

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Analýza proudění v labyrintových ucpávkách malého turbovrtulového motoru

Ing. Michal Čížek

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní stroje a zařízení

Školitel: *doc. Ing. Zdeněk Pátek, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

červen 2021

Název anglicky: Labyrinth seal air flow of small aircraft turbopropeller engine analysis

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu letadlové techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Michal Čížek

Ústav letadlové techniky, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Karlovo náměstí 13, Praha 2, 12000

Školitel: doc. Ing. Zdeněk Pátek, CSc

Ústav letadlové techniky, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Karlovo náměstí 13, Praha 2, 12000

Školitel-specialista: Ing. Roman Veselka

Centrum leteckého a kosmického výzkumu, Fakulta strojní ČVUT
v Praze

Jugoslávských partyzánů 1580/3, Praha 6, 16000

Oponenti:

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Dopravní stroje
a zařízení.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.

předseda oborové rady oboru Dopravní stroje a zařízení
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Anotace

Disertační práce se zabývá prouděním v labyrintových ucpávkách leteckého turbínového motoru. Labyrintové ucpávky se používají k nekontaktnímu těsnění hlavního pracovního prostoru motoru a tím zvětšení účinnosti motoru. Na rozdíl od jiných prací se nezabývá vlivem hmotnostního průtoku či profilu těsnění, nýbrž vlivem teploty proudu plynu na proudění v ucpávkách při jejich různém nastavení.

Vlastní práce analyzuje postup výpočtu proudění plynu v labyrintové ucpávce pomocí numerických metod. Dále se zabývá konstrukcí měřícího zařízení pro experimentální ověření metody vypočtených hodnot stejně jako popisem a ukázkou experimentu. Jsou ukázány výsledky měření, které se uskutečnily na skutečném motoru na pozemní zkušebně. Nakonec je ukázán nově navržený inovativní přístup k labyrintovým ucpávkám, který by mohl v konečném důsledku zajistit vyšší výkony motoru.

Prezentované výsledky jsou použitelné v obecné průmyslové praxi, která se zabývá konstrukcí nejen turbínových leteckých motorů, ale také např. plynových turbín, které jsou hojně rozšířené v loďařském průmyslu.

Klíčová slova

Letecký turbínový motor, labyrintová ucpávka, CFD, měření proudění v labyrintových ucpávkách, inovativní přístup k labyrintovým ucpávkám

Abstract

The thesis deals with internal labyrinth seal flow in an aircraft turbine engine. The labyrinth seals are using with contactless sealing in internal air flow. Based on the goal of better sealing, it should be possible to increase the efficiency and general performance parameters of the engine. Unlike other works, it does not deal with the influence of the mass flow or the profile of the seal, but with the influence of the temperature of the air flow in the seals at their different settings on the flow.

The work itself shows the method for calculating the air flow in a labyrinth seal using numerical methods. It also deals with the construction of a measuring device for verifying the calculated values as well as the description and demonstration of the experiment. The results of measurements performed on a real engine at a ground test facility are shown. Finally, a newly designed innovative approach to labyrinth seals is shown, which could ultimately provide higher engine performance.

The presented results are applicable in general industrial practice, which deals with the construction of not only turbine aircraft engines, but also, for example, gas turbine machines widely used in the shipbuilding industry.

Key words

Aircraft turbine engine, labyrinth seal, CFD, labyrinth seal measurement, labyrinth seal innovative approach

Použité označování

Zkratka / Symbol	Jednotka	Popis
a	[m]	Výška břitu
b	[m]	Šířka břitu
BEZ		Výška kanálu bez břitů
CORR		Poměrový
e	[-]	Počítaný koeficient
h	[J.kg ⁻¹]	Celková entalpie
n	[min ⁻¹]	Otáčky
ps	[Pa]	Statický tlak
R	[m]	Poloměr rotoru
RC	[m]	Radiální vůle
REF		Referenční
t	[m]	Rozteč břitů
T _C	[K]	Celková teplota
μ	[-]	Průtokový součinitel
ω	[rad.s ⁻¹]	Úhlová rychlost

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Současný stav.....	1
3.	Cíle disertační práce.....	3
4.	CFD výpočet	3
5.	Ověření výpočtů.....	8
5.1.	Ověření na laboratorním zařízení	8
5.2.	Ověření na skutečném turbovrtulovém motoru	10
5.3.	Porovnání.....	10
6.	Návrh inovativního přístupu k labyrintovým ucpávkám.....	12
7.	Důsledky pro vědu a praxi	13
7.1.	Důsledky pro vědu.....	13
7.2.	Důsledky pro praxi	14
8.	Závěry	14
9.	Použitá literatura	15
10.	Autorovy publikace	16

1. Úvod

Práce se zabývá labyrintovými ucpávkami leteckého turbínového motoru. Labyrintové ucpávky se používají k bezkontaktnímu těsnění pracovního prostoru motoru a zabraňují tak nežádoucímu průtoku plynu, který by mohl být využit jinde. Především se používají na těsnění tzv. sekundárních vzduchových cest motoru tedy místech, které se nacházejí mezi otáčející se hřídelí a statorovým protikusem. Jsou to místa, která neumožňují těsnit pracovní prostor pomocí např. pístního kroužku.

Výzkum a vývoj labyrintových ucpávek začal již s vývojem parních turbín, které jsou hodně zastoupeny v energetice v souvislosti s přetékáním plynu nad rotujícími lopatkami a tak ke ztrátě tepelné energie pracujícího plynu ([1], [2] a [3]). Zkušenosti získané vývojem parních turbín byly následně použity v letectví. Konkrétně se jednalo o použití turbokompresorových jednotek u pístových spalovacích motorů [4]. S rozvojem reaktivních motorů ve 30. letech 20. století se ale zkušenosti začaly aplikovat i v leteckých turbínových motorech [5].

S rozvojem výpočetní techniky bylo možné rozšířit do té doby hojně používané 1D algebraické metody výpočtu. Pomocí numerických simulací proudění je možno dosáhnout vyšších vypovídajících možností výsledků oproti 1D analýze a tím také ke zvětšení účinnosti a provozní spolehlivosti konkrétního stroje. Neméně důležité je ale také ověření vypočtených hodnot a potvrzení závěrů měření a sice nejen měření na speciálně pro tyto účely vytvořeném zařízení, ale i na konkrétním turbínovém motoru.

Z důvodů dosažení stále se zvyšující účinnosti strojů v letectví byla vypracována i tato práce, díky jejímž závěrům je možné optimalizovat konstrukční procesy návrhu labyrintových ucpávek turbínového motoru.

2. Současný stav

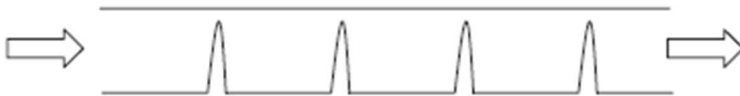
Návrh labyrintových ucpávek a jejich použití se prováděl paralelně s rozvojem turbosoustrojí v průmyslu. Během tohoto výzkumu bylo cílem najít optimální tvar břitů při otáčkách hřídele 14000 min^{-1} [6].

Kontinuální vývoj pochopitelně probíhal i na parních turbínách, kde se zkoumá hlavně vliv přetékání páry na špičkách lopatek a tím dochází ke snížení účinnosti. Labyrintové ucpávky se umísťují na špičky rotujících lopatek a tím se brání nežádoucímu hmotnostnímu průtoku [3] a [7]. V oblasti parních turbín se otáčky pohybují kolem 4000 min^{-1} – viz. [1], [7], [8], [9] a [10]. V letectví se tento problém diskutuje v [5], [11] a [13], přičemž otáčky hřídele u turbínových motorů se nacházejí okolo 40000 min^{-1} – viz. [5], [11], [13] a [14]. Vliv sekundárních vzduchových cest na termodynamické

parametry leteckého motoru je uváděn v [15]. Je zde hlavně pojmenováván postup výpočtu termodynamických parametrů jednotlivých částí motoru i s vlivem ztráty způsobené sekundárním vzduchem.

Labyrintová ucpávka slouží k omezení průtoku plynu skrz ucpávkou. Není ale pochopitelně možné hmotnostní průtok zcela eliminovat. Ucpávka pracuje na základě principu vytvoření úzkého prostoru mezi rotujícím hřídelem a statorem tzv. radiální vůle, kde proudící plyn expanduje do následující tzv. komůrky. Jednotlivé komůrky jsou od sebe odděleny brýty. V komůrkách se vytváří vír, který pomáhá zmenšovat kinetickou energii plynu.

Prakticky nejpoužívanější konstrukční uspořádání labyrintových ucpávek leteckého motoru je tzv. přímý labyrint, kdy jsou brýty umístěny na rotujícím hřídeli v jedné rovině (Obr. 1).



Obr. 1: Přímý labyrint [10]

V minulosti se používaly různé algebraické metody výpočtu hmotnostního průtoku labyrintovou ucpávkou viz [11] a [12]. S možnostmi, rozvoje výpočetní techniky se naskytly příležitosti použít numerickou simulaci proudění CFD (Computational Fluid Dynamics) ve velkém množství. V případě labyrintových ucpávek se začalo s 2D výpočtem ucpávky [16] a [17]. Následně se úlohy rozšířily na 3D aplikace [18] a [19]. Ve většině výše uvedených publikací je cílem počítat hmotnostní průtok plynu labyrintovou ucpávkou, a tak lépe predikovat výsledné důsledky na stroj jako celek.

Uvedené články popisují výpočet ucpávky při konstantních otáčkách hřídele. V [6] je ukázán výpočet proudění speciálně navržené ucpávky pro plynovou turbínu při konstantních otáčkách 14000 min^{-1} . V [20] je ukázán výpočet proudění ucpávkou v rozmezí otáček od 16000 do 30000 min^{-1} , kdy je hlavním výstupním parametrem hmotnostní průtok, resp. proudový koeficient. V uvedených člancích nebyl nikde nalezen výpočet celkové teploty v labyrintových ucpávkách na požadovaných otáčkách a tlakovém spádu.

3. Cíle disertační práce

Labyrintové ucpávky, které se používají u parních turbín v energetice, je poměrně podrobně popsána kapitola viz. [1], [7], [8], [9], [10] a [21]. Použití na parních turbínách se ale poměrně odlišuje od použití na letadlových motorech, kde se pohybujeme s otáčkami hlavního hřídele nad 30000 min⁻¹- viz. [13] a [22].

V uvedené literatuře je hojně publikován výpočet a měření tlaku a hmotnostního průtoku, které demonstrují těsnící účinek ucpávky. Nejen, ale publikován výpočet, resp. měření celkové teploty plynu v labyrintové ucpávce.

Cíle disertační práce:

- **Vytvoření modelu pro výpočet teploty plynu v labyrintové ucpávce letadlového turbínového motoru**
- **Ověřit vypočtená data**
- **Návrh inovativního přístupu k labyrintovým ucpávkám**

4. CFD výpočet

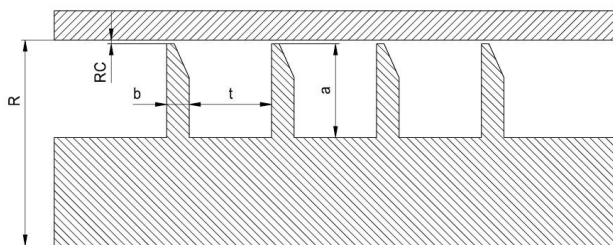
Pro výpočet byla zvolena labyrintová ucpávka, která se na turbínových motorech obvykle používá – rotující břit ve tvaru zkoseného lichoběžníku. Typické rozměry jsou:

- Výška břitu $a = 0,0024$ m
- Šířka břitu $b = 0,0057$ m
- Rozteč břitů $t = 0,0211$ m
- Poloměr rotoru $R = 0,089$ m

Pro lepší porovnání je zavedena poměrová radiální vůle RC_{CORR} [-], která je definována vztahem (1)

$$RC_{CORR} = \frac{RC}{RC_{BEZ}}, \quad (1)$$

kde RC_{BEZ} [m] je výška kanálu bez břitů. Celkem byly počítány 3 varianty poměrové radiální vůle a sice 0,02, 0,04 a 0,06. Schéma ucpávky je na Obr. 2.



Obr. 2: Schéma labyrintové ucpávky se 4 břity

Celkem byly vyhodnocovány statický tlak p_s , celková teplota T_C , průtokový koeficient μ a celková entalpie h . Všechny veličiny byly, podobně jako radiální vůle, počítány jako poměrové hodnoty viz. (2) až (5).

$$p_{SCORR} = \frac{p_s}{p_{SREF}}, \quad (2)$$

$$T_{CCORR} = \frac{T_C}{T_{CREF}}, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{Q}{Q_{KRIT}}, \quad (4)$$

$$h_{CORR} = \frac{h}{h_{REF}}, \quad (5)$$

kde Q je hmotnostní průtok, Q_{KRIT} je kritický hmotnostní průtok a veličiny s indexem REF jsou referenční. Seznam referenčních hodnot je v souladu s [22] v Tab. 1.

Veličina	Hodnota	Jednotka
p_{SREF}	101325	Pa
T_{CREF}	288	K
Q_{REF}	0,01	kg.s ⁻¹
h_{REF}	200000	J.kg ⁻¹

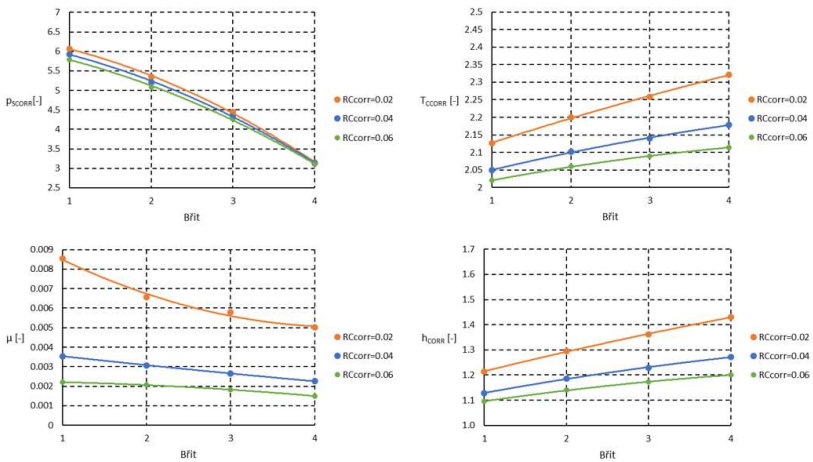
Tab. 1: Referenční hodnoty

Okrajové podmínky byly nastaveny jako konstantní tlakový spád $\Delta p = 360 \text{ kPa}$. Otáčky hřídele jsou definovány poměrovou hodnotou n_{CORR} dle (6):

$$n_{CORR} = \frac{n}{n_{REF}}, \quad (6)$$

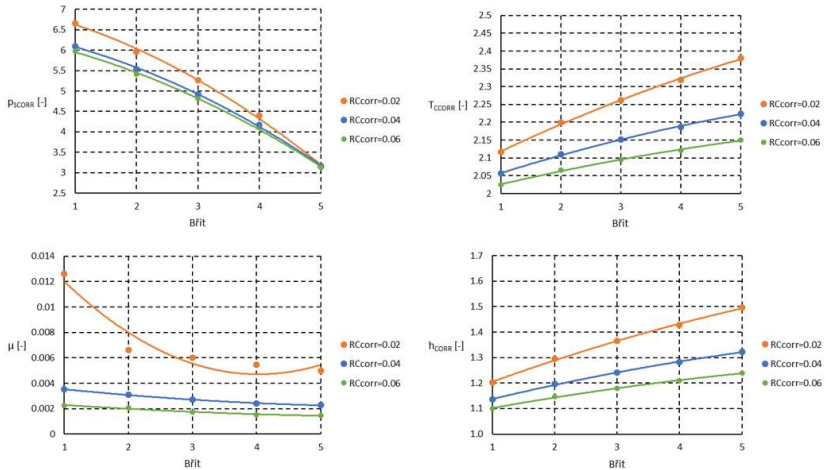
kde referenční otáčky odpovídají hodnotě 36660 min^{-1} dle [22]. Nejdříve byla spočítána matice pro konstantní otáčky odpovídající referenčním pro 4, 5 a 6 břitů pro 3 varianty RC_{CORR} . Nakonec byla vypočtena matice pro 9 různých otáček s 4 bříty s konstantní hodnotou $RC_{CORR} = 0,04$. Pro výpočet byl zvolen model turbulence k- ϵ vzhledem ke skutečnosti, že se nejedná o disipaci energie nýbrž o přeměnu kinetické energie na teplo. Výpočet konvergoval s hodnotami reziduí menší než $1\text{E-}03$. Pro výpočet byl použit program ANSYS CFX.

Výsledky pro konstantní otáčky a 4 bříty jsou na Obr. 3.



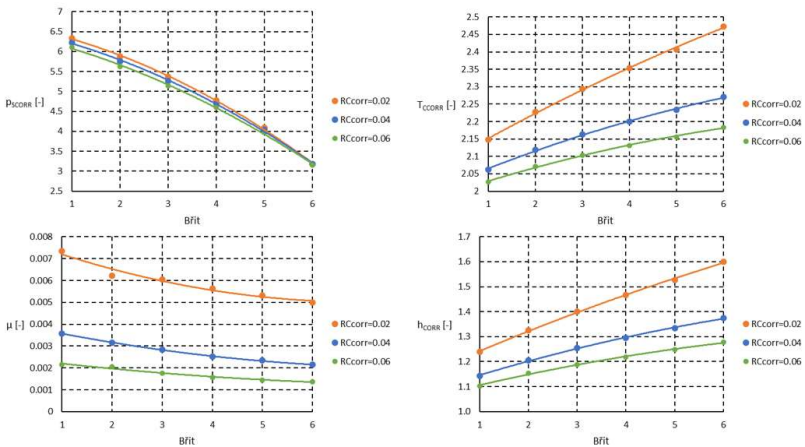
Obr. 3: Konstantní otáčky a 4 bříty

Výsledky pro konstantní otáčky a 5 břitů jsou na Obr. 4.



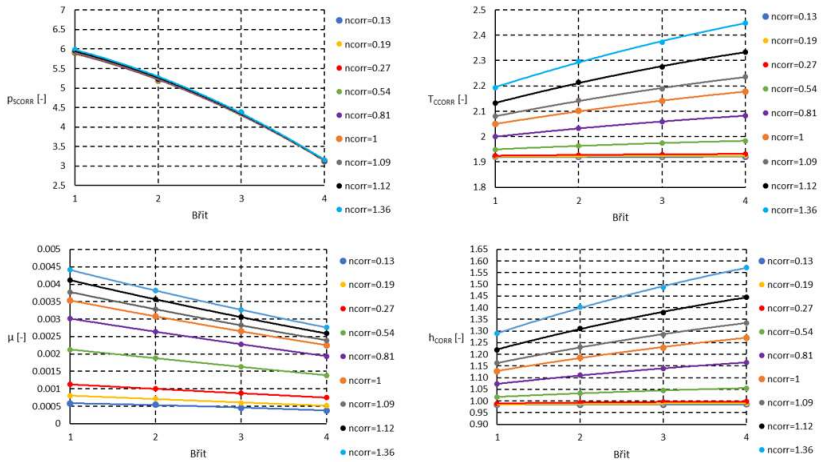
Obr. 4: Konstantní otáčky a 5 břitů

Výsledky pro konstantní otáčky a 6 břitů jsou na Obr. 5.



Obr. 5: Konstantní otáčky a 6 břitů

Výsledky pro nekonstantní otáčky v rozmezí $n_{CORR} = 0,13 \div 1,36$ a 4 bříty je na Obr. 6.

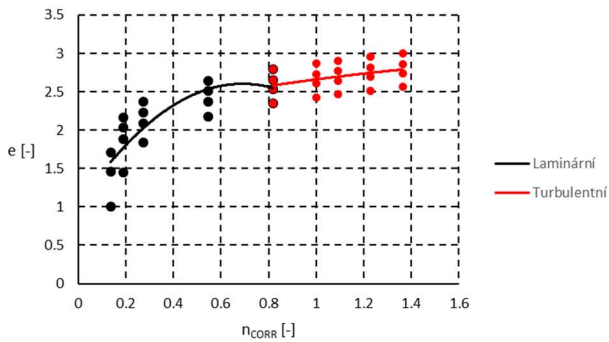


Obr. 6: Nekonstantní otáčky a 4 břity

V rámci teorie rotujícího disku uvedené v [23] byla hledána závislost poměrové obvodové rychlosti ω_{CORR} na přírůstku teploty ΔT_{CORR} .

$$\Delta T_{CORR} = f(\omega_{CORR}). \quad (1)$$

Byla nalezena závislost pro výpočet tzv. počítaného koeficientu e – bezrozměrný momentový koeficient, která je uvedena na Obr. 7.



Obr. 7: Počítaný koeficient

Závěry plynoucí z CFD analýzy při konstantních otáčkách, ale s jinými radiálními vůlemi RC_{CORR} a s jinými počty břitů je možno shrnout takto – statický tlak p_{SCORR} na jednotlivých břitech klesá. To je dáno jednak okrajovými podmínkami, ale jednak je vidět, že klesá kontinuálně na jednotlivých břitech. Stejně tak klesá průtokový koeficient μ . Oba tyto parametry ukazují, že labyrintová ucpávka ve všech kombinacích počtu břitů a vůlí těsní. Je pochopitelně vidět, že při nižší radiální vůli je hmotnostní průtok, resp. průtokový koeficient nižší. Oproti předpokladům v literatuře (mj. [3], [10], [11] a [13]) je vidět nárůst celkové teploty T_{CORR} a entalpie h_{CORR} . Z výsledků také plyne, že čím je menší radiální vůle, tím je přírůstek teploty vyšší – viz Tab. 2.

RC_{CORR}	0,02	0,04	0,06
ΔT_{CORR}	0,194	0,129	0,944

Tab. 2: Přírůstek celkové teploty na konstantních otáčkách 4bříté labyrintové ucpávky

Na základě těchto zjištění bylo rozhodnuto pokračovat ve výpočtech a uskutečnit výpočet na nekonstantních otáčkách na stejné geometrii. Výsledky (Obr. 6) potvrdily předchozí tvrzení a sice, že čím větší otáčky, tím je větší pokles statického tlaku a průtokového koeficientu. Stejně tak ale s otáčkami roste celková teplota. Na základě teorie rotujícího disku v [23] byl spočítán nový počítaný koeficient, který by odpovídal labyrintové ucpávce se 4 břity. Z Obr. 7 je také dobře vidět rozdíl mezi laminárním (černá čára) a turbulentním (červená čára) prouděním v ucpávce. Pro laminární proudění byl počítaný koeficient zjištěn jako $e = 2,1191$ a pro turbulentní proudění $e = 2,6948$. Stejně tak přírůstek celkové teploty na otáčkách $n_{CORR} = 1,36$ je 0,255. Tato hodnota odpovídá přibližně hodnotě 70 K.

5. Ověření výpočtů

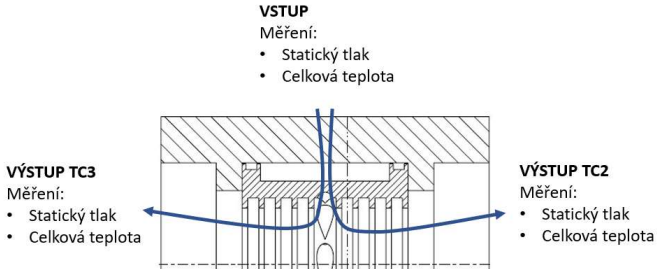
Výsledky výpočtů uvedené v předchozí kapitole bylo pochopitelně nutné ověřit měřením. Vzhledem k faktu, že se jedná o velké spektrum otáček, které není možné ověřit na jednom zařízení bylo rozhodnuto použít dvě zařízení – konkrétně:

1. Ověření na laboratorním zařízení
2. Ověření na skutečném turbovrtulovém motoru

5.1. Ověření na laboratorním zařízení

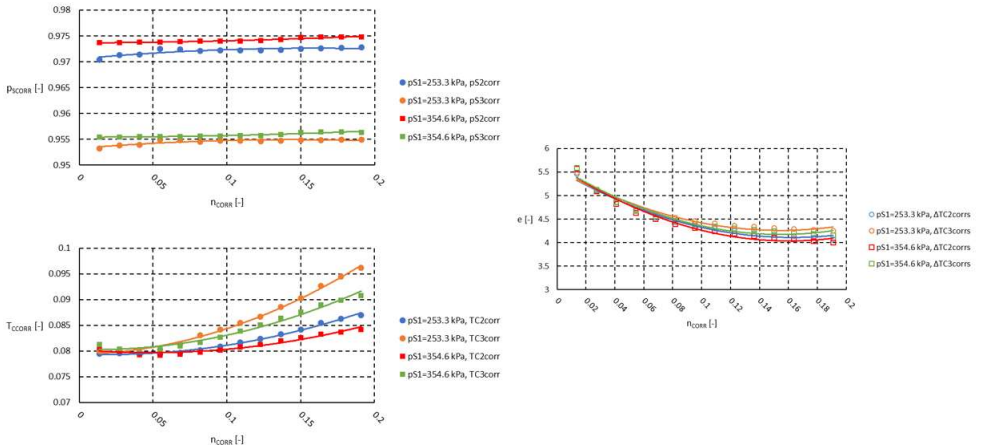
Na Ústavu mechaniky, biomechaniky a mechatroniky Fakulty strojní ČVUT v Praze je používáno laboratorní zařízení pro měření labyrintových ucpávek. Toto zařízení odpovídá okrajovým podmínkám výpočtu a je tedy pro

ověření vhodné. Zařízení (Obr. 8) se skládá z hladké hřídele a statorových labyrintových ucpávek. Vzduch proudí dírami uprostřed na okraje skrz 4břité



Obr. 8: Schéma laboratorního zařízení

labyrintové ucpávky. Během měření se měřil statický tlak (vstup a oba výstupy), celková teplota (vstup a oba výstupy) a otáčky hřídele. Měření bylo rozděleno na dvě fáze, každá měla jiný vstupní tlak – 253kPa a 354kPa. Celkem bylo změřeno 14 ustálených bodů.



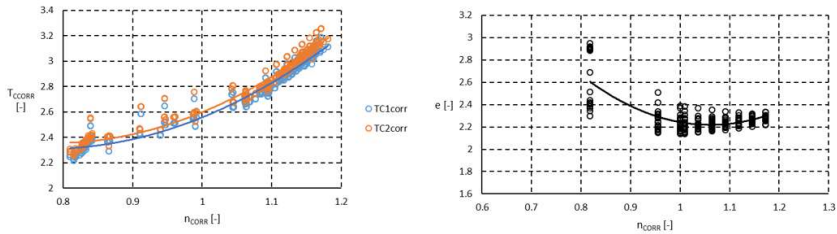
Obr. 9: Laboratorní zařízení – statický tlak a celková teplota

Jak je vidět z průběhů tlaků a teplot po otáčkách na Obr. 9, lze tvrdit, že statický tlak byl víceméně konstantní, což je dáno okrajovými podmínkami měření. Celková teplota ale narostla. Je také možné sledovat průběh počítané koeficientu e . Vzhledem k tomu, že otáčkové spektrum bylo omezené (max.

otáčky $n_{CORR}=0,19$) bylo rozhodnuto uskutečnit ještě měření na skutečném turbovrtulovém motoru.

5.2. Ověření na skutečném turbovrtulovém motoru

Vzhledem ke skutečnosti, že během měření na laboratorním zařízení nebylo změřeno celé otáčkové spektrum, jako ve výpočtu, bylo uskutečněno měření na skutečném turbovrtulovém motoru GE Catalyst [24]. Měření bylo uskutečněno na dynamometrické zkušebně ČVUT v Praze. Během měření byla instrumentována 4břítá labyrintová ucpávka s rotujícími břity. Měřila se celková teplota na vstupu a výstupu z ucpávky a otáčky hřídele.

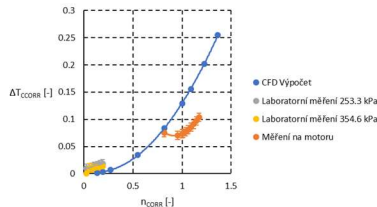


Obr. 10: Turbivrtulový motor – celková teplota a počítaný koeficient

Na Obr. 10 jsou uvedeny průběhy celkových teplot (T_{C1CORR} značí vstupní a T_{C2CORR} značí výstupní teplotu) a počítaného koeficientu. Jak z průběhu celkové teploty, tak z počítaného koeficientu je možné tvrdit, že oba parametry odpovídají předpokladům z výpočtů.

5.3. Porovnání

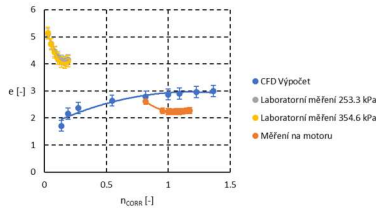
Díky výše popsaným měřením bylo možné výpočty na rozdílných otáčkách hřídele porovnat s odpovídajícím měřením. Cílem této kapitoly je porovnat výpočet přírůstku celkové teploty a počítaného koeficientu při průchodu labyrintovou ucpávkou s měřením. Nejdříve jsou vynesena data z CFD výpočtu. Potom jsou vyneseny výsledky z laboratorního měření



Obr. 11: Porovnání přírůstků teploty

rozdělené dle dvou vstupních tlaků. Nakonec jsou uvedeny přírůstky celkové teploty naměřené na reálném motoru. Přírůstky celkové teploty jsou na Obr. 11 a počítaného koeficientu na Obr. 12.

Pro lepší srovnání byly vypočtené a naměřené hodnoty proloženy polynomicou křivkou druhého stupně. Díky tomu bylo možné provést srovnání na stejných otáčkách tzv. kontrolních bodech. V Tab. 3 jsou uvedeny jednotlivé přírůstky celkové teploty a počítaný koeficient. Je zřejmé, že jednotlivé měření nepostihly celé spektrum otáček, tak jako výpočet, a tak pro některé otáčky bylo nutné naměřené hodnoty extrapolovat. V Tab. 3 jsou označeny červeným písmem.



Obr. 12: Porovnání počítaného koeficientu

Jak je vidět z absolutních hodnot, tak extrapolované hodnoty – otáčky $0,8183$ a $1,0911$ – z laboratorního zařízení je vhodné nepoužívat, protože ukazují nelogická čísla. Stejně tak hodnoty pro otáčky $0,1364$ z měření na motoru nelze použít. Interpolované hodnoty ale ano. Z trendů přírůstků celkové teploty na Obr. 11 je vidět, že na vysokých (vyšších, než $n_{CORR}=1$) otáčkách má výpočtová křivka obdobný sklon, jako křivka, naměřená na motoru. Stejně by se dalo konstatovat s hodnotami naměřenými v laboratoři při nízkých (menších, než $n_{CORR}=0,2$) otáčkách.

Díky naměřeným hodnotám může být konstatováno, že CFD výpočet lze použít jak při nízkých otáčkách labyrintových ucpávek, tak při vysokých. Výsledky výpočtu uvedené v předešlých kapitolách, převážně pak přírůstek celkové teploty na jednotlivých břítech ΔT_{CCORR} a počítaný koeficient e , lze považovat za reálně použitelné. Je ovšem důležité zohlednit skutečnost, že výpočet je nastaven jako nevratný adiabatický děj tzn. že nedochází k přestupům tepla do okolí (např. do statorového protikusu apod.). Obě výše uvedené měření ale nelze považovat za plně adiabatická.

	n_{CORR}	ΔT_{CORR}	e
	[-]	[-]	[-]
CFD	0,1364	0,0022	1,9527
	0,8183	0,0832	2,8409
	1,0911	0,1568	2,9548
Laboratorní zařízení 253,3 kPa	0,1364	0,0149	4,1459
	0,8183	0,1025	27,7473
	1,0911	0,1642	51,5007
Laboratorní zařízení 354,6 kPa	0,1364	0,0126	4,0705
	0,8183	0,1476	31,0234
	1,0911	0,2599	58,0447
Měření na motoru	0,1364	0,3959	7,8111
	0,8183	0,0753	2,6034
	1,0911	0,0854	2,2234

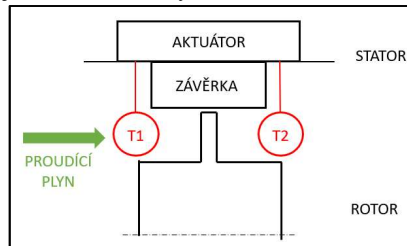
Tab. 3: Porovnání na kontrolních bodech

6. Návrh inovativního přístupu k labyrintovým ucpávkám

Ze závěrů z CFD výpočtů potvrzených měřeními daty plyne, že dominantní vliv na parametry ucpávky má radiální vůle RC_{CORR} . Je tedy důležité zaměřit se na radiální vůli. Pro zmenšení hmotnostního průtoku labyrintovou ucpávkou je teoreticky vhodné mít tuto vůli co nejmenší. Z praktického hlediska je ale nemožné, aby byla nulová. V průmyslové praxi se hojně používá obrusitelných nástřiků na statorovém protikusku [25]. Obrusitelná výstelka slouží primárně k nastavení radiální vůle na konkrétním břitu. Může tak být na jednotlivých břitech odlišná. S použitím obrusitelné výstelky se ale radiální vůle může během provozu zvětšovat vlivem např. vibrací při nenávrhovém režimu. Stejná situace nastává, při rozdílných otáčkách hřídele tzn. že např. při předstartovním volnoběhu motoru bude třeba mít radiální vůli jinou než při vzletovém režimu, kdy je motor a všechny jeho části zatěžován nejvíce. Praktické možnosti, jak dosáhnout snížení radiální vůle s ohledem na zvyšující se teplotu v ucpávce a otáčky mohou být dvě:

1. Použití akčního členu (dále aktuátoru), který by radiální vůli kontinuálně měnil v součinnosti s aktuálním režimem motoru
2. Změna radiální vůle pomocí vnějšího zařízení na bázi irisové clony [26] (dále závěrka)

Použití zařízení, které by kombinovalo obě předchozí metody se jeví, jako nejvhodnější. V místě nerotujícího protikususu – statoru – by byla umístěna závěrka, která by regulovala radiální vůli. Otáčením závěrky by byl pověřen aktuátor jako akční člen, který by na základě termočlánků umístěných na vstupu **T1** a výstupu **T2** do/z labyrintové ucpávky (termočlánky musí být uloženy tak, aby měřili celkovou teplotu proudícího plynu, nikoliv teplotu statoru) vhodně otáčel závěrkou a ta řídila radiální vůli. Viz schéma na Obr. 13. Do akčního členu by pochopitelně bylo nutné nahrát otáčkové charakteristiky pro jednotlivé režimy motoru.



Obr. 13: Inovativní řešení radiální vůle

7. Důsledky pro vědu a praxi

7.1. Důsledky pro vědu

V předchozích kapitolách byl ukázán přístup k výpočtu labyrintových ucpávek a k jejich měření. Z hlediska navazujícího výzkumu by bylo vhodné vytvořit:

- Zvětšit výpočtovou matici o další hodnoty radiální vůle. Získá se tak daleko větší přehled o tom, jak se jednotlivé termodynamické parametry vyvíjejí. V otáčkových charakteristikách se tak získají další křivky, nikoliv pouze s jednou konstantní radiální vůlí. Dále pak provést ty samé výpočty pro jinou kombinaci profilů ucpávek, ne pouze profil použitý v této práci. V otáčkových charakteristikách se tak docílí dalšího zpřesnění.
- Pro ověření takto zvětšené výpočtové matice je určitě vhodné sestavit speciálně k tomuto účelu vybavené měřicí zařízení, kde by bylo možné měřit ucpávky.

7.2. Důsledky pro praxi

Výsledky této práce ukazují jednoznačný vliv celkové teploty na labyrintovou ucpávku leteckého turbínového motoru. Závěrů je už v této fázi částečně možné použít v praxi. Díky získání otáčkových charakteristik je možné vhodně volit materiál z jakého jsou labyrintové ucpávky zkonstruovány. Stejně užitečná je tato znalost pro volbu vhodné technologie pro výrobu. To je důležité zejména při vývoji obrusitelných materiálů pro eliminaci radiální vůle, které se začínají na moderních turbínových motorech stále více používat.

Po získání dalších otáčkových charakteristik pro různé radiální vůle budou mít určitě výsledky větší možnosti uplatnění. Díky tomuto bude totiž možné lépe určit teplotní zatížení stroje nejen v místě konkrétní ucpávky s jednou radiální vůlí, nýbrž i v místech, kde jsou použity jiné (např. kvůli chlazení horkých dílů, kde je vhodné mít vůli větší).

Zjištění přepočtového koeficientu na různých otáčkách je jistě užitečné pro zpreciznění modelu pro výpočet hmotnostního průtoku sekundárními vzduchovými cestami. Tato znalost pomůže zpřesnit termodynamický model celého motoru, což je nepochybně velmi důležitá věc.

8. Závěry

Na základě provedené rešerše bylo zjištěno, že na rozdíl od parních turbín, je proudění v labyrintových ucpávkách leteckého turbínového motoru ne zcela podrobně popsáno. Z rešerše vyplynulo, že ve většině publikovaných případů se výzkum zabýval primárně hmotnostním tokem plynu skrz ucpávku. Byl tedy uskutečněn CFD výpočet labyrintové ucpávky s okrajovými podmínkami, které nejvíce odpovídají leteckému turbínovému motoru. Z výpočtů vyplynulo, že nárůst teploty je oproti teorii, která je přezvatá z parních turbín, nekonstantní. Z výpočtů také vyplynulo, že dominantním faktorem na velikost přírůstku celkové teploty je radiální vůle. Díky výpočtům bylo také možné dopočítat tzv. počítaný koeficient, který vychází z teorie rotujícího disku [23] a je navržený pro konkrétně pro letecký turbínový motor.

Výsledky výpočtů bylo pochopitelně nutné ověřit pomocí měření. Celkem proběhly 2 měření – jedno na laboratorním zařízení a druhé na skutečném motoru. Pomocí této kombinace bylo možné plně pokrýt otáčkové spektrum. Výsledky měření pak potvrdily správnost výpočtů.

Na základě zjištění, že dominantním faktorem je radiální vůle, bylo navrženo zařízení, které automaticky řídí radiální vůli v provozu. Zařízení se skládá z akčního členu a zařízení na bázi irisové clony.

9. Použitá literatura

- [1] Ščegljajev Av. V., Parní turbíny, Státní nakladatelství technické literatury, 1983
- [2] Bečvář J., Tepelné turbíny, Státní nakladatelství technické literatury, 1968
- [3] Kadrožka J., Lopatkové stroje, Akademické nakladatelství CERM Brno, 2003, ISBN 80-7204-297-1
- [4] Macek J., Spalovací motory, Nakladatelství ČVUT, 2012, ISBN: 978-80-01-05015-6
- [5] Hanus D., Pohon letadel, Nakladatelství ČVUT, 2008, ISBN 978-80-01-04104-8
- [6] Stocker H. L., Advanced labyrinth seal design performance for high pressure ratio gas turbine, ASME Winter Annual Meeting: GT Papers, 1976, DOI: 10.1115/75-wa/gt-22
- [7] Dejč M. E., Technická dynamika plynů, Nakladatelství technické literatury, 1976
- [8] Bloch H.P., Singh M.P., Steam turbines design, application and re-rating, McGraw-Hill Companies, 2009, ISBN: 978-0-07-164100-5
- [9] Ambrož J., Bém K., Budlovský J., Málek B., Zajíc V., Kmoníček V., Parní turbíny 1 - Theorie a výpočet, Redakce energeticko-strojnické literatury, 1955
- [10] Sultanian B. K., Gas turbine: internal flow systems modeling, New York USA: Cambridge University Press, 2018, ISBN 978-110-7170-094
- [11] Jerie J., Theorie motorů, Ediční středisko ČVUT Praha 1, 1996, ISBN 80-01-01460-6
- [12] Miškovský L., Parní a plynové turbíny 1.díl, Ústav parních motorů a kompresorů, 1937
- [13] Kurzke J., Halliwell I., Propulsion and Power, Springer Internationaly Publishing, 2018, ISBN: 978-3-319-75977-7
- [14] Kerrebrock J. L., Aircraft Engines and Gas Turbines, Massachusetts Institute of Technology, 1992
- [15] Růžek J., Kmoč P., Theorie leteckých motorů, Vojenská akademie Antonína Zápotockého, 1970
- [16] Moore J. J., Three-Dimensional CFD Rotordynamics Analysis of Gas Labyrinth Seals, ASME, 2003, Vol. 125, No. 4, pp. 427-433, DOI: 10.1115/1.1615248
- [17] Eser D., Kazakia J.Y, Air flow in cavities of labyrinth seals, International Journal of Engineering Science, 1995, Vol. 33, No. 15, pp. 2309-2326, DOI: 10.1016/0020-7225(95)00072-6

- [18] Fürst J., Numerical simulation of flows through Labyrinth seals, *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 821, pp. 16-22, ISSN: 1662-7482, DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.821.16
- [19] Bellaouar A., Kopey B. V., Abdelbaki N., Methods of the rational choice of a labyrinth seal design for gas pumping units, *Mechanika*, 2013, Vol. 19, No. 1, DOI: 10.5755/j01.mech.19.1.3611
- [20] Xingyun Jia, Hai Zhang, Qun Zheng, Shuangming Fan, Zhitao Tian, Investigation on Rotor-Labyrinth Seal System with Variable Rotating speed, *International Journal of Turbo & Jet-Engines*, 2019, DOI: 10.1515/tjj-2016-0066
- [21] Martin H. M., *Labyrinth Packings*, Engineering, 1908
- [22] Typový certifikát motoru H80, <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EASA%20TCDS%20E.070%20issue%208.pdf>
- [23] Schlichting H., Gersten K., *Boundary-Layer Theory*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017, ISBN: 978-3-662-52919-5
- [24] GE Catalyst Engine, https://en.wikipedia.org/wiki/General_Electric_Catalyst
- [25] Childs D., Weatherwax M., Theory Versus Experiment for the Rotordynamic Characteristics of a High Pressure Honeycomb Annular Gas Seal at Eccentric Positions, *ASME*, 2003, Vol. 125, No. 2, pp. 422/429, DOI: 10.1115/1.1504093
- [26] Clay R. S., Solid Iris Diaphragms, *Journal of Scientific Instruments*, 1941, Vol. 18, No. 9, pp. 190-191, DOI: 10.1088/0950-7671/18/9/304

10. Autorovy publikace

- [27] Čížek M., Chambers of Labyrinth Seals of Turbine Engine, *New Trends of Civil Aviation 2018*, ISBN: 978-80-554-1530-7, 2018, pp. 54-56
- [28] Čížek M., Vampola T., Labyrinth Seal of Aircraft Turbine Engine Air Flow Calculation at High Viskosity, *Acta Mechanica Slovaca*, 2019, Vol. 23, No. 4, pp. 6-12, DOI: 10.21496/ams.2020.011
- [29] Čížek M., Pátek Z., On CFD Investigation of Radial Clearance of Labyrinth Seals of a Turbine Engine, *Acta Polytechnica*, 2020, Vol. 60, No. 1, pp. 38-48, ISSN: 1210-2709, DOI: 10.14311/AP.2020.60.0038
- [30] Čížek M., Výpočet proudění v labyrintové ucpávce leteckého turbinového motoru, *Setkání uživatelů ANSYS 2019*, ISBN: 978-80-907196-1-3, 2019

- [31] Čížek M., 3D CFD Research of Labyrinth Seal Cavities of Aircraft Turbine Engine, New Trends in Aviation Development 2019, 2019, DOI: 10.1109/ntad.2019.8875611
- [32] Čížek M., Vampola T., Popelka L., Comparison of Labyrinth Seal Calculation and Real Aircraft Turbine Engine Measurement, Topical Problem of Fluid Mechanics 2020, 2020, pp. 19-26, ISSN: 2336-5781, DOI: 10.14311/TPFM.2020.003
- [33] Čížek M., Vampola T., Popelka L. , Labyrinth seal total temperature investigation, Topical Problem of Fluid Mechanics 2021, **SCHVÁLENO PRO PUBLIKOVÁNÍ**
- [34] Čížek M., Klír V., Steinbauer P., Vampola T., Labyrinth seal CFD calculation and temperature measurement investigation, Aviation Journal, **ODESLÁNO KE SCHVÁLENÍ**
- [35] Čížek M., Aircraft turbine engine labyrinth seal introduction and CFD calculation, Engineering Mechanics 2020, Vol. 26, pp. 114-117, ISBN: 978-80-214-5896-3, DOI: 10.21495/5896-3-114
- [36] Čížek M., Pátek Z., Vampola T., Aircraft Turbine Engine Labyrinth Seal CFD Sensitive Analysis, Applied Sciences, 2020, Vol. 10, No. 19, pp. 6830, ISSN: 2076-3417, DOI: 10.3390/app10196830
- [37] Čížek M., Pátek Z., Vampola T., Mass Flow and Total Temperature of Labyrinth Seal Research, International Journal of Turbo & Jet-Engines, **ODESLÁNO KE SCHVÁLENÍ**