

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní
Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

**Měření charakteristiky dmyhadla a návrh experimentu pro měření
parametrů vstupního kanálu modelového dmyhadlového letounu**

**Blower Characteristic Measurement and Design of an Experiment to
Measure Parameters of the Blower Model Plane Inlet**

Bakalářská práce

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jan Punčochář

Vypracoval: Robin Schweika

Praha 2015



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: **p. Robina SCHWEIKU**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Měření charakteristiky dmyhadla a návrh experimentu pro měření parametrů vstupního kanálu modelového dmyhadlového letounu**

název anglicky: **Blower Characteristic Measurement and Design of an Experiment to Measure Parameters of the Blower Model Plane Inlet**

Zásady pro vypracování:

- 1) Proved'te rešerši určování dmyhadlových charakteristik. Dále proved'te rešerši možností experimentální analýzy vstupního kanálu dmyhadla včetně měřicích metod.
- 2) Navrhněte měřicí trať pro měření tlakové charakteristiky. Navrženou trať postavte a proved'te na ní měření charakteristiky dmyhadla.
- 3) Navrhněte experiment pro analýzu tvaru vstupního kanálu s ohledem na účinnost dmyhadla a minimalizaci ztrát.

Rozsah průvodní zprávy: 25 stran

Rozsah grafických prací: 2 výkresy

Seznam doporučené literatury:

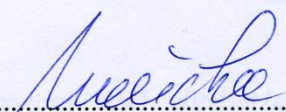
- 1) CORY, William. Fans and Ventilation. 1st Edition. Elsevier Science, 2005. 424 p. ISBN 978-00-80-44626-4.
- 2) NOVÝ, Richard. Ventilátory. Vyd. 3. přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 104 s. ISBN 978-80-01-03758-4.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jan Punčochář

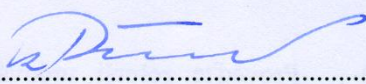
Konzultant bakalářské práce: -

Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015


.....
Prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.
Vedoucí Ú 12112




.....
Prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
Děkan fakulty

V Praze dne 30. 4. 2015

Anotační list

Jméno autora:	Robin Schweika
Název BP:	Měření charakteristiky dmyhadla a návrh experimentu pro měření parametrů vstupního kanálu modelového dmyhadlového letounu
Anglický název:	Blower Characteristic Measurement and Design of an Experiment to Measure Parameters of the Blower Model Plane Inlet
Akademický rok:	2014 / 2015
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí BP:	Ing. Jan Punčochář
Bibliografické údaje:	Počet stran: 35 Počet obrázků: 27 Počet grafů: 1 Počet příloh: 4
Klíčová slova:	Měření tlaku, rychlosti a průtoku, charakteristika dmyhadla, návrh měřicího standu
Keywords:	Measurement of pressure, velocity and flow, blower characteristic, design of an experiment
Anotace:	Pro dané dmyhadlo s neznámými parametry bylo potřeba změřit tlakovou charakteristiku. Pro tento účel byl navržen a postaven měřicí stand. Měřicí stand byl navržen na základě možností které jsou v laboratoři. Další parametry měřicího standu byly zvoleny podle normy pro měření průtoku pomocí clony, která bude v měření použita.
Abstract:	For a given blower with unknown parameters, it was necessary to measure the pressure characteristic. For this purpose it was necessary to design and construct a measuring stand. The laboratory equipment was taken into consideration when designing the measuring stand. Other parameters of measuring stand were selected according to the volume flow rate measurement using orifice plate.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Měření charakteristiky dmyhadla a návrh experimentu pro měření parametrů vstupního kanálu modelového dmyhadlového letounu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Punčocháře a pouze s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Praze dne.....

Robin Schweika

Poděkování

Tímto děkuji mému vedoucímu Janu Punčocháři a Vítu Štorchovi za množství věnovaného času, cenných rad a připomínek při vypracování bakalářské práce.

Robin Schweika

Obsah

Obsah	1
Seznam značení	2
1 Úvod	4
2 Rešeršní část	4
2.1 Vstupní ústrojí	4
2.2 Měření tlaku	4
2.3 Měření rychlosti	9
2.4 Měření průtoku	13
2.5 Dmychadlo	13
3 Experimentální část	17
3.1 Návrh měřicího standu pro změření charakteristiky dmychadla	18
3.2 Výroba měřicího standu	21
3.3 Zpracování dat	24
4 Návrh tvaru vstupního ústrojí	26
5 Návrh měřicí standu pro vstupní ústrojí	28
5.1 Společné prvky obou dále zmiňovaných variant	28
5.2 První varianta měřicího standu	28
5.3 Druhá varianta měřicího standu	29
6 Závěr	30
7 Seznam obrázků	31
8 Zdroje	32
9 Přílohy	33
10.1 Výkres navržené clony pro měření průtoku	33
10.2 Matlab skript pro odečítání hodnot z tlakových převodníků	34
10.3 Matlab skript pro vyhodnocení měření	34
10.4 Matlab skript pro výpočet objemového průtoku na clonce	35

Seznam značení

g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
p_c	[Pa]	celkový tlak
p_d	[Pa]	dynamický tlak
p_s	[Pa]	statický tlak
p_b	[Pa]	barometrický tlak
Δp	[Pa]	rozdíl tlaků
ρ	[kg/m ³]	hustota
ϵ_0	[F/m]	permitivita vakua
ϵ_r	[F/m]	relativní permitivita
ρ_{el}	[$\Omega \cdot m$]	měrný elektrický odpor
v_∞	[m/s]	rychlost neovlivněného proudu tekutiny
v	[m/s]	střední rychlost proudění
\dot{V}	[m ³ /s]	objemový průtok
P	[W]	výkon
t	[s]	čas
R	[Ω]	odpor
U	[V]	napětí
C	[F]	kapacita
I	[A]	proud
τ	[C°]	teplota
T	[K]	termodynamická teplota
S	[m ²]	plocha

η	[-]	účinnost
F	[N]	síla
n	[ot/min]	otáčky za minutu
φ	[%]	relativní vlhkost
r_A	[J/kg·K]	plynová konstanta suchého vzduchu
r_V	[J/kg·K]	plynová konstanta vodních par
p_V	[Pa]	parciální tlak vodních par
p_V''	[Pa]	parciální tlak sytých vodních par
f	[Hz]	frekvence

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je změření tlakové charakteristiky neznámého dmyhadla. Znalost tlakové charakteristiky je klíčová pro návrh aplikací dmyhadla tak, aby dmyhadlo pracovalo s vysokou účinností. Tlaková charakteristika je závislost celkového dopravního tlaku na objemovém průtoku.

Pro tento účel byl navrhnout měřicí stand na základě možností, které jsou v laboratoři. Měřicí stand byl zkonstruován s ohledem na několik faktorů, především byly vzaty v potaz přípojovací rozměry dmyhadla a prostorová omezení v laboratoři. Trať je koncipována jako modul připojitelný ke stávajícímu aerodynamickému tunelu, kterým budou kompenzovány vlivy měřicí tratě na dmyhadlo.

Následně se naměřená tlaková charakteristika použije pro optimalizaci geometrie vstupního ústrojí modelu dmyhadlového letounu pomocí numerických metod.

V další části je návrh standu pro měření parametrů vstupního ústrojí modelového dmyhadlového letounu. Stand se bude navrhovat pro aerodynamický tunel který je v Praze-Malešicích. Měření bude následovat po optimalizaci vstupu. Je vhodné pro ověření správnosti numerického výpočtu navržené geometrie

2 Rešeršní část

2.1 Vstupní ústrojí

Vstupní ústrojí slouží k přívodu vzduchu z vnější části letadla do části pohonu. Nejvýhodnější je umístění vstupního ústrojí do přední části letadla, protože zde ještě nedošlo k ovlivnění proudění. Konstrukční provedení vstupního ústrojí závisí na projektované letové rychlosti letadla. U podzvukových letadel je obvykle vstupní ústrojí neregulovatelné a s oblou náběžnou hranou. Naopak je tomu u nadzvukových letadel, kde se setkáváme s regulovaným vstupním ústrojím a ostrou náběžnou hranou z důvodu zpomalení a usměrnění proudícího vzduchu.

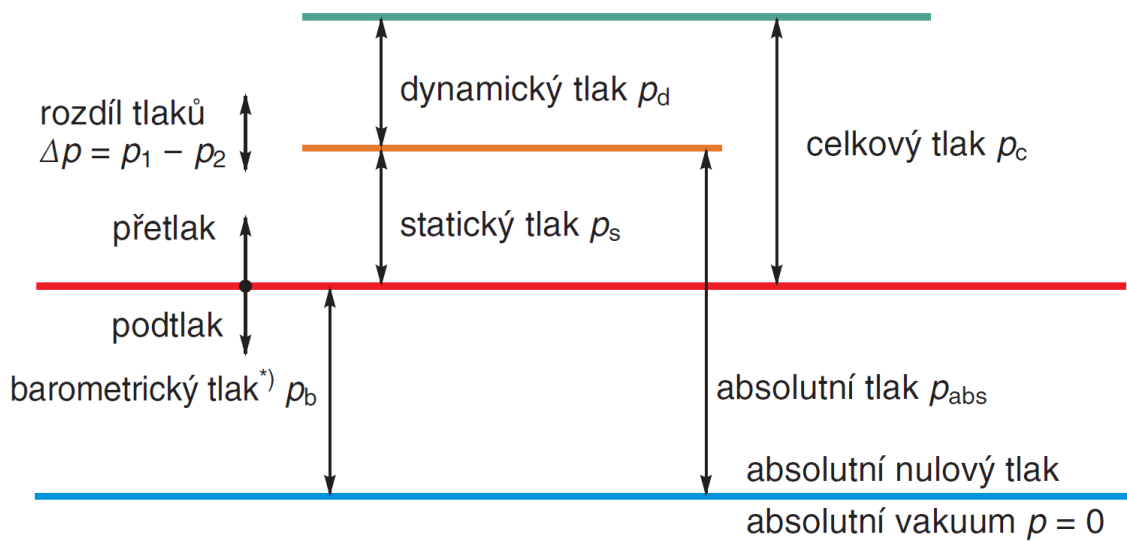
2.2 Měření tlaku

2.2.1 Základní pojmy

Měření tlaku v proudící tekutině je základní činnost, využívá se při stanovení rychlosti a následně objemového nebo hmotnostního průtoku.

- Barometrický (atmosferický) tlak je vyvolaný gravitační silou Země, která působí na molekuly plynu, z nichž je vzduch složen.

- Podtlak je tlak nižší než barometrický tlak.
- Přetlak je tlak vyšší než barometrický tlak.
- Statický tlak je v tekutinách vyvolán díky zemskému tíhovému zrychlení g .
- Absolutní tlak má počátek vztažen k nulovému tlaku (k vakuu).
- Dynamický tlak vzniká v důsledku proudění tekutiny určitou rychlostí.
- Celkový tlak se tedy rovná součtu tlaku statického a dynamického.



*) normální barometrický tlak $p_{bn} = 101\,325\text{ Pa}$

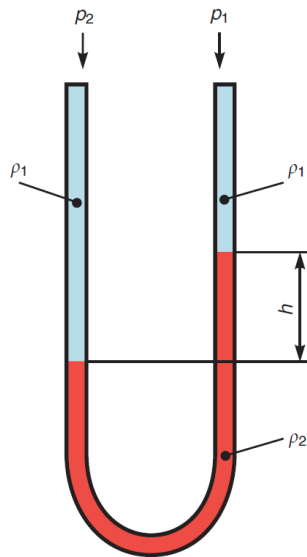
Obrázek 1-základní pojmy při měření tlaku [4]

2.2.2 Kapalinové manometry

Kapalinové manometry mají konstrukčně nenáročné řešení. Při nízkých nákladech umožňují změřit rozdíl tlaků. Ovšem vysoká setrvačnost omezuje použití na měření časově stálých nebo středních hodnot. Stupnice kapalinového manometru je dána hydrostatickým zákonem. U kapalinových manometrů není praktické odečítání hodnot pomocí počítačové techniky. Výstup kapalinového manometru se tedy obtížně digitalizuje. Rozdíl tlaků se určí podle následujícího vzorce.

$$p_1 - p_2 = \rho_2 \cdot g \cdot h \quad [Pa], \quad (1)$$

kde $p_1 - p_2$ je rozdíl tlaků, ρ_2 je hustota kapaliny v manometru, g je gravitační zrychlení a h je rozdíl výšky hladin.



Obrázek 2-kapalinový manometr [4]

Nejjednodušším manometrem je U-trubice s vhodnou kapalinovou náplní, ke které je přidělané měřítko pro odečítání délek sloupců. Běžnou náplní je voda nebo líh případně rtuť pro měření vyšších rozdílů tlaků.

Dalšími typy manometrů jsou například: diferenční manometr, mikromanometr Prandtlův a Betzův vodní mikromanometr.

2.2.3 Kapacitní snímač tlaku

Princip kapacitního snímače tlaku je jednoduchý. Jedna elektroda kondenzátoru je tvořena membránou, přičemž se její poloha mění s vlivem tlaku. Následně tedy změnou vzdálenosti elektrod se mění kapacita. Pro deskový kondenzátor platí následující vztah

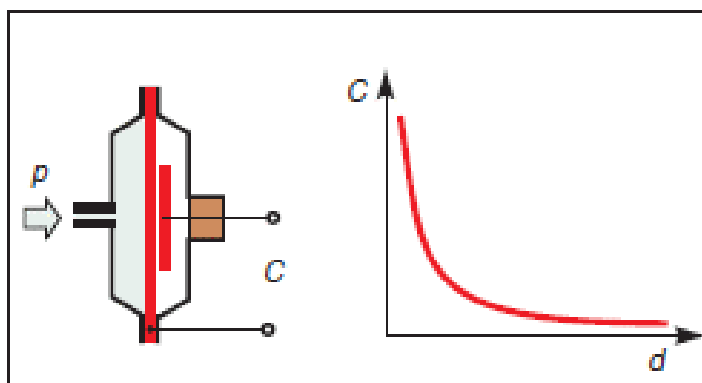
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} \quad [F], \quad (2)$$

kde S je plocha elektrod, d je vzdálenost elektrod, ε_0 permitivita vakua a ε_r poměrná permitivita.

Pokud uvažujeme, že je mění jen d , tak lze ostatní veličiny zahrnout do konstanty k .

$$C = \frac{k}{d} \quad [F] \quad (3)$$

Ze vztahu (2) vyplývá, že je charakteristika nelineární.

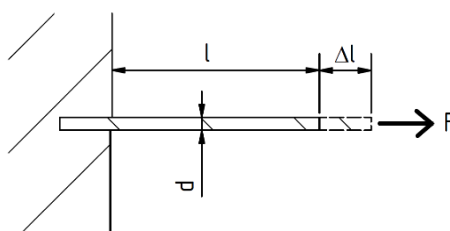


Obrázek 3-princip kapacitního snímače [5]

2.2.4 Membrána s odporovými tenzometry

Odporový tenzometr je senzor, u kterého se mění elektrický odpor při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací (platí platnost Hookova zákona).

Například pokud bychom měli odporový drát o délce l , průřezu S a měrném odporu ρ_{el} , který je vystaven účinkům síly F , tak že se prodlouží o délku Δl . Původní odpor vodiče



Obrázek 4-princip tenzometru [5]

$$R = \frac{\rho_{el} \cdot l}{S} \quad [\Omega], \quad (4)$$

se v důsledku působící síly změní o ΔR , protože se jeho délka změní o Δl , průřez o ΔS a měrný odpor o $\Delta \rho_{el}$ (viz obrázek 4). Pro malé změny platí :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho_{el}}{\rho_{el}} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} \quad (5)$$

Pokud použijeme

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (6)$$

tak pro relativní změnu můžeme odvodit, že

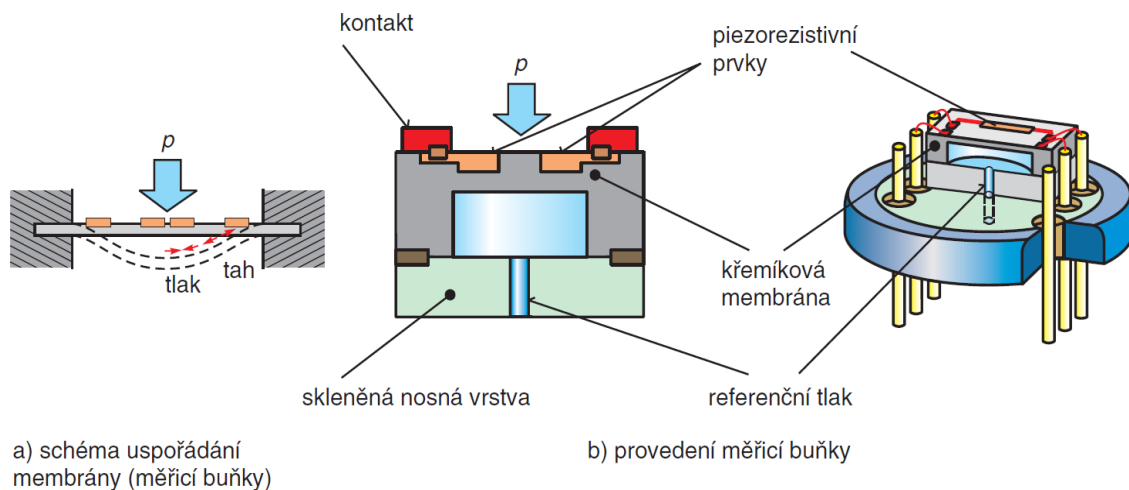
$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta l}{l} = k \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

kde k je koeficient deformační citlivosti.

2.2.5 Membrána s piezorezistivními tenzometry

Základem je měřící buňka, která převádí tlak na elektrický signál. Tu tvoří křemíková membrána, na jejímž povrchu jsou piezoresistivní prvky. Jedná se o kruhovou membránu, která má průměr 0,8 až 6 mm podle měřeného tlaku. Technologie výroby membrány je podobná technologii výroby integrovaných obvodů, tedy leptáním. Piezoresistivní prvky jsou následně vytvořené difuzí. Mezi hlavní výhody křemíkových membrán patří platnost Hookova zákona v širokém rozsahu, zanedbatelná hystereze a použitelnost při vyšších teplotách až 125°C.

Na obrázku 5a je zakreslena membrána v nezatíženém stavu a čárkovaně ve stavu při zatížení tlakem p . V zatíženém stavu lze na membráně nalézt místa, kde jsou povrchová napětí v tlaku a v tahu. Křemíkové čidlo tlaku je vytvořeno jako křemíkový čip (viz obrázek 5b) s vlastní membránou o tloušťce 2 až 5 μm pro malé a 20 až 50 μm pro velké tlaky.



Obrázek 5-čidlo tlaku s piezorezistivními tenzometry [5]

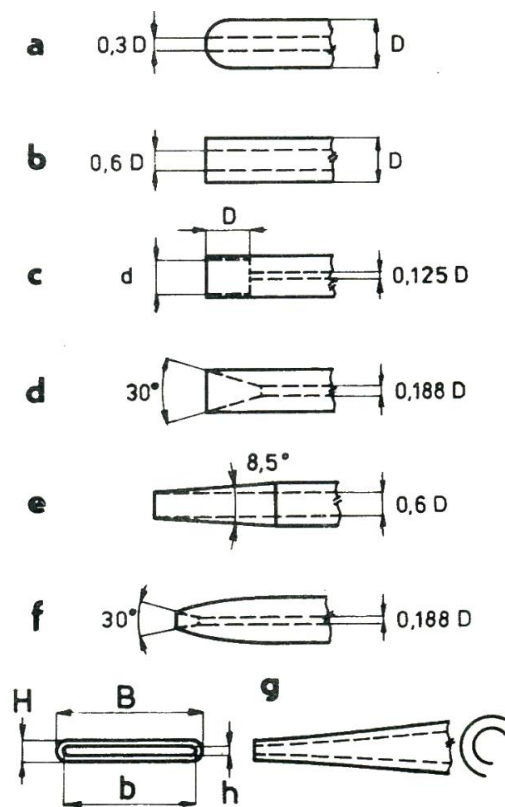
2.3 Měření rychlosti

Měření rychlostí při provádění experimentu je velice důležité. Při měření rychlostního pole je třeba brát v potaz rozměry sondy, které by měly být dostatečně malé vzhledem k rozsahu měřeného proudu. Chceme, aby měřený proud byl co nejméně rušen. Sondy se dělí na dvě skupiny:

Závislé na směru proudění, tyto sondy dokáží přesně změřit rychlost jen, pokud v měřeném místě známe směr proudění.

Nezávislé na směru proudění, tyto sondy dokáží přesně změřit rychlosti i neznámého směru proudění.

2.3.1 Pitotova sonda



Obrázek 6-různá provedení Pitotových sond [1]

Pitotova sonda je jednoduchá trubice, která je natočena proti směru proudu. Provedení ústí může být různé (viz obrázek 6).

Tato sonda má široké využití při měření rychlosti v oblastech proudění s konstantním statickým tlakem. Používá se například při měření rychlosti letadel nebo rychlosti proudění v mezní vrstvě. Její výhodou jsou malé rozměry. Toho lze využít při měření úzké oblasti, aniž bychom toto proudění výrazně ovlivnili (v nejmenších případech vnější průměr D může být $0,5-1$ mm). Tuto sondu lze běžně využívat pro měření rychlosti proudu vzduchu odkloněného až o 15° od osy sondy. Pokud se sonda upraví (Kielova trubice) může se použít

pro měření rychlosti proudu vzduchu odkloněného až o 50° od osy sondy.

2.3.2 Prandtlova sonda

Neboli Pitot-statická trubice sonda je zobrazena na obrázku 7. Odběr celkového tlaku je umístěn ve stagnačním bodě sondy (odběr má průměr $0,3 \cdot D$), odběry statického

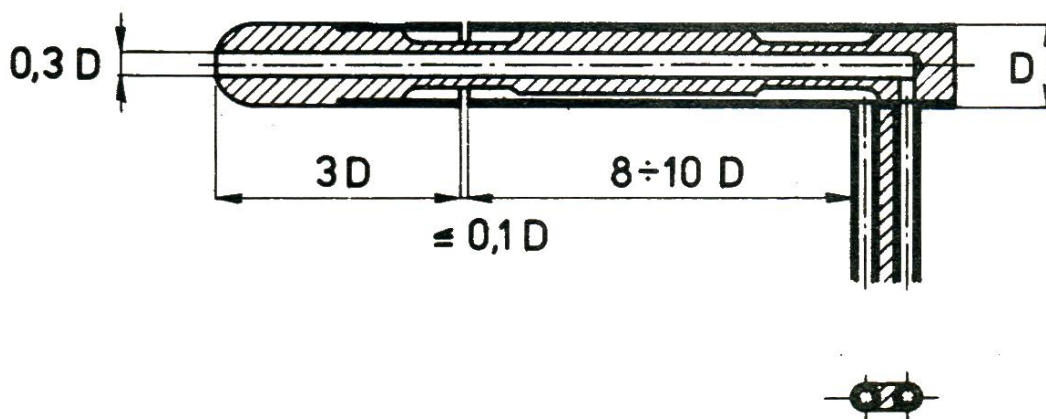
tlaku jsou umístěny po obvodu (mají průměr maximálně $0,1 \cdot D$). Provedení sondy je dané normou.

Tato sonda se řadí do skupiny sond, které dokážou správně změřit rychlost, jen pokud jsou nastaveny ve směru proudění, konkrétně tato sonda má přípustnou odchylku $\pm 20^\circ$, aby nedošlo k ovlivnění výsledků měření. Běžná přesnost při měření s Prandtlovou sondou dosahuje 1% z naměřené hodnoty. Ovšem můžeme dosáhnout i přesnosti až 0,1% z naměřené hodnoty. Dá se použít pro měření rychlostí od 1 m/s. Pomocí následujícího vztahu můžeme vypočítat rychlost proudění:

$$p_d = p_c - p_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \rightarrow v_\infty = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}}, \quad (8)$$

kde p_d je dynamický tlak, p_c je celkový tlak, p_s je statický tlak, ρ je hustota tekutiny a v_∞ je rychlost neovlivněného proudu tekutiny.

Další typy sond, které vycházejí ze stejných principů, jako Prandtlova sonda jsou hřebenové sondy, válcové sondy, kulové sondy (po zkalibrování lze měřit až v rozmezí $\pm 27^\circ$).



Obrázek 7-Prandtlova sonda [1]

2.3.3 Anemometrické metody

Anemometry založené na mechanickém principu využívají silových účinků proudu tekutiny. Využívají se jako průtoková měřidla.

Axiální lopatkové anemometry mohou měřit rychlost od 3m/s. Tento anemometr musíme nastavit ve směru proudu.

Miskový anemometr je radiální anemometr, který nemusíme směřovat dle směru proudění. Využití tohoto přístroje je především v meteorologii, dále se dá využít při měření rychlosti v ústí potrubí. Rychlost můžeme měřit od 3 m/s.

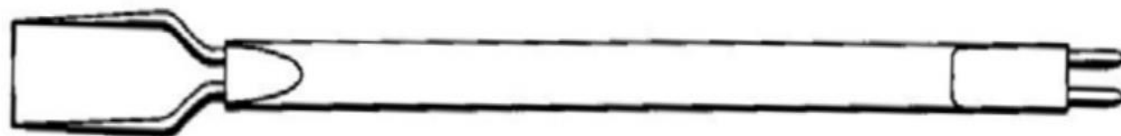
Anemometry založené na elektrickém principu mají výhodu v elektrickém principu měření, díky tomu je dosahováno širokého rozsahu měření při zachování vysoké přesnosti.

Anemometr se žhavenými elementy, neboli termoanemometr je zobrazen na obrázku 8. Tato sonda je tvořena drátkem z wolframu průměru 5 μm a délky 0,5 až 3 mm, na který je nanesená platinová vrstva, která slouží k ochraně. Tento drátek je žhavený elektrickým proudem na teplotu (100-300)°C. Výstupní elektrický signál závisí na změně elektrického odporu elementu s jeho teplotou. Tento jev závisí na odvodu Joulova tepla proudem do okolí. Změna odporu se dá počítat z Ohmova zákona.

$$R = \frac{U}{I}, \quad (9)$$

kde R je odpor, U je napětí a I je proud. V praxi řídicí obvod udržuje jednu z těchto tří veličin konstantní a podle dodávky energie do drátku se vypočítá rychlost. Jsou dvě možná zapojení pro vyhodnocení termoanemometru:

1. První možností je zapojení jako systém s konstantním proudem.
2. Druhou možností je zapojení jako systém s konstantní teplotou drátku. Toto zapojení má výhodu v jednodušším zpracování signálu a zachování vyšší přesnosti. Teplotní indikace žhaveného drátku se provádí pomocí termočlánku. Tento způsob měření lze využít pro měření širokého rozsahu rychlostí proudění.



Obrázek 8-anemometr se žhaveným drátkem [1]

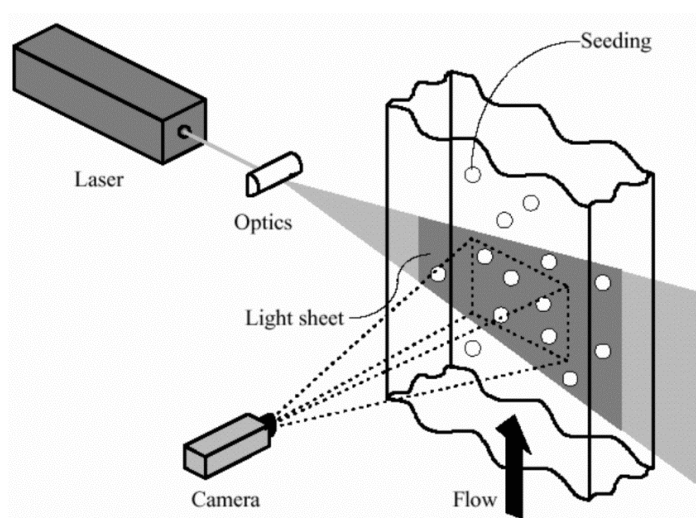
2.3.4 Bezkontaktní metody

Jsou ideální z hlediska minimálního narušení proudového pole.

Elektromagnetický indukční princip spočívá ve vzniku elektromotorické síly při pohybu vodivé tekutiny v magnetickém poli. Používá se při vyšetření turbulentních veličin.

Akustický princip, který pracuje s ultrazvukovými vlnami. Je vhodný pro měření kapalin a plynů bez nečistot, bublin a sedimentů (jakékoliv rozhraní může odrážet nebo pohlcovat ultrazvukové vlny). Je možné měřit i při vysokých teplotách (až 170°C).

PIV metoda



Obrázek 9- metoda PIV [11]

Metoda Particle Image Velocimetry funguje na jednoduchém principu. Pomocí laseru a optiky s válcovou čočkou se z laserového paprsku vytvoří rovinná plocha, která osvětlí proudící částice. Částice jsou vyfotografovány digitální kamerou ve dvou krátkce po sobě následujících časech (t_1 a t_2). Kamera je umístěna kolmo k rovině osvětlené plochy. Ta zaznamená polohy značkových částic. Z vyhodnocené vzdálenosti d , jakou částice urazí mezi dvěma body lze vypočítat rychlost v .

$$v = \frac{d}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

Měřením PIV tedy získáme obraz okamžitého rychlostního pole. Obvyklá frekvence měření je 4 Hz.

2.4 Měření průtoku

K přímému měření průtoku se široce používají škrťací prvky, které jsou zabudovány v potrubí. Funkce škrťacích prvků je založena na pevné závislosti hodnoty průtoku na měřeném tlakovém spádu (rozdílu) zabudovaného škrťacího prvku. Veškeré informace o tom jak navrhnout škrťací prvky (clona, tryska, Venturiho trubice) jsou popsány v normě. Pro správné měření je potřeba všechny předepsané podmínky dodržet.

Objemový průtok lze také dopočítat z naměřené střední rychlosti proudění a z průtočné plochy.

$$\dot{V} = v \cdot S, \quad (11)$$

kde \dot{V} je objemový průtok, v je střední rychlost proudění, S je průtočná plocha.

2.5 Dmychadlo

V případě axiálního dmychadla vzduch do dmychadla vstupuje i vystupuje v axiálním směru.

Na obrázku 10 je zobrazeno schéma axiálního dmychadla. Dmychadlo se skládá z rotorové části 1 s oběžnými lopatkami 2. Mezi další části patří kryt 3, který tvoří statorovou část. Ten usměrňuje vtok do dmychadla nebo výtok. Uprostřed dmychadla se nachází způsob pohonu, nejčastěji elektromotor 4. Dmychadlo také může být opatřeno přírubou 5, která slouží k uchycení.

2.6.1 Charakteristiky dmychadla

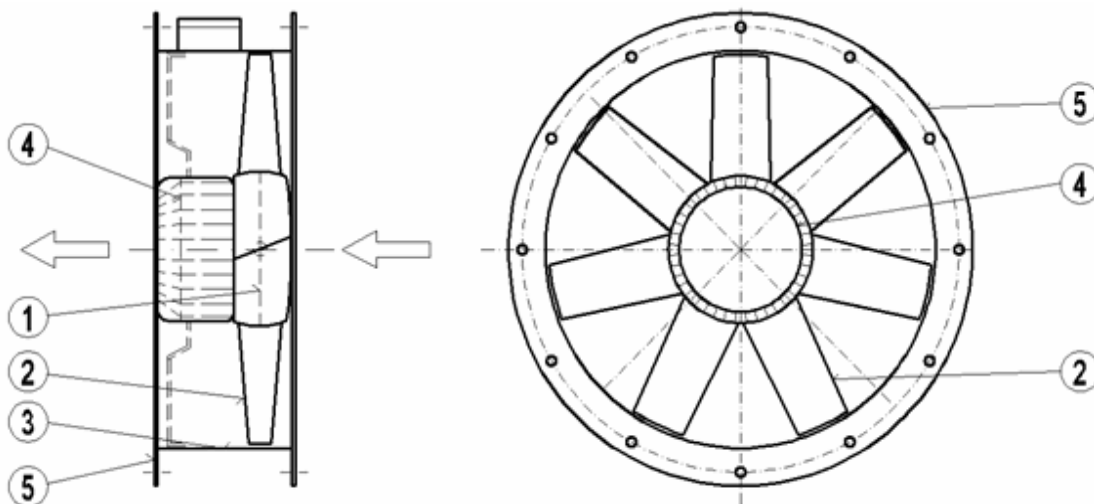
Základní parametry dmychadel jsou:

1) Objemový průtok \dot{V} [m^3/s], což znamená jaké množství vzduchu, je dmychadlo schopno dopravit. Většinou se udává pro hustotu vzduchu $\rho = 1,2 \text{ kg}/m^3$.

2) Celkový dopravní tlak Δp [Pa]. Dmychadlo zajišťuje průtok vzduchu potrubím, to je vlastnost, která je určena dopravním tlakem dmychadla. Dmychadlo musí překonat tlakové ztráty potrubního systému.

3) Výkon dmyhadla P [W] je dán součinem průtoku a celkového dopravního tlaku, tedy:

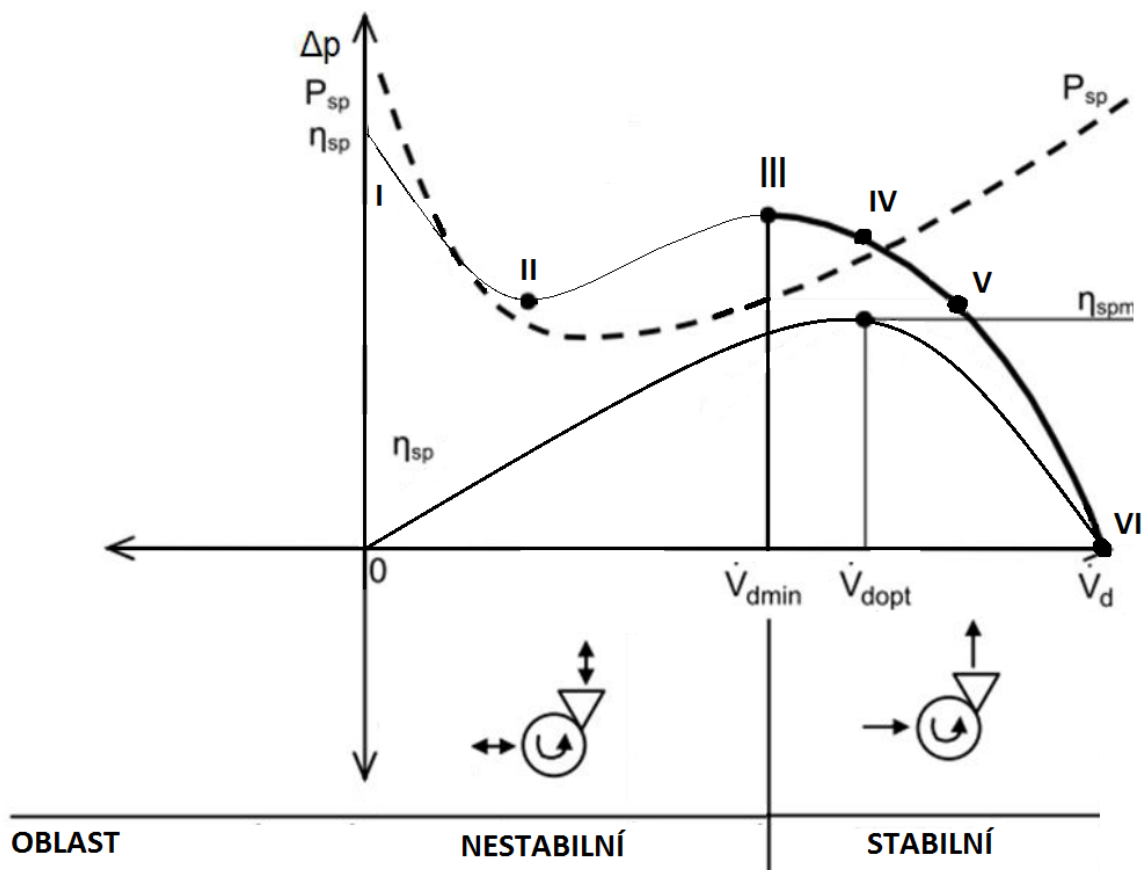
$$P = \dot{V} \cdot \Delta p \quad (12)$$



Obrázek 10-schéma axiálního dmyhadla [7]

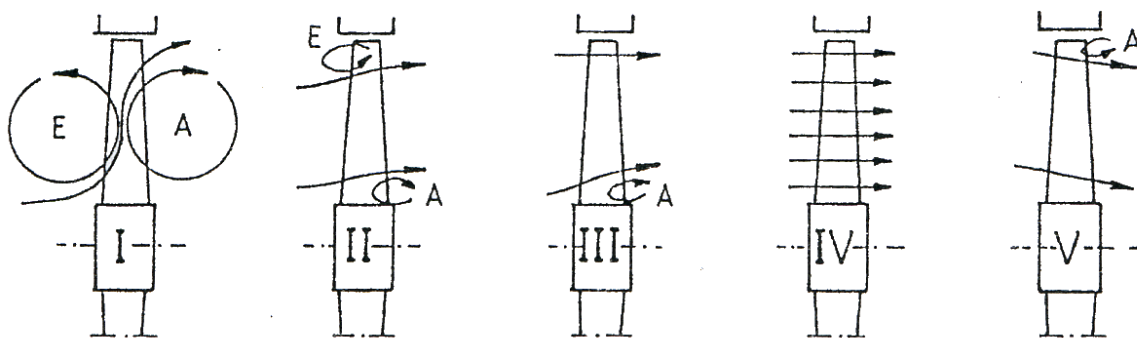
Tlaková charakteristika dmyhadla je závislostí celkového dopravního tlaku, výkonu a případně účinnosti na objemovém průtoku. Jsou to křivky, které udávají, jaké dané dmyhadlo bude mít vlastnosti při daných otáčkách. Příklad obecné charakteristiky dmyhadla je na obrázku 11.

Charakteristiky dmyhadel se měří pro konkrétní pracovní plyn a teplotu. Pokud bychom změnili pracovní plyn nebo jeho teplotu, změnila by se pak jeho hustota a viskozita. Tím by se změnila charakteristika dmyhadla. Platí, že při snížení hustoty pracovního plynu a při konstantním průtoku je celkový dopravní tlak nižší a naopak. Pokud bychom chtěli charakteristiky různých dmyhadel porovnat, je nutné, aby se jednotlivé charakteristiky přepočítaly pro stejnou hustotu plynu.



Obrázek 11-obecná charakteristika dmyhadla [3]

Charakteristika stavu dmyhadla je rozdělena pomocí bodu III (v tomto bodě dochází k odtržení proudu vzduchu) na nestabilní (I-III) a stabilní (III-VI) oblast. Do bodu III, je charakteristika nestabilní v této části by dmyhadlo nemělo pracovat. Následky provozu dmyhadla v nestabilní oblasti se projevují zvýšením hluku dmyhadla a



Obrázek 12-proudění oběžným kolem axiálního dmyhadla[3]

nerovnoměrným zatížením, které může způsobit až mechanické poškození dmyhadla. Od bodu III je charakteristika stabilní, pro tuto oblast je dmyhadlo navrhováno.

Každý bod křivky zobrazuje možný pracovní bod dmyhadla pro dané otáčky. Z konstrukčního hlediska je nejlepší, aby dmyhadlo konalo práci v návrhovém bodě. V tomto bodě má totiž dmyhadlo maximální možnou účinnost. Je to bod, který na tlakové charakteristice odpovídá vrcholu křivky účinnosti, ovšem v jakém bodě bude dmyhadlo pracovat, nerozhoduje dmyhadlo, ale systém, ve kterém je dmyhadlo zabudované. Na obrázku 11 má nejvyšší účinnost dmyhadlo ve stavu odpovídající bodu IV.

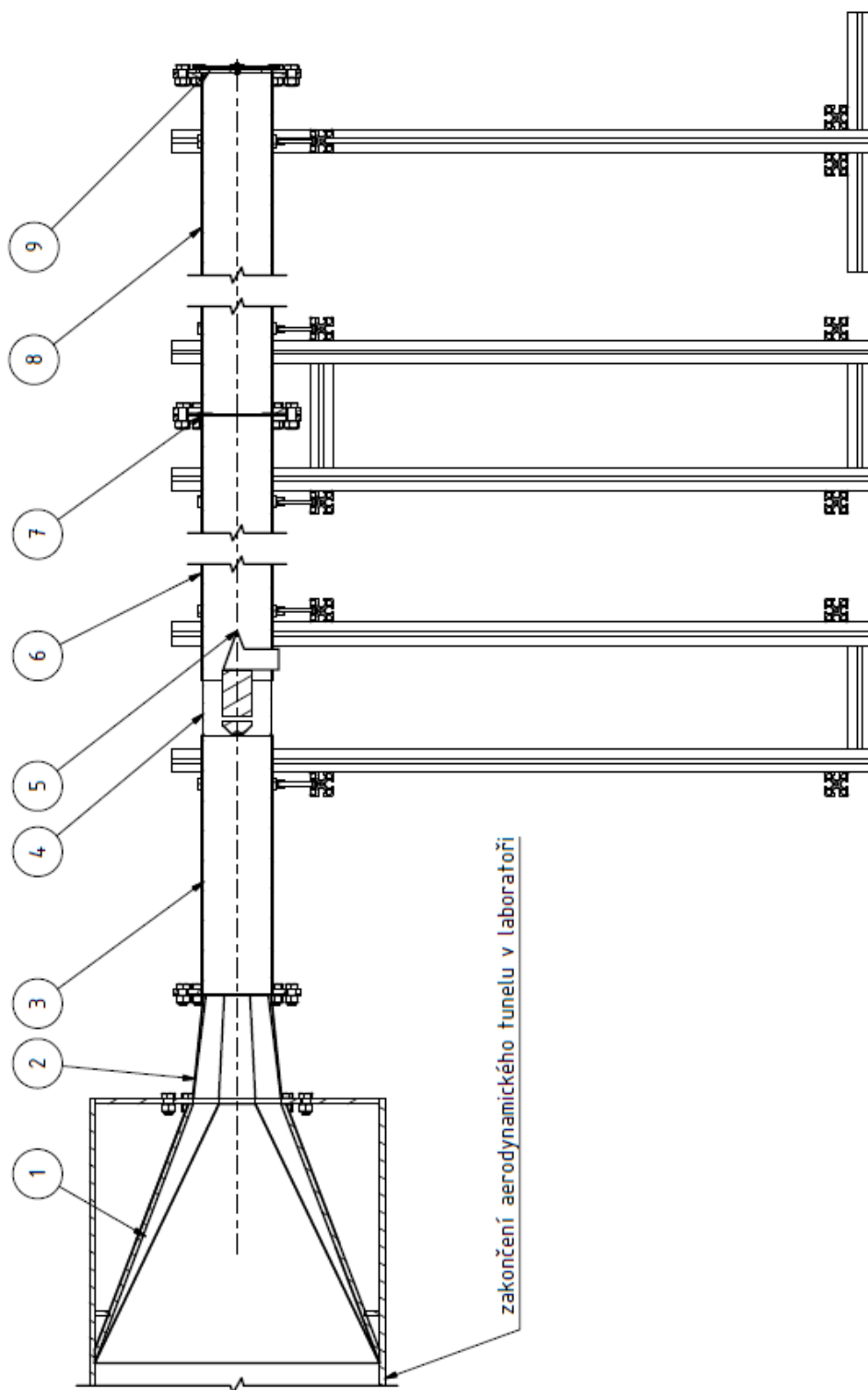
Křivky se většinou kreslí pro konstantní otáčky, ovšem existují také charakteristiky, které nejsou měřeny za stálých otáček. Křivky jsou doplněny o závislost otáček na celkovém průtoku. Tyto charakteristiky bývají například konstruovány, pokud potřebujeme zobrazit závislost celkového dopravního tlaku na průtoku při maximálních dosažitelných otáčkách dmyhadlo.



Obrázek 13-měřené dmyhadlo

3 Experimentální část

V této části se budu zabývat změřením tlakové charakteristiky dmyhadla. Budu navrhovat měřicí stand. V následujících kapitolách uvedu všechny části měřicího standu a popíšu jejich výrobu a sestavení.



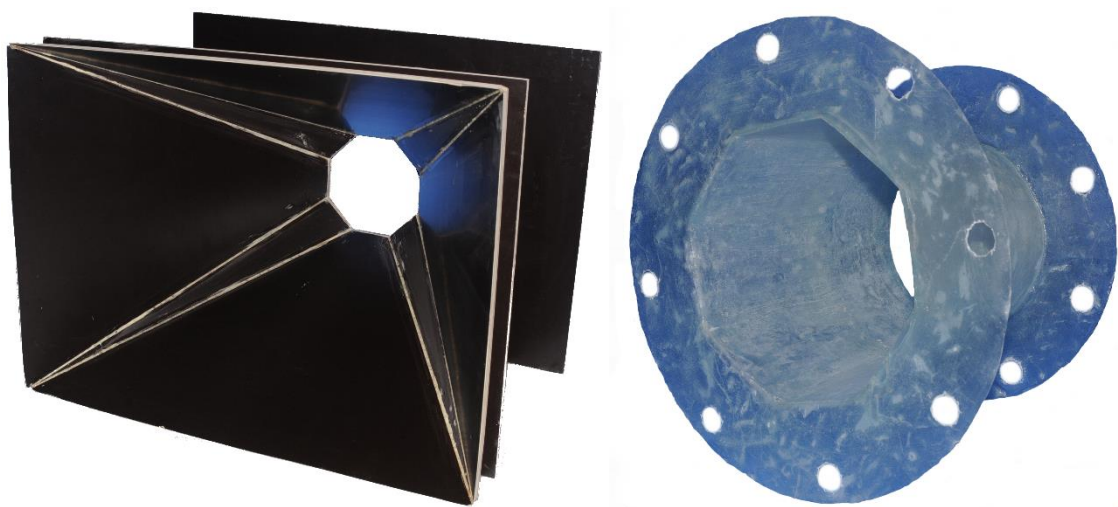
Obrázek 14-měřicí stand pro dmyhadlo

3.1 Návrh měřicího standu pro změření charakteristiky dmychadla

Měřicí stand je navržen pro měření tlakového rozdílu před a za dmychadlem je navržen za základě možností které jsou v laboratoři. Zároveň umožňuje měření průtoku trati pomocí clonky. Stand je řešen jako modul připojitelný ke stávajícímu aerodynamickému tunelu, který slouží jako pomocný zdroj proudění. Řez celým měřicím standem je zobrazen na obrázku 14.

Na začátku měřicí trati je tryska, která mění obdélníkový na potřebný kruhový průřez. Tato tryska je rozdělená na dvě části. První část (pozice 1 na obrázku 14, obrázek 15) z desek tloušťky 9 mm je dlouhá 0,5 m. V této části se mění průřez z obdélníku (750 mm x 550 mm) na pravidelný osmihran o rozměru 170 mm. Kvůli úspoře místa je celá tato část do aerodynamického tunelu vložena.

Druhá část trysky je laminovaná (pozice 2 na obrázku 14, obrázek 15), tloušťka laminátu dosahuje 1 mm a její délka je 0,2 m. V této části se mění průřez z pravidelného osmihranu o rozměru 170 mm na kruh o průměru 130 mm. Spojení první části s druhou je provedeno pomocí příruby.



Obrázek 15-tryska z desek a laminovaná tryska

Poté je připojeno potrubí z tvrzeného PVC (pozice 3 na obrázku 14, obrázek 16) délky 0,5 m, ta je s laminovanou částí spojena pomocí příruby. Potrubí je připevněno pomocí objímky ke stojanu z hliníkových profilů.



Obrázek 16- I. část potrubí

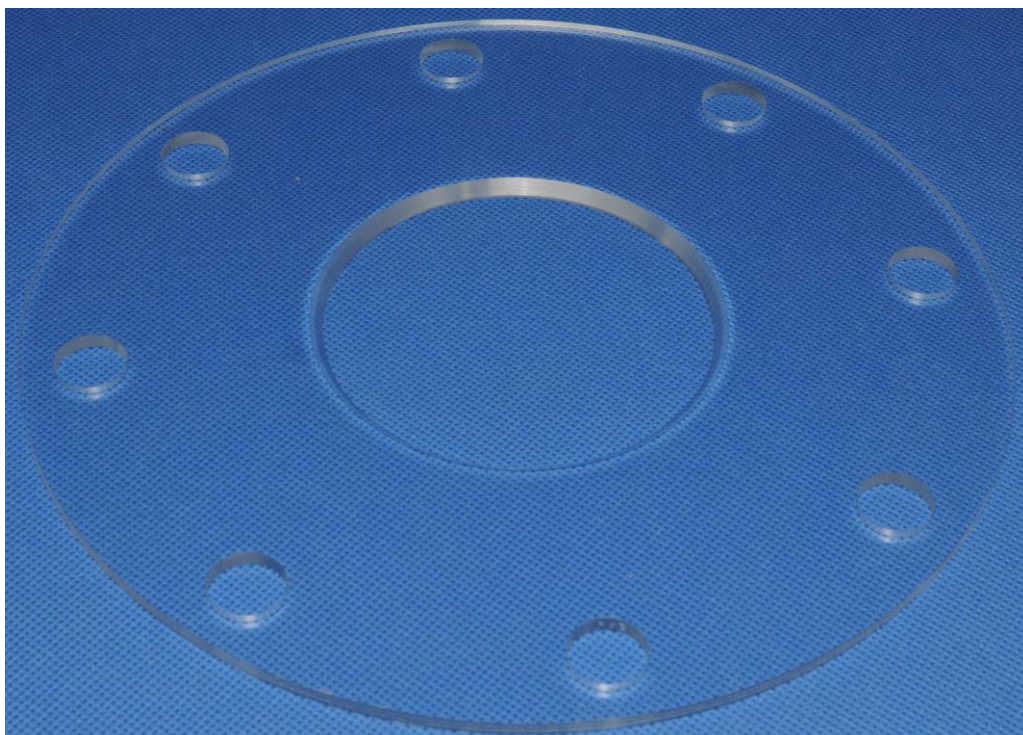
Na toto potrubí navazuje měřené dmychadlo (pozice 4 na obrázku 14, obrázek 17), které je připevněné pomocí L-profilů ke stojanu z hliníkových profilů. Kably jsou vyvedeny skrz potrubí pomocí vyrobeného kabelového přechodu. Kabelový přechod je kužel na který navazuje letecký profil NACA 0012. Kabelový přechod (pozice 5 na obrázku 14, na obrázku 17 za dmychadlem) je zde z důvodu menšího ovlivnění proudu vzduchu. 10 mm před dmychadlem je také umístěn první tlakový odběr.



Obrázek 17- dmychadlo s nasazeným kabelovým přechodem

Za dmychadlem následuje potrubí (pozice 6 na obrázku 14) dlouhé 1,5 m. 10 mm za dmychadlem je umístěn druhý tlakový odběr. PVC potrubí je připevněné ke stojanu z hliníkových profilů pomocí objímek.

Na konci potrubí je umístěna měřící clona (pozice 7 na obrázku 14, obrázek 18). Clonu pro měření objemového průtoku jsem navrhl dle normy ČSN EN ISO 5167-2. Clona je vložena mezi 2 příruby. Vzdálenosti tlakových odběrů jsou volené podle normy tedy: 130 mm před clonou a 65 mm za clonou. Za clonou je potrubí (pozice 8 na obrázku 14) dlouhé 1m.

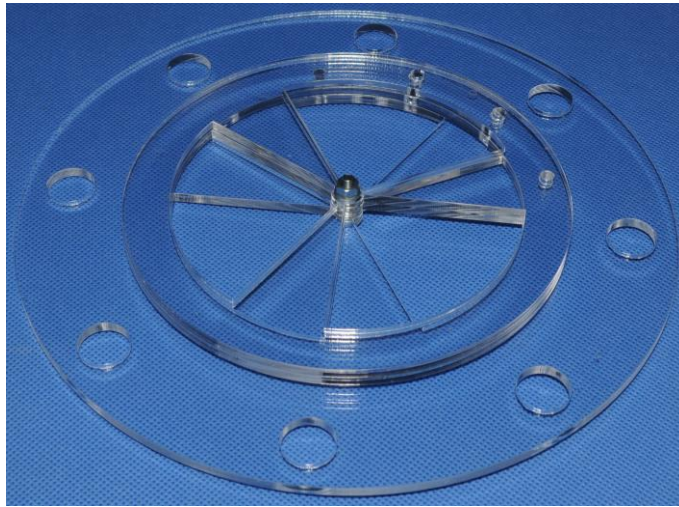


Obrázek 18-clona

Na konci tohoto potrubí je součást, která zvyšuje tlakovou ztrátu potrubního systému (pozice 9 na obrázku 14, obrázek 19), ta se skládá ze tří částí. První část je připevněná k potrubí pomocí příruby, další dvě části jsou spolu spojeny šroubem v ose. Dají se zde nastavit různé režimy.

1. Všechny škrtící elementy jsou sundané. Průtočná plocha je 13273 mm².
2. Jsou nasazeny všechny škrtící elementy, ale všechny se vzájemně překrývají. Průtočná plocha je 9870 mm² (snížení je 25%).
3. Jsou nasazeny všechny škrtící elementy dva se překrývají a jeden je posunut o 30°. Průtočná plocha je 6580 mm² (snížení je 50%).

4. Jsou nasazeny všechny škrťící elementy, žádný z nich se navzájem nepřekrývá. Průtočná plocha je 3290 mm² (snížení je 75%).

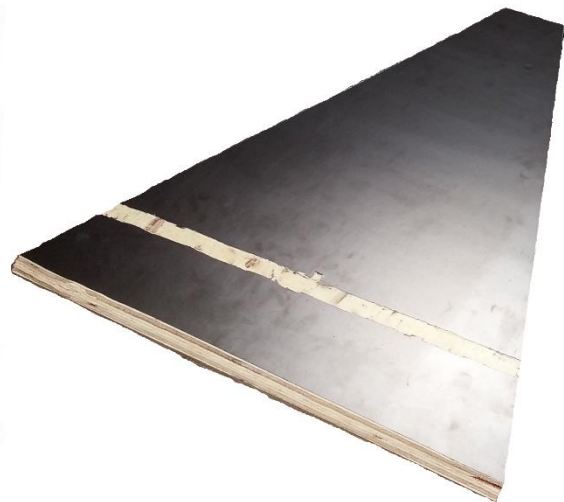


Obrázek 19-součást pro zvýšení tlakové ztráty (je nastaven režim 3)

Trat' podírají tři stojany v místě dmychadla, clony a konce trati. Stojany jsou sestavné z hliníkových profilů (Alutec).

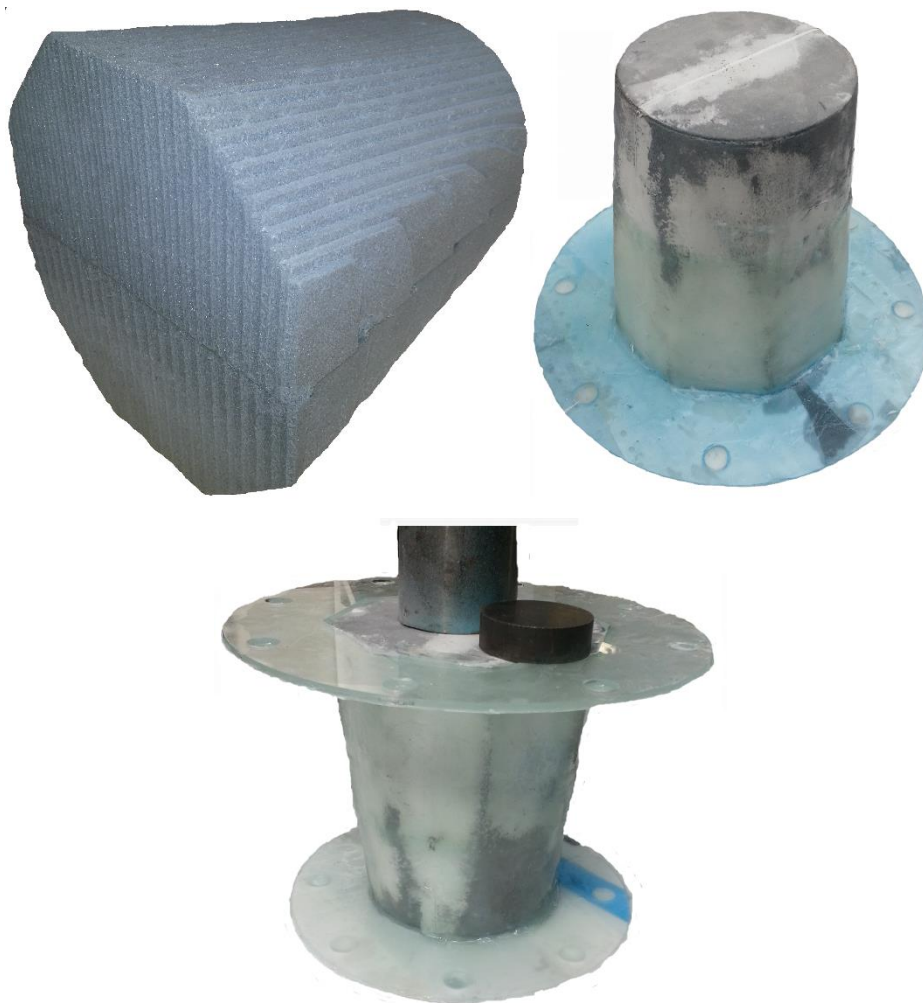
3.2 Výroba měřícího standu

První část trysky se vyráběla z deseti desek, jejich tvar se vyfrézoval a hrany se ručně opracovaly do potřebného úhlu. Desky se poté poskládaly do výsledného tvaru a slepily k sobě pomocí polyuretanového lepidla.



Obrázek 20-frézování a broušení desek

Poté se začal vyrábět laminovaný přechod z osmihranu na kruhový průřez. Nejdříve se vyfrézovaly obě pozitivní formy poloviny z polystyrenu. Ty se následně slepily k sobě a zbrousily, potom se přiložila příruba z plexiskla. Následovalo laminování od poloviny přechodu na hranu příruby. Po vytvrzení se přiložila druhá příruba a laminovala druhá část od poloviny přechodu na hranu druhé příruby. Po vytvrzení laminátu se forma odstranila, vnitřek se zbrousil a prořízly se díry pro šrouby.



Obrázek 21-postupné laminování přechodu

Dále se vyráběl přechod pro kabely, který je umístěn v zadní části dmyhadla (zde vycházejí kabely z dmyhadla). Vyráběl se stejným způsobem jako laminovaný přechod.



Obrázek 22-přechod pro kabely

Poté bylo potřeba nařezat potrubí na pásové pile na požadované délky. Dalším krokem byla výroba tlakových odběrů. Pro tlakové odběry byla použita trubka vnějšího průměru 4 mm a vnitřního průměru 2 mm. Trubka se nařezala na 16 trubiček dlouhých 35 mm. Pro tyto trubičky se do potrubí vyvrtaly díry. Trubičky se do těchto děr zasunuly a zalepily. Trubičky se musely z vnitřní strany potrubí zbrousit, aby nedocházelo



Obrázek 23-tlakové odběry

k ovlivnění proudění a hodnot měřených tlaků. Také bylo potřeba do druhé části potrubí vyříznout díru ve tvaru profilu NACA 0012 pro vložení přechodu pro kabely.

Jako poslední se vyráběly tři stojany z hliníkových profilů pro podepření potrubí.

3.3 Zpracování dat

Před vlastním měřením se nejdříve sestavil celý měřicí stand. Tlakové převodníky byly propojeny s tlakovými odběry v měřící trati. Použitá elektronika pro sběr dat je součástí snímačové stavebnice vyvinuté v laboratoři mechaniky tekutin a termodynamiky. Jednotlivé snímače spolu komunikují pomocí vytvořeného komunikačního protokolu. Sběr dat je prováděn pomocí sériové linky. Celý proces sběru je ovládán nadřazeným počítačem, v tomto případě vybaveným prostředím Matlab.

V Matlabu byly vytvořeny skripty pro odečet hodnot. Zároveň bylo zahrnuto částečné vyhodnocení dat (například výpočet rychlosti na clonce). V Matlabu byla naměřená data nakonec i uložena. Pro post processing byly vytvořeny další skripty v Matlabu.



Obrázek 24-sestavený měřicí stand v laboratoři

Poté se připojily baterie a regulátor ke dmychadlu. Na regulátoru se nastavily požadované konstantní otáčky. Tím je celé měření připraveno.

Před měřením byl odečten tlak, teplota a relativní vlhkost okolního vzduchu.

- Barometrický tlak: $p_b=750 \text{ torr} = 99991,5 \text{ Pa}$
- Teplota $t=24,5^\circ\text{C}=297,65 \text{ K}$
- Relativní vlhkost $\varphi=53,7\%$

Následně jsme spočítali hustotu okolního vlhkého vzduchu. Parciální tlak sytých vodních par pro teploty 0 až 80 °C lze určit podle následujícího vztahu s chybou menší než 1%.

$$\ln p_v^{\ddot{}} = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + \tau} = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 24,5} = 8,03 \quad (13)$$

$$p_v^{\ddot{}} = e^{8,03} = 3071,74 \text{ Pa}$$

Kde τ (°C) je teplota okolního vzduchu.

$$\begin{aligned} \rho_o &= \frac{1}{r_A \cdot T_o} \left(p_o - \left(1 - \frac{r_A}{r_v} \right) p_v \right) = \frac{1}{r_A \cdot T_o} (p_o - (1 - 0,622) p_v) = \frac{p_o - 0,378 \cdot p_v}{r_A \cdot T_o} \\ &= \frac{p_b - 0,378 \cdot \varphi \cdot p_v^{\ddot{}}}{r_A \cdot T_o} = \frac{99991,5 - 0,378 \cdot 0,537 \cdot 3071,74}{287,11 \cdot 297,65} = 1,163 \text{ kg/m}^3 \end{aligned} \quad (14)$$

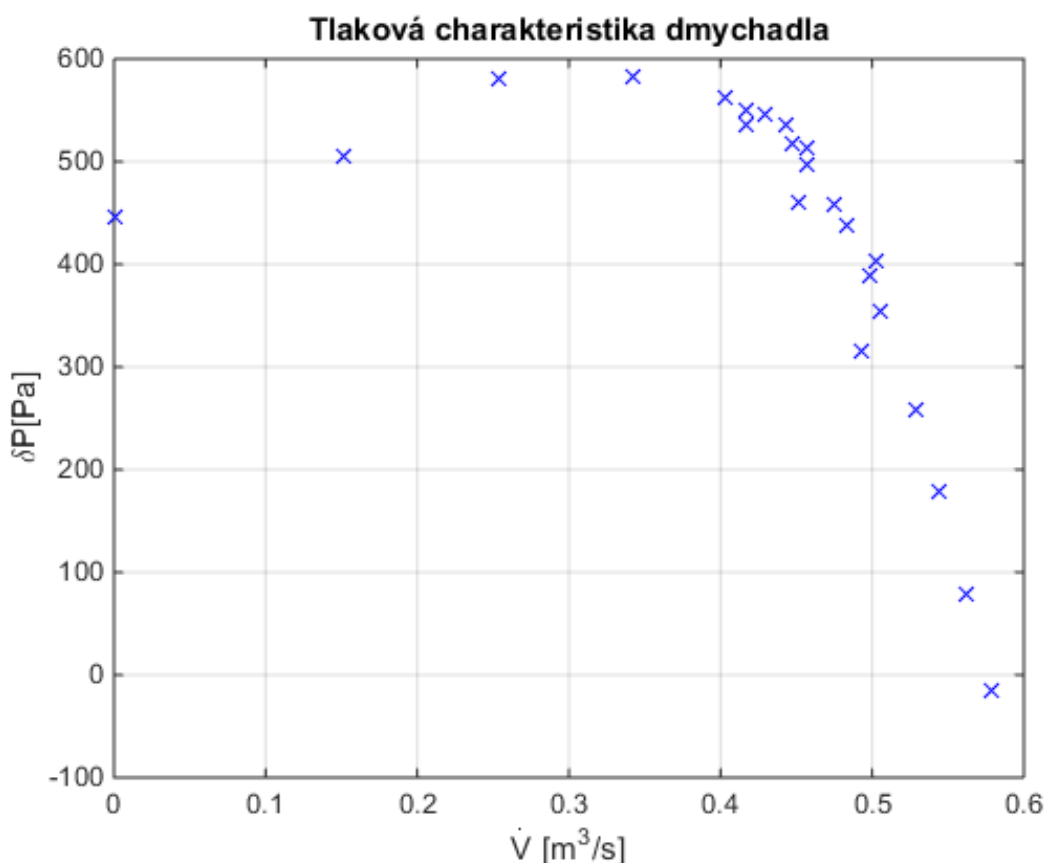
Kde $r_A = 287,11 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$ je plynová konstanta suchého vzduchu, $r_v = 461,5 \text{ (J/kg} \cdot \text{K)}$ je plynová konstanta vodních par, T_o (K) je termodynamická teplota okolního vzduchu, p_b (Pa) je tlak okolí, p_v (Pa) je parciální tlak vodních par, $p_v^{\ddot{}}$ (Pa) je parciální tlak sytých vodních par při teplotě T_o , $\varphi(-)$ je relativní vlhkost okolního vzduchu.

Vlastní měření probíhalo tak, že jsme nejprve nastavili otáčky dmychadla na konstantní hodnotu v tomto případě na 10000 ot/min. Poté jsme počkali, až se proudění ustálí. Poté jsme zapnuli skript v Matlabu a naměřili jsme hodnoty. Následovalo zapnutí ventilátoru, který pohání aerodynamický tunel. Nastavili jsme hodnotu otáčení ventilátoru na $f=3 \text{ Hz}$. Znovu jsme provedli měření. Tímto způsobem jsme potupovali až do $f=25 \text{ Hz}$. Na vyšší hodnotu výkonu jsme již postoupit nemohli, protože statický tlak v aerodynamickém tunelu vzrostl o 1450 Pa. V tunelu z bezpečnostních důvodů nemůže narůst tlak o více než 1500 Pa, aby nedošlo k jeho poškození. Následně se ventilátor v tunelu vypnul.

Poté se na konec měřicí tratě přišroubovala součást, co zvyšuje tlakovou ztrátu. Postupně se nastavily všechny možné režimy a vždy se naměřily data.

Na následujícím grafu je vidět změřená tlaková charakteristika pro otáčky $n=10000$ ot/min a hustotu $\rho_o = 1,163 \text{ kg/m}^3$.

Graf 1-naměřená tlaková charakteristika



Kde δP je celkový dopravní tlak na dmyhadle a \dot{V} je objemový průtok. Naměřené hodnoty odpovídají očekávané charakteristice. Graf se dělí na nestabilní část pro hodnoty objemového průtoku: $\dot{V} = 0 - 0,34 \text{ m}^3 / \text{s}$ a stabilní část $\dot{V} = 0,34 - 0,58 \text{ m}^3 / \text{s}$. V bodě $\dot{V} = 0,34 \text{ m}^3 / \text{s}$ je nejnižší objemový průtok při provozu ve stabilní části. Část grafu pro hodnoty objemového průtoku $\dot{V} = 0,58 - \dots \text{ m}^3 / \text{s}$ je část, kde dmyhadlo již pracuje v brzděném režimu. Je to stav kdy dmyhadlo brzdí proudící tekutinu.

4 Návrh tvaru vstupního ústrojí

U návrhu tvaru měřicího ústrojí jsem vycházel z Bernoulliho rovnice. Ze statického tahu udávaného výrobcem ($F=80 \text{ N}$) a z průtočné plochy dmyhadla

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_2^2 - D_1^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (0,13^2 - 0,055^2) = 0,0109m^2 \quad (15)$$

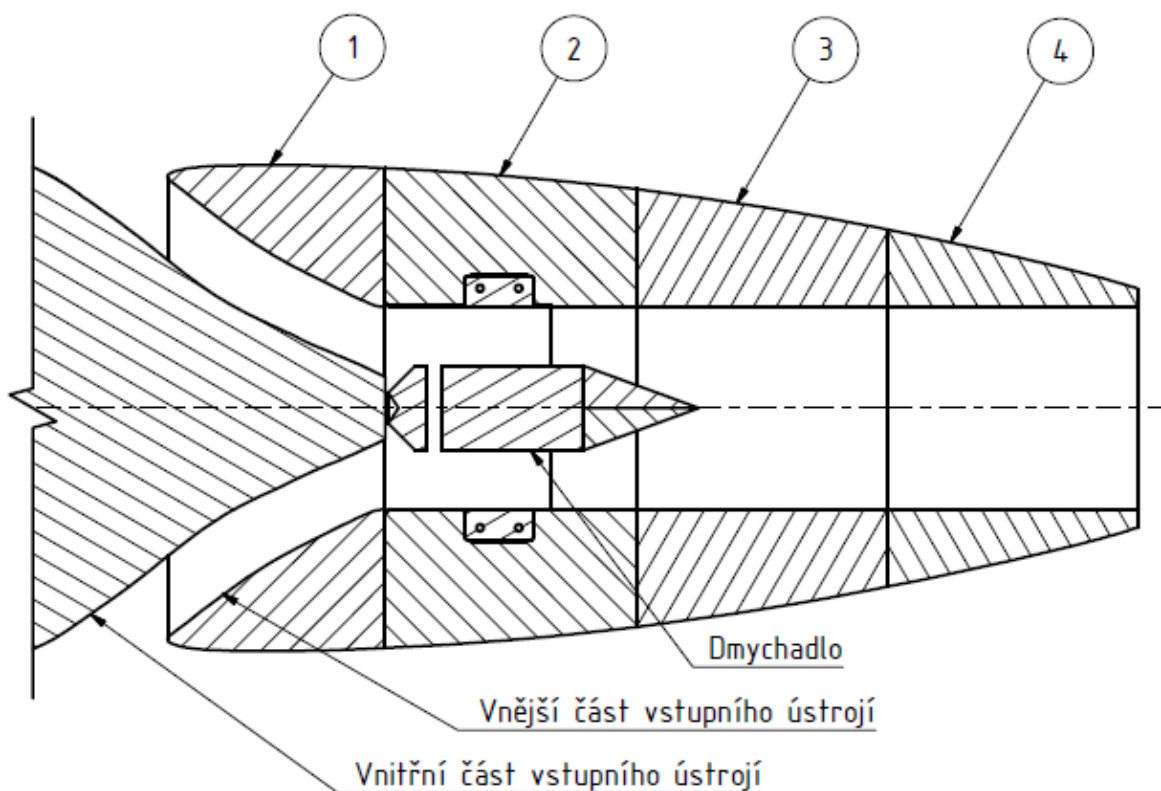
jsme určili rychlost proudu vzduchu ve dmychadle pomocí vztahu:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho \cdot S}} = \sqrt{\frac{80}{1,2 \cdot 0,0109}} \cong 78m/s \quad (16)$$

Následně předpokládáme, že rychlost, při které letadlo bude létat je maximálně 25 m/s. Poté když známe tyto informace tak pomocí rovnice kontinuity dokážeme spočítat vstupní plochu pro vstupní ústrojí podle:

$$S_{vst.ú.} = \frac{v_{dmych} \cdot S_{dmych}}{v_{let}} = \frac{78 \cdot 0,0109}{25} = 0,03410m^2 \quad (17)$$

Plocha na vstupu proudění je tedy 3,12 krát větší než plocha na výstupu z dmychadla. Dále také víme, že průřez proud vzduchu, který vstupuje do vstupního ústrojí je dán plochou mezi dvěma kuželi. To nám umožní dopočítat tvar vnějšího pláště



Obrázek 25-geometrie vstupního ústrojí a uspořádání zadní části

proudovodu při pevně dané geometrii vnitřního pláště. Tvar vnějšího pláště navrhne podle tvaru ideální dýzy.

5 Návrh měřicího standu pro vstupní ústrojí

Požadavky pro návrh měřicího standu byly takové, aby bylo možné proměřit průběh tlaku skrz celé vstupní ústrojí pomocí tlakových měřicí pásek. Jsou to úzké pásy, které mají odběry tlaků vzdáleny za sebou po 10 mm. Také je nutné změřit tah dmyhadla pomocí tenzometrů.

5.1 Společné prvky obou dále zmiňovaných variant

Pro přední část modelu byly vyrobeny formy, do kterých se následně laminovalo. Obě poloviny se nakonec slepily. Přední část je připevněna ke stojanu pomocí obdélníkového profilu, který je vsazený do profilu minimálního odporu.

Zadní část se vyráběla tak, že se rozdělila na několik segmentů (jednotlivé segmenty jsou zobrazeny na obrázku 25, které se vyfrézovaly z polystyrenu a zalaminovaly. První segment tvoří vnější vstupní ústrojí. Tento segment je přidělán ke druhému pomocí 2 čepů, aby bylo možné změřit více geometrií vstupních ústrojí. Druhý segment je rozříznutý na 2 poloviny, aby se mezi ně dalo umístit dmyhadlo. Třetí segment je spojen s druhým segmentem také pomocí 2 čepů. Třetí a čtvrtý segment jsou k sobě navzájem přilepeny.

Měření statických tlaků skrz celou oblast vstupního ústrojí je realizováno pomocí tlakových pásek, které jsou vlepeny na vnitřní části vstupního ústrojí od vstupu a končí před dmyhadlem.

Kabely od dmyhadla jsou vedeny skrz kabelový přechod a skrz obdélníkový profil do spodní části stojanu.

Vypracoval jsem dva návrhy, které se především liší ve způsobu uchycení a měření statického tahu.

5.2 První varianta měřicího standu

U první varianty je zhotovena spodní část stojanu z hliníkových profilů. Z tohoto stojanu stoupají vertikálně 2 hliníkové profily na jejich konci jsou umístěna ložiska. Ložiska je prostrčena trubka. Tato trubka prochází skrz obdélníkový profil, který je připevněn pomocí L-profilu a 2 objímek ke dmyhadlu. Následně je na tento spoj

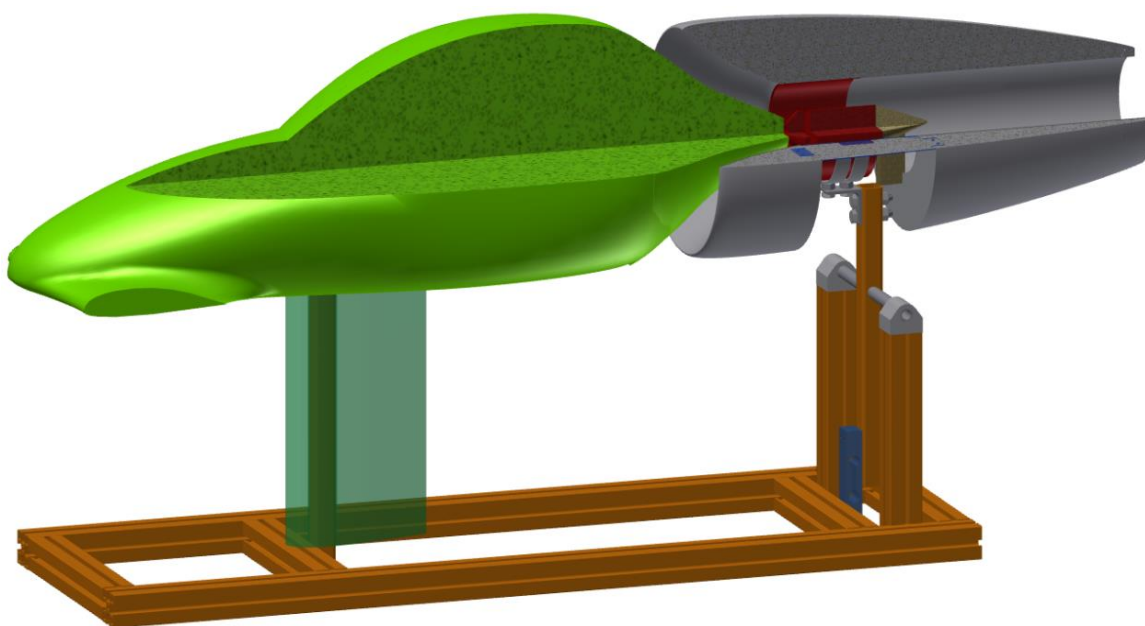
přidělána deska, k desce je připevněn druhý segment. Tenzometr pro zjištění statického tahu je umístěn v dolní části. Jakmile je dmychadlo zapnuto, tak vzniká ve spodní části moment, který působí na tenzometr. Z tohoto momentu můžeme přes známou vzdálenost od osy otáčení spočítat statický tah dmychadla. Na obrázku 26 je zobrazen tento návrh, ale není zde zobrazena spodní část druhého segmentu, aby byl zřetelný způsob upevnění.

Výhody:

- Jednodušší upevnění dmychadla k obdélníkovému profilu a jednodušší upevnění druhého segmentu k desce.

Nevýhody:

- Měření statického tahu je zatíženo chybou, protože není měřeno přímo.



Obrázek 26-řez první variantou měřícího standu pro vstupní ústrojí

5.3 Druhá varianta měřícího standu

U druhé varianty je zhotovena spodní část stojanu z hliníkových profilů. Z tohoto stojanu stoupá vertikálně 1 obdélníkový profil až do modelu. Zde je na tento profil přidělán plech, ke kterému je celý model z polystyrenu připevněn. Dále jsou k plechu přišroubovány 2 tenzometry pomocí L-profilů, které jsou následně přidělány přímo

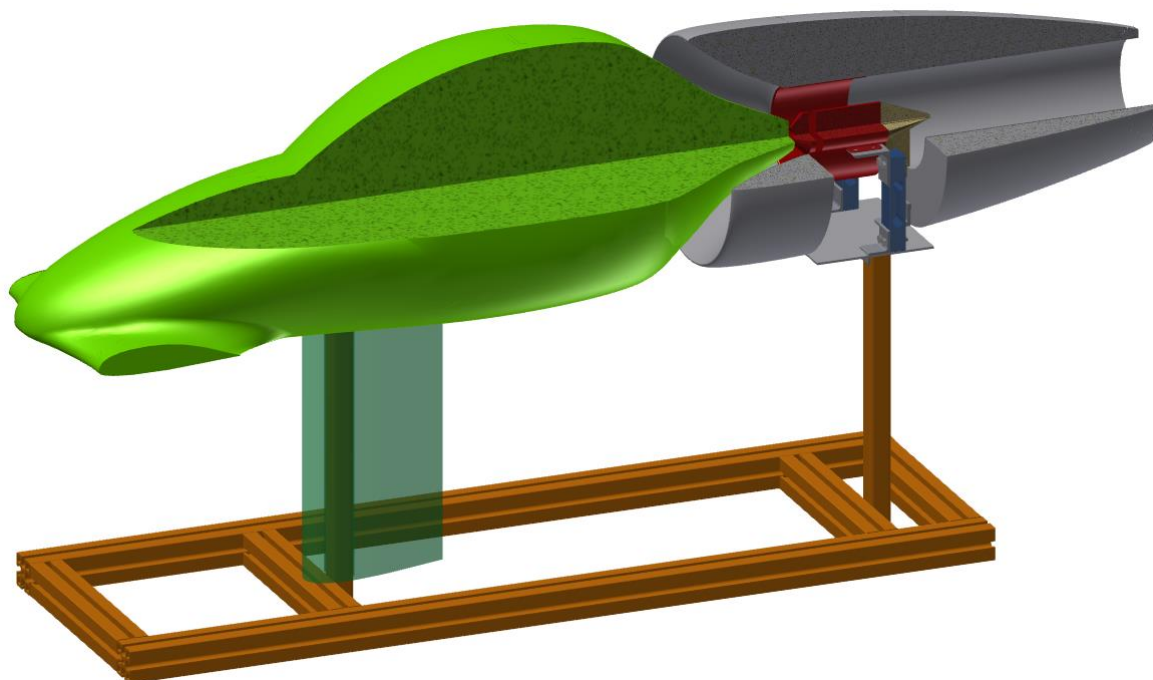
k měřenému dmychadlu také pomocí L-profilů. Na obrázku 27 je zobrazen tento návrh, ale není zde zobrazena spodní část druhého segmentu, aby byl zřetelný způsob upevnění

Výhody:

- Tenzometry měří přímo hodnotu statického tahu.

Nevýhody:

- Složitější konstrukce ve vrchní části standu.
- Dmychadlo musí mít kolem sebe prostor, aby nedocházelo k tomu, že se opře a tím pádem bude hodnota z tenzometrů nesprávná.



Obrázek 27-řez druhou variantou měřicího standu pro vstupní ústrojí

6 Závěr

Cílem práce bylo proměřit tlakové charakteristiky dmychadla. Charakteristiky nelze zjistit empirickými vztahy, proto se tedy musejí určit experimentálním měřením. Měřené dmychadlo je ve fázi prototypu, proto charakteristiky nebyly známy. Nejprve byl navržen celý měřicí stand. Stand byl následně vyroben a postaven.

Tlaková charakteristika dmychadla se změřila pro jednu hodnotu konstantních otáček. Naměřená charakteristika odpovídá předpokladům. Bude následně využita

v numerických výpočtech s dmychadlem. Aktuálně se s ní počítá v návrhu vstupního ústrojí modelového letounu.

Po návržení vstupního ústrojí by se měly výpočty pomocí numerických metod ověřit pomocí experimentu. Ten bude realizován podle jedné z variant v aerodynamickém tunelu v Praze-Malešicích. Zde doporučuji použít první variantu, především z důvodů konstrukční jednoduchosti a spolehlivosti.

7 Seznam obrázků

Obrázek 1-základní pojmy při měření tlaku [4].....	5
Obrázek 2-kapalinový manometr [4]	6
Obrázek 3-princip kapacitního snímače [5]	7
Obrázek 4-princip tenzometru [5].....	7
Obrázek 5-čidlo tlaku s piezorezistivními tenzometry [5].....	8
Obrázek 6-různé provedení Pitotovy sondy [1]	9
Obrázek 7-Prandtlůva sonda [1].....	10
Obrázek 8-anemometr se žhaveným drátkem [1]	11
Obrázek 9- metoda PIV [11]	12
Obrázek 10-schéma axiálního dmychadla [7].....	14
Obrázek 11-obecná charakteristika dmychadla [3].....	15
Obrázek 12-proudění oběžným kolem axiálního dmychadla[3].....	15
Obrázek 13-měřené dmychadlo	16
Obrázek 14-měřicí stand pro dmychadlo	17
Obrázek 15-tryska z desek a laminovaná tryska	18
Obrázek 16- dmychadlo s nasazeným kabelovým přechodem	19
Obrázek 17- I. část potrubí.....	19
Obrázek 18-clona	20
Obrázek 19-součást pro zvýšení tlakové ztráty (je nastaven režim 3).....	21
Obrázek 20-frézování a broušení desek	21
Obrázek 21-postupné laminování přechodu.....	22
Obrázek 22-přechod pro kabely	23
Obrázek 23-tlakové odběry	23
Obrázek 24-sestavený měřicí stand v laboratoři	24
Obrázek 25-geometrie vstupního ústrojí a uspořádání zadní části.....	27
Obrázek 26-řez první variantou měřicího standu pro vstupní ústrojí	29

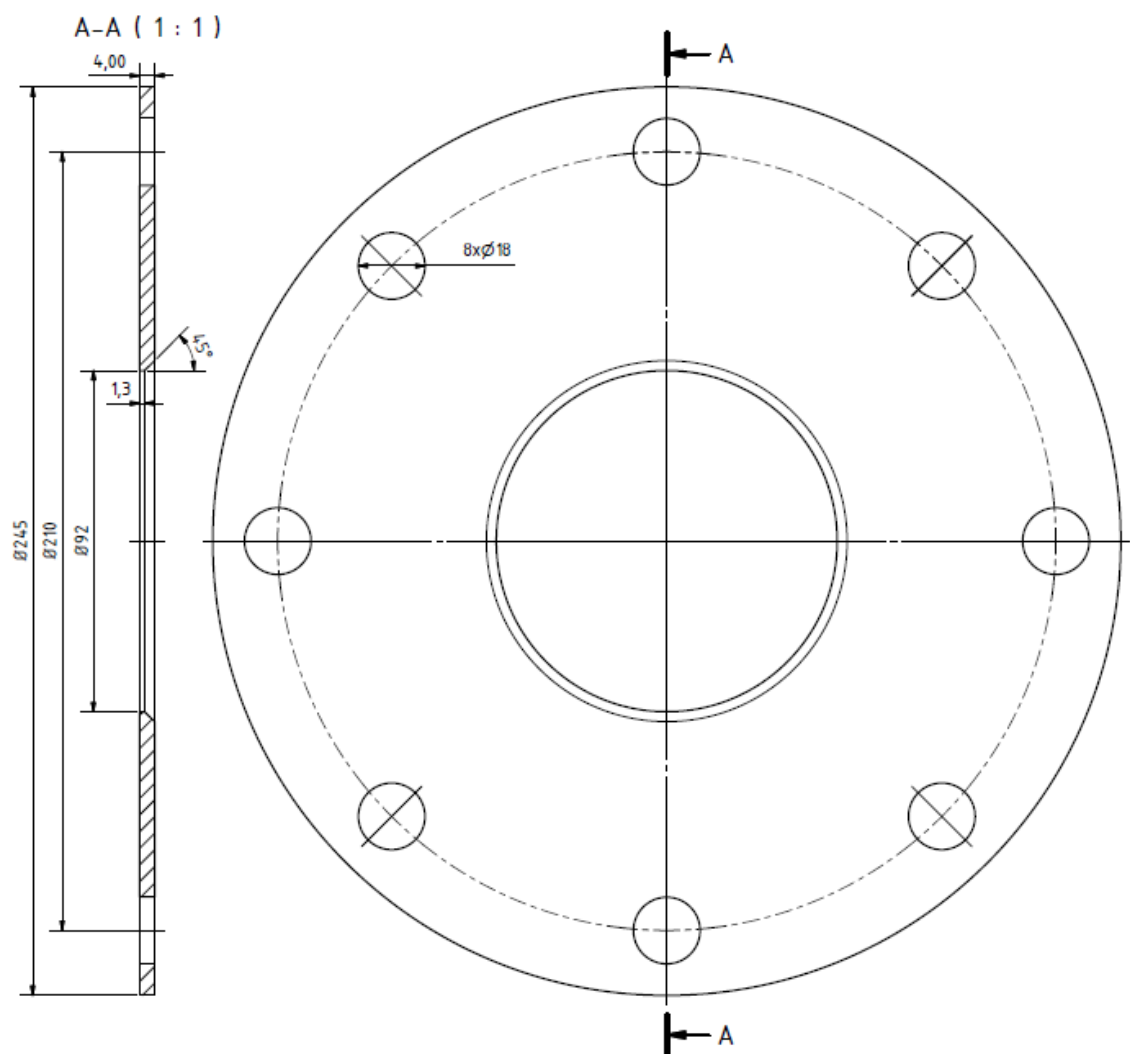
8 Zdroje

- [1] JIRSÁK, Milan. Experimentální zařízení a metody v mechanice tekutin. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1983. 117 s. Učební texty VŠ, ČVUT - fak. strojní.
- [2] CORY, W. *Fans & ventilation: a practical guide*. Boston: Elsevier in association with Roles & Assoc., 2005, xxxii, 424 p. ISBN 0080446264.
- [3] NOVÝ, Richard. Ventilátory. Vyd. 3. přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. 104 s. ISBN 978-80-01-03758-4.
- [4] KADLEC, Karel. Snímače tlaku-principy, vlastnosti a použití (část 1). *Snímače tlaku-principy, vlastnosti a použití (část 1)* [online]. 2007, roč. 2007, č. 2, s. 4 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au020728.pdf>
- [5] KADLEC, Karel. Snímače tlaku-principy, vlastnosti a použití (část 2). *Snímače tlaku-principy, vlastnosti a použití (část 2)* [online]. 2007, roč. 2007, č. 7, s. 5 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au070725.pdf>
- [6] ČSN EN ISO 5167-1 (25 7710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu: Část 1: Obecné principy a požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [7] ČSN EN ISO 5167-2 (25 7710). *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu: Část 2: Clony*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [8] ŠKORPÍK, Jiří. Škrčení plynů a par [online]. 2006 [cit. 26. 03. 2015]. dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/skrцени-plynu-a-par.html>
- [9] ZMRHAL, Vladimír. Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 1. část: Ventilátory [online] 2006 [cit. 26. 03. 2015] dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>
- [10] ZMRHAL, Vladimír. Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 2. část: Ventilátory [online] 2006 [cit. 26. 03. 2015] dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3769-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-2-cast>
- [11] HATSCHBACH, Petr a Jan NOVOTNÝ. Měření rychlostního pole v turbínové skříni pomocí metody PIV. [online]. 2009 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2009/2009_045_01.pdf

- [12] Vstup vzduchu. *Vstup vzduchu* [online]. 2002 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/teorie/teorie-konstr-01.php>
- [13] Schwarzer, Jan. Experimentální cvičení: Charakteristika ventilátoru. [online]. Praha, 2011 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: http://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/EXM/IB_EXM_char_ventilatoru_FINALL.pdf

9 Přílohy

10.1 Výkres navržené clony pro měření průtoku



10.2 Matlab skript pro odečítání hodnot z tlakových převodníků

```
nap=0.715; %napeti tlak pred clonkou vs atmosfera [V]
adr={73,71};
n=10000; % otacky dmyhadla
k=0;
v_tun=0.71; %rychlost v tunelu
rh=53.7; %vlhkost
t=24.5; %teplota
po=750; % tlak atmosfericky v torr
savefile='C:\Users\Robin\ownCloud\škola\cvut FS\6.semestr- letni\bakalařka\charakteristiky ventilatoru\Matlab\mereni_2_10000\2_10000_071.mat';
if s.bytesavailable>0,fread(s,s.bytesavailable);end
clear hodproud I c;
while (1)
    try
        k=k+1;
        fprintf('%03i> ',k);
        for i=1:length(adr)
            fwrite(s,[adr(i) 0 7]);tmp=fread(s,6);
            c(i)=tmp(5)+tmp(6)*2^8;
            I(i)=(c(i)*3.3)/(2^16*165);
            fprintf('%3f\t ',I(i)*1e3);
        end
        tlak_1(i)=625000*I(1)-2500;% přepočet hodnoty proudu na tlak
        tlak_2(i)=625000*I(2)-2500;% přepočet hodnoty proudu na tlak
        tlak_3(i)=222.22*nap-1111.11;% přepočet hodnoty napětí na tlak
        rychlostzt(i)=v_tun*31.085; %rychlost v potrubí vypočítaná přes rychlost v tunelu
        [objprutzc(i), v(i)]=vypocet_objemoveho_prutoku(tlak_3(i),tlak_2(i));%objemový průtok ze clony
        fprintf('%3f\t ',tlak_1(i));
        fprintf('%3f\t ',tlak_2(i));
        fprintf('%3f\t ',objprutzc(i));
    catch
        fprintf('\n');
        hodproud(k,:)=c(1) c(2) I(1) I(2) nap rh t po n v_tun tlak_1 tlak_2 tlak_3 objprutzc objprutzt;% hodnoty proudu tlakovych prrvodniku
        save(savefile, 'hodproud');
        pause(0.5)
    end
end
```

10.3 Matlab skript pro vyhodnocení měření

```
file1=['2_10000_005.mat';'2_10000_025.mat';'2_10000_045.mat';'2_10000_054.mat';'2_10000_062.mat';'2_10000_071.mat'];
for i=1:23
    load(file1(i,:), 'hodproud');
    Data=hodproud;
    tlak1(i,1)=mean(Data(:,12)); %průměr vypočtených hodnot z měření tlaku 1
    tlak2(i,1)=mean(Data(:,14)); %průměr vypočtených hodnot z měření tlaku 2
    tlak3(i,1)=mean(Data(:,16)); %průměr vypočtených hodnot z měření tlaku 3
    objprutzc(i,1)=mean(Data(:,18)); %průměr vypočtených hodnot z měření objemového průtoku na cloně
    objprutzt(i,1)=mean(Data(:,20)); %průměr vypočtených hodnot z měření objemového průtoku na cloně
end
figure (1)
plot(objprutzc(1:23,1),tlak1(1:23,1),'bx');grid on;
title('Tlaková charakteristika dmyhadla');
xlabel('V^3.[m^3/s]');
ylabel('\deltaP[Pa]');
```


10.4 Matlab skript pro výpočet objemového průtoku na clonce

```
function [qv, v]=vypocet_objemoveho_prutoku(p1,p2)
p_0=99991.5;%tlak barometrický
p_1=p_0+p1;%tlak před clonou
p_2=p_1-p2;%tlak za clonou
p=p_1-p_2;%rozdíl tlaku před a za clonou
D=0.13;%vnitřní průměr potrubí
d=0.095;%vnitřní průměr clony
B=d/D;%poměr průměrů
K=1.4;%izoentropický exponent vzduchu
ny=15.32*(10^-6);%kinematická viskozita pro 20°C
ro=1.159;%hustota vzduchu v laboratoři
L_1=1;%poměr vzdálenost předního odběru tlaku od přední strany clony
L_2=0.47;%poměr vzdálenost zadního odběru tlaku od zadní strany clony
S=(pi*(D^2))/4;%průtočná plocha
M_2=(2*L_2)/(1-B);%koeficient M2

v=50;%volím
v_1=40;%volím
while abs(v_1-v)>0.001
v_1=v;
Re=(v*D)/ny;%reynoldsovo číslo
E=1-(0.351+0.256*(B^4)+0.93*(B^8))*(1-(p_2/p_1)^(1/K));%součinitel expanze E
A=((19000*B)/Re)^0.8;%koeficient A
C=0.5961+0.0261*(B^2)-0.216*(B^8)+0.000521*((10^6)*B)/Re)^0.7+(0.0188+0.0063*A)
qm=(C/sqrt(1-B^4))*E*(pi/4)*(D^2)*sqrt(2*p*ro);%výpočet hmotnostního průtoku
qv=qm/ro;%výpočet objemového průtoku
v=qv/S;%výpočet rychlosti
end
```