rozšířený a používaný. Pro tento mikrokontroler existuje celá řada již vytvořených knihoven. Disponuje také osmi analogovými a čtrnácti digitálními piny. Má 10-ti bitový analogově digitální převodník a procesor ATmega328. Je možné jej napájet z 6 V až 20 V a využívá napětí pro logické úrovně 5 V. V tomto obvodu pak má následující funkce:

- zapíná a vypíná driver krokového motoru
- posílá signál pro nastavení směru otáčení
- posílá pulzy pro otočení motorku
- kontroluje signály z koncových spínačů
- měří napětí na výstupu analogového senzoru teploty a průtoku
- komunikuje pomocí i2C převodníku s LCD displejem
- přímá signál z tlačítek, kterými uživatel ovládá program

Dále na desce nalezneme i 5V stabilizátor napětí, pomocí něhož lze napájet displej, koncové spínače a logické obvody driveru krokového motoru. [9]

3.6.2 Driver pro krokový motor

Pro ovládání krokového motoru používáme driver A4988, který je hojně používaný pro jeho využití v řadě 3D tiskáren a nízké ceně. Lze jej provozovat v několika módech určujících velikost kroku, což je úhlové pootočení hřídele motorku odpovídající přijatému signálu STEP. Využíváme nejmenší možné pootočení odpovídající natočení hřídele o 1,8°. Tento mód je vhodný především proto, že motorek pak na sondu přenáší nejmenší vibrace. Během testování driveru byla také zjištěna nutnost použití pull-up rezistoru na ENABLE pinu, protože pokud se pin zanechal plovoucí, motorek se při spuštění přístroje začal zcela náhodně otáčet. Takovýto jev zcela nežádoucí a nebezpečný. Proto je pro ovládání motorku nutné při každém signálovém pulzu, pro jeho otočení, tento pin stáhnout na zem. Na napájecí piny driveru krokového motorku je vhodné připojit kondenzátor. [10]

3.6.3 Koncové spínače

Z bezpečnostních důvodů, a proto aby bylo možno měřit vzdálenost vysunutí, je sonda osazena senzory a její konec je vybaven spínačem. Tento spínač je realizován jednoduchým tlačítkem, které je připojené rezistorem k 5 V zdroji napětí na Arduino a k jednomu z interrupt pinů mikrokontroléru. Při sepnutí tlačítka se signál uzemní a spustí speciální funkci v programu, která kontroluje vysunování sondy. Další koncový spínač je umístěn ze zadní strany krabičky a sepne se pokud by kanál, ve kterém probíhá měření, měl příliš velký průměr a sonda by tak nedosáhla na opačnou stranu kanálu.

3.6.4 Displej a ovládání displeje

Pro zobrazení výsledků měření a jednoduché konfigurační menu byl použit LCD displej 1602 s klávesnicí tvořenou pěti tlačítky. Tento displej disponuje řadou pinů, které jsou rozmístěny tak, že je možné displej nasadit na desky typu Arduino UNO a Arduino Mega. Takové propojení však obsadí všechny sloty pro piny a není tedy vhodné pro tuto aplikaci. Existuje však speciální převodník, díky kterému na zobrazování znaků na displeji potřebujeme pouze 4 piny mikrokontroleru a můžeme navíc použít jeho menší verzi. Tento převodník využívá I2C komunikaci a má na sobě potřebné piny pro displej. Pokud uživatel stiskne některé z tlačítek, tak se na jednom analogovém pinu displeje objeví napětí v určitém rozsahu, náležící patřičnému tlačítku. Tímto způsobem pak uživatel ovládá program v přístroji. [11], [12]

3.7 Program

Program je navržen následovně, uživatel spustí zařízení a na displeji se mu zobrazí jednoduché menu. Po instalaci zařízení na trubici je možné vybrat program: „*automatický start*“. Mikrokontroler začne posílat řídicí signály do driveru krokového motorku a ten začne vysouvat sondu napříč trubicí. Na konci sondy je kromě senzorů umístěn i koncový spínač. V momentě, kdy sonda narazí na protější stranu trubice se spínač v podobě tlačítka stlačí a vyšle signál do mikrokontroleru. Tento signál je přiveden na digitální interrupt pin mikrokontroleru a způsobí, že se v programu spustí funkce, která zastaví vysouvání sondy a přepne se do stavu zasouvání a měření. Program poté vypočítá několik bodů, kde se sonda zastaví a změří rychlost proudění vzduchu a také teplotu v daném bodě. Protože teplotní odezva senzoru teploty není tak rychlá jako odezva senzoru průtoku, je potřeba, aby sonda v místě měření nějakou dobu setrvala a až poté snímala signál obsahující informaci o teplotě. Jakmile sonda dojedez zpět na svou počáteční pozici, vypočítá se velikost střední teploty pomocí vzorce váženého průměru.

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3.8)$$

Dále je pak v menu možné zvolit programy:

- měření střední rychlosti
- měření rychlosti v reálném čase
- měření střední rychlosti a střední teploty

Menu bylo vytvořeno na základě již existujícího programu s využitím zdroje. [13]

4 Kalibrační měření

Pro správnou funkci přístroje je třeba provést kalibrační měření, které slouží k úpravě konstant B a n tak, aby výsledná naměřená rychlost odpovídala reálné rychlosti proudění vzduchu.



Obrázek 4.1: Měřící sestava

Měřící sestava se skládá z ventilátoru s nastavitelnou rychlostí otáčení (na obrázku 4.1 vpravo), trubice, v níž proudí vzduch a zároveň se v ní nalézá Willsonova mříž, ke které je připojený anemometr VOLTcraft VPT-100 (na obrázku 4.1 uprostřed), měřící dynamický tlak a rychlost proudění před Willsonovou mříží. A také přístroj připevněný u otvoru na výfuku z trubice, jehož návrh a konstrukce byla popsána výše a je potřeba jej kalibrovat.

Vzhledem k tomu, že proudícímu vzduchu stojí v cestě mříž, vznikají na ní hydraulické ztráty. Z následujících vztahů získáme rychlost proudění vzduchu za Willsonovou mříží.

$$p_d = k \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (4.1)$$

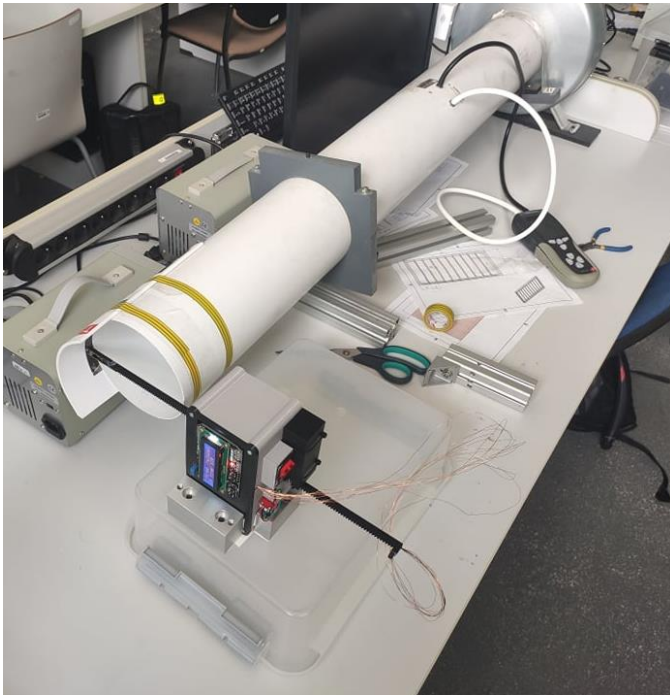
Kde p_d je dynamický tlak, k je ztrátový součinitel, který byl určen jako $k = 2.7$, ρ je hustota vzduchu a v je rychlost proudění vzduchu za mříží. Vzhledem k tomu, že měřící přístroj umí z dynamického tlaku spočítat přímo rychlost proudění vzduchu před mříží v_m lze uvažovat následující tvar rovnice.

$$\frac{\rho}{2} \cdot v_m^2 = k \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (4.2)$$

Úpravou této rovnice pak vznikne následující vztah.

$$v = \sqrt{\frac{v_m^2}{k}} \quad (4.3)$$

Rychlost proudícího vzduchu za mříží v je poté znovu změřena, tentokrát na kalibrovaném přístroji. Pro kalibraci měřícího přístroje je třeba volit různé rychlosti proudění v celém rozsahu rychlostí otáček ventilátoru. Měření je třeba pro každou z rychlostí alespoň třikrát. Hodnoty rychlostí naměřené přístrojem VOLT-CRAFT VPT-100 se pak porovnávají s hodnotami naměřenými kalibrovaným anemometrem.

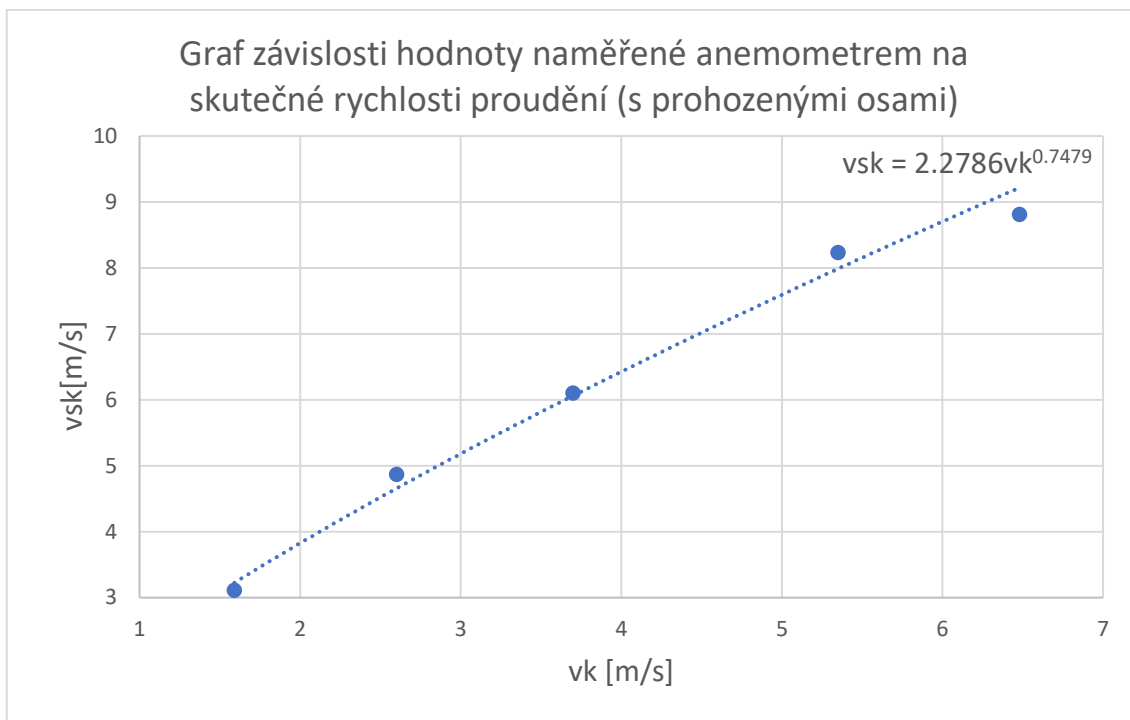


Obrázek 4.2: přístroj během měření

| $v_k [m/s]$ | $v_{sk}[m/s]$ |
|-------------|---------------|
| 1.59 | 3.11 |
| 2.6 | 4.87 |
| 3.7 | 6.1 |
| 5.35 | 8.23 |
| 6.48 | 8.81 |

Tabulka 6 Naměřených rychlostí

Naměřené hodnoty se v Excelu vynesou do grafu. Na ose x jsou hodnoty naměřené kalibrovaným anemometrem a na ose y jsou hodnoty skutečných rychlostí proudění vzduchu. Ve skutečnosti jsou hodnoty naměřené kalibrovaným anemometrem závislé na rychlosti proudění vzduchu, ale pro kalibraci zařízení je výhodnější data do grafu vynést na opačné osy. Je to z toho důvodu, že pokud jsou data závislosti proložena mocninou spojnicí trendu a zobrazí se rovnice této funkce, tak se tím přímo získá funkční závislost výsledné skutečné rychlosti na datech naměřených anemometrem.



Obrázek 4.3: Graf závislosti naměřených hodnot

Z grafu vyplývá, že pro získání správných kalibračních konstant je třeba dosadit za proměnnou v_k již dříve uvedený vztah pro závislost rychlosti proudění na hodnotách napětí měřených anemometrem.

$$v_{sk} = 2.2786 \cdot v_k^{0.7479} \quad (4.4)$$

Kde, v_{sk} je skutečná rychlost proudění a v_k rychlost měřená kalibrovaným anemometrem. Poté dosazením již známého vztahu pro závislost rychlosti proudění na naměřeném napětí vznikne.

$$v_{sk} = 2.2786 \cdot \left[\left(\frac{\left(\frac{U_{out}}{U_{out0}} \right)^2 - 1}{B} \right)^n \right]^{0.7479} \quad (4.5)$$

Kde konstanta B byla před kalibrací volena $B = 0.190$ a $n = 2.976$

$$v_{sk} = \left(\frac{\left(\frac{U_{out}}{U_{out0}} \right)^2 - 1}{B_2} \right)^{n_2} \quad (4.6)$$

Nové konstanty jsou pak rovny $n_2 = 2.226$ a $B_2 = 0.132$

5 Závěr

Během návrhu a sestavování přístroje bylo potřeba provádět řadu modifikací, aby přístroj co nejlépe splňoval požadavky. Při plánování také došlo k mnoha chybám, které se později projevily na výsledné podobě přístroje. Mezi nejzávažnější chyby patří, špatný návrh step-up měniče, kvůli čemuž nestačil původní zamýšlený počet baterií. Jako nejlepší řešení se ukázalo, použití jedné baterie navíc s využitím step-down měniče. Popřípadě vytvoření step up/down měniče přímo na desce plošných spojů. Pro realizaci takového obvodu mi však ve fázi návrhu chyběly patřičné zkušenosti a znalosti. Z toho důvodu není výsledné elektronické zapojení desky tak kompaktní, jak bylo původně zamýšleno. Za nejdůležitější část této práce lze považovat ukázkou využití senzoru průtoku, který má díky svému vylepšení o kompenzaci teploty značný potenciál. Právě díky tomu lze s přístrojem měřit neznámé rychlosti proudění bez vlivu okolní teploty i v těžce přístupných místech. Celková cena přístroje se všemi senzory a potřebnými komponenty je přibližně 3300 Kč. Cíle této bakalářské práce byly splněny, a to včetně návrhu a realizace zařízení pro automatické měření střední teploty a rychlosti v kanále libovolného průřezu.

Seznam použitých symbolů a zkratek

| Symbol | Veličina | Jednotka |
|---------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| U | Elektrické napětí | V |
| p | Tlak | Pa |
| F | Síla | N |
| ρ | Hustota | $kg \cdot m^{-3}$ |
| p_s | Statický tlak | Pa |
| p_d | Dynamický tlak | Pa |
| v | Rychlost proudění | $m \cdot s^{-1}$ |
| ϑ | Kinematická viskozita | $m^2 \cdot s^{-1}$ |
| Q_v | Objemový průtok | $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| R | Elektrický odpor | Ω |
| α | Teplotní součinitel elektrického odporu | K^{-1} |
| α_{vl} | Součinitel přestupu tepla | $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ |
| q_k | Plošná hustota tepelného toku | $W \cdot m^{-2}$ |
| t | Teplota | K |
| P | Ztrátový výkon | W |
| I | Elektrický proud | A |
| d | Hydraulický průměr potrubí | m |
| Re | Reynoldsovo číslo | (1) |

Seznam použitých zdrojů

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a JEARL WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. část 1*. Dotisk 1. čes. vyd. Přeložil Jana MUSILOVÁ. Praha: Prometheus, 2003. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 81-7196-213-9.
- [2] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Encyklopedie fyziky. In: *Fyzika.jreichl* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com>
- [3] VLACH, Radek. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [4] AirPro – anemometr AP500. In: *Airflow.cz* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://www.airflow.cz/produkty/pristroje/airpro_ap500.php
- [5] *Analogový teplotní sensor, 0..100°C, THT, TO-92 LM35DZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.313-909.1.pdf>
- [6] *FS2T.0.1E.025* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ist-ag.com/sites/default/files/downloads/fs2t.0.1e.025.pdf>
- [7] *Krokový motor NEMA 17 17HS4023 0,14Nm* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/krokovy-motor-nema-17-17hs4023-0-14nm/#relatedFiles>
- [8] *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator* [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/lm2596_datasheet.pdf
- [9] *Arduino Nano R3, ATmega328P Klon* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-nano-r3--atmega328p-klon--pripajeni-piny/#relatedFiles>
- [10] *A4988 driver pro krokové motory* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/user/related_files/a4988.pdf
- [11] *Arduino 1602 LCD + klávesnice shield* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-1602-lcd-klavesnice-shield/#relatedFiles>
- [12] *LiquidCrystal_I2C* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C
- [13] *T14_SimpleMenuTutorial.ino* [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://github.com/MaxTechTV>

Seznam příloh

- Program
- Schéma
- Deska plošných spojů
- Model sestavy