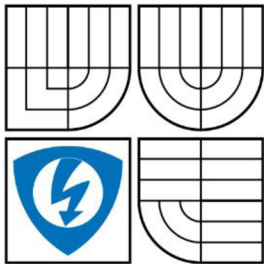


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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. PAVEL KŘEPELKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. PETR BENEŠ, Ph.D.

BRNO, 2011

Abstrakt

V první části dokumentu jsou popsány principy měření větru. Anemometry lze podle využívaného fyzikálního principu rozdělit na mechanické (vrtulkové a miskové), ultrazvukové a tepelné. Práce je zaměřena na ultrazvukové anemometry. V další části je vysvětlen princip šíření zvuku v atmosféře. Dále je rozebrána teorie měření a porovnány různé přístupy. Již hotová řešení jsou prezentována v podobě patentového průzkumu. Následně je uveden průzkum trhu, kde jsou definovány důležité parametry anemometru. Těžištěm práce je návrh prototypu ultrazvukového anemometru. Experimentální anemometr byl navržen jak po stránce software, hardware, tak i samotné konstrukce. Realizovaný anemometr byl kalibrován v aerodynamickém tunelu a výsledky byly porovnávány s výstupy simulací.

Klíčová slova

Ultrazvukový anemometr, ultrazvuk, měření větru, atmosférické měření, šíření zvuku, vítr, anemometr

Abstract

In the first section of this document, there are described principles of the wind measuring. Anemometers can be divided by physical principles to mechanical (propeller or cup), ultrasonic anemometers and thermoanemometers. This paper is focused to ultrasonic anemometers. In the next part, there are described principles of sound propagation in the atmosphere. There are studies of measurement theory and comparing of different approaches. Completed solutions are presented in patent exploration. Afterwards, there are introduction of market research. Important parameters of ultrasonic anemometers are highlighted. Main aim of work is designing prototype of ultrasonic anemometer. Software, hardware and construct of experimental anemometer were designed. Created anemometer was calibrated in aerodynamics tunnel and results were compared with simulation output.

Keywords

Ultrasonic anemometer, ultrasonic, wind measuring, atmosphere measuring, sound propagation, wind, anemometer

Bibliografická citace:

Křepelka, Pavel. *Ultrazvukový anemometr*. Diplomová práce FEKT – VUT v Brně, 2011, 68s. Vedoucí práce: Doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Ultrazvukový anemometr jsem vypracoval 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 uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc.Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji Výzkumnému a zkušebnímu leteckému ústavu, a.s. za zpřístupnění aerodynamického tunelu pro kalibraci prototypu ultrazvukového anemometru. V neposlední řadě děkuji Ing. Michalovi Chludovi za vytvoření počítačových simulací obtékání anemometru.

V Brně dne: **23. května 2011**

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	9
2. Principy měření rychlosti a směru větru	10
2.1 Mechanické anemometry	10
2.2 Akustické anemometry	11
2.3 Termoanemometry	12
3. Šíření zvuku v atmosféře	13
3.1 Geometrický rozptyl.....	13
3.2 Atmosférická absorpce.....	13
3.3 Větrný a teplotní gradient.....	14
4. Ultrazvukové anemometry	16
4.1 Teorie měření – impulsově.....	16
4.1.1 Základní měřicí algoritmus	16
4.1.2 Chyba měření způsobená aerodynamickým stínem piezoměniče [10]18	
4.1.3 Chyba způsobená fluktuací rychlosti zvuku [11].....	20
4.1.4 Proudění s vertikální složkou [12]	22
4.1.5 Další chyby měření proudění	23
4.2 Realizace ultrazvukových anemometrů	23
4.3 Přehled vyráběných ultrazvukových anemometrů.....	27
5. Simulace rychlostního profilu měřeného proudění	29
6. Experimentální ultrazvukový anemometr	35
6.1 Řadič ultrazvukových piezoměničů Prowave PW0268	35
6.2 Piezoměnič Prowave 400EP18A.....	39
6.3 Návrh hardware pro experimentální anemometr.....	41
6.4 Preprocessing vstupních dat	43
6.5 Kalibrace anemometru – tvorba kalibračního modelu	48
6.6 Vyhodnocení vektoru měřeného proudění	57
6.7 Ovládací a vizualizační software.....	59
6.8 Optimalizace konstrukce anemometru	61
7. Závěr	65
8. Seznam literatury	66

1. Úvod

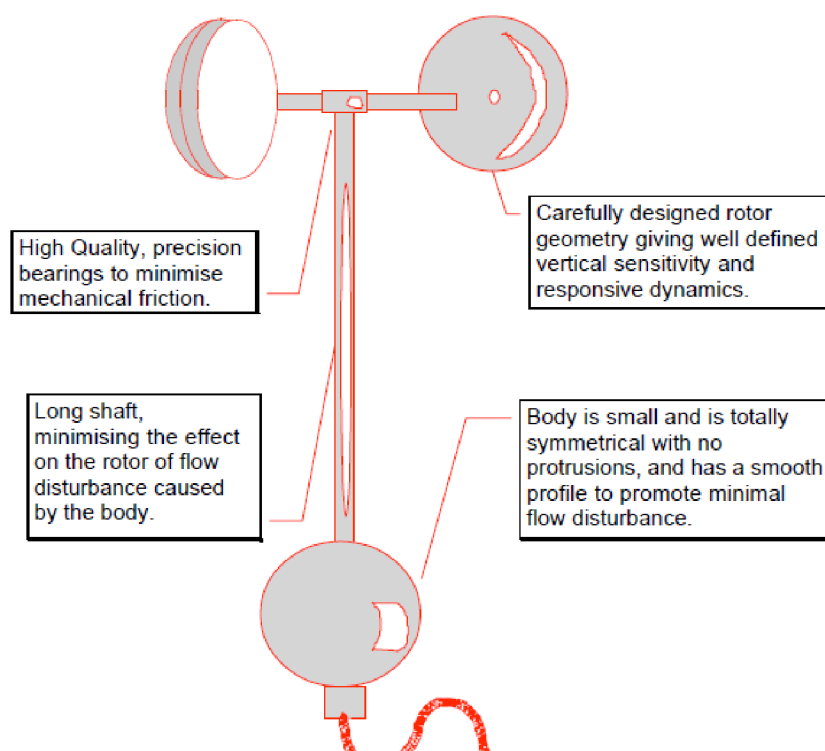
Ultrazvukové anemometry se stávají lepší alternativou pro meteorologická měření větru. Mechanické anemometry vykazují řadu nevýhod, jako je minimální měřitelná rychlost větru, nespolehlivost, krátká životnost a setrvačnost vrtulky. Ultrazvukové anemometry, které jsou založeny na zcela jiném principu, tyto nevýhody nemají. Krátký popis všech tří technických přístupů k měření rychlosti a směru větru naleznete v kapitole 2. Vzhledem k výhodám a nevýhodám představených typů anemometrů byl vybrán ultrazvukový anemometr, který funguje na principu unášení akustického vlnění proudícím prostředím. Fyzikální vysvětlení šíření a absorpce akustického vlnění lze nalézt v kapitole 3. Čtvrtá kapitola se věnuje samotným ultrazvukovým anemometrům. V první části je rozebrána teorie měření pomocí akustického vlnění a chyby, které mohou při tomto typu měření nastat. V další části jsou prezentovány některé patentované konstrukce ultrazvukových anemometrů. Na závěr čtvrté kapitoly je uveden přehled prodáváných anemometrů. Zde byly definovány významné parametry vybraných anemometrů, a na jejich základě navržen experimentální anemometr. V kapitole 6 je popsána konstrukce, hardware i software navrženého prototypu anemometru. Důležitou částí návrhu je zpracování naměřených dat, a predikce výsledného vektoru měřeného proudění. V další části práce jsou uvedeny výsledky z měření v aerodynamickém tunelu a výsledky počítačové simulace.

2. Principy měření rychlosti a směru větru

2.1 Mechanické anemometry

Mechanické (miskové) anemometry se obvykle skládají ze tří hemisférických ploch, rozmístěných na hřídeli. Detekují se otáčky této hřídele. Miskové anemometry obecně nejsou schopny měřit směr větru. Pokud se uvažuje standardní souřadnicový systém x,y,z a foukající vítr má složky u,v,w , tak miskový anemometr standardně měří hodnotu definovanou vztahem 1, tedy neměří vertikální složku w . Protože se jedná o mechanický senzor proudění, jsou parametry designu přístroje velmi důležité. Na obrázku 2.1 je znázorněn miskový anemometr s vyznačenými důležitými parametry designu.

$$|X| = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$



Obrázek 2.1 Miskový anemometr [2]

Výhody:

- Nízká cena
- Poměrně velká přesnost

Nevýhody

- Neměří směr proudění
- Je nutno překonat tření ložisek uložení hřídele – tzn. minimální měřitelné proudění
- Mechanické části – tzn. opotřebení, poruchovost, krátká životnost
- Maximální měřitelný vítr daný konstrukcí
- Setrvačnost – tzn. obtíže při měření nárazového větru

2.2 Akustické anemometry

Akustické anemometry pracují na principu ovlivňování šíření zvuku proudícím prostředím. Zpravidla se skládají z určitého počtu ultrazvukových měničů (3,4,5 nebo 6), navzájem vhodně geometricky uspořádaných. Konfigurace měničů udává tzv. měřicí dráhy, na kterých se měří doba šíření zvuku. Je jasné, že je akustický zvuk (mechanické vlnění) ovlivňován proudícím prostředím. Více o zvuku v kapitole 3. Ultrazvukový anemometr Vaisala WXT510 je vyobrazen na obrázku 2.2.



Obrázek 2-2 Anemometr Vaisala WXT510 [3]

Výhody:

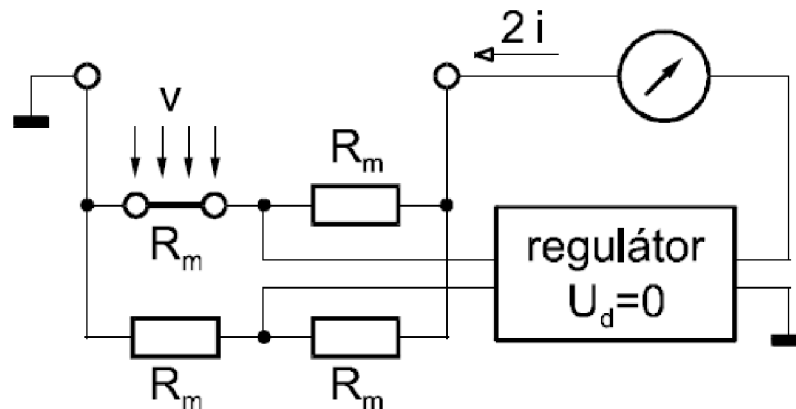
- Absence pohyblivých částí – tzn. výrazně rozšířené pracovní pásmo anemometru, větší spolehlivost, bezúdržbový
- Relativní nezávislost na parametrech prostředí (časové změny teploty, hustoty ...) – viz kap. 4.1
- Odstraňuje nevýhody mechanického anemometru

Nevýhody:

- Vysoká cena

2.3 Termoanemometry

Termoanemometry fungují na principu výměny tepla mezi zdrojem a okolím (proudící tekutinou). Zdroj tepla tvoří drátek, ohříváný na konstantní teplotu. S rostoucí rychlostí proudění se odvod tepla zvyšuje, a výkon dodávaný do drátku (regulace na konstantní teplotu) se také zvyšuje. Výkon je pak úměrný rychlosti toku. Nejčastější zapojení je můstkové, znázorněné na obrázku 2.3.



Obrázek 2.3 Principální schéma termoanemometru [4]

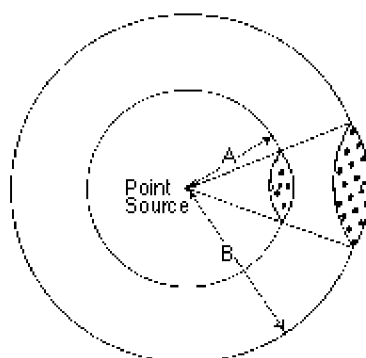
3. Šíření zvuku v atmosféře

Zvuk je kmitání molekul. Působením vzájemných sil mezi molekulami se zvuková vlna pohybuje. Zdroj generuje zvuk tak, že v prostředí vznikají místa, kde jsou molekuly zředěny (podtlak) a zhuštěny (přetlak). Takto vzniká podélné vlnění. S rostoucí vzdáleností od zdroje se zvukové vlny zeslabují. Ve volném prostoru se zvuk šíří všemi směry současně a vznikají tzv. vlnoplochy (spojnice bodů prostoru se stejnou amplitudou). Šíření zvukových vln je popsáno mnoha fyzikálními principy, některé z nich (důležité pro chod ultrazvukového anemometru) jsou popsány níže.

3.1 Geometrický rozptyl

Geometrický rozptyl je způsoben rozptýlením energie od zdroje vlnění. Tento jev je nezávislý na frekvenci vlnění a má zásadní efekt na popis šíření zvuku. Existují dva základní typy geometrického rozptylu – sférický a cylindrický. Zvukové vlnění ztrácí vlivem rozptylu definovaný počet decibelů energie na každou dvojnásobnou vzdálenost od zdroje. Například pro bodový zdroj vlnění, který vyzařuje energii všemi směry stejně, je útlum vzniklý geometrickým rozptylem 6dB na dvojnásobnou vzdálenost od zdroje. Tento jev je pojmenován jako zákon převrácených čtverců, je definován rovnicí 2[6] a znázorněn na obrázku 3.1.

$$\Delta d = 20 \log\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (2)$$



Obrázek 3.1 Rozptyl zvuku od bodového zdroje vlnění [6]

3.2 Atmosférická absorpce

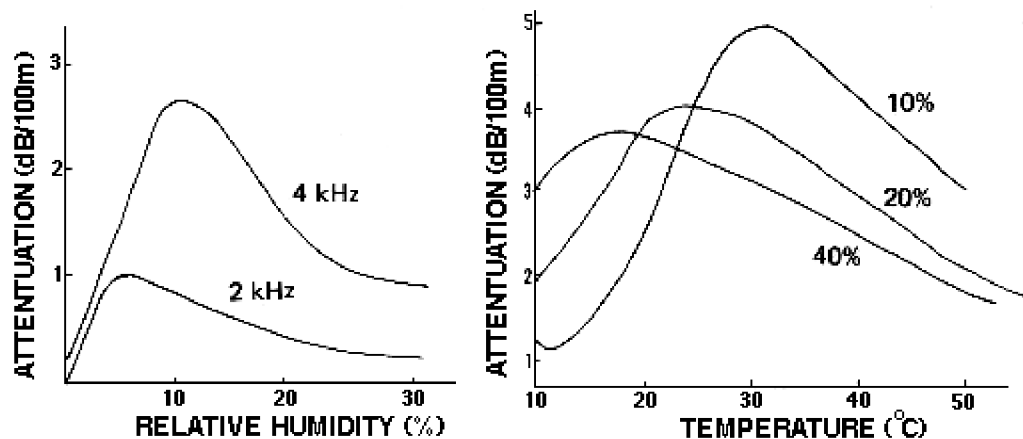
Existují dva mechanismy, které absorbují akustickou energii. Je to molekulární relaxace a vliv viskozity. Převládající vliv má molekulární relaxace, kde jsou vyšší frekvence absorbovány méně než nízké. Velikost útlumu vlivem

molekulární relaxace závisí na teplotě, tlaku a vlhkosti prostředí. Velikost tohoto útlumu je dána vztahem 3 [7].

$$\alpha = 8,686f^2 \left(\left(1,84 \cdot 10^{-11} \frac{p_r}{p_a} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,5} \right) + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-\frac{5}{2}} \left(0,01275e^{-\frac{2289,1}{T}} \right) \left(f_{r0} + \frac{f^2}{f_{r0}} \right)^{-1} + 0,1068e^{-\frac{8852}{T}} \left(f_{rn} + \frac{f^2}{f_{rn}} \right)^{-1} \right) \quad (3)$$

- f – frekvence vlnění [Hz]
- p_r – referenční tlak 101,325 kPa
- p_a – atmosférický tlak [kPa]
- T_0 – referenční teplota 293,15 K
- T – okolní teplota [K]
- f_{r0} – relaxační frekvence kyslíku – viz [7]
- f_{rn} – relaxační frekvence dusíku – viz [7]

Na grafu 3.2 jsou znázorněny atmosférické útlumy v závislosti na relativní vlhkosti prostředí a teplotě. Jednotlivé křivky vyjadřují rozdílné frekvence akustického vlnění (vlevo) nebo jednotlivé relativní vlhkosti prostředí (vpravo).

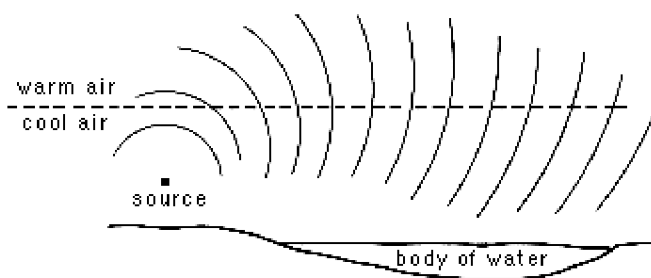


Obrázek 3.2 Závislost atmosférického útlumu na relativní vlhkosti a teplotě prostředí [6]

3.3 Větrný a teplotní gradient

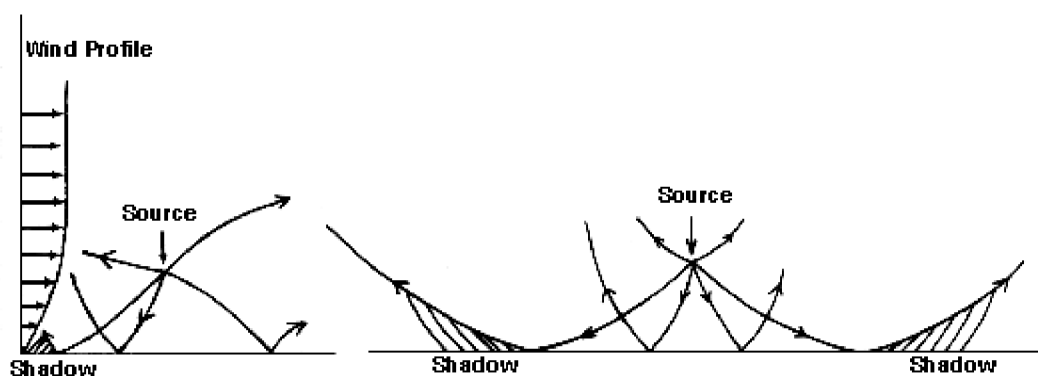
Rychlost šíření zvuku v plynném prostředí závisí na teplotě plynu. Při vyšších teplotách se šíří zvuk rychleji. Pokud není teplota atmosféry homogenní, není

homogenní ani rychlost akustického vlnění. Například za normálních podmínek je atmosféra chladnější ve větších výškách. Výsledkem je ohýbání směru šíření zvuku vzhůru (refrakce). Tímto jevem se generují tzv. akustické stíny. Při teplotní inverzi, jsou zvukové vlny ohýbány k zemi, proto je zvuk slyšet na delší vzdálenost. Situaci znázorňuje obrázek 3.3.



Obrázek 3.3 Šíření zvuku při teplotní inverzi [6]

Pokud fouká vítr, rychlost proudění není ve výškovém profilu homogenní. V nižších výškách je rychlost zvuku menší. Výsledkem je, že zvukové vlnění je ohýbáno vzhůru (ve směru proti větru) nebo dolů (ve směru shodném s větrem) – viz. Obrázek 3.4.



Obrázek 3.4 Vliv větru na šíření zvukových vln [6]

Teplotní a větrný gradient může výsledek výpočtu útlumu (vypočítaný na základě geometrického rozptylu a atmosférického útlumu) značně změnit. Rozdíl může být větší než 20 dB. Tyto efekty jsou důležité pro šíření zvuku na vzdálenosti delší než stovky metrů. Teplotní inverze a vítr mohou dramaticky redukovat efektivitu zvukových bariér.

4. Ultrazvukové anemometry

Ultrazvukové anemometry se rozdělují do třech základních typů:

- Měřící jednu složku větru (1D)
- 2D – Měří rychlost a směr v jedné rovině
- 3D – Měří rychlost, vertikální a horizontální složku větru

Podle typu měření:

- Impulsové – měří čas šíření zvukového impulsu
- Spojité – měří změnu fáze zvukového signálu

Podle počtu měřících drah.

Ultrazvukový anemometr je vhodný především pro měření nárazového větru, protože jako jeden z mála přístupů umožňuje vysokou frekvenci měření. Důležitá je teplotní kompenzace, protože rychlost šíření zvuku je na teplotě velmi závislá. Sensor bývá vyhříváný z důvodu nutnosti korektního měření i za nepříznivých atmosférických podmínek (mráz, sníh, déšť).

4.1 Teorie měření – impulsové

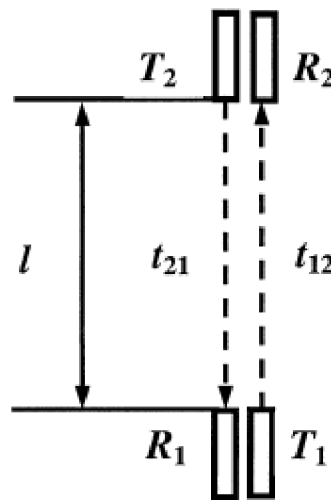
Šíření ultrazvukových impulsů lze popsat diferenciálními rovnicemi. Obecné rovnice popisují šíření zvukových vln v nestabilním a nehomogenním atmosférickém prostředí. V tomto dokumentu bude situace značně zjednodušena.

4.1.1 Základní měřící algoritmus

Všechny impulsové ultrazvukové anemometry pracují na stejném principu. Určují rychlost toku měřením časové prodlevy mezi vysláním a přijutím zvukového impulsu. Přijímač a vysílač tvoří měřící dráhu. V současné době je vysílač a přijímač tvořen jedním piezoměničem. Základní algoritmus může být dvojího typu. Pokud nelze spočítat inverzi časové prodlevy doby letu ($1/\Delta t$), rychlost proudění v jedné měřící dráze lze spočítat podle rovnice 4 [9].

$$u_p^M = \frac{c^2}{2l} \Delta t \quad (4)$$

- u_p^M – rychlost proudění v ose měřicí dráhy [m/s]
- c – rychlost zvuku [m/s]
- l – délka měřicí dráhy (vzdálenost senzorů) [m]
- $\Delta t = t_{12} - t_{21}$ [s]
 - t_{12} - naměřený čas mezi bodem 1 a 2 měřicí dráhy
 - t_{21} - naměřený čas v opačném směru



Obrázek 4.1 Měřicí dráha [9]

Pokud použitá elektronika dovoluje vypočítat inverzi času, je výhodnější použít rovnici 5[10] kde $\Delta \frac{1}{t} = \frac{1}{t_{12}} - \frac{1}{t_{21}}$

$$u_p^M = \frac{d}{2} \Delta \frac{1}{t} \quad (5)$$

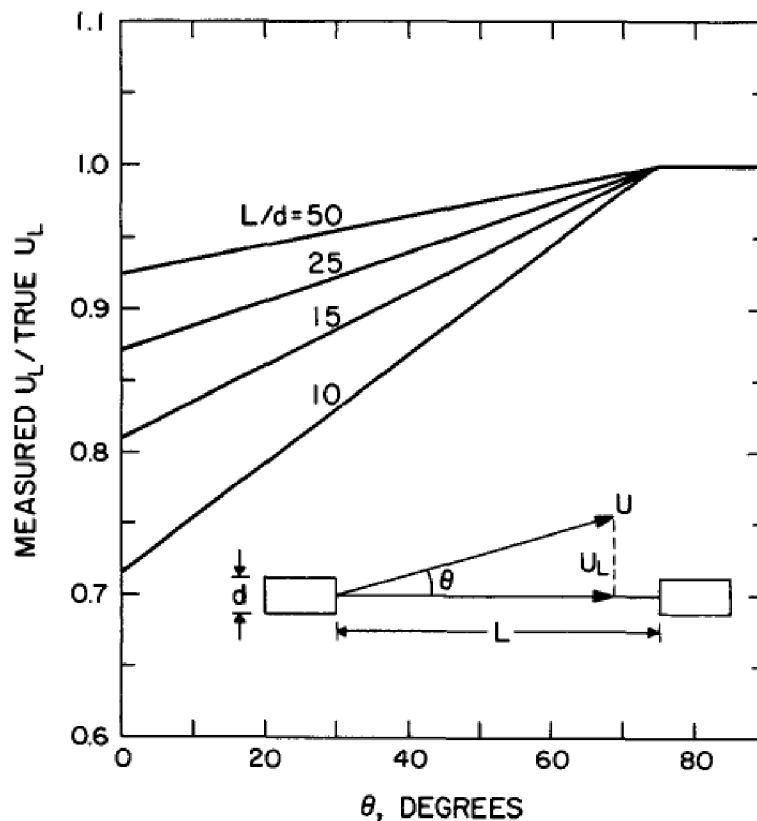
Rovnice 4 a 5 jsou použitelné pro stabilní, homogenní prostředí. Nicméně použití v obecném proudění je zatíženo velkou chybou, protože modelují reálný děj velmi zjednodušeně. Je dokázáno, že proudění kolmé na měřicí dráhu nemá žádný vliv na měření. Další možností je použít model využívající prostorové průměrování okolo měřicí dráhy. Tento proces je popsán rovnicí 6 [9]

$$u_i^M(\mathbf{x}, l) = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} \hat{u}_i(\mathbf{x} + \mathbf{s}) ds \quad (6)$$

Kde u_i^M je naměřená rychlost proudění v jedné ose proudění, která je vypočítána integrací rychlosti proudění \hat{u}_i po měřicí dráze l (od středu dráhy x).

4.1.2 Chyba měření způsobená aerodynamickým stínem piezoměniče [10]

Tento jev vzniká hlavně u konfigurací s krátkou měřicí dráhou. Na obrázku 4.2 je výsledek testů ve větrném tunelu. Graf ukazuje axiální útlum v ose piezoměniče jako funkci úhlu proudění k ose měřicí dráhy. Útlum je největší, je-li proudění v ose měřicí dráhy a klesá se vzrůstajícím úhlem. Útlum rovněž klesá se vzrůstajícím poměrem l/d (délka měřicí dráhy/průměr měniče). Tvarování křivek lze dosáhnout změnou obalu piezoměničů více, než zvyšováním koeficientu l/d – tzn. snižováním průměru měničů (technologické limity), nebo zvyšováním délky měřicí dráhy (zvyšují se chyby vlivem nehomogenity proudění). Pro většinu tvarů měničů lze odchytku od správné hodnoty psát ve tvaru znázorňující rovnice 7 [10]

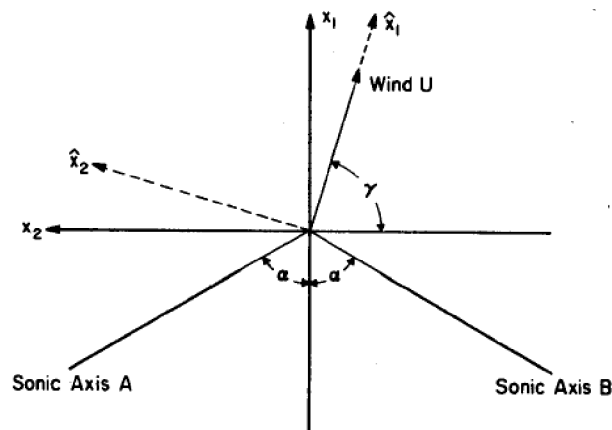


Obrázek 4.2 Chyba měření v závislosti na úhlu proudění [10]

$$\frac{U_L^m}{U_L} = C + (1 - C) \sin \theta \quad (7)$$

Kde

- U_L^m – naměřená hodnota rychlosti proudění [m/s]
- U_L – skutečná hodnota rychlosti proudění [m/s]
- C – výsledek při $\theta = 0 \text{ rad}$ [-]
- θ – úhel dopadajícího proudění [rad]



Obrázek 4.3 Souřadnicové systémy (globální a systém anemometru)[10]

Na obrázku 4.3 je znázorněn globální souřadnicový systém. Osy A a B jsou měřicí dráhy. Vektor U je vektor proudění vzduchu pod úhlem γ . Rovnice 8 [10] a 9 [10] popisují závislost naměřených složek větru (U_A a U_B) a vektoru větru v globálních souřadnicích (složky U_1 a U_2).

$$U_A = U_1 \cos \alpha - U_2 \sin \alpha \quad (8)$$

$$U_B = U_1 \cos \alpha + U_2 \sin \alpha \quad (9)$$

Rovnice lze použít pro zpětnou rekonstrukci vektoru proudění.

$$U_1 = \frac{(U_A + U_B)}{2 \cos \alpha} \quad (10)$$

$$U_2 = \frac{(U_A - U_B)}{2 \sin \alpha} \quad (11)$$

Rovnici 10 [10] je možné upravit s použitím koeficientu útlumu stínem měniče f na rovnice 12 [10] a 13 [10].

$$U_A^m = U_A(C + (1 - C)\sin\theta_A) = U_A f_A \quad (12)$$

$$U_B^m = U_B(C + (1 - C)\sin\theta_B) = U_B f_B \quad (13)$$

Použitím rovnic 10,11,12,13 [10] lze vypočítat výsledný vztah mezi naměřeným a skutečným prouděním (rovnice 14,15 [10]) a funkci útlumu (rovnice 16,17 [10]).

$$U_1^m = U_1 \left(\frac{f_A + f_B}{2} \right) + U_2 \tan \alpha \left(\frac{f_B - f_A}{2} \right) \quad (14)$$

$$U_2^m = U_1 \cot \alpha \left(\frac{f_B - f_A}{2} \right) + U_2 \left(\frac{f_A + f_B}{2} \right) \quad (15)$$

$$\frac{f_A + f_B}{2} = C + (1 - C) \sin \gamma \sin \alpha \quad (16)$$

$$\frac{f_B - f_A}{2} = (1 - C) \cos \gamma \cos \alpha \quad (17)$$

4.1.3 Chyba způsobená fluktuací rychlosti zvuku [11]

Uvažujme měřicí algoritmus daný rovnicí 4. Naměřené hodnoty časů z měřicích drah znázorněných na obrázku 4.1 jsou ve vztahu s měřeným prouděním podle rovnic 18 a 19 [11] (značení stejné jako u rovnice 4)

$$t_{12} = \frac{l}{c + u_p} \quad (18)$$

$$t_{21} = \frac{l}{c - u_p} \quad (19)$$

Za podmínek že $u_p \ll c$ a $\Delta t = t_{12} - t_{21}$ lze psát rovnici 20 [11].

$$\Delta t = \frac{2l}{c^2} u_p \quad (20)$$

Rychlost zvuku je funkcí virtuální teploty vzduchu, to znamená, že závisí na teplotě a vlhkosti vzduchu. Rovnice 21 [11] je často používaná pro zjednodušené určení rychlosti zvuku.

$$C = 20,067T_v^{0,5} \quad (21)$$

Kde T_v je virtuální teplota definovaná podle 22.

$$T_v = T \left(1 + 0,32 e \frac{1}{p} \right) \quad (22)$$

- T – teplota [K]
- e – tlak vodní páry [Pa]
- p – atmosférický tlak [Pa]

Pokud je rychlost zvuku reprezentována svou průměrnou hodnotou a fluktuací (rovnice 23 [11]), pak lze jednotlivé složky vyjádřit podle rovnic 24 a 25 [11]. Naměřená hodnota rychlosti proudění lze taktéž vyjádřit podobným způsobem (rovnice 26 [11]), složky jsou pak vyjádřeny rovnicemi 27 a 28 [11]. Je vidět, že průměrná změřená hodnota je funkcí průměrné rychlosti zvuku a průměrného časového intervalu. Fluktuační složku lze vypočítat z difference mezi změřenými časovými intervaly.

$$c = \bar{c} + c^* \quad (23)$$

$$\bar{c} = 20,067 \bar{T}^{0,5} \left(1 + 0,32 \frac{\bar{e}}{\bar{p}} \right)^{0,5} \quad (24)$$

$$c^* \approx \bar{c} \left(\frac{T^*}{2T} + 0,16 \frac{e^*}{\bar{p}} \right) \quad (25)$$

Horní index „*“ označuje fluktuační složku veličin, zatímco čára nad písmenem označuje jeho průměrnou složku.

$$u_p^M = \overline{u_p^M} + u_p^{M*} \quad (26)$$

$$\overline{u_p^M} = \frac{\bar{c}^2}{2l} \Delta t \quad (27)$$

$$u_p^{M*} = \frac{\bar{c}^2}{2l} (\Delta t - \overline{\Delta t}) \quad (28)$$

Z rovnic 27 a 28 lze odvodit, že časový interval pro pomalé proudění ($c \gg u_p^M$), které zahrnuje fluktuaci rychlosti zvuku, bude následující: (rovnice 29 [11])

$$u_p^M = u_p \left(1 - \frac{2c}{\bar{c}} \right) \quad (29)$$

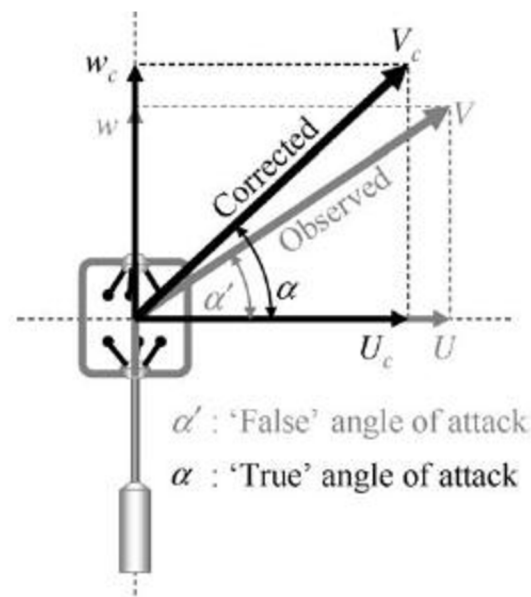
Pro případ, že fluktuace bude způsobena pouze změnou teploty, vztah 29 přechází ve vztah 30 [11].

$$u_p^M = u_p \left(1 - \frac{T^*}{T}\right) \quad (30)$$

Pro odstranění fluktuací je třeba brát v úvahu řadu měření a matematicky je zpracovávat (průměr, variance, kovariance). Pro kompenzaci teploty je nutné teplotu měřit. Další možností je použít vztah 5.

4.1.4 Proudění s vertikální složkou [12]

Pokud měřené proudění není pouze horizontální, ale má i vertikální složku, anemometr neměří správnou hodnotu vlivem vznikajících turbulencí. Chyba vzrůstá se zvětšujícím se úhlem dopadu proudění na rovinu anemometru. Pokud anemometr měří proudění i ve vertikálním směru, je nutné použít korekční algoritmus. Na obrázku 4.4 je znázorněn vektor větru před a po korekci.



Obrázek 4.4 Korigovaný vektor větru [12]

Z pokusů van der Molena [12] vyplývá, že u běžně dodávaných ultrazvukových anemometrů roste chyba měření až k 60% (při úhlu dopadu větru 90°). Experimenty dále ukázaly, že vertikální složka měřeného větru má dopad i na měření horizontální složky. Nejhorší případ je při úhlu vektoru 30° , kdy vítr fouká přímo na měřící piezoměnič. Algoritmus navržený pro korekci chyby je následující:

1. První odhad úhlu α (viz obrázek 4.4), kde $\alpha = \arctan\left(\frac{w}{U}\right)$
 - w, U – naměřené hodnoty pro první estimaci úhlu α (obr. 4.4) [rad]

2. Výpočet korigovaných hodnot

$$w_c = w \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \varepsilon_{\sin}}$$

$$U_c = U \frac{\cos \alpha}{\cos(f(\alpha, \gamma))}$$

- ε_{\sin} a $f(\alpha, \gamma)$ jsou definovány van der Morganem v [12]

3. Vypočítat další estimaci úhlu α , kde $\alpha = \arctan\left(\frac{w_c}{U_c}\right)$
4. Znovu krok 2 – nové hodnoty budou již přesnější než vypočítané pouze z naměřených hodnot.

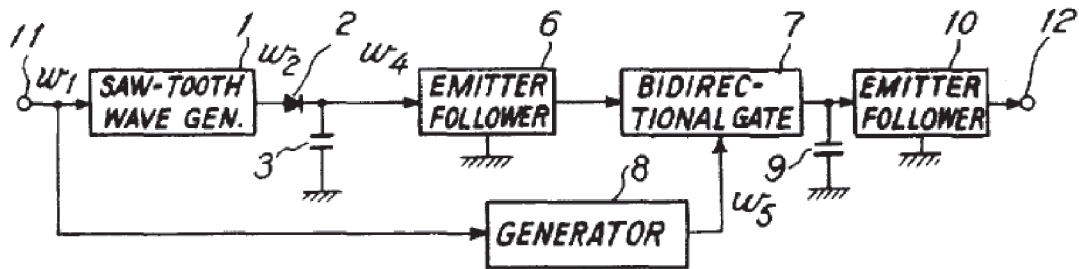
4.1.5 Další chyby měření proudění

Další systematická chyba může vzniknout nepřesnou geometrií rozložení piezoměničů. Po přepočtu mezi globálním souřadnicovým systémem a systémem anemometru (obr. 4.3) je výsledek zatížen aditivní chybou. Viz [13].

Další možná chyba vzniká při měření malé rychlosti větrů – do 2m/s. Více v [14].

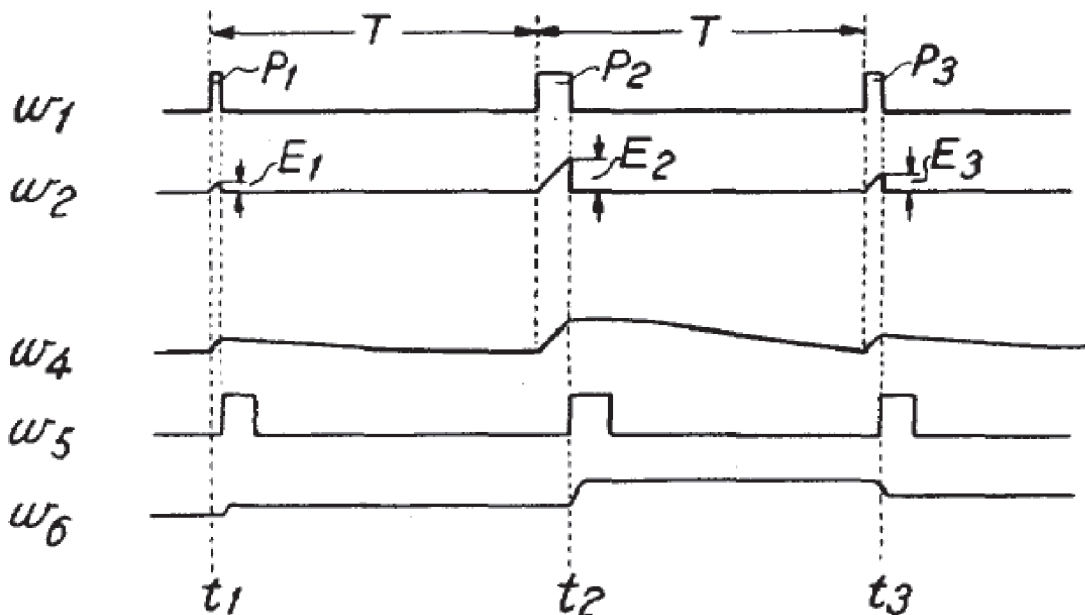
4.2 Realizace ultrazvukových anemometrů

Na obrázku 4.5 je znázorněno blokové schéma reálného anemometru bez použití mikroprocesorové techniky (patent 3,693,433 9/1972 – viz [15]). Anemometr je impulsového typu. Impulsy mají délku 100us s periodou 2ms. Přístroj používá dva páry ultrazvukových měničů. Měřicí dráhy jsou na sebe kolmé.



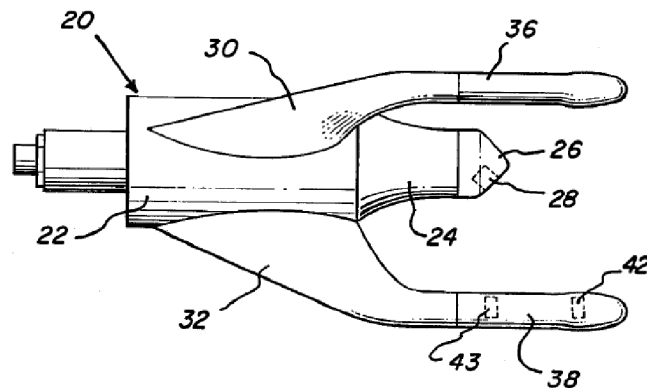
Obrázek 4.5 Blokové schéma anemometru podle patentu 3,693,433 09/1972 [15]

Generátor pilovitého průběhu (1) generuje průběh s konstantní strmostí, spouštěný přijímaným signálem z piezoměniče (obdélkový průběh - 11). Za tímto generátorem je kondenzátor (3), který se nabíjí právě pilovitým signálem (w_2). Generátor (8) generuje řídicí signál (w_5) pro bránu (7). Otevření brány se provede vždy po skončení vstupního impulsu od piezoměniče. Brána má funkci přenašeče náboje mezi kondenzátorem 3 a 9, pokud je otevřena signálem w_5 . Emitorové sledovače 6 a 10 mají za úkol impedanční oddělení pro další obvody. Napětí na výstupu (12) je pak úměrné rychlosti proudění. Průběhy jsou znázorněny na obrázku 4.6.

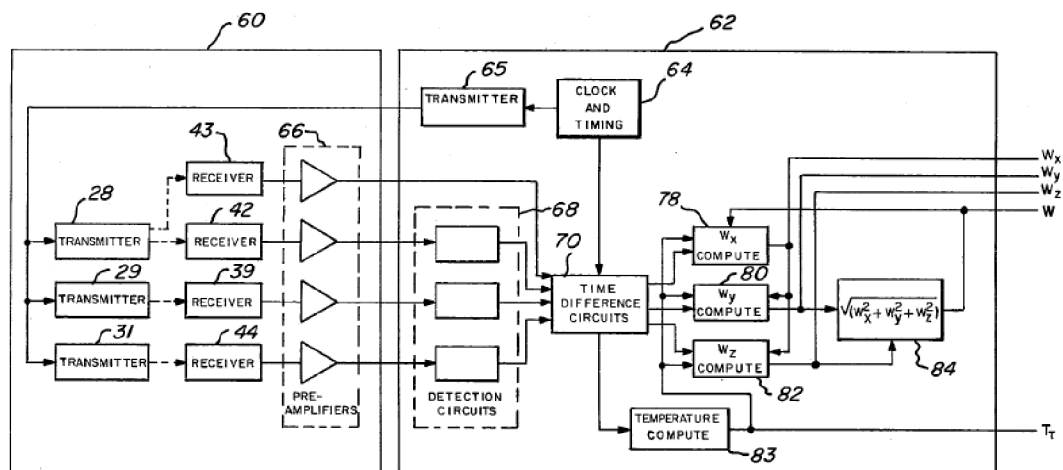


Obrázek 4.6 Průběhy napětí v anemometru podle patentu 3,693,433 09/1972 [15]

Jiný přístup je znázorněn na obrázku 4.7. Anemometr se používá pro měření relativní rychlosti větru na helikoptérách. Zde se využívá výpočetní technika pro výpočet jednotlivých složek větru a jeho absolutní hodnoty. Anemometr měří všechny 3 složky větru (3D).



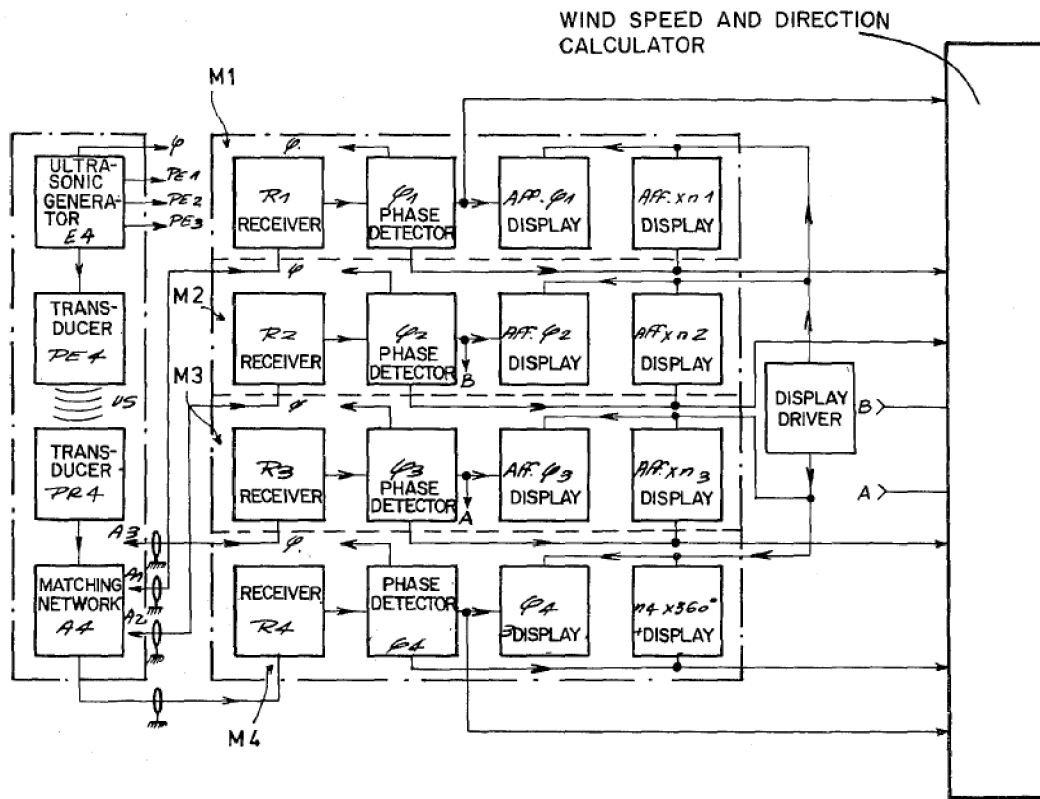
Obrázek 4.7 3D anemometr podle patentu 4,031,756 07/1977[16]



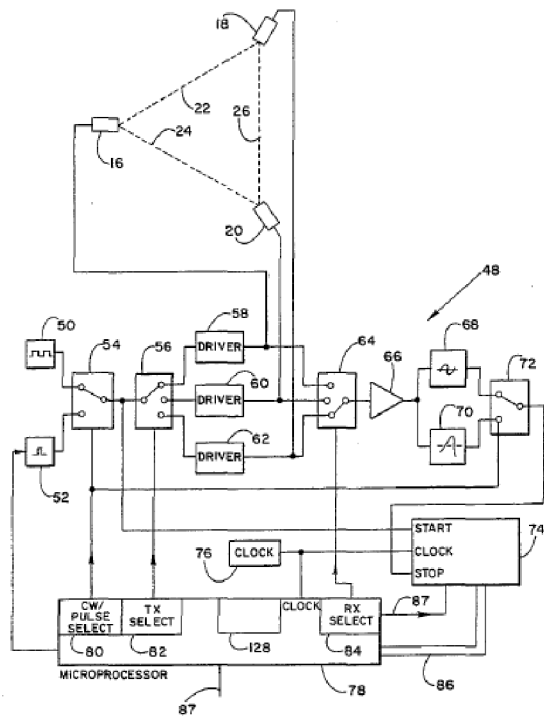
Obrázek 4.8 Vnitřní uspořádání anemometru podle patentu 4,031,756 07/1977[16]

Časovací obvody (64) vytvářejí impulsy pro vysílací obvody. Přijímaný signál je zachycen ultrazvukovými detektory (43) a zesílen (66). Detekčními obvody (68) je signál tvarován. Čas šíření ultrazvukového signálu je vypočítán v obvodu 70. Tento obvod má zdroj hodinového taktu rovněž z časovací jednotky 64. Následuje výpočetní část, kde jsou separátní obvody pro výpočet složek větru, absolutní hodnoty rychlosti a teploty.

Další možností je měřit změnu fáze zvukového signálu, viz. Obr. 4.9. Poslední představovanou možností je využití multiplexorů a demultiplexorů pro snížení složitosti přístroje (obr. 4.10). Zapojení využívá mikroprocesor.



Obrázek 4.9 Vnitřní zapojení anemometru podle patentu 4,174,630 11/1979 [17]



Obrázek 4.10 Vnitřní zapojení anemometru podle patentu 5,343,744 09/1994[18]

4.3 Přehled vyráběných ultrazvukových anemometrů

GILL Instruments – Extreme Weather WindObserver

- 4 měniče
- Rozsah měření větru 0 – 75 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 2\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 2^\circ$
- Frekvence měření 1 – 4 Hz
- Interface – RS422/RS485
- Vyhřívavý



Obrázek 4-11 GILL WindObserver

YOUNG 81000

- 6 měničů
- Rozsah měření větru 0 – 40 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 3\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 5^\circ$
- Frekvence měření 4 – 32 Hz
- Interface – RS232 nebo RS485



Obrázek 4-12 YOUNG
81000

ENERCORP Ultrasonic Anemometer 2D

- 4 měniče
- Rozsah měření větru 0 – 60 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 2\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 1^\circ$
- Frekvence měření 10Hz
- Interface – RS232, RS485/422
- Vyhřívavý



Obrázek 4-13 ENERCORP Ultrasonic
anemometer 2D

GILL Instruments - WindSonic

- 4 měniče
- Rozsah měření větru 0 – 60 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 2\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 3^\circ$
- Frekvence měření 0,25 - 4Hz



Obrázek 4-14 GILL WindSonic

- Interface – RS232, RS485

Vaisala WMT52

- 3 měniče
- Rozsah měření větru 0 – 60 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 5\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 3^\circ$
- Frekvence měření 4Hz
- Interface – RS232, RS485, USB



Obrázek 4-15 Vaisala WMT52

AMALGAMATED 85000

- 4 měniče
- Rozsah měření větru 0 – 70 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 3\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 2^\circ$
- Frekvence měření 1Hz
- Interface – RS232, RS485, 0-5V



Obrázek 4-16 AMALGAMATED 85000

TheisCLIMA Ultrasonic anemometer 2D

- 4 měniče
- Rozsah měření větru 0 – 65 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 2\%$
- Nepřesnost měření směru $\pm 1^\circ$
- Frekvence měření až 100Hz
- Interface – RS485/422, 0-10V, 0-20mA

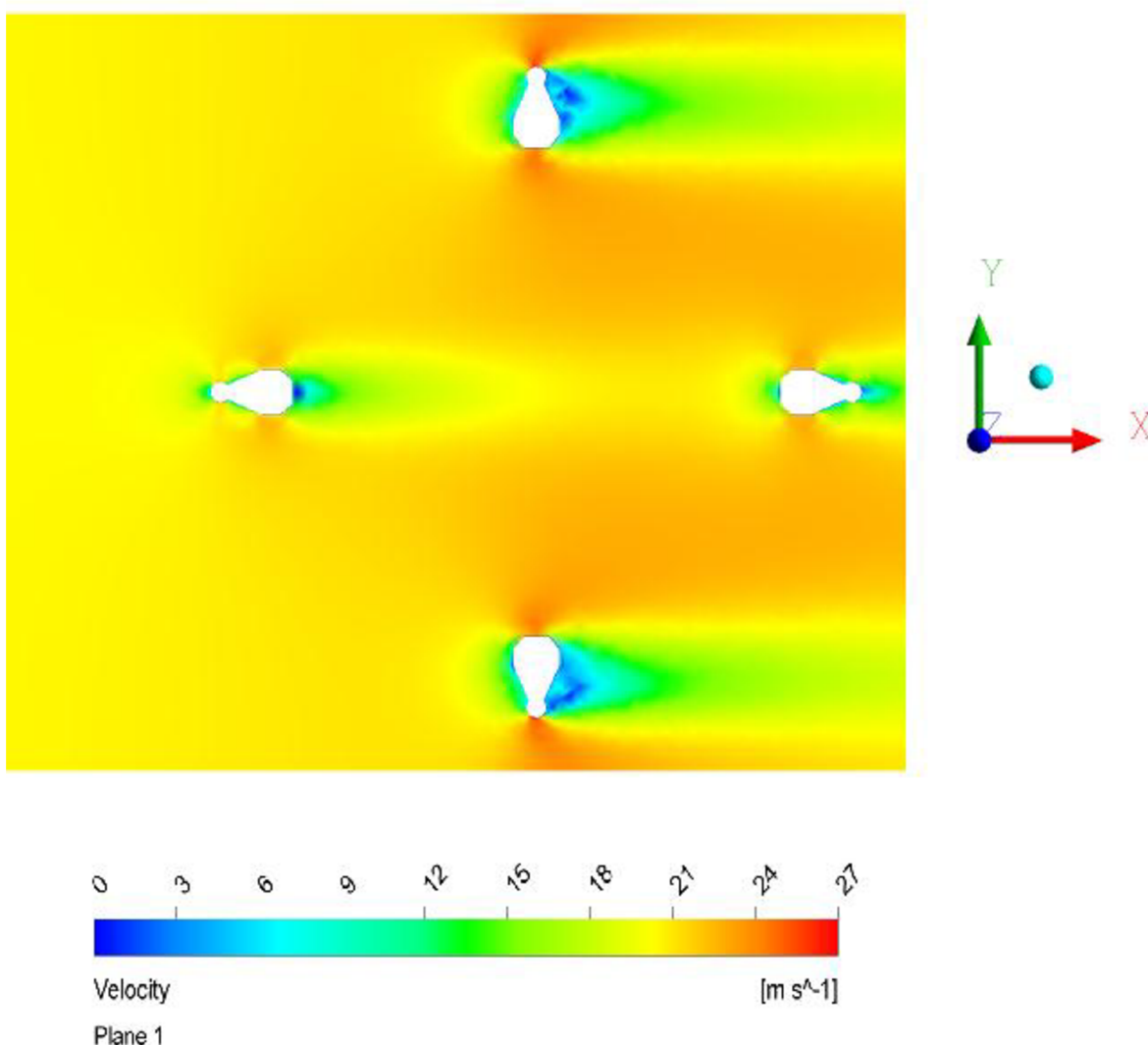


Obrázek 4-17 TheisCLIMA Ultrasonic anemometer 2D

Z průzkumu vyplývá, že maximální měřená rychlost větru je 75m/s (Extreme Weather WindObserver), průměrná maximální měřená rychlost větru je 60m/s. Nepřesnost měření rychlosti se pohybuje okolo $\pm 3\%$ a nepřesnost měření směru od $\pm 1^\circ$ do $\pm 5^\circ$. Zajímavé je, že rychlost čtení se pohybuje jenom v desítkách hertz. Výstupní interface je vždy sériová linka (RS232,RS485), v některých případech je vyveden napěťový nebo proudový výstup.

5. Simulace rychlostního profilu měřeného proudění

V programu Ansys Fluent byl simulován rychlostní profil proudění v horizontálním řezu v úrovni osy piezoměničů. Piezoměniče ovlivňují měřené proudění a tím vnášejí nepřesnosti do odečítaného času šíření ultrazvukového impulsu. Se vzrůstající rychlostí roste ultrazvukový stín mezi měniči. Situace při nulovém natočení a rychlosti proudění 20m/s je znázorněna na obrázku 5.1.

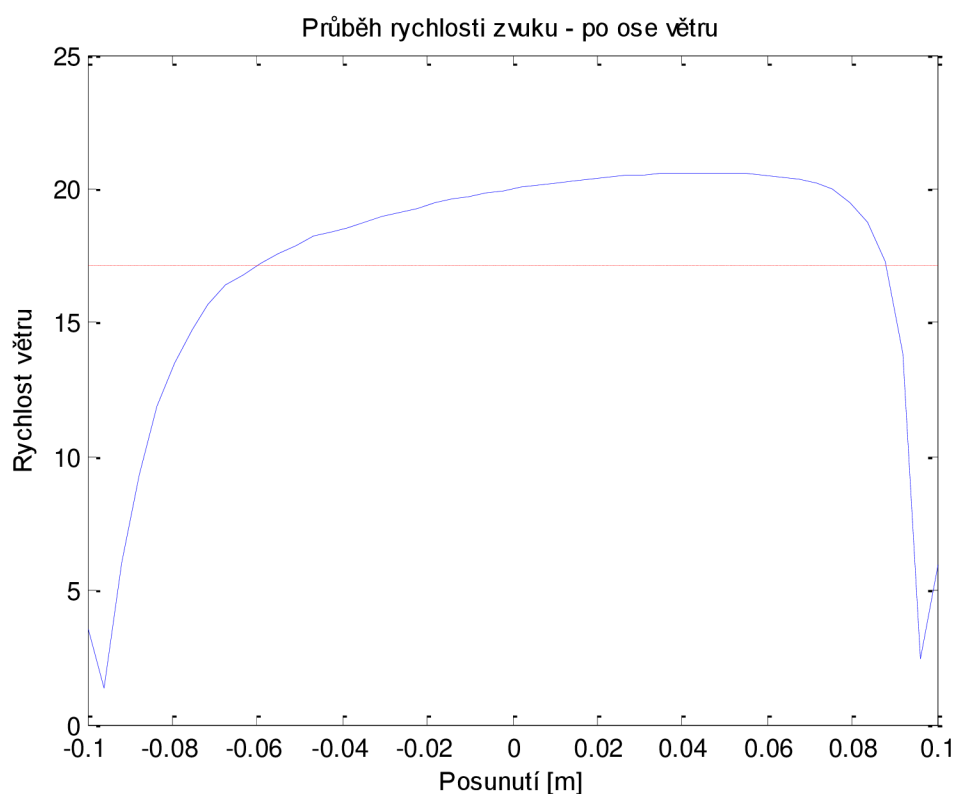


Obrázek 5.1 Rychlostní profil pro rychlost proudění 20m/s

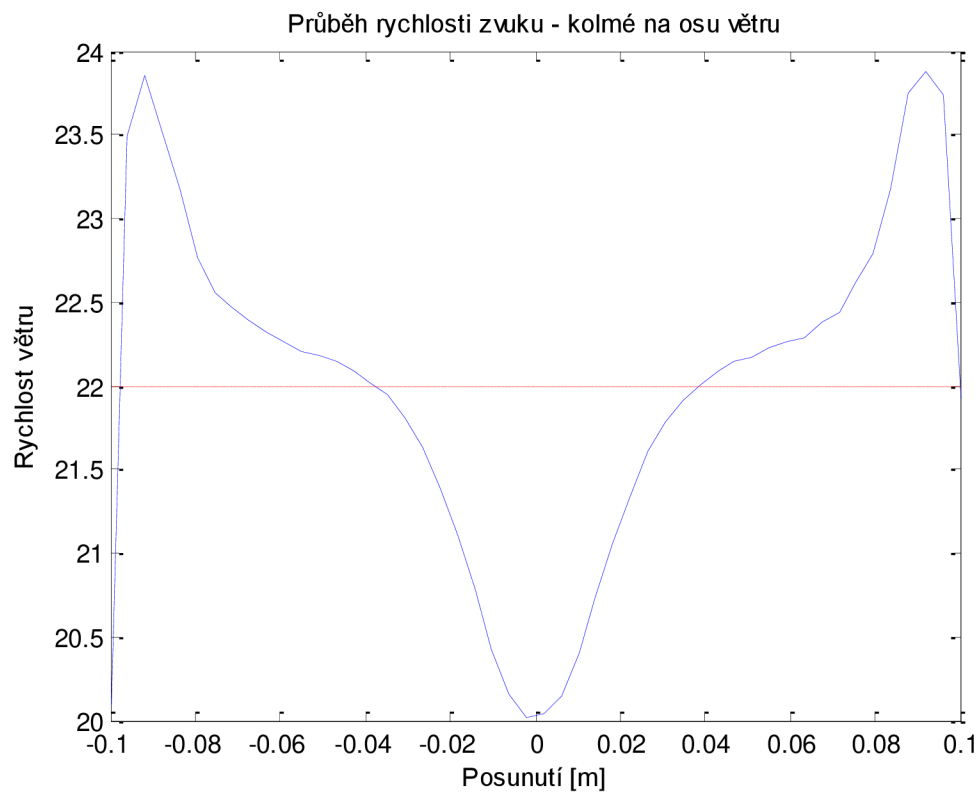
Graf na obrázku 5.2 ukazuje vývoj rychlosti proudění na měřící dráze mezi protilehlými čidly v ose proudění (na obrázku 5.2 zleva doprava). Bezprostředně za piezoměničem vzniká aerodynamický stín, který se projevuje výrazným snížením

rychlosti měřeného proudění. Změřená rychlost vypočítaná podle vztahu 6 je zobrazena červeně. Odchylka mezi skutečnou rychlostí proudění a naměřenou je tedy 2,86 m/s. Obdobná situace pro měřicí dráhu kolmou na dopadající proudění je zobrazena v grafu na obrázku 5.3.

Rychlostní profil proudění pro 50 m/s je na obrázku 5-5.

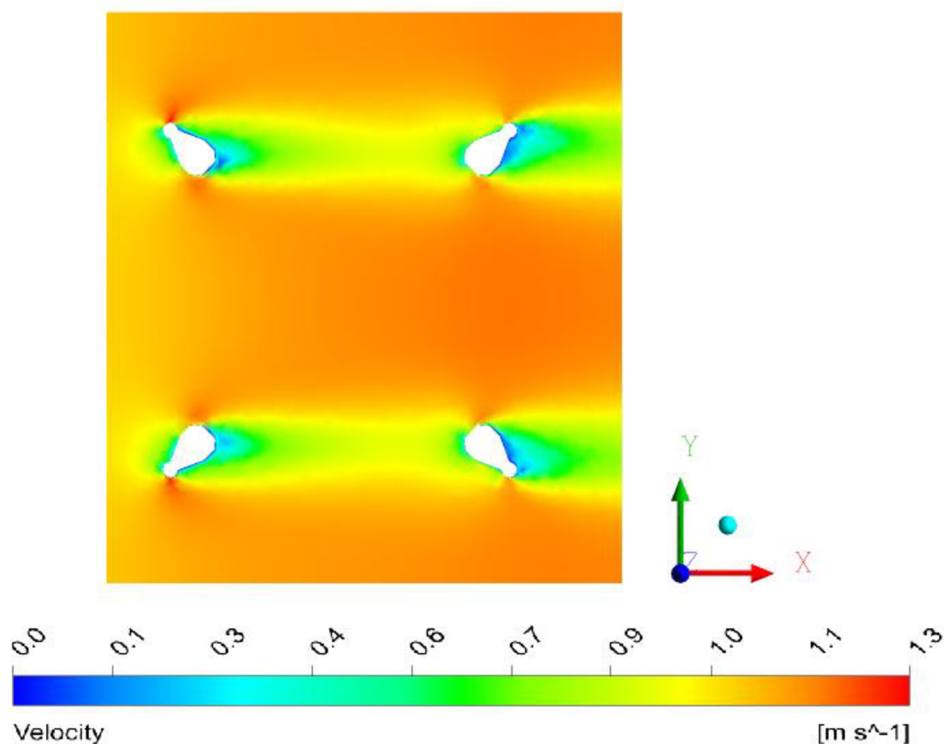


Obrázek 5.2 Vývoj rychlosti po ose větru (20m/s)

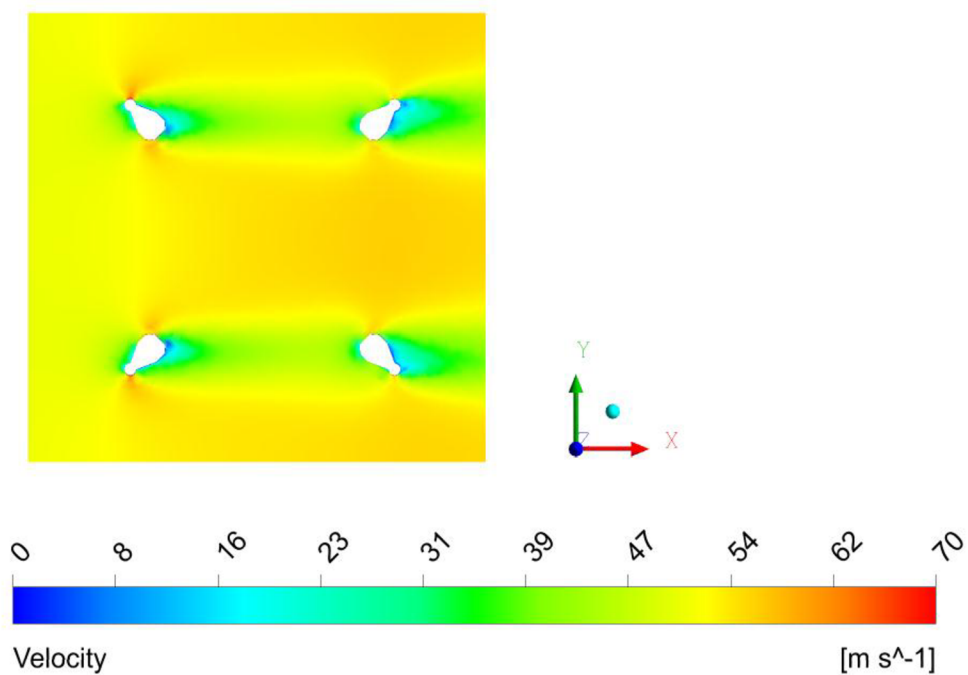


Obrázek 5.3 Vývoj rychlosti kolmo na osu větru (20m/s)

Ještě výraznější ovlivnění proudění dochází při natočení anemometru k ose měřeného proudění o 45° . Příčinou většího aerodynamického stínu je kratší vzdálenost mezi sousedními snímači a horší obtékání snímače z boku. Situaci pro extrémní rychlosti (1m/s a 50m/s) zobrazují následující obrázky.

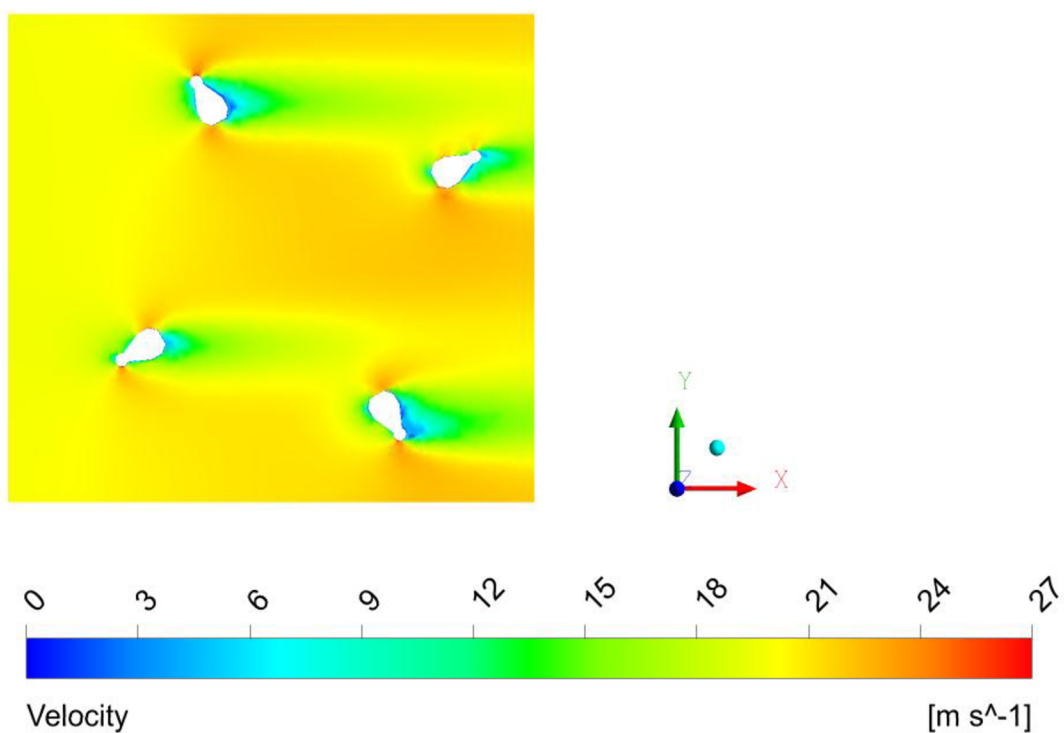


Obrázek 5.4 Rychlostní profil pro rychlost proudění 1 m/s

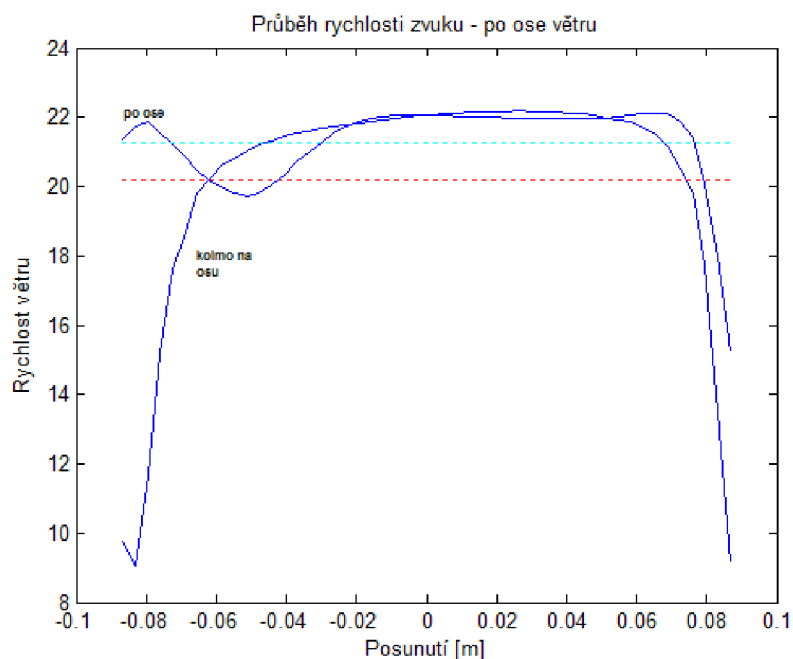


Obrázek 5.5 Rychlostní profil pro rychlost proudění 50 m/s

Z hlediska chyby je nejlepší situace při natočení 30° . Aerodynamické stíny jsou mimo měřicí dráhy. Situaci ukazují následující obrázky. Výsledný vektor větru tedy nelze rekonstruovat jednoduchým způsobem z naměřených časů, ale je nutné nalézt sofistikovanější způsob výpočtu vektoru měřeného proudění. Dalším důležitým faktorem je minimalizace rozměrů piezoměničů a dobrá konstrukční aerodynamická úprava (viz. kapitola 6.8). Další výstupy simulací jsou v příloze 1.

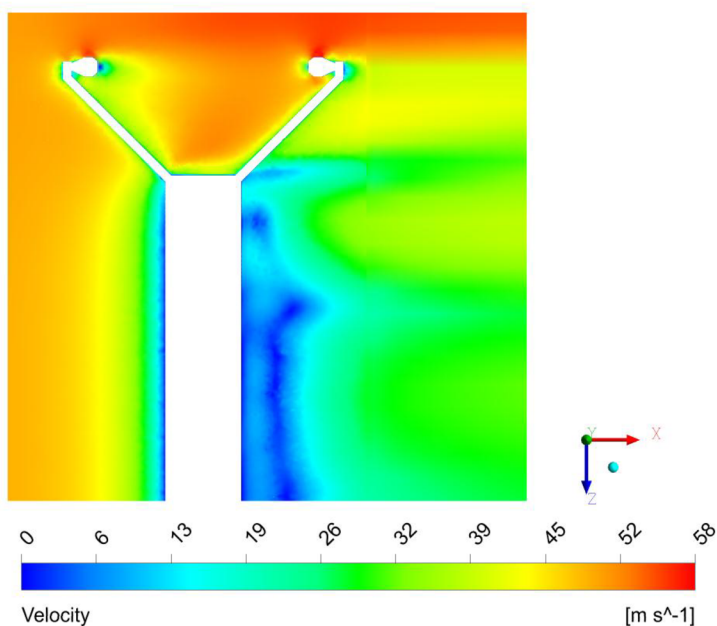


Obrázek 5.6 Rychlostní profil při natočení 30 stupňů (20 m/s)



Obrázek 5.7 Vývoj rychlosti při natočení 30 stupňů (20 m/s)

Dalším zkoumaným faktorem je ovlivnění měření samotnou konstrukcí anemometru. V okolí konstrukce vznikají turbulence, které mohou měření zásadním způsobem ovlivnit (více v kapitole 6.8). Ovlivnění rychlostního profilu při rychlosti proudění 50 m/s je na obrázku 5.8. Je vidět, že zvolená konstrukce ovlivňuje měřicí dráhy (mezi snímači) v dostatečně malé míře. Na závěr této kapitoly chci poděkovat Ing. M. Chludovi za pomoc při výrobě těchto počítačových simulací.



Obrázek 5.8 Ovlivnění rychlostního profilu konstrukcí (50 m/s)

6. Experimentální ultrazvukový anemometr

Z teoretického rozboru vyplývá, že závislost rychlosti šíření akustického vlnění na rychlosti měřeného větru rozhodně není lineární. Zákonitosti jsou popsány vztahy 5,16,17 a 30. Je nutné přidat redundantní měřicí dráhy z důvodu korekce nebo alespoň detekce nežádoucích vlivů (kapitola 4.1). Proto je jednodušší realizovat anemometr ze čtyř měničů, zde se dá využít až 6 měřících drah. Závislost naměřených časů na rychlosti proudění je komplikovaná, pro její analytické vyjádření by bylo potřeba zahrnout aerodynamické parametry anemometru a spoustu dalších faktorů popsanych v kapitole 4.1. Proto je vhodné korigovat hodnoty podle kalibračních křivek naměřených např. ve větrném tunelu. Cílem vývoje prototypu je dosáhnout parametrů porovnatelných s běžně prodávanými ultrazvukovými anemometry.

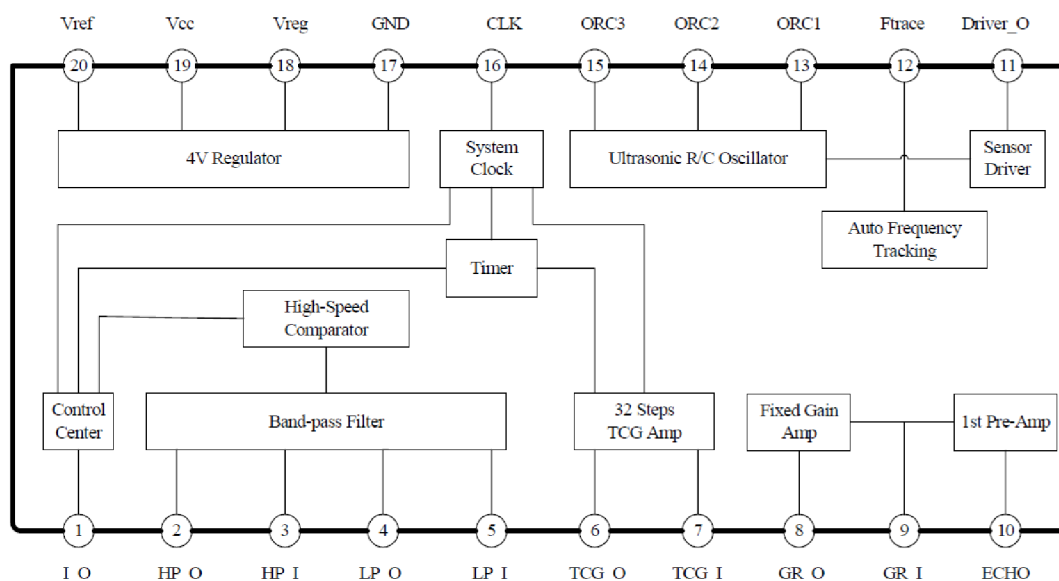
- Maximální rychlost větru 60 m/s
- Nepřesnost měření rychlosti $\pm 3\%$
- Nepřesnost měření směru do $\pm 5^\circ$

V následujících kapitolách budou rozebrány jednotlivé části experimentálního ultrazvukového anemometru a jejich propojení do celkového systému.

6.1 Řadič ultrazvukových piezoměničů Prowave PW0268

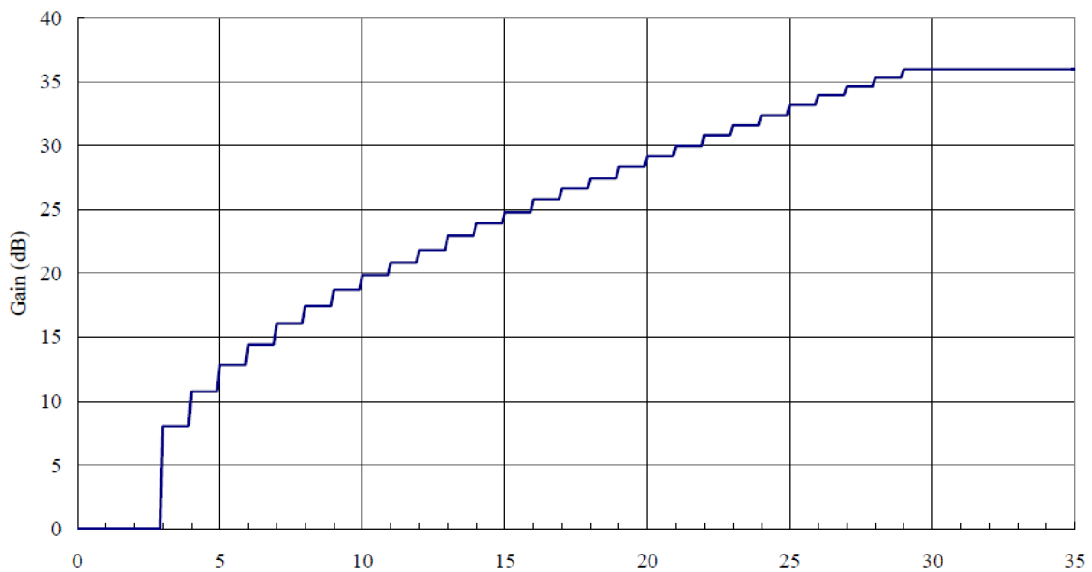
Pro standartní aplikace lze výhodně použít integrovaný obvod od společnosti PROWAVE, který má v sobě integrovány tyto obvody:

- 4V regulátor
- Základnu pro RC oscilátor se sensorovým řadičem (až 250kHz)
- 3 stupně zesílení
 - Předzesilovač
 - Zesilovač druhého stupně
 - 32 krokový zesilovač ovládaný časem (vnitřní hodiny a časovač)
- Výběrový filtr
- Vysokorychlostní komparátor
- Logika pro interface



Obrázek 6.1 Vnitřní skladba integrovaného obvodu PW0268 [19]

Řídící část RC oscilátoru pro generování vstupního signálu pro piezoměniče je složena z externích pasivních součástek (RC) z důvodu možnosti tepelné kompenzace. Proto je důležité, aby tyto součástky byly fyzicky co nejbližší piezoměniči. Jen tak lze dosáhnout optimálního výkonu měniče, protože se generovaný kmitočet oscilátoru posouvá společně se jmenovitou frekvencí piezoměniče. Interface s řídicími obvody tvoří jediný obousměrný logický pin (TTL). Pokud je na tento pin přivedena log. 0, IO začne rozkmitávat piezoměnič. Při rozkmitání piezokrystalu působením zvuku o jmenovité frekvenci se na tomto pinu opět objeví log.0. Tento pin je tedy konstruován jako pin s otevřeným kolektorem a interním pull-up rezistorem. Detekovaný signál je zesílen předzesilovačem, který se používá především pro nastavení požadovaného zesílení (tedy i citlivosti). Hlavní zesilovač je časově řízený, to znamená, že po vyslání zvuku se zesílení hlavního zesilovače zvyšuje. To může způsobit problém při detekci zvuku z jiného zdroje. Řešením je paralelní vysílání dvou piezoměničů (protilehlé měniče vysílají současně), odpojení měniče při vysílání, anebo dostatečně vysoká frekvence hodin.



Obrázek 6.2 Zesílení po vyslání zvukového impulsu [19]

Předpokládejme rychlost zvuku v atmosféře 600m/s (v_s – extrémní rychlost zvuku při extrémních klimatických podmínkách – vysoká teplota, nízká vlhkost) a vzdálenost piezoměničů od sebe 10cm (d). Dobu, za kterou dorazí zvuková vlna do druhého měniče (t_p) lze jednoduše vypočítat podle vztahu 31.

$$t_p = \frac{d}{v_s} = \frac{0,1}{600} = 166,67 \mu s \quad (31)$$

Zesilovač ovládaný časem má 32 kroků. Perioda inkrementace je $220f_s^{-1}$, kde f_s je frekvence systémových hodin. Požadavkem je, aby za dobu t_p měl zesilovač již plné zesílení. Minimální frekvenci systémových hodin lze tedy jednoduše vypočítat podle vztahu 32.

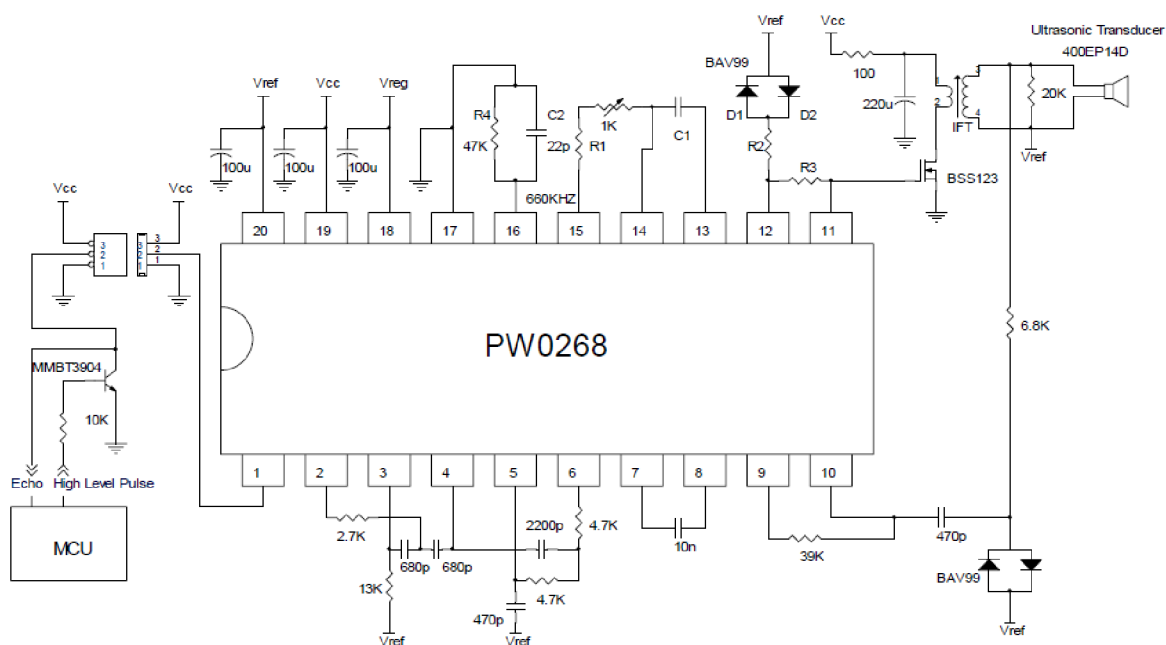
$$f_s = \frac{220}{T_{amp}} \quad (32)$$

$$T_{amp} = \frac{t_p}{32} \quad (33)$$

$$f_s = \frac{220 \cdot 32}{t_p} = 42,24 \text{ MHz} \quad (34)$$

Maximální frekvence hodin je ale 1,5 MHz. Je nutné tedy postupovat následovně

- Snížit rychlost zvyšování zesílení zesilovače
- Vyslat signál z prvního měniče. Frekvence hodin musí být nastavena tak, aby případný odraz nebyl vyhodnocen
- Po dosažení plného zesílení vyslat signál z druhého měniče
- Po dosažení plného zesílení druhého měniče opět vyslat signál z prvního měniče

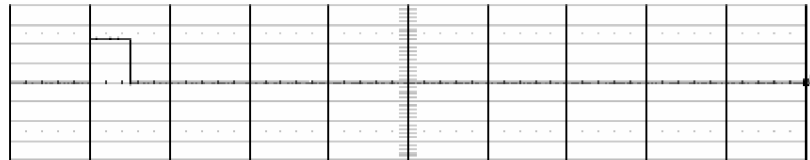


Obrázek 6.3 Typické zapojení obvodu PW0268 [19]

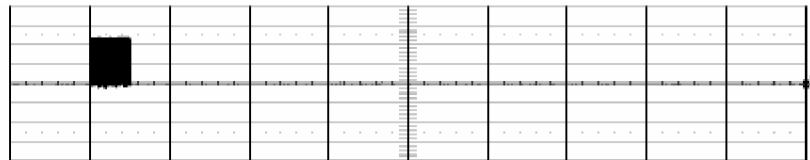
Na obrázku 5.4 je zapojení obvodu PW0268 v aplikaci experimentálního anemometru. Řídící část oscilátoru R1 C1 vytváří kmitočet pro piezoměnič. Trimrem lze doladovat frekvenci v pásmu od 38 kHz do 42 kHz. Počet impulsů se ovládá délkou řídicího signálu na pinu 1. Samotný piezoměnič je připojen k obvodu přes impedanční transformátor (pro vyrovnání impedancí) a zesilovací MOSFET tranzistor. Vysokonapěťový výstup měniče je omezen diodami a přiveden na zesilovací stupně. Nechtěné frekvence jsou odfiltrovány a signál je přiveden na vysokorychlostní komparátor. Po překročení úrovně 0,35V(Vref), komparátor přeplojí a je generován signál na pinu 1. Celý děj je znázorněn na obrázku 5.5.

Maximální délka řídicího impulsu je $396f_s^{-1}$, kde f_s je frekvence systémových hodin, minimální perioda vysílání je $9900f_s^{-1} + \text{délka impulsu}$.

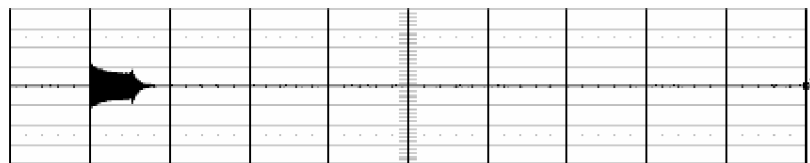
MCU output: H: 1ms/Div., V: 2.0V/Div.



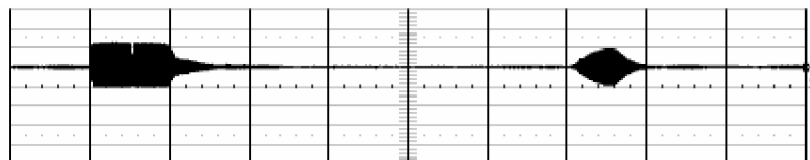
Driver_O (Pin 11): H: 1ms/Div., V: 2.0V/Div.



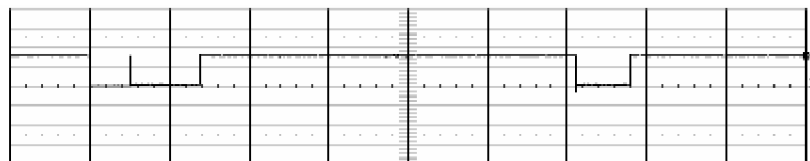
Transducer Oscillation: H: 1ms/Div., V: 50V/Div.



HP_O (Pin 2): H: 1ms/Div., V: 2.0V/Div.



Output at Pin 1 I_O: H: 1ms/Div., V: 5.0V/Div.

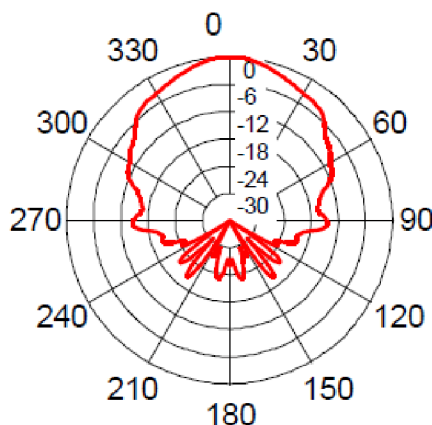


Obrázek 6.4 Průběhy sledovaných signálů na obvodu PW0268 [19]

6.2 Piezoměnič Prowave 400EP18A

Piezoměnič od společnosti PROWAVE typu 400EP18A se zdá být vhodnou komponentou pro stavbu experimentálního ultrazvukového anemometru. Vyhovuje hlavně z hlediska dostatečně široké vyzařovací/přijímací charakteristiky (viz obrázek 5.6). Piezokrystal v měniči má jmenovitou frekvenci 40 kHz. Při vstupním signálu

10Vrms, je ve vzdálenosti 30 cm od měniče akustický tlak 108 dB. Příjímací útlum je -75 dB.



Obrázek 6.5 Vyzařovací charakteristika měniče PROWAVE 400EP18A [20]

Vhodnost použitého snímače dokazují následující výpočty. Maximální rychlost měřeného větru je 80 m/s. Pokud se uvažuje rychlost šíření zvuku 350 m/s, je maximální otočení vyzařovací charakteristiky dána rovnicí 35.

$$\varphi_{max} = 90 - \tan^{-1} \left(\frac{350}{80} \right) = 13^\circ \quad (35)$$

Protože má měnič průměr 1,8 cm, lze volit délku měřicí dráhy podle doporučení v kapitole 4.1.2 20 cm. Útlum ve 20 cm se pak počítá podle rovnice 36.

$$a_{20} = 20 * \log \left(\frac{30}{20} \right) = 3,5 \text{ dB} \quad (36)$$

Atmosférickou absorpci lze uvažovat (i s vlivem větru) na $a_a = -2$ dB. Vlivem otočení vyzařovací charakteristiky (způsobené větrem) je nutné připočítat útlum $a_w = -1$ dB. Pokud se uvažuje měřicí dráha mezi piezoměniči diagonálně, bude tedy vyzařování pod úhlem 45° , čemuž odpovídá útlum $a_d = -5$ dB. Akustický tlak v místě přijímače bude tedy definován vztahem 37 (p_s je generovaný akustický tlak měniče při 30 cm a 10 Vrms).

$$\text{SPL} = p_s + a_{20} + a_a + a_w + a_d = 103,5 \text{ dB} \quad (37)$$

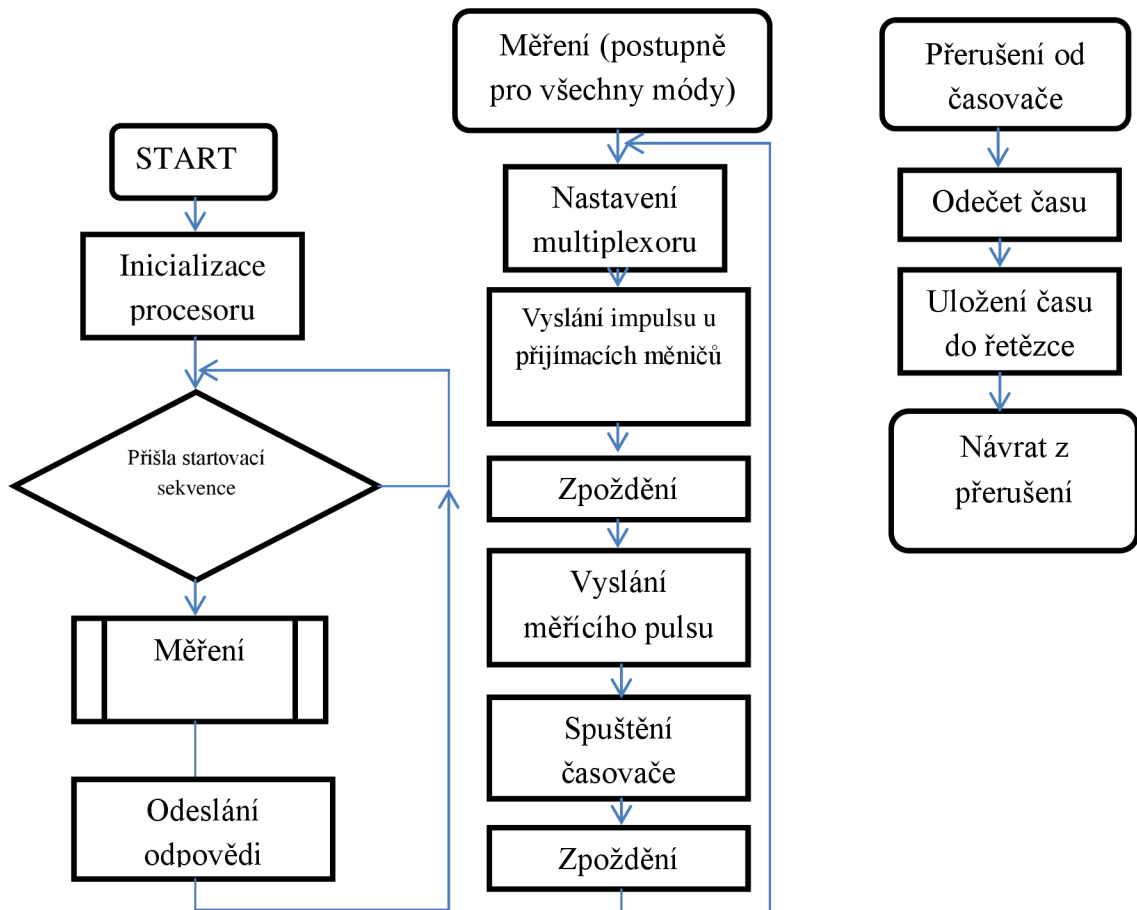
Je nutné připočítat útlum přijímače způsobený nekolmým dopadem zvukových vln na přijímač, výsledný SPL (sound pressure level – akustický tlak) bude tedy 97,5 dB. Citlivost přijímače je -75 dB, tomu odpovídá 0,18 mV/ubar.

Akustický tlak na přijímači je 15 ubar. Příjem signálu se tedy za přijímacím piezoměničem projeví jako napěťová úroveň 2,7 mV. Tato úroveň může být detekována vyhodnocovacími obvody, protože maximální zesílení řadiče PW0268 je 65 dB, tzn. že po zesílení bude mít signál 4,8 V.

6.3 Návrh hardware pro experimentální anemometr

Jako detektor a generátor ultrazvukových impulsů byly použity ultrazvukové piezoměniče Prowave 400EP18A. Při přijatelné velikosti (větší průměr 1cm) zajišťují dostatečný výkon a dostatečně široká vyzařovací charakteristika dovoluje měřit čas šíření ultrazvukového impulsu mezi sousedními čidly (45°). Piezoměnič 400EP18A může fungovat jako generátor i detektor. Pro buzení měničů a vyhodnocení detekovaného impulsu je použit systém postavený na obvodu PW0268. Je nutné připojovat piezoměniče k tomuto obvodu stíněnými vodiči, protože je na výstupu obvodu impedanční transformátor. V případě nedodržení této podmínky přívodní vodiče fungují jako antény a dochází k významnému rušení a znehodnocení naměřených výsledků. Jádrem systému tvoří procesorová deska s obvodem PIC 16F877A. Algoritmus pracuje v následujících krocích (viz obrázek 6.6):

1. Inicializace procesoru
2. Čeká na spuštění měření
3. Pro čtyři čidla opakuje následující funkci
 - a. Nastavení multiplexoru
 - b. Vyslání přijímacího impulsu pro naslouchací čidla (pro nastartování zesílení řízeného časem – viz. kapitola 6.1)
 - c. Vyslání měřicího impulsu
 - d. Odečet času při příjmu impulsu
 - e. Další nastavení multiplexoru, zpět na bod a
4. Uložení naměřených časů do řetězce
5. Odeslání řetězce do PC



Obrázek 6-6 Vývojový diagram řídicího systému

Řídicí procesor je umístěn na desce DLP 2232, která je osazena USB kontrolerem FT2232, který funguje jako interface k PC a programovací rozhraní. Elektrické schéma modulu je v příloze 2. Výstupy z procesoru jsou odděleny tranzistorovým polem ULN 2008. Vstupní část tvoří multiplexor. Protože procesor PIC 16F877 má jen dva CCP moduly na měření časového intervalu, je třeba tyto vstupy multiplexovat. Napájecí část tvoří stabilizátory pro napájení logiky (5V) a budičů (12V). Navrhnuté elektrické schéma a oboustranná deska plošného spoje je v příloze 2. Další důležitou součástí hardwareové stránky návrhu je kvalitní uzemnění všech částí konstrukce anemometru.

6.4 Preprocessing vstupních dat

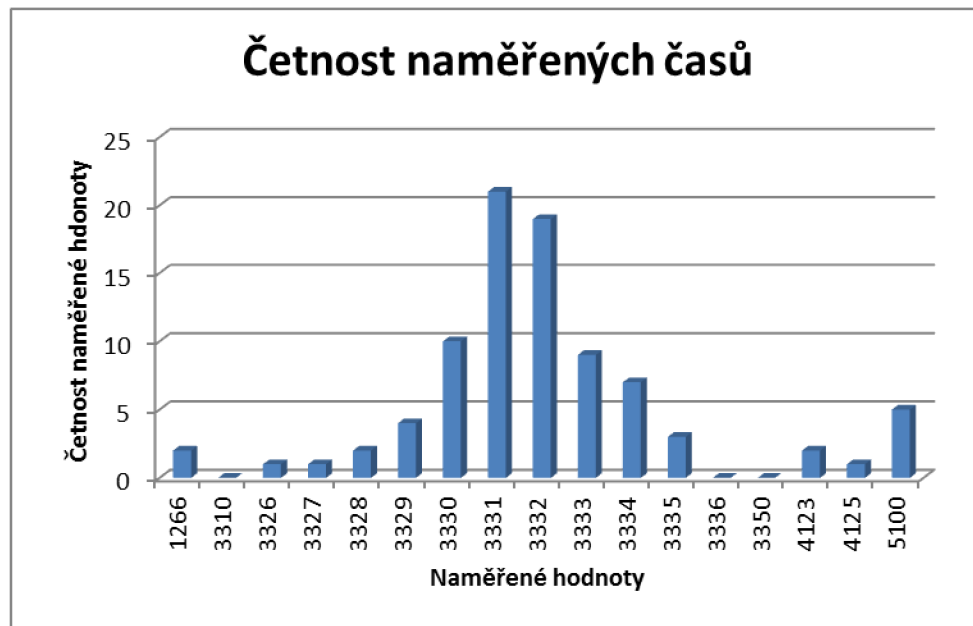
Při měření času šíření zvukového impulsu se vyskytují tyto chyby:

- Zachycení falešného zvukového impulsu
- Ovlivnění měření doby letu turbulencemi a nehomogenním prouděním
- Zesílení a vyhodnocení signálu jiného původu (elmag. signál)
- Vznikající špičky a přeslechy na plošném spoji řídicí a vyhodnocovací jednotky

Odstranění těchto chyb se děje následujícím způsobem:

1. Filtrace irelevantních hodnot (mimo stanovené meze, které mohou být teoreticky naměřeny)
2. Stanovení 30% průměru (průměr z 30% hodnot okolo aritmetického průměru původního souboru)
3. Stanovení směrodatné odchylky od tohoto průměru
4. Pomocí spočítaného Z-skóre, se vytvoří nový soubor, který je výběrem z původního souboru – vyberou se hodnoty, které náležejí do souboru reprezentovaným Gaussovým rozložením s pravděpodobností min. 80%
5. Výsledkem je aritmetický průměr nového (modifikovaného) souboru

Pro znázornění postupu preprocessingu byl vybrán naměřený soubor 87 hodnot času t_{11} při natočení anemometru 0° (viz diagram na obrázku 6.12) a rychlosti proudění 10 m/s. Četnost výskytu jednotlivých hodnot je zobrazena na obrázku 6.7.



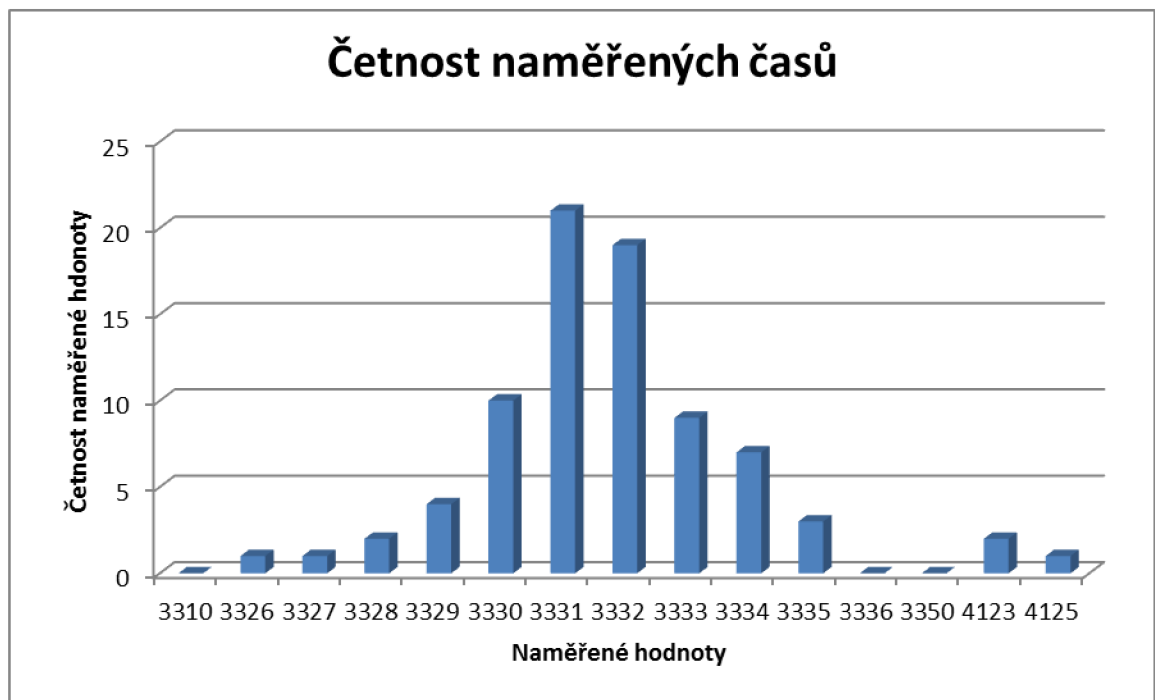
Obrázek 6.7 Četnost naměřených časů pro modelový případ

Hodnoty, které může naměřený čas nabývat, se nachází v ohraničeném intervalu. Hranice intervalu lze vypočítat z maximálního měřeného větru, rychlosti zvuku a vzdálenosti snímačů. Hranici vyjadřuje rovnice 38.

$$t_m = \frac{d}{v_z} \pm d \left(\frac{1}{v_z} - \frac{1}{v_z + v_{max}} \right) = 600 \pm 74 \mu s \quad (38)$$

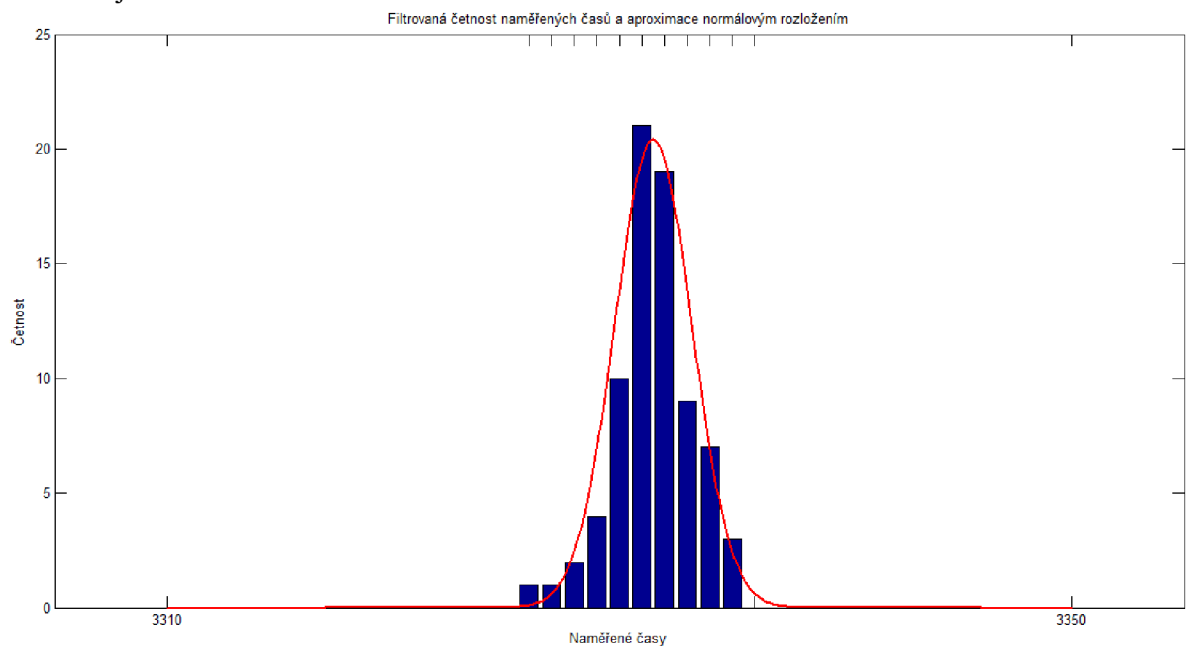
- t_m – interval relevantních hodnot
- d – vzdálenost mezi senzory – 20cm
- v_z - rychlost zvuku
- v_{max} – maximální měřitelný vítr (80m/s)

Je nutné si uvědomit, že výsledné časy jsou měřeny v násobcích 200ns. Interval relevantních vstupních hodnot pro případ, který popisuje rovnice 38 je $3000 \pm 370 \mu s$. Rozložení vstupních dat po filtraci je na obrázku 6.8.



Obrázek 6.8 Rozložení filtrovaných vstupních dat

V dalším kroku se provádí aproximace rozložení pomocí normálního (Gaussova) rozložení, s tím rozdílem, že vrchol pravděpodobnostní funkce je aritmetický průměr z 30% hodnot (vnitřních 30% v seřazené datové řadě). Situaci znázorňuje obrázek 6.9.



Obrázek 6.9 Aproximované rozložení naměřených časů

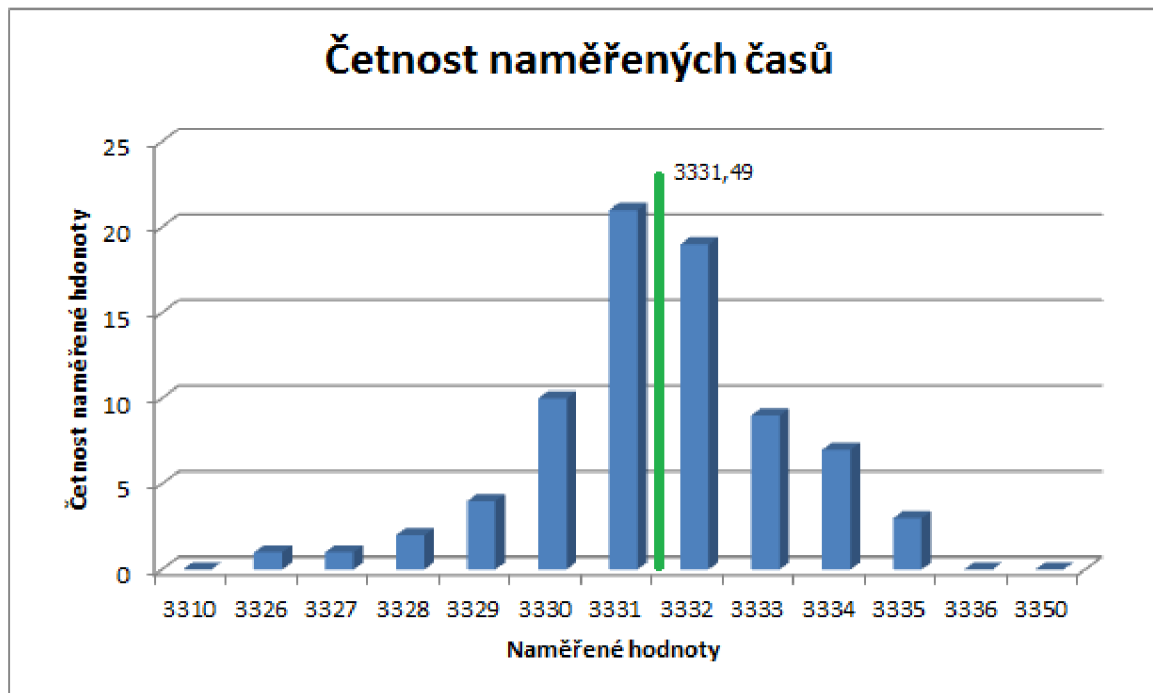
V následujícím kroku je nutné vytvořit nový soubor. Tento soubor bude podmnožinou stávajícího souboru. Budou vybrány pouze prvky, které s minimálně 80% pravděpodobností náleží k stávajícímu normálnímu rozložení. V případě, kdy směrodatná odchylka je větší než stanovená mez (významný vliv turbulencí), lze snížit minimální pravděpodobnost na 40%. K požadované pravděpodobnosti se vypočítá příslušné Z-Skóre, ze kterého lze vypočítat interval pro výběr nové odvozené datové řady. Situaci pro uváděnou datovou řadu ukazuje rovnice 40.

$$t_{max} = \bar{t} z_{80} \quad (39)$$

$$t_{min} = \bar{t} \frac{1}{z_{80}} \quad (40)$$

- t_{min}, t_{max} – hraniční časy
- \bar{t} – střední hodnota naměřeného času
- z_{80} - z-skóre 80% pravděpodobnosti

Z nového výběru se vypočítá aritmetický průměr – tato hodnota je výsledkem preprocessingu. Výsledný datový soubor je zobrazen na obrázku 6.10, zeleně je zvýrazněna výsledná výstupní hodnota. Protože je směrodatná odchylka malá (malý rozptyl dat), je výběrový interval zúžený (90%).

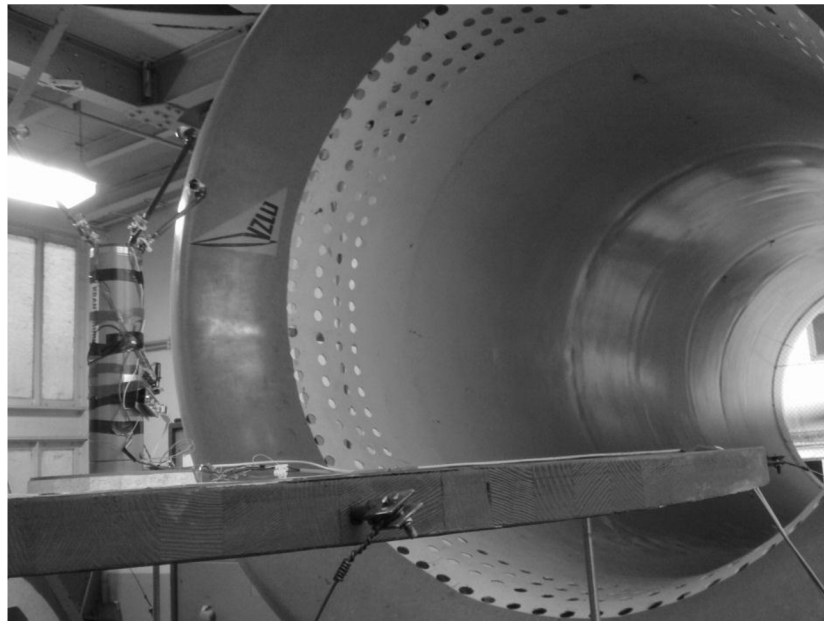


Obrázek 6.10 Výsledná hodnota ze souboru hodnot

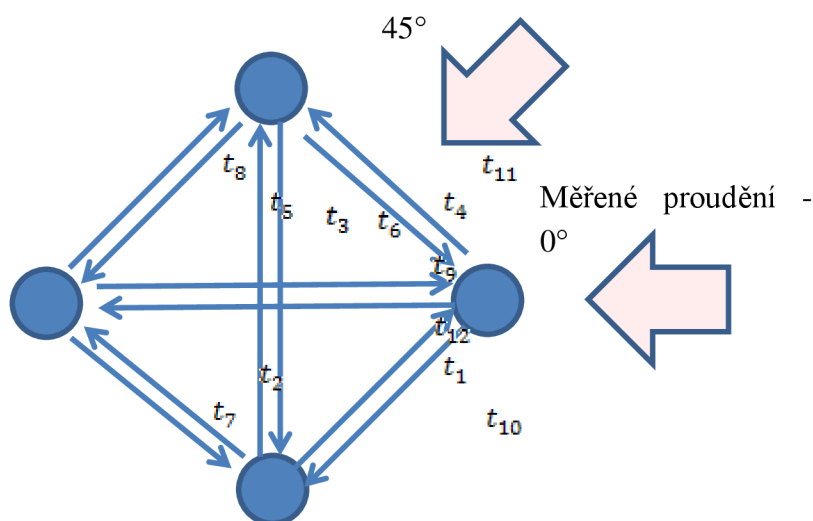
Pomocí procedury preprocessingu naměřených dat je garantováno, že k dalšímu zpracování se dostanou jen relevantní data. Výstupní veličina je aritmetickým průměrem několika vybraných hodnot.

6.5 Kalibrace anemometru – tvorba kalibračního modelu

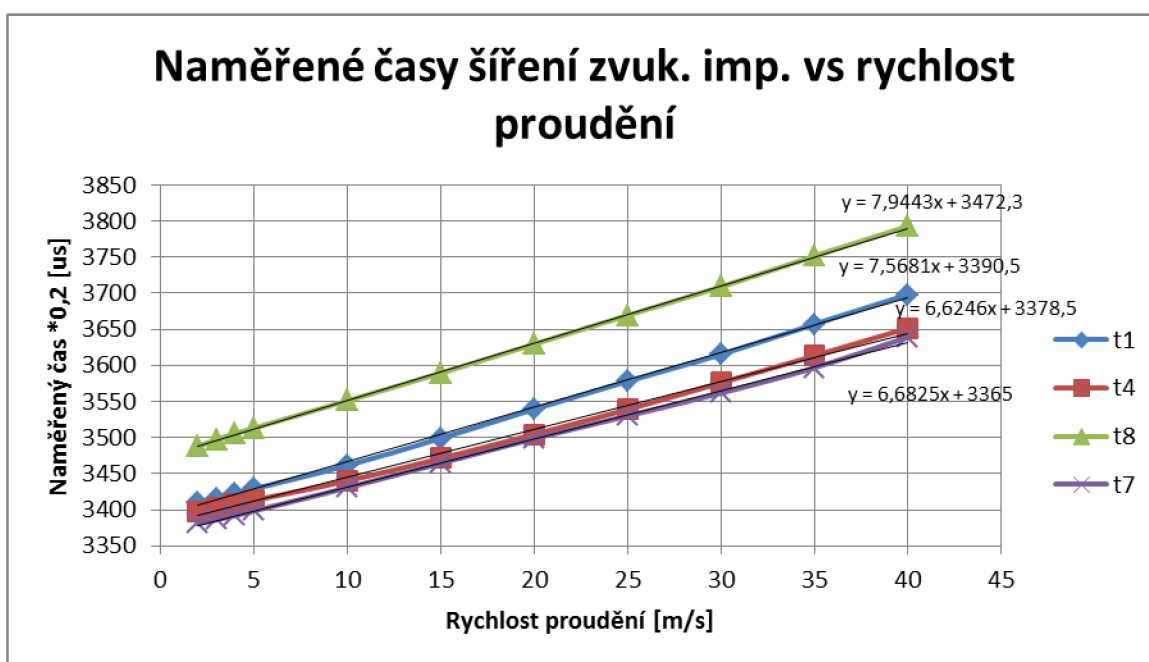
Kalibrace proběhla ve Výzkumném a Zkušebním Leteckém Ústavu a.s., Beranových 130, Praha – Letňany. Byl použit aerodynamický tunel o průměru 1,8m a rozsahu rychlosti generovaného proudění 2 - 40m/s. Proudění bylo generováno ve škále 2,3,4,5,10,15,20,25,30,35,40m/s a natočení měřeného anemometru vůči proudění v úhlech 0,2,5,10,15,20,25,30,35,40,45°. Výstup každého měření obsahoval 100 hodnot všech dvanácti měřených časů (viz. obr. 6.7). Umístění anemometru v otevřené části tunelu ukazuje obrázek 6.11. Měřicí dráhy, jejich smysl vůči generovanému proudění ukazuje obrázek 6.12. Všechny naměřené časy v níže uvedených grafech jsou uvedeny v tomto diagramu, je zde znázorněna jejich poloha a směr.



Obrázek 6.11 Umístění anemometru ve větrném tunelu



Obrázek 6.12 Orientace anemometru při kalibraci



Obrázek 6.13 Naměřené časy při kalibraci (sousední čidla – 0 stupňů)

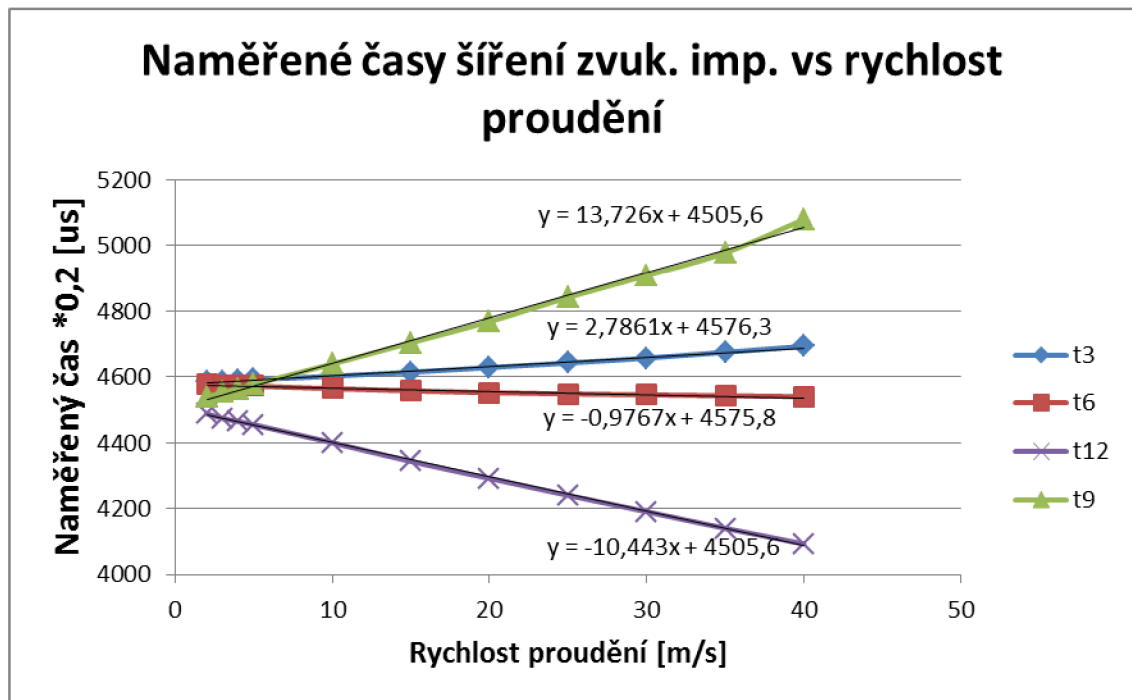
Na obr. 6.13 je znázorněny časy šíření ultrazvukového impulsu na takových měřicích cestách, jejichž smysl je opačný vůči měřenému proudění. Data byla čtena při úhlu dopadajícího proudění 0°. Je vidět, že se stoupající rychlostí proudění také stoupá čas, za který přejde zvukový impuls měřící dráhu. Naměřené údaje jsou proloženy lineární regresní křivkou. Citlivost měření rychlosti větru lze vypočítat

s použitím rovnice regresní křivky podle rovnice 41. Konstanta 0,2 je uvedena z důvodu výpočtu měřeného času v násobkách $0.2\mu\text{s}$. Citlivost se tedy pohybuje okolo $1,4 \cdot 10^{-6} \text{s}^2 \text{m}^{-1}$. Dalším zajímavým faktorem je rozdílnost offsetu regresní křivky (čas šíření zvuku při nulovém proudění). To je zřejmě způsobeno nedokonalou symetrií konstrukce a rozdílným časem zpracování ultrazvukového, potažmo analogového signálu. Tento efekt zapříčiňuje i rozdílnou citlivost na jednotlivých drahách.

$$c_x = 0,2k_x \cdot 10^{-6} [\text{s}^2 \text{m}^{-1}] \quad (41)$$

- c_x - citlivost měření času v měřící dráze x
- k_x - směrnice příslušné regresní křivky

Na obrázku 6.14 jsou uvedeny časy naměřené na delších drahách kolmo a rovnoběžně s okolním prouděním. Je vidět, že čas letu zvukového impulsu, jehož dráha je kolmá na vektor ovlivňujícího větru se jen velmi málo mění se vzrůstající rychlostí proudění. Malé změny jsou zřejmě zapříčiněny nepřesným natočením kalibrovaného anemometru nebo nedokonalou symetrií konstrukce experimentálního ultrazvukového anemometru. Naopak změna v naměřených časech v rovnoběžném směru je maximální. Zde se dosahuje citlivosti $2 \cdot 10^{-6} \text{s}^2 \text{m}^{-1}$ (vypočítáno podle rovnice 41). Je samozřejmé, že pokud se měří čas šíření zvukového impulsu proti směru větru, naměřený čas stoupá s rychlostí větru (kladná směrnice regresní křivky), naopak při měření na opačné dráze je směrnice regresní křivky záporná.



Obrázek 6.14 Naměřené časy při kalibraci (protilehlá čidla) – 0 stupňů

Úhel mezi měřicími drahami, které jsou znázorněny na obrázku 6.13 a 6.14, je 45° (viz. obr. 6.12). Pokud dopadá měřené proudění vzduchu pod úhlem 0° , měl by být poměr citlivosti $\frac{1}{\sqrt{2}}$, výpočet ukazuje rovnice 42.

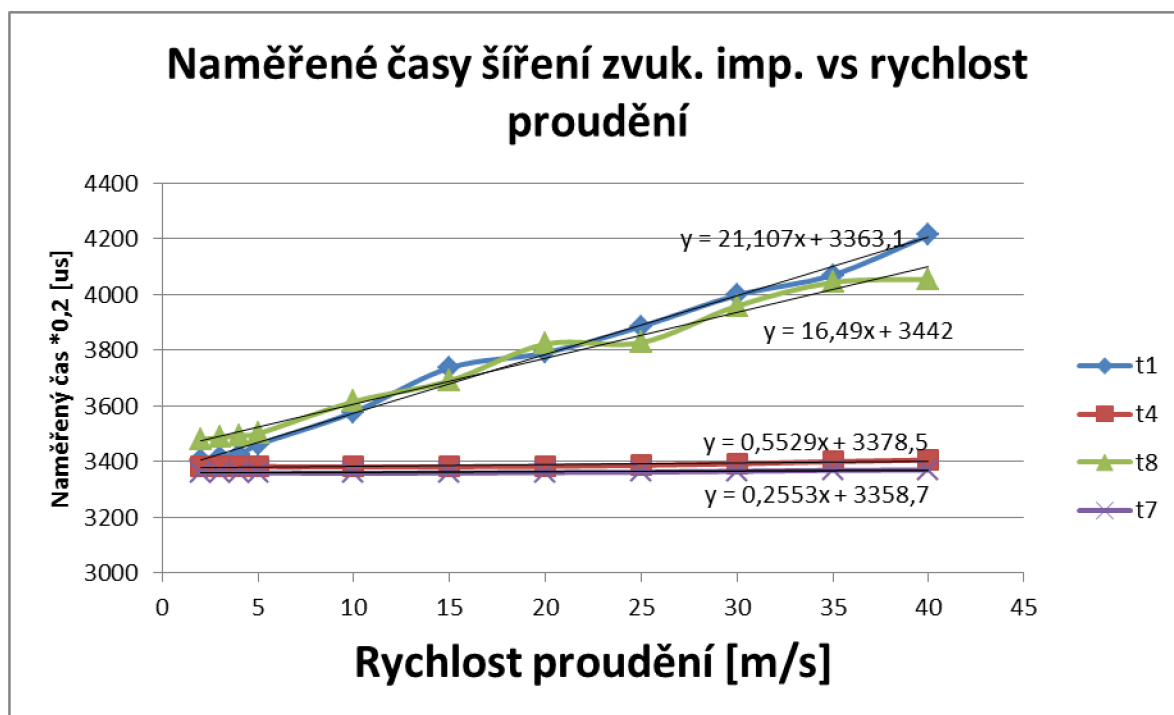
$$\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \doteq \frac{c_{45}}{c_0} \quad (42)$$

- c_{45} – citlivost na měřicí dráze mezi sousedními snímači (kratší dráha)
- c_0 – citlivost na měřicí dráze mezi protilehlými snímači (delší dráha)

Podíl citlivostí se přesně nerovná požadovanému výsledku. Odchylka je způsobena vznikajícími turbulencemi a vznikajícími větrnými štíty, stejně jako nepřesnou konstrukcí přístroje.

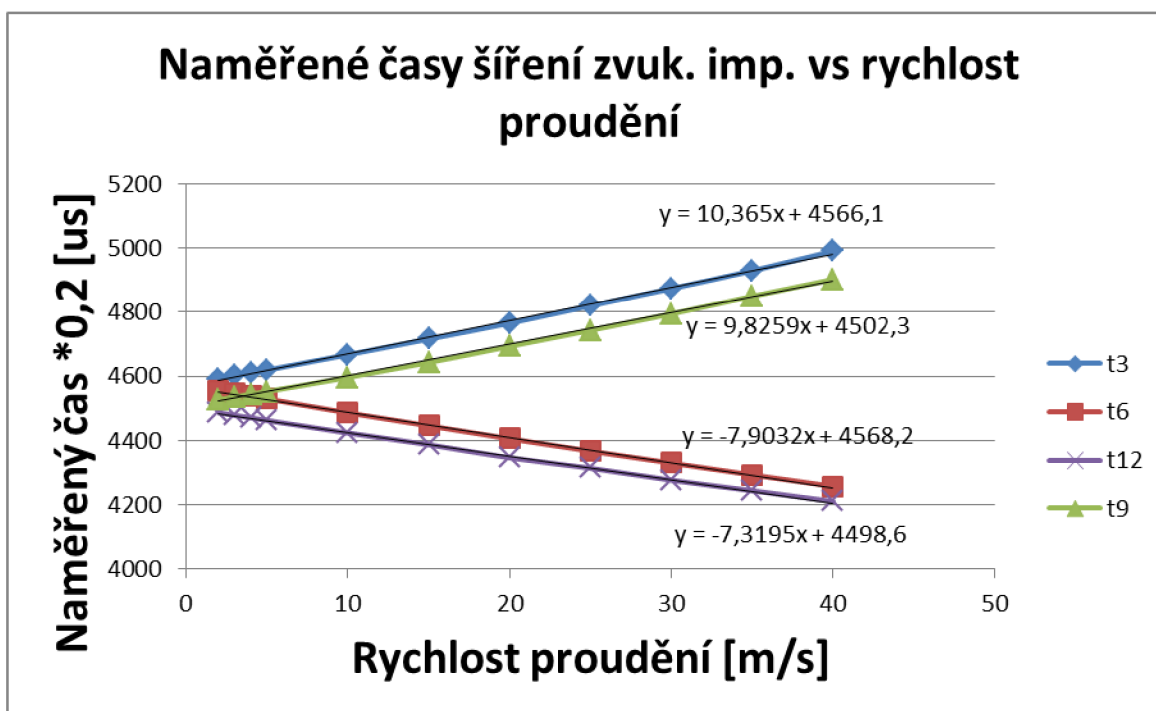
Pokud měřený vítr dopadá pod úhlem 45° je situace obdobná, výstupní data jsou znázorněna na obrázku 6.15. Na tomto obrázku jsou uvedeny stejná časy jako na obr. 6.13. Je vidět, že doby letu ultrazvukového impulsu, jehož dráha je rovnoběžná s generovaným prouděním stoupají. Se vzrůstající rychlostí proudění se tyto doby zvyšují, ale jejich odchylka od regresní křivky je větší. Citlivost tedy oproti

předchozímu případu stoupla. Protože je ale vzdálenost mezi sousedními snímači menší, jsou tyto časy více ovlivněny vznikajícími turbulencemi a větrnými stíny, to je důvod nelineární závislosti mezi rychlostí větru a změnou času doby letu zvukového impulsu. (viz simulace – obr. 5.5, viz kapitola 5). Naopak měřicí dráhy kolmé na dopadající proudění nejsou ovlivňovány téměř vůbec.



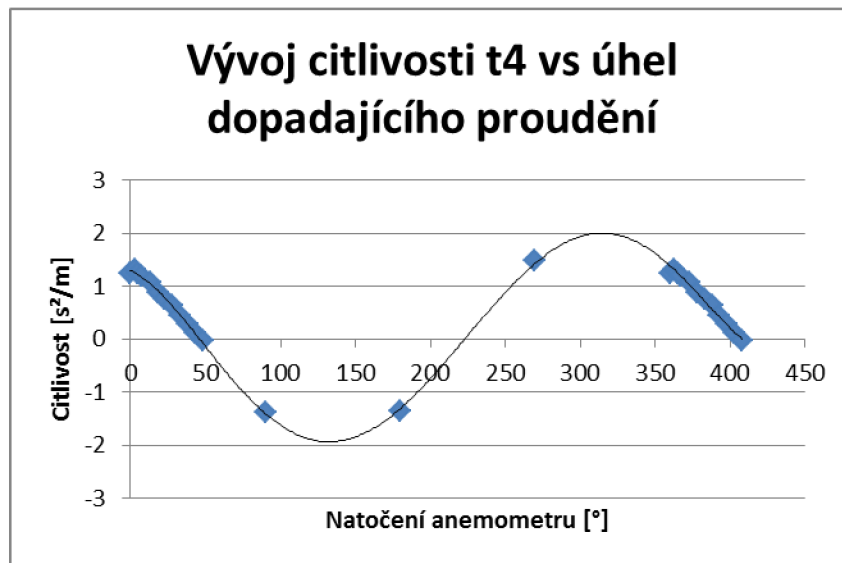
Obrázek 6.15 Naměřené časy při kalibraci (sousední čidla) – 45 stupňů

Obrázek 6.16 ukazuje situaci pro naměřené časy mezi protilehlými snímači (delší dráha). Citlivost zde pochopitelně klesla (vítr dopadá na dráhy pod úhlem 45° - viz obr. 6.12). Naměřené časy, které jsou ve směru větru, stoupají s rychlostí proudění, naopak naměřené časy proti směru větru se vzrůstající rychlostí klesají.



Obrázek 6.16 Naměřené časy při kalibraci (sousední čidla) – 45 stupňů

Je jasné, že u jedné měřicí dráhy se citlivost na měřenou rychlost dopadajícího větru mění s úhlem dopadu tohoto proudění. Pokud vítr fouká v ose měřicí dráhy, je citlivost maximální (úhel absolutního natočení anemometru je jiný než úhel osy měřicí dráhy s dopadajícím prouděním), se vzrůstajícím úhlem se citlivost snižuje až při kolmém dopadu proudění je citlivost nulová. Pro čas t4 (viz obr. 6.12) je průběh zobrazen na obr. 6.17.

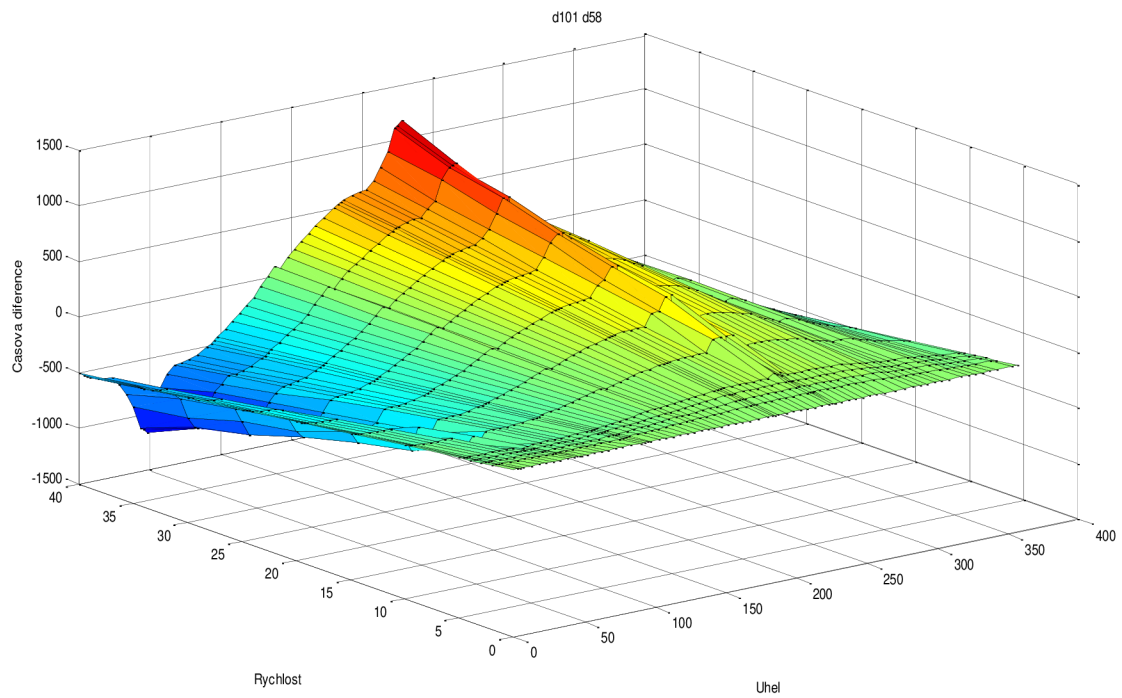


Obrázek 6.17 Vývoj citlivosti t_4 vs. úhel dopadajícího proudění

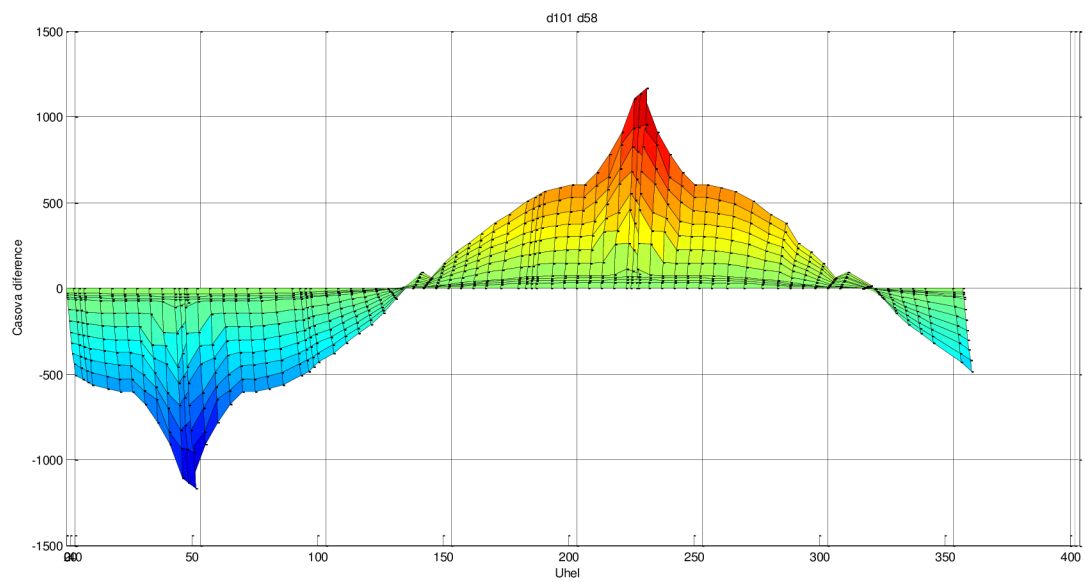
Pro kompenzaci dalších vlivů, které mají vliv na rychlost šíření zvuku (především teplota) lze použít časovou diferenci proti sobě jdoucích měřicích drah (viz. kap. 4.1). Rozdíl převrácených hodnot lze aproximovat obyčejnou diferencí. Tak lze 12 naměřených časů převést na 6 diferencí. Časové diference, které mají stejný vektor v prostoru (např. časy t_5, t_8 a t_1, t_{10} – viz obr. 6.12), lze sjednotit (např. arit. průměr). Důsledkem toho lze redukovat vstupní vektor na 4 diference. Situaci popisuje rovnice 43.

$$t_{58} = \frac{(t_5 - t_8) + (t_1 - t_{10})}{2} \quad (43)$$

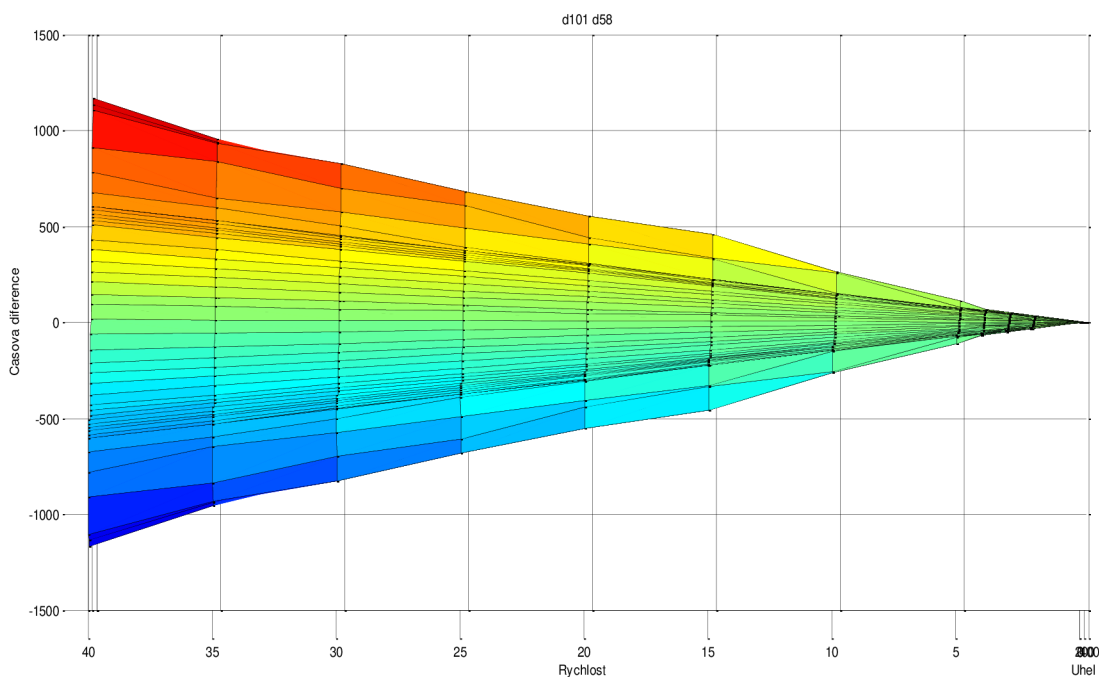
Rychlost a úhel dopadu proudění jsou nezávislé veličiny, proto lze závislost jedné časové diference na těchto proměnných zobrazit ve 3D grafu (obrázek 6.18). Na obrázku 6.19 je pohled z osy X, kde je vidět změna diference v závislosti na úhlu dopadu proudění. Špičky přičtené k sinusovce jsou zřejmě zapříčiněny vznikem turbulencí a aerodynamických stínů v extrémních úhlech. Při pohledu z osy Y je vidět monotónní změna diference se vzrůstající rychlosti proudění. Diference může být záporná nebo kladná, podle úhlu dopadajícího proudění (je v zakryté dimenzi). Pohled z osy Z znázorňuje pomocí barevného odlišení závislost časové diference na vektoru proudění (úhel a rychlost). Je vidět, že kombinace nezávislých veličin, pro které je výstupní veličina (diference) konstantní, tvoří parabolu (paraboly stejné barvy). Toho se využívá pro cílový výpočet vektoru proudění (viz. kapitola 6.6). 3D graf závislosti jiné diference je na obrázku 6.22.



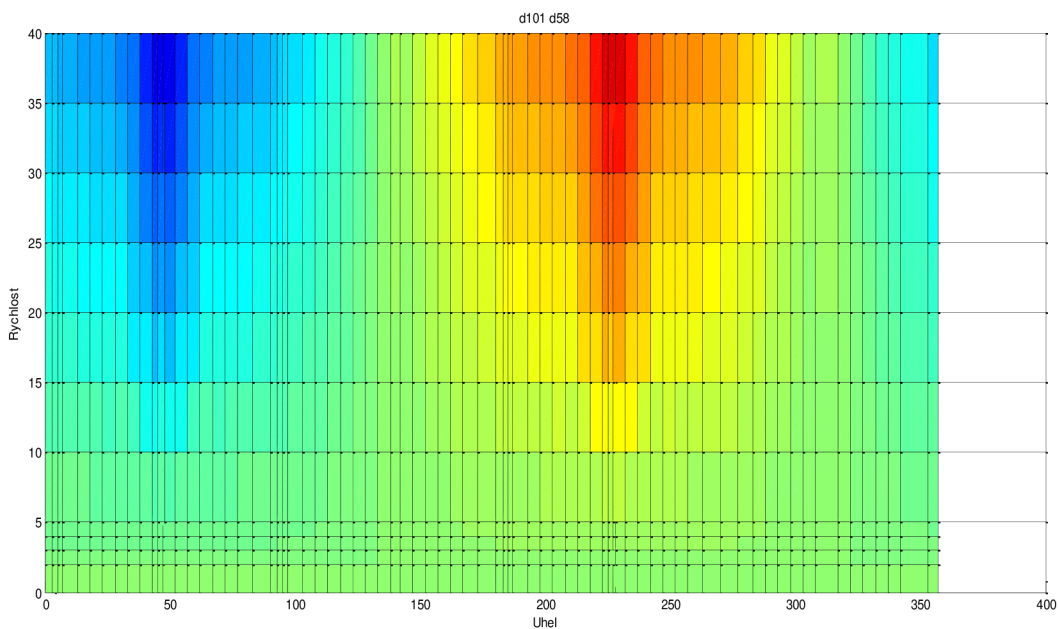
Obrázek 6.18 Kalibrační 3D graf pro diference d101 (d58)



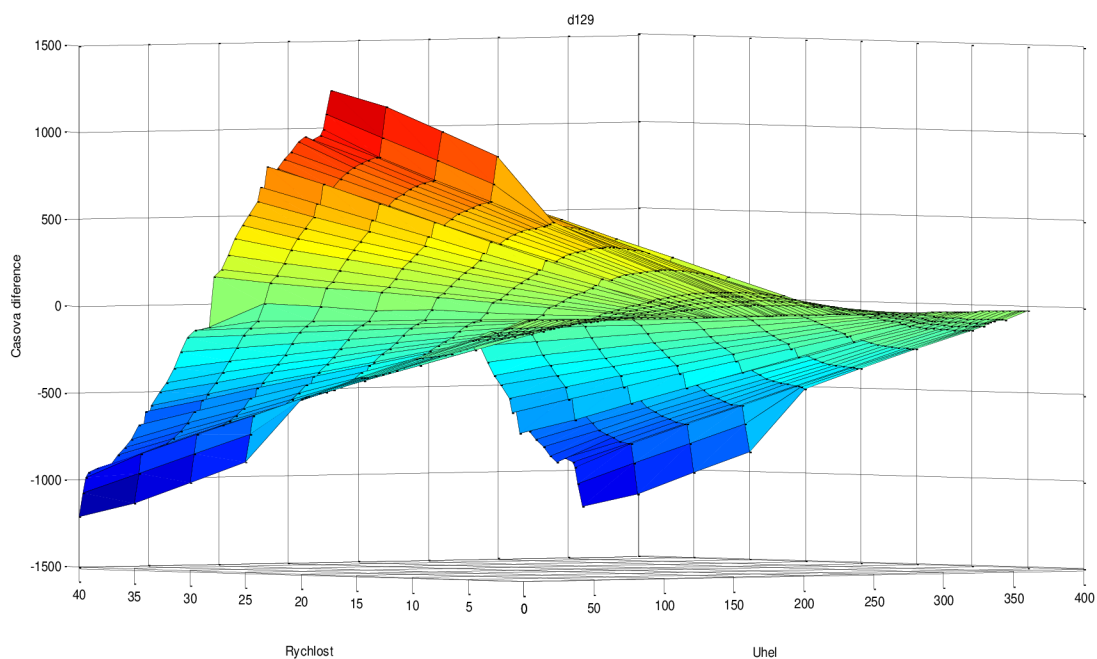
Obrázek 6.19 Kalibrační 3D graf - pohled z osy X



Obrázek 6.20 Kalibrační 3D graf - pohled z osy Y



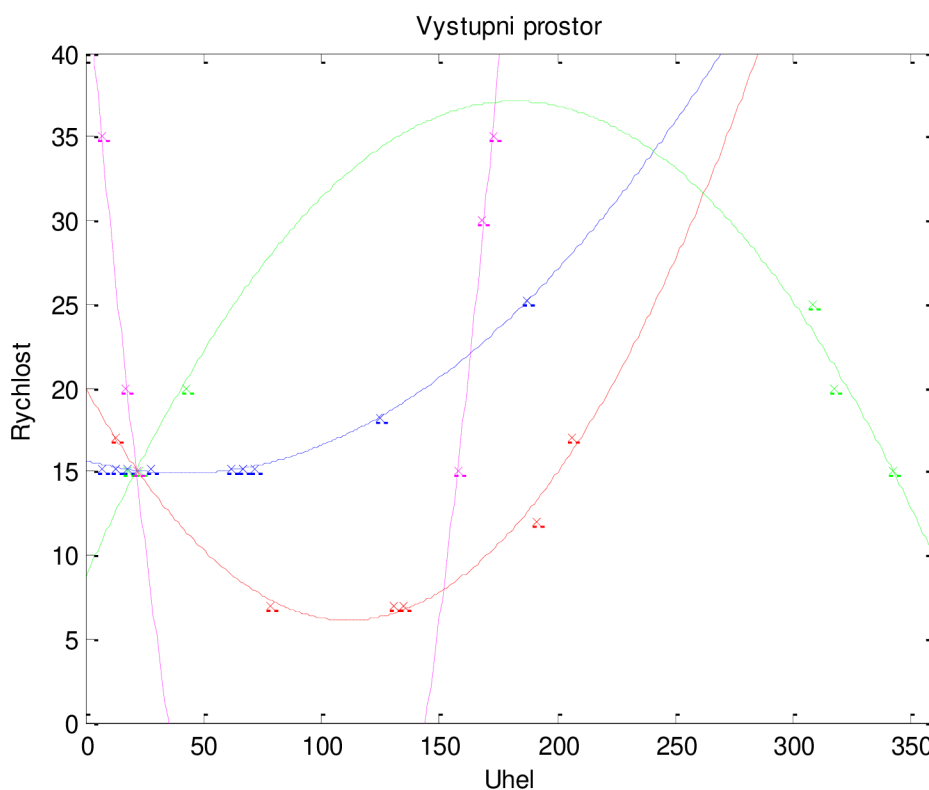
Obrázek 6.21 Kalibrační 3D graf - pohled z osy Y



Obrázek 6.22 Kalibrační 3D graf pro diference d_{129}

6.6 Vyhodnocení vektoru měřeného proudění

Závislost mezi naměřenou časovou diferencí a výstupním vektorem měřeného proudění (rychlost a úhel dopadu měřeného proudění) není pro jednu měřicí dráhu jednoznačná. Fyzicky je k dispozici 6 měřicích drah. Protože dráhy d_{114} , d_{27} a d_{58} , d_{101} jsou rovnoběžné, lze je sloučit (průměrováním) do jedné měřicí dráhy. K dispozici jsou tedy 4 časové diference a z nich vypočítané množiny možných výsledků (parabolický tvar – viz obr. 6.21). Naměřený vektor proudění tedy lze vypočítat z průsečíků těchto čtyř parabol (viz. obrázek 6.23).

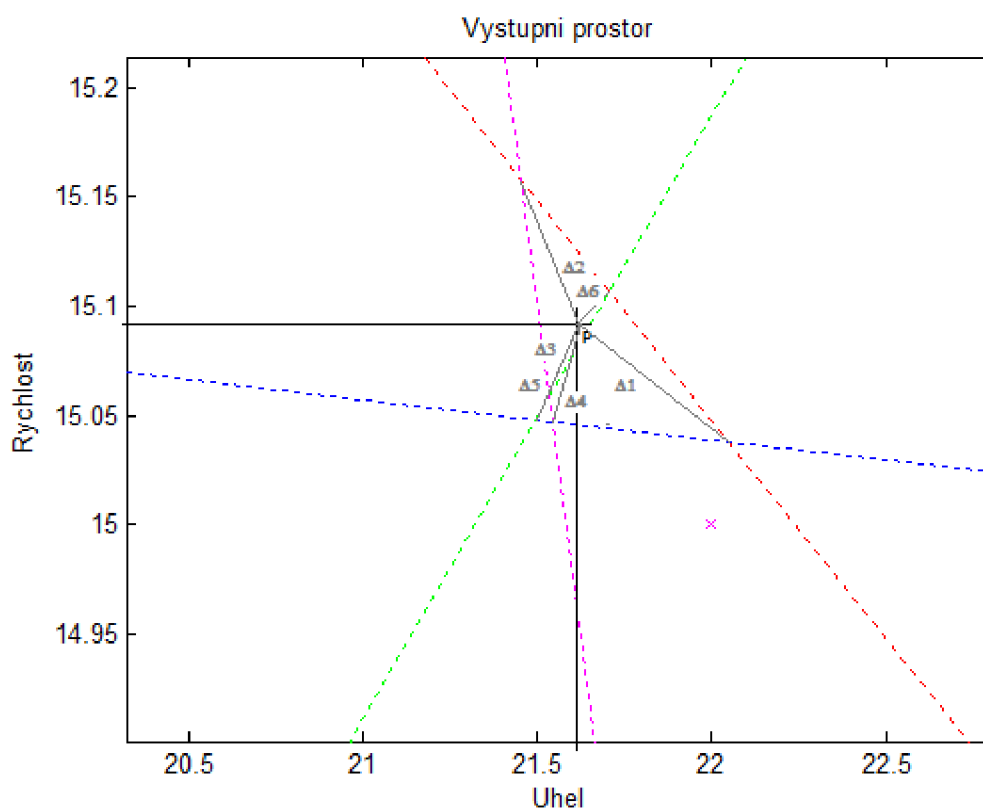


Obrázek 6.23 Výstupní prostor rekonstrukce vektoru proudění

Vlivem nepřesností (nehomogenita měřeného proudění, geometrická nesymetrie, různé zpoždění v elektrických obvodech) se zpravidla vypočítané (polynomickou interpolací) paraboly neprotínají v jednom bodě. Toto lze řešit pomocí aritmetického průměru. Rozptyl průsečíků udává přesnost výstupního údaje. Nejistota typu A reprezentuje směrodatnou odchylku souboru, počítá se podle vztahu 44.

$$u_a = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (44)$$

Protože jsou veličiny dvourozměrné (rychlost a úhel), je nutné vypočítat nejistoty pro každou složku zvlášť. Používá se koeficient rozšíření $k = 2$. V tomto případě spadá 95% hodnot do vypočítaného intervalu (za předpokladu normálně rozděleném rozložení). Hodnotu výsledku z předkládaného příkladu lze tedy zapsat pomocí rovnic 45 a 46. Situaci ukazuje obrázek 6.24. Výsledná přesnost je dostatečně velká. Podle měření jiného přístroje (pracující na výpočtu rychlosti větru z rozdílu tlaků), byla rychlost větru $21,5 \pm 2$ m/s a úhel $15 \pm 3^\circ$. Vypočítané intervaly se tedy překrývají.



Obrázek 6.24 Predikce výstupního vektoru měřeného proudění

$$V = 21,66 \pm 0,19 \text{ m/s} \quad (45)$$

$$A = 15,08 \pm 0,04^\circ \quad (46)$$

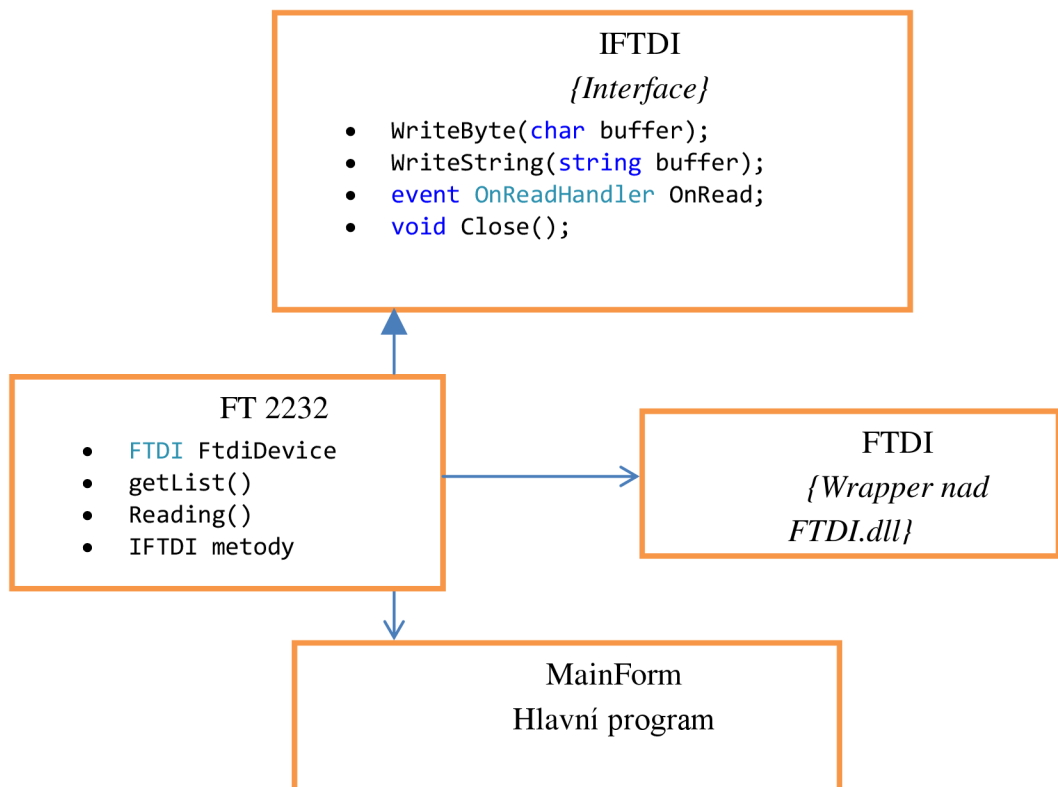
6.7 Ovládací a vizualizační software

Software pro sběr a vizualizaci dat byl naprogramován v programovacím jazyce C#.NET v prostředí Microsoft Visual Studio 2010. V programu jsou implementovány následující funkce:

- Obsluha USB rozhraní
 - Detekce nově připojeného zařízení
 - Výběr a připojení k USB zařízení
- Komunikace se zařízením
 - Vysílání a obsluha identifikačních zpráv
 - Start měření
 - Příjem a dekodování výsledků měření

- CRC kód
- Vizualizace naměřených časů a rychlostí
- Zadávání parametrů výpočtu
- Dekódování a předání naměřených hodnot dalším procesům
- Ukládání hodnot do XML souboru
- Logování chodu programu

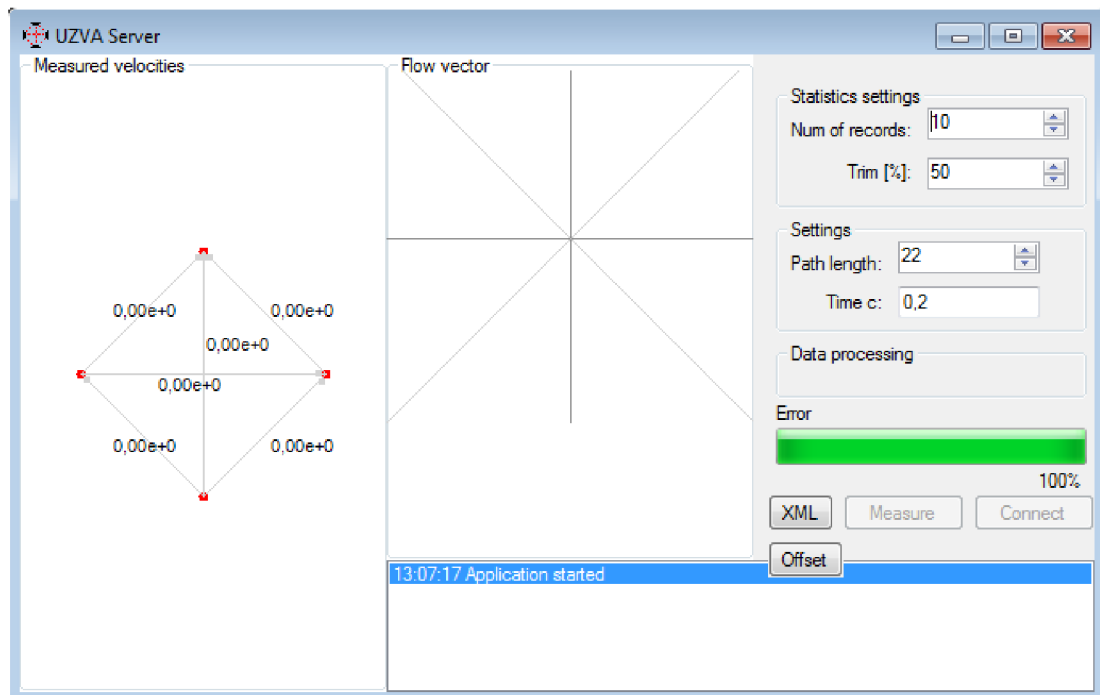
Základ USB komunikace tvoří třída FTDI která zapouzdřuje dynamicky linkované knihovny pro připojení k USB procesoru FT 2232 od společnosti FTDI. Třída FT2232 (implementuje rozhraní IFTDI) je již specifikována pro komunikaci s řídicím procesorem. UML diagram pro modelování tříd objektů komunikační části je na obrázku 6.25.



Obrázek 6-25 Topologie SW

Po připojení k vybranému zařízení a odstartování měření program pošle startovací paket. Po přijetí odpovědi program dekóduje zprávu a vypočítá CRC kód. Naměřené časy zobrazí v logovacím okně, případně uloží do XML souboru. Z časů vypočítá (na základě zadaných parametrů) naměřené rychlosti na příslušných měřicích drahách a graficky je zobrazí. Dále provede transformaci souřadnicového systému podle vztahů 8 a 9 a zobrazí výstupní vektory proudění. Dále je nutné předat

výsledky nadřazenému algoritmu pro zpracování (přes XML soubor, sdílenou paměť nebo přímo volání externí DLL knihovny). Uživatelský interface programu je na obrázku 6.26.



Obrázek 6.26 Uživatelský interface SW

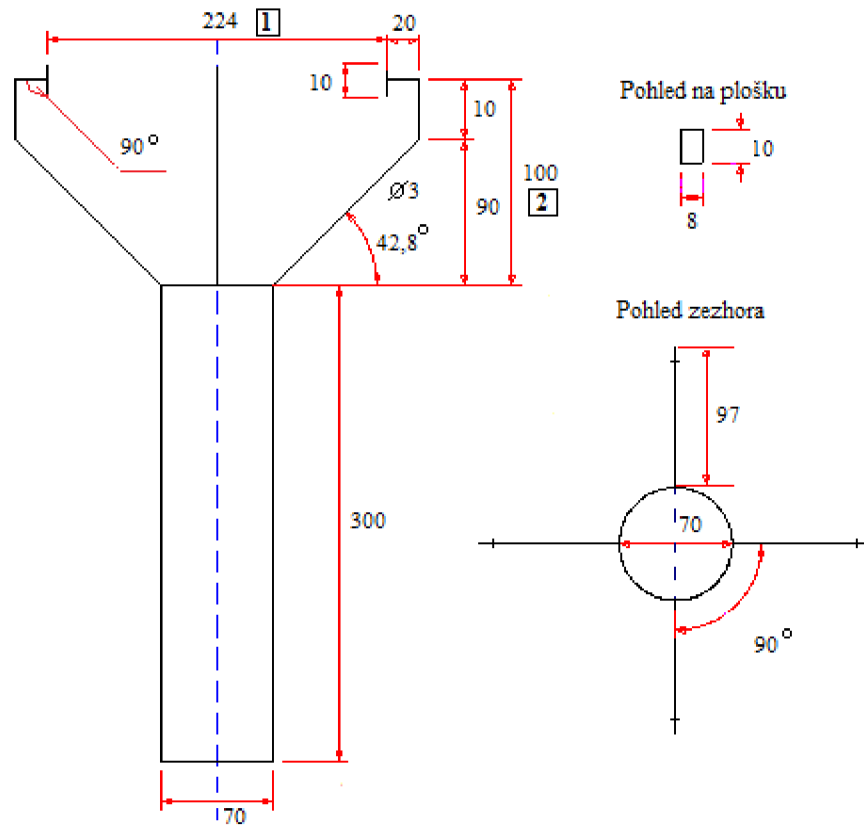
6.8 Optimalizace konstrukce anemometru

Na konstrukci ultrazvukového anemometru se kladou následující požadavky:

- Symetrické umístění čtyř piezoměničů
- Aerodynamické uchycení piezoměničů
- Dostatečná vzdálenost podstavy od měřící plochy – kvůli ovlivnění měřících drah turbulencemi
- Optimální vzdálenost mezi piezoměniči

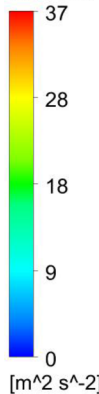
Na obrázku 6.27 je výkres navrženého experimentálního anemometru. Vzdálenost měřících ploch od podstavy je dostatečná. Tento předpoklad lze ověřit pomocí simulace. Simulace znázorňuje turbulentní kinetickou energii okolo anemometru (obrázek 6.28). V ose Z je kinetická turbulentní energie minimální,

proto lze z tohoto hlediska tuto konstrukci použít. Ovlivnění rychlosti měřeného proudění znázorňuje obrázek 5.8.



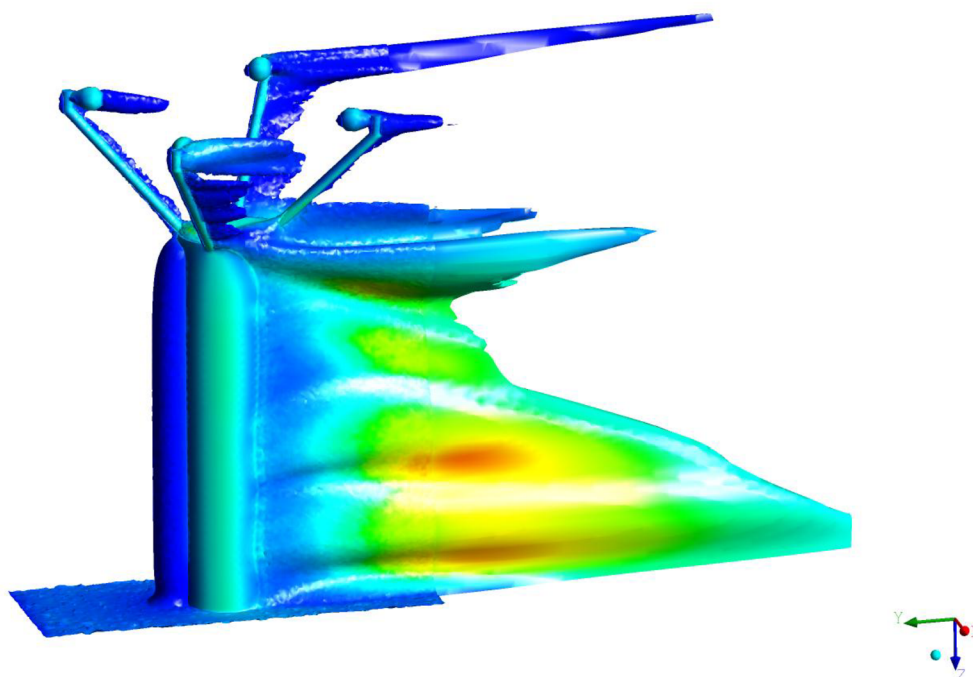
Obrázek 6.27 Konstrukce anemometru

Turbulence Kinetic Energy
Isosurface 1



37
28
18
9
0
[m² s⁻²]

ANSYS
Noncommercial use only



Obrázek 6.28 Kinetická turbulentní energie

S klesající vzdáleností mezi piezosnímači roste nepřesnost vlivem aerodynamického stínu. Výhodou bližšího uspořádání snímačů je menší měřicí plocha, tím pádem menší nároky na homogenitu měřícího proudění. Vzdálenost 20cm je rozumný kompromis mezi těmito požadavky. Naměřený čas má vůči změnám proudění integrační charakter (viz. kapitola 4.1), naměřený čas lze tedy vypočítat podle vztahu 6. Vypočítaná chyba podle vztahu 44 je přijatelná.



Obrázek 6.29 Experimentální anemometr

7. Závěr

V kapitole 4.1 je uveden teoretický rozbor měření rychlosti větru pomocí šíření ultrazvukových vln. Je vidět, že naivní řešení (změna času přímo úměrná rychlosti ovlivňujícího prostředí) nelze použít. Tento fakt rovněž potvrzují výsledky simulací rychlostního profilu a kalibrace v aerodynamickém tunelu. Jedná se tedy o poměrně složitou úlohu, definovanou mnoha nelineárními rovnicemi. Koeficienty těchto rovnic závisí zejména na aerodynamických parametrech ultrazvukového anemometru. Je tedy těžké tyto koeficienty formulovat. Analytické řešení predikce výstupního vektoru měřeného proudění na základě změřených časů je tedy téměř nemožné. Do výpočtu dále vstupují vnější parazitní vlivy. Především se jedná o teplotu, ale i vlhkost a atmosférický tlak. Je nutné tyto vlivy eliminovat. Při použití dostatečně výkonných výpočetních prostředků lze vliv těchto parametrů jednoduše matematicky eliminovat za použití časové diference naměřených časů proti sobě jdoucích ultrazvukových impulsů (rovnice 5). Na základě teoretického podkladu a provedených simulací byl navrhnout a realizován experimentální ultrazvukový anemometr (kapitola 6). Z přehledu vyráběných ultrazvukových anemometrů je zřejmé, že současné anemometry jsou, co se týká jejich parametrů, velmi podobné. Některé sériově vyráběné anemometry jsou schopny měřit všechny tři složky větru. Pro návrh experimentálního anemometru byly vytyčeny parametry již existujících anemometrů tak, aby byl navrhnoutý anemometr porovnatelný s ostatními profesionálními přístroji. Byl kompletně navržen hardware (piezoměniče, řadiče, řídicí jednotka) i software (mikrokontrolér, PC) pro správnou funkci přístroje. Těžištěm mnou navrhovaného přístupu je zpracování dat v PC. Naměřená data se filtrují a transformují do výstupního prostoru, ze kterého se rekonstruuje vektor měřeného proudění. Pro transformaci vektoru je nutné použít kalibrační křivky, které byly vypočítány při kalibraci ve větrném tunelu. Aerodynamický vliv konstrukce na měřené proudění je značný, proto je vhodné samotnou konstrukci přístroje co nejlépe optimalizovat (kapitola 6.8). Do budoucna je nutné provést úplnou kalibraci přístroje, protože nyní používané kalibrační křivky jsou z větší části interpolované. Velká míra interpolace může výsledek zatížit velkou chybou. Dále by bylo vhodné navrhnout lepší konstrukci přístroje a použít menší piezoměniče.

8. Seznam literatury

- [1] Baker. R.C. *Flow measurement handbook*. Cambridge University Press, 2000. 564 s. ISBN 9780521480109.
- [2] R.S. Hunter. *Wind Speed measurement and use of cup anemometry*. Executive Committee of the International Energy Agency Programme for Research and Development on Wind Energy Conversion System, 2003. 60 s. ISBN 87-550-3319-9
- [3] Vaisala Instruments. *Vaisala Weather Transmitter WXT510 The Most Essential of Weather*, 2005 <<http://www.hobeco.net/pdf/WXT510.pdf>>
- [4] *Sensory tlaku*[online]. ČVUT-FELK. <<http://edux2.felk.cvut.cz/modules/edux/>>
- [5] *Zvuk*[online]. Jihočeská Univerzita - Pedagogická fakulta, <http://home.pf.jcu.cz/~pepe/priklady/Formaty_grafika_zvuk_video/zvukove_formaty.pdf>
- [6] Barry Truax Simon. *The sonic research studio school of communication Simon Fraser University* [online], <<http://www.sfu.ca/sonic-studio/>>
- [7] E. Piercy and T. F. W. Embleton. *Review of noise propagation in the atmosphere*. Wyle Laboratories, 1997. 38 s. ISSN: 0001-4966
- [8] D. Heinemann, D.Langner. *Measurement and Correction of Ultrasonic Anemometer Errors and Impact on Turbulence Measurements*. Carl von Ossietzky University. 4s.
- [9] A. Cuerva, A.S. Andrés. *On sonic measurement theory*. *Journal of Wind Engineering*, 2000. 55s. ISSN 1361-6161
- [10] J.C.Wyngaard, S.F. Zhang. *Transducer-Shadow Effect on Turbulence Spectra Measured by Sonic Anemometers*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1985. 10s. ISSN 0739-0572
- [11] C.A. Friehe. *Effects of Sound Speed Fluctuations on Sonic Anemometer Measurements*. University of California. 4s. 1975
- [12] T.Nakai, M.K. van der Molen. *Correction of sonic anemometer of angle errors*. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2006. ISSN 0168-1923
- [13] J.M.Wilczak, S.P.Oncley, S.A.Stage. *Sonic anemometer tilt correction algorithms*. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2000. ISSN 0006-8314
- [14] D.Anfossi, D. Oettl, G. Degrazia, A. Goulart. *An Analysis of Sonic Anemometer Observations in Low Wind Speed Conditions*. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005
- [15] Y.Kobori, Y. Morita. United States Patent 3,693,433. 1972

- [16] D.J.Rottier, F.J. Ferrin. United States Patent 4,031,756. 1977
- [17] J. A. G. Nicoli. France Patent 4,174,630. 1979
- [18] S.K. Ammann, Cuperino, United States Patent 5,343,744. 1994
- [19] *PW0268 Datasheet*. Pro-Wave Electronics Corporation.
<<http://www.prowave.com.tw/pdf/sonaric.pdf>>
- [20] *400EP18A Datasheet*. Pro-Wave Electronics Corporation.
<<http://www.prowave.com.tw/pdf/T400ep18a.PDF>>
- [21] *DLP-2232PB-G Datasheet*. DLP Design, Inc. Řím. 2010. 15s.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Výstupy z počítačových simulací

Příloha 2. Elektrická schémata

Příloha 3. CD – Řídící SW

Seznam zkratk

SW – Software

HW – Hardware

SPL – Sound pressure level – Akustický tlak

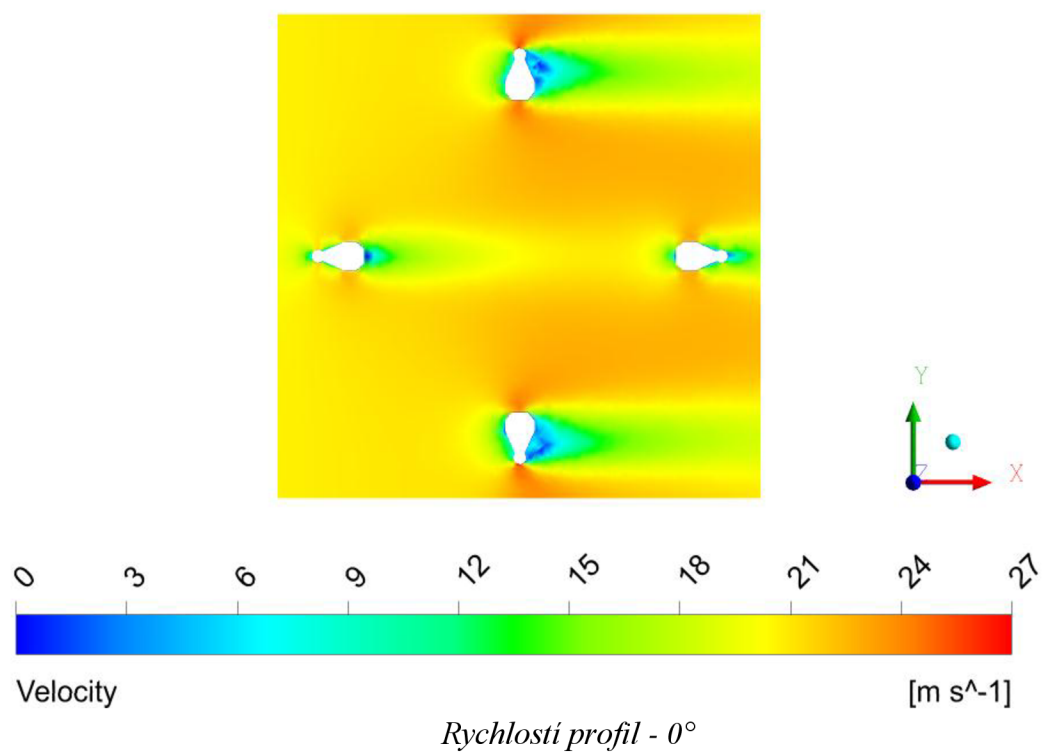
CCP – Compare,Capture,PWM – Modul pro měření času

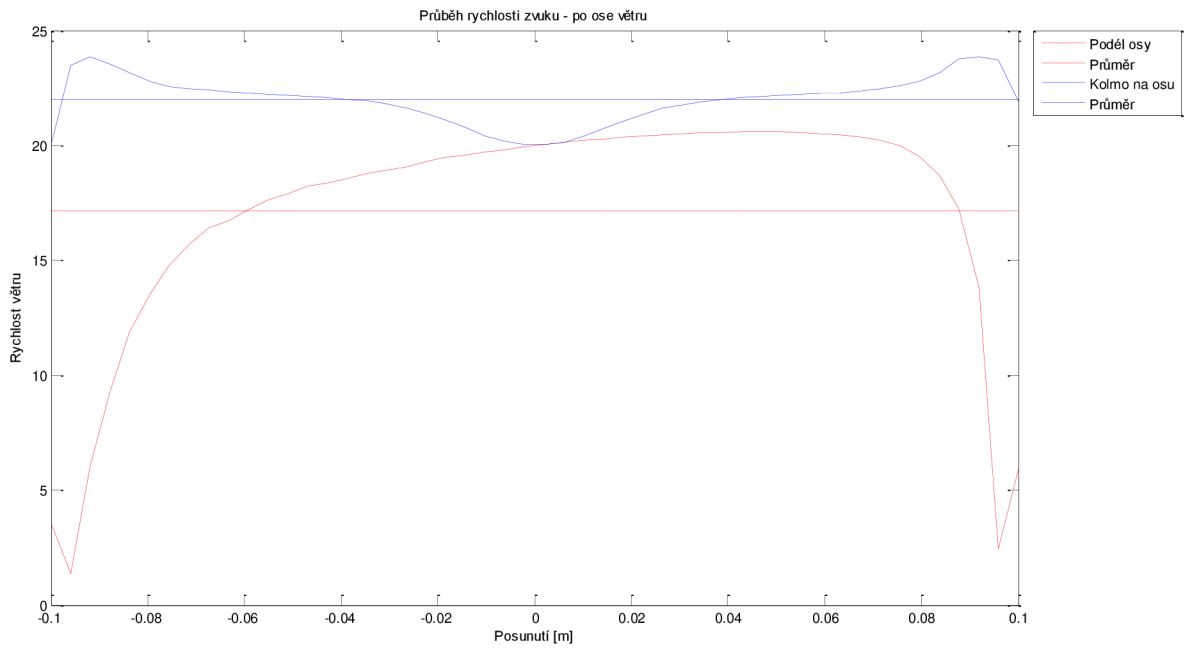
CRC – Cyclic redundancy check – Cyklický redundatní součet

XML – Extensible Markup Language – Formát dat

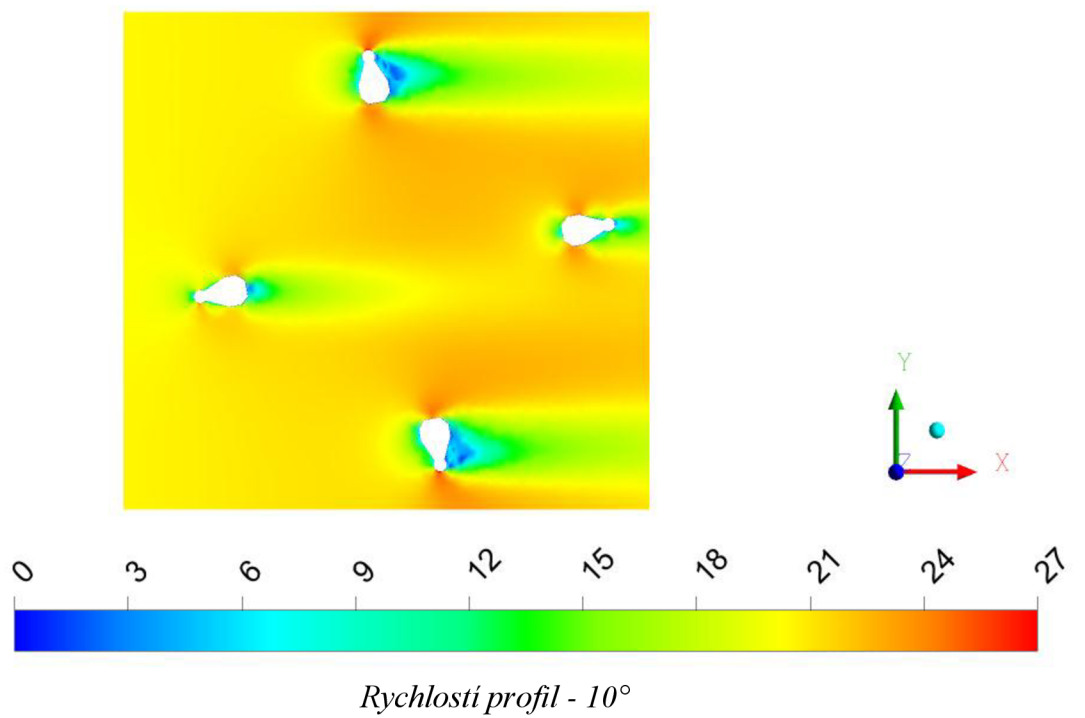
DLL – Dynamick link library – Dynamicky linkovaná knihovna

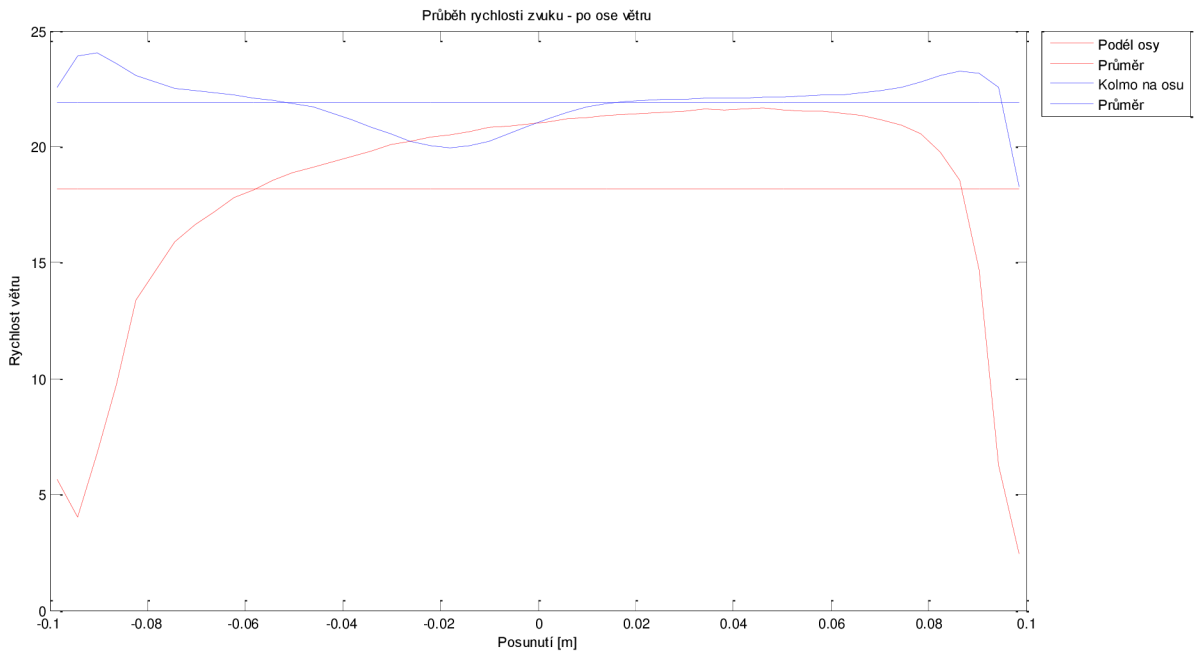
Příloha č.1 – Výstupy z počítačových simulací



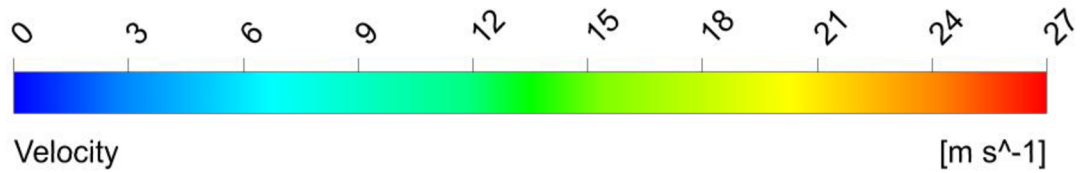
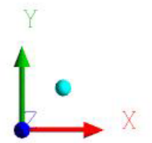
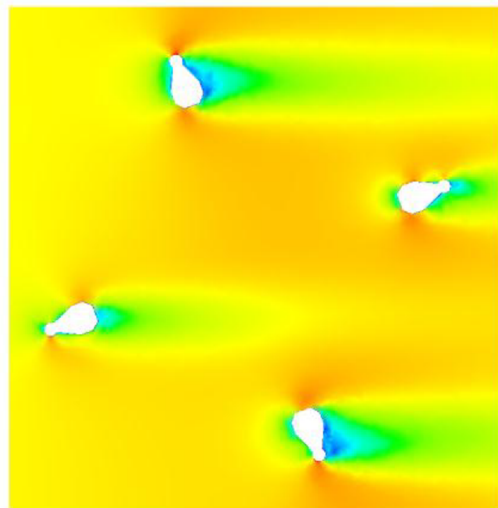


Průběh rychlostí - 0°

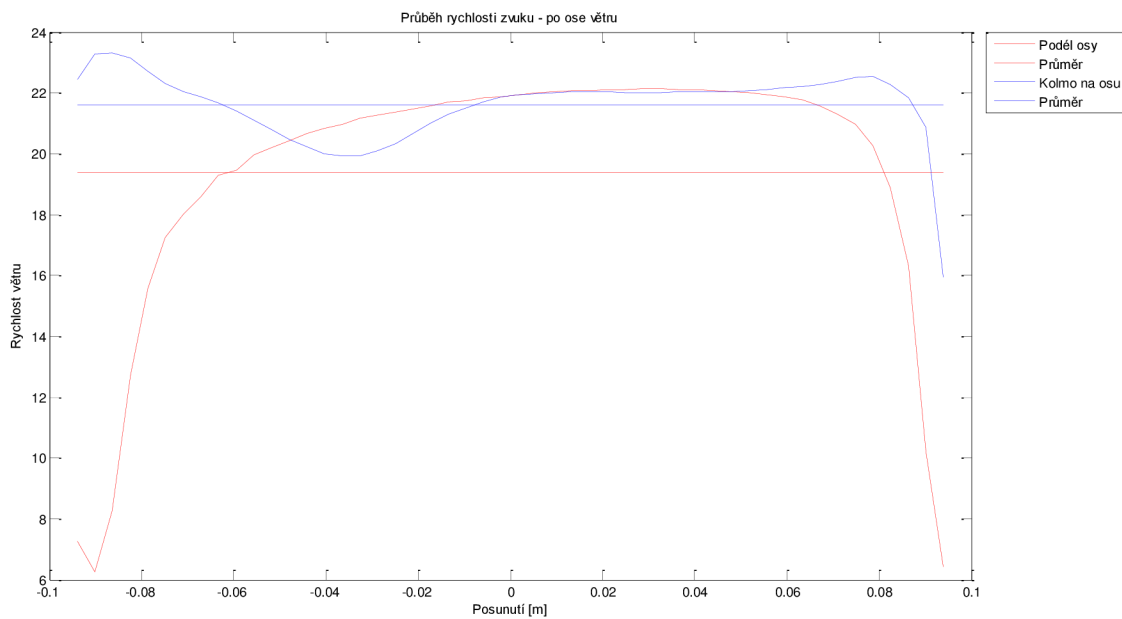




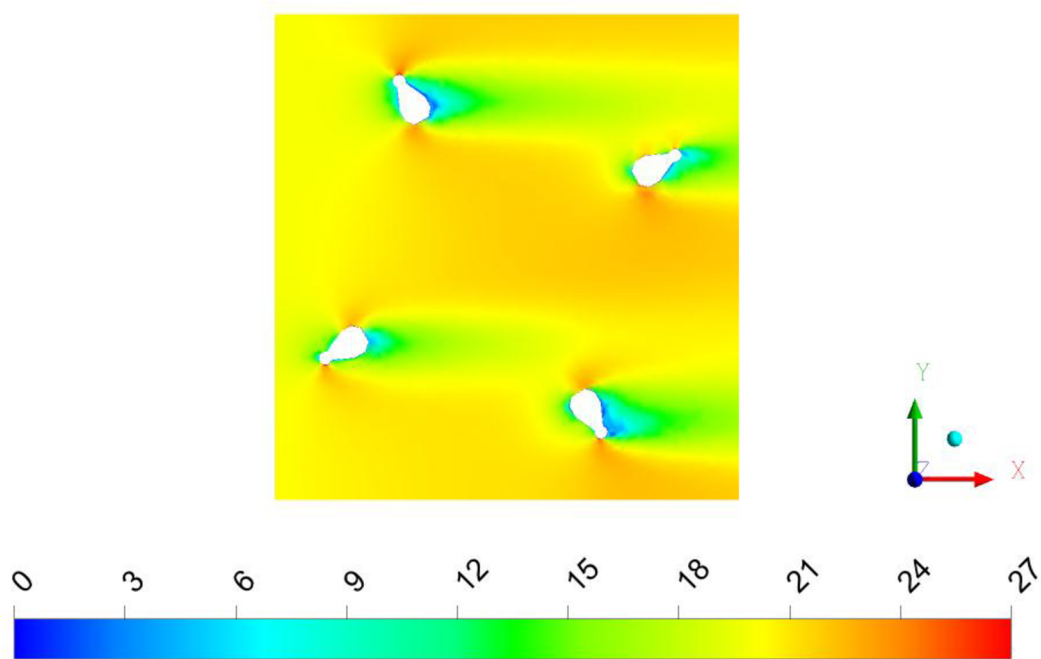
Průběh rychlosti - 10°



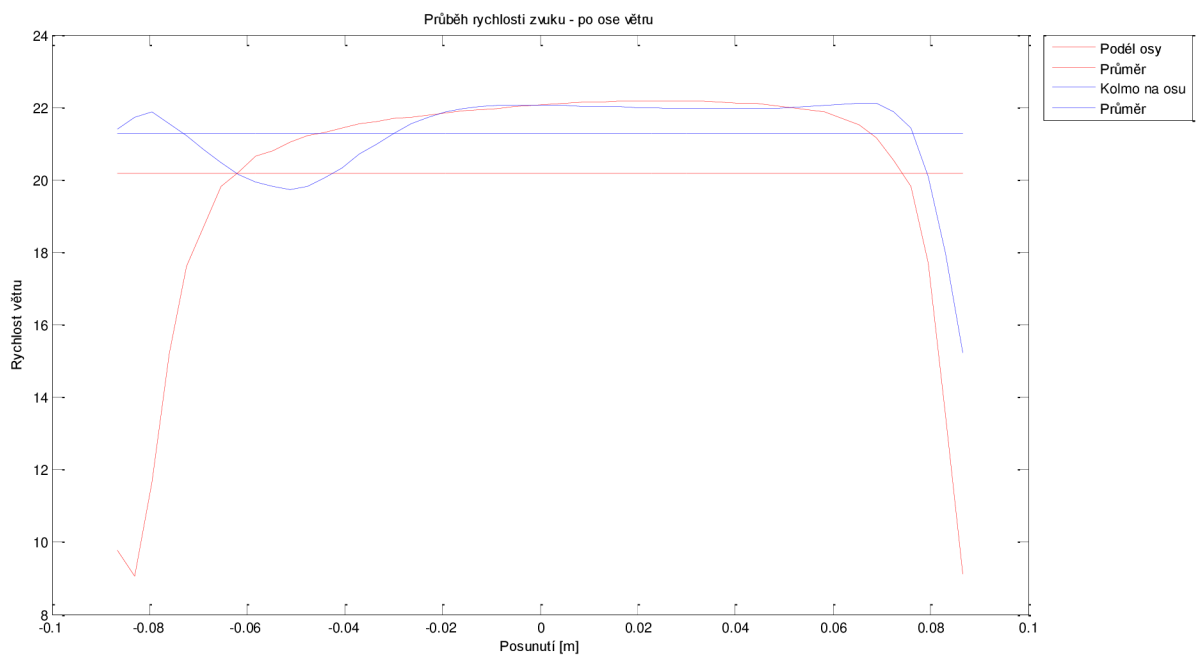
Rychlostí profil - 20°



Průběh rychlosti - 20°

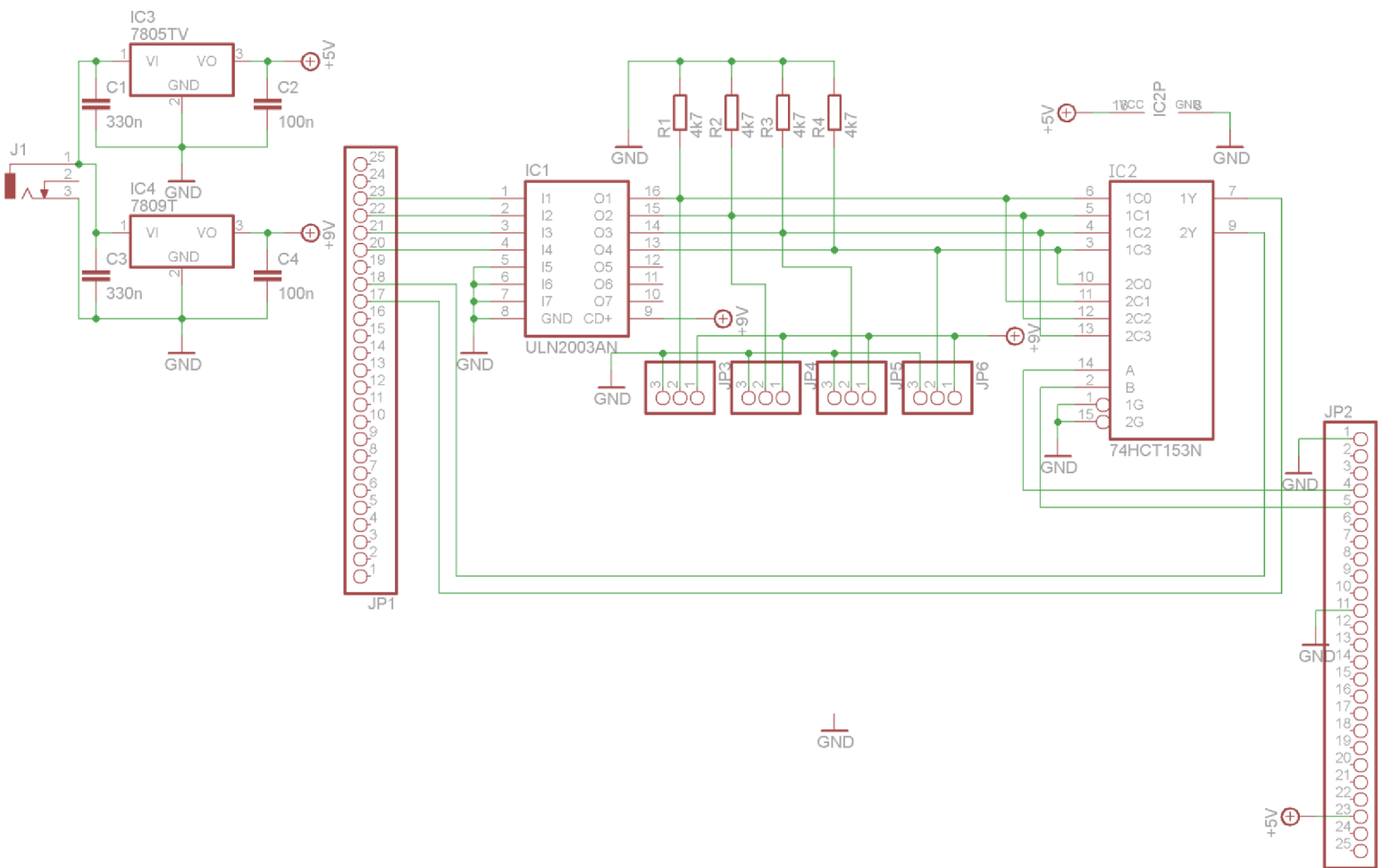


Rychlostí profil - 30°

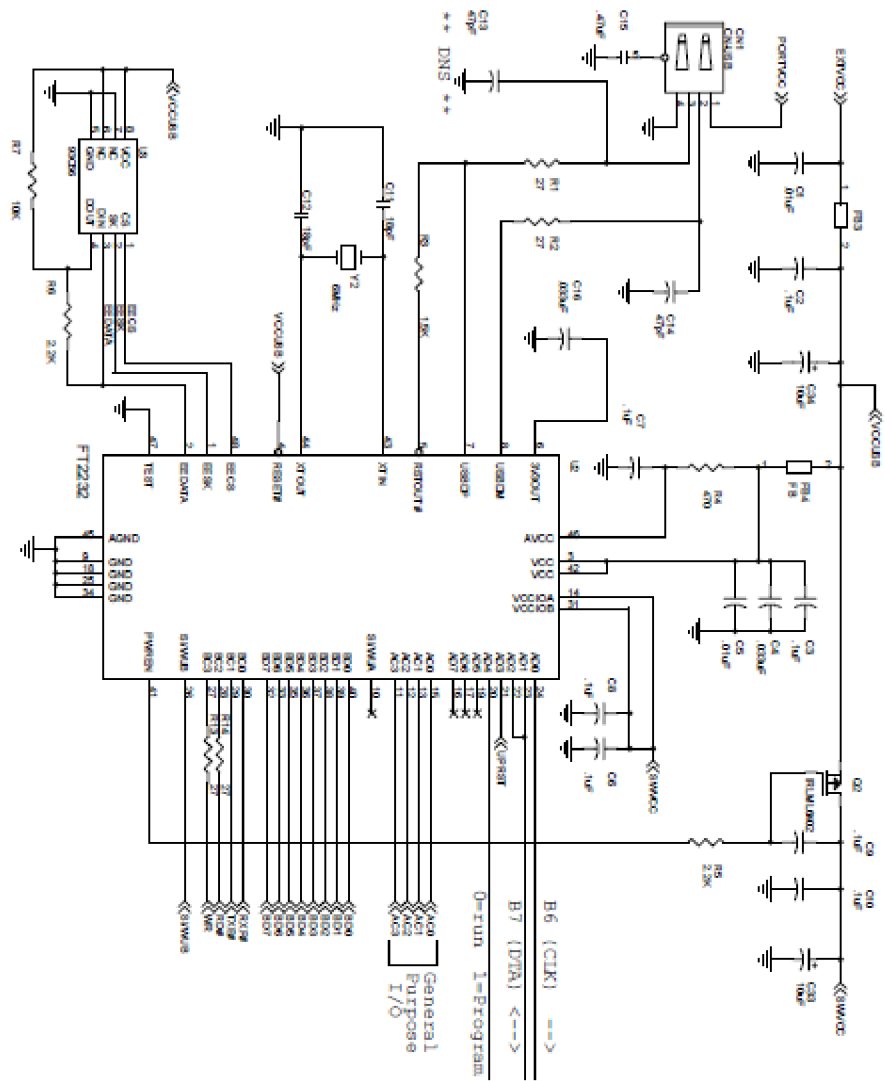


Průběh rychlosti - 30°

Příloha č.2 - Elektrická schémata



Rídící subsystem



DLP 2232[21]

