

DESIGN OPTIMIZATION OF A COMPRESSOR STAGE WITH COUNTER-ROTATING ROTORS

DIZAJNOVÁ OPTIMALIZÁCIA STUPŇA KOMPRESORA S PROTIBEŽNÝMI ROTORMI

Kristína Šajbanová

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
kristina.sajbanova@gmail.com

Jozef Čerňan

Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

Abstract

The paper deals with the design optimization of the compressor stage with counter-rotating rotors, especially in order to create a model which, due to its parameters in real operation, would achieve the maximum possible values of efficiency. The primary goal of this work is to create a design of a compressor stage with counter-rotating rotors from a theoretical point of view. The compressor stage model is created using Inventor modelling software and the subsequent design evaluation and optimization is based on airflow analysis of the compressor stage using Ansys Discovery Live software. The secondary goal is to point out the existence and application of innovative and progressive technology of rapid prototyping in the world of aircraft component production and at the same time to emphasize its benefits in comparison with conventional production techniques applied in the initial stages of aircraft component production.

Keywords

stator, rotor, airflow, design

1. Úvod

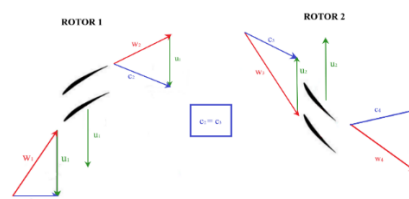
Cieľom všetkých dizajnérov je predstaviť inovatívny koncept leteckého motora, ktorý by zabezpečil bezpečnú prevádzku, maximálne hodnoty účinnosti na jednej strane a na strane druhej dosahoval minimálne možné hodnoty hmotnosti, spotreby a škodlivých emisií. Vývoj v dizajne kompresorov pokračuje od ich vynájdenia. Aktuálne trendy v oblasti vývoja efektívnych leteckých motorov z hľadiska špecifickej spotreby paliva, emisií hluku či environmentálneho pohľadu smerujú primárne na výrobu motorov s vysokým či ultravysokým obtokovým pomerom. V posledných rokoch bol však zaznamenaný značný záujem o výskum v oblasti aerodynamiky protibežných rotačných komponentov leteckých pohonných jednotiek (vrtuľa, kompresor, turbína), a to najmä kvôli ich uplatneniu v leteckých motoroch budúcej generácie. Konceptie protibežných rotorov kompresora poskytujú priaznivú voľbu z hľadiska zníženia hmotnosti a dĺžky motora pri zachovaní tlakového pomeru v porovnaní s konvenčnými axiálnymi kompresormi.

Napriek detailnému prieskumu trhu a sledovaniu diania sveta evolúcie leteckých motorov zostáva fakt, že v súčasnosti neexistuje mnohostupňový protibežný kompresor koncepcie stupňa definovaného ako dvojica rotorových mreží, ktoré sa voči sebe otáčajú opačným smerom, ktorý by spĺňal požiadavky na možnú aplikáciu ako súčasť turbínových leteckých pohonných jednotiek. Práve dokonale navrhnutý stupeň protibežného kompresora je základným predpokladom možnosti vývoja viacstupňového protibežného kompresora. Nasledujúce kapitoly preto predstavujú a popisujú komplexný a detailný experimentálny návrh stupňa protibežného axiálneho

kompresora ako aj návrh celého mnohostupňového protibežného axiálneho kompresora.

2. Princíp stlačovania vzduchu v stupni protibežného axiálneho kompresora a jeho konštrukcia

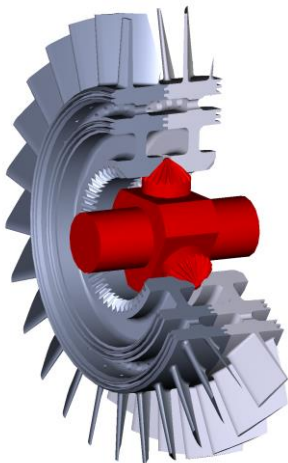
Konštrukcia tradičného stupňa axiálneho kompresora pozostáva zo statorov pripevnených k plášťu kompresora a rotorov pripevnených k hriadeľu z čoho vyplýva ich jednotný smer otáčania. V koncepte protibežného rotora stupeň pozostáva z dvoch rotorov pohybujúcich sa voči sebe v opačných smeroch, čím vylučujú nevyhnutnosť prítomnosti statorových lopatiek. Možno teda dosiahnuť vytvorenie vyššieho tlaku za súčasného poklesu hmotnosti motora a redukcie jeho dĺžky. [1-4] Základné prúdenie možno vyjadriť rýchlostným trojuholníkom. Ak by sme v jednoduchosti porovnali rýchlostný trojuholník tradičného stupňa kompresora a protibežný stupeň, možno pozorovať signifikantný nárast relatívnej rýchlosti na vstupe do druhého rotora $w_3 > w_2$. Následne možno predpokladať úmerne vyšší difúzny účinok druhého rotora, čo v konečnom dôsledku znamená dosiahnutie oveľa vyššieho stlačenia v stupni. [7-9]



Obrázok 56: Rýchlostné trojuholníky stupňa protibežného kompresora.
Zdroj: Autori.

3. Experimentálny návrh dizajnu stupňa axiálneho kompresora s protibežnými rotormi

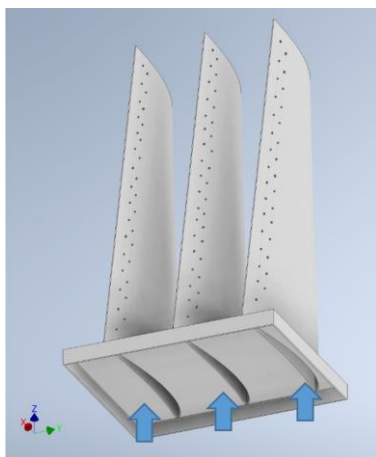
Experimentálne riešenie návrhu dizajnu axiálneho kompresora s protibežnými rotormi spočíva v zjednotení dizajnu dutej rotorovej lopatky (koncept podobný ako v prípade dutých turbínových lopatiek za účelom ich chladenia) a dizajnu disku rotora axiálneho kompresora- integrálne lopatkovaného disku (BLISK – Bladed disk) pričom stupeň kompresora je definovaný ako dvojica rotorových mreží, ktoré sa voči sebe otáčajú opačným smerom pomocou ozubeného mechanizmu.



Obrázok 57: Experimentálny návrh stupňa axiálneho kompresora s protibežnými rotormi. Zdroj: Autori.

3.1. Návrh celkového dizajnu rotorovej lopatky

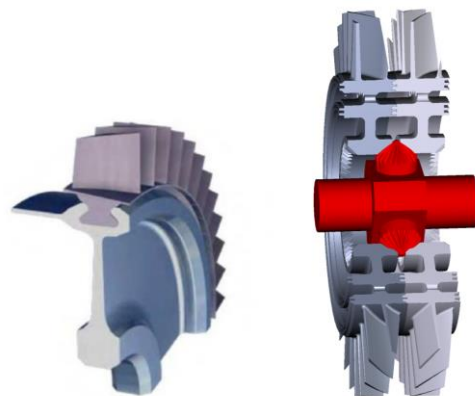
Stanovený experimentálny dizajn lopatky rotora ako takej spočíva v jej dutom, inými slovami škrupinovom, prevedení. Podstata takto vytvorenej dutej rotorovej lopatky axiálneho kompresora spočíva v možnosti prívodu už stlačeného vzduchu o vysokom tlaku z oblasti zadnej časti kompresora za účelom jeho následného využitia na „vyfukovanie“ skrz otvory na chrbte prípadne koryte lopatky za účelom „laminarizovania“ prúdu v oblastiach s najčastejším výskytom vírov. Na Obrázku 3 možno vidieť konkrétny návrh dutej rotorovej lopatky a rovnako smer prívodu vzduchu o vysokom tlaku pričom detailný systém prívodu vzduchu z posledných stupňov kompresora je popísaný v kapitole 5. Systém prívodu vzduchu s vysokým tlakom za účelom ofukovania lopatiek.



Obrázok 58: Experimentálny návrh lopatky rotora. Zdroj: Autori.

3.2. Výrobná technológia integrálne lopatkovaného disku (BLISK)

Tradičné kompresory a turbíny leteckých motorov využívali zväčša pre uchytenie lopatiek k drážkam disku valcový, rybinový, stromčekový alebo vidlicový záves. Za účelom dosiahnutia vyššej úrovne technologickej životaschopnosti a poklesu výrobných nákladov ako základných faktorov predpokladu vývoja inovatívnych komponentov leteckých pohonných jednotiek vznikla technológia integrovaných lopatkovaných diskov (IBR alebo BLISK- Bladed disk). V súčasnosti už neodmysliteľná technológia výroby leteckých motorov spočíva vo výrobe disku a lopatiek ako jedného samostatného komponentu vyrobeného z pevného materiálu, akými sú ťažko rezateľné titánové zliatiny alebo zliatiny na báze niklu. [10] [11]



Obrázok 59: Komparácia tradičného uchytenia lopatky pomocou závesu vľavo a technológie BLISK vpravo. Zdroj: Autori.

3.2.1. Benefity dizajnu integrálne lopatkovaného disku

BLISK ako jeden z najoriginálnejších komponentov leteckých motorov predstavuje radu výhod pre ktoré sa stal pre dizajnérov voľbou číslo jedna:

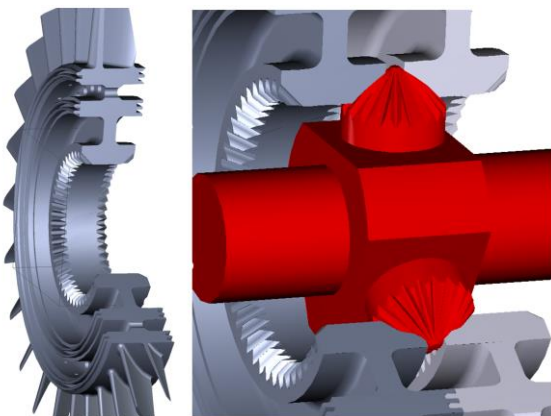
- úspora hmotnosti- zvyčajne až 20 – 30%
- úspora materiálu- v prípade využitia aditívnej manufaktúry AM (3D tlač) ako technológie výroby je možné značne redukovať straty materiálu a množstvo odpadu vznikajúceho pri použití tradičnej výrobnéj techniky (frézovanie) v opačnom prípade možno vznikajúci odpad pri výrobe vnímať ako negatívny aspekt výroby dizajnu BLISK
- vysoká aerodynamická účinnosť
- zvýšenie spoľahlivosti a životnosti - eliminácia únaravových javov a poškodení závesov
- redukcia počtu komponentov- redukcia počtu komponentov, nakoľko lopatka a disk tvoria samo o sebe jeden komponent
- úspora paliva- BLISK môže dokázateľne pri výkonných motoroch spôsobiť v konečnom dôsledku pokles špecifickej spotreby paliva až o 8% [10]

3.2.2. *Aditívna výroba integrálne lopatkovaného disku*

Inovatívny a zároveň efektívnejší spôsob výroby integrálne lopatkovaného disku predstavuje možnosť využitia technológie kovovej 3D tlače. Na rozdiel od tradičného výrobného postupu, ktoré často vedie k deformácií či odštiepeniu je využitím priemyselnej 3D tlače možné zachovať funkčnosť kompaktnosť ako aj spoľahlivosť lopatkovaného disku. V leteckom priemysle sa pre účely výroby Blisk využívajú prioritne metódy tavenia elektrónovým lúčom (EBM- Electron Beam Melting), priameho laserového spekania kovov (DMLS- Direct Laser Sintering) ako aj metóda selektívneho laserového spekania (SLS- Selective Laser Sintering).

4. Ozubené súkolesie ako mechanizmus otáčania protibežných rotorov stupňa axiálneho kompresora

Experimentálny systém protichodného otáčania rotorov, a teda funkcionality stupňa axiálneho kompresora je zabezpečená pomocou mechanizmu kuželového ozubeného kolesa, zabezpečujúceho zhodné otáčky rotorov ($n_1 = n_2$), len v opačnom zmysle. Pre účely vysvetlenia ozubeného súkolesia ako mechanizmu protibežného otáčania rotorov je v modeloch uvádzané kuželové ozubené koleso s priamymi zubmi. To sa predovšetkým používa pre menej náročné prevody a nižšie obvodové rýchlosti. Rotory axiálneho kompresora predstavujú pomerne zložitejšiu aplikáciu, preto možno uvažovať aj nad prevedením kuželového súkolesia s šikmými resp. zakrivenými zubmi, ktoré je vhodnejšie pre vyššie rýchlosti. Dôvodom výberu ozubeného súkolesia ako mechanizmu otáčania protibežných rotorov je fakt, že ozubené prevody ako také pracujú s pomerne vysokou účinnosťou vo veľkom rozsahu otáčok. Dôležitým faktorom je rovnako ich vysoká životnosť a spoľahlivosť. Vnútročné ozubenie ako súčasť integrálne lopatkovaného disku vytvára dostatočný priestor pre umiestnenie hriadeľa motora a systém mazania. V takto koncipovanom systéme je mazanie veľmi dôležitým faktorom. Prvým a najdôležitejším dôvodom prečo mazať je zníženie trenia v oblasti medzi bokmi zubov. Sekundárnym a rovnako podstatným je odvod tepla z miesta záberu, pričom výber maziva sa odvíja od prevádzkovej teploty ako aj obvodovej rýchlosti a materiálu zubov.

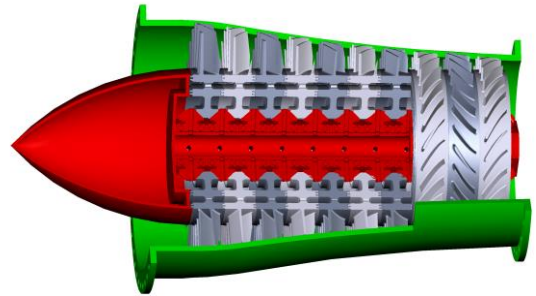


Obrázok 60: Detailný pohľad návrhu mechanizmu otáčania protibežných rotorov pomocou ozubeného prevodu. Zdroj: Autori.

4.1. Experimentálny návrh pohonu mnohostupňového protibežného axiálneho kompresora

Takmer všetky turbínové motory pracujú na systéme generátora plynu za ktorým je umiestnená turbína, ktorá

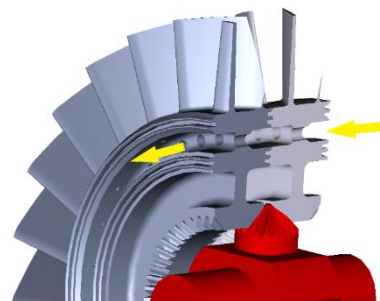
odoberá časť vzniknutej energie, mení ju na energiu mechanickú a skrz hriadeľ poháňa kompresor. Rovnaká teória je uplatnená aj v prípade tohto experimentálneho modelu až na jednu výnimku. V tomto prípade je hriadeľ statická časť konštrukcie a pohon kompresora od turbíny je zabezpečený prostredníctvom pohonu výhradne posledného stupňa, ktorý skrz ozubené prevody uvedie do pohybu každý predchádzajúci stupeň.



Obrázok 61: Experimentálny návrh mnohostupňového axiálneho kompresora. Zdroj: Autori.

5. Systém prívodu vzduchu s vysokým tlakom za účelom ofukovania lopatiek

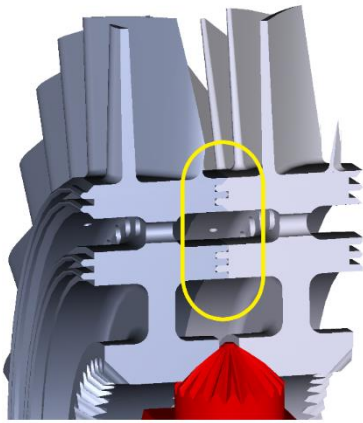
Prívod vzduchu s vysokým tlakom zo zadnej časti kompresora do oblasti prvých stupňov je zabezpečený pomocou otvorov vytvorených v oblasti disku rotora (viď Obrázok 7). Takto vytvorené otvory v systéme mnohostupňového axiálneho kompresora tvoria pomyselný kanál prívodu vzduchu s vysokým tlakom.



Obrázok 62: Detailný pohľad na systém eliminácie turbulentného prúdenia. Zdroj: Autori.

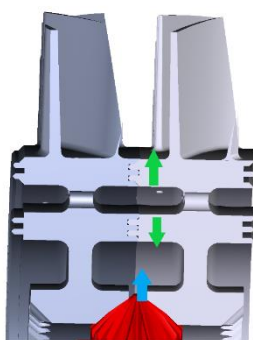
5.1. Labyrintové tesnenie

V systéme prívodu vzduchu s vysokým tlakom z oblastí posledných stupňov kompresora je nevyhnutné zabezpečiť minimálne tlakové straty počas prechodu skrz jednotlivé stupne. Preto bolo nevyhnutné zabezpečiť kanál medzi rotujúcimi diskami tesnením tak, aby vzduchu o vysokom tlaku neunikal resp. únik bol minimálny. Sekundárnou no rovnako podstatnou je tesniaca funkcia, ktorej úlohou je zabezpečiť obmedzenie prietoku oleja z oblasti ozubeného mechanizmu rotorov do priestoru medzilopatkového kanálu kompresora.



Obrázok 63: Systém tesnenia medzilopatkového priestoru. Zdroj: Autori.

Systém tesnenia je založený na relatívnom pohybe dvoch rotorov medzi ktorými sa nachádza v tvare labyrintu zložitá drážka s rozmermi uvádzanými do niekoľkých μm . Nakoľko sa jedná o bezkontaktné tesnenie s určitou možnosťou vylúčiť riziko opotrebenia trením. Nedokonalosť systému je však, že tesnenie nezabezpečí dokonalú tesnosť priestorov s rozdielnymi tlakmi média v nich. Tlakový gradient v oblasti kanála prívodu vzduchu s vysokým tlakom a oblasti lopatiek rotora môže spôsobiť mierny únik as tým spojené tlakové straty a najmä v prípadoch, kedy nastáva pokles tlaku v skrini kompresora napr. pri nízkotlakovom režime keď je kompresor v nečinnosti. Týka sa to režimov kedy je motor v nízkych otáčkach alebo voľnobehu. Rovnako v uvedených režimoch možno predpokladať únik maziva od ozubeného mechanizmu rotorov smerom ku kanálu prívodu vzduchu o vysokom tlaku a následne do oblasti medzilopatkového priestoru kde nastáva stlačovanie. Práve systém kanála prívodu vzduchu o vysokom tlaku predstavuje riešenie. V konečnom dôsledku aj v nízkootáčkových režimoch, aj keď na úkor úniku vzduchu s vysokým tlakom, zamedzíme alebo aspoň eliminujeme prenikanie maziva smerom k lopatkám. Následne s rozbehom motora vzduch s vysokým tlakom aj pri absencii kanála olej vytlačí.



↑ - možný únik vzduchu s vysokým tlakom

↑ - možný únik maziva z oblasti ozubeného mechanizmu rotácie protibežných rotorov

Obrázok 64: Možný únik vzduchu s vysokým tlakom a únik oleja. Zdroj: Autori.

Problematiku prenikania tlakového vzduchu do priestorov, kde olej zabezpečuje mazanie ozubených prevodov a ložísk rieši, ako je bežnou praxou, odstredivý odlučovač vzduchu a plynov z oleja, ktorý v mazacom systéme na základe vplyvu odstredivej sily separuje olej od vzduchu a plynov. Olej je potom opäť

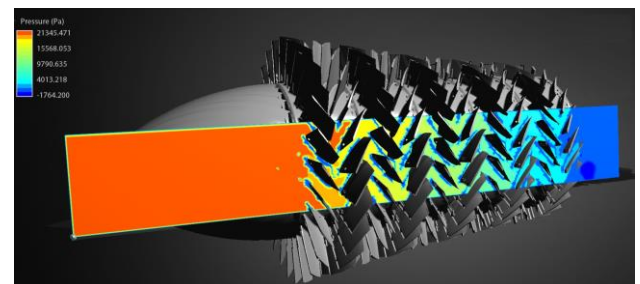
použiteľný na ďalšie mazanie a separované plyny unikajú ventiláčnym otvorom do atmosféry.

6. Výsledky analýz optimálneho prúdenia

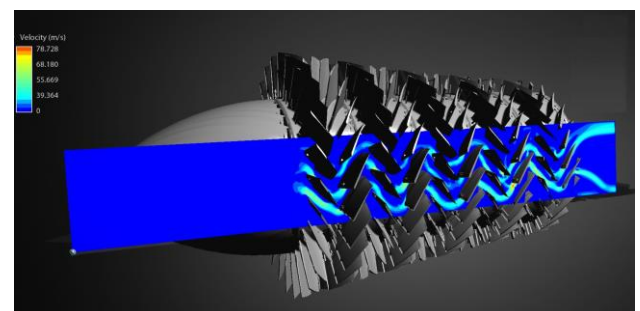
Všeobecne platí, že v každom stupni postupne prebieha premena mechanickej energie dodanej od turbíny, ktorá je pomocou hriadeľa prepojená s rotorom kompresora. Zatiaľ čo rotorová časť zodpovedá za premenu dodanej mechanickej energie na energiu kinetickú, úlohou statorových lopatiek je jej následná premena na energiu tlakovú. Preto bolo cieľom analýzy sledovať a verifikovať predpokladané teoretické zmeny parametrov rýchlosti prúdenia ale najmä parametru celkového tlaku v oblasti pred a za experimentálnym stupňom kompresora, v ktorom absentujú lopatky statora a je tvorený výhradne rotujúcimi časťami. Prúdenie bolo možné pozorovať a zobraziť prostredníctvom prúdnic, častíc, vektorov prípadne pozorovaním izoplochy, pričom výsledné hodnoty sú rozdelené do viacerých oblastí a každej z uvedených oblastí je priradená farba z farebnej legendy pomocou ktorej je možné rýchle a jednoduché farebné rozlíšenie a vyhodnotenie výsledkov.

6.1. Statické simulácie

Prvým krokom bol vytvorenie jednoduchých statických simulácií softvérom Ansys Discovery Live a Autodesk Flow, kde sa časti kompresora vôbec nepohybovali. Terčom pozorovania bol výhradne charakter prúdenia vzduchu počas obtekania takýchto stojatých lopatiek. Keďže sa stupne (rotory) neotáčajú, voči prúdiacemu vzduchu vzniká len odpor, ktorý spôsobuje postupný pokles tlaku smerom k zadným stupňom kompresora.

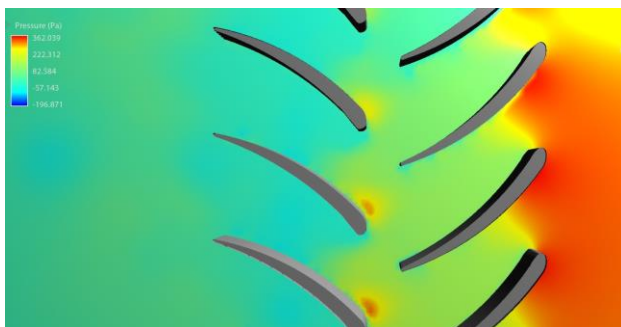


Obrázok 65: Priebeh zmeny parametra tlaku prechodom stupňami protibežného kompresora. Zdroj: Autori.



Obrázok 66: Priebeh zmeny parametra rýchlosti prechodom stupňami protibežného kompresora. Zdroj: Autori.

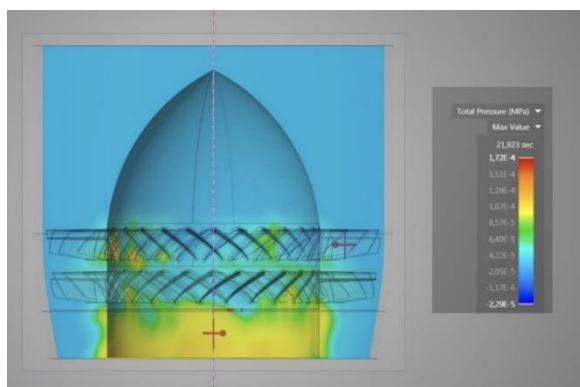
Podobne tomu bolo aj v prípade samostatného stupňa, zloženého z dvojice nepohyblivých mreží:



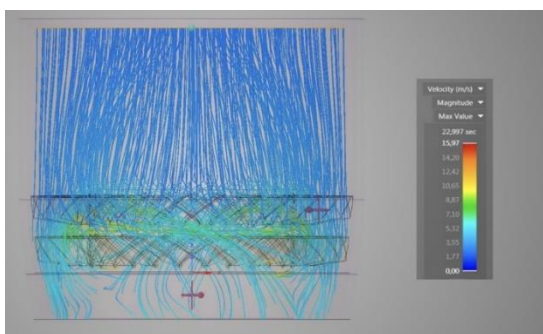
Obrázok 67: Detailný pohľad na priebeh zmeny parametra tlaku prechodom stupňa experimentálneho axiálneho protibežného kompresora. Zdroj: Autori.

6.2. Dynamické simulácie

Pre účely overenia prúdenia zmien parametrov vzduchu v kompresore počas jeho prevádzky, konkrétne zistenie funkcionality stlačovania bolo, nevyhnutné vytvoriť simulácie dynamické, teda s otáčajúcimi sa rotormi. Vzhľadom na obmedzenia softvérového vybavenia a obmedzenia licencie bolo možné vytvoriť simuláciu maximálne jedného stupňa, zloženého z dvojice protibežných rotorových mreží. Výsledky analýz protibežného rotujúceho stupňa axiálneho kompresora sú zobrazené na Obrázku 13. Na vyhodnotenie výkonu navrhnutých rotorov sa uskutočnili simulácie celkového tlaku, pozorované oblasti boli najmä oblasť vstupu do rotora 1 a výstup z rotora 2, pričom otáčky rotorov 1 a 2 sú zhodné. Na vykonanej analýze farebného spektra simulácie, možno jasne pozorovať už pri jedinom stupni pomerne vysoký nárast celkového tlaku vzduchu čo poukazuje na úspešný návrh dizajnu.



Obrázok 68: Nárast parametra tlaku prechodom stupňa axiálneho kompresora s protibežnými rotormi. Zdroj: Autori.



Obrázok 69: Simulácia rozvírenia prúdu vzduchu pomocou prúdnic. Zdroj: Autori.

Problém značného rozvírenia vzduchu rotormi je v konečnom dôsledku eliminovaný systémom vyfukovania vzduchu s vysokou hodnotou tlaku privádzaného z oblasti posledných stupňov kompresora, čím súčasne je súčasne zabezpečená dostatočná kompresná účinnosť navrhnutého experimentálneho kompresora a zhodnotená jeho reálna funkčnosť v prípade aplikácie ako komponentov leteckých motorov.

7. Benefity konštrukcie axiálneho kompresora s protibežnými rotormi

7.1. Účinnosť a celkové stlačenie v stupni kompresora

Podstatou zvýšenia účinnosti stupňa protibežného kompresora je systém dvoch rotorov, vďaka ktorým je stupeň schopný dosiahnuť vyšší kompresný pomer, teda pomer statického tlaku na výstupe z druhého rotora k hodnote statického tlaku na vstupe do rotora prvého. Treba si uvedomiť jeden zásadný fakt. V prípade klasického usporiadania stupňa kompresora (typu stator-rotor) máme rotor, ktorého úlohou je urýchliť prúd vzduchu a stator, ktorý zodpovedá za jeho spomalenie a ďalší nárast hodnoty tlaku. Takže ak máme v klasickom stupni kompresora rotor s otáčkami cca 10 000 ot./min a stator, ktorého otáčky sú nulové, takýto stupeň dosahuje porovnateľne menšie stlačenie a teda účinnosť ako stupeň, ktorého druhý rotor taktiež dosahuje určité otáčky. V jednoduchosti vysvetlené, dodatočné otáčanie protibežných rotorov môže znamenať vyššie hodnoty hmotnostného toku. Kompresor môže potom dosahovať vyšší stupeň stlačenia v jednom stupni, ak budeme definovať stupeň ako sústavu dvojice rotorových mreží, ktoré sa navzájom otáčajú opačným smerom. Pri správnom nastavení lopatiek oboch rotorových stupňov je možné predpokladať aj dostatočne vysokú kompresnú účinnosť takéhoto stupňa. No tá by zodpovedala iba tzv. výpočtovému režimu práce kompresora. Vo všetkých ostatných režimoch práce bude pravdepodobne dosahovať nižšie kompresné účinnosti.

7.2. Redukcia hmotnosti a dĺžky

Väčšina súčasných kompresorov sa za účelom dosiahnutia požadovaného stlačenia a účinnosti skladá z niekoľkých stupňov statorových a rotorových lopatiek radených za sebou. Každý ďalší stupeň na úkor dosahovania požadovaných parametrov znamená vyššiu hmotnosť, náklady, dĺžku a celkové rozmery kompresora, ktoré sú z komplexného hľadiska pre výkon lietadla negatívne. V protibežnom usporiadaní je možné elimináciu statorových lopatiek rapídne redukovať hmotnosť samotného stupňa, a teda aj hmotnosť celého kompresora. Skonstruovaním viacstupňového vysokorýchlostného protibežného kompresora je možné redukovať hmotnosť kompresora a motora ako celku pri zachovaní požadovaných vysokých hodnôt parametrov stlačenia a účinnosti, čím v konečnom dôsledku nepriamo znižujeme hodnoty špecifickej spotreby paliva.

8. Záver

Technologická životaschopnosť a výrobné náklady sú kľúčovými faktormi úspešného vývoja nových motorov. Realizovateľnosť vylepšených leteckých motorov preto závisí od výsledkov výskumných a vývojových činností, najmä tých, ktoré sa týkajú zlepšenia materiálov, štruktúr avšak predovšetkým samotného dizajnu. Rovnako ako všetky špičkové výrobky zahrňujúce vo svojej výrobe inovatívne techniky aj letecké motory čelia potrebe neustáleho zdokonaľovania svojich technických možností, pokiaľ ide o dosahovanie vyššej efektivity, nižšej spotreby paliva, vyššej spoľahlivosti a bezpečnosti a súčasne nevyhnutnosti splniť reštriktívne právne predpisy v oblasti životného prostredia.

Experimentálny model, ktorý vyniká elimináciou statorových lopatiek, spolu s navrhovaným „dutým“ dizajnom lopatiek rotorov predstavuje rapidný pokles hmotnosti nielen samotného stupňa kompresora ale komplexne celého kompresora. Pridanú hodnotu dizajnu lopatiek predstavuje možnosť privádzania vzduchu s vysokým tlakom z oblasti posledných stupňov kompresora za účelom „laminarizácie“ prúdu ako prevencie proti odtrhnutia prúdu vzduchu na lopatke a následného javu pumpáže. Záujem a myšlienka kontra-rotácie rotorov stupňa axiálneho sa objavili s cieľom dosiahnuť značný vysoký nárast tlaku a redukciu hmotnosti v každom stupni axiálneho kompresora. Skonstruovaním viacstupňového protibežného kompresora je možné redukovať hmotnosť kompresora a motora ako celku pri zachovaní požadovaných vysokých hodnôt parametrov stlačenia a účinnosti, čím v konečnom dôsledku nepriamo znižujeme hodnoty špecifickej spotreby paliva.

Je nevyhnutné poznamenať, že experimentálny návrh si do budúcnosti za účelom aplikácie v reálnej prevádzke vyžaduje mnohé detailnejšie a odbornejšie analýzy týkajúce sa 3D analýz prúdenia mezilopatkovým priestorom rovnako pevnostné analýzy a skúmanie spoľahlivosti a životnosti samotného ozubeného mechanizmu kontra-rotácie. Avšak už v súčasnosti môžeme s istotou predpokladať, že prípadne priaznivých výsledkov odborných analýz by navrhovaný protibežný kompresor predstavoval radu benefitov ako napríklad: redukcia hmotnosti leteckých turbokompresorových motorov, zmenšenie rozmerov, vyššie hodnoty stlačenia kompresora, vyššia účinnosť kompresora, a teda celého motora s finálnym dôsledkom na parameter špecifickej spotreby paliva, pričom reálne použitie by bolo možné pre aplikácie budúcich leteckých motorov s axiálnym prietokom.

PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 048ŽU-4/2020 s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

Referencie

- [1] KRÍŽ, J. 2004. Lietadlové pohonné jednotky, Žilina: Žilinská univerzita, 2004. 264 s.
- [2] ČERŇAN, J. – HOCKO, M. 2020. Turbínový motor I.: Teória a konštrukcia, Žilina: EDIS-vydavateľské centrum ŽU, 2020. 335 s. ISBN 978-80-554-1673-1

- [3] OTT, A. Základy teorie a konstrukce leteckých lopatkových motorů, část I., VA AZ Brno
- [4] BASKHARONE, Erian. 2006. Principles of Turbomachinery in Air-Breathing Engines : Overview of Turbomachinery Nomenclature Overview7, [online]. Dostupné na internete: <https://www.globalspec.com/reference/74123/203279/c-hapter-two-overview-of-turbomachinery-nomenclature> (cit. 21.02.2021)
- [5] Turbine Engines: Turbine section, [online]. Dostupné na internete: <http://www.aviationchief.com/turbine-engines.html#> (cit. 22.02.2021)
- [6] ADAMEC, J.- KOCÁB, J. Letadlové motory. Praha: KANT, 2000, 176 s. ISBN 80-902-9140-6.
- [7] PUNDIR, D – SHARMA, P. 1992. A Study of Aerodynamic Performance of a Contra-Rotating Axial Compressor Stage. In Defence Science Journal [online]. 1992, Vol. 42, No. 3, p. 191-199, Dostupné na internete: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.967.3281&rep=rep1&type=pdf> (cit. 10.03.2021)
- [8] KUMAR, B. a kol. 2016. Single Shaft Contra Rotating Axial Compressor. In International Journal of Applied Engineering Research [online]. 2016, Vol. 11, No. 11, p. 7592-7596, Dostupné na internete: <https://studylib.net/doc/18845473/single-shaft-contra-rotating-axial-compressor> ISSN 0973-4562 (cit. 10.03.2021)
- [9] TIWARI, M. 2014. Axial Compressor Design with Counter-Rotation and Variable RPM for Stall Mitigation: dizertačná práca. Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University, 2014. 64 s.
- [10] KUMAR, R. 2013. A review on BLISK technology. In International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. India: Department of Mechanical Engineering, VNR Vignana Jyothi Institute of Engineering & Technology, [online]. 2013. ISSN: 2319-8753, p. 1353- 1358. Dostupné na internete: http://www.ijirset.com/upload/may/9_%20A%20REVIEW.pdf (cit. 5.05.2021)
- [11] Bugaj, M. 2015. Aeromechanika 1: základy aerodynamiky. 1. vyd. - Bratislava : DOLIS, 2015. - 208 s., ilustr. - ISBN 978-80-970419-3-9.