

Měření charakteristik modelového dmyhadla

Jiří Hejna*, Jan Klesa

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav letadlové techniky, Karlovo náměstí 13, 121 35 Praha 2, Česká republika

Abstrakt

Rešeršní částí práce jsou shrnuty základní informace a principy kompresorů leteckých proudových motorů, snahou je především zasvětit čtenáře do problematiky strojů axiálních. Následující kapitoly popisují návrh a stavbu experimentálního zařízení pro zkoušky a vývoj komponent dmyhadlového pohonu. V práci jsou vyhodnoceny klady a možné zápory použitého konstrukčního řešení, zejména důkladně je komentována výroba a stavba. Práce se zaměřuje na měření charakteristik modelového dmyhadla. Porovnává použité metodiky provedeného měření a snaží se je optimalizovat. Výsledkem práce je charakteristika modelového dmyhadla.

Klíčová slova: proudový motor; axiální kompresor; měřicí přípravek; dmyhadlo; charakteristika dmyhadla

1. Úvod

Práce se zabývá měřením charakteristik modelového dmyhadla. Charakteristiky dmyhadla – kompresoru jsou grafy odvozené z experimentálního měření na speciálních testovacích přípravcích, které jsou schopné za konstantních otáček prostřednictvím škrticího mechanismu ve výstupu měnit průtok vzduchu kompresorem. V praxi jsou používány pro zhodnocení provozních výkonových vlastností kompresorového systému. Primárním cílem práce je návrh a realizace takového modelového zařízení pro možnost uskutečnění zkoušek a vývoje komponent dmyhadlového pohonu pro malé letouny. Z experimentálního měření provedeném na tomto zařízení je úkolem získat charakteristiku modelového dmyhadla a potvrdit tak předpoklady jeho funkce.

Realizaci měřicího přípravku lze rozdělit do několika částí. První částí je návrh principu práce a návrh a vytvoření 3D modelu v některém z cad-softwarů, následuje samotná výroba a montáž. Další částí je praktická zkouška požadované funkce a případně její optimalizace, po které je zařízení již připraveno k měření. Návrh vychází ze zkušeností autora této práce nabytých jak při laboratorních měřeních provedených během studia, tak při práci v oboru konstrukce speciálních zařízení se specifickými funkčními požadavky. Vzhledem k tomu, že jde o unikátní zařízení, byla zvolena výroba většiny hlavních částí pomocí 3D tisku.

Dalším úkolem práce je shrnutí základních informací a poznatků o axiálních kompresorech používaných zejména v leteckých proudových motorech. Motivací je srozumitelné teoretické vysvětlení dané problematiky, kterou se zabývá praktická část této práce.

2. Měření charakteristik axiálních kompresorů

Kompresor je obvykle navržen tak, aby splňoval určité požadavky pro jeden konkrétní letový stav, pro jedno konkrétní Machovo číslo a specifickou letovou nadmořskou výšku např.: Machovo číslo $M = 0,84$, nadmořská výška

$H = 11$ km (36,100 ft). Tento stav je označován jako „design point“ neboli návrhový bod, kde výkon kompresoru musí dodržet konstrukční požadavky s ohledem na průtok, tlakový poměr a účinnost. Kromě toho je také od kompresoru požadováno, aby byl schopen dodávat přiměřený výkon i při nižších rychlostech rotace rotoru, což bývá označováno jako „off-design performance“ neboli mimo návrhové režimy. [1, 2]

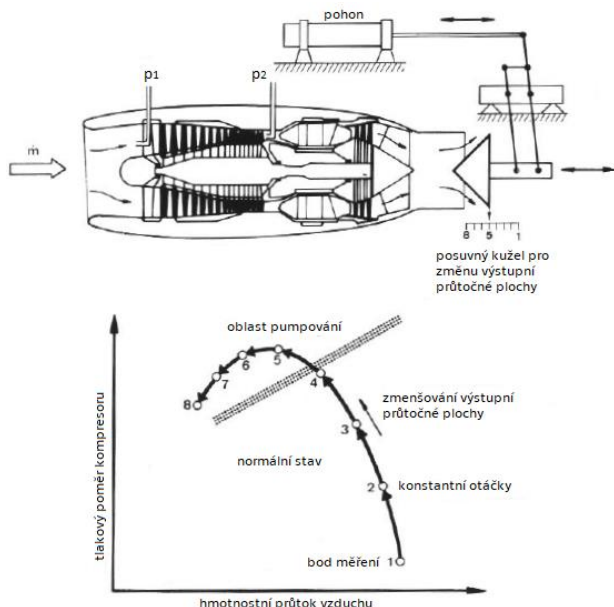
Charakteristiky kompresoru jsou grafy odvozeny z experimentálního testování na speciálních testovacích zařízeních, které umožňují měnit průtok vzduchu motorem při konstantních otáčkách rotoru kompresoru, lze je také získat výpočtem. Používají se pro vyhodnocení provozních vlastností kompresoru při práci v různých režimech. [2, 5] Průtok je obvykle řízen změnou průřezu výstupní trysky, zpravidla kuželem, u kterého je možný posuv v axiálním směru, tím dochází ke změně průtočné plochy, u menších zařízení se pak používá škrticí klapka. Provozní neboli pracovní křivka kompresoru se získá měřením následujících veličin při konstantních otáčkách rotoru N , měříme:

- celkový tlak na vstupu do kompresoru p_1
- celkový tlak na výstupu z kompresoru p_2
- hmotnostní průtok \dot{m}
- účinnost η

Zkouška začíná se zcela otevřenou výstupní tryskou, aby byl umožněn maximální průtok vzduchu (obr. 1 bod 1). Postupným uzavíráním výstupní trysky snižujeme průtok média a tím zvyšujeme tlak. Spojením všech naměřených bodů vznikne rychlostní křivka, která se vyznačuje konstantní hodnotou otáček N . Navyšování tlaku postupnou blokadou výstupní trysky je však limitováno. Přílišným seškrcením výstupní trysky dochází k významnému poklesu absolutní rychlosti proudu vzduchu, současně s tím dochází ke změně úhlu náběhu proudu na lopatky (vše se děje za konstantních otáček rotoru kompresoru). Následkem zvětšení úhlu náběhu na lopatky je odtržení proudu vzduchu a dochází tak k porušení funkce kompresoru. Dodávka vzduchu je přerušena, dokud se nesníží hodnota protitlaku, poté dochází k opětovnému přilehnutí proudu média na lopatky. Kompresor opět dodává vzduch, jehož tlak roste. V okamžiku, kdy však tlak dosáhne předchozí

* Kontakt na autora: Jiri.Hejna@fs.cvut.cz

hodnoty, dochází opět k odtržení proudu. Tento jev, který se bude takto periodicky opakovat, se nazývá pumpáž. [2, 3]



Obr. 1. Měření rychlostní křivky kompresoru [2]

2.1. Pumpáž

Příčinou vzniku pumpáže mohou být například rozdílné hodnoty možného průtočného množství jednotlivých stupňů axiálního kompresoru. Jakmile dojde v některém stupni vlivem úplavů k „ucpání“, není stupeň schopen propustit dále větší množství vzduchu, stupně předchozí dále stlačují, vzrůstá tlak – tím dochází k popsanému jevu. Problém s pumpáží nastává také při spojení osového a odstředivého kompresoru v důsledku rozdílných hlností. Bez správné regulace dojde k pumpáži. [1, 3]

Jev zvaný pumpáž se objevuje, jak již bylo vysvětleno, na nevýpočtových režimech motoru. V praxi však musí být tomuto jevu zabráněno, jelikož může způsobit úplnou destrukci motoru. Pracovní limit motoru je odvozen od prvního výskytu pumpáže kompresoru. Dalšími zkušebními testy při různých hodnotách konstantních otáček jsou obdrženy další rychlostní křivky. Takto probíhají zkoušky až do té doby, než je pokryto celé rozmezí otáček, tím se získá celá množina rychlostních křivek pro daný kompresor (obr. 2). Na každé získané rychlostní křivce existuje bod, po jehož překročení dochází k pumpáži, spojením těchto bodů je vykreslena tzv. pumpovní hranice (pumpovní čára), která definuje pracovní limit kompresoru. [1, 2, 3, 4]

2.2. Obecná charakteristika leteckého axiálního kompresoru

Na obr. 2 je vykreslena charakteristika axiálního kompresoru udávající závislost stlačení Π na korigovaném hmotnostním průtoku \dot{m}_k . Parametrem jsou konstantní korigované otáčky rotoru kompresoru N_k .

Body konstantní účinnosti kompresoru vytváří soubor křivek konstantní účinnosti, které jsou zpravidla eliptického tvaru, přičemž nejvyšší účinnosti dosahuje kompresor na vnitřní křivce. [2, 3]

Data takovéto charakteristiky jsou od naměřených hodnot korigována (redukována) a to z důvodu praktičnosti. Je totiž velice nepraktické shromažďovat naměřené hodnoty pro nespočet možných pracovních podmínek nebo počítat s daty, která byla získána na různých zařízeních. Řešení přinesla tzv. dimenzionální analýza, která umožňuje převést měřená data do univerzální podoby. Jedná se o matematickou metodu, která poskytuje velké množství upravených výkonových parametrů. Mezi ty nejdůležitější patří následující:

- korigovaný hmotnostní průtok na čelní straně kompresoru, definován jako

$$\dot{m}_k = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta} \quad (1)$$

- korigované konstantní otáčky kompresoru definované jako

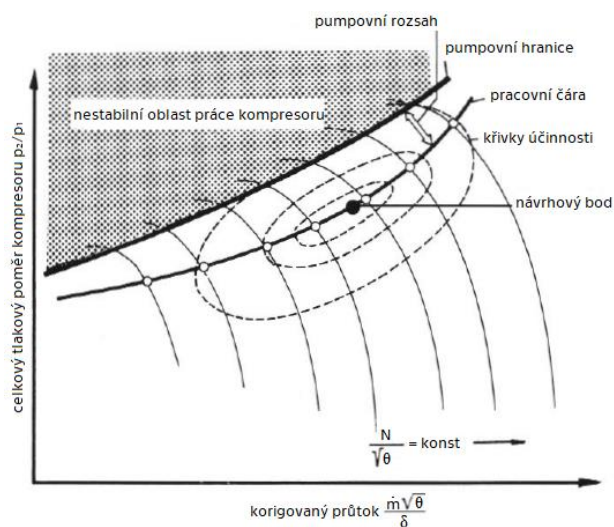
$$N_k = \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad (2)$$

- celkové stlačení neboli tlakový poměr definovaný jako

$$\Pi = \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

Pomocí korigovaných parametrů jsou charakteristiky kompresorů univerzálně použitelné nezávisle na meteorologických podmínkách zkušebního dne. Data jsou často vztažena k návrhovému bodu kompresoru (design point), což umožňuje, aby hodnoty konstantních korigovaných otáček a korigovaného hmotnostního průtoku byly dány v procentech tohoto výpočtového bodu. [2, 3, 5, 6]

Poslední křivkou grafu, která doposud nebyla zmíněna, je pracovní čára. Je třeba si uvědomit, že křivky rychlosti byly získány změnou průtočné plochy výstupního kanálu. Většina proudových motorů však používá výstupní trysku s konstantní průtočnou plochou (nenastavitelnou). V tomto případě vzniká pouze jeden bod pro každou rychlostní křivku. Spojením těchto bodů je vykreslena pracovní čára určitého kompresoru. [2]

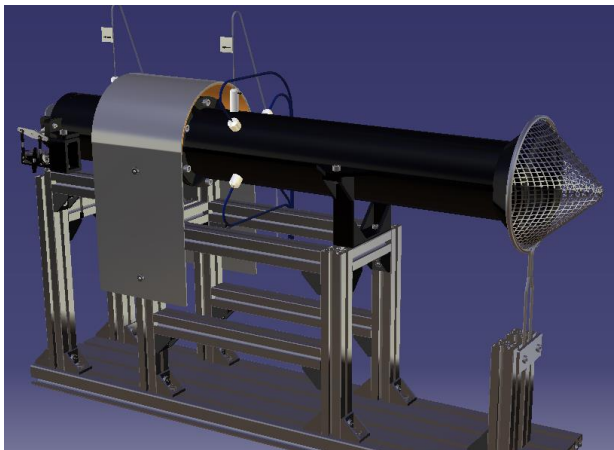


Obr. 2. Charakteristika kompresoru značící závislost tlakového poměru na korigovaném hmotnostním průtoku [2]

3. Konstrukce měřicího přípravku

Návrh měřicího přípravku vychází z několika hlavních požadavků:

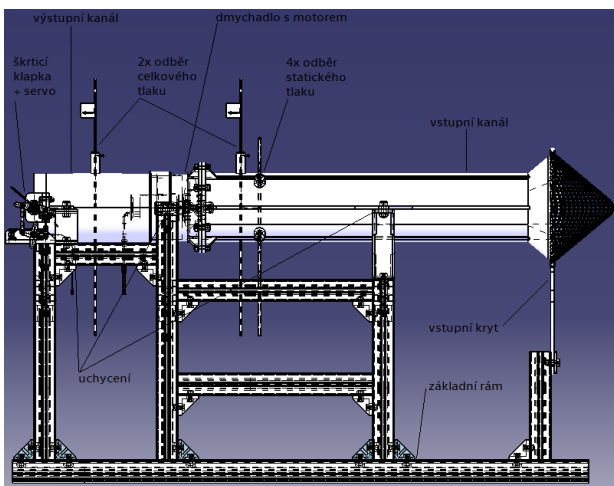
- zařízení by mělo sloužit pro zkoušky a vývoj komponent dmyhadlového pohonu pro malé letouny
- jeho konstrukce by měla především umožňovat měření charakteristik dmyhadla
- zařízení by mělo být modulární a rozebíratelné



Obr. 3. 3D model měřicího přípravku – CATIA

Z obr. 3 a 4 je vidět, že měřicí přípravek je složen z několika částí, každá část má svůj specifický úkol.

- základní rám a ochranné kryty
- vstupní kanál
- dmyhadlo a motor
- výstupní kanál
- odběry tlaku
- škrticí klapka a servomotor

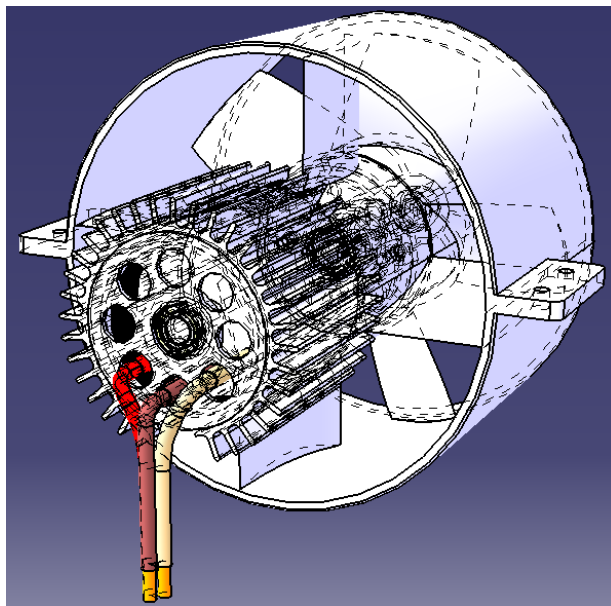


Obr. 4. Boční pohled na model s popisem komponent – CATIA

3.1. Dmyhadlo

Dmyhadlo je hlavní částí celého měřicího standu. Hlavní součásti, které tvoří soustavu dmyhadla, jsou:

- rotor s oběžnými lopatkami
- stator, jehož součástí jsou lopatky statorové
- motor s chladičem



Obr. 5. 3D model sestavy dmyhadla – CATIA

U měřicího standu je použito dmyhadlo pro letecké modely značky HIGH-END TECHNOLOGY RC – typ HET 9305. Jedná se o dmyhadlo, které patří do třídy dmyhadel s vnějším průměrem 90 mm. Lopatky a vnější plášť rotoru jsou z plastu plněného uhlíkem, vnitřní část rotoru – sklíčidlo pro upevnění – je vyrobeno z hliníku. Vnější maximální průměr je 93 mm, vnitřní 89 mm. Váha dmyhadla se pohybuje od 100 do 116 gramů, podle toho, jestli je započítána i váha chladičového kroužku. Rotor dmyhadla je opatřen pěti dynamicky vyváženými lopatkami s vnějším průměrem 88 mm. Na hřídel motoru je rotor připevněn pomocí sklíčidla a šroubu – díky kuželovitému tvaru sklíčidla je spoj samosvorný.

Na obr. 5 je také vidět model použitého elektromotoru značky HIGH-END TECHNOLOGY RC – model Typhoon 650-68-1340, který je navržen speciálně pro dmyhadlo typu 9305. Jde o čtyřpólový komutátorový elektromotor o váze 300 gramů s maximální účinností 88 %. Jeho nominální výkon je 4,1 kW a při napětí 37 V může s dmyhadlem 9305 dosahovat tahu až 4,1 kgs (= 40,2 N).

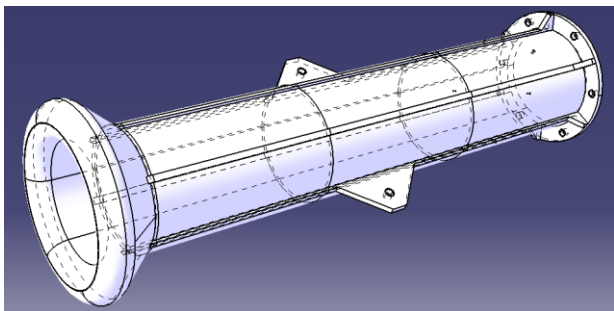
3.2. Vstupní kanál

Konstrukce jak vstupního, tak výstupního kanálu je především závislá na způsobu výroby, kterým byl v tomto případě 3D tisk. Pracovní prostor 3D tiskárny, která byla použita pro výrobu těchto dílů je totiž omezen. Zároveň byla při návrhu uvažována skutečnost, že tiskárna není schopna, nebo pouze obtížně, tisknout volně v prostoru pod úhlem větším, než je 45°. Tyto skutečnosti sťažovaly návrh těchto komponent.

Pro tisk byl vybrán materiál ABS (Akrylonitrilbutadienstyren) a to díky svým vlastnostem, které vyhovují požadavkům kladeným na měřicí přípravek. ABS je termoplastický materiál, jehož výhodou je tuhost, odolnost vůči nízkým i vysokým teplotám a odolnost proti chemikáliím. Další výhodou je možnost lepení komponentů vyčištěných z tohoto materiálu rozpouštědlovými a polyakrylátovými

lepidly, čehož bylo při stavbě přípravku hojně využito. [7, 8]

Z obr. 6 je patrné, že vstupní kanál měřícího přípravku je sestaven z celkem čtyř částí, a to právě z důvodu omezeného pracovního prostoru tiskárny. Spojení těchto částí se díky vlastnostem použitého materiálu provede pomocí acetonu. Vstupní kanál je opatřen několika funkčními prvky: vstupní tvar, packy pro uchycení k základnímu rámu, příruba pro upevnění k dmychadlu, podélná žebra ke zvýšení tuhosti. Dalšími funkčními prvky jsou díry pro odběry tlaků. Vstupní potrubí je opatřeno celkem 5 dírami, z nichž jedna slouží pro odběr tlaku celkového a zbylé 4 pro odběr tlaku statického.



Obr. 6. 3D model vstupního kanálu – CATIA

Celková délka vstupního kanálu činí 500 mm, tato délka byla navržena s ohledem na zrovnoměnění proudu vzduchu. Nejmenší tloušťka stěny je 3 mm, tloušťka příruby, žeber a patek pro uchycení je 5 mm. Hlavním rozměrem je vnitřní průměr, který je totožný s vnitřním průměrem statoru dmychadla (89 mm).

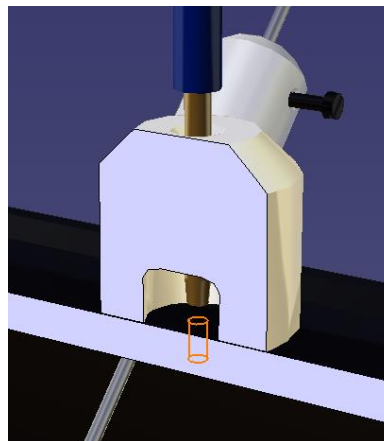
3.3. Tlakové odběry

Dalšími prvky, které jsou součástí vstupního ústrojí, jsou odběry tlaků. Tyto jsou navrženy tak, aby jimi bylo možné měřit absolutní tlak a rychlost proudící tekutiny. Je použita sonda celkového tlaku a statického tlaku. Z principu měření, jenž je popsán v kapitole 5 a 6, vyplývá několik konstrukčních požadavků. Je třeba zajistit:

- odběr statického tlaku v celém průřezu
- proměření proudového pole v celém průřezu
- odběr celkového a statického tlaku v jedné rovině

3.3.1. Odběr statického tlaku

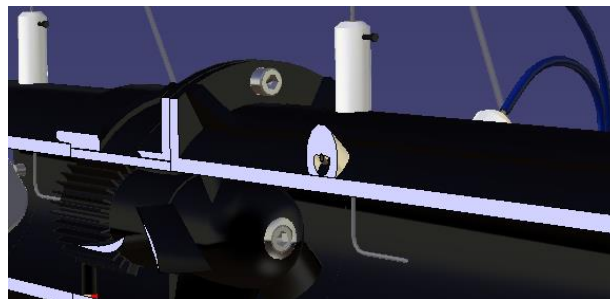
K zajištění odběru statického tlaku v celém průřezu je třeba navrhnout po obvodu potrubí odběrů více, z nichž se poté udělá průměrná hodnota. Po obvodu potrubí byly po 90° navrženy čtyři odběry statického tlaku, které jsou vůči odběru tlaku celkového natočeny o úhel 45°. Na obr. 7 je vidět konstrukce odběru statického tlaku. Tlak je přiveden dírou o velmi malém průměru do vnitřní části válečku, tím prochází měděná trubička, na kterou je nasazena gumová hadice vedoucí k měřidlu – mikromanometru. Váleček je vyroben z polyoxymetylénu (POM) soustružením. Spoj je lepený epoxidovou pryskyřicí, a to z důvodu jednoduchosti a těsnosti.



Obr. 7. Detail 3D modelu odběru statického tlaku – CATIA

3.3.2. Odběr celkového tlaku

Aby bylo možné proměřit celé proudové pole, je třeba, aby byla sonda celkového tlaku konstruována jako posuvná, anebo ji lze zkonstruovat jako tzv. „rakes“. Při návrhu tohoto měřícího zařízení byla použita první alternativa, neboť je snadnější na výrobu a také jednodušší, co se týče samotného uspořádání měření. Nerezová sonda prochází ocelovým válečkem, který je pomocí lepidla připevněn k povrchu vstupního kanálu. Polohu sondy lze ustavit pomocí šroubu ve vedení. Na trubičku je nasazená gumová hadice, která vede k mikromanometru. K zajištění správného nasměrování sondy do proudu slouží ukazatel směru, který je částečně vidět na obr. 9.



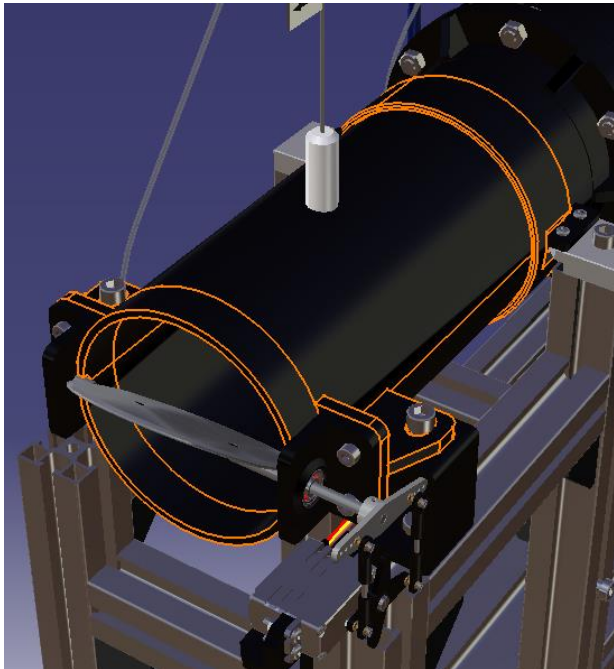
Obr. 8. Řez 3D modelem vstupního ústrojí k zobrazení sondy celkového tlaku – CATIA

3.4. Výstupní kanál

Jak již bylo řečeno v textu předchozí podkapitoly, výstupní kanál je navržen pro 3D tisk z materiálu ABS. Jelikož není možné kvůli složitosti tento díl vytisknout najednou, bylo třeba jej rozdělit na tři části, což je patrné z následujícího obrázku.

Komponenta – objímka, která je zobrazena v pravé části obrázku, slouží ke spojení dmychadla a výstupního potrubí. Spojení je na straně stator – objímka založeno na pouhém nasunutí mírným tlakem přes vnější povrch statoru dmychadla. Těsnost je zajištěna díky uložení s přesahem. Jelikož je na zadním čele statoru provedeno uchycení dmychadla k rámu, bylo třeba vytvořit drážky, které poskytují místo pro packy dmychadla, ocelové úchyty a šrouby, které procházejí skrz. Další funkcí drážek je usta-

vení polohy. Na straně objímka – výstupní kanál je objímka opět nasunuta s malým přesahem přes vnější povrch kanálu. Axiální doraz je vytvořen v objímce. Spojení objímka – výstupní kanál je lepené. Po odmontování šroubů u druhého uchycení, je díky této konstrukci možné jednoduše výstupní ústrojí odejmout, což umožní přístup k motoru a dmychadlu.



Obr. 9. Detail sestavy 3D modelu výstupního ústrojí – CATIA

Prostřední komponentou je samotný výstupní kanál, v němž jsou vymodelovány dvě díry, jedna menší pro odběr celkového tlaku a druhá větší pro průchod kabelů od motoru. V zadní části kanálu je vidět úchyt, který má dvojí funkci. Za prvé jde o uchycení k základnímu rámu, které je provedeno přes podpěry pomocí šroubů a matic. Toto uchycení také dovoluje lehké výrobní nepřesnosti. Druhou funkcí je možnost uchycení škrticí klapky. Poslední třetí komponentou výstupního ústrojí je výstupní kroužek, jehož funkcí je prodloužení výstupního kanálu až ke škrticí klapce. Kroužek je rovněž navržen pro tisk na 3D tiskárně (ABS). Navržené spojení je opět lepením pomocí acetonu. Výřezy na zadní straně vytvářejí místo pro pohyb hřídele škrticí klapky.

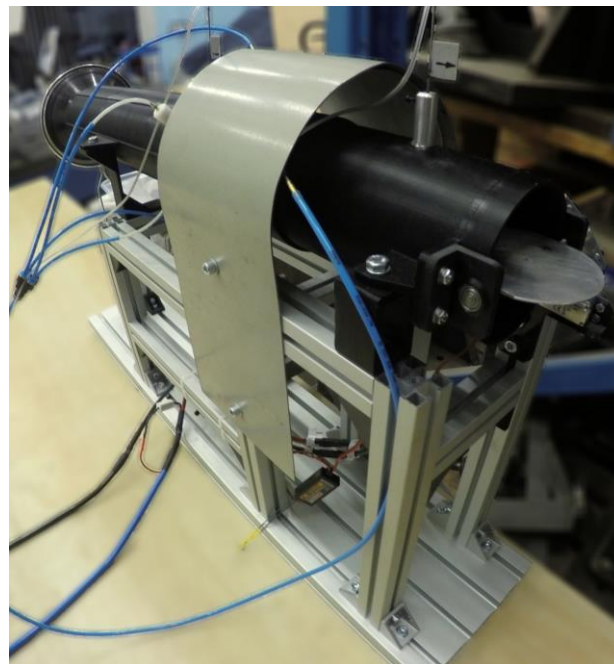
Ve výstupním kanálu je umístěn odběr celkového tlaku. Tato sonda má totožnou konstrukci jako je tomu u kanálu vstupního. Lze s ní také proměřit celé proudové pole. Její funkcí je však pouze měření absolutního tlaku. Rozměry výstupního kanálu jsou, až na rozměr délky, podobné rozměrům vstupního kanálu.

3.5. Škrticí klapka

Funkcí škrticí klapky je, jak je již zřejmé z názvu, škrčení proudů vzduchu protékajícího měřicím zařízením. Konstrukce a princip funkce této podsestavy je zřejmý z předchozího obrázku. Duralová klapka je připevněna na hřídel pomocí dvou šroubů. V hřídeli je navržena drážka, do které klapka zapadá. Rozměry jsou navrženy tak, aby po

celém výstupním obvodu vznikla malá vůle z důvodu zabezpečení natáčení klapky. Hřídel je navržena pro uložení v kuličkových ložiskách 624 značky SKF. Axiální poloha klapky je zajištěna díky menšímu průměru hřídele pod ložiskem. Ložiska jsou uložena s přesahem v úchytech a jejich poloha je pojištěna zalepením vnějších kroužků do úchyťů. Spojení úchyťů škrticí klapky a výstupního kanálu je zajištěno čtyřmi páry šroubů a matic. Funkci neboli škrčení natáčením klapky plní vysokonapěťový digitální servomotor DSHV-3D13T značky JETI model, ten je uchycen úchytem speciálně navrženým pro tento typ. Parametry servomotoru jsou vzhledem k momentu 13 kg.cm více než dostačující. Rotaci servomotoru dochází k natáčení plastové páky servomotoru, která je k němu pomocí drážkování a šroubu připevněna. Plastová páka je spojena pomocí dvou táhel s pákou ocelovou, která je připevněna na hřídeli klapky stavícím šroubem. Úchyty jsou vytištěny na 3D tiskárně (ABS), klapka byla navržena jako stříhaná z plechu, ocelová hřídel je vyrobena soustružením a frézováním. Zbylé komponenty, jak je zřejmé, byly zakoupeny. Tato konstrukce se zdá být výrobně nejjednodušší. Díky této konstrukci byl splněn požadavek na odmontovatelnost klapky.

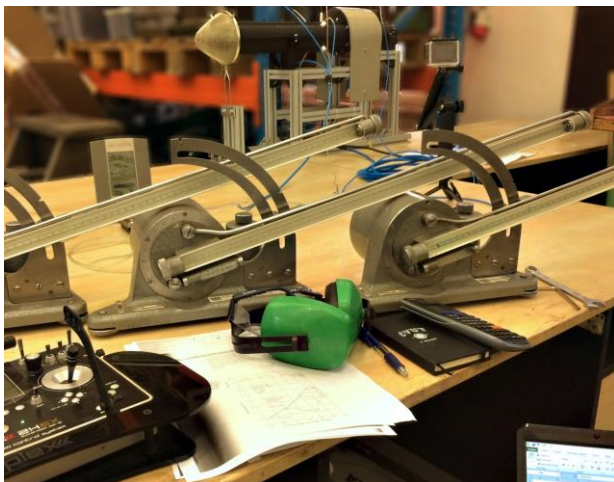
4. Stavba měřicího přípravku



Obr. 10. Sestava měřicího přípravku připravena k měření

Výroba a stavba měřicího přípravku probíhala přesně podle konstrukčního návrhu, který byl dopodrobna rozebrán v přechodí kapitole. Obr. 10 zobrazuje celý měřicí přípravek bez napájecích baterií a měřidel ve stavu, kdy je připraven k prvnímu měření. Odběry tlaků jsou ustaveny do příslušné polohy směrem do proudu, hadičky jsou nasazeny a přivedeny k mikromanometrům, elektromotor je přes regulátor napojen na napájecí baterie, přijímač vysílače je zapnut, klapka je nastavena do polohy zcela otevřeno. Celá sestava měřicího zařízení včetně baterií a měřidel je pak pro lepší představu schematicky zobrazena v kapitole 5.

5. Popis metodiky měření



Obr. 11. Pohled na sestavu měřicího přípravku tak jak je připravena k měření

Popis metodiky měření je popsán následujícími body.

1) uchycení základního rámu měřicího standu k pracovnímu stolu pomocí svěrky, tak aby rovina rotoru dmychadla byla z důvodu bezpečnosti obsluhy mimo prostor, ve kterém dochází k odečítání hodnot z manometrů

pozn. 1: Při první zkoušce funkce dmychadla, nebyl ještě rám připevněn ke stolu a během rotace rotoru díky vyvozenému tahu tak docházelo k posuvu celého standu vpřed.

2) kontrola pospojování hadiček vedoucích k mikromanometrům

3) nastavení mikromanometrů do vodorovné polohy

4) sklopení ramen mikromanometrů na příslušný úhel/poměr

pozn. 2: Sklopení ramene u mikromanometru č. 3 je třeba během měření měnit.

5) doplnění destilované vody do nádobek manometrů; po ustálení zaznamenání výšky poloh vodních sloupců za klidu; totéž bylo provedeno na konci měření

6) odečtení hodnot teploty a atmosférického tlaku; toto bylo provedeno jak na začátku, tak na konci měření – byly vypočteny průměrné hodnoty

7) vyznačení poloh měření na trubičkách sond celkového tlaku

8) nastavení odběrů celkového tlaku do příslušné polohy (aretace polohy šroubem) a kontrola nasměrování do proudu

9) použití ochranných brýlí a sluchátek proti hluku pro ochranu obsluhy

10) zapnutí vysílačky, její kalibrace

11) zapojení napájecích kabelů na kabely regulátoru; nejprve je zapojen „mínus“ (černý kabel), poté rezistor a na konec „plus“ (modrý kabel) - rozpojení je v totožném sledu

pozn. 3: Napájecí baterie jsou propojeny, stejně tak jsou zapojeny kabely elektromotoru a regulátoru, servomotor je propojen s přijímačem vysílačky, tento je připojen k regulátoru; tato zapojení byla již provedena při stavbě přípravku.

12) nastavení polohy spínače elektrických zařízení přípravku na „on“ (= zapnuto)

13) nastavení úhlu škrtkové klapky; při měření označeném jako nulté je klapka vodorovně (0°), poté se při dalším následujícím měření úhel navyšuje, a to s krokem 3°

14) „najetí“, pomocí páčky ovladače, na příslušné otáčky dmychadla; 20500 min^{-1}

15) vyčkání na ustálení vodních sloupců v trubicích mikromanometrů

16) odečtení hodnot ze stupnic; levý manometr měří absolutní tlak na vstupu, prostřední je pro měření rychlosti proudu vzduchu, pravý mikromanometr slouží ke změření absolutního tlaku na výstupu

17) snížení otáček rotoru dmychadla na nulu

18) návrat k bodu 8) - postup se opakuje, vyjma bodů 10), 11), 12) a 13), až do chvíle, než je pomocí změny poloh sond celkových tlaků proměřené celé proudové pole

19) změna nastavení úhlu škrtkové klapky; měření označené jako první 3° , druhé 6° atd.

20) návrat k bodu 18)

pozn. 4: Během měření je třeba sledovat teplotu regulátoru a motoru, aby nedošlo ke „spálení“.

Tento postup platí, pokud je měřeno celé proudové pole, tzn. polohy sond celkových tlaků jsou během měření měněny. Zmíněný postup měření, označen jako postup 1, je však velice časově náročný, a proto bylo přistoupeno k poněkud rychlejšímu řešení, postup 2, který je založen na postupu 1. Postup 2 umožňuje nastavit sondy do jedné jediné příslušné polohy a během jednoho sepnutí dmychadla a „najetí“ na dané otáčky lze proměřit celou jednu rychlostní křivku. Jediným parametrem, který je v tuto chvíli měněn, je natočení klapky. Metodika postupu 2 se od metodiky postupu 1 příliš neliší.

1) - 12) totožné jako u postupu 1

13) nastavení úhlu klapky do výchozí polohy – úhel 0°

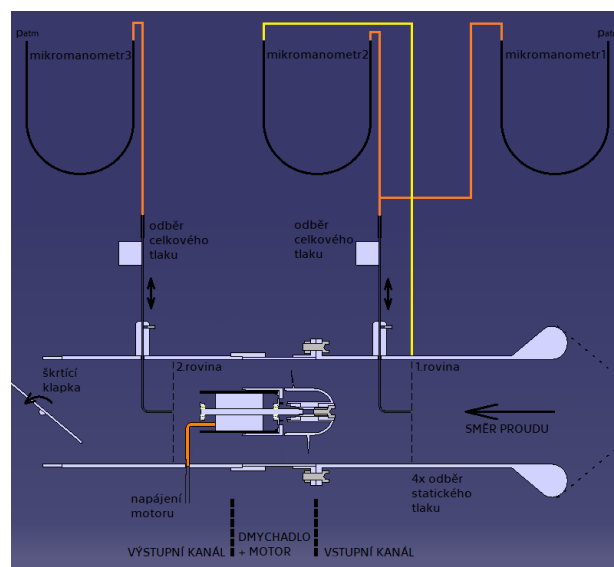
14) „najetí“, pomocí páčky ovladače, na příslušné otáčky dmychadla; při měření první křivky 20500 min^{-1} , druhé 25800 min^{-1} a při měření křivky třetí 30000 min^{-1}

15) - 16) totožné postupu 1

17) navýšení úhlu natočení klapky o 3°

18) návrat k bodu 15) - postup se opakuje až do dosažení pumpáže – úhel 48°

19) snížení otáček rotoru na nulu



Obr. 12. Schématické zobrazení měřicího přípravku – CATIA

6. Měření charakteristiky dmyhadla

Speciální měřicí přípravek navržený v této práci je schopný za konstantních otáček rotoru dmyhadla proměřit jeho charakteristiku pomocí škrťací klapky ve výstupu. Obecný princip měření charakteristik dmyhadla a jevy, které jsou s tímto měřením související, jsou popsány v teoretické části této práce.

Vstupní veličiny:

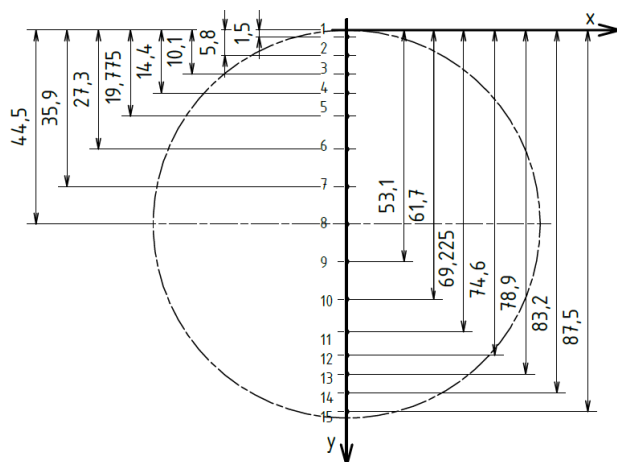
- otáčky rotoru dmyhadla N
- úhel natočení škrťací klapky ε

Měřené veličiny:

- rozdíl atmosférického a absolutního tlaku na vstupu Δp_1 (podtlak)
- rozdíl celkového a statického tlaku Δp_2 (přetlak) - Pitot
- rozdíl atmosférického a absolutního tlaku na výstupu Δp_3 (přetlak)

6.1. Postup 1

Při tomto postupu je díky měnitelným polohám sond celkových tlaků proměřeno celé proudové pole. Lze tedy získat informace o tlaku a rychlosti na vstupu a tlaku na výstupu v celém průřezu potrubí. Tento postup byl použit, neboť bylo třeba zjistit, jak se proud vzduchu uvnitř potrubí chová a v návaznosti na to určit koeficienty, které byly použity pro přepočítání při postupu 2. Naměřená rychlostní křivka je výchozím bodem celého měření, sloužící pro porovnání a ověření správnosti výpočtu koeficientů.



Obr. 13. Polohy měření sond celkových tlaků – Inventor

Pro ilustraci měření je zde uvedena část tabulky naměřených hodnot.

Tabulka 1. Naměřené hodnoty při 0. měření s vodorovnou polohou škrťací klapky – postup 1 (1. den měření)

natočení $\varepsilon = 0^\circ, j = 0$ otáčky $N = 20500 \text{ min}^{-1}$				M č. 1	M č. 2	M č. 3
Body měření i	Poloha bodů [mm]	l [A]	U [V]	h_{1ij} [mm]	h_{2ij} [mm]	h_{3ij} [mm]
1	1,5	7	37,5	184,5	99,0	233,0
2	5,8	7	37,2	87,0	206,0	357,0
3	10,1	7	37,0	51,5	239,0	397,0
4	14,4	7	37,0	49,5	242,0	407,5
5	19,775	6	36,9	47,5	247,0	403,0

Poloha výšky vodních sloupců v trubicih mikromanometrů za klidu (atm. tlak) byla během prvního měřicího dne konstantní:

- mikromanometr č. 1 - sklopení 1:4 $H_1 = 28 \text{ mm}$
- mikromanometr č. 2 - sklopení 1:4 $H_2 = 5,5 \text{ mm}$
- mikromanometr č. 3 - sklopení 1:2 i 1:4 $H_3 = 2 \text{ mm}$

Druhý den se změnila pouze hodnota výšky $H_2 = 4,5 \text{ mm}$.

6.1.1. Výpočet hustoty nasávaného vzduchu

Vzhledem k tomu, že rychlostní křivka měřená postupem 1, byla kvůli zdlouhavosti měření měřena během dvou dnů, bylo třeba pro oba dny změřit klimatické podmínky a z nich pak počítat dvě rozdílné hustoty vzduchu. Tyto hustoty pak byly použity ve výpočtech s příslušnými naměřenými hodnotami.

Při výpočtu uvažujeme vzduch jako ideální plyn – lze použít stavovou rovnici ideálního plynu, z které lze následujícím vztahem vypočítat hustotu.

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T} \quad (4)$$

$$r = 287,06 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tabulka 2. Stavové veličiny 1. den měření

		začátek dne	konec dne	aritmetický $\bar{\theta}$
atmosférický tlak p_{atm}	[Torr]	748	747	
	[Pa]	99724,86	99591,53	99658,20
teplota T	[°C]	26,0	26,6	
	[K]	299,15	299,75	299,45
hustota ρ	[kg·m ⁻³]	1,161293	1,157419	1,159356

Tabulka 3. Stavové veličiny 2. den měření

		začátek dne	konec dne	aritmetický $\bar{\theta}$
atmosférický tlak p_{atm}	[Torr]	748	747,5	
	[Pa]	99724,86	99658,20	99691,53
teplota T	[°C]	25,9	27	
	[K]	299,05	300,15	299,60
hustota ρ	[kg·m ⁻³]	1,161681	1,156650	1,159166

Pro ilustraci provedeného výpočtu je zde uvedena tabulka s mezi-výpočty.

Tabulka 4. Mezi-výpočty postup 1 (1. den měření)

0°	absolutní tlak na vstupu			rychlost			absolutní tlak na výstupu		
	h_{z1ij} [mm]	Δp_{1ij} [Pa]	p_{1ij} [Pa]	h_{z2ij} [mm]	Δp_{2ij} [Pa]	c_{1ij} [m·s ⁻¹]	h_{z3ij} [mm]	Δp_{3ij} [Pa]	p_{2ij} [Pa]
1	39,1	383,69	99274,51	23,4	229,23	19,89	57,8	566,33	100224,53
2	14,8	144,65	99513,55	50,1	491,56	29,12	88,8	870,34	100528,54
3	5,9	57,61	99600,58	58,4	572,46	31,43	98,8	968,41	100626,60
4	5,4	52,71	99605,48	59,1	579,82	31,63	101,4	994,15	100652,34
5	4,9	47,81	99610,39	60,4	592,08	31,96	100,3	983,12	100641,31

indexem i jsou označeny polohy sond celkových tlaků ($i = 1, 2, 3, \dots, 15$)

indexem j jsou označeny natočení škrťací klapky ($j = 0, 1, 2, \dots, 13$) pro postup 1, ($j = 0, 1, 2, \dots, 16$) pro postup 2

Použité poměry (úhly) sklopení ramen mikromanometrů při měření – postup 1 i 2

- 1:1 - převodový poměr $z_{90} = 1$
- 1:2 - převodový poměr $z_{30} = 2$

1:4 - převodový poměr $z_{15} = 4$

Konstanta pro přepočet z 1 mm konvenčního vodního sloupce na Pascaly vyplývá ze vzorce:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h \quad (5)$$

$$\rightarrow 1 \text{ mm } H_2O = 9,80665 \text{ Pa} \rightarrow K$$

Výpočet absolutního tlaku vzduchu na vstupu:

$$h_{z_{1ij}} = \frac{h_{1ij} - H_1}{z} \quad (6)$$

$$\Delta p_{1ij} = h_{z_{1ij}} \cdot K \quad (7)$$

$$p_{1ij} = p_{atm} - \Delta p_{1ij} \quad (8)$$

Po dosazení:

$$p_{1ij} = p_{atm} - \left[\left(\frac{h_{1ij} - H_1}{z} \right) \cdot K \right] \quad (9)$$

Výpočet rychlosti proudu vzduchu na vstupu:

$$h_{z_{2ij}} = \frac{h_{2ij} - H_2}{z} \quad (10)$$

$$\Delta p_{2ij} = h_{z_{2ij}} \cdot K \quad (11)$$

Z Bernoulliho rovnice pak plyne:

$$gh_1 + \frac{p_{s1}}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = gh_2 + \frac{p_{s2}}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} \quad (12)$$

$$p_c = p_{s1} + \rho \frac{c_1^2}{2} = p_{s2} + \rho \frac{c_2^2}{2} \quad (13)$$

$$\rightarrow c_{1ij} = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_c - p_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{2ij}}{\rho}} \quad (14)$$

Po dosazení:

$$c_{1ij} = \sqrt{\frac{2K \cdot \left(\frac{h_{2ij} - H_2}{z} \right)}{\rho}} \quad (15)$$

Výpočet absolutního tlaku vzduchu na výstupu:

$$h_{z_{3ij}} = \frac{h_{3ij} - H_3}{z} \quad (16)$$

$$\Delta p_{3ij} = h_{z_{3ij}} \cdot K \quad (17)$$

$$p_{2ij} = p_{atm} + \Delta p_{3ij} \quad (18)$$

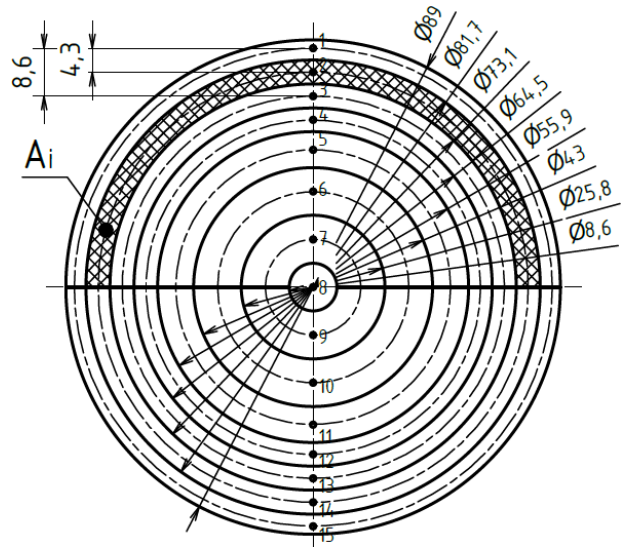
Po dosazení:

$$p_{2ij} = p_{atm} + \left[\left(\frac{h_{3ij} - H_3}{z} \right) \cdot K \right] \quad (19)$$

Tímto způsobem jsou spočítány všechny dílčí hodnoty absolutních tlaků a rychlosti pro natočení škrticí klapky od 0° do 39° . Výstupem z předchozích výpočtů a naměřených hodnot je celkem 13 tabulek, každá tabulka pro jedno natočení klapky. Z každé ze 13 tabulek vyjde jeden jediný bod, který je následně zanesen do charakteristiky dmyhadla. Rychlostní křivka je sestavena z celkem 13 bodů. K dosažení žádaného výstupu je třeba použít následující vzorec:

ROVINA MĚŘENÍ 1

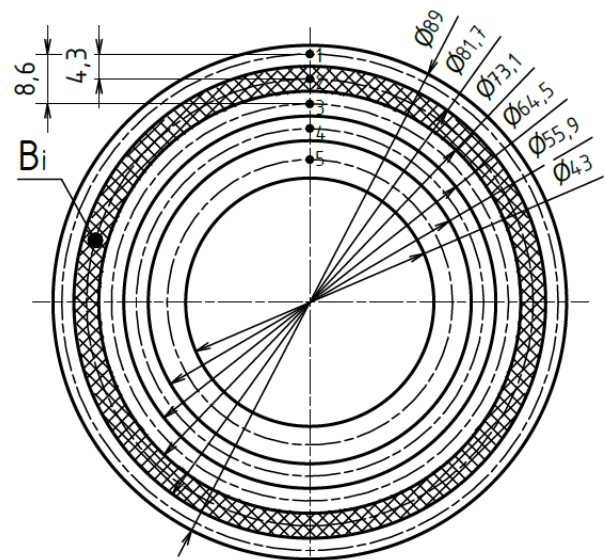
$$\bar{p}_{1j} = \left(\sum_{i=1}^n p_{1ij} \cdot c_{1ij} \cdot A_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n c_{1ij} \cdot A_i \right) \quad (20)$$



Obř. 14. Rovina měření 1, vyznačení poloh měření, vyznačení plochy A_i - Inventor

ROVINA MĚŘENÍ 2

$$\bar{p}_{2j} = \left(\sum_{i=1}^n p_{2ij} \cdot B_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n B_i \right) \quad (21)$$



Obř. 15. Rovina měření 2, vyznačení poloh měření, vyznačení plochy B_i - Inventor

$$A_i = \frac{\pi d_1^2}{4} \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right] \quad (22)$$

$$B_i = \frac{\pi d_1^2}{4} \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right] \quad (23)$$

Výpočet celkového stlačení dmyhadla:

$$\Pi_j = \frac{\bar{p}_{2j}}{\bar{p}_{1j}} \quad (24)$$

Výpočet hmotnostního průtoku:

$$\dot{m}_j = \sum_{i=1}^n c_{1ij} \cdot A_i \cdot \rho \quad (25)$$

Tabulka 5. Vypočtené hodnoty celkového stlačení a hmotnostního toku

j [-]	ε [°]	\bar{p}_{1j} [Pa]	\bar{p}_{2j} [Pa]	Π_j [-]	\dot{m}_j [kg.s ⁻¹]
0	0	99567,60	100530,07	1,009666	0,215567
1	3	99568,81	100543,94	1,009793	0,216901
2	6	99573,01	100552,58	1,009838	0,217217
3	9	99576,73	100570,07	1,009976	0,217750
4	12	99578,10	100584,11	1,010103	0,215455
5	15	99576,41	100633,22	1,010613	0,212161
6	18	99584,36	100661,25	1,010814	0,208339
7	21	99620,96	100766,76	1,011502	0,205199
8	24	99625,01	100848,64	1,012282	0,200084
9	27	99627,13	100947,37	1,013252	0,194016
10	30	99621,65	100985,96	1,013695	0,184774
11	33	99625,03	101032,38	1,014126	0,178824
12	36	99634,33	101092,08	1,014631	0,172043
13	39	99637,44	101167,44	1,015356	0,165152

V teoretické části bylo také vysvětleno, že hodnoty je nutné korigovat na standardní podmínky, tj. tlak 101325 Pa a teplotu 15 °C (0m MSA).

$$p_{ref} = 101325 \text{ Pa}$$

$$T_{ref} = 288,15 \text{ K}$$

Výpočet korigovaného hmotnostního průtoku:

$$\dot{m}_k = \frac{\dot{m}\sqrt{\theta}}{\delta} \quad (26)$$

$$\theta = \frac{T}{T_{ref}} \quad (27)$$

$$\delta = \frac{\bar{p}_1}{p_{ref}} \quad (28)$$

Výpočet korigovaných otáček rotoru:

$$N_k = \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad (29)$$

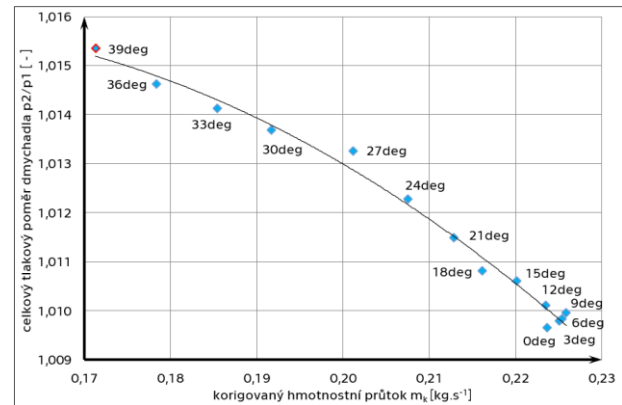
Stlačení není třeba korigovat, neboť jde o bezrozměrnou veličinu.

Tabulka 6. Výsledná tabulka vypočtených hodnot – postup 1

	j [-]	ε [°]	θ [-]	δ [-]	N_k [min ⁻¹]	\dot{m}_k [kg.s ⁻¹]	Π_j [-]
1. den měření	0	0	1,039215	0,982656	20109,49	0,223632	1,009666
	1	3		0,982668		0,225013	1,009793
	2	6		0,982709		0,225331	1,009838
	3	9		0,982746		0,225875	1,009976
	4	12		0,982759		0,223492	1,010103
	5	15		0,982743		0,220079	1,010613
	6	18		0,982821		0,216097	1,010814
2. den měření	7	21	1,039736	0,983182	20104,45	0,212815	1,011502
	8	24		0,983222		0,207502	1,012282
	9	27		0,983243		0,201205	1,013252
	10	30		0,983189		0,191631	1,013695
	11	33		0,983223		0,185454	1,014126
	12	36		0,983314		0,178405	1,014631
	13	39		0,983345		0,171253	1,015356

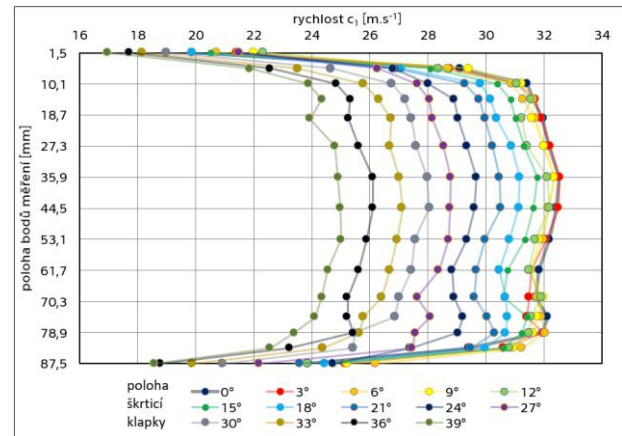
Výstupem tabulky je jedna rychlostní křivka měřená při konstantních otáčkách 20500 min⁻¹. Charakteristika

dmychadla je vyobrazena na následujícím obrázku, komentována je však až v podkapitole 6.2.



Obr. 16. Výsledná charakteristika dmychadla – postup 1

Zajímavým výstupem je také graf rychlostního pole měnící se s natáčením škrtky klapky. Jak je vidět rychlost s přivíráním klapky klesá.



Obr. 17. Graf rychlostního pole

6.1.2. Výpočet koeficientů pro přepočítání u postupu 2

Tyto koeficienty, které byly vypočteny na základě postupu 1, slouží postupu 2, díky nim lze tento postup realizovat. U postupu 2 je během celého měření neměnná poloha sond celkových tlaků. Sonda celkového tlaku na vstupu je ustavena uprostřed potrubí – poloha 8 (44,5 mm), sonda celkového tlaku na výstupu je ustavena do polohy 3 (10,1 mm) - dle obr. 13.

Tabulka 7. Část hodnot potřebných k výpočtu koeficientů

natočení ε = 0° → j = 0							
i [-]	poloha [mm]	P_{1ij} [Pa]	c_{1ij} [m.s ⁻¹]	P_{2ij} [Pa]	\bar{p}_{1j} [Pa]	c_{1j} [m.s ⁻¹]	\bar{p}_{2j} [Pa]
1	1,5	99274,51	19,89	100224,53	99567,60	29,89	100530,07
2	5,8	99513,55	29,12	100528,54			
3	10,1	99600,58	31,43	100626,60			
4	14,4	99605,48	31,63	100652,34			
5	19,775	99610,39	31,96	100641,31			
6	27,3	99633,68	32,16	-			
7	35,9	99645,94	32,52	-			
8	44,5	99642,26	32,42	-			
9	53,1	99621,42	32,19	-			

Takto byly sestaveny všechny tabulky, natočení pro postup 1 $\varepsilon = 0^\circ - 39^\circ$ tzn. $j = 0 - 13$ ($n = 14$). Z těchto tabulek jsou pomocí následujících vzorců vypočteny koeficienty pro přepočet.

$$K_{p_1} = \left(\sum_{j=0}^n \frac{\overline{p_{1j}}}{p_{18j}} \right) / n \quad (30)$$

$$K_{c_1} = \left(\sum_{j=0}^n \frac{c_{1j}}{c_{18j}} \right) / n \quad (31)$$

$$K_{p_2} = \left(\sum_{j=0}^n \frac{\overline{p_{2j}}}{p_{23j}} \right) / n \quad (32)$$

Tabulka 8. Výsledná tabulka opravných koeficientů

j [-]	ε [°]	$\frac{\overline{p_{1j}}}{p_{18j}}$	$\frac{\overline{p_{2j}}}{p_{23j}}$	$\frac{c_{1j}}{c_{18j}}$
0	0	0,999251	0,999041	0,921924
1	3	0,999226	0,999154	0,925768
2	6	0,999342	0,998899	0,936548
3	9	0,999305	0,998878	0,966937
4	12	0,999270	0,998945	0,928003
5	15	0,999315	0,999056	0,930093
6	18	0,999357	0,999249	0,928174
7	21	0,999391	0,999333	0,932771
8	24	0,999456	0,999270	0,937649
9	27	0,999452	0,999375	0,935570
10	30	0,999373	0,999478	0,913476
11	33	0,999407	0,999646	0,914038
12	36	0,999500	0,999376	0,914189
13	39	0,999531	0,999274	0,916851
Σ		13,991176	13,988974	13,001991
KOEFICIENTY		0,999370	0,999212	0,928714

Díky měření v následující podkapitole, kdy je obdržena také rychlostní křivka při otáčkách 20500 min^{-1} , lze porovnat postup 1 a 2 viz příloha bakalářská práce.

6.2. Postup 2

Jak již bylo na předchozích stranách vysvětleno, poloha odběrů celkových tlaků je během měření neměnná. Odběr na vstupu nastaven do polohy 8 (44,5 mm), odběr na výstupu nastaven do polohy 3 (10,1 mm). Díky tomu lze proměřit celou jednu rychlostní křivku na jedno sepnutí dmychadla pouhým natáčením škrticí klapky. Celkem byly proměřeny tři rychlostní křivky během jednoho měřicího dne.

Naměřené hodnoty musí však být vzhledem ke statické poloze sond během měření přepočítány pomocí opravných koeficientů.

Tabulka 9. Stavové veličiny

		začátek měření	konec měření	aritmetický $\bar{\varnothing}$
atmosférický tlak p_{atm}	[Torr]	752,5	752	
	[Pa]	100324,81	100258,14	100291,48
teplota T	[°C]	31,4	31,4	
	[K]	304,55	304,55	304,55
hustota ρ	[kg·m ⁻³]	1,147564	1,146801	1,147183

Poloha výšky vodních sloupců v trubcích mikromanometrů za klidu (atm. tlak) byla během celého měření konstantní.

- mikromanometr č. 1 - sklopení 1:4 $H_1 = 27 \text{ mm}$
- mikromanometr č. 2 - sklopení 1:4 $H_2 = 8,5 \text{ mm}$
- mikromanometr č. 3 - sklopení 1:1 $H_3 = 2 \text{ mm}$, 1:2 $H_3 = 1,75 \text{ mm}$, 1:4 $H_3 = 1,75 \text{ mm}$

Měření byly celkem tři rychlostní křivky: 20500 min^{-1} , 25800 min^{-1} , 30000 min^{-1}

Vzhledem k tomu, že naměřené hodnoty při otáčkách 20500 min^{-1} byly již předvedeny u postupu 1, zde budou ukázány naměřené hodnoty druhé rychlostní křivky – otáčky 25800 min^{-1} . U tohoto měření se poloha sklonu trubice manometru č. 3 neměnila.

Tabulka 10. Tabulka naměřených hodnot s mezi-výpočty – postup 2 (25800 min^{-1})

25800 min ⁻¹		manometr č. 1			manometr č. 2			manometr č. 3				
j [-]	ε [°]	I [A]	U [V]	h_{1j} [mm]	h_{2j} [mm]	Δp_{1j} [Pa]	h_{2j} [mm]	h_{3j} [mm]	Δp_{2j} [Pa]	h_{3j} [mm]	h_{3j} [mm]	Δp_{3j} [Pa]
0	0	14	37,2	37,0	2,5	24,5	390,0	95,4	935,3	334,0	166,1	1629,1
1	3	13	36,9	36,5	2,4	23,3	393,0	96,1	942,7	335,0	166,6	1634,0
2	6	13	36,9	35,5	2,1	20,8	393,0	96,1	942,7	337,0	167,6	1643,8
3	9	13	36,8	35,0	2,0	19,6	392,5	96,0	941,4	342,0	170,1	1668,4
4	12	13	36,8	35,0	2,0	19,6	388,5	95,0	931,6	350,0	174,1	1707,6
5	15	13	36,8	34,5	1,9	18,4	382,5	93,5	916,9	362,5	180,4	1768,9
6	18	15	37,2	35,0	2,0	19,6	364,0	88,9	871,6	378,0	188,1	1844,9
7	21	14	36,8	34,5	1,9	18,4	355,0	86,6	849,5	396,5	197,4	1935,6
8	24	15	36,8	33,0	1,5	14,7	339,5	82,8	811,5	418,0	208,1	2041,0
9	27	15	36,7	30,0	0,8	7,4	327,0	79,6	780,9	441,5	219,9	2156,2
10	30	15	36,7	29,0	0,5	4,9	309,0	75,1	736,7	457,0	227,6	2232,2
11	33	15	36,6	28,5	0,4	3,7	292,5	71,0	696,3	464,0	231,1	2266,6
12	36	16	36,6	28,0	0,3	2,5	268,0	64,9	636,2	493,5	245,9	2411,2
13	39	16	36,6	28,0	0,3	2,5	248,0	59,9	587,2	505,5	251,9	2470,1
14	42	16	36,5	28,0	0,3	2,5	222,0	53,4	523,4	518,0	258,1	2531,3
15	45	16	36,5	27,5	0,1	1,2	201,5	48,3	473,2	511,5	254,9	2499,5
16	48	13	36,6	25,0	-0,5	-4,9	149,0	35,1	344,5	418,0	208,1	2041,0

Výpočet je proveden podobně jako u postupu 1 (zde již nefiguruje index i):

Výpočet celkového absolutního tlaku vzduchu na vstupu:

$$h_{z_{1j}} = \frac{h_{1j} - H_1}{z} \quad (33)$$

$$\Delta p_{1j} = h_{z_{1j}} \cdot K \quad (34)$$

$$\overline{p_{1j}} = (p_{atm} - \Delta p_{1j}) \cdot K_{p_1} \quad (35)$$

Po dosazení:

$$\overline{p_{1j}} = \left\{ p_{atm} - \left[\left(\frac{h_{1j} - H_1}{z} \right) \cdot K \right] \right\} \cdot K_{p_1} \quad (36)$$

Výpočet celkové rychlosti proudu vzduchu na vstupu:

$$h_{z_{2j}} = \frac{h_{2j} - H_2}{z} \quad (37)$$

$$\Delta p_{2j} = h_{z_{2j}} \cdot K \quad (38)$$

$$c_{1j} = K_{c_1} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{2j}}{\rho}} \quad (39)$$

Po dosazení:

$$c_{1j} = K_{c1} \cdot \sqrt{\frac{2K \cdot \left(\frac{h_{2j} - H_2}{Z}\right)}{\rho}} \quad (40)$$

Výpočet celkového absolutního tlaku vzduchu na výstupu:

$$h_{z3j} = \frac{h_{3j} - H_3}{Z} \quad (41)$$

$$\Delta p_{3j} = h_{z3j} \cdot K \quad (42)$$

$$\bar{p}_{2j} = (p_{atm} + \Delta p_{3j}) \cdot K_{p2} \quad (43)$$

Po dosazení:

$$\bar{p}_{2j} = \left\{ p_{atm} + \left[\left(\frac{h_{3j} - H_3}{Z} \right) \cdot K \right] \right\} \cdot K_{p2} \quad (44)$$

Výpočet celkového stlačení dmyhadla:

$$\Pi_j = \frac{\bar{p}_{2j}}{\bar{p}_{1j}} \quad (45)$$

Výpočet hmotnostního průtoku:

$$\dot{m}_j = c_{1j} \cdot A \cdot \rho \quad (46)$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (47)$$

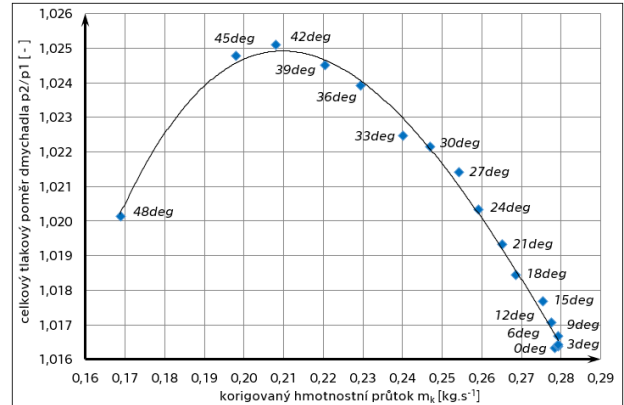
$$d = 89 \text{ mm} = 0,089 \text{ m}$$

Dále je pak nutné vypočtené hodnoty korigovat na standardní podmínky, tj. tlak 101325 Pa (0 m nadmořské výšky) a 15°C. Použity byly stejné vzorce jako pro postup 1 (26-29).

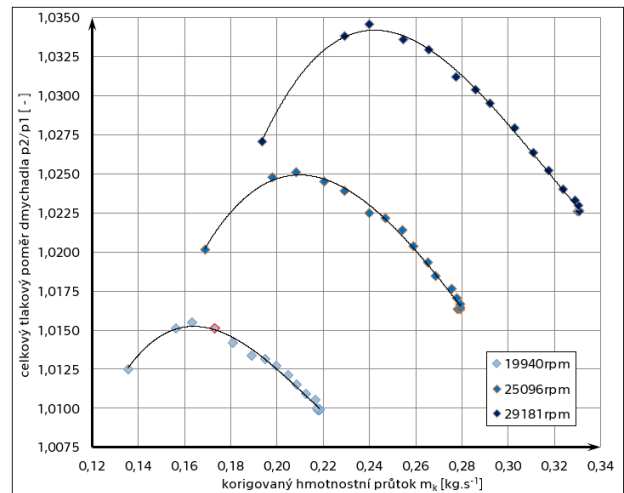
Tabulka 11. Výsledné hodnoty – postup 2 (25800 min⁻¹)

N = 25800 min ⁻¹				θ = 1,056915				
N _k = 25095,72 min ⁻¹								
j	ε	\bar{p}_{1j}	c _{1j}	\bar{p}_{2j}	$\Pi_j \equiv \Pi_{kj}$	\dot{m}_j	δ	\dot{m}_{kj}
[-]	[°]	[Pa]	[m·s ⁻¹]	[Pa]	[-]	[kg·s ⁻¹]	[-]	[kg·s ⁻¹]
0	0	100203,76	37,50	101840,34	1,016333	0,267646	0,988934	0,278236
1	3	100204,98	37,65	101845,24	1,016369	0,268696	0,988946	0,279324
2	6	100207,43	37,65	101855,04	1,016442	0,268696	0,988970	0,279318
3	9	100208,66	37,62	101879,53	1,016674	0,268521	0,988983	0,279133
4	12	100208,66	37,43	101918,73	1,017065	0,267119	0,988983	0,277675
5	15	100209,88	37,13	101979,97	1,017664	0,265002	0,988995	0,275471
6	18	100208,66	36,20	102055,91	1,018434	0,258365	0,988983	0,268574
7	21	100209,88	35,74	102146,55	1,019326	0,255073	0,988995	0,265150
8	24	100213,56	34,93	102251,89	1,020340	0,249303	0,989031	0,259142
9	27	100220,91	34,27	102367,03	1,021414	0,244550	0,989103	0,254183
10	30	100223,36	33,28	102442,97	1,022147	0,237539	0,989128	0,246890
11	33	100224,58	32,36	102477,27	1,022476	0,230926	0,989140	0,240013
12	36	100225,81	30,93	102621,80	1,023906	0,220741	0,989152	0,229424
13	39	100225,81	29,71	102680,60	1,024493	0,212064	0,989152	0,220406
14	42	100225,81	28,05	102741,84	1,025104	0,200222	0,989152	0,208099
15	45	100227,03	26,67	102709,99	1,024773	0,190367	0,989164	0,197854
16	48	100233,16	22,76	102251,89	1,020140	0,162425	0,989224	0,168802

Výstupem této tabulky a dvou dalších tabulek, které jsou přiloženy v příloze bakalářské práce, je charakteristika dmyhadla obsahující tři rychlostní křivky.



Obr. 18. Rychlostní křivka měřená při konstantních otáčkách rotoru dmyhadla



Obr. 19. Charakteristika modelového dmyhadla

Z grafů vyplývá několik zásadních poznatků:

- měřicí zařízení bylo zkonstruováno a vyrobeno správně, jeho práce odpovídá předpokladům
- s přivíráním škrtkové klapky ve výstupu klesá rychlost, což má za následek pokles hmotnostního průtoku, zároveň vzrůstá tlakový poměr dmyhadla
- vzrůst protitlaku vyvozeným škrtkovou klapkou se projeví až od natočení 9°
- se zvyšováním hodnoty parametru N (otáček rotoru) vzrůstají veličiny na obou osách
- mezi úhly natočení klapky 42° a 45° dochází k překročení pumpovní hranice a objevuje se jev, který byl popsán v teoretické části této práce, zvaný pumpáž
- pumpáž má za následek markantní pokles obou veličin, jak hmotnostního průtoku, tak i stlačení
- bod grafu při úhlu 48° je již hluboko v nestabilní oblasti práce dmyhadla, tzv. hluboká pumpáž, proto byl při samotném měření kladen důraz na přílišné nesetrvávání v této oblasti, neboť by mohlo dojít k destrukci dmyhadla
- průběhy jednotlivých křivek se zdají být podobné, což naznačuje správnost provedeného měření

7. Závěrečné shrnutí informací

Cíl této práce, jímž byl návrh a realizace modelového zařízení pro zkoušky a vývoj komponent dmychadlového pohonu pro malé letouny, byl splněn. Byl navržen, vyroben a sestaven měřicí přípravek, který jeho obsluze umožňuje měřit charakteristiku použitého dmyhadla za konstantních otáček rotoru. Charakteristika je měřena pomocí odběrů tlaků v potrubí při různých polohách škrtkové klapky ve výstupním ústrojí.

Experimentální měření, při němž byl použit postup, u kterého dochází k proměření celého proudového pole, přineslo po vyhodnocení odpověď na zásadní otázku a tou bylo urychlení celého procesu, neboť tento byl velice zdoluhavý. Výstupem z tohoto zkušebního měření jsou koeficienty pro přepočítání, které byly použity při experimentálním měření druhým postupem. Měření druhým postupem bylo několikanásobně rychlejší, neboť nebyla měněna poloha sond celkových tlaků, naměřené hodnoty musely být však přepočítány, a to pomocí již získaných koeficientů. Tímto postupem byla naměřena charakteristika dmyhadla obsahující tři rychlostní křivky, každá s příslušnými konstantními otáčkami. Optimalizací ustavením sond celkových tlaků do jedné neměnné polohy a výpočtem koeficientů došlo k výraznému zrychlení celého měření a jeho zefektivnění.

Naměřená charakteristika modelového dmyhadla odpovídá teoretickým předpokladům uvedeným v rešeršní části práce. Tento fakt svědčí o tom, že měřicí přípravek byl zkonstruován správně a měření bylo úspěšné. Při měření bylo dokonce dosaženo jevu zvaného pumpáž. Naměřené hodnoty vynesené v grafu charakteristiky dmyhadla předkládají čtenáři informace o průběhu veličin stlačení a hmotnostního průtoku při škrcení výstupu klapkou – stlačení vzrůstá se současným poklesem průtoku až do doby, než je dosaženo pumpáže, v tuto chvíli dojde k výraznému poklesu obou těchto veličin.

Vzhledem k docílení požadované modulárnosti a rozebíratelnosti měřícího zařízení jej lze podle požadavků dále vylepšovat nebo upravovat. Např. díky možné zaměnitelnosti vstupního kanálu lze provést experimentální měření a zkoušky pro návrh a vývoj nových vstupních kanálů rozličných tvarů. Jak již bylo uvedeno, zařízení lze dále vylepšovat a vyvíjet, tudíž lze tuto práci využít také jako základní podpůrný materiál pro zasvěcení do dané problematiky a je možné na ní navázat dalšími závěrečnými nebo vědeckými pracemi. V tuto chvíli se již vyrábí nový kanál pro posouzení umístění chladiče UL-39 před dmychadlem. Zároveň by také tato práce, díky svému detailnímu popisu jak teoretické, tak i praktické probírané problematiky, mohla sloužit čtenářům, kteří jsou laiky v tomto oboru, avšak mají zájem proniknout hlouběji do dané látky.

Seznam symbolů

A, B, S [m^2]	plocha
d [m]	průměr potrubí
g [$m \cdot s^{-2}$]	tíhové zrychlení
h, H_{123} [mm]	výška vodního sloupce
H [m]	nadmořská výška
i, j [$-$]	indexy

K [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2} \cdot 10^{-3}$]	konstanta pro přepočítání 1 mm H ₂ O na Pascaly
K_{p_1, c_1, p_2} [$-$]	koeficienty pro přepočítání hmotnostního průtoku
\dot{m} [$kg \cdot s^{-1}$]	hmotnostní průtok
N [min^{-1}]	otáčky
p [Pa]	tlak
r [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	měrná plynová konstanta
t [$^{\circ}C$], T [K]	teplota
V [m^3]	objem
z [$-$]	převodový poměr
δ [$-$], θ [$-$]	koeficienty pro korekci na standardní podmínky
ε [$^{\circ}$]	úhel natočení škrtkové klapky
η [$-$]	účinnost
Π [$-$]	tlakový poměr
ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	hustota

Literatura

- [1] ROLLS-ROYCE. The Jet Engine. 5. ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2015. ISBN 978-1119065999.
- [2] HÜNECKE, Klaus. Jet engines: fundamentals of theory, design, and operation. Osceola, WI, USA: Motorbooks International, 1997. ISBN 0-7603-0459-9.
- [3] ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. Letadlové motory. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.
- [4] KULAGIN, Ivan Ivanovič. Theorie letadlových proudových motorů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954.
- [5] LINHART, Zdeněk a Ján KAMENICKÝ. Konstrukce leteckých motorů: část I. Brno: VA AZ, 1986.
- [6] S. M. YAHYA. Turbines compressors and fans. 2nd ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2003. ISBN 0070420394.
- [7] GIANG, Ken. PLA vs. ABS: What's the difference?. 3D HUBS [online]. ©2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>
- [8] ABS (Acylonitrile Butadiene Styrene) Material. VEXMA Technologies Pvt. Ltd. [online]. ©2018 [cit. 2018-07-30]. Dostupné z: <http://vexmatech.com/abs-material.html>