

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ULTRAZVUKOVÝ ANEMOMETR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

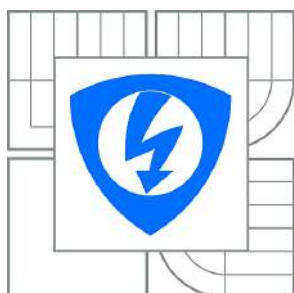
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB HŮLKA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ULTRAZVUKOVÝ ANEMOMETR

ULTRASONIC ANEMOMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

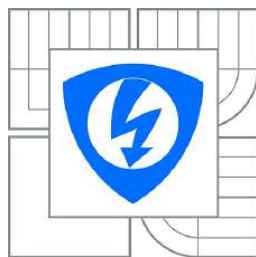
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB HŮLKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Jakub Hůlka

ID: 125456

Ročník: 2

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Ultrazvukový anemometr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracuje literární rešerši z oblasti problematiky snímání rychlosti a směru větru včetně průzkumu trhu, zaměřte se rovněž na vlivy pracovního prostředí snímání (teplota, tlak, vlhkost).
2. Pro zadané požadavky externí firmy FIEDLER-MÁGR navrhnete vhodné konstrukční provedení ultrazvukového anemometru a diskutujte volby jednotlivých snímačů a jejich rozmístění.
3. Navrhnete měřicí jednotku pro ultrazvukový anemometr, tak aby bylo možné porovnat různé metody měření rychlosti větru.
4. Realizujete měřicí jednotku ultrazvukového anemometru.
5. Ultrazvukový anemometr experimentálně ověříte, prezentujete a zhodnotíte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ZEHNULA, K. Snímání neelektrických veličin. Druhé upravené vydání, SNTL, Praha 1983
- [2] JÄÄÖ, S., KREIDL, M. Senzory a měřicí obvody, ĚVUT Praha 1999
- [3] OBRAZ, J. Ultrazvuk v měřicí technice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 18.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Marie Havlíková, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce: Ing. Jindřich Fiedler

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí a realizací ultrazvukového anemometru. Jsou zde porovnány jednotlivé typy anemometrů, a to mechanické, termoanemometry a ultrazvukové anemometry. Detailněji jsou v práci rozebrána různá konstrukční provedení a principy měření ultrazvukových anemometrů. Dále je v dokumentu popsána experimentální metoda měření rychlosti zvuku pomocí fázového posunu mezi dvěma frekvencemi. Práce obsahuje návrh řídicí jednotky a realizaci jednoduchého provedení ultrazvukového anemometru. V poslední části je zpracováno experimentální ověření vlastností ultrazvukového anemometru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ultrazvuk, anemometr, rychlost zvuku, vítr, měření, fázový posun

ABSTRACT

This master's thesis deals with the construction and realization of an ultrasound anemometer. Individual types of anemometers are compared in this thesis, including mechanical, thermo anemometer and ultrasound anemometer. Different construction renderings and measurement principles of ultrasonic anemometers are analyzed. In addition, an experimental method of measuring the speed of sound by phase shift between two transmitting frequency is described in the document. This thesis includes the design of an control unit and the realization of a simple prototype of an ultrasonic anemometer. Experimental confirmation of the characteristics of the ultrasound anemometer is the last part of the document.

KEYWORDS

Ultrasonic, anemometer, speed of sound, wind, measurement, phase shift

HŮLKA, Jakub *Ultrazvukový anemometr*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2015. 93 s. Vedoucí práce byl Ing. Marie Havlíková, , Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Ultrazvukový anemometr“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce paní Ing. Marii Havlíkové, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval konzultantovi Ing. Jindřichu Fiedlerovi za vypsání zajímavého tématu a cenné připomínky během řešení práce. Děkuji rodičům za jejich podporu během celého studia.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

1 Úvod	9
2 Teoretický rozbor	10
2.1 Ultrazvuk [5]	10
2.2 Piezo měnič [3],[1]	11
2.2.1 Piezoelektrický jev	11
2.2.2 Měřicí obvody pro piezo měniče [2]	11
2.2.3 Základní parametry piezo měničů	11
2.3 Principy snímačů rychlosti větru-anemometrů	12
2.3.1 Mechanické anemometry	12
2.3.2 Termoanemometry [21]	13
2.3.3 Rezonanční anemometry [23], [24]	14
2.3.4 Ultrazvukové anemometry	15
2.4 Měřicí metody ultrazvukových anemometrů	15
2.4.1 Měření doby letu signálu [3],[4]	16
2.4.2 Metoda elektroakustické smyčky [3]	17
2.4.3 Metoda měření fázového posunu mezi dvěma měniči [8]	18
2.4.4 Metoda měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi	19
2.5 Provedení ultrazvukových anemometrů	20
2.5.1 Čtyřramenný ultrazvukový anemometr	20
2.5.2 Tříramenný ultrazvukový anemometr	20
2.5.3 Tříhlavý ultrazvukový anemometr [25]	21
2.5.4 S odraznou plochou	21
2.6 Komerční ultrazvukové anemometry	22
3 Experiment - měření pomocí fázového posunu mezi dvěma frekvencemi	24
3.1 Teoretický rozbor experimentu	24
3.2 Postup měření	26
3.3 Použité přístroje	27
3.4 Podmínky měření	27
3.5 Výsledky měření	28
3.6 Závěr experimentu	32
4 Řídicí jednotka	33
4.1 Blokové schéma řídicí elektroniky	33
4.1.1 Budiče	34

4.1.2	Omezovač	35
4.1.3	Filtr a zesilovač	35
4.1.4	Analogový přepínač	35
4.1.5	Nápájení	36
4.1.6	Detektor obálky	36
4.1.7	Detektor průchodu nulou	36
4.1.8	Mikropočítač a komunikace	37
4.2	Návrh filtru	38
4.3	Výroba	39
4.4	Návrh vylepšení pro prototyp anemometru	39
4.4.1	Oddělit napájení přijímače a vysílače	40
4.4.2	Detektor obálky	41
4.4.3	Tlumení vstupních obvodů během vysílání	41
4.4.4	Stínění vodičů	42
5	Softwarové řešení	43
6	Návrh mechanické konstrukce	46
6.1	Výběr měniče pro anemometr	46
6.2	Mechanická konstrukce	47
6.3	Nová mechanická konstrukce	47
6.4	Mechanická konstrukce pro testování v tunelu	48
6.5	Vyskytlé problémy s kovovou konstrukcí	49
7	Praktické ověření	51
7.1	Odvození vztahů	52
7.2	Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu	54
7.2.1	Použité přístroje	54
7.2.2	Postup měření	55
7.2.3	Naměřené výsledky	55
7.3	Měření rychlosti a směru proudění	60
7.3.1	Použité přístroje	60
7.3.2	Postup měření	61
7.3.3	Měření rychlosti proudění $ w_M $	62
7.3.4	Měření směru proudění vektoru w_M	68
7.3.5	Verifikace korekčních koeficientů	74
7.4	Porovnání metod	76
8	Zhodnocení a doporučení	77

9 Závěr	78
Literatura	79
10 Seznam použitých zkratk a symbolů	82
Seznam příloh	86
A Výrobní poklady pro demo desku	87
A.1 Osazovací výkres-vrchní strana	87
A.2 Osazovací výkres-dolní strana	87
A.3 Schéma zapojení	87
B Výrobní poklady pro prototypu desky	90
B.1 Osazovací výkres-vrchní strana	90
B.2 Osazovací výkres-dolní strana	90
B.3 Schéma zapojení	90
C Obsah přiloženého CD	93

1 ÚVOD

Vítr je základní meteorologický prvek popisující pohyb vzduchu v určitém místě atmosféry. Měření rychlosti a směru větru je důležité nejen v meteorologii, ale v poslední době například i při sportovních událostech pro zjištění rychlosti větru a jeho vlivu na výkony sportovců. Měření rychlosti a směru větru se využívá také v námořní a letecké dopravě, kde je důležitou součástí bezpečnosti.

Mezi nejznámější přístroje pro měření rychlosti a směru větru patří miskové a lopatkové anemometry. Jejich princip spočívá v tom, že vítr mechanicky roztáčí citlivou část a snímají se otáčky této části.

V současnosti se ultrazvukové anemometry stávají kvalitnější alternativou pro měření rychlosti a směru větru. Tyto anemometry nemají žádnou pohyblivou část a celé měření probíhá čistě elektronicky, což prodlužuje jejich životnost.

Firma FIEDLER-MÁGR nabízí širokou škálu zařízení pro meteorologii, včetně řídicích stanic a datalogerů. Ultrazvukový anemometr ve svém sortimentu zatím firma nemá. Úkolem této práce bylo analyzovat principy a provedení komerčních ultrazvukových anemometrů a najít vhodné řešení pro realizaci prototypu.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

2.1 Ultrazvuk [5]

Zvuk je mechanické vlnění v plynech, kapalinách a pevných látkách. Lidský sluch je schopný vnímat zvukové frekvence v rozsahu 20 Hz až 20 kHz . Frekvence vyšší než 20 kHz nazýváme ultrazvuk. Podle účinků se ultrazvuk rozděluje na aktivní a pasivní.

Aktivní ultrazvukové vlny svým šířením v prostředí vyvolávají fyzikální nebo chemické účinky.

Pasivní používá mnohem menší výkon a využívá se ke zjištění vnitřních vad materiálů, v ultrazvukové měřicí technice a lékařské diagnostice.

Vliv prostředí na šíření ultrazvuku [4] Rychlost šíření zvuku ve vzduchu je závislá na podmínkách okolního prostředí.

Při normálních rozdílech atmosférického tlaku rychlost zvuku kolísá okolo $\pm 0.6\%$.

Rozdíl mezi minimální a maximální vlhkostí způsobí změnu o 2% .

Teplota okolí ovlivňuje rychlost šíření zvuku nejvýrazněji a lze si ji spočítat podle vztahu (2.1) a (2.2).

$$v_0 = \sqrt{\frac{p_0}{\rho_0} \kappa} = \sqrt{\frac{101325}{1.2935}} 1.402 = 331.4 \text{ m/s} \quad (2.1)$$

$$v_T = v_0 \sqrt{1 + \alpha T} = \sqrt{1 + 3.661 \cdot 10^{-3} T} = v_0 + K_T \cdot T = 331.4 + 0.607 \cdot T \quad (2.2)$$

α	koeficient roztažnosti $3.661 \cdot 10^{-3} [^{\circ}\text{C}^{-1}]$
p_0	atmosférický tlak při 0°C $[\text{Pa}]$
ρ_0	hustota vzduchu při 0°C $[\text{kg}/\text{m}^3]$
κ	adibaitický index 1.402
v_T	rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě T $[\text{m}/\text{s}]$
v_0	331.4 rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě 0° $[\text{m}/\text{s}]$
K_T	0.607 koeficient teplotní závislosti rychlosti zvuku $[\frac{\text{m}/\text{s}}{^{\circ}\text{C}}]$
T	teplota vzduchu $[^{\circ}\text{C}]$

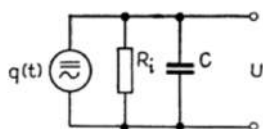
2.2 Piezo měnič [3],[1]

2.2.1 Piezoelektrický jev

Ultrazvukové vlny se vysílají a přijímají pomocí elektroakustických měničů, které transformují elektrickou energii na mechanickou a naopak. Využívá se při tom piezoelektrického jevu, který byl objeven Pierrem a Jacquesem Curieovými. Tento jev je založen na tom, že u některých krystalických dielektrik vzniká vlivem mechanických deformací elektrická polarizace - přímý piezoelektrický jev. Nepřímý piezoelektrický jev je jev při kterém dochází k mechanické deformaci vlivem působení elektrického pole. Nejčastěji používaným materiálem pro výrobu piezo měničů je křemen.

2.2.2 Měřicí obvody pro piezo měniče [2]

Výstupní napětí piezo měničů je poměrně vysoké, ale jako zdroj napětí má veliký výstupní odpor. Není proto možné používat elektromechanické voltmetry pro měření tohoto napětí. Lze použít napěťový zesilovač s velkým vstupním odporem nebo nábojové zesilovače.



Obr. 2.1: Náhradní schéma piezo krystalu

2.2.3 Základní parametry piezo měničů

- Rezonanční frekvence - pracovní frekvence odpovídají jejich mechanickým rozměrům.
- Šířka pásma - rozsah pracovních frekvencí $-6dB$.
- Směrová vyřazovací charakteristika(vyřazovací úhel) - závislost akustického tlaku na úhlu natočení piezo měniče.
- Maximální vstupní napětí
- Sound Pressure Level(SPL) - hodnota akustického tlaku, jaký je měnič schopný generovat na rezonanční frekvenci.
- Sound Level Distance - vzdálenost při které byl měřen SPL.
- Kapacita
- Rozsah pracovních teplot
- Rozměry

2.3 Principy snímačů rychlosti větru-anemometrů

Větrné proudění je atmosférická veličina, která je způsobena pohybujícím se proudem vzduchu. Směr je dán poměrem tlaků, vítr proudí z místa vyššího tlaku směrem k nižšímu.

2.3.1 Mechanické anemometry

Miskové anemometry Základem sočasných mechanických anemometrů jsou většinou tři misky otáčející se kolem hřídele 2.2. Rychlost otáčení hřídele je úměrná rychlosti proudění větru. Výhodou tohoto provedení je nízká cena a poměrně velká přesnost. Bohužel anemometr založený na tomto principu nedokáže měřit směr proudění větru. Vítr musí překonávat tření v mechanických vazbách a měření nárazových větrů je problematické z důvodu setrvačnosti rotující části. Maximální měřená rychlost větru je omezena konstrukcí. Z dlouhodobého hlediska se při měření projevuje opotřebení.



Obr. 2.2: Miskový anemometr [12]

Lopátkové anemometry Možnost měření směru proudění větru lze získat mechanickým upořádáním podle 2.3. Vrtulka na jedné straně měří rychlosti proudění a křídlo na druhé zajišťuje natočení přístroje ve směru proudění větru. Nutnost natočení celé konstrukce při změně směru zvyšuje časovou konstantu snímače.



Obr. 2.3: Lopátkový anemometr [<http://goo.gl/RLN7T8>]

2.3.2 Termoanemometry [21]

Princip termoanemometru je založen na závislosti teploty elektricky vyhřívaného prvku (termistor, PT 100, polovodičové čidlo) a rychlosti proudění vzduchu. Používají se dvě metody vyhodnocování.

S konstantní teplotou Spočívá v udržování konstantní teploty vyhřívaného prvku, kde proud potřebný k vyhřívání je úměrný rychlosti proudění, které prvek ochlazuje.

S konstantním proudem Při aplikaci této metody se vyhřívaný prvek napájí konstantním proudem a změna rychlosti proudění způsobí změnu teploty. A jelikož odpor materiálu je závislý na teplotě, měříme právě tuto teplotní změnu.

Hlavní výhodou termoanemometrů je jejich jednoduché provedení, které neobsahuje žádné pohyblivé součástky, což zvyšuje mechanickou odolnost a spolehlivost. Termoanemometry mají také výbornou citlivost a velký rozsah měření od 0.1 m/s až do 130 m/s . Teplotní rozsah použití je -20°C až 80°C . Nevýhodou je použití v uzavřených trubicích a kanálech.

Termoanemometr se žhavenými drátky V tomto případě není měřicí prvek bod jako například termistor, ale žhavený drátek. Tento typ termoanemometru je závislý na úhlu natočení vůči směru proudění. Vhodným mechanickým upořádáním lze vyhodnocovat i více os. Tento druh anemometru je charakteristický velkou přesností, ale s velmi krátkou životností, v některých případech pouze jednotky hodin.



Obr. 2.4: Termoanemometr se žhavenými drátky [22]

2.3.3 Rezonanční anemometry [23], [24]

Klasické ultrazvukové anemometry měří dobu letu ultrazvukového pulzu. Rezonanční anemometr využívá rezonanci ultrazvukových vln uvnitř mále vestavěné dutiny. V této dutině je umístěno pole ultrazvukových měničů, které složí k vytvoření stojaté ultrazvukové vlny. Průchodem větrného proudění dochází k posunu stojaté vlny. Z fázového posunu na každém měniči lze vypočítat rychlosti a směr proudění. V porovnání s ostatními anemometry mají rezonanční anemometry výrazně menší rozměry, což usnadňuje i případné vychřívání v zimě. Stejně jako klasické ultrazvukové anemometry nemají žádné pohyblivé části. Jejich přesnost je malinko horší než u ostatních typů, ale díky jejich dlouhé životnosti a odolnosti jsou často vhodným kompromisem při výběru.



Obr. 2.5: Rezonanční anemometr [23]

2.3.4 Ultrazvukové anemometry

Ultrazvukové anemometry používají měření rychlosti šíření ultrazvukových vln mezi piezoelektrickými měniči. Pokud se mění vektor proudění vzduchu mezi měniči, lze detekovat změny v naměřené době letu signálu. Výhodou těchto anemometrů je, že nemají žádné pohyblivé části a proto jsou vhodné pro dlouhodobé měření. Bohužel samotná konstrukce ultrazvukových anemometrů ovlivňuje vektor proudění větru. Za jednotlivými měniči vznikají aerodynamické stíny a turbulence, které mění rychlost proudění. Velikost turbulencí je úměrná rychlosti proudění vzduchu a proto je nutné ultrazvukové anemometry kalibrovat ve větrném tunelu. Celková rychlost šíření signálu c se rovná součtu rychlosti zvuku ve vzduchu v a rychlosti proudění větru w , viz. (2.3).

$$c = w + v \quad (2.3)$$

c celková rychlost šíření signálu(zvuku) [m/s]

v rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s]

w rychlost větru [m/s]

2.4 Měřicí metody ultrazvukových anemometrů

Ultrazvukové anemometry využívají závislosti doby šíření ultrazvukového signálu z vysílače k přijímači. Tato doba je ovlivňována rychlostí proudění větru. Fouká-li vítr ve směru od vysílače, signál dorazí k přijímači rychleji, než když vítr fouká v opačném směru. Pokud čas šíření změříme a známe přesně vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem lze snadno spočítat jeho rychlost. V této podkapitole jsou popsány dvě standardně používané metody a jedna spíše laboratorní a jedna experimentální.

2.4.1 Měření doby letu signálu [3],[4] :

Základní metoda měření rychlosti větru. Princip je založen na metodě při které měříme dobu letu ultrazvukového signálu t_1 jedním směrem a t_2 směrem opačným mezi dvěma piezo měniči, viz. obrázek 2.6. Signál musí urazit vzdálenost s a šíří se rychlostí zvuku v prostředí v plus rychlost proudění větru w . Měřením časové difference t_1 a t_2 je podle vztahů (2.4) a (2.5) je možné eliminovat vliv teploty a jiným vlivů pracovního prostředí.

$$v = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.4)$$

$$w = \frac{s}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.5)$$

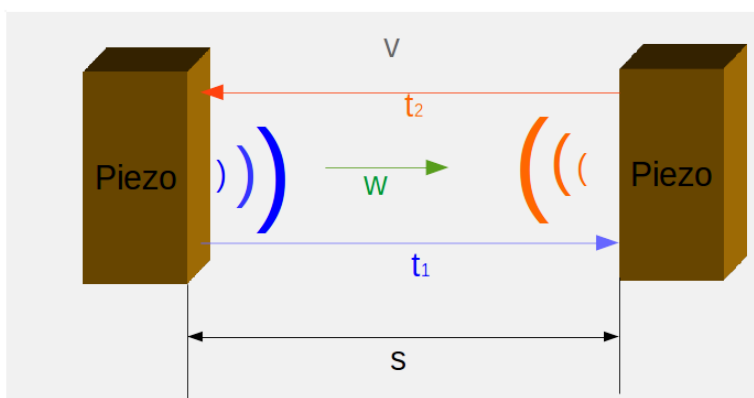
v rychlost šíření zvuku ve vzduchu $[m/s]$

w rychlost větru $[m/s]$

s vzdálenost mezi měniči $[m]$

t_1 doba letu signálu jedním směrem $[s]$

t_2 doba letu signálu druhým směrem $[s]$



Obr. 2.6: Měření doby letu signálu

2.4.2 Metoda elektroakustické smyčky [3] :

Při této metodě se doba průchodu t přivádí na opakovací frekvenci. Generátor vybudí krátkým pulzem vysílací měnič, z něhož ultrazvukový impulz urazí měřeným prostředím vzdálenost s do druhého měniče. Na něm vznikne elektrický singál, který se zesílí a vytvaruje v zesilovači a znovu spustí generátor. Tak se vytvoří opakovací frekvence f_O přímo úměrná rychlosti šíření zvuku v prostředí c , jak udává vztah (2.6). Princip je naznačen na obrázku 2.7.

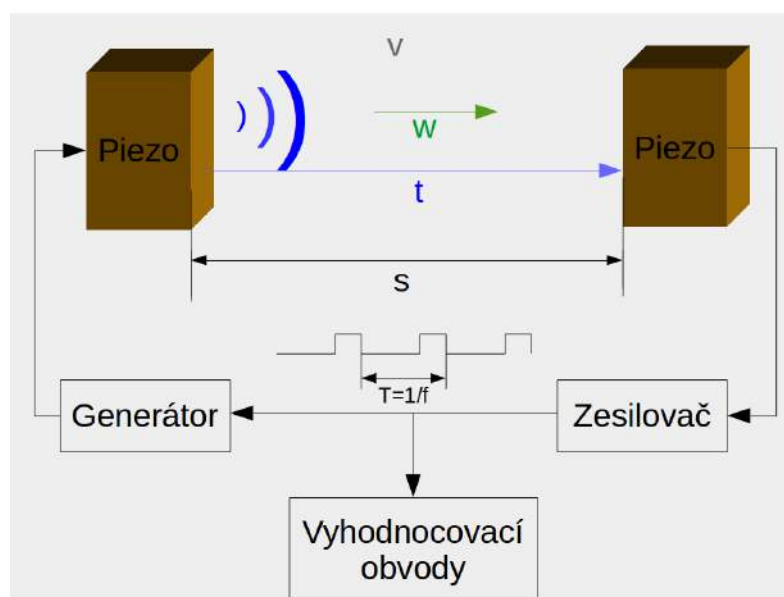
$$c = \frac{s f_O}{1 - f_O(\tau_u + \tau_e)} \quad (2.6)$$

c rychlost šíření zvuku prostředím $[m/s]$

f_O opakovací frekvence $[Hz]$

τ_u zpoždění ultrazvukového impulzu v krycích a vazebních vrstvách $[s]$

τ_e zpoždění v elektronických obvodech $[s]$



Obr. 2.7: Metoda elektroakustické smyčky

2.4.3 Metoda měření fázového posunu mezi dvěma měniči [8]:

Zajímavé řešení je měření fázového posunu ultrazvukové vlny mezi dvěma přijímači. Velikost fázového posunu je úměrná rychlosti proudění. Princip je naznačen na 2.8. Výslednou rychlost lze spočítat podle vztahu 2.7. Jedná se spíše o laboratorní příklad. Žádné z komerčních ultrazvukových anemometrů nepoužívá toto upořádání.

$$c = \frac{2\pi f \Delta s}{\varphi_2 - \varphi_1} \quad (2.7)$$

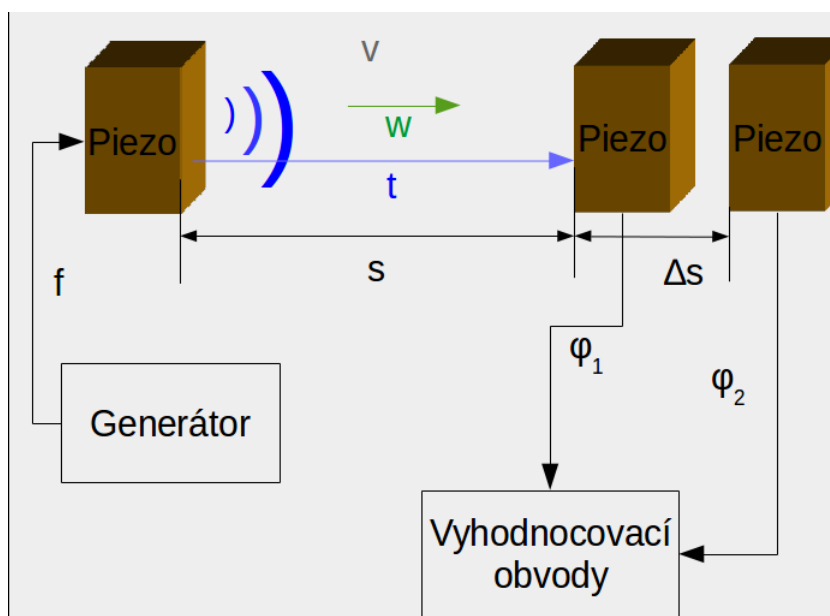
v rychlost šíření zvuku ve vzduchu $[m/s]$

f vysílací frekvence piezo měniče $[kHz]$

Δs vzdálenost mezi přijímacími měniči $[m]$

φ_1 fázový posun na prvním přijímacím piezo měniči $[rad]$

φ_2 fázový posun na druhém přijímacím piezo měniči $[rad]$

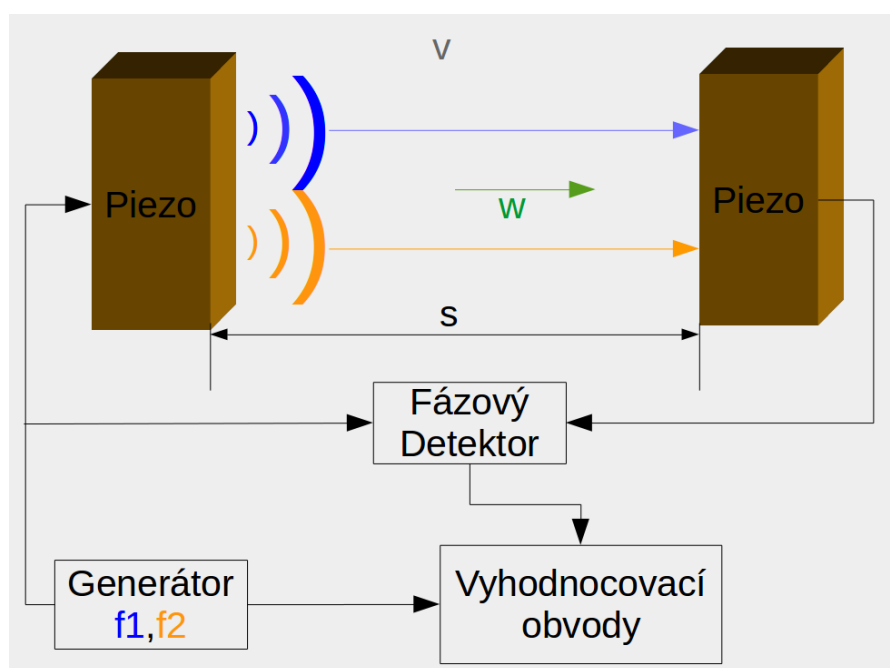


Obr. 2.8: Metoda měření fázového posunu mezi dvěma měniči

2.4.4 Metoda měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi

Jak je popsáno v [3] lze použít fázová měření pro malé vzdálenosti, kdy změna fáze na jedné frekvenci nepřekročí 2π . Lze touto metodou měřit rychlost šíření na vzdálenost několika mm, což pro účelu ultrazvukového anemometru není dostačující, jelikož při tak malých vzdálenostech by byla rychlost šíření ultrazvuku značně ovlivněna aerodynamickým stínem mezi měniči.

V rámci předmětu MIPS byl proveden experiment, kde jsem se pokusil změřit rychlost šíření zvuku pomocí fázového posunu mezi dvěma frekvencemi. Princip je naznačen na obrázku 2.9. Celý experiment je popsán dále v kapitole 3.



Obr. 2.9: Metoda měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi

2.5 Provedení ultrazvukových anemometrů

V této podkapitole jsou popsány různá mechanická provedení ultrazvukových anemometrů a porovnány jejich vlastnosti.

2.5.1 Čtyřramenný ultrazvukový anemometr

Asi nejznámější provedení ultrazvukového anemometru. Na měření jedné osy jsou potřeba dva piezo měniče. Jednoduchý a snadno realizovatelný. Menší přesnost, výsledky jsou ovlivněny aerodynamickým stínem kolem piezo měničů.



Obr. 2.10: Čtyřramenný ramenný ultrazvukový anemometr [13]

2.5.2 Tří ramenný ultrazvukový anemometr

Stejný princip jako u předchozího, pouze je zde přidána jedna redundantní osa. Tato konstrukce zaručuje větší přesnost, jelikož měřící osy jsou méně ovlivněny aerodynamickými turbulencemi.



Obr. 2.11: Tří ramenný ultrazvukový anemometr [13]

2.5.3 Tříhlavý ultrazvukový anemometr [25]

Speciální typ ultrazvukového anemometru. Obsahuje pouze tři piezo měniče s možností měření ve dvou osách. Piezo měniče jsou umístěny jako vrcholy rovnostranného trojúhelníku. Podmínkou je dostatečně široká vyřazovací charakteristika těchto měničů, tak aby se navzájem slyšely. Zvýšení přesnosti je zajištěno, použitím vždy dvou nespolehlivější os, které jsou v daný moment nejméně zatížené turbulencemi kolem snímačů. Použitím trigonometrických funkcí lze získat složky x a y .



Obr. 2.12: Tříhlavý ultrazvukový anemometr [25]

2.5.4 S odraznou plochou

Tento typ konstrukce odolnější vůči dešťovým a sněhovým přeháňkám, ale také zlepšuje přesnost oproti klasickému čtyřramennému ultrazvukovému anemometru. Dráha měření není přímo mezi senzory, ale je vedena přes odraznou plochu, tak aby nebyla ovlivněna aerodynamickým stínem za měniči. Výsledný vektor proudění větru je opět nutné dopočítat přes trigonometrické funkce.



Obr. 2.13: Ultrazvukový anemometr s odraznou plochou [13]

2.6 Komerční ultrazvukové anemometry

V této kapitole jsou porovnány základní parametry komerčních ultrazvukových anemometrů. Asi nejvýznamnější společností na trhu v této oblasti jsou firmy GILL Instrument [13], YOUNG [14], Vaisala [15] a Thiesclima [18], které nabízí široké spektrum přístrojů pro meteorologii včetně ultrazvukových anemometrů. Dále firmy Amalgamated [17] Instrument a Enercorp [16], které se zaměřují obecně na senzorku, ale ultrazvukové anemometry mají také ve svém portfoliu. A pak dvě české firmy Ekotechnika [19] a FIEDLER-MÁGR [20], jejichž zaměření je elektronika pro ekologii.

V tabulce 2.1 jsou porovnány komerční ultrazvukové anemometry. Standardně jsou vybaveny čtyřmi piezo měniči. Vylepšené provedení představuje YOUNG 81000, který je schopen měřit rychlost proudění ve třech osách a dalším zajímavým řešením je VaisalaWMT52, který má pouze 3 piezo měniče uspořádané do trojúhelníku a dokáže měřit na dvou osách.

Největší rychlostní rozsah má GILL-Extreme Weather WindObserver, kterým lze měřit rychlosti až 75 m/s s malou chybou $\pm 2\%$. Pro přesné měření směru jsou naopak vhodné anemometry VaisalaWMT52 a TheisCLIMA Ultrasonic anemometer 2D, které mají nepřesnost maximálně $\pm 1^\circ$.

Pokud je potřeba velké množství vzorků, tak je nejlepší volbou TheisCLIMA Ultrasonic anemometer 2D, který je schopný až 100 vzorků za sekundu. Ostatní anemometry mají vzorkovací frekvence několikanásobně nižší.

Všechny typy, kromě Ultrazvukový anemometr DS-2 používají ke komunikaci sběrnice RS232/RS485. Některé podporují i klasické analogové výstupy 0-5/10V nebo 0-20mA.

Ultrazvukové anemometry určené do extrémních podmínek jsou vybaveny vyhříváním, aby namrzlá vrstva ledu neovlivňovala výsledky měření.

Posledním srovnávaným parametrem je vzdálenost piezo měničů. Tu jsem uvedl z důvodu inspirace na rozměry konstrukce prototypu. Čím dále jsou měniče od sebe, tím menší chyba způsobená nepřesným měřením času. Jelikož $w = \frac{s}{t}$, čím větší tedy bude vzdálenost s , tím méně výslednou rychlost w ovlivní změřený čas t . Je zřejmé, že vzdálenost 200 mm je dostačující. Dokonce i při vzdálenosti 75 mm jde dosáhnout malé chyby $\pm 3\%$

	GILL Instrument – Extreme Weather WindObserver	YOUNG 81000	ENERCORP Anemometr 2D	Vaisala WMT52	AMALGAMATE D 85000	TheisCLIMA Ultrasonic anemometer 2D	Ultrazvukový anemometr DS-2
Počet měničů	4	6	4	3	4	4	4
Počet os	2	3	2	2	2	2	2
Max. měřená rychlost [m/s]	75	40	60	60	70	65	30
Nepřesnost měření rychlosti [± %]	2	3	2	5	3	2	3
Nepřesnost měření směru [± °]	2	5	1	3	2	1	3
Max. frekvence měření [Hz]	4	32	10	4	1	100	1
Interface	RS232,RS485	RS232,RS485	RS232,RS485	RS232,RS485,US B	RS232,RS485,0- 5V	RS232,RS485,0- 10V,0-20mA	SDI-12
Vyhřívání	ANO	NE	ANO	NE	NE	NE	NE
Vzdálenost měničů [mm]	213	207	200	115	170	135	75

Tab. 2.1: Porovnání komerčních ultrazvukových anemometrů

3 EXPERIMENT - MĚŘENÍ POMOCÍ FÁZOVÉHO POSUNU MEZI DVĚMA FREKVENCEMI

3.1 Teoretický rozbor experimentu

Tato metoda měření rychlosti zvuku je založena na měření fázového posunu mezi vstupním a výstupním signálem. Je potřeba změřit fázový posun φ_A a φ_B při frekvenci f_A a f_B . Pro zjednodušení odvození předpokládám bezvětrí, takže se měří pouze rychlost šíření zvuku v ve vzduchu. Řešení jsem se pokusil najít pomocí rovnic (3.1) a (3.2).

$$\sin\left(2\pi f_A \frac{s}{v} + \varphi_A\right) = 0 \quad (3.1)$$

$$\sin\left(2\pi f_B \frac{s}{v} + \varphi_B\right) = 0 \quad (3.2)$$

Dále dostávám rovnice (3.3) a (3.4).

$$2\pi f_A \frac{s}{v} + \varphi_A = 0 \quad (3.3)$$

$$2\pi f_B \frac{s}{v} + \varphi_B = 0 \quad (3.4)$$

Řešením soustavy rovnic a vyjádřením v dostávám vztah (3.5), z kterého lze spočítat rychlost šíření zvuku v prostředí měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi.

$$v = \frac{2\pi(f_B - f_A)s}{\varphi_B - \varphi_A} \quad (3.5)$$

v	rychlost zvuku ve vzduchu $[m/s]$
f_A	první vysílací frekvence piezo měniče $[kHz]$
f_B	druhá vysílací frekvence piezo měniče $[kHz]$
s	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem $[m]$
φ_A	fázový posun na první frekvenci f_A $[rad]$
φ_B	fázový posun na druhé frekvenci f_B $[rad]$

Možné zdroje chyb působící na fázový posun mezi frekvencemi Výsledná chyba fázového posunu se skládá z těchto jednotlivých chyb:

$\Delta\varphi_{Vf}$	chyba fázového posunu vysílacího piezo měniče mezi vstupním napětím a výstupními mechanickými kmity na frekvenci f
$\Delta\varphi_{Pf}$	chyba fázového posunu přijímacího piezo měniče mezi vstupními mechanickými kmity a výstupními napětím na frekvenci f
$\Delta\varphi_{Ff}$	chyba fázového posunu na filtru při frekvenci f
$\Delta\varphi_{SK}$	chyba fázového posunu způsobená umístěním krystalu uvnitř pouzdra o určitou neznámou vzdálenost
$\Delta\varphi_{SP}$	chyba fázového posunu způsobená nepřesným odečtem vzdálenosti mezi pouzdry
$\Delta\varphi_{Cf}$	chyba fázového posunu způsobená nepřesným odečtem fázového posunu z čítače při frekvenci f , i přes zapnuté průměrování se hodnota mění o cca $\pm 1^\circ$
$\Delta\varphi_O$	chyba fázového posunu způsobená ostatními vlivy tlak, vlhkost a chyba vyhodnocovací elektroniky

Výsledná chyba fázového posunu se tedy skládá ze součtu těchto chyb (3.6).

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{Vf} + \Delta\varphi_{Pf} + \Delta\varphi_{Ff} + \Delta\varphi_{SK} + \Delta\varphi_{SP} + \Delta\varphi_{Cf} + \Delta\varphi_O \quad (3.6)$$

V případě, že je známa vzdálenost mezi měniči jako ve vztahu (3.5), je potřeba měřit fázové posuny na dvou různých frekvencích. Fázový rozdíl pro frekvenci f_A je dán rovnicí (3.7), pro frekvenci f_B vztahem (3.8).

$$\varphi_A = \varphi_{TA} + \Delta\varphi_{VA} + \Delta\varphi_{PA} + \Delta\varphi_{FA} + \Delta\varphi_{SK} + \Delta\varphi_{SP} + \Delta\varphi_{CA} + \Delta\varphi_O \quad (3.7)$$

$$\varphi_B = \varphi_{TB} + \Delta\varphi_{VB} + \Delta\varphi_{PB} + \Delta\varphi_{FB} + \Delta\varphi_{SK} + \Delta\varphi_{SP} + \Delta\varphi_{CB} + \Delta\varphi_O \quad (3.8)$$

φ_{TA} teoretická hodnota fázového posunu při frekvenci f_A

φ_{TB} teoretická hodnota fázového posunu při frekvenci f_B

Výsledný fázový rozdíl je určen vztahem (3.9).

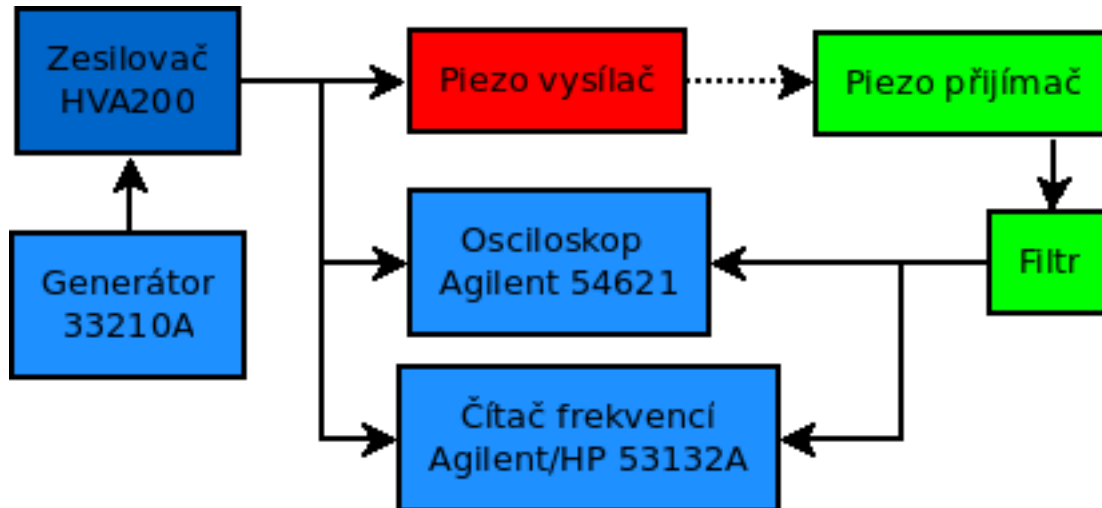
$$\begin{aligned} \varphi_B - \varphi_A = & \varphi_{TB} - \varphi_{TA} + \Delta\varphi_{VB} + \Delta\varphi_{PB} + \Delta\varphi_{FB} - \\ & - \Delta\varphi_{VA} - \Delta\varphi_{PA} - \Delta\varphi_{FA} + \Delta\varphi_{CB} - \Delta\varphi_{CA} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Je vidět, že se zcela vykompenzují chyby způsobené fázovým posunem umístění krystalu v měniči $\Delta\varphi_{SK}$, vlivy prostředí $\Delta\varphi_O$ a chyba nepřesného odečtu vzdálenosti $\Delta\varphi_{SP}$. Naopak zůstávají chyby frekvenční závislosti přijímače $\Delta\varphi_{Pf}$, vysílače $\Delta\varphi_{Vf}$ a filtru $\Delta\varphi_{Ff}$. Při dostatečném počtu měření lze jejich velikost vypočítat a korigovat.

3.2 Postup měření

Měření bylo provedeno na laboratorním přípravku pro měření Dopplerova jevu v předmětu MSNV [6]. Základem přípravku jsou dva ultrazvukové piezo měniče vysílač UST40T a přijímač UST40R. Oba jsou umístěny na lineárním posuvu.

1. Připravit experiment podle blokového schématu z obrázku 3.1.
2. Nastavit generátor na sinus a požadovanou frekvenci, výstupní amplitudu volíme 5Vpp.
3. Nastavit čítač pro měření fázového posunu.
4. Posunout piezo měniče do první polohy a odečíst vzdálenost na posuvném měřítku.
5. Postupně odečíst fázové posuny pro jednotlivé frekvence.
6. Body 4 a 5 opakujeme pro dostatečný počet vzdáleností.



Obr. 3.1: Blokové schéma měření

3.3 Použité přístroje

1. 33210A - Funkční generátor signálů do 10MHz
2. Agilent/HP 53132A - čítač frekvencí
3. Osciloskop Agilent 54621
4. Impedančním analyzátor 4294A
5. Laboratorní přípravek pro měření Dopplerova jevu z předmětu MSNV
6. Otočný podstavec
7. HVA200 - Vysokonapěťový zesilovač
8. Posuvné měřítko digitální Magg 150mm

3.4 Podmínky měření

Všechna měření probíhala za bezvětří, tedy $w = 0m/s$. Platnost odvozených vztahů jsem testoval pouze na měření šíření rychlosti zvuku ve vzduchu v za laboratorních podmínek, které jsou uvedeny v tabulce 3.1. Dále jsem v tabulce uvedl referenční rychlost zvuku při laboratorní teplotě $24^{\circ}C$.

Laboratorní podmínky	
Teplota	$24^{\circ}C$
Vlhkost	20%
Tlak	$986hPa$
Rychlost zvuku	$346.13m/s$

Tab. 3.1: Laboratorní podmínky

3.5 Výsledky měření

V tabulce 3.2 jsou zaznamenány naměřené vzdálenosti x a fázové posuny φ_M při různých frekvencích f . Tyto údaje nám stačí pro ověření odvozených vztahů. Při převodu nesmíme zapomínat přičíst periodu při "přetečení" fázového posunu z $2\pi rad$ na $0 rad$. Se vzrůstající vzdáleností se musí fázový posun zvětšovat. A vyšší frekvence musí vždy mít větší fázový posun než nižší.

	f[kHz]									
	38	39	40	41	42	38	39	40	41	42
x[mm]	$\varphi_M[rad]$					$\varphi_T[rad]$				
47.99	3.67	6.33	9.56	13.66	16.02	1.69	2.56	3.43	4.30	5.17
51.69	6.21	8.90	12.30	16.39	18.90	4.24	5.18	6.12	7.05	7.99
54.41	8.09	10.83	14.22	18.41	20.91	6.12	7.10	8.09	9.08	10.07
58.37	10.79	13.62	17.03	21.34	23.91	8.85	9.91	10.97	12.03	13.09
62.03	13.33	16.20	19.69	24.06	26.70	11.37	12.50	13.62	14.75	15.88
66.05	16.05	18.98	22.57	27.03	29.75	14.15	15.34	16.54	17.74	18.94
69.05	18.10	21.08	24.77	29.16	31.94	16.21	17.47	18.72	19.98	21.23
71.25	19.64	22.70	26.38	30.89	33.68	17.73	19.03	20.32	21.61	22.91
75.26	22.41	25.49	29.25	33.84	36.70	20.50	21.86	23.23	24.60	25.96
76.57	23.34	26.44	30.21	34.82	37.74	21.40	22.79	24.18	25.57	26.96

Tab. 3.2: Naměřené a teoretické hodnoty fázového posunu

f	nastavená frekvence [kHz]
x	změřená vzdálenost pomocí posuvného měřítka Magg [mm]
φ_M	změřený fázový posun pomocí Agilent/HP 53132A [rad]
φ_T	teoretická hodnota fázového posunu [rad]
v_R	referenční rychlost zvuku ve vzduchu 346.13 m/s

Teoretická hodnota fázového posunu φ_T ve výpočtu 3.10 je brána jako zbytek po dělení hodnotou 2π tak, aby bylo možné vypočítat správně chybu vůči naměřenému fázovému posunu φ_M , který je vždy v rozsahu 0 až 2π . Dále platí, že se vzrůstající vzdáleností se musí fázový posun zvětšovat. A vyšší frekvence musí vždy mít větší fázový posun než nižší.

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky 3.2 při vzdálenosti $x = 47.99 \text{ mm}$ a frekvenci $f = 38 \text{ kHz}$.

$$\varphi_T = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{x}{v_R} = 2 \cdot \pi \cdot 38000 \cdot \frac{0.04799}{346.13} = 33.10 \text{ rad} \approx 1.69 \text{ rad} \quad (3.10)$$

	f[kHz]						Δf [kHz]			
	38	39	40	41	42		39..38	40..39	41..40	42..41
x[mm]	$\Delta\varphi_M$ [rad]					x[mm]	φ_K [rad]			
47.99	1.98	3.77	6.13	9.35	10.85	47.99	-1.79	-2.36	-3.22	-1.49
51.69	1.97	3.73	6.19	9.34	10.91	51.69	-1.75	-2.46	-3.15	-1.57
54.41	1.98	3.73	6.13	9.33	10.84	54.41	-1.75	-2.40	-3.20	-1.51
58.37	1.94	3.71	6.07	9.31	10.82	58.37	-1.77	-2.36	-3.24	-1.51
62.03	1.96	3.70	6.07	9.31	10.82	62.03	-1.74	-2.37	-3.24	-1.51
66.05	1.90	3.63	6.03	9.29	10.81	66.05	-1.73	-2.39	-3.26	-1.53
69.05	1.89	3.61	6.04	9.18	10.71	69.05	-1.73	-2.43	-3.14	-1.53
71.25	1.91	3.67	6.06	9.28	10.78	71.25	-1.76	-2.38	-3.23	-1.50
75.26	1.91	3.62	6.02	9.24	10.74	75.26	-1.71	-2.40	-3.22	-1.50
76.57	1.93	3.65	6.03	9.25	10.78	76.57	-1.72	-2.38	3.22	-1.53

Tab. 3.3: Výpočet absolutních chyb a korekce fázového posunu

f	nastavená frekvence [kHz]
x	změřená vzdálenost pomocí posuvného měřítka Magg [mm]
$\Delta\varphi_M$	absolutní chyba fázového posunu[rad]
φ_K	korekce fázového posunu mezi frekvencemi Δf [rad]
Δf	rozdíl použitých frekvencí při buzení [kHz]

Příklad výpočtu (3.11) v tabulce 3.3 pro chybu fázového posunu $\Delta\varphi_M$ na frekvenci $f = 38 \text{ kHz}$ a vzdálenosti měničů $x = 47.99 \text{ mm}$.

$$\Delta\varphi = \varphi_M - \varphi_T = 3.67 - 1.69 = 1.98 \text{ rad} \quad (3.11)$$

Příklad výpočtu (3.12) v tabulce 3.3 pro korekci fázového posunu mezi frekvencemi $f_B = 39 \text{ kHz}$ a $f_A = 38 \text{ kHz}$ při vzdálenosti měničů $x = 47.99 \text{ mm}$. Korekce je hodnota s opačným znaménkem oproti absolutní chybě.

$$\Delta\varphi_{K_{39..38}} = \Delta\varphi_{M_{38}} - \Delta\varphi_{M_{39}} = 1.98 - 3.77 = -1.79 \text{ rad} \quad (3.12)$$

V tabulce 3.4 jsou vypočítány průměrné velikosti korekce mezi dvěma frekvencemi $\varphi_{K\Delta f}$.

$\Delta f[\text{kHz}]$	39..38	40..39	41..40	42..41
$\overline{\varphi_{K\Delta f}}$	-1.75	-2.39	- 3.21	- 1.52

Tab. 3.4: Průměrná velikost korekce mezi frekvencemi

Dále jsem spočítal výslednou rychlost zvuku ve vzduchu v se započítanou korekcí fázového posunu. Korekce je brána jako hodnota s opačným znaménkem než průměrná absolutní chyba fázového posunu mezi frekvencemi. Výsledné rychlosti zvuku ve vzduchu v jsou v tabulce 3.5.

$v_R[\text{m/s}]$	$f[\text{kHz}]$					$\Delta f[\text{kHz}]$			
346.13	38	39	40	41	42	39..38	40..39	41..40	42..41
$x[\text{mm}]$	$\varphi_M[\text{rad}]$					$v[\text{m/s}]$			
47.99	3.67	6.33	9.56	13.66	16.02	328.68	358.86	342.50	356.42
51.69	6.21	8.90	12.30	16.39	18.90	343.57	322.83	371.11	327.77
54.41	8.09	10.83	14.22	18.41	20.91	343.87	342.79	350.14	349.95
58.37	10.79	13.62	17.03	21.34	23.91	337.50	358.94	336.52	348.06
62.03	13.33	16.20	19.69	24.06	26.70	348.04	354.22	336.60	347.44
66.05	16.05	18.98	22.57	27.03	29.75	351.42	345.90	332.36	343.75
69.05	18.10	21.08	24.77	29.16	31.94	351.29	336.18	368.58	342.53
71.25	19.64	22.70	26.38	30.89	33.68	341.26	348.78	342.72	351.99
75.26	22.41	25.49	29.25	33.84	36.70	354.80	345.40	343.21	351.54
76.57	23.34	26.44	30.21	34.82	37.74	353.57	349.62	344.81	342.54

Tab. 3.5: Naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu po korekci fázového posunu

v spočítaná rychlost zvuku ve vzduchu z naměřených hodnot $[\text{m/s}]$

$\overline{\varphi_{K\Delta f}}$ průměrná korekce fázového posunu mezi frekvencemi Δf $[\text{rad}]$

v_R referenční hodnota rychlosti šíření zvuku $[\text{m/s}]$

Příklad výpočtu (3.13) v tabulce 3.5 rychlosti šíření zvuku c z fázového rozdílu mezi frekvencemi $f_B = 39\text{kHz}$ a $f_A = 38\text{kHz}$ při započtené korekci fázového posunu.

$$c = \frac{2\pi(f_B - f_A)s}{\varphi_B - \varphi_A + \overline{\varphi_{K\Delta f}}} = \frac{2\pi(39000 - 38000) \cdot 0.04799}{3.67 - 6.33 - 1.75} = 328.68\text{m/s} \quad (3.13)$$

V tabulce 3.6 jsou vypočítány chyby měření rychlosti zvuku ve vzduchu po korekci. Maximální relativní chyba δc vůči referenční hodnotě 346.13 m/s je -24.98% . Z tabulky je také patrné, že se vzrůstající vzdáleností se chyba měření zmenšuje. Průměrná rychlost zvuku ve vzduchu $\bar{c}$ vypočítaná z posledních čtyřech vzdáleností je 347.11 m/s . Výsledná chyba z tohoto průměru je pak $\delta \bar{c} = 0.2\%$.

$v_R [\text{m/s}]$	$\Delta f [\text{kHz}]$							
346.13	39..38	40..39	41..40	42..41	39..38	40..39	41..40	42..41
$x [\text{mm}]$	$\Delta_v [\text{m/s}]$				$\delta_v [\%]$			
47.99	-17.45	12.73	-3.63	10.29	-5.04	3.68	-1.05	2.97
51.69	-2.56	-23.30	24.98	-18.36	-0.74	-6.73	7.22	-5.30
54.41	-2.26	-3.34	4.01	3.82	-0.65	-0.97	1.16	1.10
58.37	-8.63	12.81	-9.61	1.93	-2.49	3.70	-2.78	0.56
62.03	1.91	8.09	-9.53	1.31	0.55	2.34	-2.75	0.38
66.05	5.29	-0.23	-13.77	-2.38	1.53	-0.07	-3.98	-0.69
69.05	5.16	-9.95	22.45	-3.60	1.49	-2.87	6.49	-1.04
71.25	-4.87	2.65	-3.41	5.86	-1.41	0.77	-0.98	1.69
75.26	8.67	-0.73	-2.92	5.41	2.51	-0.21	-0.84	1.56
76.57	7.44	3.49	-1.32	-3.59	2.15	1.01	-0.38	-1.04

Tab. 3.6: Výsledné chyby rychlosti zvuku ve vzduchu po korekci fázového posunu

c_{ref} referenční hodnota rychlosti šíření zvuku $[\text{m/s}]$

$\bar{c}$ průměrná hodnota naměřené rychlosti zvuku $[\text{m/s}]$

Δ_v absolutní chyba naměřené rychlosti zvuku $[\text{m/s}]$

δ_v relativní chyba naměřené rychlosti zvuku $[\%]$

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky 3.6. Výpočet absolutní Δc (3.14) a relativní δc (3.15) chyby rychlosti zvuku ve vzduchu.

$$\Delta c = c - c_R = 328.68 - 346.13 = -17.45 \text{ m/s} \quad (3.14)$$

$$\delta c = \frac{\Delta c}{c_R} = \frac{-17.45}{346.13} = -5.04 \% \quad (3.15)$$

3.6 Závěr experimentu

Metoda měření rychlosti zvuku pomocí fázového posunu mezi frekvencemi dosáhla při použití průměrné hodnoty z více měření dobrého výsledku a rozhodl jsem se ji použít jako jednu z variant pro ultrazvukový anemometr. Při vzdálenosti měničů okolo 20 cm předpokládám ještě větší přesnost. Velkou výhodou této metody je, že eliminuje šum před rozkmitáním přijímače. Při detekci začátku echa metodou doby letu signálu se může z důvodů malé amplitudy stát, že detekuji začátek echa o několik period později. Pokud měřím fázový posun, měřím až po rozkmitání přijímače do plné amplitudy.

4 ŘÍDICÍ JEDNOTKA

Od řídicí jednotky se očekává možnost testování jednotlivých metod měření rychlosti větru nebo zvuku ve vzduchu a dále možnost sběru naměřených dat nadřazených systémem. V této kapitole jsou rozebrány požadavky na jednotlivé sekce řídicí jednotky. Návrh celkového konceptu je naznačen pomocí blokového schématu a postupně jsou popsány jednotlivé bloky. Dále kapitola obsahuje konkrétní schéma zapojení a návrh plošného spoje.

4.1 Blokové schéma řídicí elektroniky

Na obrázku 4.1 je blokové schéma řídicí elektroniky. Celý koncept je navržen tak, aby bylo možné ověřit a porovnat všechny zmíněné metody v kapitole 2.3.4.

Řídicí jednotka - mikropočítač, který generuje PWM signál pro budiče a vyhodnocuje čas a fázový rozdíl mezi vysílaným a přijatým signálem.

Analogový přepínač - přepne na vstupní zesilovač vždy požadovaný piezo měnič, šetří náklady na drahé operační zesilovače

Zesilovač - zesiluje a filtruje vstupní napětí na požadovanou úroveň

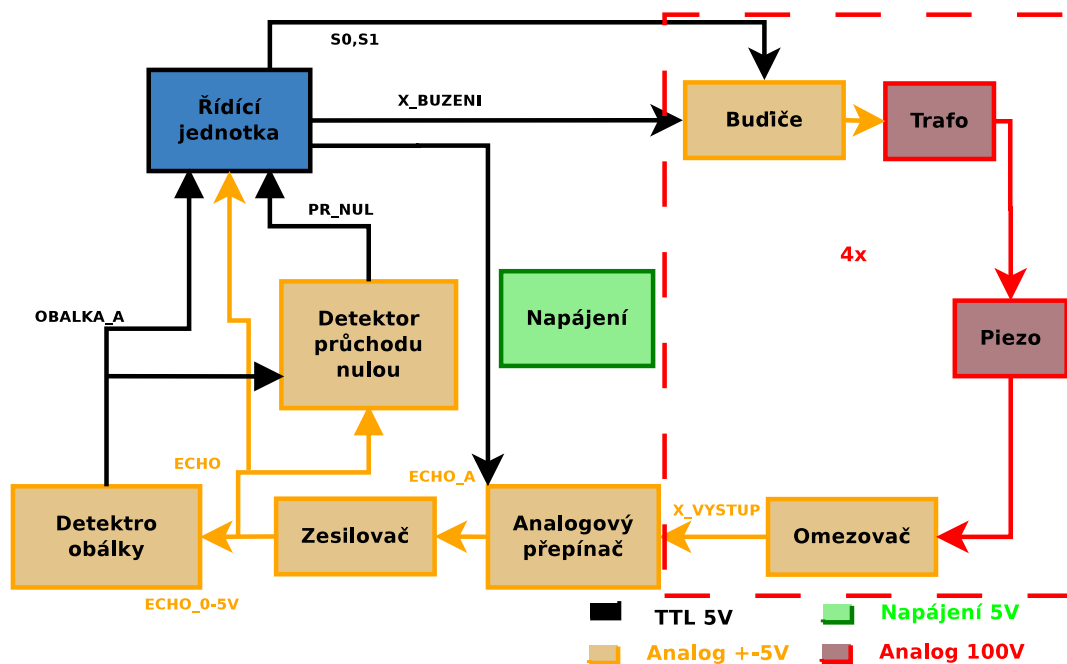
Trafo - jedná se vysokofrekvenční a vysokonapěťové trafo, zajišťuje jednoduché zesílení signálu pro piezo měniče přibližně na 100 V_{pp}

Piezo - generuje/přijímá výstupní/vstupní signál

Detektor obálky - generuje logický signál pro mikropočítač v případě, že amplituda obálky překročí nastavenou mez

Fázový detektor - generuje logický signál pro mikroprocesor pokud vstupní signál protne nulovou hodnotu, doba průchodu nulou je porovnávána s časovou základnou PWM generátoru

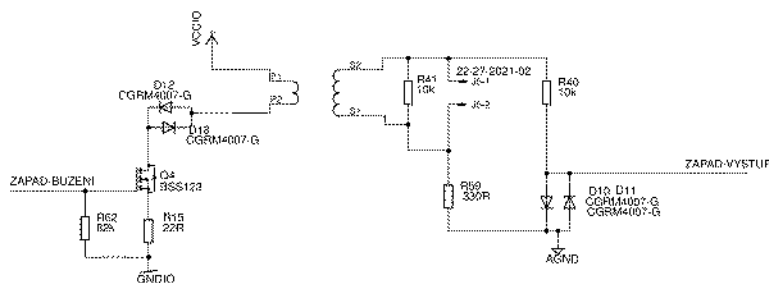
Napájení - zajišťuje stabilizované stejnosměrné napájení pro všechny obvody



Obr. 4.1: Blokové schéma elektroniky

4.1.1 Budiče

Pro vybuzení piezoměníčů je potřeba střídavé napětí o amplitudě $100 V_{pp}$ na frekvenci $40 kHz$. Jednoduchý způsob jak generovat vysoké napětí o vysoké frekvenci je použití speciálního transformátoru. Pro aktuálně použité piezo měniče 400EP18A lze použít transformátor K40004, který je přímo určený pro tyto účely. K vybuzení nám postačí běžně dostupný FET tranzistor BSS123, doplněný o ochranné diody. Lze ho budit přímo výstupem z mikropočítače. Ukázka zapojení budiče pro západní piezo měnič je na obrázku 4.2.



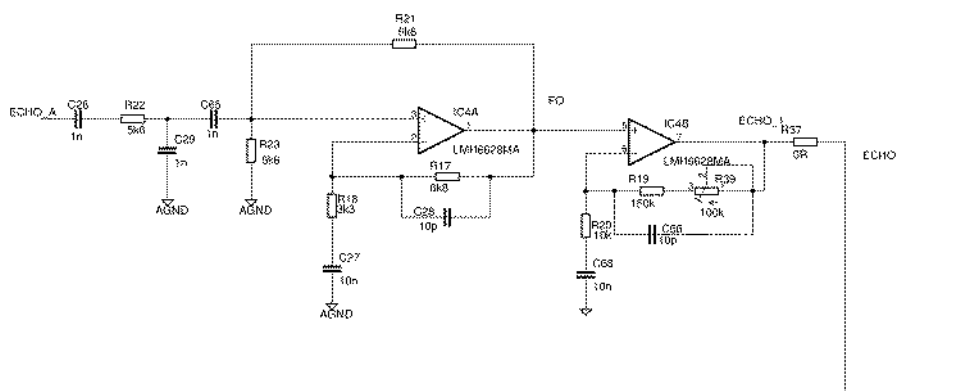
Obr. 4.2: Zapojení budiče pro piezo měnič (západ)

4.1.2 Omezovač

Přijímaný signál má velmi malou amplitudu pod 10 mV . V jeden časový okamžik se generuje 100 Vpp napětí a ani ne o 1 ms později je potřeba detekovat takto malé napětí na stejném místě. Pro ochranu vstupních obvodů od budícího napětí je nutný omezovač, složený z antiparalelně zapojených diod proti zemi. Kladný výstup piezo měniče je na diody přiveden přes velký odpor a záporný výstup je zapojen přes menší odpor, za kterým je obvod spojen s analogovou zemí AGND. Ukázka zapojení jednoho omezovače je na obrázku 4.2 (část za sekundárem transformátoru).

4.1.3 Filtr a zesilovač

Za omezovačem je potřeba kvalitní a rychlý filtr typu pásmová propust na požadovanou frekvenci 40 kHz , případně 200 kHz . Proto je zde požadována jednoduchost pro snadnou změnu jeho mezní frekvence. Hned za filtrem je rychlý zesilovač, který zesiluje přijímaný signál z piezo měniče na napětí 0 až 3.3 V . Toto napětí je dále zpracováno analogově, ale případně ho lze i navzorkovat pomocí vnitřního analogově digitálního převodníku mikropočítače.

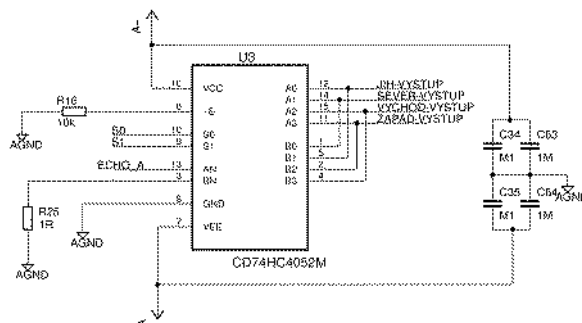


Obr. 4.3: Filtr a vstupní zesilovač

4.1.4 Analogový přepínač

Jelikož rychlé a nízkošumové operační zesilovače jsou poměrně drahé a použít čtyřikrát stejný filtr a zesilovač na desce by výrazně zvedlo náklady. Rozhodl jsem se pro přepínání mezi jednotlivými piezo měniči použít integrovaný analogový přepínač

74HC4052. Tímto řešením jsem ušetřil místo na desce plošných spojů, zjednodušil její návrh a ušetřil finance za drahé operační zesilovače. Zapojení analogového přepínače je na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Analogový přepínač

4.1.5 Napájení

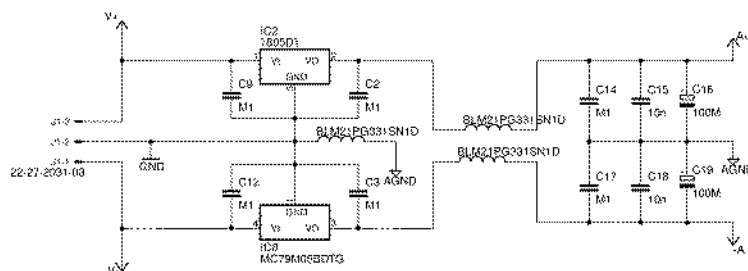
Toto je velmi důležitá část celé jednotky. Je potřeba symetrické napájení pro operační zesilovače $\pm 5\text{ V}$. Dále oddělené napájení pro budiče, aby nevznikaly přeslechy v citlivé přijímací analogové části a samostatné napájení pro mikroprocesor, které postačí 3.3 V . Jednotlivé napájecí větve je potřeba oddělit filtry a použít oddělenou zem pro analogovou část AGND, mikroprocesor DGND a výkonovou neboli budící část GNDIO. Jednotlivé země jsem oddělil tlumivkami a spojil v jednom bodě u vstupní svorky, tak aby nevznikaly nežádoucí zemní smyčky. Ukázka oddělení země pro analogovou část je na obrázku 4.5. Celkové řešení napájecí části lze nálezt ve schématu v příloze A.

4.1.6 Detektor obálky

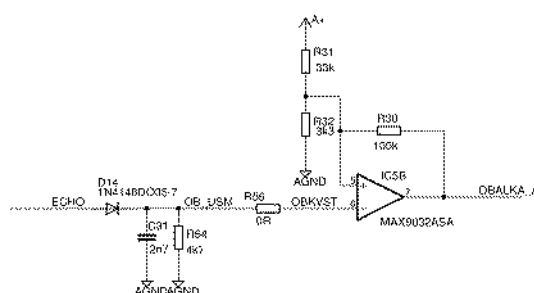
Tento blok generuje logický signál pro mikropočítač v momentě, kdy vstupní obvody detekují přijatý signál. Přijaté echo je nejprve usměrněno a následně filtrováno RC článkem s velkou časovou konstantou, tak aby se vytvořila obálka přijatého signálu. Tento usměrněný a vyfiltrovaný signál je přiveden na vstup komparátoru, který generuje zmíněný logický signál na vstup mikropočítače, viz obrázek 4.6.

4.1.7 Detektor průchodu nulou

Tento detektor je důležitý pro metodu měření rychlosti větru na základě fázového posunu mezi dvěma frekvencemi. Je zde potřeba generovat logický signál pro mikro-



Obr. 4.5: Nápajení analogové části

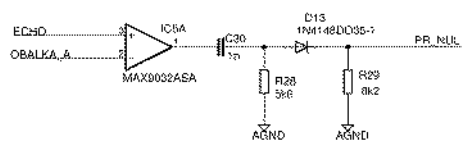


Obr. 4.6: Detektor obálky

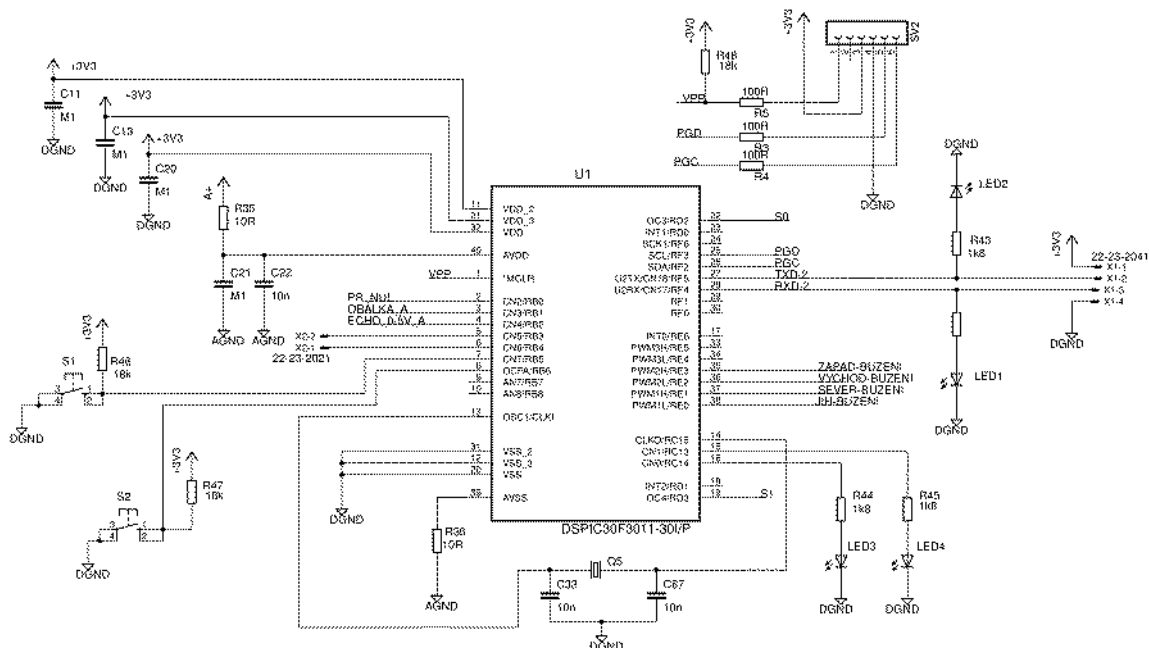
počítač v okamžicích průchodu nulou, ten je následně použit k časové synchronizaci čítače uvnitř mikropočítače. Zapojení detektoru průchodu nulou je na obrázku 4.7.

4.1.8 Mikropočítač a komunikace

Hlavním úkolem řídicí jednotky je hlavně aplikace jednotlivých měřících algoritmů. Výhodnocení a zpracování dat probíhá v pc pomocí utility PLX-DAQ, která umí zpracovávat data ze sériové linky RS232 a rovnou je exportovat do tabulkového editoru Excel. Jednolivé důležité analogové signály jsou přivedeny na vstupy mikroprocesru, zde je možnost je navzorkovat a dále digitálně zpracovat. Další variantou je použít logické signály na výstupu komparátorů a vyhodnocovat jejich časové rozdíly. Zapojení je na obrázku 4.8.



Obr. 4.7: Detektor průchodu nulou



Obr. 4.8: Zapojení mikroprocesorového a komunikačního bloku

4.2 Návrh filtru

Pro správnou detekci přijatého signálu bylo nutné navrhnout filtr. Vybral jsem pásmovou propust z důvodu filtrace síťového rušení na frekvenci 50 Hz a dále omezení vyšších harmonických složek při spínání transformátorů. Zvolil jsem pásmovou propust druhého řádu typu Sallen-Key. Jedná se o ověřené zapojení z [27], odkud je i převzatý postup výpočtu. V první fázi výpočtu je nutné zvolit hodnotu kapacitoru, aby jsem mohl z časové konstanty dopočítat hodnotu R . Zapojení filtru je na obrázku 4.3. Hodnotám rezistorů R_{21} , R_{22} a R_{23} v zapojení přísluší hodnota R ve výpočtu. Hodnoty C_{26} a C_{65} se rovnají zvolené hodnotě C . Výpočtená hodnota

$R_A = R18$ a $R_B = R17$. Volím $C = 1 \text{ nF}$, $f_{mez} = 40 \text{ kHz}$.

$$R = \frac{\sqrt{2}}{C \cdot 2\pi \cdot f_{mez}} = \frac{\sqrt{2}}{10^{-9} \cdot 2\pi \cdot 40000} = 5626 \text{ } \Omega \approx 5k6. \quad (4.1)$$

Dále potřebuji šířku pásma $\beta = 4kHz$ pro možnost měření na více frekvencích. Výpočet frekvenčního rozsahu je popsán dále. Na základě požadavku na šířku pásma je vypočítán požadovaný činitel jakosti, viz 4.2.

$$Q = \frac{f_{mez}}{\beta} = \frac{40000}{4000} = 10 \quad (4.2)$$

Požadované zesílení získáme podle 4.3.

$$K = 4 - \frac{\sqrt{2}}{Q} = 4 - \frac{\sqrt{2}}{10} = 3.85 \quad (4.3)$$

Dále na základě velikosti zesílení a známého vztahu lze spočítat velikost rezistorů ve zpětné vazbě.

$$K = 1 + \frac{R_B}{R_A} \quad (4.4)$$

Vztah 4.5 vyjadřuje poměr mezi zpětnovazebními rezistory. Zde je nutné hodnotu jednoho zvolit a druhu dopočítat.

$$\frac{R_B}{R_A} = 2.85 \quad (4.5)$$

Volím $R_A = 3k3$. A hodnota R_B je dána vztahem 4.6.

$$R_B = 2.85 * R_A = 9405 \approx 9k2 \quad (4.6)$$

4.3 Výroba

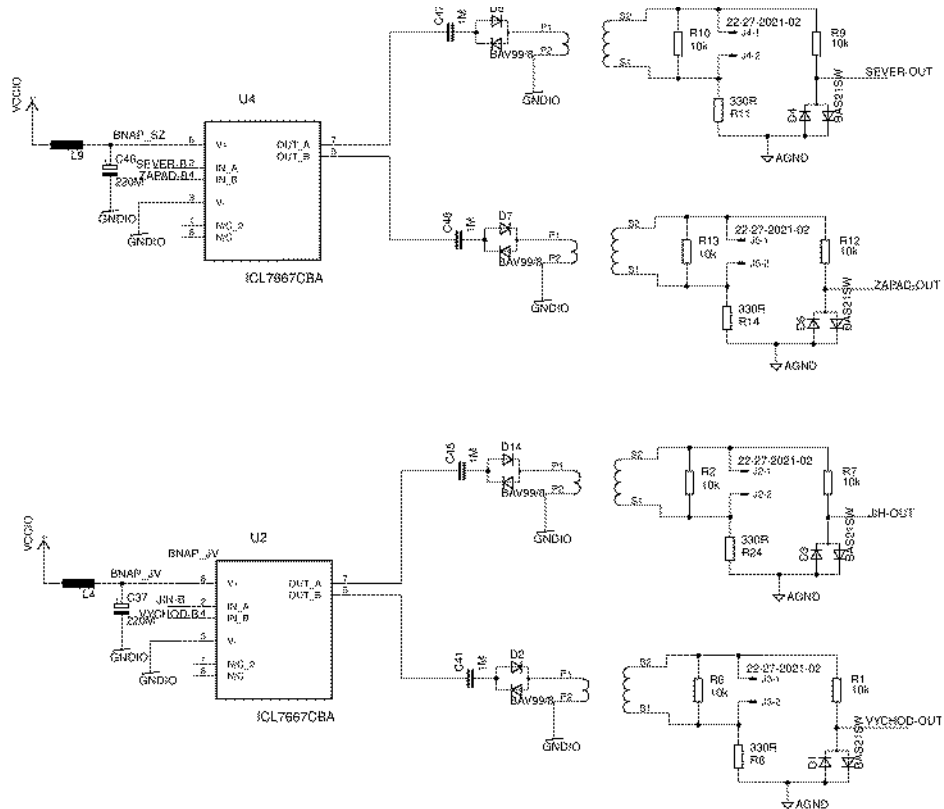
Plošný spoj jsem nechal vyrobit prostřednictvím POOL servisu firmy GATEMA s.r.o. Osazení a oživení jsem prováděl sám. Postupně jsem osazoval jednotlivé bloky a ověřoval jejich funkčnost od napájení, analogové části, mikroprocesorového bloku a výkonové části.

4.4 Návrh vylepšení pro prototyp anemometru

Během ožiování desky jsem narazil na několik problémů. Kromě menších chyb v návrhu desky plošných spojů a pár prohozených rezistorů během pájení se vyskytly i závažnější nedostatky.

4.4.1 Oddělit napájení přijímače a vysílače

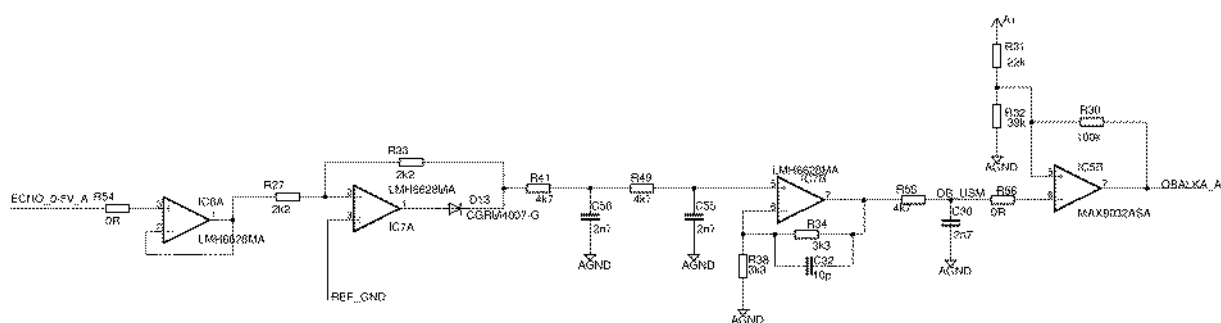
Výstupní signál ze vstupního filtru a zesilovače přenášel i budící signál a dokmitý krystalu piezo měniče. Očekávaný vstupní signál má amplitudu okolo 5 mV . Spínáním transformátorů způsobovalo pulzy na napájecím napětím okolo 20 mV na frekvenci 40 kHz . Tyto pulzy se u přijímacího transformátoru transformovali na 50 mV , prošly vstupním filtrem a přebudily zesilovače. Navíc i pouhých 50 mV dokázalo rozkmitat přijímací piezo měnič na větší amplitudě než očekávaných 5 mV . Přijímání echa bylo tudíž rušeno dokmitáváním budícího signálu. Oddělení napájení mezi vysílačem a přijímačem situaci zlepšilo. Napájení muselo být spárováno tak, aby na společném napájení nikdy nebyl vysílač a přijímač v jeden okamžik, takové řešení je použito zde [26]. Vytvořil jsem dvojice JIH+VYCHOD a SEVER+ZAPAD. Pro lepší oddělení jsem navíc použil integrovaný budič ICL7667, který zajistí i spolehlivější spínání transformátorů. Výstup budiče je podle doporučení výrobce oddělen kapacitou, která slouží jako ochrana proti trvalému sepnutí primáru na zem. Nové zapojení budících obvodů je na obrázku 4.9.



Obr. 4.9: Nové zapojení budičů s odděleným napájením

4.4.2 Detektor obálky

Signál *ECHO* na obrázku 4.6 obsahoval nežádoucí stejnosměrnou složku a měl tvar podobný průběhu nabíjení a vybíjení kapacity. Vše dohromady způsobovalo nestabilitu vstupních zesilovačů a nemožnost signál dostatečně zesílit. Postupným odpojováním jednotlivých bloků vstupních obvodů jsem zjistil, že vše způsobuje špatně provedený detektor obálky. Přidáním napětového sledovače před detektor obálky se problém vyřešil. Nicméně jednosměrně usměrněný a filtrovaný signál byl na svém výstupu dost zvlněný. Zvětšením časové konstanty RC článku se zvlnění zmenšilo, ale na druhou stranu déle trvalo překlopení komparátoru zpět a logická úroveň mezi vysíláním a přijímáním se téměř překrývala. Proto jsem zvolil více RC článků s menší časovou konstantou řazených za sebou. Další vylepšení spočívalo v použití dvoucestného usměrňovače, tím se zvlnění obálky výrazně zmenšilo. Použití komparátoru v zapojení Schmittův klopný obvod zvýšilo odolnost vůči šumu. Nové zapojení detektoru obálky je na obrázku 4.10.

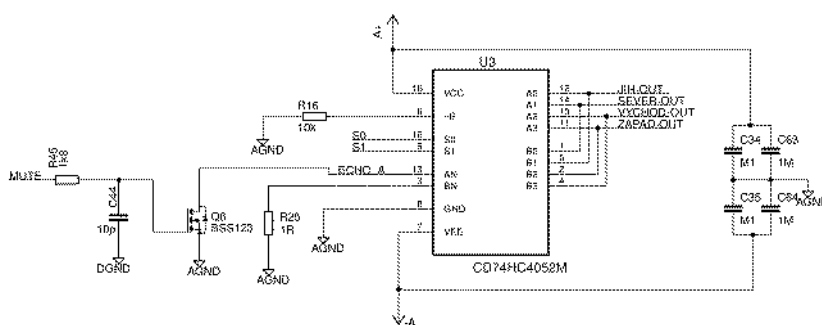


Obr. 4.10: Vylepšený detektor obálky

4.4.3 Tlumení vstupních obvodů během vysílání

I přes oddělení napájecích částí vysílačů a přijímačů se při generování budícího signálu dostával tento signál na výstup a způsoboval předčasné detekování echa. Jelikož tento nežádoucí signál obsahuje přesně frekvenci, na kterou je nastaven vstupní filtr,

procházel bez problémů až do výstupního zesilovače. Proto jsem přímající obvod doplnil o funkci "MUTE". Zatlumení vstupu analogového filtru během vysílání sepnutým FET tranzistorem proti zemi. Nepříjemné pak bylo, že vypnutí zatlumení logickým signálem způsobilo přebuzení zesilovače a opět falešné echo. Řešení naštěstí bylo celkem jednoduché, vstup tranzistoru jsem vybavil RC článkem. Následně při vypnutí tlumení se tranzistor nezavřel skokově, ale pomalu úměrně velikosti časové konstanty RC článku se zavírá a vstup filtru se stává aktivní. Zapojení je zobrazeno na obrázku 4.11. Tlumení je připojeno na výstup analogového přepínače, což je i vstup pro filtr a zesilovač.



Obr. 4.11: Zapojení tlumení vstupních obvodů během vysílání

4.4.4 Stínění vodičů

Během prvních testů, kdy jsem celý anemometr sestavil dohromady, se opět zvýšila velikost vstupního signálu na výstupu. Bylo to způsobeno vzájemným rušením přírodních vodičů k piezoměničům, které byly všechny vedeny vedle sebe jedním otvorem v plastovém držáku. Po vytažení každého samostatně se situace zlepšila. Použitím stíněných vodičů lze určitě problém ještě více omezit. Vedení vodičů podél os kovové konstrukce zavádělo také vazbu mezi vysílací a přijímací piezoměniči. Uzemněním kovové části konstrukce se vazba omezila.

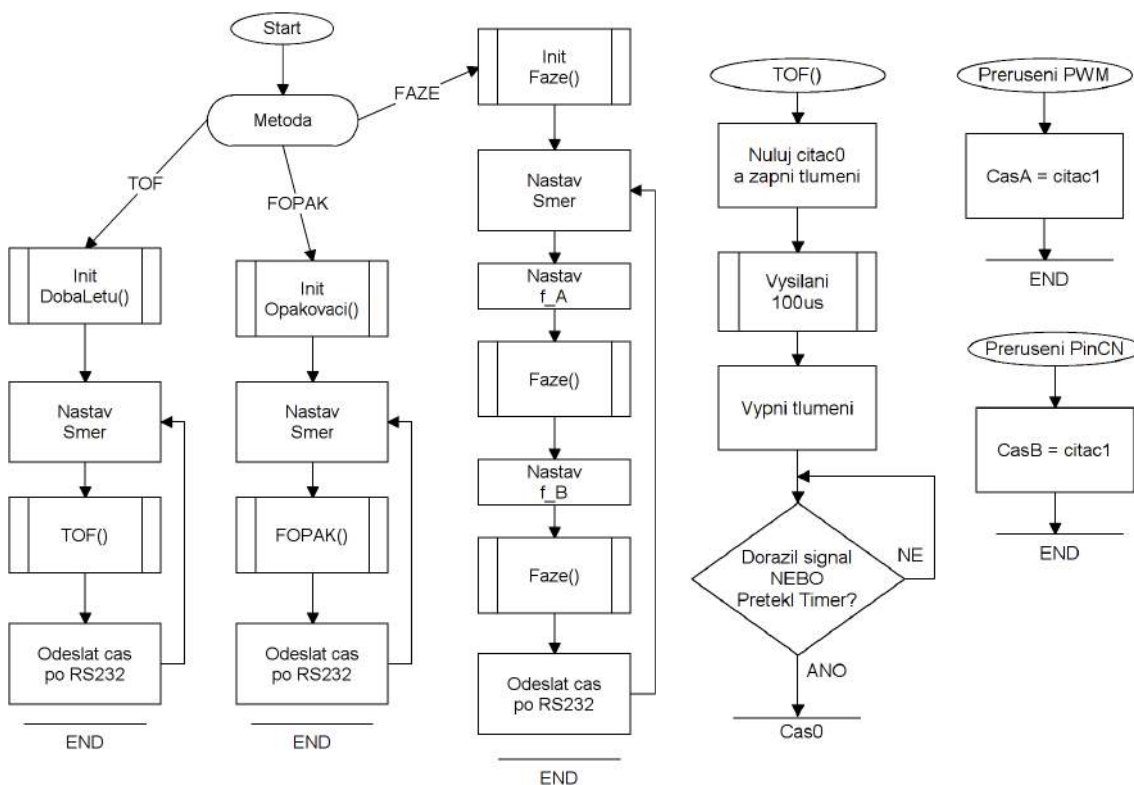
Celkové schéma prototypu desky k ultrazvukovému anemometru je v příloze B.

5 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

Do vyrobeného prototypu desky jsem implementoval jednotlivé metody měření rychlosti proudění c ultrazvukem. Výběr metody se provádí pomocí maker ve zdrojovém kódu. Změna použité metody měření vyžaduje přeprogramování mikropočítače.

Jednotlivé časy jsou měřeny pomocí čítačů, které mají časové rozlišení 31.25 ns . Naměřené časy jsou odesílány ke zpracování do PC přes rozhraní RS232, kde jsou ukládány přímo do sešitů tabulkového procesoru. Pro každé měření je uloženo alespoň dvacet vzorků. Tyto vzorky jsou dále seřazeny podle velikosti. Největší a nejmenší dvě hodnoty jsou vyřazeny a výsledný čas pro výpočet je dán průměrem zbylých vzorků.

Jednotlivé algoritmy jsou na obrázcích 5.1 a 5.2. Princip všech algoritmů je stejný, nejprve se nastaví směr měření, pak se provede měření podle daného algoritmu a celý cyklus se opakuje v nekonečné smyčce pro všechny možné směry měření.

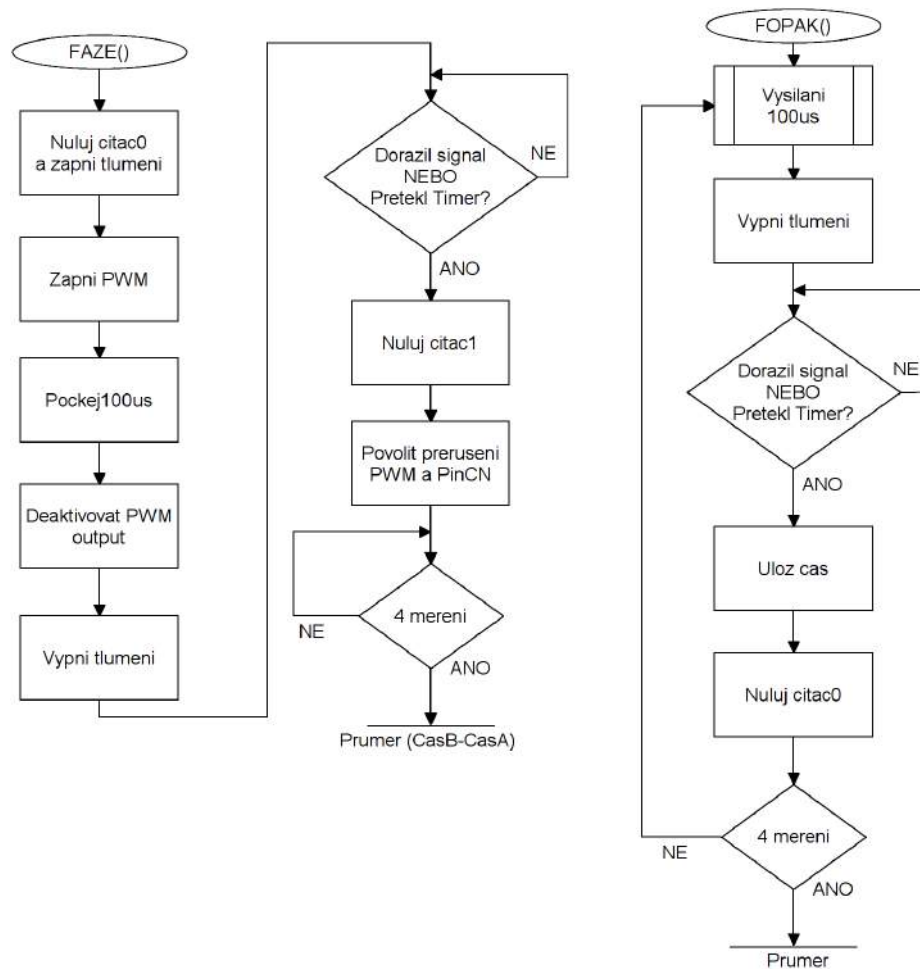


Obr. 5.1: Algoritmy *TOF*

Metoda měření doby letu signálu *TOF* Při výběru tohoto algoritmu se nejprve vynuluje čítač 0 a zapne tlumení vstupních obvodů během vysílání po dobu 100 *us*. Po vysílání se čeká na změnu logické úrovně na vstupu mikropočítače, která indikuje přijetí vysílaného pulsu. V momentě přijetí je uložena aktuální hodnota čítače a odeslána k dalšímu zpracování po sběrnici RS232. Ošetření přetečení hodnoty čítače je řešeno v tabulkovém procesoru.

Metoda opakovací frekvence *FOPAK* Základ tohoto algoritmu je velice podobný algoritmu *TOF*. Rozdíl spočívá v době nulování a ukládání hodnoty čítače. Zde se neměří čas od vysílání po přijetí, ale čas mezi jednotlivými přijetími. Provádí se celkem čtyři měření, přičemž první je synchronizační a k dalšímu zpracování se odesílá průměr posledních tří měření.

Metoda fázového posunu mezi dvěma frekvencemi *FAZE* Začátek tohoto algoritmu vychází z algoritmu *TOF*, změna nastává ve způsobu ukončení vysílání. Zde není vypnut celý PWM modul mikropočítače, ale pouze deaktivován konkrétní výstup a časová základna PWM běží dál. Po detekci obálky je vynulován čítač 1 a aktivována přerušování od PWM základny a přerušování při průchodu signálu nulou. Do proměnné *CasB* je ukládána hodnota čítače 1 při dokončení periody PWM modulem. Do proměnné *CasA* hodnota čítače 1 při průchodu nulou. Výsledný časový rozdíl je úměrný fázovému posunu vysílaného a přijatého signálu a je posílán přes rozhraní RS232 k dalšímu zpracování do PC. Toto měření fázového posunu je prováděno pro každou frekvenci a směr samostatně.



Obr. 5.2: Algoritmus *FAZE* a *FOPAK*

6 NÁVRH MECHANICKÉ KONSTRUKCE

V této kapitole je popsán návrh prototypu ultrazvukového anemometru. Na základě konzultace se zadávající firmou FIEDLER-MÁGR jsem zvolil čtyřramenné konstrukční provedení. Toto řešení bylo vybráno z důvodu jednoduché mechanické konstrukce a snadného ověření možnosti měření směru proudění a případného snadného rozšíření o další osu.

6.1 Výběr měniče pro anemometr

Konečná podoba mechaniky je závislá na typu vybraného piezo měniče. V této podkapitole jsem nejprve analyzoval parametry a typy vyráběných piezo měničů. Na základě požadavků jsem následně vybral vhodný ultrazvukový měnič.

Typy piezo měničů

- Vysílač (Transmitter) - určen hlavně pro vysílání, horší vstupní citlivost, používá se v kombinaci s přijímačem
- Přijímač (Receiver) - určen prioritně pro příjem, lepší vstupní citlivost, používá se v kombinaci s vysílačem
- Univerzální (Transceiver) - v co nejlepším poměru se snaží zkombinovat vlastnosti přijímače a vysílače

Pro konstrukci ultrazvukového anemometru jsem se výběrem zaměřil pouze na univerzální. Jelikož pro získání rychlosti větru podle dobře známe metody popsané dříve, viz (2.4) a (2.5), je nutné změřit dobu letu signálu oběma směry. Od měničů jsou požadovány v ideálním případě stejné vlastnosti pro měření oběma směry.

Porovnání piezo měničů	400EP18A [10]	400EP125 [9]	HT200F12H2 [11]
Rezonanční frekvence	40	40	200
Sířka pásma	2	1.5	20
Výřazovací úhel	85	108	15
Maximální napětí	100V _{pp}	100V _{pp}	200V _{pp}
SPL	108dB	100dB	-
SPL vzdálenost	30cm	30cm	-
Kapacita	2000pF	1400pF	160pF
Rozsah teplot	-30 až 80 °C	-30 až 70 °C	-10 až 60 °C
Průměr	18 mm	12.5 mm	12 mm

Tab. 6.1: Přehled piezo měničů

Při měření doby letu signálu se měří čas od vyslání signálu, obvykle několik sinusových period, do vybuzení přijímače. To bývá většinou detekováno pomocí komparátoru vůči referenční hodnotě. Pokročilejší metoda pomocí zpracování v mikroprocesoru používá detekci průchodu signálu nulou. Proto je důležité správně detekovat hned první průchod nulou. Pokud bych průchod nulou detekoval o jednu periodu později tak při 40 kHz bude chyba v naměřeném čase $25\text{ }\mu\text{s}$, při 200 kHz bude $5\text{ }\mu\text{s}$. Z tohoto důvodu je lepší piezo měnič na vyšší frekvenci.

Pohledem na průmyslově vyráběné ultrazvukové anemometry je patrné, že měniče jsou vždy umístěny přesně proti sobě, proto nepožadujeme široký vyřazovací úhel v tomto případě. Ten by byl nutný v momentě, kdy by byla zvolena varianta se třemi piezo měniči. Předpokládám dostatečně přesné konstrukční provedení. Malý vyřazovací úhel je výhodou, pokud se vzájemně slyší jen měniče v dané ose. Potom se může zvýšit perioda měření a je možné měřit více os ve stejném čase. To by ovšem vyžaduje i potřebný počet měřících kanálů.

Piezo měniče 400EP18A a 400EP125 byly testovány na vzdálenosti 30 cm. U HT200F12H2 lze z datasheetu vyčíst, že byl testován na 20 cm, bez žádného dalšího popisu. Experimentálně byla ověřena dostatečná velikost signálu na přijímacím prvku při vzdálenosti 30 cm a vstupním napětí 50Vpp.

Další důležitý parametr při konstrukci anemometru je rozměr piezo měniče, kde s nejmenším průměrem 12 mm je nejvhodnější HT200F12H2. Navíc oproti měničům 400EP18A a 400EP125 má HT200F12H2 lepší aerodynamický tvar a je i přímo doporučen pro použití měření rychlosti a směru větru. Použití metody měření fázového posunu není podmíněno velikostí rezonanční frekvence, ale rozdílem použitých frekvencí. Pro konstrukci ultrazvukového anemometru jsem se rozhodl použít HT200F12H2.

6.2 Mechanická konstrukce

Pro první testování a ověření jednotlivých metod jsem sestrojil jednoduchou konstrukci s běžně dostupných vodovodních trubek. S celou konstrukcí a uchycením piezo měničů mi pomohl otec, který potřebnou redukci na upevnění piezo měničů vyrobil na soustruhu a následně navařil. Fotodokumentace je na obrázku 6.1.

6.3 Nová mechanická konstrukce

Piezo měnič HT200F12H2 vyžaduje buzení napětím vyšším než 100 Vpp při frekvenci 200 kHz . Jak je popsáno v úvodu finální verze anemometru by měla být bateriově napájena a vytvářet z 12V baterie 100 V je neefektivní a celkem razantně

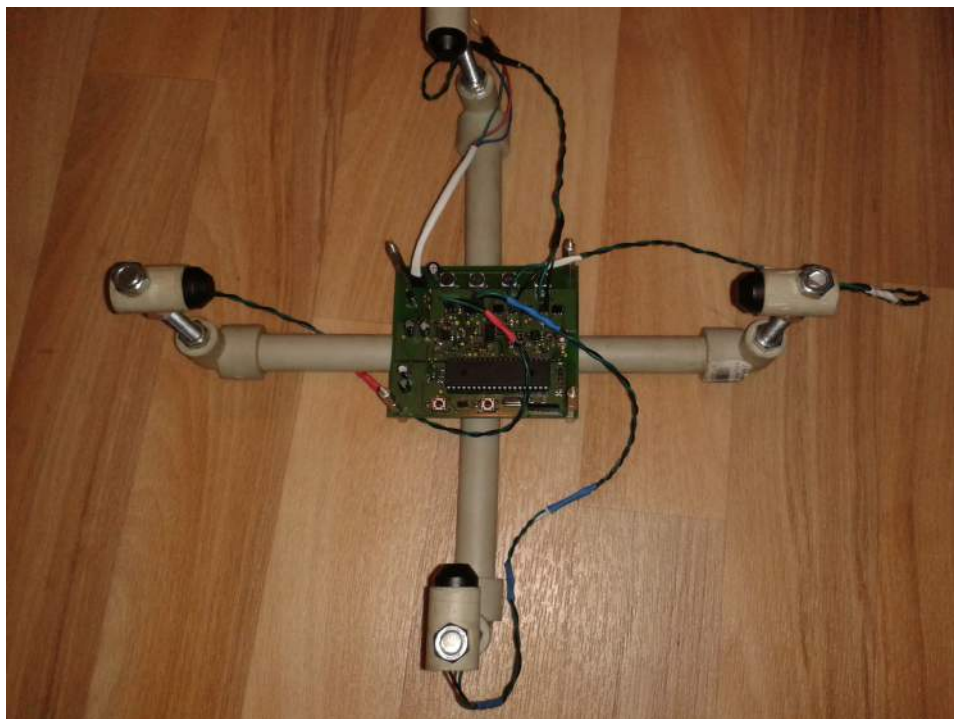


Obr. 6.1: Fotodokumentace původní mechanické konstrukce

by se snížila její životnost. Použití zesilovače, který má na výstupu 100 V je v tomto případě nevhodné. Proto jsem se rozhodl použít transformátor. Ovšem zesilovací transformátor na 200 kHz není běžně dostupný. Proto jsem rozhodl transformátor nechat vyrobit na zakázku u firmy TronicCZ, která měla nejlepší nabídku. Firma bohužel nezvládla vyrobit transformátor požadovaných parametrů. Na prázdko bylo výstupní napětí dostatečné, ale i při malé a pouze ohmické zátěži $33\text{ k}\Omega$ nastal silný pokles výstupního napětí. Trafo bohužel nebylo schopné přenášet požadovaný výkon na 200 kHz . Z časových důvodů jsem se rozhodl pro otestování principů měření rychlosti větru použít piezo měniče 400EP18A. K těmto měničům je sériově vyráběn transformátor K40004. Celá tato změna samozřejmě znamenala i nutnou změnu konstrukce, hlavně nové uchycení pro piezo měniče. Pouzdra pro měniče 400EP18A jsem vyrobil ze zbytků plastových trubek. Vnitřní průměr trubek je 14 mm , vnější 20 mm , sražením vnitřního průměru na 18 mm do hloubky 3 mm vytvořilo pevné a stabilní pouzdro pro piezo měnič, viz 6.2.

6.4 Mechanická konstrukce pro testování v tunelu

Pro experimentální ověření vlastností prototypu ultrazvukového anemometru jsem si domluvil schůzku na Leteckém Ústavu FSI. Zde mají malý aerodynamický tunel

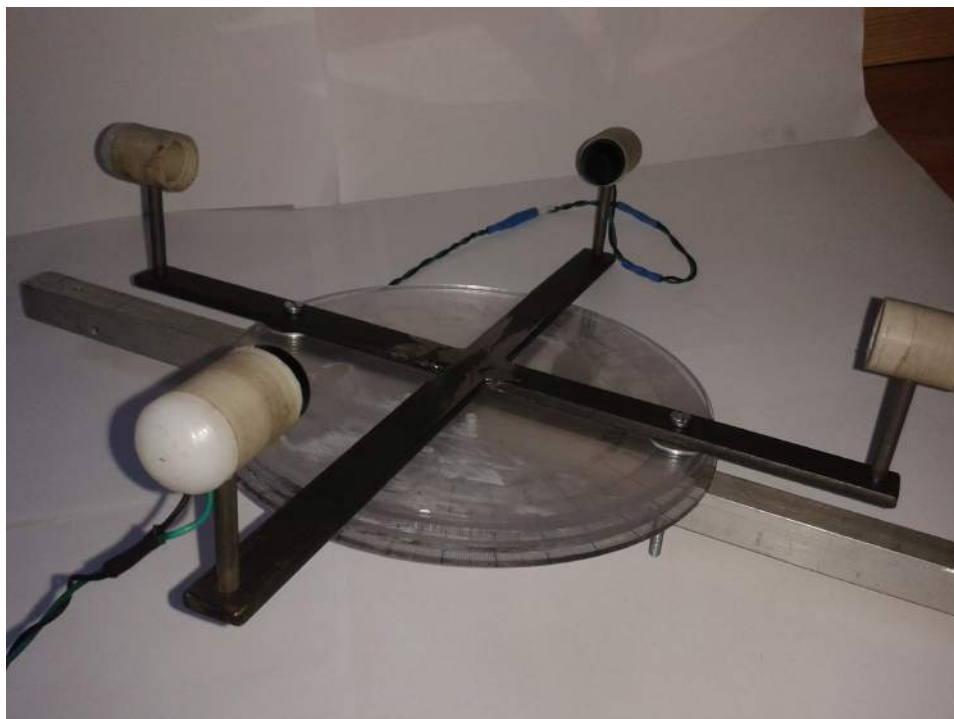


Obr. 6.2: Nová mechanická konstrukce

pro studijní a experimentální účely. Tunel má opravdu minimální rozměry a proto byla nutná další změna konstrukce, aby bylo možné anemometr v tunelu otestovat. Důležitá nebyla pouze změna rozměrů, ale také provedení. Od pana Ing. Lajzy jsem dostal odborné rady jak zlepšit aerodynamické vlastnosti konstrukce. Bylo nutné ztenčit distanční sloupky, odstranit podpurné matky a nahradit je závitem do plastové redukce. Dále jsem konce držadel na piezo měniče vybavil záslepkami kopulovitého tvaru pro menší odpor při větrném proudění. Výška distančních sloupků byla snížena na 5cm , aby měniče byly uprostřed tunelu. Snažil jsem se zachovat vzdálenost měničů, ale po přidání záslepek se zvětšil vnější rozměr a bylo nutné posunout sloupky blíže k sobě. Pouzdra na piezo měniče jsem zkrátil na minimální možnou vzdálenost, díky tomu jsem dostal pár mm zpět. Výsledné řešení je na 6.3.

6.5 Vyskytlé problémy s kovovou konstrukcí

Jedno z prvních testování jsem prováděl v termokomoře a zkoušel měřit rychlost zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě. Při snižování teploty pod 15°C se mnohonásobně zvýšila velikosti vstupního signálu a výstupu zesilovače, což mělo za následek brzkou detekci echa. Jedním z důvodů byl problém v elektronice, popsáno dále. Hlavním problém byl ovšem v kovové mechanické konstrukci, při snížení teploty se



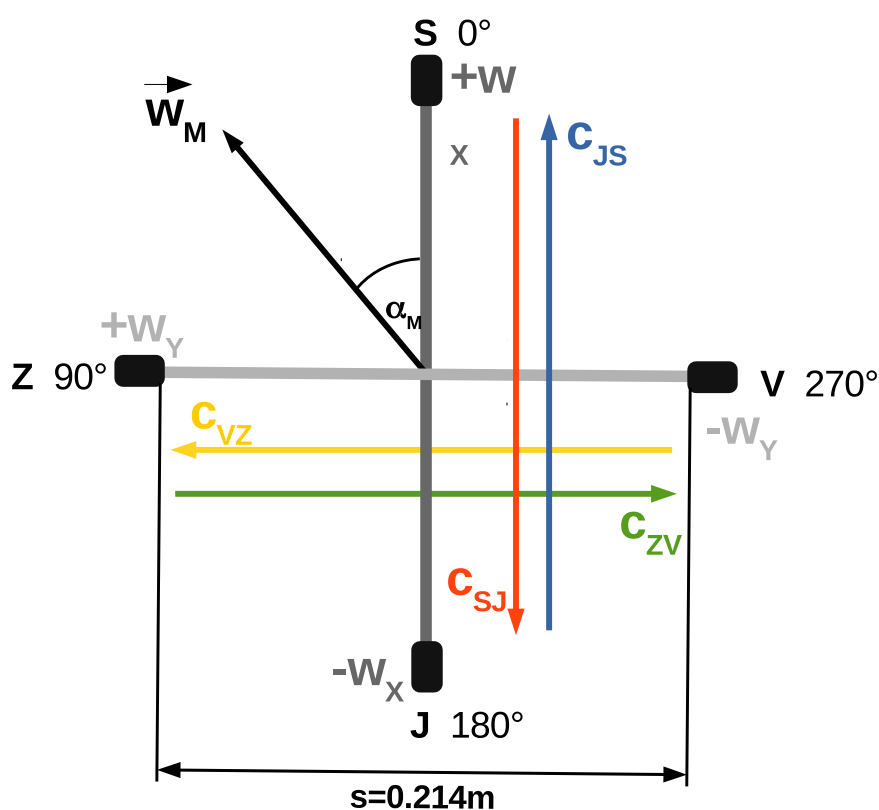
Obr. 6.3: Prototyp do aerodynamického tunelu

vazby mezi piezo měniči a kovovým základem zpevnily a mechanické kmity vysílačího měniče se přenášely po konstrukci na přijímací měnič. Místo rychlosti zvuku ve vzduchu v jsem tedy měřil rychlost šíření zvuku v kovu (plastu). Při zvýšení teploty zpět nad 20°C se přenos mechanických kmitů výrazně snížil. Při návštěvě Leteckého ústavu FSI a konzultaci s panem Ing. Lajzou mi bylo doporučeno zlepšit tuhost konstrukce. Celý kovový nosník byl uchycen pouze na dvou bodech a v podstatě v jedné ose, viz obrázek 6.3 (osa bez měničů v tom případě). Druhá osa měla volná ramena a mohla volně mechanicky kmitat. Po porovnání průběhů napětí z měření na jednotlivých osách se tato hypotéza ukázala pravdivá. Proto jsem i druhou osu uchytil pevně šrouby k plastovému podstavci.

I přes všechna zmíněná opatření se stále šířil ultrazvukový signál po konstrukci a nemohl jsem pořádně zesílit vstupní signál. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl celý kovový kříž rozříznout a jednotlivá ramena přichytit k plastovému podstavci přes gumové podložky, které snížili mechanickou vazbu mezi jednotlivými rameny.

7 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ

Poslední důležitou částí této práce bylo experimentální ověření prototypu ultrazvukového anemometru. Na obrázku 7.1 je vysvětlen základní popis a orientace anemometru. Každý piezo měnič je přiřazen jedné ze světových stran. Pro přesné měření je nutné změřit rychlost šíření signálu c mezi každým párem v obou směrech. Vzdálenost s mezi piezo měniči je 0.214 m . V aerodynamickém tunelu na FSI je úhel natočení $\alpha_R = 0^\circ$ umístěn nahoře. Z tohoto důvodu je i orientace os otočena o 90° proti směru hodinových ručiček. Změřený úhel natočení α_M (směr proudění) je brán vůči kladnému směru osy w_X a je počítán z velikostí složek w_X a w_Y změřeného vektoru směru proudění $\vec{w}_M$.



$\vec{w}_M$ - změřený vektor proudění [m/s]

C_{SJ} - celková rychlost šíření signálu ze severu na jih [m/s]

C_{JS} - celková rychlost šíření signálu z jihu na sever [m/s]

C_{VZ} - celková rychlost šíření signálu ze východu na západ [m/s]

C_{ZV} - celková rychlost šíření signálu ze západu na východ [m/s]

Obr. 7.1: Popis a orientace anemometru

7.1 Odvození vztahů

Jak je popsáno dříve celková rychlost šíření signálu c mezi měniči je dána obecně vztahem 2.3. Pro konkrétní případ páru měničů mezi jihem a severem je to ve směru z jihu na sever c_{JS} (7.1) a ze severu na jih c_{SJ} (7.2).

$$c_{JS} = v + w_X \quad (7.1)$$

$$c_{SJ} = v - w_X \quad (7.2)$$

c_{JS}	celková rychlost šíření signálu z jihu na sever $[m/s]$
c_{SJ}	celková rychlost šíření signálu ze severu na jih $[m/s]$
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění $\vec{w}_M$ $[m/s]$
v	rychlost šíření zvuku ve vzduchu $[m/s]$

Velikost složky w_X lze získat pomocí vztahu 7.3. Stejný postup platí i pro složku w_Y , viz 7.4. Použitím difference rychlostí mezi měniči lze zcela vykompenzovat rychlost zvuku ve vzduchu v , která je silně závislá na teplotě. Výsledná difference obsahuje průměr ze dvou hodnot w_X .

$$w_X = \frac{c_{JS} - c_{SJ}}{2} = \frac{v + w_X - v + w_X}{2} = \frac{2 \cdot w_X}{2} = w_X \quad (7.3)$$

$$w_Y = \frac{c_{VZ} - c_{ZV}}{2} = \frac{v + w_Y - v + w_Y}{2} = \frac{2 \cdot w_Y}{2} = w_Y \quad (7.4)$$

w_Y	velikosti složky Y změřeného vektoru proudění $\vec{w}_M$ $[m/s]$
c_{JS}	celková rychlost šíření signálu z jihu na sever $[m/s]$
c_{SJ}	celková rychlost šíření signálu ze severu na jih $[m/s]$
c_{VZ}	celková rychlost šíření signálu z východu na západ $[m/s]$
c_{ZV}	celková rychlost šíření signálu ze západu na východ $[m/s]$

Velikost výsledného změřeného vektoru proudění w_M lze pak získat podle známého vztahu 7.5.

$$|w_M| = \sqrt{w_X^2 + w_Y^2} \quad (7.5)$$

$ w_M $	změřená velikost vektoru proudění w_M [m/s]
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění w_M [m/s]
w_Y	velikosti složky Y změřeného vektoru proudění w_M [m/s]

Směr změřeného vektoru proudění w_M lze získat pomocí výpočtů v tabulce 7.1. Nejprve je nutné určit, v jakém kvadrantu se vektor nachází ze znamének jednotlivých složek w_X a w_Y .

w_X	w_Y	Vztah pro výpočet α_M
+	+	$\alpha_M = \arcsin(\frac{w_X}{ w_M })$
+	-	$\alpha_M = 180 - \arcsin(\frac{w_X}{ w_M })$
-	+	$\alpha_M = 360 + \arcsin(\frac{w_X}{ w_M })$
-	-	$\alpha_M = 180 - \arcsin(\frac{w_X}{ w_M })$

Tab. 7.1: Výpočet směru proudění

Teplotní závislost rychlosti zvuku ve vzduchu je využívána k měření teploty ultrazvukovými anemometry. V tomto případě lze rychlosti zvuku ve vzduchu v získat z průměrné hodnoty rychlosti šíření signálu mezi měniči c_{JS} a c_{SJ} , viz 7.6.

$$v = \frac{c_{JS} + c_{SJ}}{2} = \frac{v + w_X + v - w_X}{2} = \frac{2 \cdot v}{2} = v \quad (7.6)$$

c_{JS}	celková rychlost šíření signálu z jihu na sever [m/s]
c_{SJ}	celková rychlost šíření signálu ze severu na jih [m/s]
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění w_M [m/s]
v	rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s]

Takto vypočtená rychlost zvuku v je závislá na teplotě podle vztahu 7.7.

$$v = v_0 + K_T \cdot T = 331.4 + 0.607 \cdot T \quad (7.7)$$

v	rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m/s]
v_0	331.4 rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě 0° [m/s]
K_T	0.607 koeficient teplotní závislosti rychlosti zvuku [$\frac{m/s}{^\circ C}$]
T	teplota vzduchu [$^\circ C$]

Výslednou změřenou teplotu vzduchu T_M získanou z naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v lze získat pomocí vztahu 7.8.

$$T_M = \frac{v - v_0}{K_T} \quad (7.8)$$

T_M	změřená teplota vzduchu [$^\circ C$]
-------	--

7.2 Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu

Správnou funkčnost prototypu ultrazvukového anemometru jsem nejprve ověřil v tepelné komoře Clima Temperature Systeme CTS. Jak je popsáno dříve ve vztahu 7.7, rychlost zvuku ve vzduchu v je závislá na teplotě T . Pro ověření byl použit teplotní rozsah $20^\circ C$ až $55^\circ C$, měření na nižších teplotách nebylo možné z důvodu šíření ultrazvukových kmitů po konstrukci, jak je posáno v kapitole 6.5.

7.2.1 Použité přístroje

1. Clima Temperature Systeme CTS
2. Digitalthermometer GHM 3230
3. Dell Latitude 5420
4. Laboratorní zdroj BK 307
5. Prototyp ultrazvukového anemometru
6. Převodník USB< – >RS232 UCAB

7.2.2 Postup měření

1. Nastavit teplotu na Clima Temperature Systeme CTS.
2. Počkat 15 min na ustálení teploty.
3. Odečíst teplotu na Digitalthermometer GHM 3230.
4. Provést sběr dat do PC pomocí PLX-DAQ.
5. Předchozí body opakovat pro všechny požadované teploty.

7.2.3 Naměřené výsledky

V tabulce 7.2 jsou naměřené výsledky teplotní závislosti rychlosti vzduchu pomocí prototypu ultrazvukového anemometru.

$T_R[^\circ C]$	$v_R[m/s]$	$v_M[m/s]$	$\Delta v_M[m/s]$	$\delta v_M[\%]$	$T_M[^\circ C]$	$\Delta T_M[^\circ C]$	$\delta T_M[\%]$
18.9	342.9	304.8	-38.1	-11.1	-43.8	-62.7	564.9
24.9	346.5	306.8	-39.7	-11.5	-40.5	-65.4	570.9
29.7	349.4	309.5	-39.9	-11.4	-36.0	-65.7	575.7
34.0	352.0	311.0	-41.1	-11.7	-33.6	-67.6	580.0
39.2	355.2	313.3	-41.9	-11.8	-29.9	-69.1	585.2
43.8	358.0	315.4	-42.6	-11.9	-26.4	-70.2	589.8
48.6	360.9	317.6	-43.3	-12.0	-22.8	-71.4	594.6
53.3	363.8	319.6	-44.1	-12.1	-19.4	-72.7	599.3

Tab. 7.2: Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu prototypem ultrazvukového anemometru

T_R	referenční teplota změřená pomocí GHM 3230 $[^\circ C]$
v_R	referenční rychlost zvuku ve vzduchu vypočtená z T_R $[m/s]$
v_M	naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru $[m/s]$
Δv_M	absolutní chyba naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M $[m/s]$
δv_M	relativní chyba naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M $[\%]$
T_M	vypočtená teplota na základě v_M $[^\circ C]$
ΔT_M	absolutní chyba vypočtené teploty T_M $[^\circ C]$
δT_M	relativní chyba vypočtené teploty T_M $[\%]$

Příklad výpočtu Ukázka výpočtů je pro první řádek tabulky 7.2.

Vypočítal jsem referenční rychlost zvuku ve vzduchu v_R z naměřené referenční teploty T_R , výpočet 7.9, velikost absolutní Δv_M (7.10) a relativní δv_M (7.11) chyby naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu vůči referenční hodnotě v_R . Následně jsem vypočítal naměřenou teplotu T_M z naměřené rychlosti zvuku v_M (7.12) a její absolutní ΔT_M (7.13) a relativní δT_M (7.14) chybu.

$$v_R = v_0 + K_T \cdot T_R = 331.4 + 0.607 \cdot 18.9 = 342.9 \text{ m/s} \quad (7.9)$$

$$\Delta v_M = v_M - v_R = 304.8 - 342.9 = -38.1 \text{ m/s} \quad (7.10)$$

$$\delta v_M = \frac{\Delta v_M}{v_R} \cdot 100 = \frac{-38.1}{342.9} \cdot 100 = -11.1\% \quad (7.11)$$

v_R	referenční rychlost zvuku ve vzduchu vypočtená z T_R [m/s]
v_M	naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru [m/s]
v_0	331.4 rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě 0° [m/s]
K_T	0.607 koeficient teplotní závislosti rychlosti zvuku [$\frac{\text{m/s}}{^\circ\text{C}}$]
T_R	referenční teplota změřená pomocí GHM 3230 [$^\circ\text{C}$]
Δv_M	absolutní chyba naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M [m/s]
δv_M	relativní chyba naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M [%]
T_M	vypočtená teplota na základě v_M [$^\circ\text{C}$]
ΔT_M	absolutní chyba vypočtené teploty T_M [$^\circ\text{C}$]
δT_M	relativní chyba vypočtené teploty T_M [%]

$$T_M = \frac{v_M - v_0}{K_T} = \frac{304.8 - 331.4}{0.607} = -43.8^\circ\text{C} \quad (7.12)$$

$$\Delta T_M = T_M - T_R = -43.8 - 18.9 = -62.7^\circ\text{C} \quad (7.13)$$

$$\delta T_M = \frac{\Delta T_M}{T_R} \cdot 100 = \frac{-62.7}{18.9} \cdot 100 = -564.9\% \quad (7.14)$$

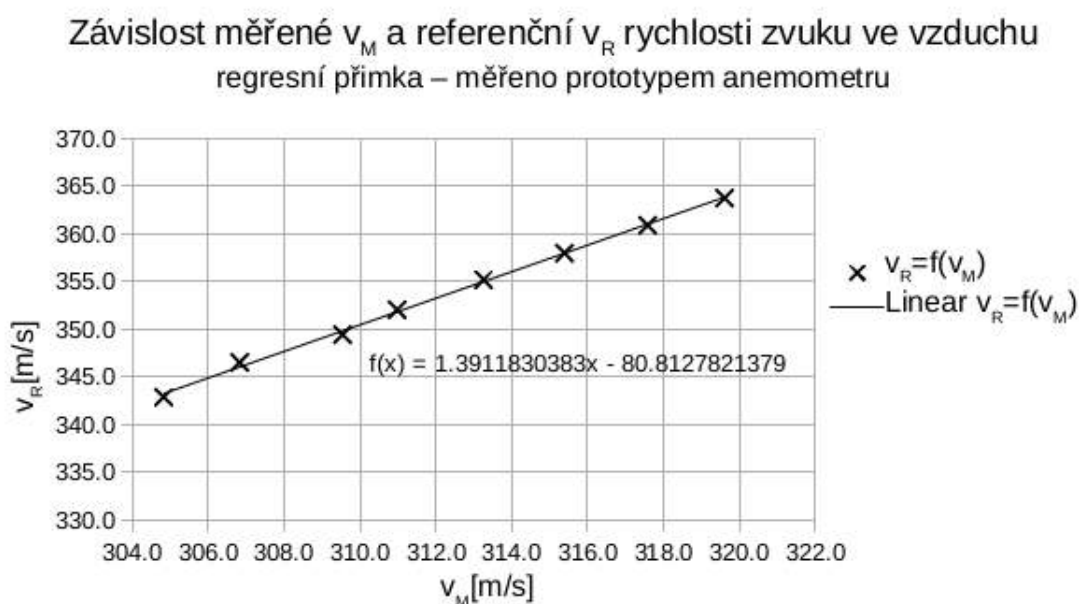
Výsledné chyby měření jak pro rychlosti zvuku ve vzduchu v_M , tak i pro výsledné měřené teploty T_M jsou vysoké. Tyto obrovské chyby jsou způsobeny hlavně zpožděním v přijímacích obvodech, především filtrem detektoru obálky. Tuto chybu lze nalezením korekčních koeficientů odstranit.

Na obrázku 7.2 je vynesena závislost naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M vůči referenční rychlosti zvuku v_R . Tyto naměřené body jsem proložil regresní přímkou získanou metodou nejmenších čtverců. Rovnice regresní přímky je zobrazena též na obrázku 7.2. A její koeficienty $K = 1.39$ a $B = -80.81$ jsem dosadil do 7.15. Rovnice pro výpočet pro výpočet korigované rychlosti zvuku ve vzduchu v_K je dána vztahem 7.16.

$$v_K = K \cdot v_M + B \quad (7.15)$$

$$v_K = 1.39 \cdot v_M - 80.81 \quad (7.16)$$

v_K	korigovaná rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě $[m/s]$
v_M	naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru $[m/s]$
K	multiplikativní korekční koeficient $[-]$
B	aditivní korekční koeficient $[m/s]$



Obr. 7.2: Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu - regresní přímka

V tabulce 7.3 jsou vypočítány korigované rychlosti zvuku v_K a korigované teploty T_K , zde je vidět, že velikosti chyb po korekci se výrazně zmenšily. V tabulce 7.4 jsou tři nové naměřené hodnoty, které slouží k verifikaci provedené korekce a nebyly použity jako body k vytvoření korekční přímky.

v_M [m/s]	v_R [m/s]	v_K [m/s]	Δv_K [m/s]	δv_K [%]	T_R [°C]	T_K [°C]	ΔT_K [°C]	δT_K [%]
304.8	342.9	343.2	0.4	0.1	18.9	19.5	0.6	3.2
306.8	346.5	346.0	-0.5	-0.1	24.9	24.1	-0.8	-3.3
309.5	349.4	349.8	0.4	0.1	29.7	30.3	0.6	2.1
311.0	352.0	351.8	-0.2	-0.1	34.0	33.6	-0.4	-1.1
313.3	355.2	355.0	-0.2	-0.1	39.2	38.9	-0.3	-0.9
315.4	358.0	358.0	0.0	0.0	43.8	43.8	0.0	-0.1
317.6	360.9	361.0	0.1	0.0	48.6	48.8	0.2	0.4
319.6	363.8	363.8	0.1	0.0	53.3	53.4	0.1	0.3

Tab. 7.3: Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu - po korekci

T_R	referenční teplota změřená pomocí GHM 3230 [°C]
v_R	referenční rychlost zvuku ve vzduchu vypočtená z T_R [m/s]
v_M	naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru [m/s]
v_K	korigovaná rychlost zvuku ve vzduchu prototypu anemometru [m/s]

$v_M[m/s]$	$v_R[m/s]$	$v_K[m/s]$	$\Delta v_K[m/s]$	$\delta v_K[\%]$	$T_R[^\circ C]$	$T_K[^\circ C]$	$\Delta T_K[^\circ C]$	$\delta T_K[\%]$
311.8	353.1	353.0	-0.2	0.0	35.8	35.5	-0.3	-0.8
307.6	347.1	347.2	0.0	0.0	25.9	26.0	0.1	0.2
304.9	343.1	343.3	0.3	0.1	19.2	19.6	0.4	2.2

Tab. 7.4: Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu - verifikace

Δv_K absolutní chyba korigované rychlosti zvuku ve vzduchu v_K [m/s]

δv_K relativní chyba korigované rychlosti zvuku ve vzduchu v_K [%]

T_K korigovaná teplota na základě v_K [°C]

ΔT_K absolutní chyba korigované teploty T_K [°C]

δT_K relativní chyba korigované teploty T_K [%]

Příklad výpočtu pro první řádek tabulky 7.3, postup je stejný i pro tabulku 7.4. Většina výpočtů zůstává stejná jako u hodnot pro tabulku 7.2.

Výpočet korigované rychlosti zvuku ve vzduchu v_K je zobrazen vztahem 7.17.

$$v_K = K \cdot v_M + B = 1.39 \cdot 304.8 - 80.81 = 343.2 m/s. \quad (7.17)$$

v_M naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru [m/s]

v_K korigovaná rychlost zvuku ve vzduchu prototypu anemometru [m/s]

K multiplikativní korekční koeficient [–]

B aditivní korekční koeficient [m/s]

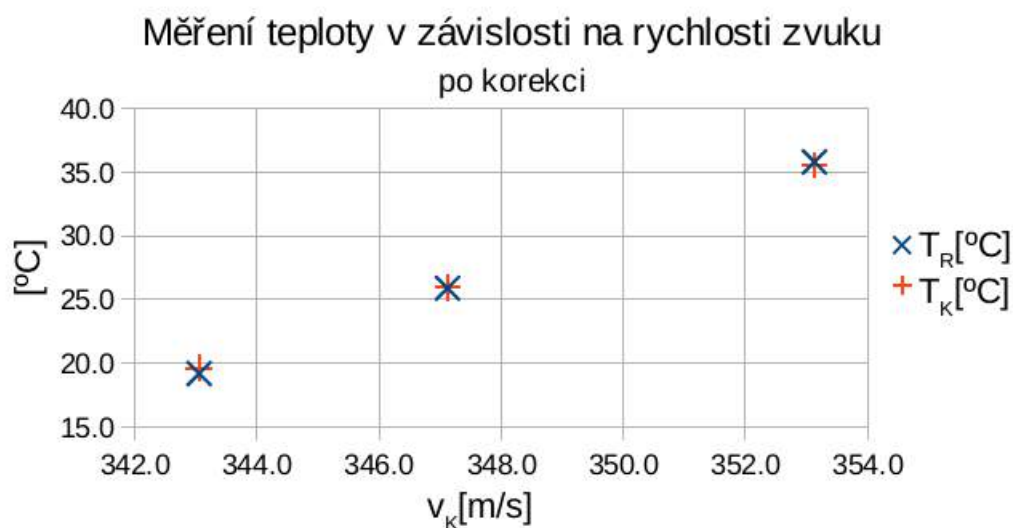
Výpočet korigované teploty T_K je ve výpočtu 7.18.

$$T_K = \frac{v_K - v_0}{K_T} = \frac{343.2 - 331.4}{0.607} = 19.5^\circ C \quad (7.18)$$

T_K korigovaná teplota na základě v_K [°C]

v_0 331.4 rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě 0° [m/s]

K_T 0.607 koeficient teplotní závislosti rychlosti zvuku [$\frac{m/s}{^\circ C}$]



Obr. 7.3: Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu - po korekci

Data v tabulce 7.3 jsem použil k nalezení korekčních koeficientů K a B . Data v tabulce 7.4 jsem použil k verifikaci získaných korekčních koeficientů.

Maximální absolutní chyba rychlosti zvuku po korekci je $\Delta v_K = 0.3 \text{ m/s}$ a relativní $\delta v_K = 0.1\%$.

V případě měření teploty je maximální absolutní chyba $\Delta T_K = 0.4^\circ\text{C}$ a relativní $\delta T_K = 2.2\%$.

Na obrázku 7.3 je zobrazen průběh referenční teploty T_R (modré body) a vypočítaná teplota T_K (jako oranžové body) na základě získané rychlosti zvuku ve vzduchu v_K .

7.3 Měření rychlosti a směru proudění

Měření rychlosti a směru probíhalo na Fakultě strojního inženýrství v laboratořích Leteckého ústavu pod odborným dozorem Ing. Onřeje Lajzy. Zde je po domluvě k dispozici malý výukový aerodynamický tunel Eiffelova typu s uzavřenou měřicí sekci. Slouží pro výuku, demonstrace a jednoduchá měření 2D modelů. Rozměry měřicí sekce: 100x300mm, délka 600mm. Maximální rychlost proudění v měřicí sekci je 35m/s, viz [28].

7.3.1 Použité přístroje

1. Výukový aerodynamický tunel Eiffelova typu - Letecký ústav FSI VUT
2. Dell Latitude 5420

3. Laboratorní zdroj BK 307
4. Prototyp ultrazvukového anemometru
5. Převodník USB< – >RS232 UCAB

7.3.2 Postup měření

1. Natočit prototyp na požadovaný směr a odečíst hodnotu.
2. Nastavit požadovanou rychlost proudění v aerodynamickém tunelu.
3. Provést sběr dat do PC pomocí PLX-DAQ.
4. Předchozí body opakovat pro všechny požadované rychlosti a směry.

7.3.3 Měření rychlosti proudění $|w_M|$

V tabulce 7.5 jsou naměřená data pro různé rychlosti proudění $|w_R|$.

$ w_R $	referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu, změřená z rozdílů tlaků [m/s]
v_M	naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru [m/s]
$ w_M $	naměřená rychlost proudění prototypem anemometru [m/s]
$ w_K $	korigovaná rychlost proudění prototypu anemometru [m/s]
Δw_M	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [m/s]
δw_M	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [%]
c_{JS}	celková rychlost šíření signálu z jihu na sever [m/s]
c_{SJ}	celková rychlost šíření signálu ze severu na jih [m/s]
c_{VZ}	celková rychlost šíření signálu z východu na západ [m/s]
c_{ZV}	celková rychlost šíření signálu ze západu na východ [m/s]
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění w_M [m/s]
w_Y	velikosti složky Y změřeného vektoru proudění w_M [m/s]
α_R	referenční velikost natočení anemometru v tunelu [°]

Příklad výpočtu pro třetí řádek tabulky 7.5. Nejprve jsem spočítal velikost jednotlivých složek vektoru proudění w_X (7.19) a w_Y (7.20).

$$w_X = \frac{c_{JS} - c_{SJ}}{2} = \frac{318.9 - 314.3}{2} = 2.3 \text{ m/s} \quad (7.19)$$

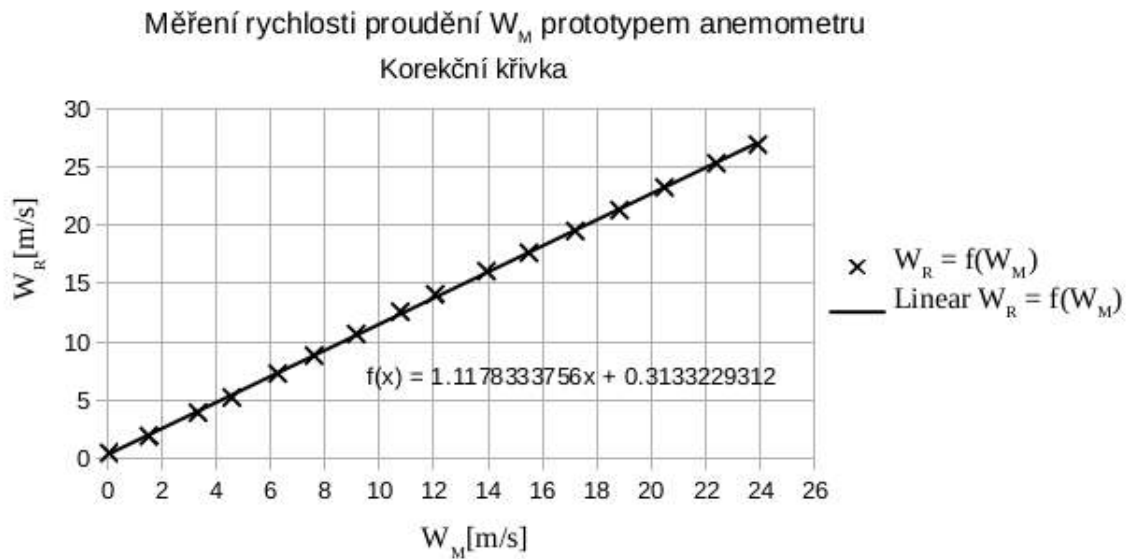
$$w_Y = \frac{c_{VZ} - c_{ZV}}{2} = \frac{321.5 - 316.7}{2} = 2.4 \text{ m/s} \quad (7.20)$$

A z takto vypočítaných složek jsem následně spočítal celkovou velikost měřeného vektoru w_M (7.21).

$$|w_M| = \sqrt{w_X^2 + w_Y^2} = \sqrt{2.3^2 + 2.4^2} = 3.3 \text{ m/s} \quad (7.21)$$

$ w_R [\text{m/s}]$	$\alpha_R[\text{o}]$	$c_{JS}[\text{m/s}]$	$c_{SJ}[\text{m/s}]$	$c_{VZ}[\text{m/s}]$	$c_{ZV}[\text{m/s}]$	$w_X[\text{m/s}]$	$w_Y[\text{m/s}]$	$v_M[\text{m/s}]$	$ w_M [\text{m/s}]$
0.5	45.0	318.3	318.4	318.7	318.8	-0.1	0.0	318.5	0.1
1.9	45.0	317.7	315.7	320.2	318.0	1.0	1.1	317.9	1.5
3.9	45.0	318.9	314.3	321.5	316.7	2.3	2.4	317.9	3.3
5.2	45.0	319.9	313.4	322.4	315.9	3.2	3.2	317.9	4.6
7.3	45.0	321.2	312.3	323.6	314.8	4.4	4.4	318.0	6.3
8.8	45.0	322.2	311.5	324.6	313.8	5.4	5.4	318.0	7.6
10.7	45.0	323.4	310.3	325.6	312.9	6.6	6.4	318.0	9.2
12.6	45.0	324.5	309.0	326.7	311.7	7.7	7.5	318.0	10.8
14.1	45.0	325.2	308.1	327.8	310.9	8.6	8.5	318.0	12.1
16.1	45.0	326.3	306.6	329.0	309.3	9.9	9.8	317.8	13.9
17.6	45.0	327.4	305.5	330.0	308.1	10.9	11.0	317.7	15.5
19.5	45.0	328.4	304.3	331.3	306.8	12.1	12.2	317.7	17.2
21.3	45.0	329.6	303.2	332.5	305.6	13.2	13.4	317.7	18.8
23.2	45.0	330.9	302.2	333.6	304.4	14.4	14.6	317.8	20.5
25.3	45.0	332.0	300.7	334.9	302.8	15.6	16.0	317.6	22.4
26.9	45.0	333.2	299.5	335.7	301.7	16.8	17.0	317.5	23.9

Tab. 7.5: Měření rychlosti proudění $|w_M|$



Obr. 7.4: Měření rychlosti proudění w_M v aerodynamickém tunelu

Výsledné rychlosti proudění $|w_M|$ jsou malinko nižší, než referenční velikost vektoru proudění $|w_R|$. Výsledná závislost mezi $|w_M|$ a $|w_R|$ je zobrazena na obrázku 7.4. Jednotlivé naměřené body této závislosti jsem proložil lineární regresní přímkou a její koeficienty použil jako korekční pro velikost vektoru proudění $|w_K|$, viz 7.22. Velikost této chyby je z velké části způsobena aerodynamickým stínem samotné konstrukce anemometru, vyskytuje se v celém rozsahu měření a jedná o systematickou chybu, kterou lze korekcí odstranit. Hrubý odhad vlivu konstrukce na proudění od pana Ing. Ondřeje Lajzy byl 15 %. Z velikosti multiplikativního koeficientu $K = 1.12$ regresní přímky lze odečíst výslednou chybu přibližně 12 %.

$$|w_K| = K \cdot |w_M| + B = 1.12 \cdot |w_M| + 0.31 \quad (7.22)$$

$|w_M|$ naměřená rychlost proudění prototypem anemometru [m/s]

$|w_K|$ korigovaná rychlost proudění prototypu anemometru [m/s]

K multiplikativní korekční koeficient [–]

B aditivní korekční koeficient [m/s]

$|w_R|$ referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu [m/s]

Δw_M absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [m/s]

δw_M relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [%]

Výsledné hodnoty korigované rychlosti proudění $|w_K|$ a chyby měření naměřené hodnoty $|w_M|$ a korigované hodnoty proudění $|w_K|$ jsou v tabulce 7.6.

$ w_R [\text{m/s}]$	$ w_M [\text{m/s}]$	$\Delta w_M[\text{m/s}]$	$\delta w_M[\%]$	$ w_K [\text{m/s}]$	$\Delta w_K[\text{m/s}]$	$\Delta w_K[\%]$
0.5	0.1	-0.4	-83.1	0.4	-0.1	-15.0
1.9	1.5	-0.4	-20.0	2.0	0.1	5.7
3.9	3.3	-0.6	-14.9	4.0	0.1	3.3
5.2	4.6	-0.6	-12.2	5.4	0.2	4.3
7.3	6.3	-1.0	-13.7	7.3	0.1	0.9
8.8	7.6	-1.2	-13.7	8.8	0.0	0.2
10.7	9.2	-1.5	-14.2	10.6	-0.1	-1.0
12.6	10.8	-1.8	-14.3	12.4	-0.2	-1.6
14.1	12.1	-2.0	-14.3	13.8	-0.3	-1.8
16.1	13.9	-2.1	-13.2	15.9	-0.1	-0.8
17.6	15.5	-2.1	-12.1	17.7	0.0	0.2
19.5	17.2	-2.3	-11.7	19.6	0.1	0.4
21.3	18.8	-2.4	-11.5	21.4	0.1	0.6
23.2	20.5	-2.7	-11.8	23.3	0.0	0.1
25.3	22.4	-2.9	-11.4	25.4	0.1	0.4
26.9	23.9	-3.0	-11.1	27.1	0.2	0.7

Tab. 7.6: Měření rychlosti proudění $|w_M|$ - výpočet korigované rychlosti $|w_K|$

Příklad výpočtu pro druhý řádek tabulky 7.6. Nejprve jsem spočítal absolutní Δw_M (7.23) a relativní δw_M (7.24) chybu mezi naměřenou hodnotou $|w_M|$ a referenční hodnotou $|w_K|$.

$$\Delta w_M = |w_M| - |w_R| = 1.5 - 1.9 = -0.4 m/s \quad (7.23)$$

$$\delta w_M = \frac{\Delta w_M}{|w_R|} \cdot 100 = \frac{-0.4}{1.9} \cdot 100 = -20.0\% \quad (7.24)$$

Δw_M	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [m/s]
δw_M	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [%]
$ w_M $	naměřená rychlost proudění prototypem anemometru [m/s]
$ w_R $	referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu [m/s]

Následně jsem vypočítal velikost korigované rychlosti proudění $|w_K|$ podle 7.25 a její absolutní Δw_K (7.26) a relativní δw_K (7.27) chybu.

$$w_K = K \cdot w_M + B = 1.12 \cdot 1.5 + 0.31 = 2.0 m/s \quad (7.25)$$

$$\Delta w_K = w_K - w_R = 2.0 - 1.9 = 0.1 m/s \quad (7.26)$$

$$\delta w_K = \frac{\Delta w_K}{w_R} \cdot 100 = \frac{0.1}{1.9} \cdot 100 = 5.7\% \quad (7.27)$$

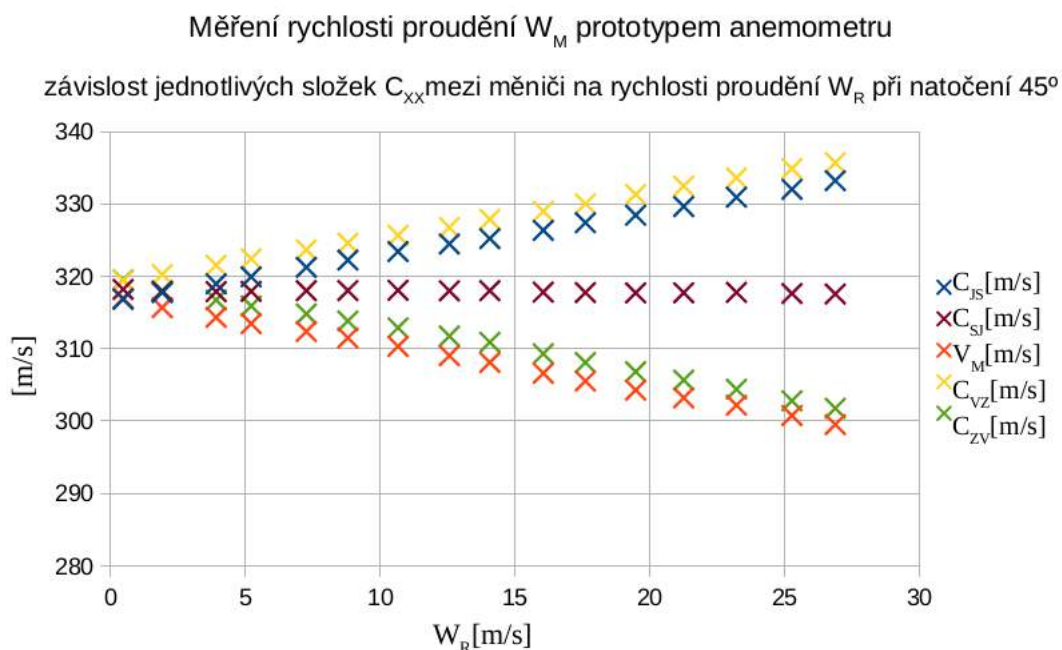
K	multiplikativní korekční koeficient [–]
B	aditivní korekční koeficient [m/s]
Δw_K	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_K [m/s]
δw_K	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_K [%]
$ w_K $	korigovaná rychlost proudění prototypu anemometru [m/s]
$ w_R $	referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu [m/s]

Na obrázku 7.5 je zachycena závislost jednotlivých složek proudění mezi měniči v závislosti na velikosti vektoru proudění $|w_R|$ při úhlu natočení 45° . Složka c_{JS} by se měla překrývat s c_{VZ} a složka c_{SJ} by se měla překrývat s c_{ZV} .

Obě dvojice jsou od sebe posunuty o stejnou velikost, která je způsobena nepřesným odečtem vzdálenosti mezi jednotlivými páry. Vzdálenost mezi měniči jsem změřil pomocí klasického metru a nepřesnost odečtu odhaduji na $\pm 1mm$, takže výsledný rozdíl chyby ve vzdálenosti by neměl přesáhnout $2mm$.

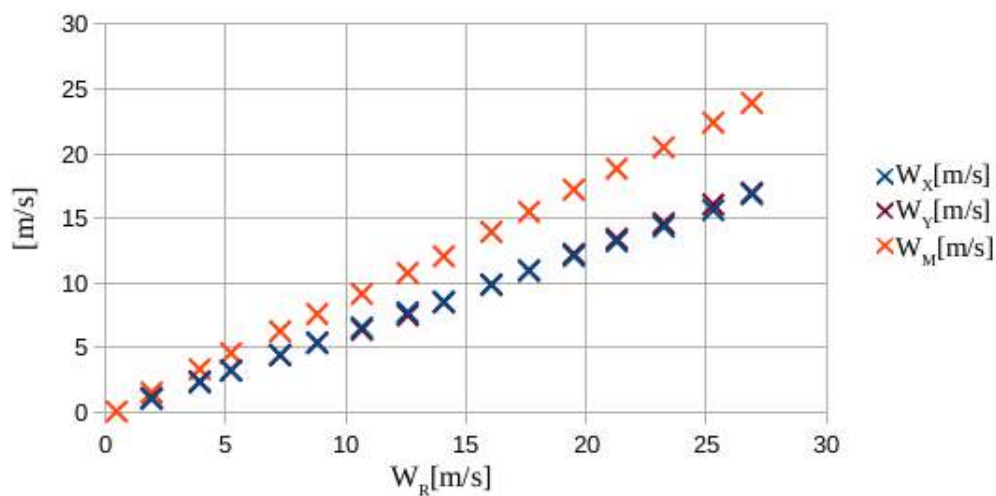
Pro všechny výpočty je použita stejná vzdálenost $s = 0.214m$. Rozdíl je přibližně $2m/s$ a to odpovídá rozdílu ve vzdálenosti $\Delta s = 1.35mm$. Důležité pro měření velikosti vektoru proudění w_M je, že rozdíl mezi jednotlivými páry zůstává stejný.

Rozdíl rychlostí mezi páry jsem přepočítal na složku w_X a w_Y , jejich vzájemný vztah při různých rychlostech je zobrazen na obrázku 7.6.



Obr. 7.5: Závislost jednotlivých složek na rychlosti proudění w_M

Měření rychlosti proudění W_M prototypem anemometru
 Závislost jednotlivých složek W_X a W_Y na rychlosti proudění W_R při natočení 45°



Obr. 7.6: Závislost složek w_X, w_Y a velikosti vektoru w_M na rychlosti proudění w_R

7.3.4 Měření směru proudění vektoru w_M

Dalším úkolem bylo změřit směrovou charakteristiku prototypu anemometru vůči směru proudění vektoru w_M . Naměřená data jsou v tabulce 7.7.

α_R	referenční velikost natočení anemometru v tunelu $[\circ]$
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění w_M $[m/s]$
w_Y	velikosti složky Y změřeného vektoru proudění w_M $[m/s]$
$ w_M $	naměřená rychlost proudění prototypem anemometru $[m/s]$
α_M	naměřená velikost natočení anemometru v tunelu $[\circ]$
$\Delta\alpha_M$	absolutní chyba naměřeného směru proudění $[\circ]$
$\delta\alpha_M$	relativní chyba naměřeného směru proudění $[\%]$

$\alpha_R[^\circ]$	$w_X[\text{m/s}]$	$w_Y[\text{m/s}]$	$ w_M [\text{m/s}]$	$\alpha_M[^\circ]$	$\Delta\alpha_M[^\circ]$	$\delta\alpha_M[\%]$
0.0	0.0	11.2	11.2	0.0	0.0	0.0
15.0	2.9	11.0	11.4	15.0	0.0	0.0
30.0	5.8	9.9	11.4	30.4	0.4	1.2
45.0	8.1	8.2	11.6	44.7	-0.3	-0.7
60.0	9.8	5.5	11.3	60.5	0.5	0.9
75.0	11.0	2.9	11.4	75.3	0.3	0.4
90.0	10.9	0.3	10.9	88.4	-1.6	-1.8
105.0	10.9	-2.6	11.2	103.2	-1.8	-1.7
120.0	9.6	-5.6	11.1	120.2	0.2	0.2
135.0	7.9	-8.2	11.4	136.2	1.2	0.9
150.0	5.5	-10.0	11.4	151.2	1.2	0.8
165.0	2.9	-11.0	11.4	165.1	0.1	0.1
185.0	-1.3	-11.5	11.6	186.2	1.2	0.7
195.0	-2.9	-11.1	11.5	194.7	-0.3	-0.2
210.0	-5.8	-10.0	11.6	210.2	0.2	0.1
225.0	-8.2	-8.3	11.7	224.8	-0.2	-0.1
240.0	-9.9	-5.6	11.4	240.7	0.7	0.3
255.0	-11.2	-3.1	11.6	254.7	-0.3	-0.1
270.0	-10.8	-0.3	10.8	268.3	-1.7	-0.6
285.0	-10.9	2.5	11.1	282.7	-2.3	-0.8
300.0	-9.8	5.3	11.2	298.5	-1.5	-0.5
315.0	-8.2	8.0	11.5	314.3	-0.7	-0.2
330.0	-5.7	9.8	11.4	329.7	-0.3	-0.1
345.0	-2.8	11.0	11.4	345.8	0.8	0.2
360.0	-0.1	11.1	11.1	359.7	-0.3	-0.1

Tab. 7.7: Měření úhlu natočení anemometru

Příklad výpočtu pro třetí řádek tabulky 7.7. Nejprve jsem spočítal velikost složek w_X, w_Y a velikost vektoru w_M . Postup byl stejný jako v 7.19 až 7.21. Výsledky jsou $w_X = 5.8m/s$, $w_Y = 9.9m/s$ a $|w_M| = 11.4m/s$.

Na základě těchto hodnot jsem dále spočítal výsledný úhel natočení α_M . Nejprve bylo nutné určit kvadrant, ve kterém se vektor nachází na základě znamének složek w_X a w_Y . Podle kvadrantu se pak použije vztah z tabulky 7.1 pro výpočet směru proudění α_M .

V tomto případě se jedná o první kvadrant a výpočet je určen vztahem 7.28.

$$\alpha_M = \arcsin\left(\frac{w_X}{|w_M|}\right) = \arcsin\left(\frac{5.8}{11.4}\right) = 30.4^\circ \quad (7.28)$$

$$\Delta\alpha_M = \alpha_M - \alpha_R = 30.4 - 30.0 = 0.4^\circ \quad (7.29)$$

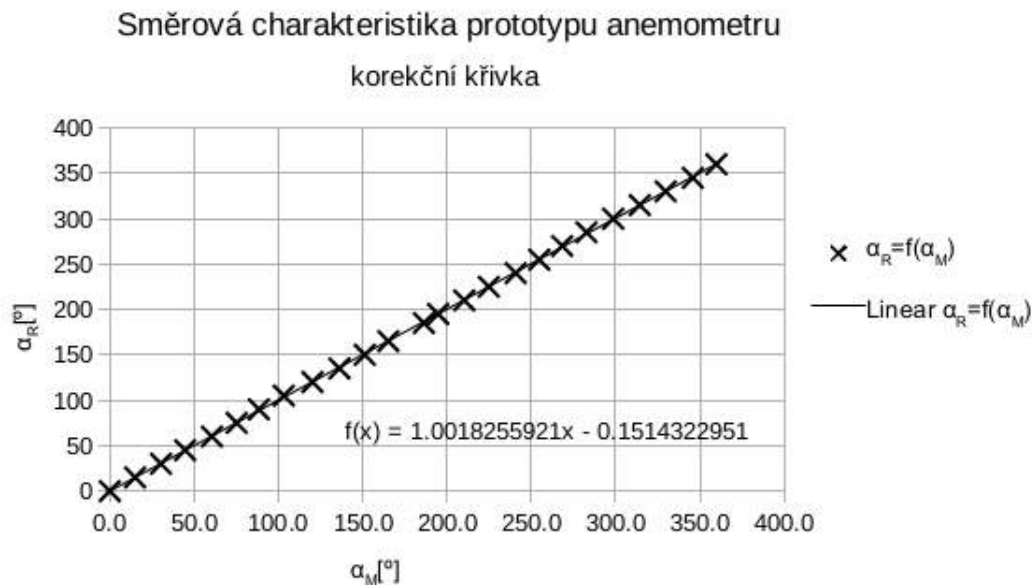
$$\delta\alpha_M = \frac{\Delta\alpha_M}{\alpha_R} \cdot 100 = \frac{0.4}{30} \cdot 100 = 1.2\% \quad (7.30)$$

w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění w_M [m/s]
$ w_M $	naměřená rychlost proudění prototypem anemometru [m/s]
α_M	naměřená velikost natočení anemometru v tunelu [°]
$\Delta\alpha_M$	absolutní chyba naměřeného směru proudění [°]
$\delta\alpha_M$	relativní chyba naměřeného směru proudění [%]

Závislost α_M na α_R je vynesena v grafu na obrázku 7.7. Rovnice regresní přímky je vyjádřena vztahem 7.31. Multiplikativní koeficient K je roven 1 a aditivní koeficient B je roven -0.15° . Měření směru proudění je dostatečně přesné i bez použití korekce.

$$\alpha_K = K \cdot \alpha_M + B = 1.00 \cdot \alpha_M - 0.15 \quad (7.31)$$

K	multiplikativní korekční koeficient [–]
B	aditivní korekční koeficient [°]
α_M	korigovaná velikost natočení anemometru v tunelu [°]



Obr. 7.7: Korekční křivka směru natočení α_M

V tabulce 7.8 jsou spočítány výsledné chyby velikosti vektoru w_K v závislosti na směru proudění α_R . Postup výpočtů je stejný jako v 7.26 a 7.27. Rozdíl mezi referenční w_R a korigovanou w_K rychlostí proudění v závislosti na natočení je vyneseno do grafu na obrázku 7.9. Největší chyba je okolo 90° a 270° , tedy v bodě, kde proudění ovlivňuje pouze jednu osu měření a je nejvíce zatíženo chybou způsobenou aerodynamickými vlastnostmi konstrukce. Větší chyba je také podle očekávání v okolí 0° nebo 90° .

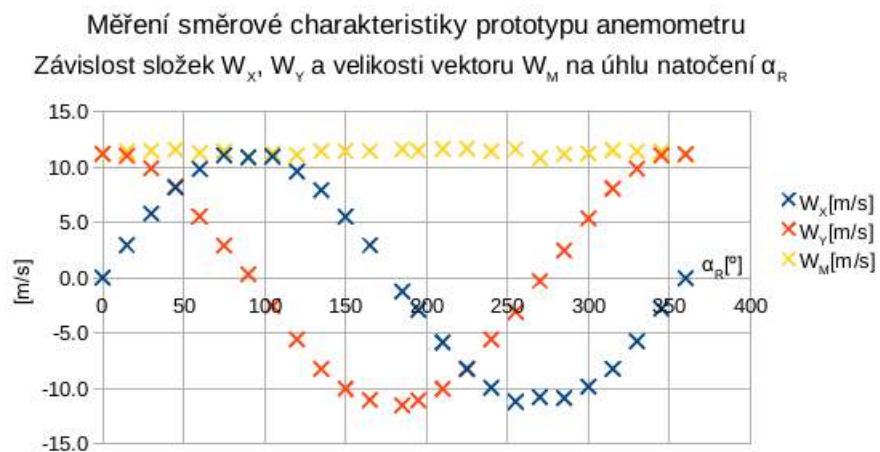
Z důvodu rozměrových limitů v tunelu nebylo možné změřit velikost chyby při natočení 180° , kde by měl být další vrchol. Maximální chyba velikosti vektoru δw_K je -5.3% při natočení $\alpha_R = 270^\circ$. Korekci na velikosti vektoru w_K v závislosti na natočení jsem neudělal z důvodu malého množství dat v okolí $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ a 270° . Jejich okolí přibližně $\pm 15^\circ$ je nutné proměřit s menším krokem než 15° , doporučuji krok alespoň 2° .

Na obrázku 7.8 jsou zachyceny závislosti složek w_X a w_Y na směru proudění. Podle očekávání je průběh velikosti složky w_X podobný průběhu funkce $\sin$ a průběh velikosti složky w_Y je podobný průběhu funkce $\cos$.

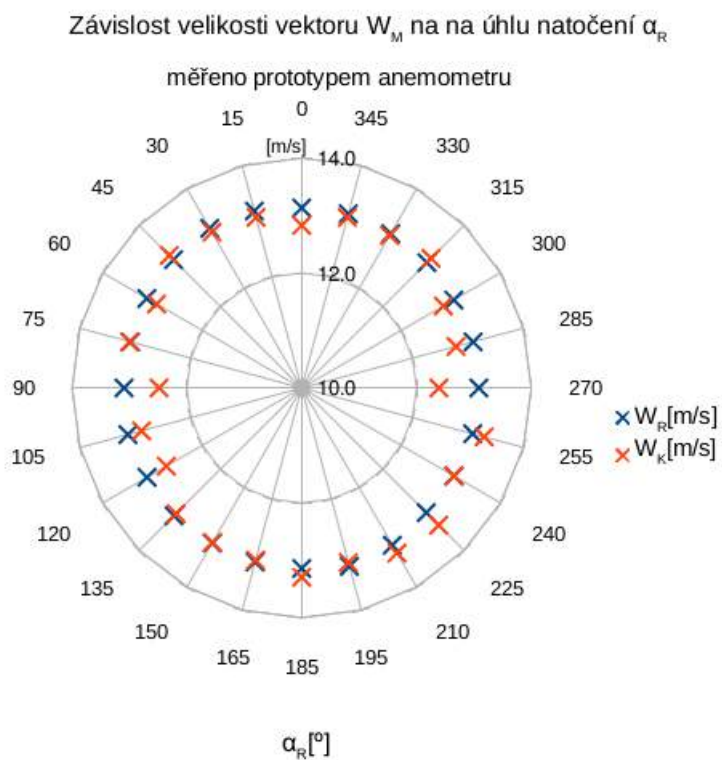
$\alpha_R[^\circ]$	$ w_R [\text{m/s}]$	$ w_K [\text{m/s}]$	$\Delta w_K[\text{m/s}]$	$\Delta w_K[\%]$
0	13.1	12.8	-0.3	-2.3
15	13.2	13.1	-0.1	-0.9
30	13.2	13.1	-0.1	-0.6
45	13.2	13.3	0.1	0.8
60	13.1	12.9	-0.2	-1.5
75	13.1	13.1	0.0	0.1
90	13.1	12.5	-0.6	-4.7
105	13.1	12.9	-0.2	-1.9
120	13.1	12.7	-0.4	-3.0
135	13.1	13.1	-0.1	-0.4
150	13.1	13.1	0.0	-0.1
165	13.1	13.1	0.0	-0.3
185	13.1	13.3	0.2	1.2
195	13.2	13.1	-0.1	-0.5
210	13.2	13.3	0.2	1.2
225	13.1	13.4	0.3	2.3
240	13.1	13.1	0.0	0.1
255	13.1	13.3	0.2	1.6
270	13.1	12.4	-0.7	-5.3
285	13.1	12.8	-0.3	-2.3
300	13.1	12.9	-0.2	-1.6
315	13.1	13.2	0.1	0.8
330	13.1	13.1	0.0	-0.3
345	13.1	13.1	-0.1	-0.5
360	13.1	12.8	-0.3	-2.7

Tab. 7.8: Měření úhlu natočení anemometru - chyba velikosti vektoru Wk

α_R	referenční velikost natočení anemometru v tunelu, odečtená ze stupnice na podstavci $[\circ]$
$ w_R $	referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu $[m/s]$
$ w_K $	korigovaná rychlost proudění prototypu anemometru $[m/s]$
Δw_K	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_K $[m/s]$
δw_K	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_K $[\%]$



Obr. 7.8: Závislost složek w_x, w_y a velikosti vektoru w_M na směru natočení α_R



Obr. 7.9: Závislost velikosti vektoru w_K na úhlu natočení α_r

7.3.5 Verifikace korekčních koeficientů

Pro ověření přesnosti prototypu ultrazvukového anemometru bylo naměřeno pár náhodně vybraných rychlostí při náhodném natočení. Naměřená data jsou v tabulce 7.9. Výsledné rychlosti a směry proudění, včetně chyb měření, jsou v tabulce 7.10.

Maximální relativní chyba měření rychlosti proudění δw_K je -1.7% , porovnání s referenčními hodnotami je vyneseno do grafu na obrázku 7.10. Maximální relativní chyba měření směru proudění $\delta\alpha_M$ je -1.7% , porovnání s referenčními hodnotami je vyneseno do grafu na obrázku 7.11.

$ w_R [\text{m/s}]$	$\alpha_R[^\circ]$	$w_X[\text{m/s}]$	$w_Y[\text{m/s}]$	$ w_M [\text{m/s}]$	$\alpha_M[^\circ]$
14.9	25.0	5.3	11.6	12.8	24.6
12.1	147.0	5.3	-8.9	10.4	149.1
23.8	308.0	-16.4	12.8	20.8	307.8
21.5	200.0	-6.5	-17.7	18.8	200.2
11.8	52.0	8.1	6.3	10.3	52.2

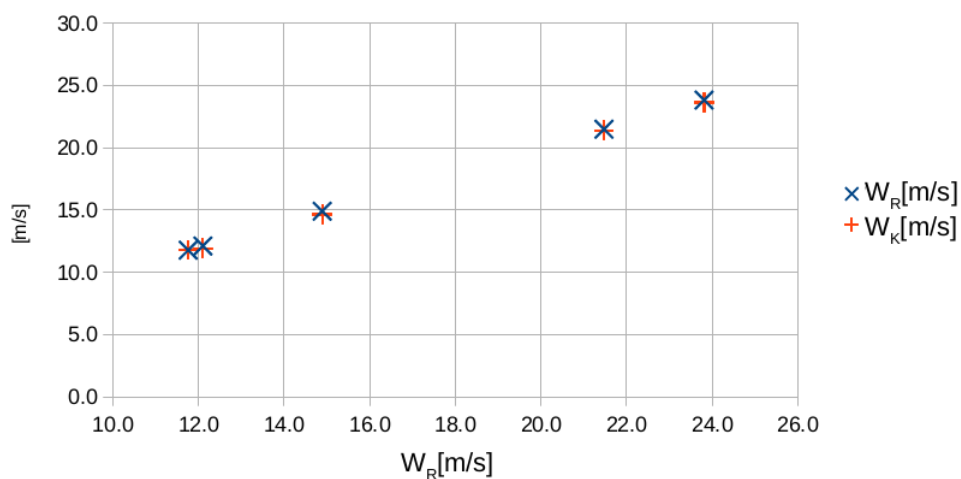
Tab. 7.9: Verifikace - naměřená a vypočítaná data

$ w_R $	referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu $[\text{m/s}]$
α_R	referenční velikost natočení anemometru v tunelu $[^\circ]$
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění $\vec{w}_M$ $[\text{m/s}]$
w_Y	velikosti složky Y změřeného vektoru proudění $\vec{w}_M$ $[\text{m/s}]$
$ w_M $	naměřená rychlost proudění prototypem anemometru $[\text{m/s}]$
$ w_K $	korigovaná rychlost proudění prototypu anemometru $[\text{m/s}]$
Δw_K	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_K $[\text{m/s}]$
δw_K	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_K $[\%]$
α_M	naměřená velikost natočení anemometru v tunelu $[^\circ]$
$\Delta\alpha_M$	absolutní chyba naměřeného směru proudění $[^\circ]$
$\delta\alpha_M$	relativní chyba naměřeného směru proudění $[\%]$

$ w_R [\text{m/s}]$	$ w_K [\text{m/s}]$	$\Delta w_K[\text{m/s}]$	$\delta w_K[\%]$	$\alpha_R[^\circ]$	$\alpha_M[^\circ]$	$\Delta \alpha_M[\text{m/s}]$	$\Delta \alpha_M[\%]$
14.9	14.6	-0.2	-1.7	25.0	24.6	-0.4	-1.7
12.1	11.9	-0.2	-1.6	147.0	149.1	2.1	1.4
23.8	23.6	-0.2	-0.8	308.0	307.8	-0.2	-0.1
21.5	21.4	-0.1	-0.4	200.0	200.2	0.2	0.1
11.8	11.8	0.0	0.3	52.0	52.2	0.2	0.4

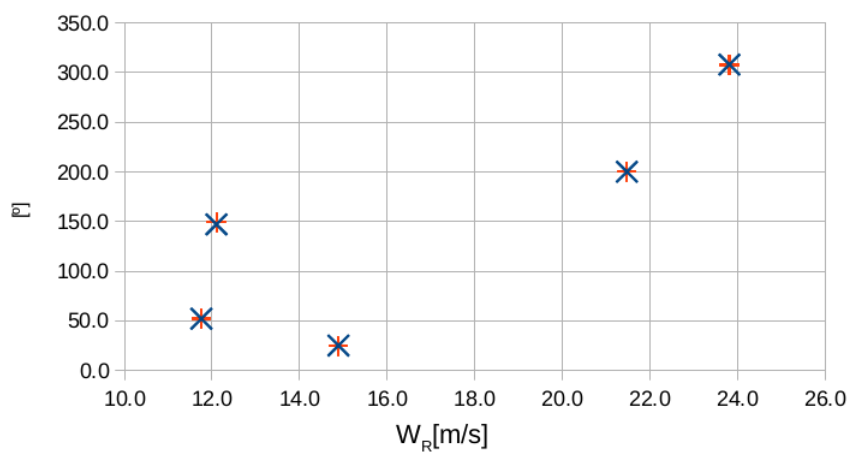
Tab. 7.10: Verifikace - výpočet chyb měření

Verifikace korigované rychlosti proudění w_K



Obr. 7.10: Verifikace korigované rychlosti proudění $|w_K|$

Verifikace měřeného směru natočení α_M



Obr. 7.11: Verifikace směru natočení α_M

7.4 Porovnání metod

Metodu měření doby letu signálu Metodu měření doby letu signálu se mi podařilo jako jedinou řádně ověřit.

Měření teploty na základě rychlosti zvuku ve vzduchu po korekci mělo maximální chybu $\delta T_K = \pm 2.2\%$.

Měření rychlosti a směru proudění metodou doby letu signálu dosáhlo maximálních chyb $\delta w_K = \pm 1.7\%$ a $\delta \alpha_K = \pm 1.7\%$.

Metoda opakovací frekvence Metodu opakovací frekvence se mi nepodařilo ověřit. Problém nebyl v konstrukci nebo programovém řešení, ale akustické přeslechy v malých prostorách měřicí komory a tunelu. Obložení vnitřku CTS molitanem a jinými různými tlumícími prvky nepomohlo. V aerodynamickém tunelu tato možnost vůbec nebyla. Metoda měření doby letu nevyžaduje opakované vysílání pulsů za sebou. Pro ověření v malých prostorách byla snížena vzorkovací frekvence tak, aby mezi jednotlivými měřeními vždy stihly odeznít předchozí odrazy.

Metoda měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi f_A a f_B Metodu měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi f_A a f_B se podařilo ověřit pouze v rámci experimentu provedeného v laboratoři UAMT a pouze na měření rychlosti zvuku ve vzduchu v . Měření rychlosti proudění w navrženým hardwarem je sice možné, ale naměřené hodnoty jsou velice náhodné a nedpovídají očekávání. Důvodem bude především rozptyl naměřených časů, který je přibližně $\pm 1 \mu s$. Což například při očekávané rychlosti zvuku ve vzduchu $v = 345 m/s$, způsobí chybu až $20 m/s$ na frekvencích $f_A = 40 kHz$ a $f_B = 41 kHz$. Problém je také ve způsobu buzení pomocí spínání obdeníkovými pulsy, které spínají transformátory a ty budí piezoměniče. Každý prvek tohoto budícího obvodu má jinou frekvenční charakteristiku, což způsobuje další chybu do měření. Dalším problémem také je, že je potřeba měřit na dvou frekvencích, což znamená vysílat ve dvou různých časech a mezitím se může rychlost proudění změnit. Metoda měření fázového posunu mezi dvěma frekvencemi f_A a f_B je vhodná pouze jako zajímavá laboratorní úloha, kde se dá dosáhnout rozumných výsledků při použití sinusového buzení a čítače na měření fázového posunu. Měření rychlosti proudění by vyžadovalo kvalitnější hardware s možností sinusového buzení a přesného čítače.

8 ZHODNOCENÍ A DOPORUČENÍ

V této diplomové práci jsem se zabýval návrhem a realizací prototypu ultrazvukového anemometru.

Důležitou součástí práce bylo prověření jednotlivých metod měření rychlosti proudění. Metoda měření fázového posunu *FAZE* mezi dvěma vysílacími frekvencemi f_A a f_B se ukázala použitelná pouze jako laboratorní pro měření rychlosti zvuku ve vzduchu v .

Metoda opakovací frekvence *FOPAK* je nepoužitelná v malých uzavřených prostorech, kde jsem prováděl veškerá měření a testování. Aerodynamický tunel nebo tepelná komora větších rozměrů bohužel nebyly k dispozici.

Metoda doby letu signálu *TOF* se ukázala jako nejrobustnější. Je použitelná v libovolných prostorech a dosahuje dostatečné přesnosti.

V průběhu práce jsem vyzkoušel různé druhy zapojení tak, abych dosáhl co nejpřesnějšího naměřeného výsledku. Dlouhou dobu jsem se potýkal s velkým šumem před detekcí vysílaného signálu. Pro detekci správného echa jsem použil kvalitní detektor obálky a zvýšil hodnotu rozhodovací úrovně na vstupu komparátoru, který generuje logický signál pro mikropočítač. Toto řešení zvýšilo odolnosti vůči šumu, ale zaneslo zpoždění do naměřeného času. Velikost tohoto zpoždění je konstantní pro všechny směry měření a při vyhodnocování pomocí časové difference nezpůsobuje chybu v měření.

Na základě tohoto poznatku by použití levnějších a pomalejších operačních zesilovačů v detektoru obálky nemělo způsobit chybu při měření rychlosti proudění w . Doporučuji nejprve prakticky vyzkoušet.

Finální verzi ultrazvukového anemometru není nutné osazovat detektorem průchodu nulou, který je potřebný pro měření fázového posunu.

Největší problémy během řešení diplomové práce způsobovala mechanická konstrukce. Tento fakt jsem náhodou při měření v tepelné komoře CTS, kde prototyp anemometru při nižších teplotách přestával naprosto fungovat. Připojením osciloskopu jsem zjistil veliký šum na vstupu bloku zesilovače. Jednotlivá ramena jsem oddělil přes gumové podložky, šum se výrazně zmenšil a bylo tedy možné i pořádně zesílit vstupní signál a zmenšit chybu časového zpoždění.

Pro návrh finální konstrukce doporučuji oddělit jednotlivá ramena tlumicími prvky. Na vyrobeném prototypu jsem měniče do pouzder přilepil vteřinovým lepidlem, které vytvořilo velice pevnou vazbu. Uchycení měničů pomocí silikonu nebo jiného pružnějšího materiálu by mělo přenos mechanických kmitů po konstrukci také omezit.

9 ZÁVĚR

V teoretické části této diplomové práce jsem rozebral jednotlivé způsoby měření rychlosti a směru větru. Dále jsem porovnal různá komerční provedení ultrazvukových anemometrů jak z hlediska konstrukce, tak i principu.

Rychlost šíření signálu vzduchem je ovlivněna atmosférickým tlakem, vlhkostí vzduchu a zejména teplotou. Měřením difference časů oběma směry lze tyto vlivy úspěšně eliminovat.

Na základě konzultace se zadávající firmou FIEDLER-MÁGR jsem zvolil čtyřramenné konstrukční provedení. Díky měření ve dvou osách jsem mohl otestovat i měření směru proudění. Toto řešení je dobrým základem pro případný 3D ultrazvukový anemometr, na který firma také dostává poptávky.

Pro zvolené konstrukční provedení jsem navrhl řídicí jednotku tak, abych mohl porovnat různé metody měření rychlosti větru ultrazvukem. Navržená koncepce prototypu řídicí desky umožňuje snadné rozšíření o případnou třetí měřicí osu.

V rámci této diplomové práce jsem vyrobil prototyp mechanické konstrukce. Samotný plošný spoj jsem si nechal vyrobil externí firmou. Osazení a oživení celé desky jsem provedl sám.

Poslední a nejzajímavější součástí této práce bylo experimentální ověření funkčnosti prototypu ultrazvukového anemometru. S maximální chybou měření směru proudění $\Delta\alpha_M = \pm 2.3^\circ$ a maximální chybou měření rychlosti proudění $\Delta w_K = \pm 0.1 \text{ m/s}$ při natočení $\alpha_R = 45^\circ$ je naprosto srovnatelný s komerčními ultrazvukovými anemometry. Největší chyba rychlosti proudění se vyskytuje při natočení $\alpha_R = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$, kde je měření nejvíce ovlivněno tvarem konstrukce. V okolí těchto bodů chyba měření rychlosti proudění Δw_K dosahuje hodnoty až $\pm 0.7 \text{ m/s}$, což odpovídá $\delta w_K = \pm 5.3\%$. Porovnané komerční ultrazvukové anemometry dosahují maximální chyby rychlosti proudění $\delta w_K = \pm 5\%$.

Vyrobený prototyp zatím neprovádí korekci velikosti rychlosti proudění na základě směru proudění. Proměřením více bodů směrové charakteristiky lze tuto chybu zmenšit.

LITERATURA

- [1] *ZEHNULA, K.*: Snímače neelektrických veličin. Druhé upravené vydání, Praha: SNTL, 1983.
- [2] *ĎAĎO, S., KREIDL, M.* Senzory a měřicí obvody, ČVUT Praha 1999
- [3] *OBRAZ, Jaroslav.*: Ultrazvuk v měřicí technice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976.
- [4] *BENEŠ, Petr, Zdeněk HAVRÁNEK, Tomáš KOPECKÝ a Miroslav KRUPA.*: Měření fyzikálních veličin: návody do laboratorních cvičení [online]. Brno, 2011 [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: IS VUT. Elektronická skripta. FEKT Vysoké učení technické v Brně.
- [5] *HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER.* Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [6] MSNV Návod pro pracoviště - Ultrazvukový snímač, 2012
- [7] MSNV Návod pro pracoviště - Měření průtoku, 2012
- [8] *ZHOU, Yufeng, Yan WANG, Peter JOHANSSON a Per ÄNGSKOG.* To Measure Wind Speed using the theory of One-dimensional Ultrasonic Anemometer. 2011
- [9] 400EP125: Datasheet online. [online]. [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1830388.pdf>
- [10] 400EP18A: Datasheet online. [online]. [cit. 2015-01-02]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/524508.pdf>
- [11] HT200F12H2: Datasheet, dostupné na vyžádání u Chengdu Huitong West-electronic Co., Ltd
- [12] <http://www.fiedler-magr.cz/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/rychlost-smer-vetru/anemometr-w1>
- [13] Gill Instruments: environmental & industrial monitoring solutions [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://gillinstruments.com/>
- [14] Young Company [online]. 2008 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.youngusa.com/>
- [15] Vaisala [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.vaisala.com/en/Pages/default.aspx>

- [16] Enercorp Instruments Ltd [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.enercorp.com/>
- [17] Amalgamated Instrument Co Pty Ltd: Instrumentation and Sensors for Industry and Laboratory [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.aicpl.com.au/index.shtml>
- [18] Thies Clima: The complete Program for Meteorology and Environmental measurement technology [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.thiesclima.com/ind1e.html>
- [19] Ekotechnika spol. s r.o. [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.ekotechnika.cz/>
- [20] FIEDLER AMS s.r.o.: ELEKTRONIKA PRO EKOLOGII [online]. 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: <http://www.fiedler-magr.cz/>
- [21] VOJÁČEK, Antonín. Teplotní průtokoměry – termoanemometry. [online]. 2006 [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006082301>»<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006082301>
- [22] MAT NAWI, Mohd Norzaidi. Hot Wire Anemometer: (Part 3: Probes). [online]. [cit. 2015-04-08]. Dostupné z: <http://goo.gl/VdjPmU>><http://goo.gl/VdjPmU>
- [23] Mobile and Wireless Computing: Sensors Survey. CITS4419 Mobile and Wireless Computing [online]. 2014 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://undergraduate.csse.uwa.edu.au/units/CITS4419/lectures/wk2.submissions/leix03/Wind%20Speed%20Sensor.pdf>
- [24] 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..
- [25] Wind Speed and Direction (Ultrasonic Anemometer 2D). Weather Station[online]. 2004 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://trekker.customer.netSPACE.net.au/wind.htm>
- [26] Ultrasonic Anemometer (Wind speed and direction) [online]. 2015. [cit. 2015-05-11]. Dostupné z: <http://www.technik.dhbw-ravensburg.de/lau/ultrasonic-anemometer.html>

- [27] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice. 3. vyd. Praha: BEN, 1996, 467 s. ISBN 80-901984-3-0.
- [28] Letecký ústav: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně [online]. 2015. [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: <http://lu.fme.vutbr.cz/aerodynamika.php?full=vv>

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α	koeficient roztažnosti $3.661 \cdot 10^{-3} [^{\circ}C^{-1}]$
p_0	atmosférický tlak při $0^{\circ}C [Pa]$
ρ_0	hustota vzduchu při $0^{\circ}C [kg/m^3]$
κ	adibaitický index 1.402
v_T	rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě $T [m/s]$
v_0	331.4 rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě $0^{\circ} [m/s]$
K_T	0.607 koeficient teplotní závislosti rychlosti zvuku $[\frac{m/s}{^{\circ}C}]$
T	teplota vzduchu $[^{\circ}C]$
c	celková rychlost šíření signálu(zvuku) $[m/s]$
v	rychlost šíření zvuku ve vzduchu $[m/s]$
w	rychlost větru $[m/s]$
s	vzdálenost mezi měniči $[m]$
t_1	doba letu signálu jedním směrem $[s]$
t_2	doba letu signálu druhým směrem $[s]$
f_O	opakovací frekvence $[Hz]$
τ_u	zpoždění ultrazvukového impulsu v krycích a vazebních vrstvách $[s]$
τ_e	zpoždění v elektronických obvodech $[s]$
f	vysílací frekvence piezo měniče $[kHz]$
Δs	vzdálenost mezi přijímacími měniči $[m]$
φ_1	fázový posun na prvním přijímacím piezo měniči $[rad]$
φ_2	fázový posun na druhém přijímacím piezo měniči $[rad]$
f_A	první vysílací frekvence piezo měniče $[kHz]$

f_B	druhá vysílací frekvence piezo měniče [kHz]
s	vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem [m]
φ_A	fázový posun na první frekvenci f_A [rad]
φ_B	fázový posun na druhé frekvenci f_B [rad]
$\Delta\varphi_{Vf}$	chyba fázového posunu výsílacího piezo měniče mezi vstupním napětím a výstupními mechanickými kmity na frekvenci f [rad]
$\Delta\varphi_{Pf}$	chyba fázového posunu přijímacího piezo měniče mezi vstupními mechanickými kmity a výstupními napětím na frekvenci f [rad]
$\Delta\varphi_{Ff}$	chyba fázového posunu na filtru při frekvenci f [rad]
$\Delta\varphi_{SK}$	chyba fázového posunu způsobená umístěním krystalu uvnitř pouzdra o určitou neznámou vzdálenost [rad]
$\Delta\varphi_{SP}$	chyba fázového posunu způsobená nepřesným odečtem vzdálenosti mezi pouzdry [rad]
$\Delta\varphi_{Cf}$	chyba fázového posunu způsobená nepřesným odečtem fázového posunu z čítače při frekvenci f , i přes zapnuté průměrování se hodnota mění o cca $\pm 1^\circ$ [rad]
$\Delta\varphi_O$	chyba fázového posunu způsobená ostatními vlivy tlak, vlhkost a chyba vyhodnocovací elektroniky [rad]
φ_{TA}	teoretická hodnota fázového posunu při frekvenci f_A [rad]
φ_{TB}	teoretická hodnota fázového posunu při frekvenci f_B [rad]
x	změřená vzdálenost pomocí posuvného měřítka Magg [mm]
φ_M	změřený fázový posun pomocí Agilent/HP 53132A [rad]
φ_T	teoretická hodnota fázového posunu [rad]
v_R	referenční rychlost zvuku ve vzduchu 346.13 m/s
$\Delta\varphi_M$	absolutní chyba fázového posunu [rad]
φ_K	korekce fázového posunu mezi frekvencemi Δf [rad]
Δf	rozdíl použitých frekvencí při buzení [kHz]
$\overline{\varphi_{K\Delta f}}$	průměrná korekce fázového posunu mezi frekvencemi Δf [rad]

$\bar{c}$	průměrná hodnota naměřené rychlosti zvuku [m/s]
Δ_c	absolutní chyba naměřené rychlosti zvuku [m/s]
δ_c	relativní chyba naměřené rychlosti zvuku [%]
c_{JS}	celková rychlost šíření signálu z jihu na sever [m/s]
c_{SJ}	celková rychlost šíření signálu ze severu na jih [m/s]
c_{VZ}	celková rychlost šíření signálu z východu na západ [m/s]
c_{ZV}	celková rychlost šíření signálu ze západu na východ [m/s]
w_X	velikosti složky X změřeného vektoru proudění $\vec{w}_M$ [m/s]
w_Y	velikosti složky Y změřeného vektoru proudění $\vec{w}_M$ [m/s]
$ w_M $	změřená velikost vektoru proudění $\vec{w}_M$ [m/s]
T_R	referenční teplota změřená pomocí GHM 3230 [°C]
v_R	referenční rychlost zvuku ve vzduchu vypočtená z T_R [m/s]
v_M	naměřená rychlost zvuku ve vzduchu prototypem anemometru [m/s]
Δv_M	absolutní chyba naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M [m/s]
δv_M	relativní chyba naměřené rychlosti zvuku ve vzduchu v_M [%]
T_M	vypočtená teplota na základě v_M [°C]
ΔT_M	absolutní chyba vypočtené teploty T_M [°C]
δT_M	relativní chyba vypočtené teploty T_M [%]
v_K	korigovaná rychlost šíření zvuku ve vzduchu při teplotě [m/s]
K	multiplikativní korekční koeficient [–]
B	aditivní korekční koeficient [m/s],[°]
Δv_K	absolutní chyba korigované rychlosti zvuku ve vzduchu v_K [m/s]
δv_K	relativní chyba korigované rychlosti zvuku ve vzduchu v_K [%]
ΔT_K	absolutní chyba korigované teploty T_K [°C]

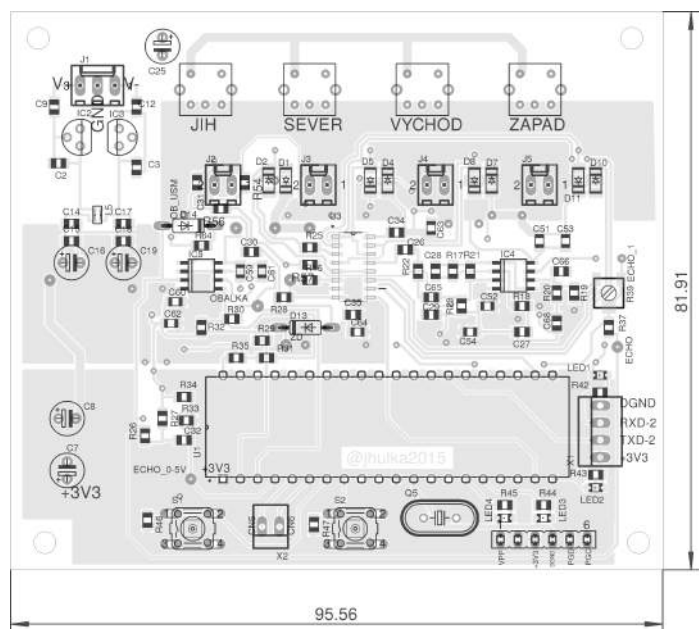
δT_K	relativní chyba korigované teploty T_K [%]
$ w_R $	referenční rychlost proudění v aerodynamickém tunelu [m/s]
$ w_M $	naměřená rychlost proudění prototypem anemometru [m/s]
$ w_K $	korigovaná rychlost proudění prototypu anemometru [m/s]
Δw_M	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [m/s]
δw_M	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_M [%]
α_R	referenční velikost natočení anemometru v tunelu [°]
Δw_K	absolutní chyba naměřené rychlosti proudění w_K [m/s]
δw_K	relativní chyba naměřené rychlosti proudění w_K [%]
α_M	naměřená velikost natočení anemometru v tunelu [°]
$\Delta \alpha_M$	absolutní chyba naměřeného směru proudění [°]
$\delta \alpha_M$	relativní chyba naměřeného směru proudění [%]

SEZNAM PŘÍLOH

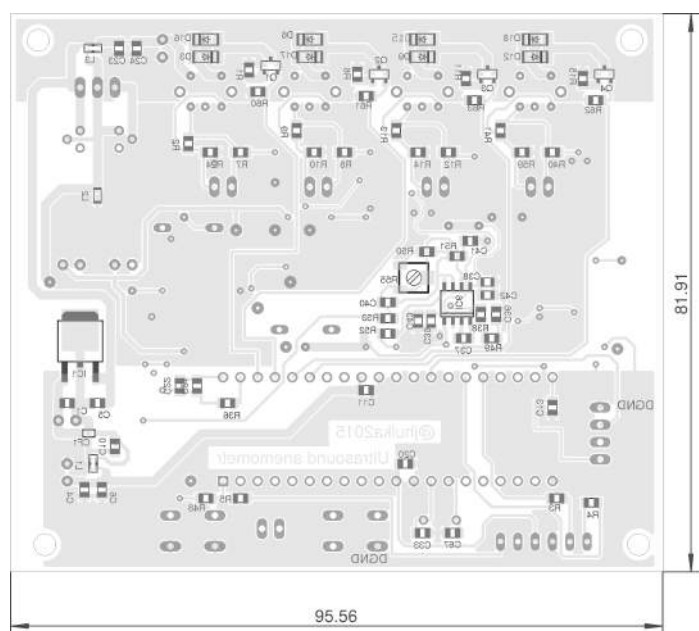
A	Výrobní poklady pro demo desku	87
A.1	Osazovací výkres-vrchní strana	87
A.2	Osazovací výkres-dolní strana	87
A.3	Schéma zapojení	87
B	Výrobní poklady pro prototypu desky	90
B.1	Osazovací výkres-vrchní strana	90
B.2	Osazovací výkres-dolní strana	90
B.3	Schéma zapojení	90
C	Obsah přiloženého CD	93

A VÝROBNÍ POKLADY PRO DEMO DESKU

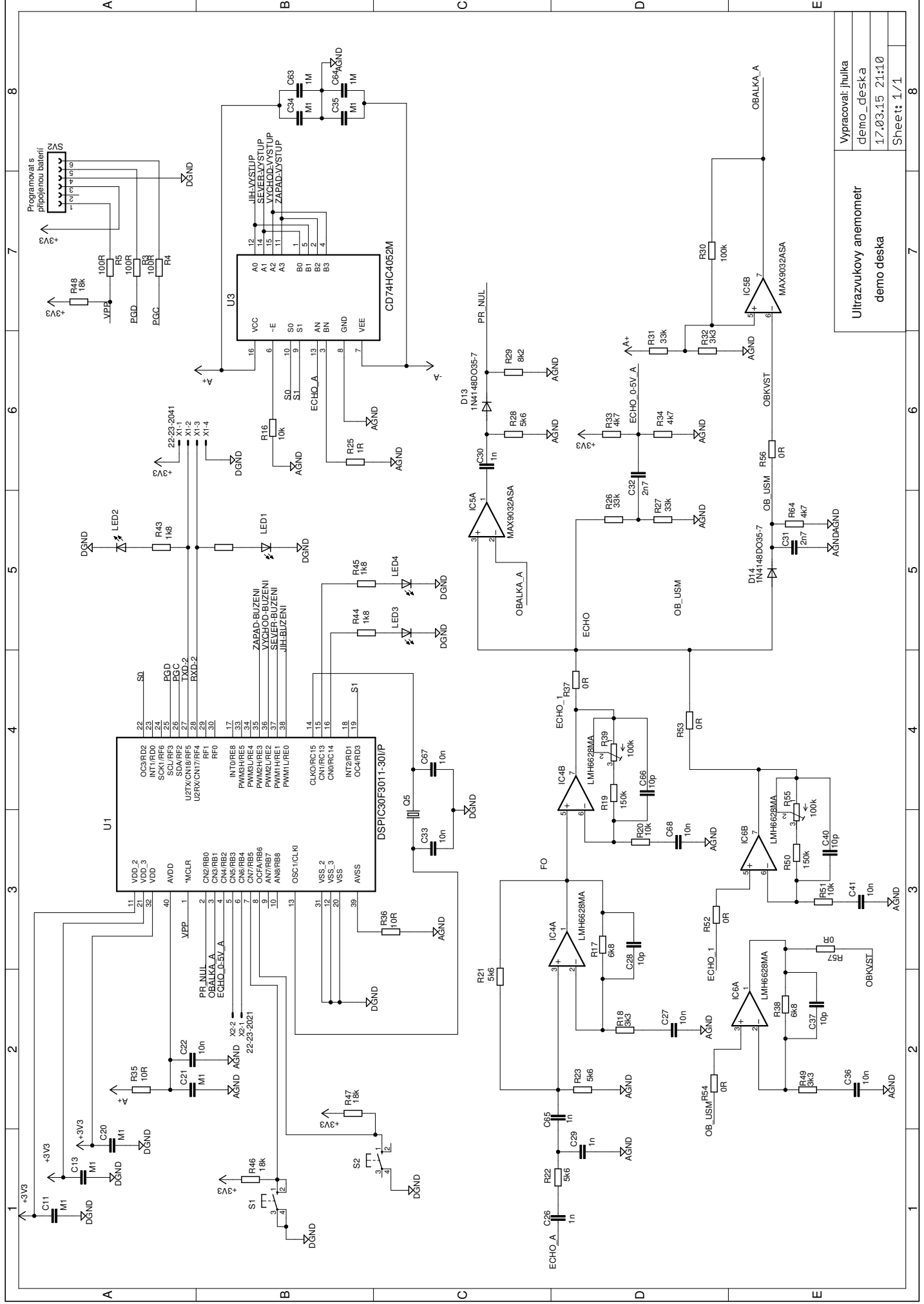
A.1 Osazovací výkres-vrchní strana

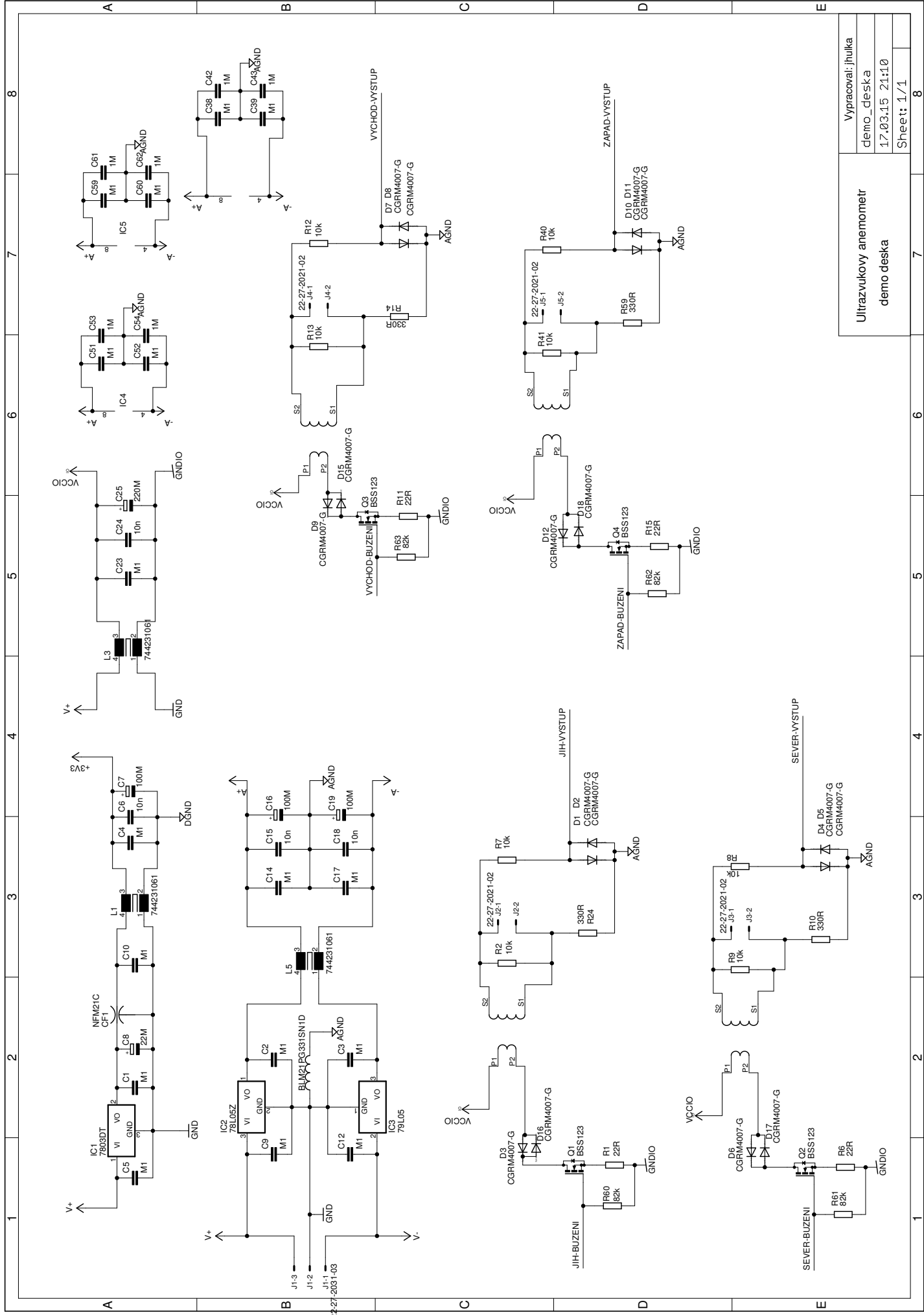


A.2 Osazovací výkres-dolní strana



A.3 Schéma zapojení



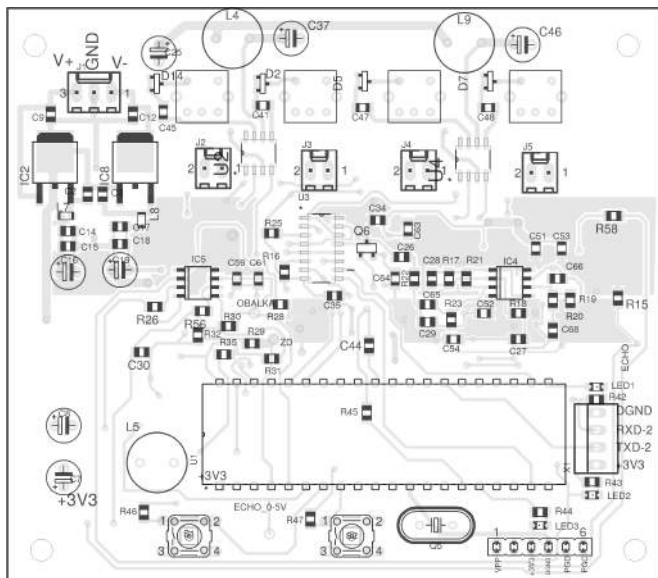


Výpracovná: Jihulka	
demo_deska	
17.03.15 21:10	
Sheet: 1/1	

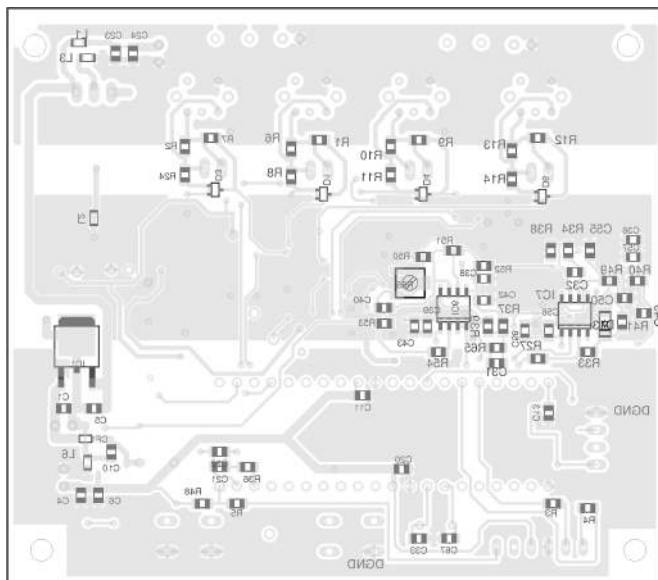
Ultrazvukový anemometr
demo deska

B VÝROBNÍ POKLADY PRO PROTOTYPU DESKY

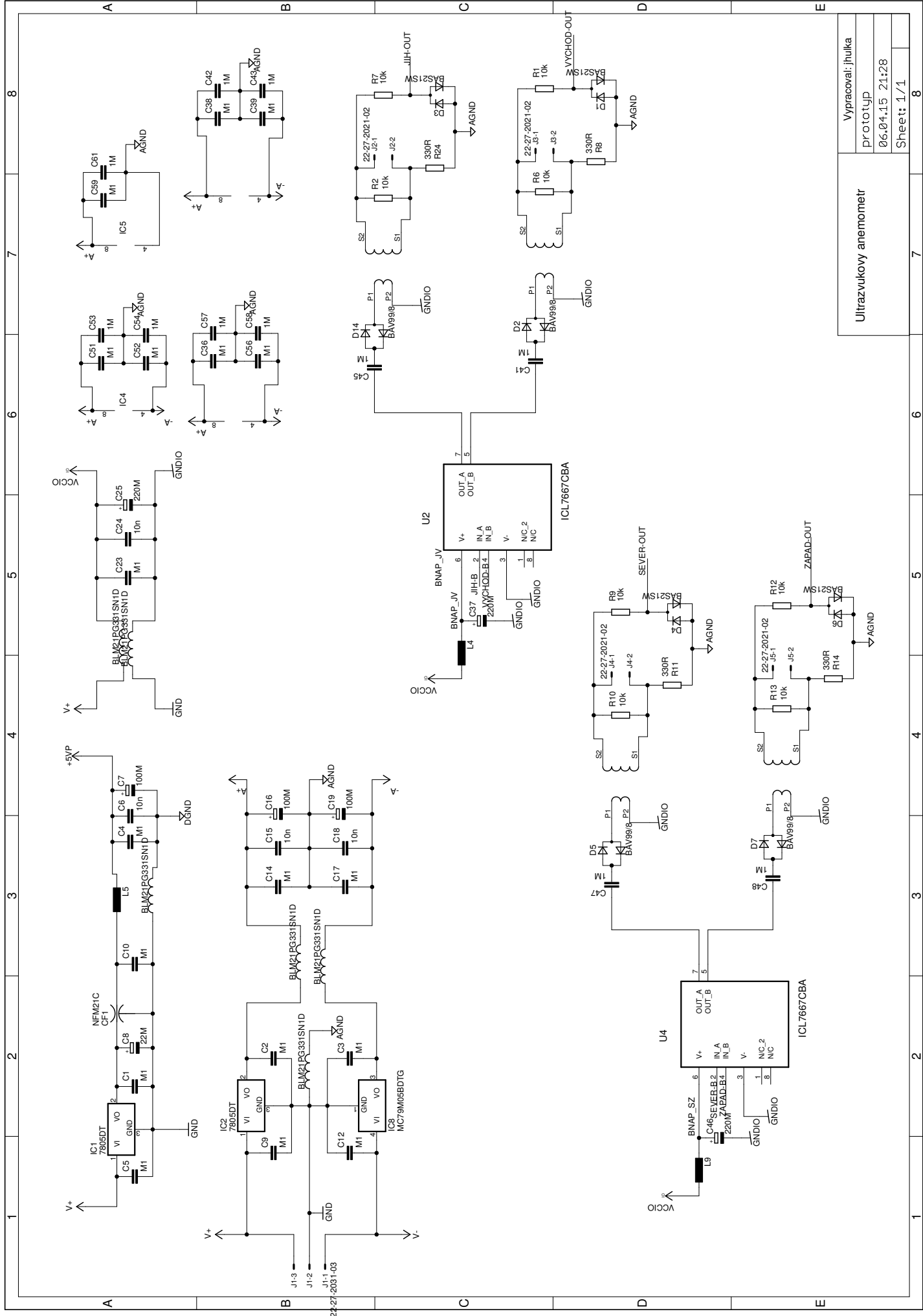
B.1 Osazovací výkres-vrchní strana



B.2 Osazovací výkres-dolní strana



B.3 Schéma zapojení



C OBSAH PŘÍLOŽENÉHO CD

Příložené CD je rozděleno do následujících složek:

- DOKUMENT - zdrojová data diplomové práce pro $\text{\LaTeX}$
- DPS
 - demo deska - výrobní podklady demo desky v Eagle
 - prototyp - výrobní podklady prototypu desky v Eagle
- MERENI
 - RYCHLOST - naměřená data z aerodynamického tunelu
 - TEPLOTA - naměřená data z tepelné komory CTS
- SW - zdrojový kód do mikropočítače dsPIC30F3011 prototypu desky