

Oponentský posudek k disertační práci

Analýza proudění v labyrintových ucpávkách malého turbovrtulového motoru

Autor: Ing. Michal Čížek

Dosažení v disertaci stanovaného cíle:

Předložená disertační práce o rozsahu 77 stran důvodové zprávy a 27 stran příloh, včetně použité literatury, seznamu obrázků a tabulek, si klade za cíl, jak je uvedeno v jejím názvu „Analýza proudění v labyrintových ucpávkách malého turbovrtulového motoru“, analyzovat proudění vzduchu, případně plynu, v labyrintových ucpávkách s dominantním zaměřením na velikost celkové teploty při jejím průchodu ucpávkou.

Disertant si stanovil 3 hlavní cíle, a to: vytvoření numerického CFD modelu, ověření vypočtených dat z CFD simulace pomocí experimentu a návrh inovativního přístupu k návrhu labyrintových ucpávek.

Byly vytvořeny základní modely pro 3 různá nastavení radiální vůle a pro 3 různé počty břitů labyrintových ucpávek. Základní modely byly vytvořeny pro konstantní otáčky rotoru. Dále byly vytvořeny modely s konstantní radiální vůlí a konstantním počtem břitů při rozdílných otáčkách. Nakonec byly vytvořeny CFD modely, které měly dokumentovat korektnost výsledků CFD analýzy.

K ověření korektnosti analyzovaných dat pomocí CFD modelu byly zvoleny celkem dva způsoby. Prvním bylo ověření na laboratorním zařízení, které se nachází na ČVUT a v druhém případě bylo využito naměřených dat z pozemních motorových zkoušek turbovrtulového motoru GE Catalyst.

Na konci práce je sestaven koncept zařízení, které by na základě vypočtených a analyzovaných dat řídilo velikost radiální vůle v závislosti na jejím tepelném zatížení v provozu.

Stanoveného cíle bylo dosaženo.

Úroveň rozboru současného stavu v disertaci řešené problematiky:

V práci je zohledněn současný přístup k řešení daného problému, který vychází z předpokladu konstantní celkové teploty při průchodu plynu labyrintovou ucpávkou. Způsoby řešení a návrhu proudění idealizovanou nebo reálnou ucpávkou při jejím navrhování a konstruování v konstrukčních kancelářích.

Teoretický přínos disertační práce:

V práci byla podrobně popsána analýza labyrintové ucpávky s ohledem na parametry plynu při jejím průchodu. Disertant zde předkládá vliv na tyto parametry při změně tlakového spádu na ucpávce, počtu břitů a v neposlední řadě velikosti otáček rotoru. Tato analýza provedená přes CFD simulaci komerčním programem ANSYS CFX je následně podrobně

vyhodnocena a porovnána s experimentem. Pro oba případy (CFD analýza i experiment) byl popsán postup vyhodnocení na základě teorie rotujícího disku v tzv. nekonvenčním vyhodnocení výpočtů a měření.

Praktický přínos disertační práce:

V práci je ukázán praktický přístup pro konstruování a vyhodnocování labyrintových ucpávek pomocí CFD software. Samotné zaměření práce na zažitý předpoklad, že celková energie se při průchodu plynu v ucpávce nemění bourá standardní přístup konstruktérů k řešení tohoto problému.

V práci byly ukázány postupy pro definování úloh pomocí CFD modelů, jejich vyhodnocování a ověřování. Dále byly ukázány postupy pro tvorbu měření ucpávek a analýzu dat, včetně vyjádření jejich nejistot. Byl ukázán koncept zařízení, které by mohlo měnit radiální vůli za provozu a zlepšovat tak výkonové parametry turbínových motorů.

Vhodnost použitých metod řešení:

Metody pro výpočet ucpávek, jak algebraické, tak CFD, jsou v průmyslové praxi běžně používané. Stejně tak metody pro měření a následnou analýzu naměřených dat. Použité experimentální vybavení, metody měření či analytické přístupy lze považovat za standardní.

Zde bych si dovilil poukázat na metodiku vyhodnocování parametrů plynu (tlaku, teploty, hmotnostního průtoku, otáček hřídele) při průchodu ucpávkou a eliminaci nestejných okrajových podmínek tlaku, teploty a otáček hřídele při experimentálních zkouškách, které v práci disertant vyhodnocoval jako poměrné vůči vstupním referenčním parametrům plynu. Raději, než metodiku vyhodnocování přes poměrné parametry bych doporučil redukci výstupních parametrů na okrajové podmínky použité v CFD analýze. Ve standardní motorářské praxi se při vyhodnocování termodynamických parametrů leteckých motorů tato metodika používá. Redukce je založena na předpokladech, které by v této práci byly splněny a zároveň by se neztrácel přehled o absolutních hodnotách měřených nebo počítaných parametrů.

Způsob, jak byly použité metody aplikovány:

Požitá metodika byla v této práci zpracovaná zcela v rozsahu a standardu, který je v současné době běžně využíván v průmyslové praxi.

V oblasti validace výpočtového modelu experimentem by se měl disertant více zabývat adiabatičností experimentálních zkoušek. U CFD analýzy byl tento předpoklad definován přímo v okrajových podmínkách výpočtu. U prvního experimentu na laboratorní ucpávce sám disertant vysvětluje, že nerovnost teplot na výstupu ze symetrické ucpávky může být zapříčiněna sdílením tepla z blízkého hnacího elektromotoru. U druhého experimentu, který byl realizován přímo na

leteckém motoru se o tomto předpokladu, v celém rozsahu labyrintové ucpávky a rozsahu otáček motoru, dá pochybovat.

V práci se disertant také zmiňuje o kalibraci měřící techniky, ale protože dominantní téma této disertační práce je prokázání nárůstu celkové teploty při průchodu plynu Labyrintovou ucpávkou pomocí teplotních sond na vstupu a výstupu z ucpávky, bylo by dobré se zmínit o kalibraci těchto sond. Restituční faktor těchto sond je silně závislý na konstrukčním provedení dané sondy a v závislosti na Machově čísle může být rozdíl v měřené a skutečné teplotě až 20 °C v rámci zmiňovaného experimentu.

Prokázání odpovídajících znalostí v oboru:

Zvládnutím prezentované úlohy disertant prokázal široké znalosti v oboru, kterým se tato práce zabývá. Rovněž nechybějí standardní inženýrské dovednosti, které disertant získal v průmyslové praxi.

V oblasti použité literatury disertant prokázal, že co do rozsahu použité literatury (85 publikací a citací) je na dobré úrovni. Po stránce publikační činnosti (11 publikací zabývajících se problematikou ucpávek) disertant prokázal svým spoluautorstvím, že se touto problematikou intenzivně zabývá nejen teoreticky, ale i experimentálně. Navíc disertant v rámci svého zaměstnání ve společnosti GEAC řeší danou problematiku přímo v rámci pracovních úkolů.

Formální úroveň:

Po stránce formální má práce dobrou úroveň (i přes některé připomínky uvedené níže). Rozsah sdělených informací je v dostatečném rozsahu a na požadované úrovni. Grafická a vypočítací úroveň příloh a grafů splňuje požadovanou úroveň.

Ve své práci by se disertant měl více zaměřit na komplexnost použitých symbolů v samotné práci a uvedených v seznamu symbolů na začátku práce. Pro vyšší přehlednost rozlišit symbol a index. Pokud to jde, vyhnout se při jejich definování podobnému názvu. V některých případech (uvedených níže) chybí i definice použité proměnné. Příklady uvádím níže:

- 1) Celková teplota (T_c) má index c, statická teplota (T_s) má index s. Celková entalpie nemá index žádný. Statická entalpie, ač se v práci vyskytuje, v seznamu proměnných není uvedena.
- 2) V seznamu použitých symbolů je definován průtokový součinitel α , ale také součinitel průtoku φ .
- 3) Některé proměnné nejsou definovány ani v textu, ale ani v seznamu symbolů. Str. 51, rovnice (29) p_{SF} a p_{SL} , str. 34, rovnice (22) T_{CIN} , str. 43, rovnice (27) h_s .

Připomínky a poznámky k disertační práci:

- 1) Str. 5, citace „*vzduch izochoricky expanduje*“, v daném popisu děje je to změna izoentropická, tzn. izoentropická expanze.
- 2) Str. 5, pokud platí rovnice (3), musí rovnice (4) obsahovat ještě člen rychlosti w
- 3) Str. 6, zde je uveden hrubý popis výpočtu proudění plynu přes tzv. reálnou ucpávku. Rovnice jsou vytrženy z kontextu, a ne zcela korektně popisují tento výpočet. Doporučuje buď uvést celý výpočet nebo jen odvolávku na literaturu.
- 4) Str. 9, uvedená výška břitu 0,0024 m je v nepoměru k šířce břitu ucpávky 0,0057 m. Jeden z uvedených rozměrů není korektní.
- 5) Str. 16, disertant píše, že pro CFD analýzu byl použit turbulentní model, cituji „*k-ε EARSM - zjednodušená verze modelu k-ε*“. Použitý model má název EARSM (Explicit Algebraic Reynolds Stress Model) a je zjednodušenou verzí modelu RSM. Použití tohoto modelu bylo správné, protože jako jeden z mála dvou rovnicových modelů turbulence umí dobře modelovat koutové víry.
- 6) Str. 17, cituji „*upřednostněn model k-ε, vzhledem k rychlosti výpočtu a k faktu, že se nejedná o disipaci energie, nýbrž o nevratnou přeměnu*“. Disipace energie je reprezentovaná nárůstem entropie, tudíž je to nevratný děj.
- 7) Str. 45, cituji „*Reynoldsovo číslo se zvětšuje díky jednak větší rychlosti a jednak kvůli zvětšující se kinematické viskozitě*“. Kinematická viskozita je v definici Re čísla ve jmenovateli, a proto jejím růstem by Re číslo klesalo.

Dotaz na autora:

V práci se na několika místech vyskytuje vysvětlení daného stavu s odvoláním na skutečnost, že jde o proudění laminární nebo turbulentní. Na str. 35 se přímo říká, že laminární proudění je do 0,8 poměrných otáček hřídele a od 0,8 výše je proudění v ucpávce turbulentní.

Protože v práci není nikde uvedeno kritérium, podle kterého by se tato skutečnost stanovila, prosím o vysvětlení tohoto tvrzení

Závěr

Disertační práce je přínosem v aplikaci problému návrhu labyrintových ucpávek. Disertant prokázal schopnost orientace ve složitém technickém oboru. Předkládá nástin metodiky návrhu labyrintových ucpávek v aplikaci turbínových motorů.

Disertační práci doporučuji k obhajobě.

