

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: **Vojtěcha Malého**

program: **B2342 - Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: bez oboru

číslo BP: **BP2015 – LT 04**

název česky: **Konstrukční návrh kalibračního zařízení pro žhavené drátky**

název anglicky: **Design of Hot-Wire Probe Calibration Device**

Pokyny pro vypracování:

- Návrh celkové koncepce kalibračního zařízení
- Návrh a konstrukce zdroje vzduchu a uklidňovací komory
- Návrh a konstrukce dvouosého polohovacího zařízení pro anemometrické sondy
- Zpracování 3D modelu a výkresové dokumentace

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího BP
Rozsah průvodní zprávy: 20 stran
Seznam odborné literatury: dle pokynů vedoucího BP
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Čenský, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 26. června 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne:

.....

podpis

.....
Ing. Robert Theiner, Ph.D.
vedoucí ústavu 12 122

.....
Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.
děkan fakulty strojní

V Praze dne 3. dubna 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze citované podklady (literaturu, projekty, SW atd.).

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
podpis

Poděkování

Děkuji Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D. za vedení bakalářské práce, za čas strávený nad konzultacemi a odbornou pomoc. Mé díky také patří Ing. Robertu Theinerovi, Ph.D. za příležitost, které mi nabídl během studia, a které mimo jiné vyústili v tento projekt. V neposlední řadě děkuji Miloslavu Frantovi za rady týkající se technologie výroby a samotnou výrobu dílů zařízení.

Anotace

MALÝ, V.: Konstrukční návrh kalibračního zařízení pro žhavené drátky: bakalářská práce. Praha: ČVUT – České vysoké učení technické, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, 2015, 22s. Vedoucí práce: Čenský, T.

Práce stručně charakterizuje měření rychlosti proudu sondami se žhaveným drátkem, popisuje problematiku spojenou s jejich kalibrací a především obsahuje návrh a konstrukci kalibračního zařízení. Dále rozebírá přesnost kalibrace a rychlostní pole vzduchu vystupujícího ze vzduchové tratě. Součástí práce je také kompletní výkresová dokumentace.

Annotation

MALÝ, V.: Design of Hot-Wire Probe Calibration Device: bachelor thesis. Prague: CTU – Czech Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Aerospace Engineering, 2015, 22p. Thesis head: Čenský, T.

Thesis briefly characterizes hot wire anemometry, describes problems connected with its calibration and mainly contains design of calibration device. Thesis also analyzes precision of calibration and velocity field of stream made by air track. It includes complete drawing documentation.

Obsah

1 Úvod	1
2 Hot Wire Anemometry	2
2.1 Zařazení HWA	2
2.2 Výhody a nevýhody HWA	3
2.3 Typy sond.....	3
3 Kalibrace	4
4 Koncepce a konstrukční uspořádání.....	5
4.1 Požadavky na kalibrační zařízení	5
4.2 Koncepce zařízení.....	5
5 Vzduchová trať	7
5.1 Ventilátor.....	7
5.2 Pružná spojka	8
5.3 Difuzor	8
5.4 Usměrňovací komora	9
5.5 Výstupní tryska	10
6 Polohovací zařízení	13
6.1 Pohon os a převod.....	13
6.2 První osa	15
6.3 Druhá osa.....	16
6.4 Senzory	17
7 Řídící elektronika	18
8 Měření vzduchové tratě	20
9 Závěr	22

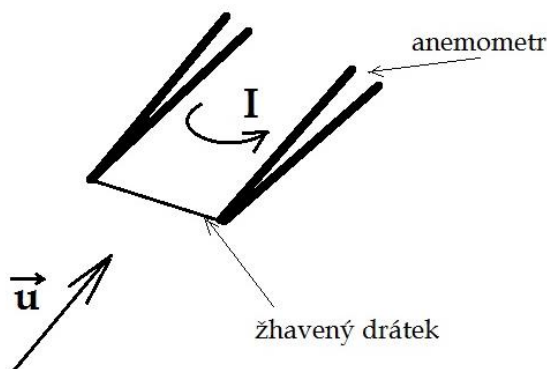
1 Úvod

Sondy se žhaveným drátkem jsou základním měřidlem pro zkoumání vektoru rychlosti a především turbulence. Jejich kalibrace má vysoké nároky na přesnost a vyžaduje zdroj stabilního proudu vzduchu o nízké turbulenci. Takové kalibrační zařízení vyrábí pouze společnost Dantec Dynamics, u kterého je nutné vzduch dodávat z kompresoru. Nízkému počtu vyráběných zařízení a prakticky neexistující konkurenci odpovídá vysoká cena. Ve spojení s potřebou kompresoru vedly tyto dva faktory k rozhodnutí vyvinout a vyrobit vlastní kalibrační zařízení. Požadavky na jeho funkci jsou shrnuty v odstavci 4.1, nutné je však mít na paměti, že zařízení bylo konstruováno s ohledem na technologické a materiálové možnosti Ústavu letadlové techniky FS ČVUT.

2 Hot Wire Anemometry^{1,2,3}

2.1 Zařazení HWA

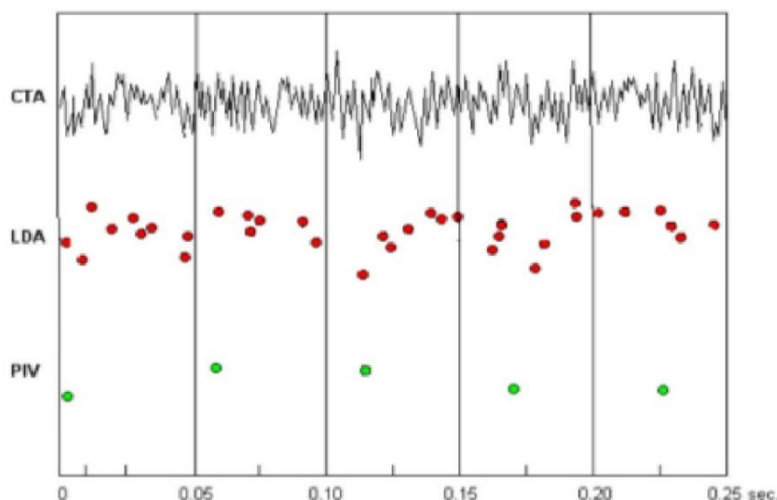
HWA je zkratka pro měření anemometrem se žhaveným drátkem (Hot Wire Anemometry). Základní princip je zřejmý z **Chyba! Chybný odkaz na záložku..**



Obr. 1: Princip HWA. I-proud procházející drátkem; u-vektor rychlosti tekutiny.

Mezi žhaveným drátkem a proudem tekutiny o rychlosti \vec{u} dochází k přestupu tepla. Tepelné ztráty na drátku jsou funkcí hlavně rychlosti protékajícího proudu a měří se dvojím způsobem.

- Metodou CCA (Constant Current Anemometry), kdy do sondy je dodáván konstantní proud a měří se odpor drátku, respektive napětí na výstupu. Nevýhodou je možnost přepálení drátku za nízkých rychlostí. Měří s vyšší frekvencí výstupu.
- Metodou CTA (Constant Temperature Anemometry), při které je drátek udržován na konstantní teplotě (odporu) a měří se proud, který drátkem prochází (nebo změna napětí v servo zesilovači). Hlavními výhodami jsou automatická kompenzace teplotních změn okolního vzduchu, kalibruje se a měří ve stejném režimu a sonda déle vydrží (méně teplených cyklů oproti CCA).



Obr. 2: Srovnání výstupů měření metodami CTA, LDA a PIV.¹

¹ . DANTEC Dynamics. In: *CTA slideshow* [online]. 2013 [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: <http://www.dantecdynamics.com/educational-slideshows>

² CHOPRA, Mehak. *Hot wire anemometry and fluid flow measurement*. 2010. Prezentace. Indian Institut of Technologi Delhi. Vedoucí práce Dr B. Uensal

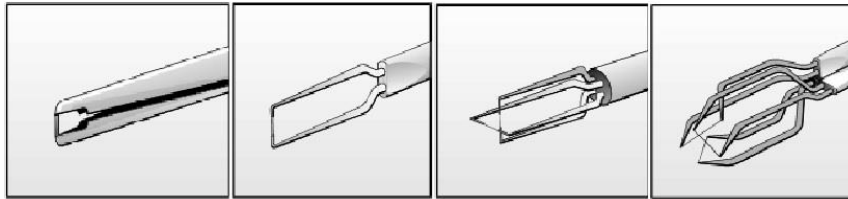
³ JØRGENSEN, Finn. DANTEC DYNAMICS. *How to measure turbulence with hot-wire anemometers*. 2002 [cit. 2015-04-10].

2.2 Výhody a nevýhody HWA

- + měří velikost i směr rychlosti (vektor)
- + analogový výstup – srovnání s ostatními sondami viz Obr. 2
- + vysoká frekvence výstupu, až stovky kHz; umožňuje měřit jak absolutní rychlost, tak turbulenci
- + SNR 1:10 000 (poměr síly šumu k síle signálu)
- narušuje prostor měření
- křehký, nelze použít v agresivních prostředích
- vysoká cena
- potřeba časté recalibrace

2.3 Typy sond

Sondy se vyrábějí z wolframu či platiny, případně jejich kombinací – wolframové jádro zaručující pevnost s platinovým povlakem pro vyšší odolnost proti korozi. Průměr drátku je 5 μm a délka do 3 mm. Dělí se na sondy s vláknem a s tenkým filmem. Pro měření směru rychlosti se kombinuje více vláken na jedné sondě uspořádané kolmo na sebe (2D), nebo tvořící bázi (3D).



Obr. 3: Typy sond: Film probe, Fiber-film probe, X-probe, Tri-axial probe³

3 Kalibrace

Vše, kromě měřených veličin, ovlivňující přestup tepla mezi sondou a okolím nazýváme chybou. Ty dělíme na:

- 1) Systematické
 - Změna okolní teploty
 - Další vlivy okolí (blízká stěna)
 - Karmánovy víry za válcovými sondami
- 2) Nesystematické
 - Bubliny v kapalině
 - Vibrace sondy
 - Zanesení sondy

Na žhavených drátcích dochází k připékání prachových zrn, výparů oleje, či jiných chemikálií a dalších částic. To má za následek změnu citlivosti sondy a snížení frekvence výstupu měření. Jediným způsobem, jak zamezit této chybě, je vyčištění nebo recalibrace sondy.

Při kalibraci je senzor vystaven proudu vzduchu o nízké turbulenci a známé rychlosti. Pro kalibraci tříosé sondy je ještě nutné natáčení o známý úhel ve dvou osách.

4 Koncepce a konstrukční uspořádání

4.1 Požadavky na kalibrační zařízení

Základním parametrem je charakter proudového pole vzduchu vystupujícího ze zařízení, které musí splňovat následující požadavky:

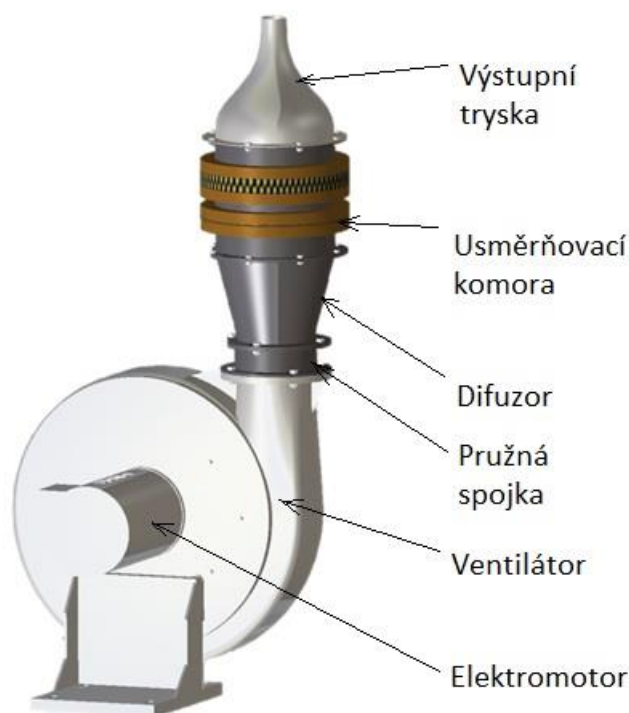
- Homogenita výstupního proudového pole
- Nízká turbulence
- Požadovaná rychlost okolo 70 m/s
- Průměr výstupní trysky 40 mm

Druhým významným požadavkem je automatizace procesu kalibrace, zejména natáčení sondy ve dvou osách nezávisle na sobě a to s vysokou přesností cca 100 kroků na stupeň v rozsahu cca 70°. Mezi méně významné můžeme zařadit mobilitu a kompaktnost zařízení, snadný přístup k ovládacím prvkům nebo snížení hlučnosti.

4.2 Koncepce zařízení

S ohledem na funkci je zařízení děleno na čtyři větve: nosná kostra (skříň), vzduchová trať, polohovací zařízení a řídicí elektronika.

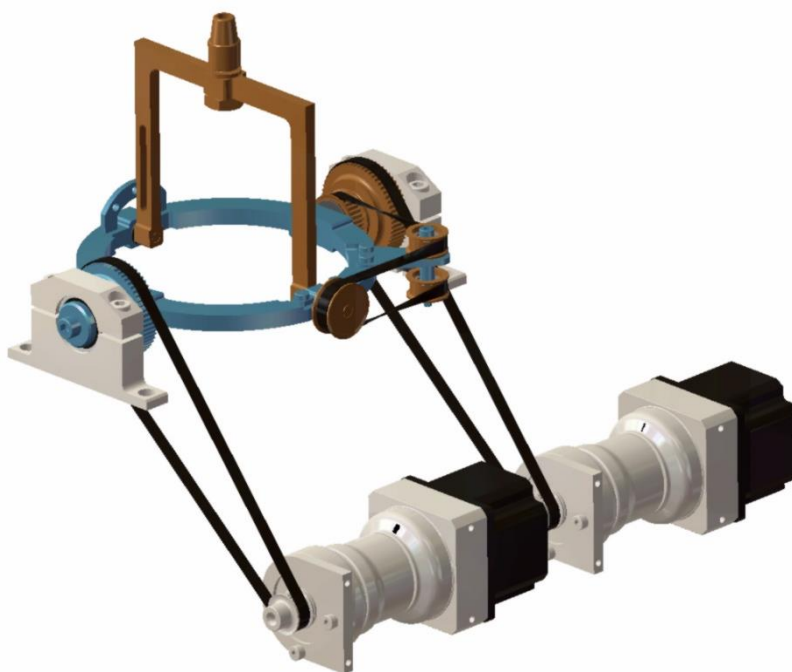
Nosná kostra je smontována z hliníkových profilů společnosti Alutec K&K o rozměru 45x45 a spojena šrouby ISO 4762 M8x25-8.8. Pro tento účel byly do profilů vytvořeny závity a montážní díry nebo drážky. Pro zajištění mobility byly na kostru namontovány dvojice pevných koleček a stavitelných noh. V kostře je dále vložen plech pro oddělení nízkonapěťové elektroniky od zbytku zařízení. Tato část je přístupná servisními vrátky, zbytek zařízení je oplechován vyjma výstupu vzduchové tratě.



Obr. 4: Model vzduchové tratě

Uspořádání vzduchové tratě je zřejmé z Obr. 4 a tvoří ji elektromotor, ventilátor, difuzor, usměrňovací komora a výstupní tryska. Elektromotor pohání ventilátor, ten žene vzduch do difuzoru, který proud zpomalí a dále pokračuje do usměrňovací komory. Zde se velké víry z ventilátoru rozbijí na menší pomocí síta a ve voštině usměrní. Ve výstupní trysce je zachována nízká turbulence usměrněného proudu, který je urychlen na požadovanou rychlost. Ventilátor s elektromotorem je od zbytku zařízení oddělen silentbloky a pružnou spojkou pro odstínění vibrací.

Polohovací zařízení je poháněno dvěma krokovými motory, pro každou osu jeden. Za jednotlivými motory je řazena planetová převodovka a převod ozubeným řemenem, který kromě zvýšení přesnosti také umožňuje umístění motorů pod měřící prostor. Osy jsou na sebe navzájem kolmé a každá z nich obsahuje další tři senzory – dva koncové a jeden pro nulovou polohu. Kalibrovaná sonda se připevní do kleštiny. Schéma je vidět na Obr. 5.



Obr. 5: Model polohovacího zařízení

5 Vzduchová trať

5.1 Ventilátor

Pro volbu ventilátoru je nutné znát objemový průtok a tlakový rozdíl, který je schopný vyvinout. Objemový průtok byl vypočítán následovně:

$$\dot{V} = c_3 \cdot A_3 = c_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_3^2}{4} = 70 \cdot \frac{\pi \cdot 0,04^2}{4} = 0,09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

kde c_3 je rychlost proudu a d_3 průměr na výstupu z trysky. Objemový průtok se obvykle udává v metrech krychlových za minutu, v tomto případě $0,09 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 5,3 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. Tento průtok uvažujeme jako minimální.

Tlakový rozdíl určíme z Bernoulliho rovnice v tlakovém tvaru:

$$\frac{1}{2} \rho c_1^2 + p_1 + \rho g h_1 = \frac{1}{2} \rho c_3^2 + p_3 + \rho g h_3$$

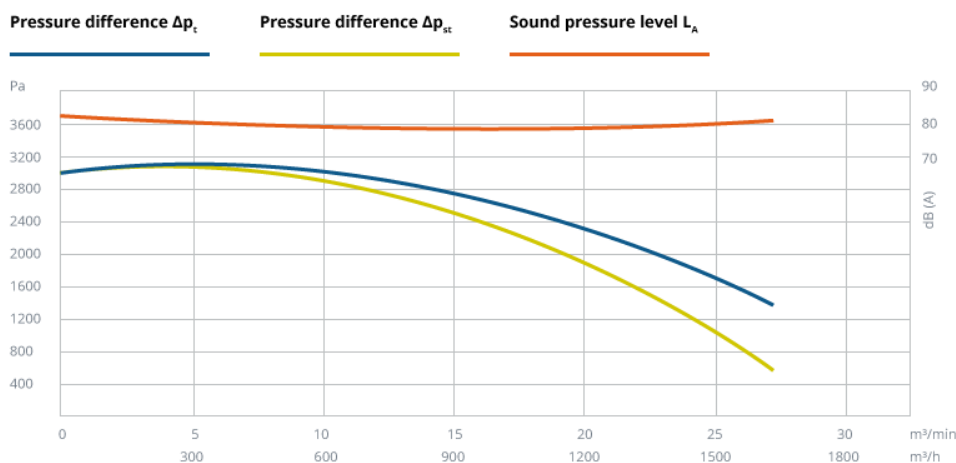
kde levá strana rovnice udává stav na začátku vzduchové trati a pravá výstup z trysky. Hustota vzduchu ρ je při teplotě 21°C $1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Výškový rozdíl je zanedbatelný, po úpravě dostaneme:

$$\Delta p = p_1 - p_3 = \frac{1}{2} \rho (c_3^2 - c_1^2) = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot (70^2 - 7^2) = 2910 \text{ Pa}$$

Těmto hodnotám vyhovuje ventilátor RD 62 od společnosti Elektror, jeho výkonové parametry udává tabulka 1 a Obr. 6.⁴

Výkonnostní třída		IE2
Objemový průtok	[$\text{m}^3 \text{ min}^{-1}$]	27,5
Rozdíl tlakových sil	[Pa]	3000
Výkon	[kW]	1,1
Otáčky motoru/ventilátoru	[min^{-1}]	2830
Hmotnost	[kg]	33

Tabulka 1: Výkonové parametry RD 62⁴

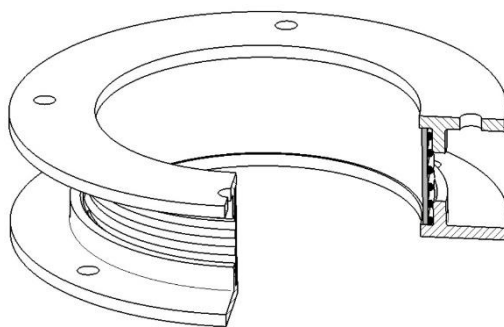


Obr. 6: Závislost rozdílů tlakových sil na objemovém průtoku (modrá čára)⁴

⁴ Ventilátor Elektror RD 62 [online]. 2015 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <https://www.elektor.de/cs/product/RD62>

5.2 Pružná spojka

Účelem pružné spojky je odizolovat vibrace ventilátoru od zbytku vzduchové tratě a svojí roztažností vykompenzovat výškové nepřesnosti ostatních dílů tratě vzniklé při výrobě. Tvoří ji dvě příruby s vlepenou hadicí OREDA - S120 od výrobce GUMEX, viz Obr. 7. Výhodou této hadice je hladká vnitřní stěna o průměru 127 mm, přičemž ve spojení s přírubou o vnitřním průměru 125 mm vzniká skok 1 mm, který je zanedbatelný (dáno také umístěním před usměrňovací komorou).



Obr. 7: Schéma pružné spojky

S ventilátorem je spojena čtyřmi šrouby ISO 4017 M8x25-8.8 s maticemi ISO 4032, které jsou dány velikostí děr na ventilátoru, a k difuzoru stejnou čtveřicí šroubů a matic o délce 16 mm.

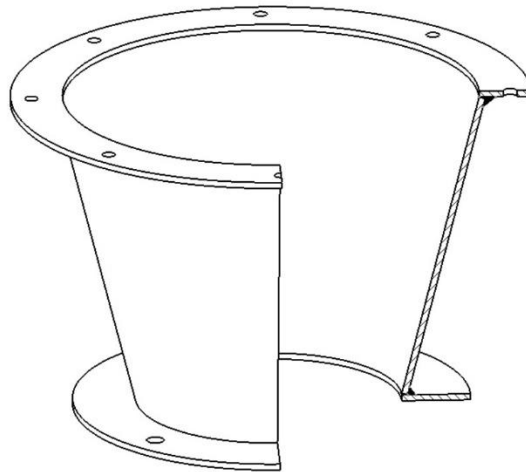
5.3 Difuzor

Difuzor je do vzduchové trati zařazen z důvodu zpomalení proudu pro následné efektivnější usměrnění. Jedná se o svařenec dvou přírub (první navazující na pružnou spojku a druhá na usměrňovací komoru) a kuželové části, viz Obr. 8. Aby nedošlo k odtržení proudu, volí se maximální úhel mezi osou souměrnosti a stěnou 15°. Vzhledem k protitlaku z usměrňovací komory, mající významný vliv na odtržení, byl zvolen právě úhel 15°. Z rovnice kontinuity pro nestlačitelné tekutiny (stlačitelnost za daných Reynoldsových číslech zanedbáme) plyne poměr mezi vstupní a výstupní rychlostí:

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{A_1}{A_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{125^2}{200^2} \doteq 0,4$$

kde indexem 1 je označen vstup do difuzoru a indexem 2 výstup do usměrňovací komory. Proud je tedy 0,4-krát zpomalen.

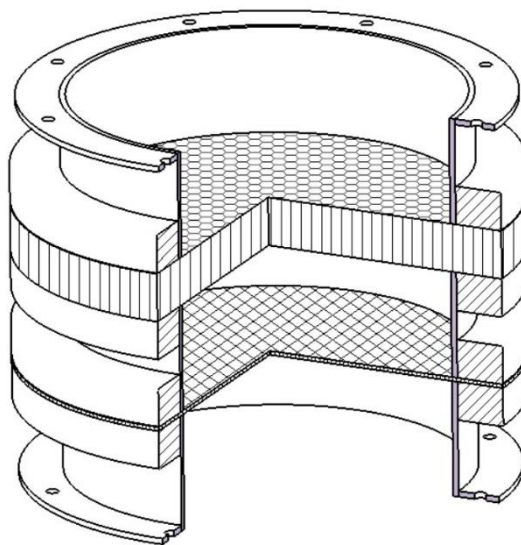
S ohledem na dostupnost, rozměrovou neměnnost a hmotnost byl pro výrobu zvolen hliníkový plech tloušťky 3mm. S komorou je spojen dvěma šrouby ISO 4017 M6x12-8.8 a šesti šrouby ISO 4017 M6x16-8.8 s maticemi ISO 4032, které zároveň spojují difuzor, komoru a výstupní trysku s kostrou zařízení odstíněnou od vibrací ventilátoru.



Obr. 8: Schéma difuzoru

5.4 Usměrnovací komora

Usměrnovací komora je základním prvkem vzduchové tratě zajišťujícím homogenní proudové pole s co nejnižší přirozenou turbulencí. Prvky komory a jejich umístění jsou zřejmé ze schématu na Obr. 9, jsou to příruby, vnitřní válec rozdělený na 3 kusy, prstence, síť a voština. Válce a příruby jsou opět z důvodu dostupnosti vyrobeny z hliníkového plechu o tloušťce stěny 3mm a svařeny dohromady.



Obr. 9: Schéma usměrnovací komory

Prstence zvětšují plochu lepeného spoje mezi jednotlivými válci a sítí s voštinou, proto byl zvolen materiál MDF (Medium Density Fibreboard), který v kombinaci s dvousložkovou pryskyřicí tvoří pevný spoj.

Síť je zhotovena ze skelných vláken o průměru $d=0,3\text{mm}$, které tvoří čtvercová oka s roztečí $M=1\text{mm}$ vyráběná společností TESA. Síť je mechanicky vypnuta a vlepena mezi dva prstence. Drobné víry v úplavu sítě se disipují ve volném prostoru o délce $l = 55\text{ mm}$.

U voštiny je zásadní její geometrie a to strana komůrky $a = 6,5$ mm, výška komůrky (tloušťka voštinové desky) $h = 25$ mm a tloušťka hliníkové folie tvořící voštinu $s = 0,1$ mm. Důležité je, aby poměr mezi výškou komůrky a její stranou byl co nejvyšší, v případě použité voštiny:

$$\frac{h}{a} = \frac{25}{6,5} \doteq 3,8$$

Tento poměr je použitelný, ideální by však byl cca 2x větší. Zvolena byla z důvodu dostupnosti, snadné manipulace při výrobě a možnosti jednoduchého vlepění do komory (u vyšší voštiny by bylo nutné řešit pevnost komory a stabilnější uložení).

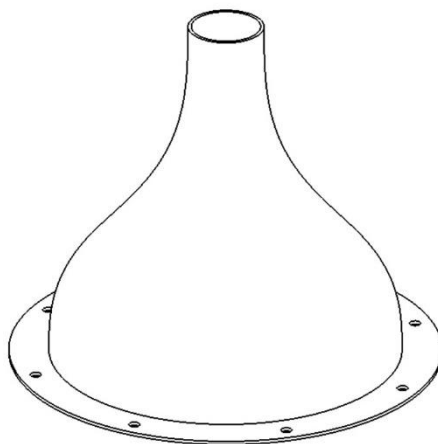
5.5 Výstupní tryska

Výstupní tryska má za úkol zpětně urychlit proud, přičemž zachová charakter proudu, tzn. homogenní proudové pole o nízké turbulenci. Změna rychlosti proudu je opět dána rovnicí kontinuity:

$$\frac{c_3}{c_2} = \frac{A_2}{A_3} = \frac{d_2^2}{d_3^2} = \frac{200^2}{40^2} = 25$$

kde indexem 2 je označen vstup do trysky a indexem 3 výstup. Proud je tedy urychlen na pětadvacetinásobek rychlosti z komory vystupujícího vzduchu.

Geometrie vnitřní plochy výstupní trysky vznikla rotací dvou-sinové křivky, tento tvar byl již laboratorně ověřen jako vhodný pro konstrukci trysek. Další funkční částí je příruba sloužící k připojení k usměrňovací části. Tvar součásti je zřejmý z Obr. 10.



Obr. 10: Schéma výstupní trysky

Dvousinová křivka je dána kartézskými souřadnicemi dle následujících rovnic⁵. První část určuje parametr s_1 a souřadnice x_1, y_1 :

$$0 \leq s_1 \leq \frac{L}{3 \cdot \cos \alpha}$$

$$x_1 = s_1 \cdot \cos \alpha + \tan^2 \alpha \cdot \frac{L}{3 \cdot \pi} \cdot \sin \left(s_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{3 \cdot \pi}{L} \right)$$

$$y_1 = \frac{d_2}{2} - s_1 \cdot \sin \alpha + \tan \alpha \cdot \frac{L}{3 \cdot \pi} \cdot \sin \left(s_1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{3 \cdot \pi}{L} \right)$$

druhou část parametr s_2 a souřadnice x_2 a y_2 :

$$\frac{L}{3 \cdot \cos \alpha} \leq s_2 \leq \frac{L}{\cos \alpha}$$

$$x_2 = s_2 \cdot \cos \alpha + \tan^2 \alpha \cdot \frac{2 \cdot L}{3 \cdot \pi} \cdot \sin \left(\frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot L} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{s_2 + L}{3 \cdot \cos \alpha} \right)$$

$$y_2 = \frac{d_3}{2} - s_2 \cdot \sin \alpha + \tan \alpha \cdot \frac{2 \cdot L}{3 \cdot \pi} \cdot \sin \left(\frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot L} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{s_2 + L}{3 \cdot \cos \alpha} \right)$$

kde vstupními hodnotami jsou $d_1=200\text{mm}$, $d_2=40\text{mm}$, $\alpha=21^\circ$ a výška trysky L se vypočítá:

$$L = \frac{d_2 - d_3}{2 \cdot \tan \alpha} = \frac{200 - 40}{2 \cdot \tan 21^\circ} = 208,4 \text{ mm}$$

Jednotlivé body křivky byly získány výpočtem ve výukové verzi programu MATLAB a vyexportovány do textového souboru, skript programu je součástí přílohy.

Vstupními daty pro výběr materiálu byly pevnost v tahu, cena, požadavky na tvarovou přesnost vnitřní plochy a v neposlední řadě náročnost výroby. Srovnání třech vybraných materiálů bylo vyneseno do Tabulky 2. Na součást působí minimální síly, pro jistotu však byl proveden výpočet napětí v tahu v části připojení kopyta k přírubě. V tomto místě působí axiální síla F vyvolaná proudem vzduchu o průtoku \dot{m} a povrch průřezu při tloušťce stěny 1mm je A' .

$$F = \dot{m} \cdot (c_3 - c_2) = c_2 \cdot A_2 \cdot \rho \cdot (c_3 - c_2) = 3,2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,2^2}{4} \cdot 1,2 \cdot (80 - 3,2) = 9,26 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{F}{A'} = \frac{9,26}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,202^2 - 0,2^2)} = 14\,664 \text{ Nm}^{-2} = 14,7 \text{ Nmm}^{-2}$$

Materiál	Pevnost v tahu [Nmm^{-2}]	Cena [Kč/kg]	Přesnost	Složitost výroby
Nerezový plech ČSN 17 240	nad 700	~100	dostatečná	náročná
Kompozit-uhlík	2000-6000	~460	vysoká	střední
Kompozit-sklo	nad 1800	~100	vysoká	střední

Tabulka 2: Srovnání materiálů výstupní trysky⁶

⁵ HANUS, Daniel. *Experimentální vzduchová trať pro výzkum proudění v zakřivených kanálech*. 2005 [cit. 2013-12-10].

⁶ Data platná pro prosinec 2013

Z tabulky 2 vyplývá, že všechny materiály splňují podmínku minimální pevnosti v tahu. Nerezový plech by byl vhodným materiálem pro sériovou výrobu, v tomto případě však přílišná složitost výroby a nižší přesnost dává přednost kompozitním materiálům. Hlavní výhodou uhlíkových vláken oproti skelným je jejich pevnost v tahu. Tuto podmínku ale splňují i levnější skelná vlákna. Proto byl pro výrobu vybrán kompozit obsahující skelná vlákna jako výztuž.

Pro přesné okopírování povrchu byl na první vrstvu vybrán GELCOAT T35, dále vrstva E-SKLA 160 ($160 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Jako třetí a čtvrtou vrstvu bylo pro tvarovou odolnost vybráno tužší E-SKLO 400 ($400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$). Matrici kompozitu tvoří dvousložkový epoxid - epoxidová pryskyřice MGS 285 a tužidlo MGS 275. Jedná se o epoxid schválený pro výrobu certifikovaných leteckých dílů. Je doporučován pro ruční laminaci kvůli dlouhé životnosti, dobré zpracovatelnosti, fyziologické nezávadnosti a výborným pevnostním charakteristikám.⁷

Pro laminaci byla zhotovena forma ze slepených MDF desek tloušťky 25mm s vlepenou kovovou trubkou pro přesnější upnutí do soustruhu. MDF má však nevhodný povrch pro laminaci, proto byl nanesen dvousložkový tmel (2K polyurethan primer + C05 katalyzátor) a lak, viz Obr. 11. Povrch byl dále před laminací naseparován.



Obr. 11: Forma na výstupní trysku

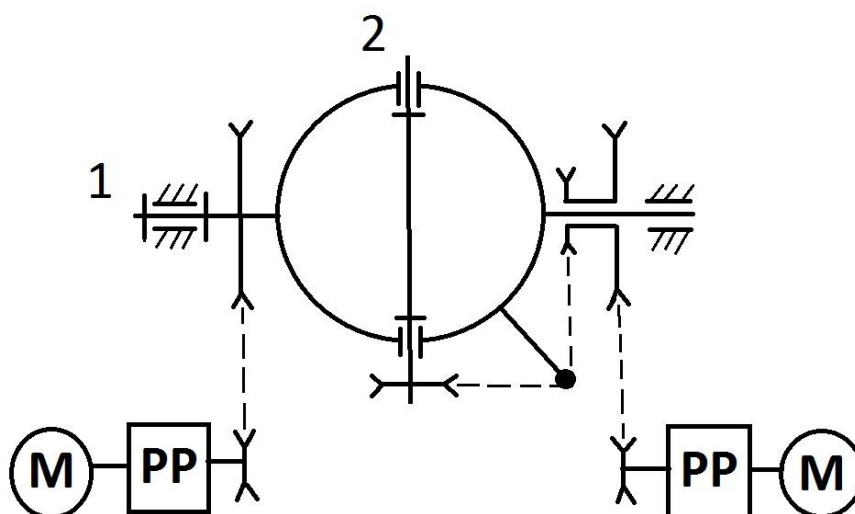
Součást byla vyrobena v rámci volitelného předmětu Praktická aplikace kompozitních materiálů v letadlové technice na Ústavu letadlové techniky FS ČVUT.

⁷ GRM systems: sklo. [online]. [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.grm-systems.cz/skelne-vyztuze>

6 Polohovací zařízení

6.1 Pohon os a převod

Základním požadavkem na polohovací zařízení je nezávislé natočení upnuté sondy o $\pm 35^\circ$ ve dvou osách s dostatečnou přesností. Dále je podstatná automatizace, což mimo jiné znamená nutnost použití motorů, v tomto případě krokových. Přesnost krokových motorů je dána konstrukcí, běžných je však $1,8^\circ$ na krok. Rozlišení motoru lze zvýšit driversy, pak je ale nutné zařadit zpětnovazební snímání polohy, které je drahé a méně spolehlivé. Druhou možností je vysoký mechanický převod.



Obr. 12: Schéma pohonu polohovacího zařízení: M-motor, PP-planetová převodovka, 1-první osa, 2-druhá osa

Celkový převod je dělen na převod ozubeným řemenem a planetovou převodovkou, viz schéma na Obr. 12: Schéma pohonu polohovacího zařízení: M-motor, PP-planetová převodovka, 1-první osa, 2-druhá osa. Použití ozubeného řemeny umožňuje schovat motor s převodovkou do nitra zařízení, planetová převodovka na druhou stranu zajistí vysoký převodový poměr bez příliš velkých nároků na prostor. Jelikož je řemenem přenášen minimální výkon (způsobený momentem od nevyvážení zařízení a ztrátou v ložiskách), byl zvolen nejmenší běžně dostupný. Tzn. s minimálním modulem a šířkou – ozubený řemen DIN 7721 T2,5 W6.

Celkový teoretický převodový poměr získáme trojčlenkou z požadavku na přesnost natočení a rozlišení motoru:

$$\begin{aligned} 1 \text{ krok} &\dots 1,8^\circ \\ x \text{ kroků} &\dots 0,01^\circ \\ \rightarrow x &= \frac{0,01}{1,8} = 0,005\bar{5} \\ \rightarrow i_{ct} &= \frac{1}{0,005} = 180 \end{aligned}$$

Převod ozubeným řemenem je omezen velikostí řemenic: menší průměrem hřídele vystupující z planetové převodovky a větší řemenice maximálním vyráběným rozměrem. Velikosti řemenic vyjádřené počtem zubů $z_{1\min}=22$ a $z_{2\max}=60$ umožňují výpočet převodového poměru ozubeným řemenem:

$$i_{\check{r}} = \frac{60}{22} = 2,73$$

Pro planetovou převodovku tedy zbývá:

$$i_p^* = \frac{180}{2,73} \doteq 66$$

Nutné je však mít na paměti, že se zvyšujícím se převodovým poměrem roste i cena a tudíž bylo postupnou iterací vybrána planetová převodovka společnosti RAVEO s poměrem $i_p=50$. Celkový převodový poměr je tedy:

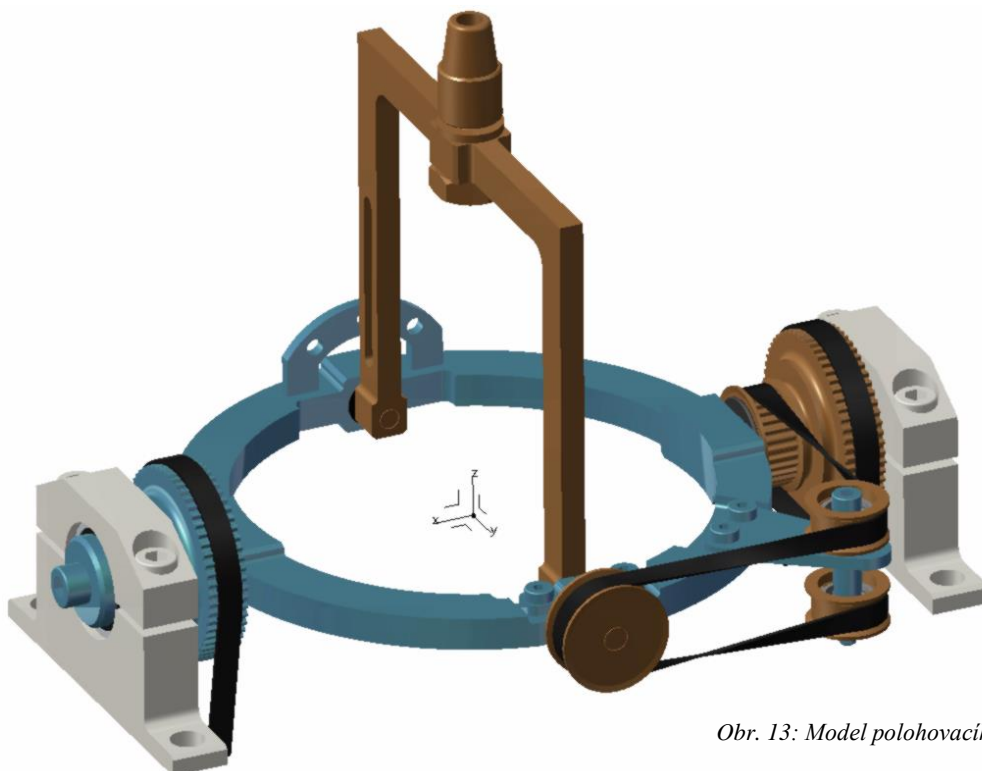
$$i_c = i_{\check{r}} \cdot i_p = 2,73 \cdot 50 = 136,36$$

a přesnost natočení:

$$\frac{1,8}{136,36} \doteq 0,013^\circ/\text{krok}$$

Tato přesnost je s ohledem na chybu natočení (viz kapitoly První osa, Druhá osa) a rozlišitelnost sond naprosto dostačující.

Na následujícím Obr. 13 je vyobrazen model konstrukčního uspořádání polohovacího zařízení. Jednotlivým funkčním prvkům sestavy byla pro názornost přiřazena jiná barva: bílou barvou domky ložisek, které jsou pevně spojeny s kostrou kalibračního zařízení, modrou barvou první osa a oranžovou druhá osa. Střed souřadnicového systému značí polohu drátků kalibrované sondy upnuté v kleštině druhé osy.



Obr. 13: Model polohovacího zařízení

6.2 První osa

Za první osu jsou považovány všechny díly pevně spojené s obručí otáčející se pouze kolem osy x, na Obr. 13 modrou barvou. Jednotlivými prvky jsou obruč se dvěma hřídeli, řemenice, přípravek pro umístění senzorů polohy a napínák řemenu druhé osy. Hřídele jsou usazeny v kuličkových ložiscích SKF 63001 a axiálně zajištěny pojistnou deskou se šroubem ISO 4762 M6x12-8.8. Vzhledem k zanedbatelnému zatížení ložisek a nízkým otáčkám nebyl proveden výpočet životnosti. Přípravek pro umístění senzorů je přichycen dvěma bodovými svary. Na hřídeli ze strany axiálního zajištění je také nalisována řemenice přenášející moment z pohonu, zvoleno bylo uložení s přesahem $\varnothing 12H7/s7^8$. Napínák, stejně jako člen přidržující druhou osu, je k obruči připevněn dvojicí šroubů DIN 7984 M4x8-8.8.

Za účelem zvýšení přesnosti natočení jsou díly předimenzovány, navrhnuté dostatečně tuhé, aby nedocházelo ke zkroucení hřídelů ani obruče. Jediný prostor pro chybu tedy vzniká v převodovce a natažením řemenu. Výrobce planetové převodovky udává maximální vůli natočení $10 \text{ arcmin} = 0,167^\circ$. Tato vůle se díky převodu řemenem sníží:

$$v_{p1} = \frac{v_{p0}}{i_{\ddagger}} = \frac{0,167}{2,727} = 0,061^\circ$$

Pro výpočet chyby natočení způsobenou prodloužením řemene se nejdříve vypočte jeho zatížení:

$$\begin{aligned} M_{c1} &= M_{nev} + 2 \cdot M_{t\ddagger} = m_{nev} \cdot g \cdot r_{nev} + 2 \cdot \frac{\mu \cdot (G + F_w) \cdot d}{2} \\ &= 0,059 \cdot 9,81 \cdot 70 + 0,002 \cdot (4,9 + 10) \cdot 12 = 40,5 + 0,4 = 40,9 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

kde M_c je celkový krouticí moment v ose x vyvolaný nevyvážením soustavy M_{nev} a třením v ložiscích $M_{t\ddagger}$. Pro výpočet tření v ložisku byl použit odhad, kde μ je součinitel tření v kuličkovém ložisku, G tíha polohovacího zařízení, F_w předpětí v řemenu a d průměr díry ložiska. Z výpočtu je zřejmé, že tření v ložiscích je zanedbatelné. Síla napínající řemen je tedy:

$$F_{c1} = \frac{M_{c1}}{\frac{D_{p1}}{2}} = \frac{2 \cdot 40,9}{47,85} = 1,7 \text{ N}$$

kde D_p je roztečný průměr řemenice. Prodloužení řemene získáme z Hookova zákona:

$$\Delta l_1 = l_{01} \cdot \frac{F_{c1}}{S \cdot E} = 252 \cdot \frac{1,7}{46875} = 0,009 \text{ mm}$$

kde l_0 je délka napínaného řemene, S jeho průřez a E Youngův modul pružnosti. Ozubený řemen má po délce proměnou geometrii a skládá se jak z gumy, tak z drátěné výztuže, proto se uvádí společný součin $S \cdot E$ pro celý řemen dané šířky. Prodloužení způsobí natočení o úhel $v_{\ddagger 1}$:

$$v_{\ddagger 1} = \arctg \frac{\Delta l_1}{\frac{D_{1p}}{2}} = \arctg \frac{2 \cdot 0,009}{47,85} = 0,022^\circ$$

⁸ LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. Úvaly: ALBRA, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.

Celková chyba natočení první osy je:

$$v_1 = v_{p1} + v_{r1} = 0,061 + 0,022 = 0,083^\circ$$

Rozlišovací schopnost sondy ve smyslu určení směru proudu vzduchu je dána přesností kalibrace, maximálně však okolo desetiny stupně. Proto je přesnost natočení sondy v první ose více než dostačující.

6.3 Druhá osa

Druhá osa je sestava dílů otáčejících se pouze kolem osy y a díly sloužící k jejich pohonu, v Obr. 13 oranžovou barvou. První částí je rameno druhé osy s vlisovanými osičkami, za které drží v obruči osy 1. Rotační vazba s axiálním zajištěním je realizována kluznými plastovými pouzdry společnosti Hennlich. Ve středu ramene je zašroubována kleština sloužící k upnutí měřené sondy v prostoru. Kleština je zajištěna proti nechtěnému vyšroubování nízkou kontra maticí DIN 936 M10. Na jedné části ramene je vyfrézována drážka pro upnutí dalších typů sond, např. pitotovy trubice.

Druhou částí je pohon osy. Umístění pohonu kompletně na obruči první osy by způsobilo značné nevyvážení první osy. V případě přidání protizávaží by zůstala vysoká hmotnost soustavy zvyšující setrvačný moment a mohutnost, což by mimo jiné vedlo ke snížení přesnosti. Proto je využit systém pohonu kombinující dva řemenové převody, viz Obr. 13. První řemenový převod s poměrem $i=2,72$ je řazen mezi motorem a svařencem řemenic umístěným na ose 1 (uložen na kluzná pouzdra) a zajišťuje zvýšení přesnosti. Druhý převod je úhlově zalomený o 90° přes kladky s poměrem $i=1$. Takto je docílena rotace druhé osy ve směru kolmém na první osu, aniž by ji motor s převodovkou zatěžovaly. Poměr délky kroucené části řemene k jeho šířce je:

$$\frac{l_s}{w} = \frac{66}{6} = 11$$

Výrobce řemenů Contitech uvádí ideální poměr $l_s/w \geq 20$, takže lze očekávat nepravidelné rozložení napětí na řemenu s vrcholy na jeho krajích.⁹ Pro předpětí odpovídající jedné šestině dovoleného napětí není nutné tento poměr měnit.

Řemen je veden přes napínák, kde výrobce předepisuje minimální vnější průměr kladky 15mm, s ohledem na rozměry ložisek je zvolen průměr 16mm. Kladky jsou nalisovány na ložiscích SKF 624 s vnitřním průměrem 4mm. Výškové umístění kladek je nastaveno rozpěrnými válečky a předpětí řemene zafixováno šroubem ISO 4762 M4x35-10.9 se samojistnou maticí ISO 10 511 M4.

Jelikož druhý převodový poměr je roven jedné, bude vůle převodovky stejná, jako u první osy:

$$v_{p2} = v_{p1} = 0,061^\circ$$

Zatížení řemene je závislé na natočení, maximální je při mezním naklonění o úhel 35° , kdy v ose y působí moment vzniklý vychýlením těžiště:

$$M_{c2} = \Sigma(G \cdot x_T) = 9,81 \cdot (0,039 \cdot 55 + 0,05 \cdot 140) = 89,7 \text{ Nmm}$$

⁹ CONTITECH. *Product Range Conti Synchroflex Timing Belts: katalog* [online]. 2012 [cit. 2015-05-19].

Tento moment přenáší jak smyčka řemene lomená přes kladky, tak smyčka mezi řemenicí a motorem. Síla napínající obě smyčky je však různá:

$$F'_{c2} = \frac{M_{c2}}{\frac{D_{p2}}{2}} = \frac{2 \cdot 89,7}{23,95} = 7,5N$$

$$F''_{c2} = \frac{M_{c2}}{\frac{D_{p2}}{2}} = \frac{2 \cdot 89,7}{47,85} = 3,7N$$

Jelikož jsou ztráty třením v ložiscích zanedbatelné, můžeme předpokládat, že zatížení části řemene před a za kladkou je stejné. Funkční (napínaná) délka je tudíž dána součtem obou vzdáleností. Prodloužení opět určíme z Hookova zákona:

$$\Delta l_2 = \frac{l'_{02} \cdot F'_{c2} + l''_{02} \cdot F''_{c2}}{S \cdot E} = \frac{2 \cdot 72,5 \cdot 7,5 + 252 \cdot 3,7}{46785} = 0,043 \text{ mm}$$

Pro nepřesnost natočení danou prodloužením platí:

$$v_{2ř} = \arctg \frac{\Delta l_2}{\frac{D_{p2}}{2}} = \arctg \frac{2 \cdot 0,043}{23,95} = 0,206^\circ$$

Celková chyba natočení druhé osy je:

$$v_2 = v_{p2} + v_{ř2} = 0,061 + 0,206 = 0,281^\circ$$

Tato chyba je více než třikrát větší jak u první osy. Pro běžné měření je i tato přesnost natočení dostačující. V případě přesného měření je možné sondu kalibrovat na první ose, poté pootočit o 90° a kalibrovat druhý směr. Tento mód kalibrace samozřejmě není možné automatizovat.

6.4 Senzory

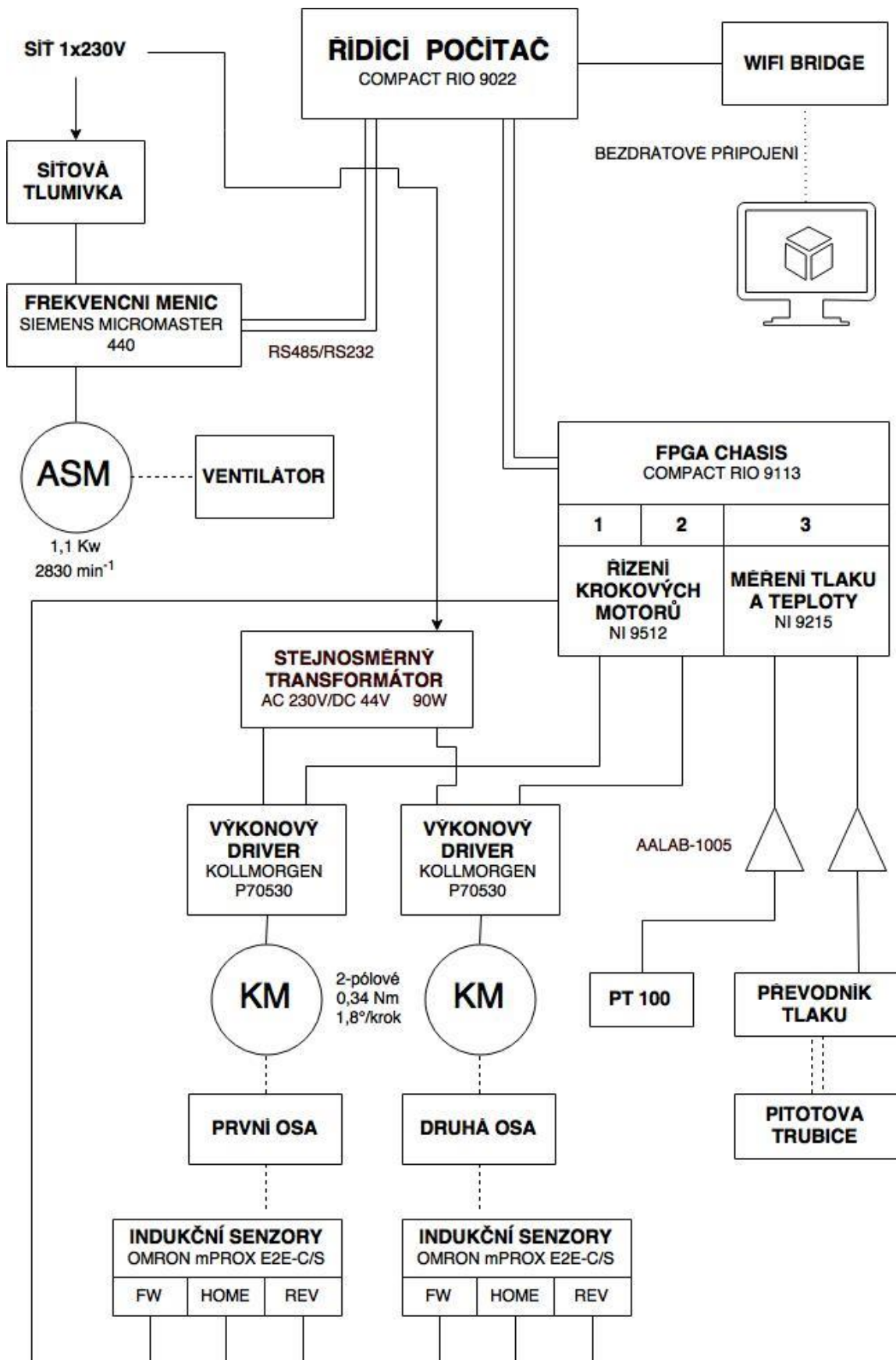
Každá osa je opatřena trojicí indukčních senzorů – první určuje počáteční polohu a zbývající dva koncové polohy. Koncové senzory se nacházejí v pozici $\pm 40^\circ$ a při zaznamenání tělesa vystupujícího z osy zastaví pohyb. Senzor počáteční polohy je softwarově seřízen následujícím způsobem: při zaznamenání tělesa nechá osu přejet do chvíle, než se signál ztratí, poté se vrátí přesně do poloviny ujetého úseku. Použity byly kompaktní senzory OMRON μ PROX E2E-C/S, určené primárně k přesnému měření vzdálenosti v rozsahu 1,2 mm, pro vysokou přesnost a rychlou odezvu.

7 Řídící elektronika

Kalibrační zařízení je analogově řízeno soustavou kupovaných jednotek, jejich výčet a vzájemné propojení je zřejmé ze schématu řízení na Obr. 14. Soustava se dělí na silnoproudou část pohánějící ventilátor a slaboproudou část pohánějící krokové motory a zpětnovazební měření. Silnoproudá je rozmístěna v okolí ventilátoru co nejdále od slaboproudé skříně, aby nedocházelo k rušení frekvenčním měničem. Srdcem řízení je programovatelný řídicí počítač COMPACT RIO 9022 od společnosti National Instruments s integrovaným FPGA CHASSIS COMPACT RIO 9113.

Asynchronní motor silnoproudé části je napájen ze sítě přes síťovou tlumivku určenou k omezení negativních vlivů motoru a jeho řízení na napájecí síť. Motor je zapojen do trojúhelníku a řízen frekvenčním měničem SIEMENS MICROMASTER 440. Nastavována je rychlost proudu, kterou řídicí počítač vypočítává z měřeného tlaku a přes PI regulátor řídí otáčky motoru a tudíž i rychlost proudu. Celkový tlak je měřen pitotovou trubicí vyrobenou z měděné trubičky o vnějším průměru pouhých 1,6mm, aby nenarušovala proud. Umístěna je nad voštinou usměrňovací komory.

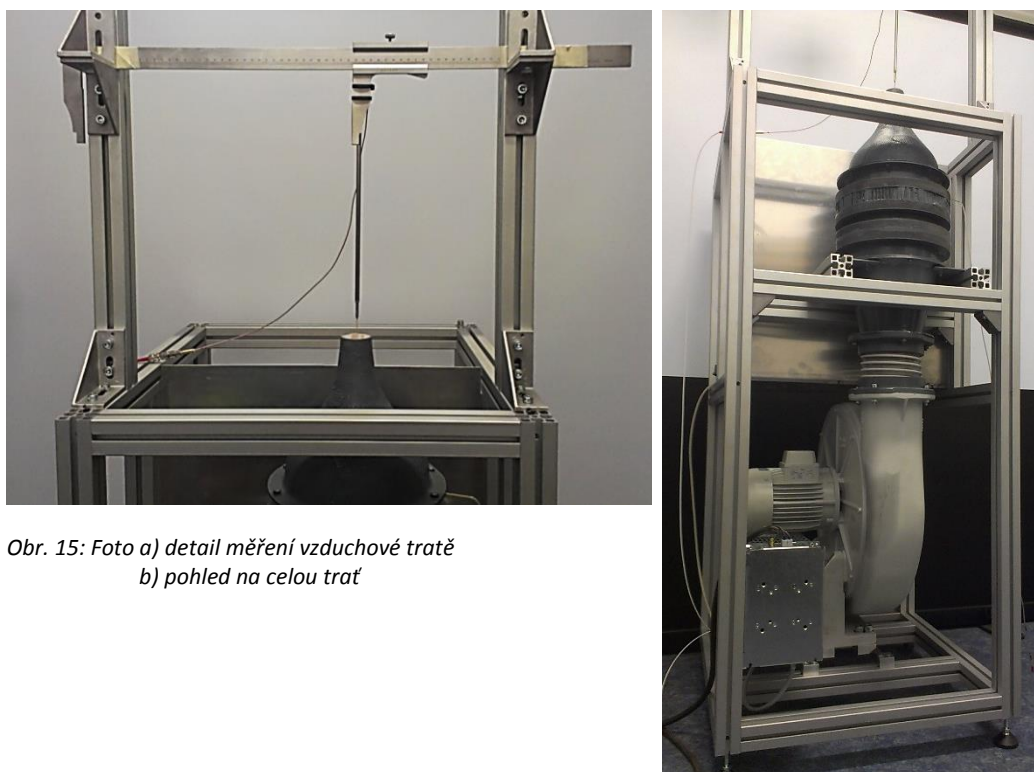
Do FPGA CHASSIS jsou vsunuty dvě jednotky NI 9512 řídicí krokové motory polohovacího zařízení a jednotka NI 9215 zpracovávající signály z teploměru a tlakoměru. Krokové motory jsou poháněny přes výkonové drivery KOLLMORGEN 970530, jejich relativní poloha vůči počátku se stanovuje počtem kroků. Počátek je určen polohou indukčního senzoru OMRON μ PROX E2E-C/S stejně jako koncové polohy (princip viz kapitola 6.4). Na měření teploty bylo zvoleno platinové teplotní čidlo PT 100 pro svou vysokou přesnost, rychlou odezvu (nízká časová konstanta) a malé rozměry (minimální narušení proudu). Signály z teplotního i tlakového čidla jsou zesíleny dvojicí zesilovačů.



Obr. 14: Schéma řízení

8 Měření vzduchové tratě

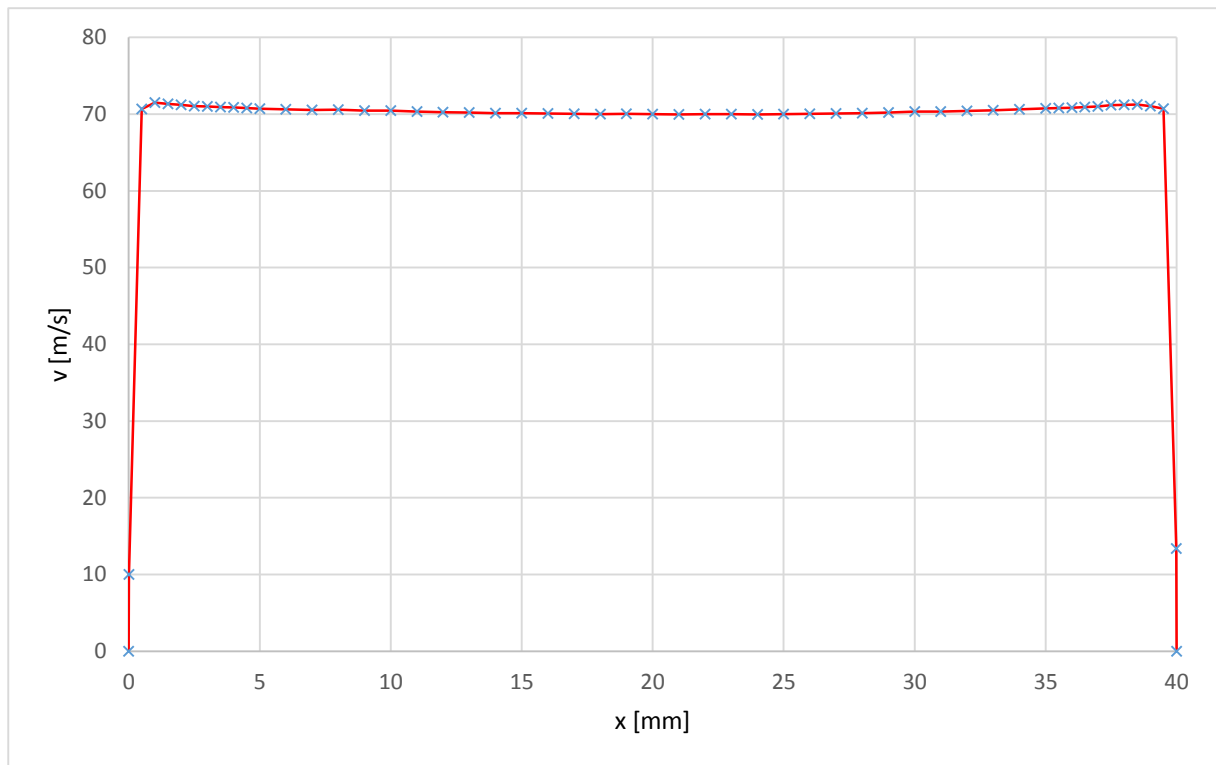
Účelem měření bylo ověřit, zda vyrobená vzduchová trať splňuje požadavky vytyčené na začátku projektu. Pro měření byla využita sonda s jedním žhaveným drátkem DANTEC 9055P0011 připevněná k podpěrnému systému a posuvnému měřidlu s reálným rozlišením 0,5mm. Signál ze sondy jde přes zesilovač AALab-1005 do měřící karty NI 6251, která je dále připojena k PC. Pro zpracování byl využit software Signal Express společnosti National Instruments. Schéma měření je zřejmé z fotek na Obr. 15. Ventilátor byl roztočen na otáčky, kterým odpovídala rychlost proudu 70ms^{-1} , čímž byl splněn první požadavek na dostatečnou rychlost.



Obr. 15: Foto a) detail měření vzduchové tratě
b) pohled na celou trať

Druhým požadavkem je homogenita proudového pole vystupujícího z trysky, jinak řečeno rychlostní profil v průběhu celého průměru výstupní trysky by měl být pokud možno konstantní. Takového rychlostního profilu samozřejmě nelze dosáhnout, vzduch na stěnách ulpívá a jeho rychlost se směrem ke středu (měřené oblasti) vyvíjí. Měřen byl celý průměr, 5mm od stěny s krokem 0,5mm, dále po jednom milimetru. Naměřené hodnoty ve voltech byly přepočteny na rychlost v metrech za sekundu a vyneseny do grafu na Obr. 16. Z grafu lze usoudit, že tloušťka mezní vrstvy je přibližně 0,5mm, poté následuje konvexní profil, ve kterém je rychlost proudu téměř konstantní s rozdílem maximálně 2%. V oblasti kalibrace ($\pm 5\text{mm}$ od středu) je rozdíl pouhých $0,15\text{ms}^{-1}$ – 0,2% z měřené rychlosti. Naměřený profil můžeme považovat za dostatečný.

Pro úplnost byla změřena turbulence v oblasti kalibrace $Tu = 0,075\%$ a ve vzdálenosti 1mm od stěny $Tu = 0,11\%$. Úroveň turbulence je také dostatečně nízká.



Obr. 16: Rychlostní profil ve výstupní trysce

9 Závěr

Cílem bakalářské práce byl návrh a konstrukce kalibračního zařízení se zaměřením především na vzduchovou trať a polohovací zařízení. Dalšími kroky ke kompletaci zařízení bude opláštění zařízení včetně odhlučňovací izolace, výroba vzduchového filtru a vývoj softwaru řídící kalibraci. Proměřením charakteru proudu vystupujícího ze vzduchové tratě byla ověřena její správná funkce, stejně tak vypočítaná chyba natočení polohovacího zařízení je dostatečně nízká i pro přesná měření. Zařízení bude použito ke kalibraci anemometrických sond používaných v aerodynamickém tunelu Ústavu letadlové techniky FS ČVUT na Karlově náměstí.

Seznam obrázků

Obr. 1: Princip HWA	2
Obr. 2: Srovnání výstupů měření metodami CTA, LDA a PIV	2
Obr. 3: Typy sond: Film probe, Fiber-film probe, X-probe, Tri-axial probe	3
Obr. 4: Model vzduchové tratě.....	5
Obr. 5: Model polohovacího zařízení.....	6
Obr. 6: Závislost rozdílu tlakových sil na objemovém průtoku	7
Obr. 7: Schéma pružné spojky	8
Obr. 8: Schéma difuzoru	9
Obr. 9: Schéma usměrňovací komory	9
Obr. 10: Schéma výstupní trysky	10
Obr. 11: Forma na výstupní trysku.....	12
Obr. 12: Schéma pohonu polohovacího zařízení.....	13
Obr. 13: Model polohovacího zařízení.....	14
Obr. 14: Schéma řízení.....	19
Obr. 15: Foto-měření vzduchové tratě.....	20
Obr. 16: Rychlostní profil ve výstupní trysce.....	21

Seznam tabulek

Tabulka 1: Výkonové parametry RD 62	7
Tabulka 2: Srovnání materiálů výstupní trysky	11

Seznam programů

CATIA V5R21, Dassault Systèmes

MATLAB R2012b, výuková verze

Flow Chart Maker & Online Diagram Software, dostupné z: <https://www.draw.io/>

MS Word 2015

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

MATLAB skript – body dvousinové křivky