



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

Návrh proudového motoru pro RC modely

Design of the Jet Engine for RC Models

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Adam BUDÍNSKÝ

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing. Karel Petr, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh proudového motoru pro RC modely“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karlem Petrem, Ph.D. s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 14. 6. 2017

.....
Adam Budínský

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Karlu Petrovi, Ph.D., za ochotu, čas, trpělivost a odborné vedení. Dále pak panu prof. Ing. Jiřímu Nožičkovi CSc. za cenné rady, připomínky, vstřícnost a čas.

Anotační list

Jméno autora:	Adam BUDÍNSKÝ
Název BP:	Návrh proudového motoru pro RC modely
Anglický název:	Design of the Jet Engine for RC Models
Rok:	2017
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Karel Petr, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 47 počet obrázků: 36 počet tabulek: 3 počet příloh: 3
Klíčová slova:	Proudový motor, Odstředivý kompresor, Lopatkový difuzor, Bezlopatkový difuzor
Keywords:	Jet Engine, Centrifugal Compressor, Vaned Diffuser, Vaneless Diffuser
Anotace:	Tato práce je zaměřena na návrh proudového motoru pro RC modely. Na začátku práce je vypracována rešerše a popis principu funkce proudových motorů. Hlavní částí práce je výpočtová, kde je podrobně popsán výpočet kompresoru a difuzoru pro tah motoru o velikosti přibližně 200 N. Dále jsou přibližným výpočtem navržena ložiska proudového motoru. Součástí přílohy je výkres sestavy proudového motoru a výrobní výkresy rotoru a náboje.
Abstract	This thesis is focused on design of the jet engine for RC models. On the beginning of the thesis is retrieval part and description of the principle of jet engine function. The main part of the thesis is focused on a calculation where a centrifugal compressor and diffuser will be designed in order to give a thrust of approximately 200 N. Next step is approximate calculation of bearing capacity. The attachment contains assembly drawing of the jet engine and production drawings of rotor and stator.

Obsah

1. ÚVOD	1
2. PROUDOVÝ MOTOR	2
2.1. HISTORIE LETECTVÍ	2
2.2. VÝVOJ PÍSTOVÝCH MOTORŮ.....	3
2.3. VÝVOJ PROUDOVÝCH MOTORŮ	3
2.4. PRINCIP ČINNOSTI A VZNIKU TAHU.....	5
2.5. KONFIGURACE PROUDOVÝCH MOTORŮ.....	6
2.6. MODULOVÁ KONCEPCE LETADLOVÝCH TURBINOVÝCH MOTORŮ	7
2.7. VÝKONY	9
3. NÁVRH PROUDOVÉHO MOTORU	11
3.1. PŘIBLIŽNÝ TERMODYNAMICKÝ VÝPOČET MOTORU	11
3.2. NÁVRH CENTRIFUGÁLNÍHO KOMPRESOROVÉHO KOLA	17
3.3. VÝPOČET BEZLOPKOVÉHO DIFUZORU Odstředivého kompresoru	25
3.4. VÝPOČET LOPATKOVÉHO DIFUZORU	28
3.5. VÝPOČET VÝSTUPNÍ SOUSTAVY	32
4. LOŽISKA	35
4.1. PŘIBLIŽNÝ VÝPOČET ZATÍŽENÍ LOŽISEK	36
5. KONSTRUKCE	39
5.1. NÁBOJ A ROTOR PROUDOVÉHO MOTORU.....	39
5.2. KOMPRESOR A TURBÍNA PROUDOVÉHO MOTORU.....	40
5.3. PLAMENEC	40
6. ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN	42
POUŽITÁ LITERATURA:	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	45
SEZNAM TABULEK	46
SEZNAM PŘÍLOH	47

1. Úvod

Během posledních let vzrostl zájem o malé proudové motory pro jejich potenciál využití mezi dálkově ovládanými letadly, bezpilotními aplikacemi a kluzáky, zejména kvůli jejich velkému tahu, kterým disponují vůči své velmi malé hmotnosti. Dnes je k dispozici řada malých proudových motorů, s širokou škálou výkonů pohybujících se mezi 200-1500 N tahu.

Tyto motory byly odvozeny z velkých proudových motorů v měřítku. Konstrukce těchto strojů je nevyhnutelně ovlivněna jejich malou velikostí a je nutné se vypořádat s technickými problémy, které jsou srovnatelné s těmi, které charakterizují velké konvenční stroje. Nicméně tradiční konstrukční kritéria nemusí nutně platit u takto malých strojů. Přenos tepla a s ním spojené problémy díky kompaktnosti, mohou mít vliv na konstrukci motoru, a to zejména na konstrukci jádra motoru. V potaz musí být brána také skutečnost, že součásti rotují při velmi vysokých rychlostech ($> 60\,000$ ot/min), tím se vyvážení stává rozhodujícím pro bezpečnost a dlouhodobý provoz. Na rotující součásti je tím kladen velký důraz na přesné opracování. Použitá ložiska musejí mít vysokou tuhost a tlumící vlastnost, která má proto prvořadý význam. Nicméně problémy spojené se spalováním jsou značné, a to zejména pokud jde o stabilizaci hoření. To zahrnuje velmi přesnou konstrukci spalovací komory a sestavení účinné recirkulace uvnitř primární spalovací zóny.

Zadáním bakalářské práce kromě vypracované rešerše a vysvětlení principu funkce proudového motoru je i samotný výpočet tepelného oběhu a návrh studené sekce proudového motoru. Ten obsahuje návrh odstředivého kompresoru, bezlopatkového a lopatkového difuzoru a výstupní soustavy. Přibližným výpočtem bude přiblížen návrh a dimenzování ložisek proudového motoru. Poslední částí je vyhotovení výkresu sestavy, výrobních výkresů rotoru a náboje proudového motoru.

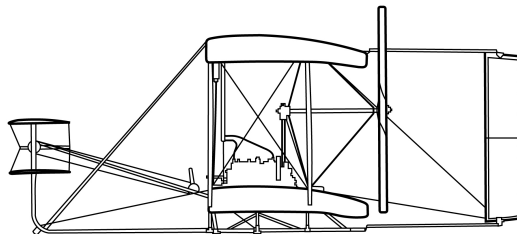
2. Proudový motor

Nástupem proudových motorů došlo doslova k revoluci ve vývoji letadel, která umožnila výrazně zvýšit rychlost letu i jeho dostup. K výrazným změnám v aerodynamické charakteristice a snížení odporu vzduchu došlo tím, že hnací látka – vzduch prochází přímo motorem a neovlivňuje tak obtékání letadla. S koncem 2. světové války se dostalo rychlému nárůstu civilní letecké dopravy zajišťované letadly s proudovými motory. Velmi rychle pak nahradily motory pístové. Požadavky na zvyšování ekonomické efektivity letecké dopravy si vynutily zavedení dvouproudových turbínových motorů a motorů turbovrtulových [1].

Proudové motory našly své uplatnění v široké škále aplikací. Nejvýznamněji ale zasáhlo do letectví, kde díky jejich vysokým výkonům mohou pohánět obrovská letadla a také jsou nákladově efektivní na provoz. Dnes je kladen velký důraz na optimalizování spotřeby paliva a použitelnost těchto motorů při minimalizování hladiny hluku. To přispívá k co nejmenšímu dopadu na životní prostředí. Tepelné a materiálové inženýrství tak hrají důležitou roli při vývoji plynových turbín a zlepšování jejich výkonů. [2]

2.1. Historie letectví

Snaha o létání a překonání zemské tíže je zakořeněná dávno v historii lidské civilizace. Lidé inspirováni letem ptáků se je po staletí snažili napodobit a přiblížit se jim. To se poprvé povedlo až 17. prosince 1903 v USA. Bratři Wilbur a Orville Wrightovi byli první v historii, kdo provedl skutečný řízený motorový let s letadlem Flyer I poháněným spalovacím motorem o výkonu 8,8 kW a hmotností kolem 100 kg (obr. 1) [3].



Obr. 1 Wright Flyer I [7]

2.2. Vývoj pístových motorů

Další prudký vývoj byl rozdělen na dva směry. Na jedné straně vznikaly motory chlazené vzduchem a na druhé motory chlazené kapalinou.

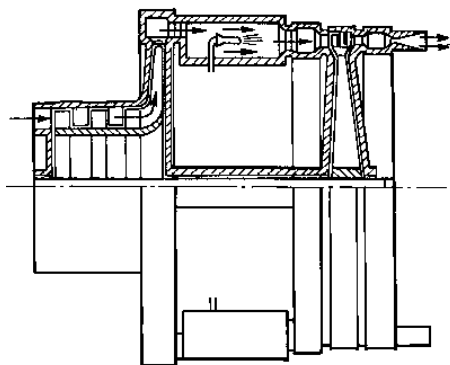
V období před první světovou válkou vzniklo mnoho pístových motorů s různým uspořádáním válců. S jejich rostoucím výkonem se zvětšovala i spolehlivost a hmotnost motoru na jednotku výkonu naopak klesala.

V meziválečném období se výrazně vylepšuje hvězdicový vzduchem chlazený motor s pevnými válci. Motory této koncepce začínají být lehké, výkonné a spolehlivé a přispěly k rychlému rozvoji civilní letecké dopravy. Jako nové prvky se v konstrukci objevují odstředivé kompresory, vhodné zejména pro výškové motory. Zvýšené otáčky motorů bylo potřeba snižovat pomocí reduktorů a své využití také uplatňuje stavitelná vrtule. Výkon motorů v druhé polovině třicátých let překročil 750 kW. Za druhé světové války dosahovaly nejsilnější pístové motory výkonu 2 950 kW [3].

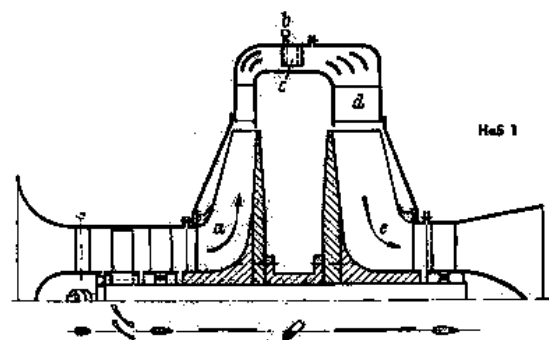
2.3. Vývoj proudových motorů

Letadlové lopátkové motory postupem času nahradili motory pístové a omezily jejich použití na lehká letadla vyžadující menší výkony a lepší hospodárnost. Konstrukce pístových motorů již neumožňovala dosažení požadovaných výkonů. Počátek vývoje proudových motorů, tak jak je známe dnes, začal v období 2. světové války.

Na vývoj proudového motorů pracovali všechny soupeřící mocnosti. V r. 1930 F. Whittle patentoval princip proudového motoru. Patentovaný motor na (obr. 2). K prvním letovým zkouškám došlo až v r. 1941 a k operačnímu nasazení dokonce až v r. 1944. V Německu byl vývoj proudového motoru rychlejší. K prvnímu vzletu letadla s proudovým motorem došlo již v roce 1939. První německý motor profesora von Ohaina (obr. 3).

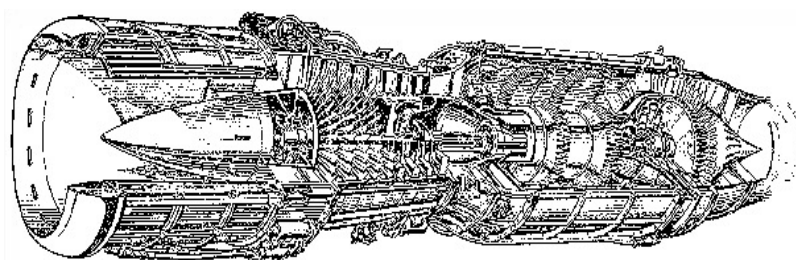


Obr. 2 Patentovaný proudový motor anglický - F. Whittle [8]



Obr. 3 Patentovaný proudový motor německý - profesor von Ohain [9]

V Sovětském Svazu v roce 1941 patentoval princip dvou Proudového motoru konstruktér A. M. Ljulka. Do provozu byl uveden v r. 1947. Motor s označením TR-1 měl axiální kompresor a byl použit v letounu Su-11 (obr. 4).

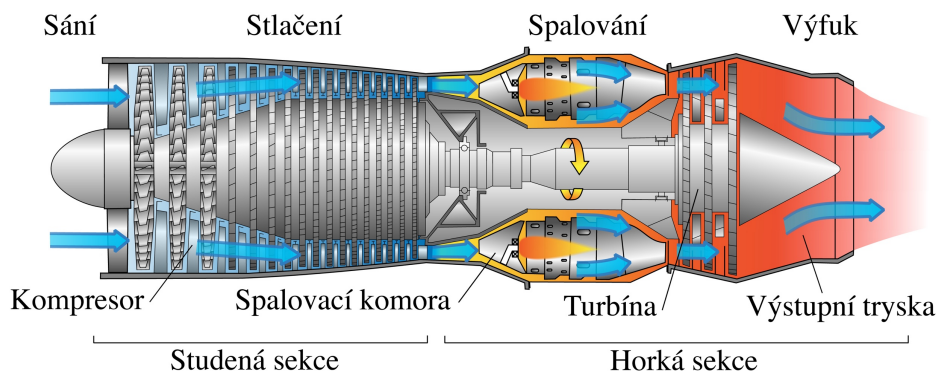


Obr. 4 První ruský proudový motor TR-1 [10]

V USA bylo rozhodnuto o nákupu licence na výrobu proudových motorů od Anglie v r. 1941. Výrobou byla pověřena firma General Electric s bohatými zkušenostmi v oblasti vývoje a výroby turbodmychadel pro pístové motory. Firma Pratt & Whitney začala s výrobou proudových motorů až v r. 1947, kdy začala vyrábět v licenci motor RR Nene pod označením J42 Turbo-Wasp. Od té doby proudový motor prodělal obrovský pokrok ve vývoj až do dnešní podoby [3].

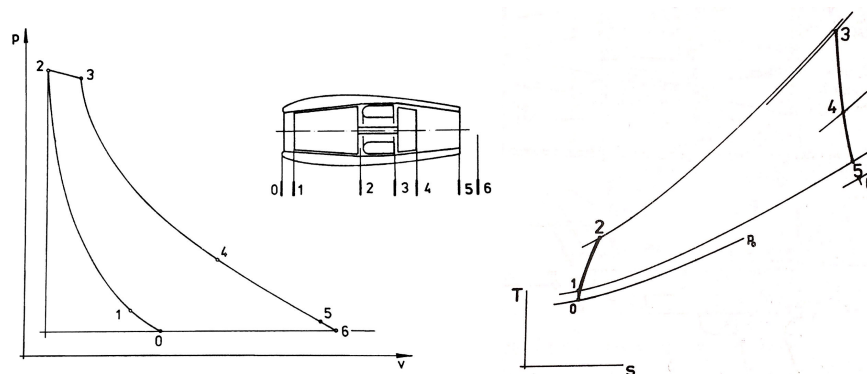
2.4. Princip činnosti a vzniku tahu

Proudový motor pracuje následujícím způsobem. „Kompressor nasává vzduch přes vstupní usměrňovací ústrojí a stlačuje jej. Stlačený vzduch proudí do spalovací komory, kde se do něj vstříkuje palivo. V důsledku hoření paliva za konstantního tlaku roste teplota plynů (spalin), a tím i jejich tepelná energie. Spaliny dále proudí přes rozváděcí lopatky do oběžných lopatek turbíny, kde předávají část své energie turbíně, která slouží k pohonu kompresoru. Za turbínou však plyny mají stále ještě vyšší tlak než okolní atmosféra a jsou dále vedeny do hnací trysky. V hnací trysce se tepelná a tlaková energie mění na kinetickou (pohybovou), která vyvozuje tah motoru“ [3].



Obr. 5 Řez proudovým motorem s axiálním kompresorem (přeloženo) [11]

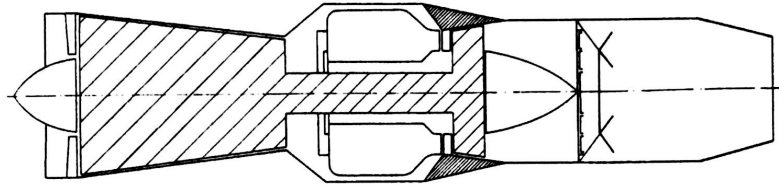
Abychom mohli popsat princip činnosti proudového motoru také matematicky, zakreslují se jednotlivé stavy plynu do tepelných diagramů. Proudový motor je tepelný stroj s otevřeným pracovním cyklem a změnu stavu plynu ve vhodně volených řezech znázorňujeme Braytonovým cyklem v $p-v$ a $T-s$ diagramu (obr. 6).



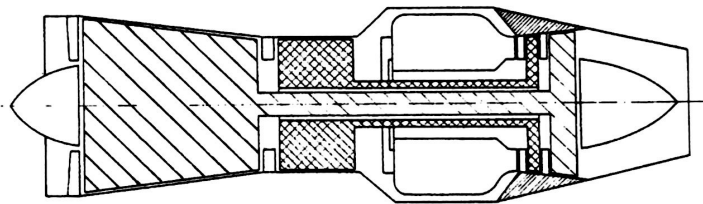
Obr. 6 $p-v$ a $T-s$ diagram oběhu motoru: 0-stav vzduchu okolní atmosféry, 1-stav vzduchu před kompresorem, 2-stav vzduchu za kompresorem, 3-stav plynu před turbínu, 4-stav plynu za turbínou, 5-stav plynu v hnací trysce, 6-stav okolní atmosféry [3]

2.5. Konfigurace proudových motorů

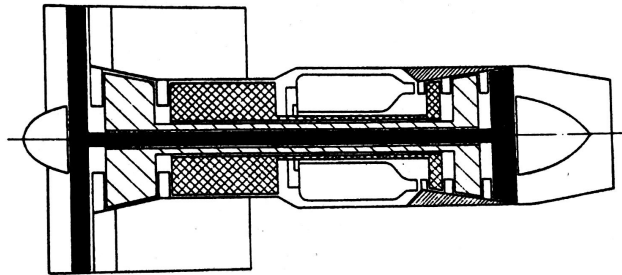
Základním parametrem pro rozdělení proudových motorů je počet rotorů (hřídelů). Dělíme motory na jednohřídelové, dvouhřídelové, a tříhřídelové (obr. 7-9).



Obr. 7 Jednohřídelový proudový motor s přídavným spalováním [3]



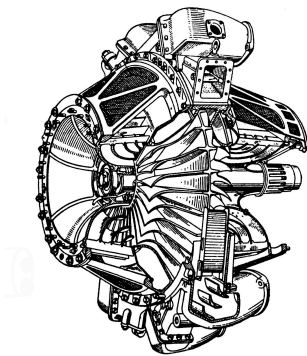
Obr. 8 Dvouhřídelový proudový motor [3]



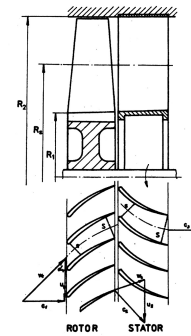
Obr. 9 Tříhřídelový dvouproudový motor [3]

U dvouproudových motorů rozeznáváme motory s částečným nebo úplným obtokem. Podle typu kompresoru se pak mohou dělit na motory s osovým (axiálním), odstředivým (radiálním) nebo kombinovaným kompresorem. Turbíny se výhradně vždy používají jako axiální. Výtoková tryska proudového motoru může být pevná nebo regulovatelná, anebo může být vybavena obracečem tahu a přídavným spalováním [3].

Kompresory se používají hlavně v axiálním provedení, a to díky větší hltnosti než u radiálních, při stejné čelní ploše kompresoru. Radiální provedení našlo dnes své uplatnění u motorů s nižším výkonem a tahem a jsou vhodné také pro pomocné palubní jednotky (obr. 10). Axiální kompresory jsou tvořeny řadou rotujících lopatek (rotorem) a řadou statorových lopatek (státorem) (obr. 11).



Obr. 10 Radiální kompresor s oboustranným kole [3]

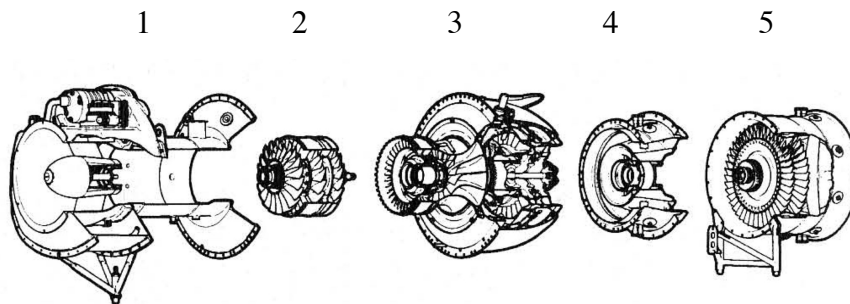


Obr. 11 Stupeň axiálního kompresoru [3]

2.6. Modulová koncepce letadlových turbinových motorů

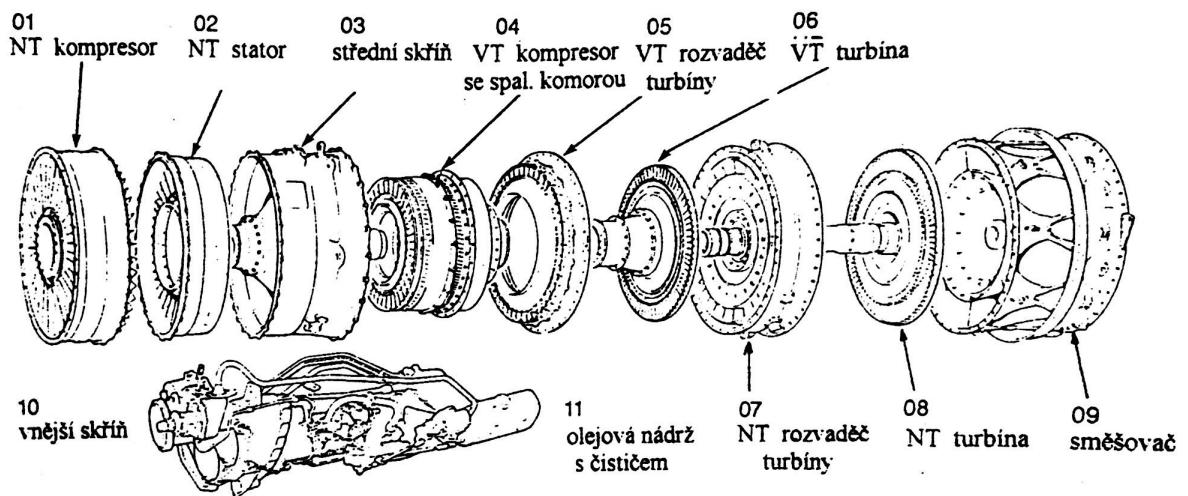
Rozhodujícím hlediskem letecké dopravy jsou provozní náklady na palivo, údržbu draku i motorů. Proto musí být dnešní motory konstruovány tak, aby měly co nejnižší měrnou spotřebu paliva a umožňovaly nám snadnou udržitelnost.

Tyto požadavky splňuje například modulová konstrukce (obr. 12). Ta umožňuje výměnu jednotlivých modulů (částí) motoru, na kterých dojde k poškození nebo vyčerpání provozní doby. Poškozený modul se nahradí novým a motor je ihned schopen provozu. Vyjmutý modul je po opravě možné použít jako záložní díl. U jednotlivých modulů musí být zajištěna přesná fyzická návaznost dodržováním připojovacích rozměrů z hlediska mechanického i funkčního, přičemž mají vedle rozměrových a hmotových vlastností dále specifikovány všechny další parametry a pracovní charakteristiky. To umožňuje vyrábět jednotlivé moduly motoru různými výrobci mezinárodního konsorcia vytvořeného pro vývoj a výrobu daného typu motoru [1] [3].



Obr. 12 Modulová konstrukce malého motoru: 1-modul vstupního ústrojí, 2-modul nízkotlakého kompresoru, 3-modul vysokotlakého kompresoru, 4-modul plamence, 5-modul turbíny [3]

Díky modulové koncepci tak dokážeme významně zlepšit provozní hospodárnost motoru, neboť i v případě poruchy motoru může být v mnoha případech oprava motoru prováděna přímo na letadle výměnou příslušných modulů, na kterých se vyskytla závada. Na následujícím obrázku je uvedeno schéma modulové konstrukce dvouhřídelového motoru Rolls & Royce - Turboméca Adour/F405 (obr. 13) [1].



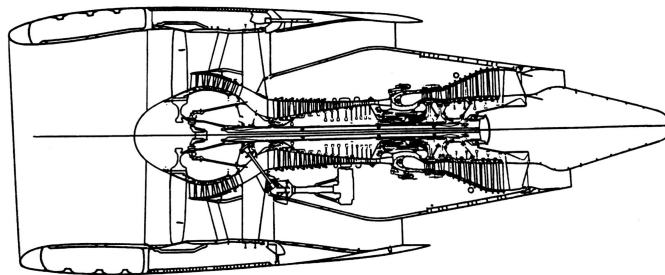
Obr. 13 Modulová konstrukce motoru ADOUR / F405 [1]

2.7. Výkony

V dnešní době rozeznáváme velkou řadu různorodých proudových motorů. Jejich výkony se pohybují v rozmezí od 245 N až do 450 kN tahu, u turbovrtulových od 11 kW do 11 MW.

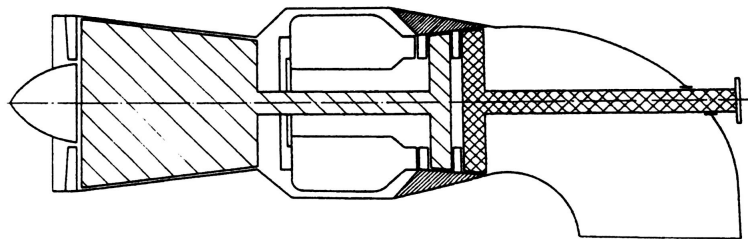
Jednoproudové motory známe v nejrůznějších podobách už od dob 2. světové války. Původně byly v provedení s oboustranně radiálním kompresorem a neregulovatelnou tryskou. Stále vzrůstající nároky na výkony motorů však přinutily konstruktéry k použití axiálních kompresorů, díky své větší hltnosti než u kompresorů radiálních. I přesto, že ve svém počátku měly axiální kompresory menší účinnost, intenzivní výzkum v oblasti proudění v kanále axiálního kompresoru napomohl k vypracování spolehlivé teorie a metody výpočtu dostatečné k navržení kompresorů o vysokém stlačení a vynikající účinnosti. Pro velmi vysoké rychlosti se pak používá tzv. přídavného spalování. To spočívá ve vstřikování paliva za turbínu do vhodně upravené výstupní trysky. Tah motoru se tím zvýší o 40 – 60%, ale měrná spotřeba vzroste o 100% i více. Moderní motory pak dosahují tahu 80 – 120 kN tahu bez přídavného spalování. [3]

Dvouproudové motory se uplatnili zejména pro velká dopravní a nákladová letadla (obr. 14). Dosahují tahu až 450 kN, jejich průměr je přes 2 800 mm a hmotnost kolem 7 500 kg. Jejich předností je nízká měrná spotřeba paliva, nízká hladina hluku a škodlivých emisí. Obtokové poměry se nacházejí v širokém rozmezí od 0,4 do 8. Dvouproudové motory jsou rozšířené také v oblasti služebních letadel, kde dosahují tahu od 10 do 20 kN.



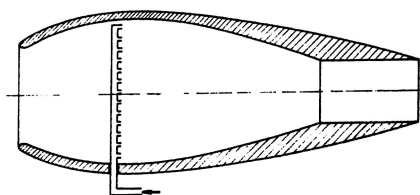
Obr. 14 Dvouproudový motor [3]

Turovrtulové a turbohrđdelové motory jsou využívány k pohonu vrtulí nebo nosných rotorů. V obou aplikacích musejí být opatřeny reduktory pro snížení otáček na požadovanou hodnotu. Turbohrđdelové motory jsou nedílnou součástí prakticky všech dnes vyráběných vrtulníků (obr. 15).



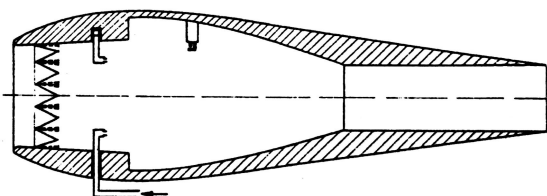
Obr. 15 Turbohrđidelový motor [3]

Náporové motory jsou prakticky nejjednodušším typem proudových motorů (obr. 16). „Jeho základem je zužující se trubice na obou koncích otevřená, do níž se vstřikuje palivo. Vzduch vstupuje určitou rychlostí (rychlostí letu) do difuzoru, kde dojde ke snížení rychlosti (tím ke vzrůstu tlaku) a při jeho průchodu spalovací komorou se vstřikuje palivo. Shořením paliva se uvolní potřebné množství tepelné energie, vzroste prudce teplota spalin, které potom unikají zužující se výstupní tryskou.“ [3] Z toho vyplývá že náporový motor nemůže pracovat za klidu. Proto se samostatný prakticky nepoužívá, až na výjimky ve spolupráci s proudovým motorem.



Obr. 16 Náporový motor [3]

Pulsační je ve své podstatě náporový motor, který je opatřený ventily za vstupním difuzorem (obr. 17). „Při otevření ventilů vstupuje vzduch dovnitř. Shořením paliva ve spalovací komoře dojde ke zvýšení tlaku, který ventily uzavře a spaliny proudí výtokovou tryskou do atmosféry. Tím dojde k poklesu tlaku ve spalovací komoře a ventily se vzniklým podtlakem otevřou a vzduch opět vstupuje do motoru.“ [3] Pulsační motor na rozdíl od motoru náporového může pracovat i za klidu po nastartování pomocí stlačeného vzduchu.



Obr. 17 Náporový motor pulsační [3]

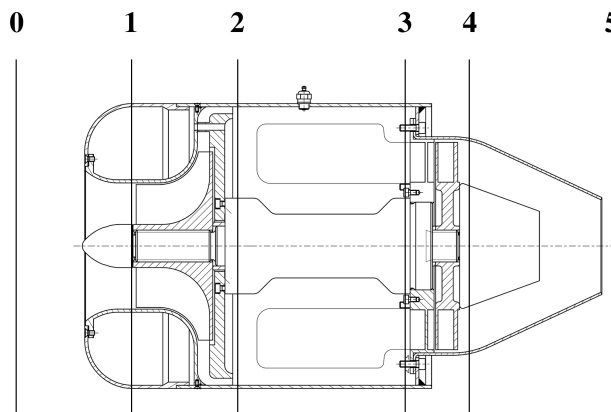
3. Návrh proudového motoru

Při návrhu tepelného oběhu proudového motoru je voleno několik základních parametrů. Volba však musí vždy respektovat výrobní možnosti. Mezi volené parametry patří právě teplota T_3 před turbínou a stlačení kompresoru π_{kc} . Teplota T_3 je nejdůležitějším parametrem při návrhu proudového motoru a je omezena mechanickými vlastnostmi žárupevných materiálů lopatek turbíny. Současné monokrystalické chlazené lopatky turbín posouvají hranici použitelnosti o krok dál. Maximální operační teplota se pohybuje v rozmezí 1 300 až 1 600 K. Vliv stlačení kompresoru je závislý na teplotě T_3 a při jejich volbě musí být zohledněna výsledná měrná spotřeba paliva, jakožto rozhodující parametr dnešní doby. [3]

3.1. Přibližný termodynamický výpočet motoru

Cílem přibližného výpočtu tepelného oběhu je stanovení základních parametrů proudu vzduchu a plynu v jednotlivých typických řezech a výpočet hlavních parametrů, specifického tahu F_m , tahu F_T a specifické spotřeby paliva c_m . Výpočet je realizovaný pro činnost v maximálním režimu, na zemi, při nulové rychlosti $M = 0$ a nulové výšce $H = 0$ m.

Výpočet a volené součinitele vychází z výpočtového cvičení z teorie leteckých motorů [4].



Obr. 18 Volené řezy proudového motoru pro výpočet: 0-stav vzduchu okolní atmosféry, 1-stav vzduchu před kompresorem, 2-stav vzduchu za kompresorem, 3-stav plynu před turbínou, 4-stav plynu za turbínou, 5-stav plynu ve výstupní trysce

1. Parametry vzduchu pro výšku $H=0$ m; a Machovo číslo $M=0$ (řez-0)

$$p_0 = 101\,325,2 \text{ Pa}$$

$$T_0 = 288,15 \text{ K}$$

- Uvedené hodnoty jsou zjištěné pro $H = 0$ m z tabulek mezinárodní standardní atmosféry.

2. Parametry vzduchu před vstupním ústrojím motoru (řez-0)

$$p_{0c} = p_0 \cdot \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot M_0^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad [Pa] \quad (1)$$

Kde:

$$\kappa = 1,4$$

$$M_0 = 0$$

$$p_{0c} = 101\,325,2 \cdot \left(1 + \frac{1,4-1}{2} \cdot 0\right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 101\,325,2 \text{ Pa}$$

$$T_{0c} = T_0 \cdot \left(1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot M_0^2\right) \quad [K] \quad (2)$$

$$T_{0c} = 288,15 \cdot \left(1 + \frac{1,4-1}{2} \cdot 0\right) = 288,15 \text{ K}$$

3. Parametry vzduchu před radiálním kompresorem motoru (řez-1)

$$p_{1c} = \sigma_{rv} \cdot \sigma_D \cdot p_{0c} \quad [Pa] \quad (3)$$

Kde:

$$\sigma_{rv} = 1$$

$$\sigma_D = 0,943$$

$$p_{1c} = 1 \cdot 0,943 \cdot 101\,325 = 95\,549,66 \text{ Pa}$$

$$T_{1c} = T_0 + \frac{c_0^2}{2 \cdot c_{p,v}} \quad [K] \quad (4)$$

Kde:

$$c_{p,v} = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$T_{1c} = 288,15 + \frac{0^2}{2 \cdot 1005} = 288,15 \text{ K}$$

4. Parametry vzduchu za radiálním kompresorem motoru (řez-2)

$$p_{2c} = p_{1c} \cdot \pi_{Kc} \quad [Pa] \quad (5)$$

Kde:

$$\pi_{Kc} = 3$$

$$p_{2c} = 95\,549,66 \cdot 3 = 286\,648,99 \text{ Pa}$$

$$T_{2c} = T_{1c} \cdot \left[1 + \frac{\frac{\kappa-1}{\pi_{Kc}^{\kappa}} - 1}{\eta_{Kc}} \right] [K] \quad (6)$$

Kde:

$$\eta_{Kc} = 0,8$$

$$\pi_{Kc} = 3$$

$$T_{2c} = 288,15 \cdot \left[1 + \frac{3 \frac{1,4-1}{1,4} - 1}{0,8} \right] = 420,96 K$$

5. Parametry plynu za spalovací komorou motoru (řez-3)

$$T_{3c} = t_{3c} + 273,15 [K] \quad (7)$$

Kde:

$$t_{3c} = 720 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{3c} = t_{3c} + 273,15 = 720 + 273,15 = 993,15 K$$

$$p_{3c} = \sigma_{HSK} \cdot p_{2c} [Pa] \quad (8)$$

Kde:

$$\sigma_{HSK} = 0,93$$

$$p_{3c} = 0,93 \cdot 286\,648,99 = 266\,583,56 [Pa]$$

6. Parametry plynu za turbínou motoru (řez-4)

$$T_{4c} = T_{3c} - \frac{c_{p,v}}{c_{p,pl} \cdot \eta_m} \cdot (T_{2c} - T_{1c}) \cdot \frac{Q_v}{Q_{pl}} [K] \quad (9)$$

Kde:

$$Q_v = Q_{pl} [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$c_{p,pl} = 1158 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\eta_m = 0,96$$

$$T_{4c} = 993,15 - \frac{1005}{1158 \cdot 0,96} \cdot (420,96 - 288,15) \cdot \frac{0,5}{0,5} = 873,08 K$$

$$p_{4c} = p_{3c} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{T_{4c}}{T_{3c}} \right) \cdot \frac{1}{\eta_{Tc}} \right]^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}} [K] \quad (10)$$

Kde:

$$\eta_{Tc} = 0,874$$

$$p_{4c} = 266\,583,56 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{873,08}{993,15} \right) \cdot \frac{1}{0,874} \right]^{\frac{1,33}{1,33-1}} = 146\,299,95 \text{ Pa}$$

$$p_{4c}' = \sigma_{PT} \cdot p_{4c} \text{ [Pa]} \quad (11)$$

Kde:

$$\sigma_{PT} = 0,935$$

$$p_{4c}' = 0,935 \cdot 146\,299,95 = 136\,790,46 \text{ Pa}$$

7. Kritický tlakový spád ve vstupní trysce (řez-5)

$$\left(\frac{p_5}{p_{4c}} \right)_{KRIT} = \left[1 - \frac{\kappa'-1}{\kappa'+1} \cdot \frac{1}{\phi_{VD}^2} \right]^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}} \quad [1] \quad (12)$$

Kde:

$$\eta_{VD} = \phi_{VD}^2 = 0,97$$

$$\kappa' = 1,33$$

$$\left(\frac{p_5}{p_{4c}} \right)_{KRIT} = \left[1 - \frac{1,33-1}{1,33+1} \cdot \frac{1}{0,97} \right]^{\frac{1,33}{1,33-1}} = 0,529$$

8. Skutečný tlakový spád na výstupní trysce

$$\left(\frac{p_0}{p_{4c}} \right) = \frac{101\,325,2}{146\,299,95} = 0,693$$

9. Porovnání tlakového spádu s kritickým tlakovým spádem

$$0,529 < 0,693$$

$$\left(\frac{p_5}{p_{4c}} \right)_{KRIT} < \left(\frac{p_0}{p_{4c}} \right) \quad (13)$$

- Podkritický tlakový spád

10. Parametry plynu na výstupu z výstupní trysky motoru (řez-5)

$$c_5 = \phi_{VD} \cdot \sqrt{2 \cdot c_{p,p} \cdot T_{4c} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_{4c}} \right)^{\frac{\kappa'-1}{\kappa'}} \right]} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (14)$$

Kde:

$$\phi_{VD} = 0,985$$

$$c_5 = 0,985 \cdot \sqrt{2 \cdot 1158 \cdot 873,08 \cdot \left[1 - \left(\frac{101\,325,2}{146\,299,95} \right)^{\frac{1,33-1}{1,33}} \right]} = 413,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Předpoklad:

$$T_{5c} = T_{4c} = 873,08 \text{ K}$$

$$T_5 = \frac{2}{\kappa'+1} \cdot T_{4c} \text{ [K]} \quad (15)$$

$$T_5 = \frac{2}{1,33+1} \cdot 873,08 = 749,43 \text{ K}$$

Předpoklad:

$$p_5 = p_0 = 101\,325,2 \text{ Pa}$$

11. Průřez výstupní trysky motoru (řez-5)

$$A_5 = \frac{Q_{pl}}{\rho_5 \cdot c_5 \cdot \eta_{VD}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (16)$$

$$A_5 = \frac{\pi \cdot D_5^2}{4} \text{ [m}^2\text{]} \quad (17)$$

$$\rho_5 = \frac{p_5}{R \cdot T_5} \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]} \quad (18)$$

Kde:

$$\eta_{VD} = 0,97$$

$$R = 287,4 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

$$\rho_5 = \frac{101\,325,2}{287,4 \cdot 749,43} = 0,47044 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$D_5 = \sqrt{4 \cdot \frac{Q_{pl}}{\rho_5 \cdot c_5 \cdot \eta_{VD}} \cdot \frac{1}{\pi}} \text{ [m]} \quad (19)$$

$$D_5 = \sqrt{4 \cdot \frac{0,5}{0,47044 \cdot 413,4 \cdot 0,97} \cdot \frac{1}{\pi}} = 0,058 \text{ m}$$

12. Specifický tah motoru

$$F_m = c_5 - c_0 \text{ [N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}\text{]} \quad (20)$$

$$F_m = 413,4 - 0 = 413,4 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$$

13. Tah motoru

$$F_T = Q_{pl} \cdot F_m \quad [N] \quad (21)$$

$$F_T = 0,5 \cdot 413,4 = 206,7 \text{ N}$$

14. Specifická spotřeba paliva při maximálním režimu při H=0 m; M=0

$$c_m = \frac{3600}{F_m} \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \quad [kg \cdot N^{-1} \cdot h^{-1}] \quad (22)$$

$$c_m = \frac{3600}{413,4} \cdot 0,017 = 0,148 \text{ kg} \cdot N^{-1} \cdot h^{-1}$$

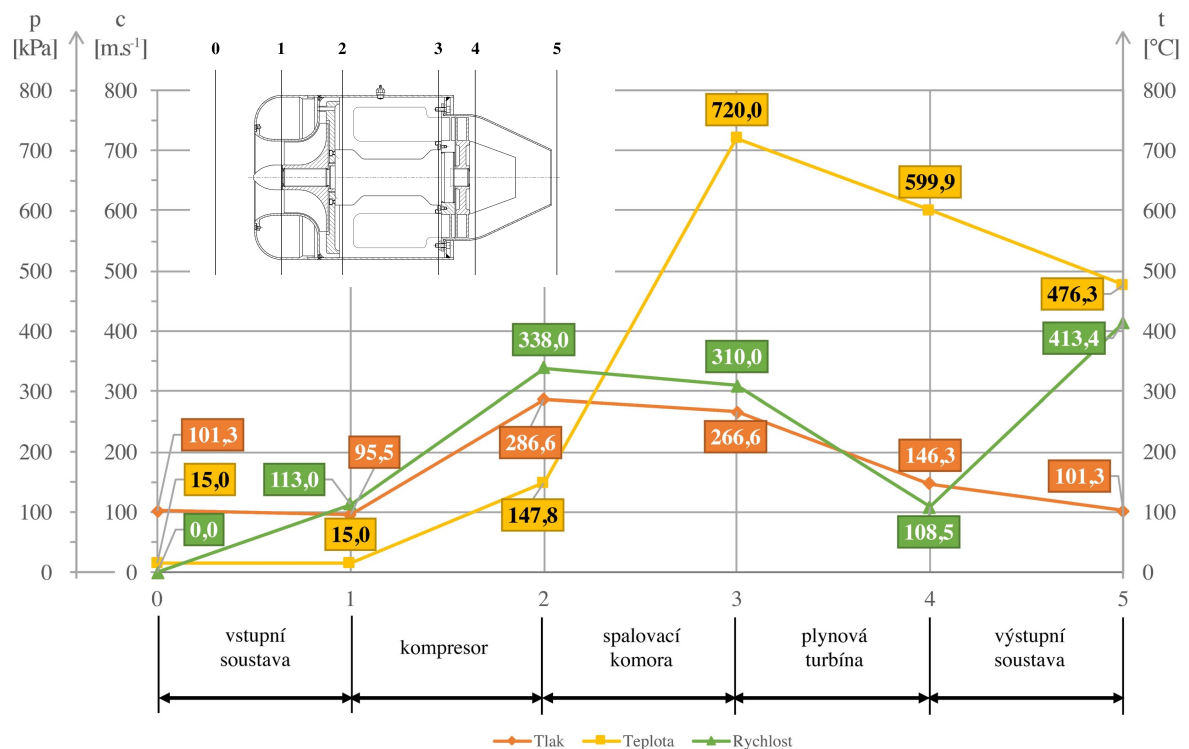
Kde:

$$\frac{1}{\alpha \cdot l_0} = f(T_{2c}, t_{3c}) \quad [1]$$

$$\frac{1}{\alpha \cdot l_0} = 0,017 \quad (23)$$

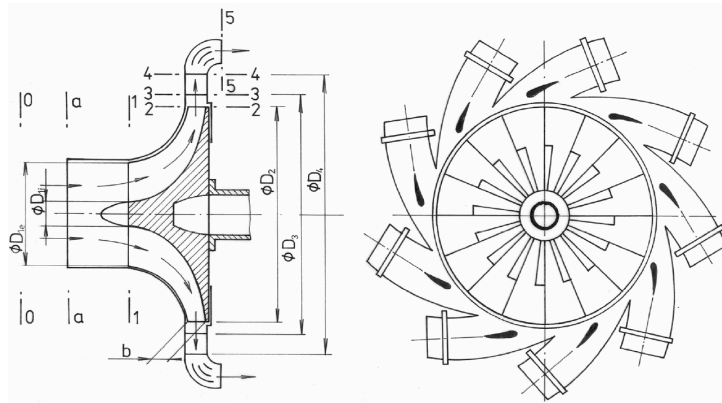
15. Závěr

Z přibližného termodynamického výpočtu motoru byla zjištěná hodnota tahu motoru při maximálním režimu ($F_T = 206,7 \text{ N}$) a specifická spotřeba paliva ($c_m = 0,148 \text{ kg} \cdot N^{-1} \cdot h^{-1}$)



Obr. 19 Průběh změny parametrů vzduchu a plynu při průchodu proudovým motorem

3.2. Návrh centrifugálního kompresorového kola



Obr. 20 Principiální schéma odstředivého (radiálního) kompresoru [4]

1. Vstupní parametry

Výška letu $H = 0$ m

Rychlost letu $c_0 = 0$ m/s

Průtokové množství vzduchu $Q_v = 0,5$ kg/s

Celkový stupeň stlačení $\pi_{Kc} = 3$

Celková účinnost kompresoru $\eta_{Kc} = 0,8$

- Řezy označené v dalším výpočtu dle (obr. 20)

2. Celkový tlak p_{1c} a celková teplota T_{1c} na vstupu do oběžného kola (řez-1)

Předpoklad: Na vstupu do oběžného kola nepřivádíme ani neodvádíme teplo $\Delta Q_0 = 0$

Z předběžného termodynamického výpočtu:

$$p_{1c} = 95\,549,66 \text{ Pa}$$

$$T_{1c} = T_{0c} = 288,15 \text{ K}$$

3. Výpočet adiabatické práce kompresoru

$$W_{ad,c} = c_p \cdot T_{1c} \cdot \left(\pi_{Kc}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) [J \cdot kg^{-1}] \quad (24)$$

$$W_{ad,c} = 1005 \cdot 288,15 \cdot \left(3^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = 106\,783,14 \text{ J} \cdot kg^{-1}$$

4. Výpočet obvodové rychlosti na výstupu z oběžného kola (řez-2)

Předpoklad:

1. Vzduch vstupuje do kompresoru bez rozvíření $c_{1u} = 0$, tedy platí $c_{1a} = c_1$.

2. Volba součinitele skluzu μ , který má hodnotu $\mu = 0,86$ až $0,92$. Volba součinitele třecí práce disku α , který má u odstředivých (radiálních) kompresorů hodnotu $\alpha = 0,03$ až $0,05$. Součinitel skluzu μ je poměr obvodových složek absolutní rychlosti proudu vzduchu pro skutečné oběžné kolo a oběžné koleso s nekonečným počtem lopatek. Pro oběžné koleso s radiálními lopatkami platí $c_{2u,\infty} = u_2$. Součinitel α definuje ztráty v koncové části oběžného kola $\alpha = \alpha_0$.

3. Přibližné stanovení obvodové rychlosti na vnějším průměru oběžného kola odstředivého (radiálního) kompresoru.

$$u_2 = \sqrt{\frac{W_{ad,c}}{\eta_{Kc} \cdot (\mu + \alpha)}} [m \cdot s^{-1}] \quad (25)$$

$$u_2 = \sqrt{\frac{106\,783,14}{0,8 \cdot (0,9 + 0,04)}} = 376,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

5. Stanovení absolutní rychlosti na vstupu do oběžného kola

Volba poměru $c_{2r}/u_2 = 0,25 - 0,35$ [1]. Za předpokladu že $c_{2r} = c_{1a}$, bude určená rychlost c_1 .

$$\frac{c_{2r}}{u_2} = 0,3 \quad (26)$$

$$c_{2r} = 0,28 \cdot u_2 [m \cdot s^{-1}]$$

6. Parametry na vstupu do oběžného kola na středním průměru (řez-1)

Předpoklad:

$$c_1 = c_{1s} [m \cdot s^{-1}]$$

$$T_1 = T_{1c} - \frac{c_{1s}^2}{2 \cdot c_p} [K] \quad (27)$$

$$T_1 = 288,15 - \frac{113,05^2}{2 \cdot 1005} = 281,8 \text{ K}$$

$$p_1 = p_{1c} \cdot \left(\frac{T_1}{T_{1c}} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} [Pa] \quad (28)$$

$$p_1 = 95\,549,66 \cdot \left(\frac{281,8}{288,15} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 88\,371,75 \text{ Pa}$$

$$Q_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (29)$$

$$Q_1 = \frac{88\,371,75}{287,4 \cdot 281,8} = 1,091 [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

7. Výpočet vnějšího průměru na vstupu do oběžného kola (řez-1)

$$D_{1e} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot c_{1as} \cdot Q_1 \cdot (1-v^2)}} [m] \quad (30)$$

$$D_{1e} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,5}{3 \cdot 113,05 \cdot 1,091 \cdot 0,35}} = 0,077 \text{ m}$$

$$v = \frac{D_{1i}}{D_{1e}} = 0,35 [1] \quad (31)$$

$$D_{1i} = 0,35 \cdot D_{1e} = 0,35 \cdot 0,077 = 0,027 \text{ m}$$

8. Stanovení středního průměru na vstupu do oběžného kola (řez-1)

$$D_{1s} = D_{1e} \cdot \sqrt{\frac{1+v^2}{2}} [m] \quad (32)$$

$$D_{1s} = 0,077 \cdot \sqrt{\frac{1+0,35^2}{2}} = 0,057 \text{ m}$$

9. Stanovení vnějšího průměru oběžného kola (řez-2)

Poměr $D_{1e}/D_2 = 0,45-0,65$. V uvedeném rozsahu se volí poměr průměrů

$$\frac{D_{1e}}{D_2} = 0,65 \quad (33)$$

$$D_2 = \frac{D_{1e}}{0,65} = \frac{0,077}{0,65} = 0,118 \text{ m}$$

10. Výpočet otáček odstředivého kompresoru

$$n = \frac{60 \cdot u_2}{\pi \cdot D_2} [\text{min}^{-1}] \quad (34)$$

$$n = \frac{60 \cdot 376,83}{\pi \cdot 0,118} = 60998,8 \text{ min}^{-1}$$

11. Výpočet vstupní obvodové rychlosti oběžného kola (řez-1)

$$u_{li} = \frac{\pi \cdot D_{li} \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,027 \cdot 60998,8}{60} = 85,73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (35)$$

$$u_{ls} = \frac{\pi \cdot D_{ls} \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,057 \cdot 60998,8}{60} = 183,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (36)$$

$$u_{le} = \frac{\pi \cdot D_{le} \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,077 \cdot 60998,8}{60} = 244,94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (37)$$

12. Výpočet vstupní relativní rychlosti oběžného kola (řez-1)

$$w_{li} = \sqrt{u_{li}^2 + c_{lai}^2} = \sqrt{85,73^2 + 113^2} = 141,88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (38)$$

$$w_{ls} = \sqrt{u_{ls}^2 + c_{las}^2} = \sqrt{183,5^2 + 113^2} = 215,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (39)$$

$$w_{le} = \sqrt{u_{le}^2 + c_{lae}^2} = \sqrt{244,9^2 + 113^2} = 269,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (40)$$

$$c_{lai} = c_{las} = c_{lae} = c_{la} = c_l \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}\text{]}$$

$$c_{lr} \cdot r = \textit{konst.}$$

13. Statická teplota na vstupu do oběžného kola (řez-1)

$$T_{li} = T_{0c} - \frac{c_{li}^2}{2 \cdot c_p} \text{ [K]} \quad (41)$$

Kde:

$$c_{li} = \sqrt{w_{li}^2 - u_{li}^2} = \sqrt{141,9^2 - 85,7^2} = 113 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (42)$$

$$c_{ls} = \sqrt{w_{ls}^2 - u_{ls}^2} = \sqrt{215,5^2 - 183,5^2} = 113 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (43)$$

$$c_{le} = \sqrt{w_{le}^2 - u_{le}^2} = \sqrt{269,8^2 - 244,9^2} = 113 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (44)$$

$$T_{li} = T_{0c} - \frac{c_{li}^2}{2 \cdot c_p} = 288,15 - \frac{113^2}{2 \cdot 1005} = 281,8 \text{ K} \quad (45)$$

$$T_{ls} = T_{0c} - \frac{c_{ls}^2}{2 \cdot c_p} = 288,15 - \frac{113^2}{2 \cdot 1005} = 281,8 \text{ K} \quad (46)$$

$$T_{le} = T_{0c} - \frac{c_{le}^2}{2 \cdot c_p} = 288,15 - \frac{113^2}{2 \cdot 1005} = 281,8 \text{ K} \quad (47)$$

14. Machovo číslo relativního proudu vzduchu na vstupu do oběžného kola (řez-1)

$$M_{wli} = \frac{w_{li}}{20,05 \cdot \sqrt{T_{li}}} = \frac{141,88}{20,05 \cdot \sqrt{281,8}} = 0,4 \quad (48)$$

$$M_{wls} = \frac{w_{ls}}{20,05 \cdot \sqrt{T_{ls}}} = \frac{215,5}{20,05 \cdot \sqrt{281,8}} = 0,6 \quad (49)$$

$$M_{wle} = \frac{w_{le}}{20,05 \cdot \sqrt{T_{le}}} = \frac{269,8}{20,05 \cdot \sqrt{281,8}} = 0,8 \quad (50)$$

15. Určení úhlu alfa1 (řez-1)

$$\operatorname{tg} \alpha_{li} = \frac{c_{lai}}{u_{li} - c_{lui}} = \frac{113}{85,73} \Rightarrow \alpha_{li} = 52,8^\circ \quad (51)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{ls} = \frac{c_{las}}{u_{ls} - c_{lus}} = \frac{113}{183,5} \Rightarrow \alpha_{ls} = 31,6^\circ \quad (52)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{le} = \frac{c_{lae}}{u_{le} - c_{lue}} = \frac{113}{244,9} \Rightarrow \alpha_{le} = 24,8^\circ \quad (53)$$

16. Volba počtu lopatek z_k oběžného kola

$$z_k = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin\left(\frac{\phi_{1s} + \phi_2}{2}\right)}{k \cdot \ln \frac{D_2}{D_{1e}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \sin\left(\frac{31,6^\circ + 90^\circ}{2}\right)}{0,85 \cdot \ln \frac{0,118}{0,077}} = 14,98 \Rightarrow 15 \text{ lopatek} \quad (54)$$

Kde:

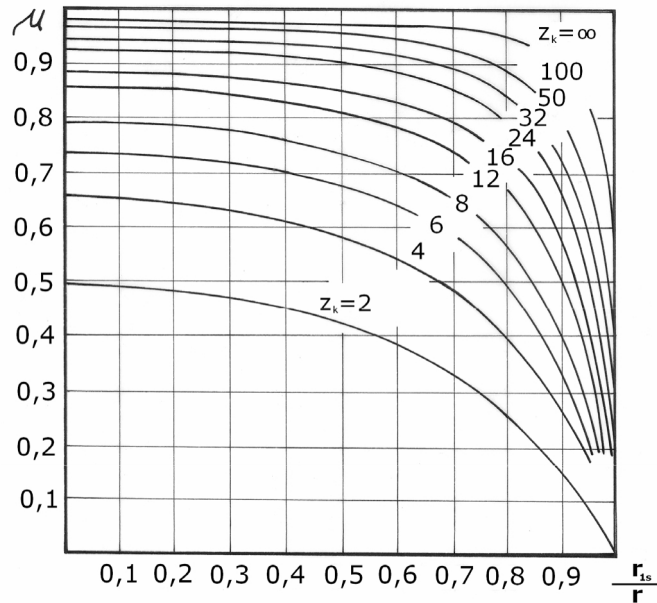
$$\phi_{1s} = \alpha_{1s}$$

$$\phi_2 = 90^\circ$$

$$k = 0,85$$

17. Kontrola voleného součinitele skluzu

$$\mu = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot z_k} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{D_{1s}}{D_2}\right)^2}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot 15} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{0,057}{0,118}\right)^2}} = 0,845 \quad (55)$$



Obr. 21 Závislost součinitele skluzu na poměru poloměrů pro zadaný počet lopatek [4]

18. Celková teplota vzduchu za oběžným kolem (řez-2)

$$T_{2c} = T_{1c} + \frac{1}{c_p} \cdot [u_2^2 \cdot (\mu + \alpha) - u_{1s} \cdot c_{1as}] \text{ [K]} \quad (56)$$

$$T_{2c} = 288,15 + \frac{1}{1005} \cdot [376,83^2 \cdot (0,9 + 0,04) - 183,5 \cdot 113] = 420,96 \text{ K}$$

19. Absolutní rychlost na výstupu z oběžného kola (řez-2)

$$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2r}^2} = \sqrt{318,5^2 + 113^2} = 338 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad (57)$$

Kde:

$$c_{2r} = c_{1a} \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$$

$$c_{2u} = \mu \cdot u_2$$

$$c_{2u} = 0,85 \cdot 376,8 = 318,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

20. Statická teplota na výstupu z oběžného kola (řez-2)

$$T_2 = T_{2c} - \frac{c_2^2}{2 \cdot c_p} = 420,96 - \frac{338^2}{2 \cdot 1005} = 364,13 \text{ K} \quad (58)$$

21. Machovo číslo na výstupu z oběžného kola (řez-2)

$$M_{c2} = \frac{c_2}{20,05 \cdot \sqrt{T_2}} = \frac{338}{20,05 \cdot \sqrt{364,13}} = 0,88 \quad (59)$$

22. Určení celkových ztrát při průtoku vzduchu oběžným kolem

$$W_{r1} = \zeta_1 \cdot \frac{w_{1s}^2}{2} = 0,25 \cdot \frac{215,5^2}{2} = 5806,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (60)$$

$$W_{r2} = \zeta_2 \cdot \frac{c_{1a}^2}{2} = 0,15 \cdot \frac{113^2}{2} = 958,5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (61)$$

$$W_{r3} = \alpha \cdot u_2^2 = 0,04 \cdot 376,8^2 = 5680 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (62)$$

Kde:

$$\zeta_1 = 0,25$$

$$\zeta_2 = 0,15$$

$$\sum W_r = W_{r1} + W_{r2} + W_{r3} \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (63)$$

$$\sum W_r = 5806,5 + 958,5 + 5680 = 12\,445 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

23. Stanovení polytropického exponentu stlačení v oběžném kole

Předpoklad:

Není odváděné žádné teplo z oběžného kola odstředivého kompresoru.

$$\frac{n_1}{n_1 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{\sum W_r}{R \cdot (T_2 - T_1)} \text{ [1]} \quad (64)$$

$$\frac{n_1}{n_1 - 1} = \frac{1,4}{1,4 - 1} - \frac{12\,445}{287,4 \cdot (364,13 - 281,8)} = 2,97$$

$$n_1 = 1,51$$

24. Statický tlak na výstupu z oběžného kola (řez-2)

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n_1}{n_1 - 1}} = 88371,75 \cdot \left(\frac{364,13}{281,8} \right)^{\frac{1,51}{1,51 - 1}} = 189\,413 \text{ Pa} \quad (65)$$

25. Specifická hmotnost vzduchu na výstupu z oběžného kola (řez-2)

$$\rho_2 = \frac{p_2}{R \cdot T_2} = \frac{189\,413}{287,4 \cdot 364,13} = 1,81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \quad (66)$$

26. Stanovení šířky oběžného kola na výstupu (řez-2)

$$b_2 = \frac{Q_v}{c_{2r} \cdot Q_2 \cdot \pi \cdot D_2 \cdot \tau_1} = \frac{0,5}{113 \cdot 1,81 \cdot \pi \cdot 0,118 \cdot 0,95} = 6,959 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (67)$$

$$\tau_1 = 1 - \frac{z_k \cdot t}{\pi \cdot D_2} = 1 - \frac{15 \cdot 1,3}{\pi \cdot 0,118} = 0,95 \quad (68)$$

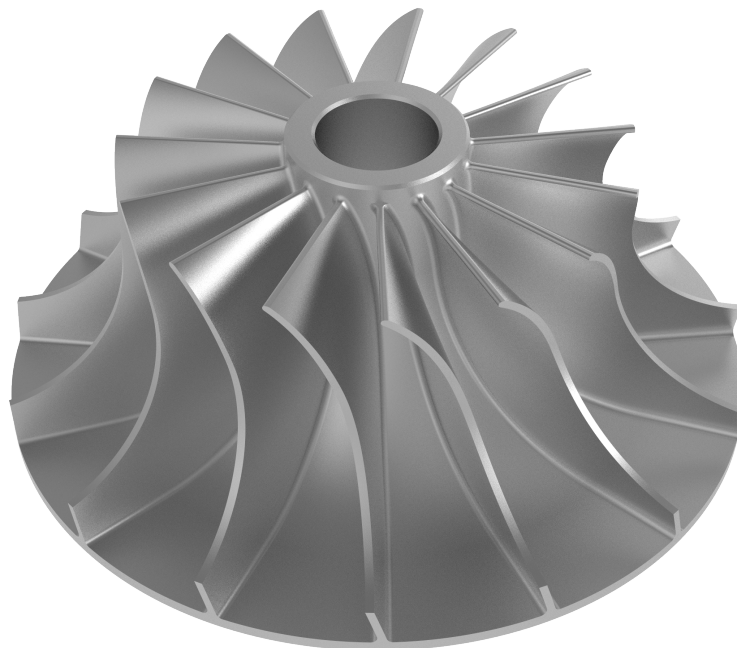
Doporučení:

Volit pro $D_2 < 200$ mm: $t = 1,2$ až $1,5$ mm

Volím $t = 1,3$

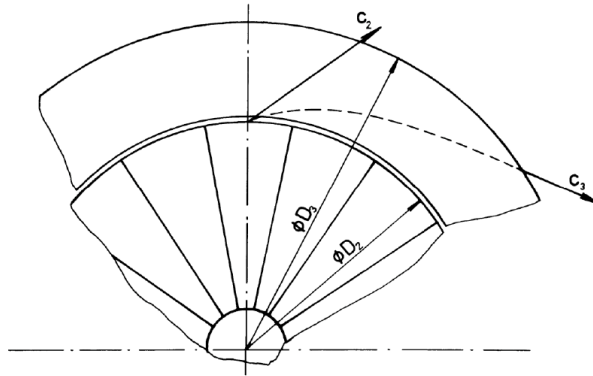
27. Závěr

Uvedený výpočet oběžného kola je přibližný. Uvažují se jen střední hodnoty rychlosti a jednotlivých stavových veličin v řezech. Po návrhu oběžného kola by následovalo profilování lopatek, určení průběhu ploch v mezilopatkovém kanále, případně detailní výpočet parametrů a rychlosti v oběžném kole.



Obr. 22 3D model vypočteného oběžného kola odstředivého kompresoru

3.3. Výpočet bezlopatkového difuzoru odstředivého kompresoru



Obr. 23 Principiální schéma bezlopatkového difuzoru odstředivého kompresoru [4]

Předpoklad:

- nedochází k odvodu tepla do atmosféry
- celkové teploty $T_{2c} = T_{3c} = T_{4c} = \text{konst.}$

1. Určení vstupní rychlosti do bezlopatkového difuzoru

Doporučení:

Je vhodné zvětšit šířku bezlopatkového difuzoru vzhledem ke koncové šířce oběžného kola o 0,6 až 0,8 mm.

$$b_2' = b_2 + (0,6 \div 0,8) [mm] \quad (69)$$

$$b_2' = 0,007 + 0,0007 = 0,0077 \text{ m}$$

Předpoklad:

$$c_{2u}' = c_{2u} [m \cdot s^{-1}]$$

$$c_{2r}' = c_{2r} \cdot \tau_1 \cdot \frac{b_2}{b_2'} = 113,05 \cdot 0,95 \cdot \frac{0,007}{0,0077} = 97,31 \text{ m} \cdot s^{-1} \quad (70)$$

2. Stanovení středního úhlu na vstupu do bezlopatkového difuzoru

$$\text{tg}(\alpha_2') = \frac{c_{2r}'}{c_{2u}'} = \frac{97,31}{318,53} = 0,306 \Rightarrow \alpha_2' = 17^\circ \quad (71)$$

3. Volba délky bezlopatkového difuzoru

$$\frac{D_3}{D_2} = 1,05 \div 1,15 \quad (72)$$

$$D_3 = 1,05 \cdot 0,11798 = 0,12388 \text{ m}$$

4. Výpočet středního úhlu na výstupu z bezlopatkového difuzoru

Předpoklad:

$$b_4 = b_3 = b_2$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_3) = \operatorname{tg}(\alpha_2') + \frac{\zeta_{tr}}{b_3} \cdot (r_3 - r_2) \Rightarrow \alpha_3 [^\circ] \quad (73)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha_3) = 0,306 + \frac{0,88}{0,0077} \cdot (0,062 - 0,059) = 0,309 \Rightarrow \alpha_3 = 17,17^\circ$$

5. Statická teplota vzduchu na výstupu z bezlopatkového difuzoru

$$T_3 = \frac{T_{3c}}{1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_3^2} = \frac{420,96}{1 + \frac{1,4 - 1}{2} \cdot 0,8^2} = 373,2 \text{ K} \quad (74)$$

Kde:

$$M_3 \leq 0,9$$

6. Absolutní rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru

$$c_{3r} = c_{2r}' \cdot \frac{D_2}{D_3} \cdot \frac{Q_2}{Q_3} = 97,31 \cdot \frac{0,118}{0,124} \cdot \frac{1,81}{1,955} = 85,8 \text{ m.s}^{-1} \quad (75)$$

Kde:

$$\frac{Q_3}{Q_2} = 1,08 \quad (76)$$

$$Q_3 = 1,08 \cdot 1,81 = 1,955 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$c_3 = M_3 \cdot \sqrt{\kappa \cdot R \cdot T_3} = 0,8 \cdot \sqrt{1,4 \cdot 287,4 \cdot 373,2} = 310 \text{ m.s}^{-1} \quad (77)$$

7. Třecí práce v bezlopatkovém difuzoru

$$W_r = \frac{\zeta_{tr}}{4 \cdot b_3} \cdot \frac{(c_2' + c_3)^2}{\sin(\alpha_{str})} \cdot (r_3 - r_2) [J.kg^{-1}] \quad (78)$$

$$W_r = \frac{0,88}{4 \cdot 0,0077} \cdot \frac{(338 + 310)^2}{\sin(17)} \cdot (0,062 - 0,059) = 1\,211,52 \text{ J.kg}^{-1}$$

Kde:

$$\alpha_{str} = \frac{\alpha_3 + \alpha_2'}{2} = \frac{17,17 + 17}{2} = 17,08^\circ \quad (79)$$

8. Polytropický exponent stlačení v bezlopatkovém difuzoru

Předpoklad:

- Stavové veličiny na vstupu do bezlopatkového difuzoru se nemění

$$p_2 = p_2'$$

$$Q_2 = Q_2'$$

$$T_2 = T_2'$$

$$\frac{n_2}{n_2 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_r}{R \cdot (T_3 - T_2)} \quad [1] \quad (80)$$

$$\frac{n_2}{n_2 - 1} = \frac{1,4}{1,4 - 1} - \frac{1\,211,52}{287,4 \cdot (373,2 - 364,13)} = 3,035$$

$$n_2 = 1,49$$

9. Specifická hmotnost vzduchu na výstupu z bezlopatkového difuzoru

$$Q_3 = Q_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{n_2 - 1}} = 1,81 \cdot \left(\frac{373,2}{364,13} \right)^{\frac{1}{1,49 - 1}} = 1,903 \text{ kg.m}^{-3} \quad (81)$$

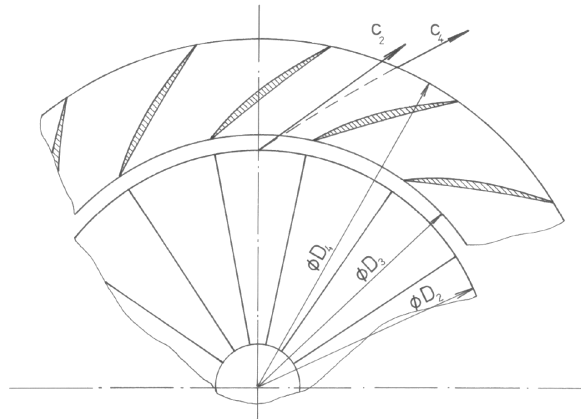
10. Statický tlak na výstupu z bezlopatkového difuzoru

$$p_3 = p_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{n_2}{n_2 - 1}} = 189\,413,04 \cdot \left(\frac{373,2}{364,13} \right)^{\frac{1,49}{1,49 - 1}} = 204\,093,31 \text{ Pa} \quad (82)$$

11. Kontrola velikosti Machova čísla na výstupu z bezlopatkového difuzoru

$$M_{c3} = \frac{c_3}{20,05 \cdot \sqrt{T_3}} = \frac{310}{20,05 \cdot \sqrt{373,2}} = 0,8 \quad (83)$$

3.4. Výpočet lopatkového difuzoru



Obr. 24 Principiální schéma lopatkového difuzoru odstředivého kompresoru [4]

Předpoklad:

- Střední výstupní absolutní rychlost na výstupu z bezlopatkového difuzoru c_3 vstupuje do lopatkového difuzoru pod úhlem α_3 .
- Úhel střední křivky lopatky od obvodového směru na průměru D_3 je $\alpha_{3k} = \alpha_3 + i$, úhel náběhu (i) bývá v rozsahu $\pm 1^\circ$.
- Je uvažována konstantní šířka lopatkového difuzoru $b_3 = b_4$.

1. Volba výstupního úhlu proudu vzduchu z lopatkového difuzoru

$$\alpha_4 = \alpha_3 + (12 \div 20^\circ) = 17,17 + 19 = 36,17^\circ \quad (84)$$

2. Stanovení úhlu lopatky na výstupu z lopatkového difuzoru

$$\alpha_{4k} = \alpha_4 + (2 \div 4^\circ) = 36,17 + 2 = 38,17^\circ \quad (85)$$

3. Volba poměru průměrů D_4/D_3

$$\frac{D_4}{D_3} = 1,25 \Rightarrow D_4 = 1,25 \cdot 0,124 = 0,155 \text{ m} \quad (86)$$

Kontrola poměrů ploch A_4/A_3
- poměr by měl být přibližně 2,5

$$\frac{A_4}{A_3} = \frac{D_4}{D_3} \cdot \frac{\sin(\alpha_{4k})}{\sin(\alpha_{3k})} \Rightarrow = \frac{0,155}{0,124} \cdot \frac{\sin(38,17)}{\sin(16,17)} = 2,7 \quad (87)$$

4. Určení délky střední křivky lopatky

$$l = \frac{r_4^2 - r_3^2}{\sqrt{r_4^2 + r_3^2 - 2 \cdot r_3 \cdot r_4 \cdot \cos(\alpha_{3k} + \alpha_{4k})}} [m] \quad (88)$$

$$l = \frac{0,077^2 - 0,062^2}{\sqrt{0,077^2 + 0,062^2 - 2 \cdot 0,062 \cdot 0,077 \cdot \cos(16,17 + 38,17)}} = 0,0331 \text{ m}$$

5. Určení úhlu rozevření kanálu lopatkového difuzoru

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\Theta}{2}\right) = \frac{d_4 - d_3}{2 \cdot l} = \frac{0,015 - 0,009}{2 \cdot 0,0331} = 0,091 \Rightarrow \Theta = 5,2^\circ \quad (89)$$

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot D_4 \cdot b_4 \cdot \sin(\alpha_{4k})}{z_{ld}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,155 \cdot 0,0077 \cdot \sin(38,17)}{13}} = 0,015 \text{ m} \quad (90)$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot D_3 \cdot b_3 \cdot \sin(\alpha_{3k})}{z_{ld}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,124 \cdot 0,0077 \cdot \sin(16,17)}{13}} = 0,009 \text{ m} \quad (91)$$

Kde:

Volba počtu lopatek difuzoru $z_{ld} = 13$

Pro stanovený úhel Θ a Machovo číslo M_{c3} se z tabulky č.1 určí součinitel ztrát ζ_{ld} .

Tab. 1 Součinitel ztrát ζ_{ld} [4]

M_{c3}	4°	6°	8°	10°
0,3	0,145	0,155	0,17	0,2
0,5	0,14	0,145	0,159	0,18
0,7	0,135	0,14	0,16	0,19
0,9	0,141	0,2	0,22	0,23

6. Volba výstupní rychlosti z lopatkového difuzoru odstředivého kompresoru

Doporučení:

Doporučuje se volit výstupní absolutní rychlost vzduchu z empirického vztahu:

$$\frac{c_4}{c_3} = 0,35 \quad (92)$$

$$c_4 = 0,35 \cdot 310 = 108,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

7. Výpočet statické teploty vzduchu na výstupu z lopatkového difuzoru odstředivého kompresoru

$$T_4 = T_{2c} - \frac{c_4^2}{2 \cdot c_p} = 420,96 - \frac{108,5^2}{2 \cdot 1005} = 415,1 \text{ K} \quad (93)$$

8. Stanovení třecí práce v lopatkovém difuzoru odstředivého kompresoru

$$W_{r,ld} = 0,175 \cdot \frac{310^2 + 108,5^2}{2} = 9439 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1} \quad (94)$$

9. Určení polytropického exponentu stlačení v lopatkovém difuzoru odstředivého kompresoru

$$\frac{n_3}{n_3 - 1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} - \frac{W_{r,ld}}{R \cdot (T_4 - T_3)} \quad [1] \quad (95)$$

$$\frac{n_3}{n_3 - 1} = \frac{1,4}{1,4 - 1} - \frac{9439}{287,4 \cdot (415,1 - 373,2)} = 2,72$$

$$n_3 = 1,58$$

10. Stanovení specifické hmotnosti vzduchu na výstupu z lopatkového difuzoru odstředivého kompresoru

$$\rho_4 = \rho_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{1}{n_3 - 1}} = 1,903 \cdot \left(\frac{415,1}{373,2} \right)^{\frac{1}{1,58 - 1}} = 2,28 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad (96)$$

11. Statický tlak na výstupu z lopatkového difuzoru

$$p_4 = p_3 \cdot \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{n_3}{n_3 - 1}} = 204\,093,31 \cdot \left(\frac{415,1}{373,2} \right)^{\frac{1,58}{1,58 - 1}} = 272\,515,9 \text{ Pa} \quad (97)$$

12. Kontrola volby výstupní absolutní rychlosti c_4 na výstupu z lopatkového difuzoru odstředivého kompresoru

$$c_4 = \frac{Q_v}{Q_4 \cdot \sin(\alpha_4) \cdot \pi \cdot D_4 \cdot b_4 \cdot \tau_2} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (98)$$

$$c_4 = \frac{0,5}{2,28 \cdot \sin(36,17) \cdot \pi \cdot 0,155 \cdot 0,0077 \cdot 0,92} = 108,23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

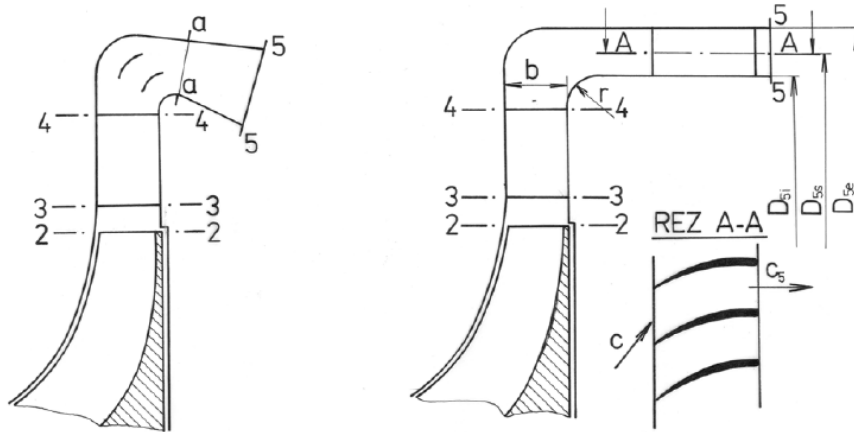
Kde:

$$\tau_2 = 1 - \frac{z_{ld} \cdot t}{\pi \cdot D_4} = 1 - \frac{13 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,155} = 0,92 \quad (99)$$

13. Závěr

Podobně jako v oběžném kole je i bezlopatkový a lopatkový difuzor počítaný velmi přibližně s uvažováním středních rychlostí a parametrů proudu vzduchu. Lopatky difuzoru, jejichž tvar je ve výpočtu minimálně respektovaný, může mít různý tvar. V praxi je velmi důležitá kontrola difuznosti mezilopatkového kanálu.

3.5. Výpočet výstupní soustavy



Obr. 25 Prstencová výstupní soustava odstředivého kompresoru [4]

Prstencová výstupní soustava se nejčastěji používá u jednoproudových motorů, které mají za odstředivým kompresorem umístěnou prstencovou, smíšenou nebo sdruženou spalovací komoru. Jelikož výstupní rychlost vzduchu z lopatkového difuzoru má radiální i obvodovou složku (c_{4r} , c_{4u}), pak po ohnutí proudu ve výstupní soustavě stále zůstává ještě určitá složka rychlosti v obvodovém směru. Většina spalovacích komor vyžaduje vstup vzduchu v osovém směru, a proto je třeba vložit do koncové části výstupní soustavy usměrňovací lopatky, aby $c_{5u} = 0$.

1. Volba středního průměru na výstupu D_5

$$D_5 \approx D_4 + 2 \cdot b_4 \text{ [m]} \quad (100)$$

$$D_5 \approx 0,155 + 2 \cdot 0,0077 = 0,17 \text{ m}$$

2. Stanovení obvodové složky absolutní rychlosti c_{5u}

Předpoklad:

Předpokládá se rovnost momentů hybnosti proudu vzduchu vzhledem k ose otáčení při přechodu z průměru D_4 na D_5 .

$$c_{5u} = c_{4u} \cdot \frac{D_4}{D_5} = 64,03 \cdot \frac{0,155}{0,17} = 58,27 \text{ m.s}^{-1} \quad (101)$$

$$c_{4u} = c_4 \cdot \sin(\alpha_4) = 108,23 \cdot \sin(36,17) = 64,03 \text{ m.s}^{-1} \quad (102)$$

3. Volba výstupní rychlosti c_5

Výstupní rychlost c_5 se volí v rozsahu $c_5 = (100 \div 120) \text{ m.s}^{-1}$

$$c_5 = 110 \text{ m.s}^{-1}$$

4. Stanovení stavových parametrů na výstupu z odstředivého kompresoru

Polytropický exponent charakterizující zbytkovou kompresi ve výstupní soustavě byl zvolen dle doporučení v [5] $n = 1,8$.

$$T_5 = T_{2c} \cdot \frac{c_5^2}{2 \cdot c_p} = 420,96 \cdot \frac{110^2}{2 \cdot 1005} = 414,94 \text{ K} \quad (103)$$

$$Q_5 = Q_4 \cdot \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{1}{n-1}} = 2,284 \cdot \left(\frac{414,9}{415,1} \right)^{\frac{1}{1,8-1}} = 2,283 \text{ kg.m}^{-3} \quad (104)$$

$$p_5 = p_4 \cdot \left(\frac{T_5}{T_4} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 272\,515,9 \cdot \left(\frac{414,9}{415,1} \right)^{\frac{1,8}{1,8-1}} = 272\,275,3 \text{ Pa} \quad (105)$$

5. Určení průtokové plochy v řezu „5-5“

$$A_5 = \frac{Q_v}{Q_5 \cdot c_{5a}} = \frac{0,5}{2,283 \cdot 93,3} = 23,47 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (106)$$

Kde:

$$c_{5a} = \sqrt{110^2 - 58,27^2} = 93,3 \text{ m.s}^{-1} \quad (107)$$

6. Určení rozměrů výstupní soustavy

$$D_{5i} = D_5 - \frac{A_5}{\pi \cdot D_5} = 0,17 - \frac{23,47 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,17} = 0,166 \text{ m} \quad (108)$$

$$D_{5e} = 2 \cdot D_5 - D_{5i} = 2 \cdot 0,17 - 0,166 = 0,175 \text{ m} \quad (109)$$

7. Určení celkového tlaku na výstupu z odstředivého kompresoru

$$p_{5c} = p_5 \cdot \left(\frac{T_{2c}}{T_5} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} = 272\,275,3 \cdot \left(\frac{420,96}{414,94} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 286\,353,2 \text{ Pa} \quad (110)$$

8. Kontrola stupně stlačení odstředivého kompresoru

$$\pi_{Kc} = \frac{p_{5c}}{p_{1c}} = \frac{286\,353,2}{95\,549,7} = 2,997 \quad (111)$$

9. Kontrola celkové účinnosti odstředivého kompresoru

$$\eta_{Kc} = \frac{\frac{\pi_{Kc}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{T_{2c}}}{\frac{\pi_{Kc}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{T_{1c}}} = \frac{2,99 \frac{1,4-1}{1,4} - 1}{\frac{420,96}{288,15} - 1} = 0,799 \quad (112)$$

10. Závěr

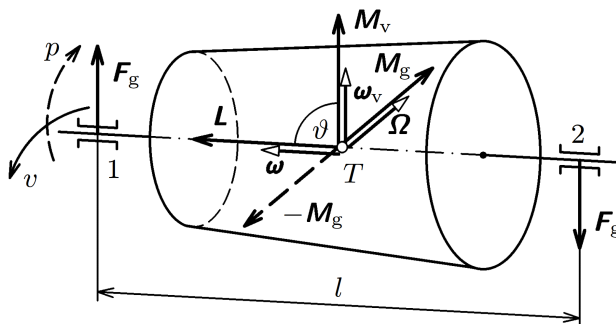
Vypočítaná hodnota celkového stlačení odpovídá zvolené vstupní hodnotě a vypočítaná hodnota celkové účinnosti je v toleranci 2 % od zvolené vstupní hodnoty.



Obr. 26 3D model vypočteného difuzoru odstředivého kompresoru

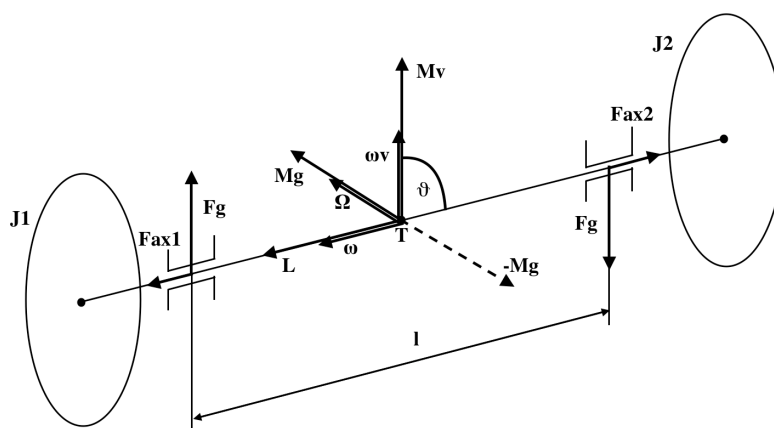
4. Ložiska

Velmi rychle rotující části jsou nezbytnou součástí proudových motorů, kde jsou to zpravidla rotory turbín a kompresorů. Z fyzikálního hlediska představují tyto rotující části setrvačníky. Při změně směru pohybu (při manévrování letounu) se proto musí nutně projevat gyroskopické (setrvačnickové) jevy, které nelze zanedbat při návrhu uložení v ložiskách [6].



Obr. 27 Působení gyroskopického momentu [6]

Při výpočtu budeme uvažovat umístění motoru v podélné ose letadla. Moment hybnosti roztočených rotorů značíme L . Změna směru pohybu stroje je vyvolána pomocí kormidel, kterými musíme vynutit na jistou dobu rotační pohyb (tzv. vnucený pohyb). Ten je vnucen úhlovou rychlostí ω_v působením momentu síly M_v (obr. 27). Uložením rotoru do ložisek 1 a 2 dochází k zachycení sil F_g , které jsou vyvolány gyroskopickým momentem M_g .



Obr. 28 Působení gyroskopického momentu v proudovém motoru

4.1. Přibližný výpočet zatížení ložisek

1. Hmotnosti oběžného kola kompresoru a turbínového kola

Oběžné kolo kompresoru: - hliníková slitina ($\rho = 2\,700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

$$m_1 = 0,233\text{ kg}$$

Turbínové kolo: - titanová slitina ($\rho = 4\,510\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

$$m_2 = 0,285\text{ kg}$$

2. Moment setrvačnosti oběžného kola kompresoru a turbínového kola

- momenty setrvačností odečtené z 3D modelu aplikace Autodesk Inventor

$$J = J_1 + J_2 = 216,69 \cdot 10^{-6} + 374,28 \cdot 10^{-6} = 590,97\text{ kg}\cdot\text{m}^2 \quad (113)$$

3. Úhlová rychlost oběžného kola kompresoru

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 60\,999}{60} = 6387,8\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1} \quad (114)$$

4. Moment hybnosti oběžného kola kompresoru

$$L = J \cdot \omega = 590,97 \cdot 10^{-6} \cdot 6387,8 = 3,77\text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1} \quad (115)$$

5. Volené parametry:

- Manévrovací úhlová rychlost letounu

$$\omega_v = 2\pi\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1} \quad (116)$$

- Nutační úhel (úhel odklonění dráhy letounu)

$$\vartheta = 90^\circ \left(0 < \vartheta < \frac{\pi}{2} \right) \quad (117)$$

Volím největší možný nutační úhel pro výpočet uložení.

6. Gyroskopický moment

$$M_g = L \cdot \omega_v \cdot \sin(\vartheta) = 3,77 \cdot 2\pi \cdot \sin(90) = 23,72\text{ Nm} \quad (118)$$

7. Reakce v ložiskách (od gyrokopického momentu)

$$F_g = \frac{M_g}{l} = \frac{23,72}{0,085} = 279,05 \text{ N} \quad (119)$$

kde: Vzdálenost podpor $l = 0,085 \text{ m}$

8. Axiální síla z rozdílů tlaků před a za oběžným kolem kompresoru

$$F_{ax1} = \frac{\pi \cdot D_{1e}^2}{4} \cdot (p_2 - p_1) = \frac{\pi \cdot 0,077^2}{4} \cdot (189\,413 - 88\,371,7) = 466,7 \text{ N} \quad (120)$$

9. Axiální síla z rozdílů tlaků před a za turbínovým kolem

$$F_{ax2} = \frac{\pi \cdot (D_{4e}^2 - D_{4i}^2)}{4} \cdot (p_{3c} - p_{4c}) \quad (121)$$

$$F_{ax2} = \frac{\pi \cdot (0,13^2 - 0,085^2)}{4} \cdot (266\,583,6 - 146\,300) = 992 \text{ N}$$

10. Výsledná axiální síla

$$F_{ax} = F_{ax2} - F_{ax1} = 992 - 466,7 = 525,3 \text{ N}$$

- Z katalogu výrobce GRW byla vybrána ložiska určená pro modelové zástavy RC letadel s vysokou teplotní odolností, otáčkami okolo 100 000 ot/min při doporučené životnosti 50 h.

11. Kuličkové ložisko u oběžného kola kompresoru

Tab. 2 Parametry kuličkového ložiska

typ	X	Y	d [mm]	D [mm]	b [mm]	C [N]
6005	0,56	1,4	25	47	12	8 550

$$\frac{F_a}{F_r} = 1,15 \quad (122)$$

$$P = F_g \cdot X + F_{ax} \cdot Y = 279,05 \cdot 0,56 + 525,3 \cdot 1,4 = 891,7 \text{ N} \quad (123)$$

$$C^* = P \cdot \sqrt[3]{\frac{L_h \cdot n}{16666}} = 891,7 \cdot \sqrt[3]{\frac{50 \cdot 61\,000}{16666}} = 5062,5 \text{ N} \leq C \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (124)$$

kde: $L_h = 50 \text{ h}$
 $n = 61\,000 \text{ ot/min}$

12. Válečkové ložisko u turbínového kola

Tab. 3 Parametry válečkového ložiska

typ	d [mm]	D [mm]	b [mm]	C [N]
NUP 204 ECP	20	47	14	28 500

$$\frac{F_a}{F_r} = 0 \quad (125)$$

$$P = F_g = 279,05 \text{ N} \quad (126)$$

$$C^* = P \cdot \sqrt[3]{\frac{10}{16666} \frac{L_h \cdot n}{16666}} = 279,05 \cdot \sqrt[3]{\frac{50 \cdot 61\,000}{16666}} = 1331,7 \text{ N} \leq C \Rightarrow \text{vyhovuje} \quad (127)$$

kde: $L_h = 50 \text{ h}$
 $n = 61\,000 \text{ ot/min}$

13. Závěr

Při výpočtu ložisek proudového motoru je uvažováno reakční působení gyroskopických momentů a axiální zatížení od oběžného kola kompresoru a turbínového kola, které je dáno rozdílem tlaků před a za jednotlivými koly.

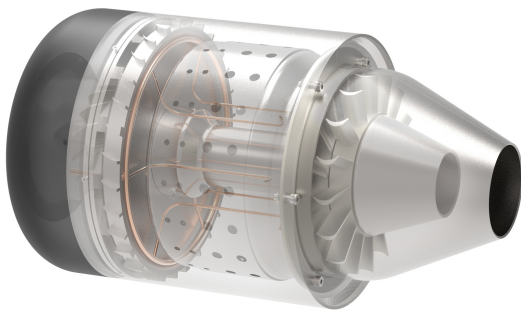
Pro výpočet gyroskopických momentů je pak nutné vycházet z maximální manévrovací úhlové rychlosti letounu, která je přímo závislá na působícím gyroskopickém momentu. Dále je nutné vytvoření výpočtového modelu, kde rotující části nahradíme setrvačníky. V tomto případě bylo zvoleno oběžné kolo kompresoru a turbínové kolo. Z návrhu odstředivého kola byla získána potřebná geometrie a spolu se zvoleným materiálem oběžného kola byla určena hmotnost setrvačníku potřebná k určení momentů setrvačnosti. Rozsah této práce neobsáhl výpočet turbínového kola, jehož velikost musela být zvolena kvalifikovaným odhadem. Momenty setrvačností byly vzhledem k přesnosti odečteny z 3D modelu aplikace Autodesk Inventor. Dalším voleným parametrem je vzdálenost rotujících setrvačnicků, která je nepřímo závislá na velikosti reakčních sil z gyroskopického momentu.

Z katalogu výrobce GRW byla vybrána ložiska určená pro modelové zástavby. Jedná se o ložisko s keramickými valivými elementy, snášející vysoké teploty a otáčky do 100 000 ot/min. Jejich doporučená životnost je 50 h.

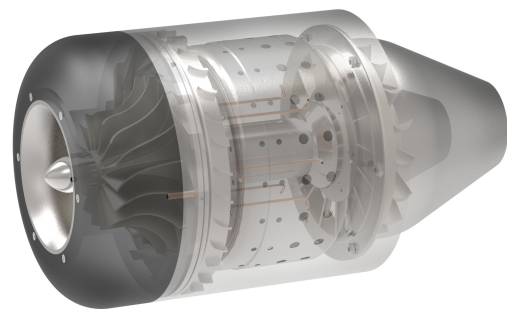
5. Konstrukce

Při návrhu proudového motoru bylo zohledněno několik kritérií a požadavků na konstrukci.

1. Jednoduchá konstrukce pro výrobu a montáž
2. Snadná výměna ložisek
3. Tuhé jádro



Obr. 29 Průhled konstrukcí proudového motoru



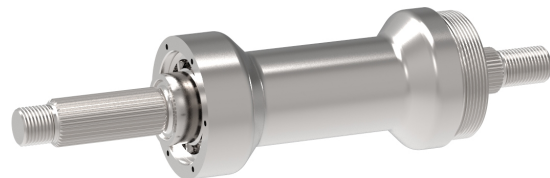
Obr. 30 Průhled konstrukcí proudového motoru

5.1. Náboj a rotor proudového motoru

Rotor proudového motoru je uložen pomocí kuličkového ložiska pod oběžným kolem kompresoru a pomocí válečkového ložiska pod turbínou. Kuličkové ložisko je navrženo jako axiálně pevné a přenáší axiální sílu vzniklou prací kompresoru a turbíny. Náboj je navržen s ohledem na tuhou konstrukci jádra.



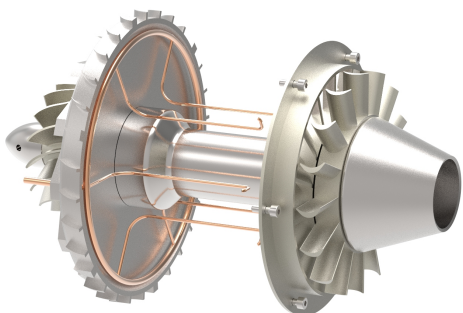
Obr. 31 Rotor proudového motoru



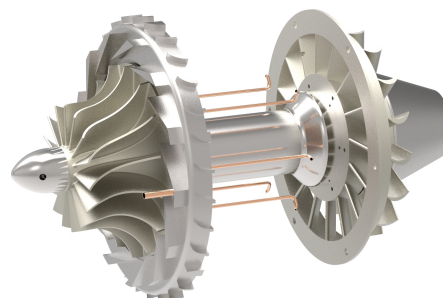
Obr. 32 Náboj na rotoru proudového motoru

5.2. Kompresor a turbína proudového motoru

Difuzor oběžného kola kompresoru je přišroubován k náboji pomocí šesti zápusťných šroubů. Samotné oběžné kolo kompresoru je na hřídeli radiálně zajištěno pomocí evolventního drážkování a je přes distanční kroužek opřené o kuličkové ložisko. Axiálně zajištěno je aerodynamicky tvarovanou maticí s otvory pro montáž či demontáž. Kolo turbínových rozváděcích lopatek je na náboj našroubováno. Turbínové kolo je na hřídeli radiálně zajištěno pomocí evolventního drážkování a je přes distanční kroužek opřené o válečkové ložisko. Axiálně zajištěno je pomocí matice a pružné podložky v kuželu usměrňovací trysky. Palivové ústrojí je tvořeno ze svařených měděných trubiček a přívod vede skrze jednu z rozváděcích lopatek lopatkového difuzoru.



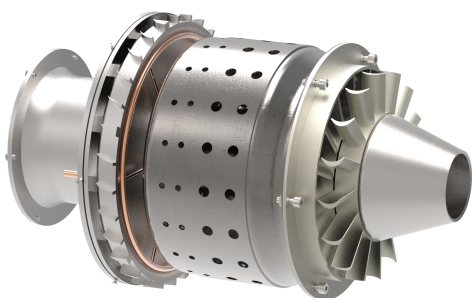
Obr. 33 Uložení turbíny proudového motoru



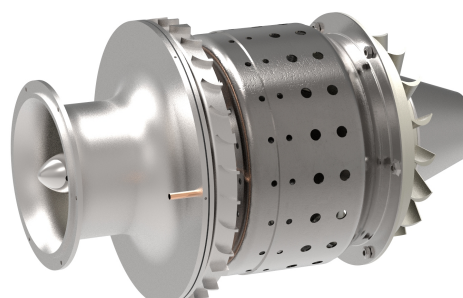
Obr. 34 Uložení kompresoru proudového motoru

5.3. Plamenec

Je konstrukčně velmi složitý celek, který zajišťující stabilitu hoření a účinnost spalování. V tomto případě se jedná o tzv. prstencovou spalovací komoru s protiproudým vstřikováním paliva. Zajištěná je pomocí šestice šroubů k rozváděcímu kolu turbíny.



Obr. 35 Uložení plamenec proudového motoru



Obr. 36 Uložení plamenec proudového motoru

6. Závěr

Na začátku této bakalářské práce byla provedena rešerše v oblasti historie a vývoje proudových motorů včetně vysvětlení principu činnosti a vzniku tahu. Dále byl proveden přibližný termodynamický výpočet motoru, ze kterého byla zjištěna hodnota tahu motoru a specifické spotřeby paliva. Následně byl vypracován graf průběhu změny parametrů vzduchu a plynu při průchodu proudovým motorem.

U odstředivého kompresoru byl proveden přibližný návrh vycházející ze středních hodnot rychlostí a jednotlivých stavových veličin ve vhodně zvolených řezech.

Difuzor odstředivého kompresoru byl navržen přibližným výpočtem, rozděleným na bezlopatkovou, lopatkovou a výstupní část. Stejně jako u přibližného výpočtu odstředivého kompresoru, i tento výpočet vycházel ze středních hodnot rychlostí a jednotlivých stavových veličin ve vhodně zvolených řezech.

Byl zjištěn způsob namáhání ložisek proudového motoru a přibližným výpočtem byl naznačen způsob jejich navržení.

Konstrukční návrh celého motoru byl podrobně popsán a byl vypracován výkres sestavy spolu s výrobními výkresy rotoru a náboje.

Celá sestava proudového motoru byla modelována v 3D programu Autodesk Inventor. Výstupní výkresy jsou připojeny na konec práce ve formě příloh.

Seznam použitých veličin

p	[Pa]	Tlak
p_c	[Pa]	Celkový tlak
T	[K]	Termodynamická teplota
T_c	[K]	Celková termodynamická teplota
Ma	[1]	Machovo číslo
κ	[1]	Adiabatický exponent vzduchu
κ'	[1]	Adiabatický exponent plynu
n_i	[1]	Polytropický exponent
H	[m]	Výška letu
c_p	[1]	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
Q	[kg/s]	Průtokové množství vzduchu
σ_{rv}	[1]	Součinitel zachování celkového tlaku v rázových vlnách
σ_D	[1]	Součinitel zachování celkového tlaku ve vstupním difuzoru
σ_{HSK}	[1]	Součinitel zachování celkového tlaku spalovací komory
σ_{PT}	[1]	Součinitel zachování celkového tlaku plynové turbíny
ρ	[kg/m ³]	Hustota
A	[m ²]	Průtoková plocha
D	[m]	Průměr
F	[N]	Síla
W	[J/kg]	Celková adiabatická práce
π_{kc}	[1]	Celkový stupeň stlačení kompresoru
η_{kc}	[1]	Účinnost kompresoru
η_{VD}	[1]	Účinnost výstupní soustavy
η_m	[1]	Účinnost mechanická
η_{Tc}	[1]	Účinnost plynové turbíny
c_m	[kg.N ⁻¹ .h ⁻¹]	Specifická spotřeba paliva
l	[m]	Délka
l_0	[1]	Teoretické množství vzduchu
α_0	[1]	Součinitel přebytku vzduchu
t	[°C]	Teplota
μ_{VD}	[1]	Součinitel kontrakce proudu ve výstupní dýze
φ_{VD}	[1]	Součinitel ztráty rychlosti ve výstupní dýze
R	[J.K ⁻¹ .kg ⁻¹]	Molární plynová konstanta

c	[m/s]	Rychlost letu
c_{ai}	[m/s]	Osová složka absolutní rychlosti na vnitřním průměru
c_{as}	[m/s]	Osová složka absolutní rychlosti na středním průměru
c_{ae}	[m/s]	Osová složka absolutní rychlosti na vnějším průměru
c_{ui}	[m/s]	Obvodová složka absolutní rychlosti na vnitřním průměru
c_{us}	[m/s]	Obvodová složka absolutní rychlosti na středním průměru
c_{ue}	[m/s]	Obvodová složka absolutní rychlosti na vnějším průměru
c_r	[m/s]	Radiální složka absolutní rychlosti
u_i	[m/s]	Obvodová rychlost na vnitřním průměru
u_s	[m/s]	Obvodová rychlost na středním průměru
u_e	[m/s]	Obvodová rychlost na vnějším průměru
w_i	[m/s]	Relativní rychlost na vnitřním průměru
w_s	[m/s]	Relativní rychlost na středním průměru
w_e	[m/s]	Relativní rychlost na vnějším průměru
μ	[1]	Součinitel skluzu
v	[1]	Poměr vnitřního a vnějšího vstupního průměru
α	[°]	Úhel náběhu
n	[ot/min]	Otáčky rotoru
z_k	[1]	Počet lopatek odstředivého kompresoru
z_{ld}	[1]	Počet lopatek lopatkového difuzoru
ζ	[1]	Součinitel třecích ztrát
b	[m]	Šířka
t	[m]	Koncová šířka lopatky
τ	[1]	Součinitel plochy lopatek
m	[kg]	Hmotnost
J	[kg.m ²]	Moment setrvačnosti
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost
L	[kg.m ² .s ⁻¹]	Moment hybnosti
θ	[°]	Nutační úhel
M_g	[Nm]	Gyroskopický moment
F_g	[N]	Reakce od gyroskopického momentu
F_{ax}	[N]	Axiální síla

Použitá literatura

- [1] HANUS, Daniel. *Pohon letadel*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-800-1041-048.
- [2] KLEIN, Dominik a Chamil A O - 10.1109/ITechA.2015.7317395 ABEYKOON. *Modelling of a turbojet gas turbine engine* [online]. B.m.: IEEE. 2015. ISBN 9781479980369. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7317395/>
- [3] ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. *Letadlové motory*. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008. ISBN 978-80-86116-54-9.
- [4] HOCKO, Marián. *VÝPOČTOVÉ CVIČENIE Z TEÓRIE LETECKÝCH MOTOROV*. První, roz. 2009. Približný výpočet odstředivého kompresora. ISBN 978-80-553-0163-1.
- [5] POLEDNO, Martin. *Návrh letadlové energetické jednotky* [online]. Brno, 2010. b.n. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/16309>
- [6] VYBÍRAL, Bohumil. *Setrvačníky a jejich aplikace*. 1998. vyd. Hradec Králové: Gaudeamus, 1998. studijní text pro soutěžící FO a ostatní zájemce o fyziku. ISBN 8086148165.
- [7] *Wright Flyer I* [online]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/be/Flyer_I_and_Flyer_III_profile_comparison.SVG
- [8] *Patentovaný proudový motor - F. Whittle* [online]. Dostupné z: <https://jqmgrdyk.home.xs4all.nl/jetpower/german-jetpower-p1a.htm>. NULL
- [9] *Patentovaný proudový motor - profesor von Ohain* [online]. Dostupné z: <https://jqmgrdyk.home.xs4all.nl/jetpower/german-jetpower-p1a.htm>. NULL
- [10] *První ruský proudový motor TR-1* [online]. Dostupné z: http://www.aviapanorama.narod.ru/journal/1998_2/images/engine_b.gif. NULL
- [11] *Řez proudovým motorem s axiálním kompresorem* [online]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Jet_engine.svg. NULL

Seznam obrázků

Obr. 1 Wright Flyer I [6].....	2
Obr. 2 Patentovaný proudový motor anglický - F. Whittle [8].....	4
Obr. 3 Patentovaný proudový motor německý - profesor von Ohain [9]	4
Obr. 4 První ruský proudový motor TR-1 [7].....	4
Obr. 5 Řez proudovým motorem s axiálním kompresorem (přeloženo) [10].....	5
Obr. 6 p-v a T-s diagram oběhu motoru [3].....	5
Obr. 7 Jednohřídelový proudový motor s přídavným spalováním [3].....	6
Obr. 8 Dvouhřídelový proudový motor [3].....	6
Obr. 9 Tříhřídelový dvouproudový motor [3].....	6
Obr. 10 Radiální kompresor s oboustranným kole [3].....	7
Obr. 11 Stupeň axiálního kompresoru [3].....	7
Obr. 12 Modulová konstrukce malého motoru [3]	8
Obr. 13 Modulová konstrukce motoru ADOUR / F405 [1].....	8
Obr. 14 Dvouproudový motor [3].....	9
Obr. 15 Turbohřídelový motor [3]	10
Obr. 16 Náporový motor [3]	10
Obr. 17 Náporový motor pulsační [3].....	10
Obr. 18 Volené řezy proudového motoru pro výpočet	11
Obr. 19 Průběh změny parametrů vzduchu a plynu při průchodu proudovým motorem	16
Obr. 20 Principiální schéma odstředivého (radiálního) kompresoru [4]	17
Obr. 21 Závislost součinitele skluzu na poměru poloměrů pro zadaný počet lopatek [4]	22
Obr. 22 3D model vypočteného oběžného kola odstředivého kompresoru	24
Obr. 23 Principiální schéma bezlopatkového difuzoru odstředivého kompresoru [4].....	25
Obr. 24 Principiální schéma lopatkového difuzoru odstředivého kompresoru [4]	28
Obr. 25 Prstencová výstupní soustava odstředivého kompresoru [4].....	32
Obr. 26 3D model vypočteného difuzoru odstředivého kompresoru.....	34
Obr. 27 Působení gyroskopického momentu [11]	35
Obr. 28 Působení gyroskopického momentu v proudovém motoru	35
Obr. 29 Průhled konstrukcí proudového motoru	39
Obr. 30 Průhled konstrukcí proudového motoru	39
Obr. 31 Rotor proudového motoru.....	39
Obr. 32 Náboj na rotoru proudového motoru	39
Obr. 33 Uložení turbíny proudového motoru	40
Obr. 34 Uložení kompresoru proudového motoru	40
Obr. 35 Uložení plamence proudového motoru.....	40
Obr. 36 Uložení plamence proudového motoru.....	40

Seznam tabulek

Tab. 1 Součinitel ztrát ζ_{ld} [4]	29
Tab. 2 Parametry kuličkového ložiska.....	37
Tab. 3 Parametry válečkového ložiska	38

Seznam příloh

Příloha 1. Výkres sestavy - BP-0001-00 - PROUDOVÝ MOTOR

Příloha 2. Výrobní výkres - BP-0001-01 - NÁBOJ ROTORU

Příloha 3. Výrobní výkres - BP-0001-02 - ROTOR