



**FAKULTA
ŠTROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

**Návrh dvoustupňové výkonové turbíny pro
turbovrtulový motor**

**Two Stage Power Turbine Design for
Turboprop Engine**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Denis HERMANN

Studijní program: N3958 LETECTVÍ A KOSMONAUTIKA

Studijní obor: 3906T008 Letadlová a kosmická technika

Vedoucí práce: Ing. Jan Klesa Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hermann** Jméno: **Denis** Osobní číslo: **424860**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Letectví a kosmonautika**
Studijní obor: **Letadlová a kosmická technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh dvoustupňové výkonové turbíny pro turboprotulový motor

Název diplomové práce anglicky:

Two Stage Power Turbine Design for Turboprop Engine

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) Rešerši turbín pro turboprotulové motory
- 2) Popis proudění v turbíně
- 3) Návrh rozdělení teplotního spádu na stupně
- 4) Návrh stupňů na středním poloměru
- 5) Porovnání s původní jednostupňovou turbínou

Seznam doporučené literatury:

Podklady a doporučená literatura dle doporučení vedoucího práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Klesa, Ph.D., ústav letadlové techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **02.08.2019**

Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Jan Klesa, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

29.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh dvoustupňové výkonové turbíny pro turbovrtulový motor“ vypracoval(a) samostatně pod vedením Ing. Jana Klesy Ph.D. a Ing Romana Veselky, s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Denis Hermann

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří především rodině, za její psychickou podporu během celých studií i psaní této práce. Dále bych velice rád poděkoval Ing. Romanu Veselkovi, za jeho odborné rady a vedení, bez nichž by tato práce nejspíš nebyla úspěšně dokončena. Poděkování také patří Ing. Janu Klesovi Ph.D. i jeho odborné rady přispěli ke zdárnému dokončení této práce.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Denis HERMANN
Název DP:	Návrh dvoustupňové výkonové turbíny pro turbovrtulový motor
Anglický název:	Two Stage Power Turbine Design for Turboprop Engine
Rok:	2019
Studijní program:	Letectví a kosmonautika
Obor studia:	Letadlová a kosmická technika
Ústav:	Ústav letadlové techniky
Vedoucí BP:	Ing. Jan Klesa Ph.D.
Konzultant:	Ing. Roman Veselka
Bibliografické údaje:	počet stran 72 počet obrázků 66 počet tabulek 1 počet příloh XX
Klíčová slova:	Turbovrtulový motor, volná turbína, návrh stupně na středním průměru, návrh stupně po výšce lopatek, návrh profilů, proudová cesta, simulace dvojrozměrného proudění.
Keywords:	Turboprop engine, power turbine, meanline design, three-dimensional design, meanline blade design, blade to blade channel, two-dimensional flow simulation.
Anotace:	V první části práce je vypracována rešerše používaných turbín pro turbovrtulové motory a popsány principy proudění a stanovení ztrát ve stupni turbíny. Ve druhé části je pomocí popsáných principů navržena dvoustupňová turbína na středním poloměru a poté i po výšce lopatky. Dále jsou vytvořeny profily a proudová cesta volné turbíny na středním poloměru. V poslední části je simulováno proudění navrženou volnou turbínou.
Abstract:	This diploma thesis deals with the topic of turboprop engines. Its first part consists of the research of turbines which are used in those engines including the description of fluid flow and pressure losses in turbine stage. A two stage power turbine is designed in the second part of this thesis. It is based on meanline using the described principles, further on also at the 3d design. The thesis contains two-dimensional blade design and design blade-to-blade channel. The final part shows a simulation of the flow of the free turbine.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Turbíny leteckých motorů.....	3
2.1. Popis turbín užívaných pro turbovrtulové motory.....	3
2.1.1. Rozdělení leteckých turbín.....	3
2.1.2. Příklady turbín turbovrtulových motorů.....	4
2.1.2.1. Jednohřídelové turbovrtulové motory.....	4
2.1.2.2. Dvouhřídelové turbovrtulové motory.....	5
2.1.2.3. Tříhřídelový turbovrtulový motor.....	6
2.2. Proudění v turbíně leteckého motoru.....	6
2.2.1. Aplikace základních rovnic ve stupni osově turbíny.....	8
2.2.1.1. Zákon zachování energie.....	9
2.2.1.2. Eulerova rovnice.....	9
2.2.1.3. Bernoulliho rovnice.....	10
2.2.2. Diagram $i-s$	11
2.2.3. Reakce.....	12
2.2.4. Výkonový součinitel.....	13
2.3. Ztráty.....	14
2.3.1. Princip metody.....	15
2.3.2. Profilové ztráty Y_p	16
2.3.3. Korekce na vliv Reynoldsova čísla fRe	19
2.3.4. Sekundární ztráty Y_s	19
2.3.5. Ztráty v oblasti odtokové hrany Y_{TE}	21
2.3.6. Ztráty radiální vůlí Y_{TC}	21
2.4. Účinnost turbíny.....	23
3. Návrh dvoustupňové axiální turbíny.....	24
3.1. Vstupní parametry jednorozměrového návrhu stupně turbíny.....	24
3.2. Výpočet jednorozměrového návrhu na střední proudnici.....	25
3.2.1. Vstupní parametry pro první stupeň.....	25
3.2.2. Vstupní parametry pro druhý stupeň.....	26
3.2.3. Parametry prvního stupně v návrhovém bodě.....	26
3.2.4. Parametry druhého stupně v návrhovém bodě.....	27
3.3. Výpočet parametrů po výšce turbíny.....	29
3.3.1. Vstupní parametry prvního stupně.....	30
3.3.2. Vstupní parametry druhého stupně.....	32
3.3.3. Výstupní parametry radiální rovnováhy.....	32
3.4. Návrh turbínových profilů na středním průměru.....	33
3.4.1. Beziérovky křivky.....	34
3.4.2. Základní parametry turbínových profilů.....	35
3.4.2.1. Úhel incidence a deviace.....	36
3.4.2.2. Stagnační bod.....	37
3.5. Návrh lopatkování.....	38
4. Síťování.....	39

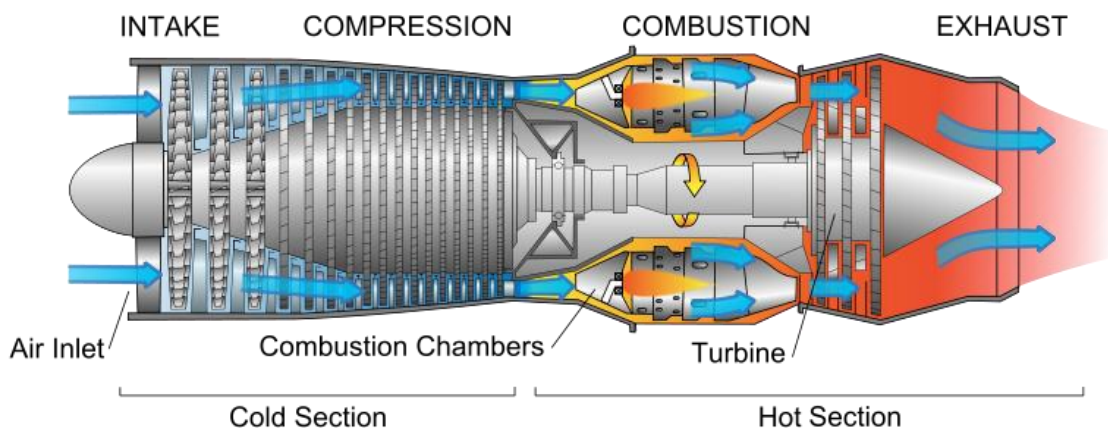
5. Výpočet proudění v turbíně	41
5.1. Stanovení fyzikálních vlastností pracovní tekutiny	42
5.2. Fyzikální modely a řešiče.....	42
5.3. Podmínky konvergence řešení.....	43
5.4. Stanovení výpočetní oblasti	43
5.5. Výpočet samostatných profilů	45
5.5.1. Stator prvního stupně volné turbíny	45
5.5.2. Rotor prvního stupně volné turbíny	46
5.5.3. Stator druhého stupně volné turbíny	48
5.5.4. Rotor druhého stupně	49
5.5.5. Shrnutí výsledků výpočtů samostatných profilů	50
5.6. Výpočet izolovaných stupňů volné turbíny.....	50
5.6.1. První stupeň volné turbíny	50
5.6.2. Druhý stupeň volné turbíny	52
5.7. Výpočet kompletní volné turbíny	54
5.8. Zhodnocení výsledků CFD simulací	58
6. Závěr.....	60
Seznam použité literatury	61
Seznam obrázků	62
Seznam tabulek	63
Přílohy.....	64
Příloha č. 1- Parametry tepelného oběhu.....	64
Příloha č. 2- Parametry původní turbíny	65
Příloha č. 3- Parametry prvního stupně dvoustupňové turbíny	66
Příloha č. 4- Parametry druhého stupně dvoustupňové turbíny.....	67
Příloha č. 5- Parametry po výšce lopatky na vstupu do rotoru prvního stupně volné turbíny ..	68
Příloha č. 5- Parametry po výšce lopatky na výstupu z rotoru prvního stupně volné turbíny...	69
Příloha č. 5- Parametry po výšce lopatky na vstupu do rotoru druhého stupně volné turbíny .	70
Příloha č. 5- Parametry po výšce lopatky na výstupu z rotoru druhého stupně volné turbíny..	71

1. Úvod

Ve své práci se budu věnovat turbínovým leteckým motorům, a to jak z pohledu celkové konstrukce, tak hlavně v praktické části návrhu výkonové turbíny pro takový motor.

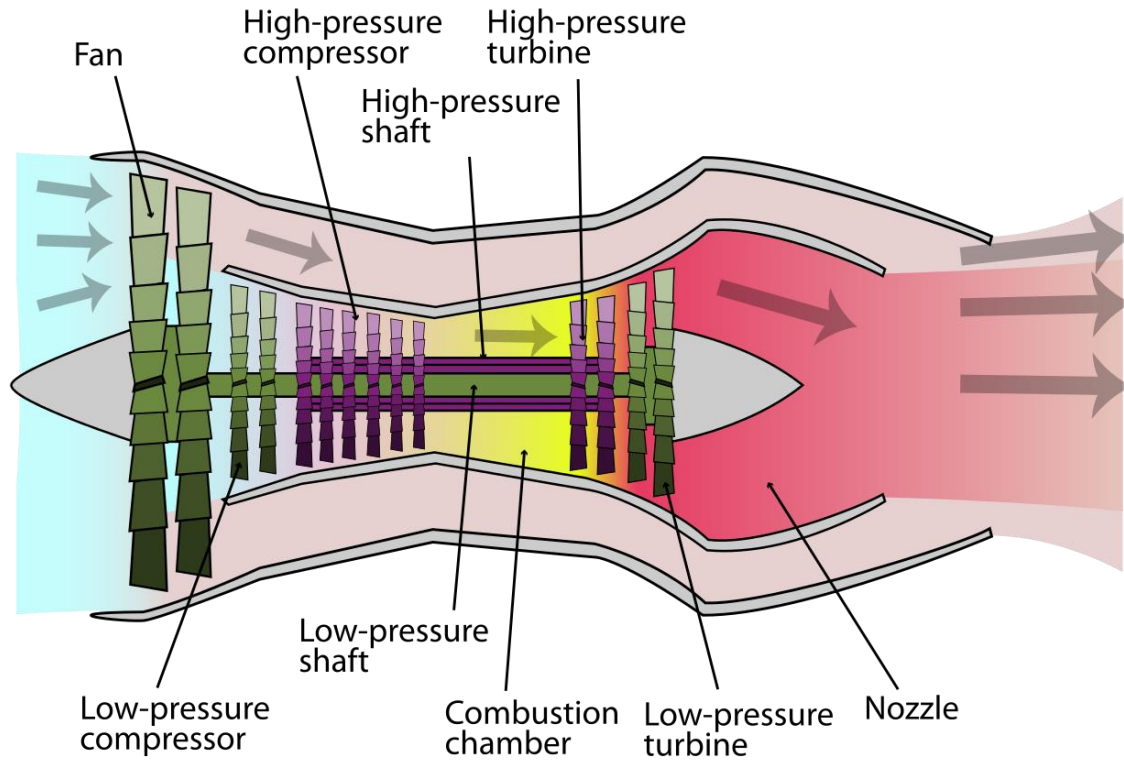
Turbínový motor je nejrozšířenější typ proudových motorů, používaných pro pohon letadel. Turbínové motory dělíme do několika dalších kategorií: proudový, turbodmychadlový, turbovrtulový a turbohřídelový motor.

Proudový motor je klasickou koncepcí turbínových motorů, která se začala objevovat během 30. let 20. století. První let proudového motoru se v Německu konal v roce 1939 a ve Velké Británii v roce 1941. Proudový motor pracuje na principu III. Newtonova pohybového zákona – neboli zákon akce a reakce. Vzduch nasávaný vstupním ústrojím je kompresorem stlačen, tím se i zahřeje a postupuje do spalovací komory. Ve spalovací komoře je do horkého vzduchu rozprášeno palivo a směs je zapálena. Horké plyny expandují a roztáčejí turbínu. Turbína je na společné hřídeli s kompresorem a pohání jej. Horké plyny dále putují do trysky, kde je využita zbylá energie. Vhodným tvarováním trysky, je dosaženo opětovného stlačení a následné expanze. Tím je vytvořen tah, který následně pohání letadlo.



Obrázek 1: Turbínový motor [2]

Turbodmychadlový motor funguje v zásadě na stejném principu, jako motor proudový. Rozdíl je v tom, že velká část nasávaného vzduchu neprochází přes kompresor, spalovací komoru a turbínu, ale jen přes dmychadlo. Dmychadlo vytváří dominantní část tahu. Menší část vzduchu, která všemi částmi motoru prochází, vytváří energii pro pohon dmychadla. Poté je smíchána s vzduchem z obtokového kanálu a zbytek energie se podílí na tahu.



Obrázek 2: Turbodmychadlový motor [2]

Turbovrtulové motory jsou turbínové motory, jejichž turbína pohání krom kompresoru i hřídel, kterou je přes reduktor poháněna vrtule. Tyto motory byly vyvinuty pro pomaleji létající letadla, kde nahradily motory pístové, které při stejném výkonu narůstaly na velikosti a hmotnosti. Velice podobnou kategorií jsou turbohřídelové motory. Jediný rozdíl mezi těmito motory je, že u turbohřídelového motoru, je hřídelí nejčastěji poháněn nosný rotor, případně jiné zařízení.

2. Turbíny leteckých motorů

Turbína leteckého motoru má za úkol poskytovat výkon pro pohon kompresoru, pomocných agregátů a vrtule u turbovrtulových motorů, případně dmyhadla u motorů dvouproudových, nebo hřídele u turbohřídelových motorů. Využívá k tomu tepelnou a tlakovou energii horkých plynů proudících ze spalovací komory. Tuto energii pomocí vhodně tvarovaných kanálů a lopatek přeměňuje pomocí kinetické energie na mechanickou práci.

2.1. Popis turbín užívaných pro turbovrtulové motory

Turbíny, stejně jako kompresory se skládají z jednotlivých stupňů, jedním stupněm rozumíme soustavu jednoho statoru a jednoho rotoru. Stator, nebo také rozváděcí kolo, je tvořen nepohyblivými kanály, tvar kanálů vytváří turbínové lopatky. V turbíně je za státorem umístěn rotor neboli oběžné kolo, což je soustava pohyblivých (rotujících) kanálů, které jsou opět tvořeny lopatkami.

Nicméně v kompresoru teplota i tlak plynů ve stupni roste, kdežto ve stupni turbíny se teplota i tlak plynů snižuje. Je to dáno jak tvarem jednotlivých kanálů, tak i odběrem mechanické práce z turbíny. Kanál kompresoru svojí průtočnou plochu zvětšuje, nazýváme jej difuzorní, naopak kanál turbíny svojí průtočnou plochu zmenšuje, nazýváme jej konfuzorní.

Teplota plynů vstupujících do prvního stupně může dosahovat až 1700 °C a rychlosti až 750 m/s. Obvodová rychlost špiček lopatek rotoru může dosahovat 450 m/s. Takové podmínky vytvářejí velké síly, které musí lopatky a disky jednotlivých stupňů snést, při současném dodržení následujících hlavních požadavků na letecké turbíny:

- velký výkon,
- vysoká účinnost,
- malá hmotnost,
- vysoká životnost.[5]

2.1.1. Rozdělení leteckých turbín

Turbíny se dělí do několika kategorií.

1) Podle směru protékajících plynů:

- a) Osově – ve kterých plyn protéká stupni ve směru osy rotace rotoru. Tyto turbíny jsou v leteckých motorech nejpoužívanější, protože splňují všechny požadavky, které byly zmíněny.
- b) Radiální – ve kterých plyn proudí převážně kolmo na osu rotace rotoru. Podle směru proudění lze tyto turbíny rozdělit na dostředivé, kdy plyn proudí od vnějšího průměru rotoru k jeho středu a na odstředivé, kdy plyn proudí od středu rotoru k vnějšímu průměru. Radiální turbíny jsou vhodnější spíše pro menší hmotnostní průtoky, a proto jsou používány spíše jako pomocné agregáty, případně pro pohon turbokompresoru v pístových motorech.

- 2) Podle změny tlaku na rotoru:
 - a) Reakční (přetlakové)- v tomto typu turbíny statický tlak na rotoru klesá. Reakční turbína má vysokou účinnost, a proto je používána v letectví.
 - b) Akční (rovnotlaké)- ve kterých se statický tlak na rotoru nemění. Tento typ se v letectví nepoužívá, neboť nedosahuje takové účinnosti jako předchozí.
- 3) Podle počtu stupňů:
 - a) Jednostupňové – tvořené pouze jedním statorem a jedním rotorem.
 - b) Vícestupňové – které tvoří soustava několika stupňů.[5]

2.1.2. Příklady turbín turbovrtulových motorů

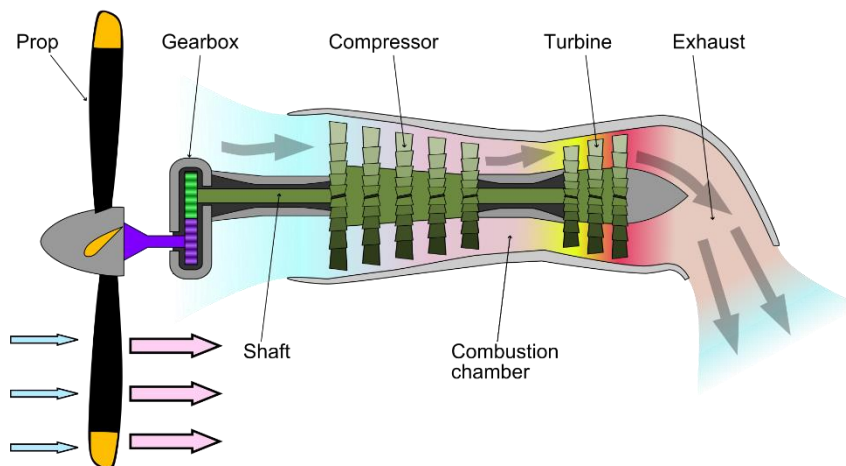
V leteckých motorech se používají axiální turbíny, jednostupňové i ty s více stupni. Počet stupňů turbíny závisí nejen na zpracovávané práci, ale i konstrukci motoru, a na požadovaných otáčkách, které turbína musí vyprodukovat.

Počet hřídelí, a tedy i turbín v leteckém motoru je závislý na požadavcích kladených na motor, jako jsou například:

- a) konstrukční a výrobní náročnost,
- b) měrná spotřeba paliva,
- c) výkon,
- d) celková účinnost.[5]

2.1.2.1. Jednohřídelové turbovrtulové motory

Jsou konstrukčně nejjednodušší motory, avšak tato jednoduchost má za následek horší využití vložené energie a tím pádem vyšší měrnou spotřebu. Tato konstrukce byla využívána hlavně v dřívějších dobách. V současné době je konstrukce využívána jen minimálně, a to především u menších a méně výkonných motorů. Příklady takových motorů mohou být motory s třístupňovou axiální turbínou Ivčenko AI 20, AI 24, Rolls-Royce Dart, Honeywell TPE331, případně s pětistupňovou axiální turbínou Kuzněcov NK-2 a další. [6]

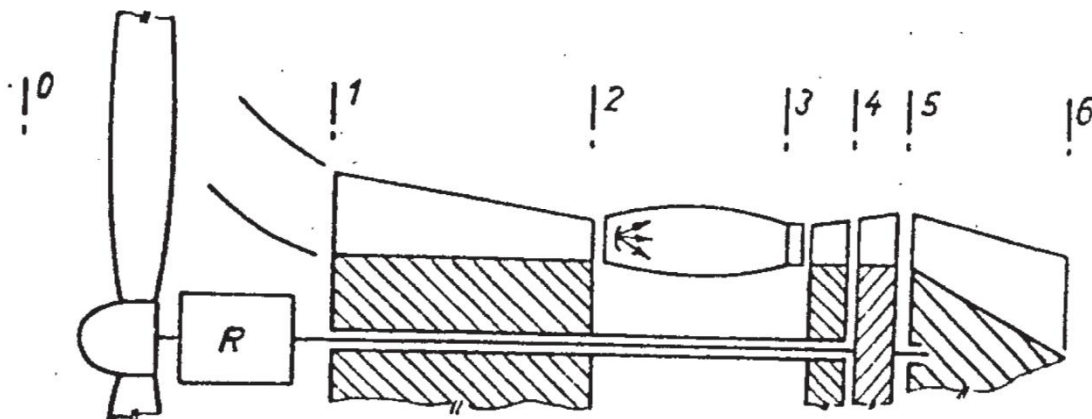


Obrázek 3: Schéma jednohřídelového turbovrtulového motoru [3]

2.1.2.2. Dvuhřídelové turbovrtulové motory

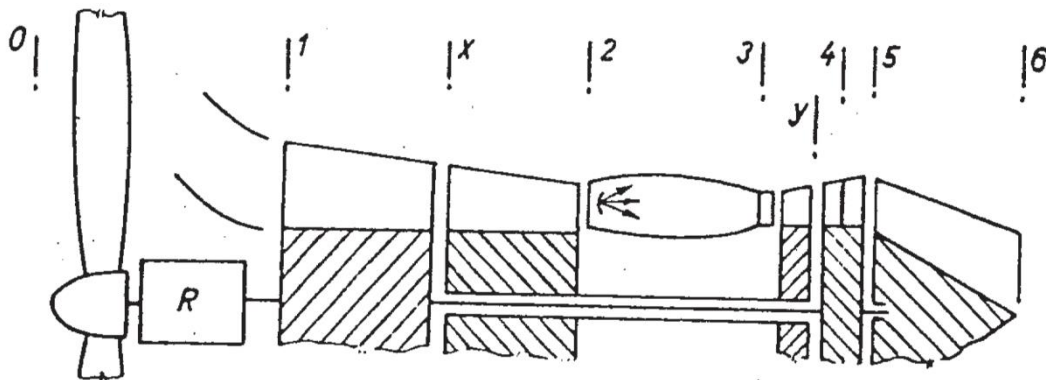
V současné době nejpoužívanější turbovrtulové motory, ať už v provedení s jednorotorovým kompresorem (Obrázek 4), nebo dvurotorovým kompresorem (Obrázek 5).

V uspořádání s jednorotorovým kompresorem pohání vysokotlaká turbína hřídel kompresoru a nízkotlaká pohání přes reduktor vrtuli. Příkladem takových motorů jsou Lycoming T53, GE T64, T700. Tyto motory mají dvoustupňovou vysokotlakou i nízkotlakou turbínu. Dalším příkladem je motor M601 (GE H80), který má jednostupňovou nízkotlakou i vysokotlakou turbínu. Asi nejrozšířenějším motorem tohoto typu je motor Pratt&Whitney Canada PT6, u něhož bychom v jeho rozličných variantách našli více kombinací počtů stupňů jednotlivých turbín, jelikož tato řada motorů pokrývá pásmo výkonů od 430 kW do 1450kW na hřídeli. Asi nejnovějším motorem v této kategorii by měl být motor GE Catalyst, který by mohl být certifikovaný v průběhu roku 2020. Tento motor má dva stupně vysokotlaké turbíny a tři stupně nízkotlaké turbíny. Příkladů takových motorů bychom našli mnoho i s různými kombinacemi počtu stupňů nízkotlakých a vysokotlakých turbín. [6]



Obrázek 4: Schéma dvuhřídelového turbovrtulového motoru s jednorotorovým kompresorem [6]

V druhé zmíněné konstrukční variantě pohání vysokotlaká turbína vysokotlaký kompresor a nízkotlaká turbína pohání krom vrtule i nízkotlaký kompresor. Pohon vrtule je opět řešen přes reduktor. Zástupcem kategorie s dvurotorovým uspořádáním kompresoru je motor Rolls-Royce Tyne s jednostupňovou vysokotlakou turbínou a třístupňovou nízkotlakou turbínou. [6]

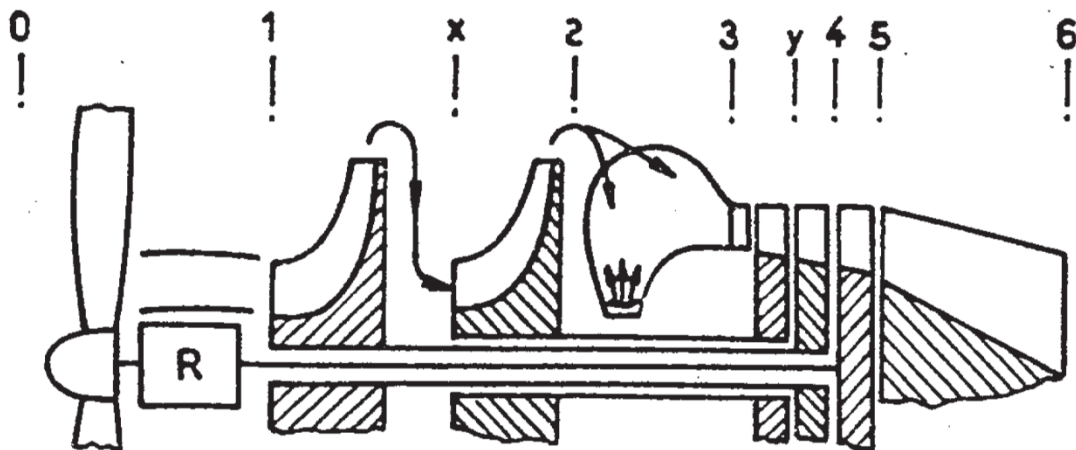


Obrázek 5: Schéma dvouhřídelového motoru s dvourotorovým kompresorem [6]

2.1.2.3. Tříhřídelový turbovrtulový motor

Konstrukčně nejsložitější typ, avšak jeden z neúčinnějších turbovrtulových motorů. Tříhřídelový motor je složen z dvourotorového kompresoru, tří turbín a vrtule. Nízkotlaký i vysokotlaký kompresor využívá k pohonu vlastní turbínu a volná výkonová turbína přes reduktor pohání vrtuli. Mezi zástupce tříhřídelových turbovrtulových motorů patří Pratt & Whitney Canada PW100, Rolls-Royce GEM, nebo český Walter M602, který se ale nedostal do sériové produkce. Všichni tito zástupci mají jednostupňovou nízkotlakou i vysokotlakou turbínu a dvoustupňovou volnou výkonovou turbínu.

Schéma tříhřídelového motoru Walter M602 se dvěma radiálními kompresory a třemi turbínami můžeme vidět na Obrázek 6. [6]



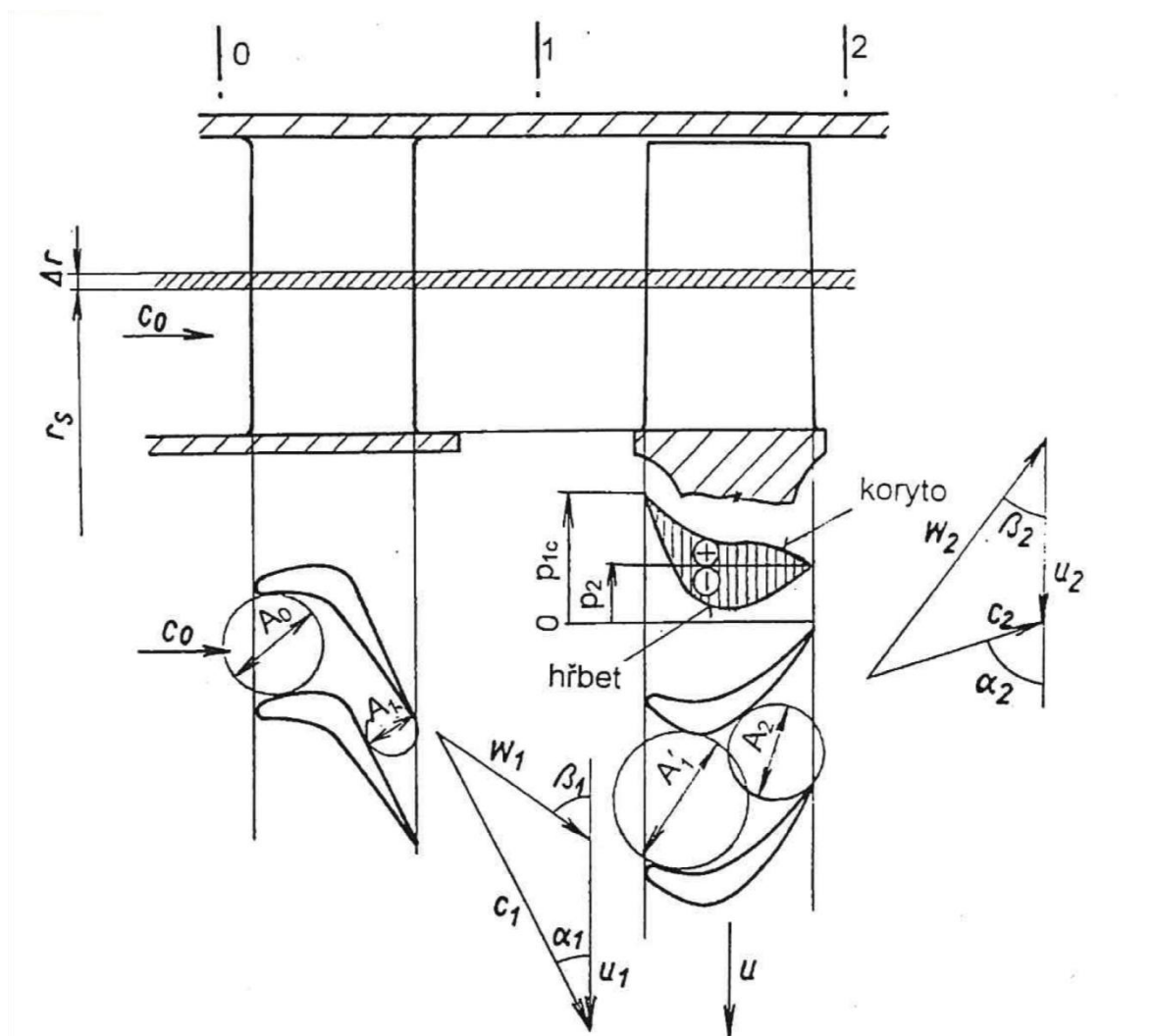
Obrázek 6: Schéma tříhřídelového motoru. [6]

2.2. Proudění v turbíně leteckého motoru

Základní metodou pro výpočet parametrů proudění v turbíně je metoda elementárního stupně. Elementární stupeň turbíny je stupeň s nekonečně krátkými lopatkami a délka těchto lopatek je ohraničena dvěma sousedními proudnicemi. Poloměr takového stupně můžeme volit libovolně mezi patním a špičkovým průměrem reálného stupně.

Konfuzorní tvar průtočného kanálu, kdy $A_0 > A_1$, na statoru způsobí nárůst rychlosti tak, že $c_0 < c_1$ a rychlost c_1 je často blízká místní rychlosti zvuku. Ve výpočtu elementárního stupně neuvažujeme odvod tepla. Jelikož stator neodvádí žádnou práci, celková entalpie plynu zůstane po průchodu statorem konstantní $i_{0c} = i_{1c}$. S uvažováním konstantní měrné tepelné kapacity plynu, zůstane i celková teplota po průchodu statorem stejná $T_{0c} = T_{1c}$. Při zachování entalpie i celkové teploty a nárůstu rychlosti, klesne statická teplota i statický tlak $T_{0s} > T_{1s}$ a $p_{0s} > p_{1s}$. Celkový tlak klesne jen málo, protože při průtoku plynu statorem vznikají jen malé ztráty $p_{0c} > p_{1c}$.

Zúžení rotorové mříže je u rotorů turbín leteckých motorů menší, než u statorů $A_1' > A_2$. Relativní rychlost v rotorové mříži stoupá $w_1 < w_2$, což má za následek další pokles statické teploty $T_{1s} > T_{2s}$. Na rotorové mříži dochází k velkému poklesu momentu hybnosti plynů $c_1 > c_2$, tento pokles způsobí pokles celkové entalpie $i_{1c} > i_{2c}$. Pokud znovu uvážíme konstantní střední měrnou tepelnou kapacitu plynu, celková teplota klesne $T_{1c} > T_{2c}$ a celkový tlak také klesne $p_{1c} > p_{2c}$. Na Obrázek 7 je zobrazeno rozložení tlaku na hřbetu a korytě rotorové lopatky. [5]



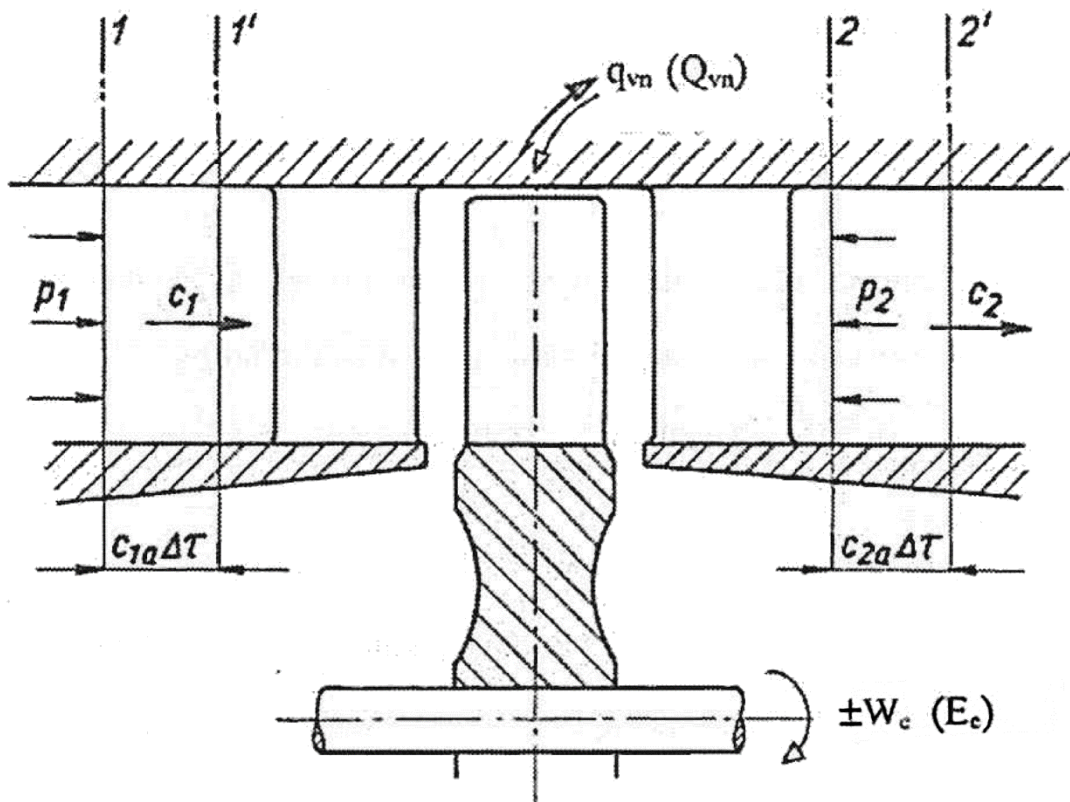
Obrázek 7: Elementární stupeň osové turbíny [5]

Ohnutí proudu v profilové mříží stupně osové axiální turbíny je násobně větší než ohnutí proudu ve stupni osového kompresoru. Tato skutečnost vychází z charakteru příslušných typů kanálů a jejich aerodynamických vlastností. V difuzorním kanálu tlak narůstá ve směru proudu. Záporný tlakový spád ovlivňuje nepříznivě mezní vrstvu na profilu, která poměrně rychle v takovém kanálu narůstá a díky tomu narůstají rychle i profilové ztráty. Naproti tomu v kanálu konfuorním tlak ve směru proudu klesá. Při tomto kladném tlakovém spádu je mezní vrstva poměrně malá i při velkém ohnutí proudu a profilové ztráty jsou také relativně malé. Z těchto charakteristik jednotlivých stupňů vyplývá, že díky velkému ohnutí proudu, které si můžeme na jednom stupni dovolit, lze získat několikanásobně větší práci než na jednom stupni kompresoru, což vede k tomu, že na pohon několika stupňů kompresoru stačí jeden stupeň turbíny. [5]

2.2.1. Aplikace základních rovnic ve stupni osové turbíny

Základní rovnicí je zákon zachování energie, který pro lopatkový stroj můžeme sestavit z Obrázek 8 pro proudění mezi řezy 1-1 a 2-2. Za malý časový úsek Δt plyn urazí dráhu mezi řezy 1-1 až 1'-1' rovnou $c_{1a} \cdot \Delta t$ na vstupu a 2-2 až 2'-2' $c_{2a} \cdot \Delta t$ na výstupu. A pro turbínu bude platit: Energie a teplo odvedené z plynu se spotřebují na změnu vnitřní a kinetické energie

$$E_{vn} + Q_{vn} = \Delta U + \Delta E_k \cdot [4] \quad (1)$$



Obrázek 8: Schéma pro sestavení rovnice zákona zachování energie [4]

2.2.1.1. Zákon zachování energie

Rovnice zákona zachování energie pro stupeň turbíny má následující tvar:

$$-W_{et} = c_p \cdot (T_{2c} - T_{0c}). \quad (2)$$

Tedy

$$W_{et} = W_{st} = c_p \cdot (T_{0c} - T_{2c}). \quad (3)$$

Z čehož vyplývá, že efektivní práce odvedená ze stupně turbíny se rovná poklesu celkové entalpii plynu ($i_{2c} < i_{0c}$), čemuž odpovídá i pokles celkové teploty ($T_{2c} < T_{0c}$). [5]

2.2.1.2. Eulerova rovnice

V roce 1755 Leonard Euler zformuloval vztah o změně hybnosti ustáleného proudění tekutiny. Tento vztah je známý jako Eulerova rovnice, jejíž slovní vyjádření je „součet všech sil působících na vymezenou hmotnost tekutiny od obtékaných profilů a na hranicích kontrolní plochy v ustáleném proudu, je roven časové změně hybnosti tekutiny při jejím průtoku přes hranice vymezené kontrolní plochou“

$$\sum_{abcd} \vec{F}' + \sum \vec{F}_{\Sigma}' = \sum_{abcd} \frac{\Delta m \cdot \vec{c}_2 - \Delta m \cdot \vec{c}_1}{\Delta \tau}. \quad (4)$$

$\sum_{abcd} \vec{F}'$ je součet vektorů sil působících na proud podél kontrolní plochy.

$\sum \vec{F}_{\Sigma}'$ je součet vektorů sil působících od profilů na plyn.

$\Delta m \cdot \vec{c}_1$ je vektor hybnosti tekutiny vstupující elementem kontrolní plochy abcd.

$\Delta m \cdot \vec{c}_2$ je vektor hybnosti tekutiny vytékající elementem kontrolní plochy abcd.

$\Delta \tau$ je časová změna.

Eulerova rovnice předpokládá znalost parametrů proudu pouze na kontrolní ploše a není tedy potřeba řešit procesy probíhající uvnitř objemu plynu uzavřeného kontrolní plochou.

Eulerovu rovnici můžeme též vyjádřit o momentech hybnosti a momentech vnějších sil. „Časová změna momentu hybnosti tekutiny k dané ose se rovná součtu všech momentů vnějších sil působících na tekutinu k téže ose.“

$$\sum M_{vn} = \frac{\Delta m \cdot (c_{2u} \cdot r_2 - c_{1u} \cdot r_1)}{\Delta \tau}. \quad (5)$$

Δm je hmotnost plynu protékajícího za čas $\Delta \tau$ kanálem mezi řezy (1-1)-(1'-1') a (2-2)-(2'-2').

c_{1u}, c_{2u} jsou obvodové složky rychlosti v řezech (1-1) a (2-2).

r_1, r_2 jsou vzdálenosti osy otáčení „0“ a těžiště hmoty Δm na vstupu a výstupu z kanálu.

$\sum M_{vn}$ je moment vnějších sil působících na hmotnost plynu protékajícího kanálem mezi řezy (1-1) a (2-2), vztažený k ose procházející bodem „0“.

Dosazením $\frac{\Delta m}{\Delta \tau} = Q_m$ do rovnice (5), dostaneme rovnici ve tvaru:

$$\sum M_{vn} = Q_m \cdot (c_{2u} \cdot r_2 - c_{1u} \cdot r_1). \quad (6)$$

Vynásobením rovnice (6) úhlovou rychlostí ω a zkrácením hmotnostním průtokem Q_m ji lze také napsat ve tvaru:

$$W_c = c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1. \quad [4] \quad (7)$$

2.2.1.3. Bernoulliho rovnice

Na stupni osové turbíny je práce z hřídele odváděna, a tak Bernoulliho rovnice je ve tvaru:

$$-W_{et} = -W_{pol,t} + W_r + \frac{c_2^2 - c_0^2}{2}. \quad (8)$$

Vyjádřením v celkových stavech a úpravou rovnice (8) lze rovnici vyjádřit ve tvaru:

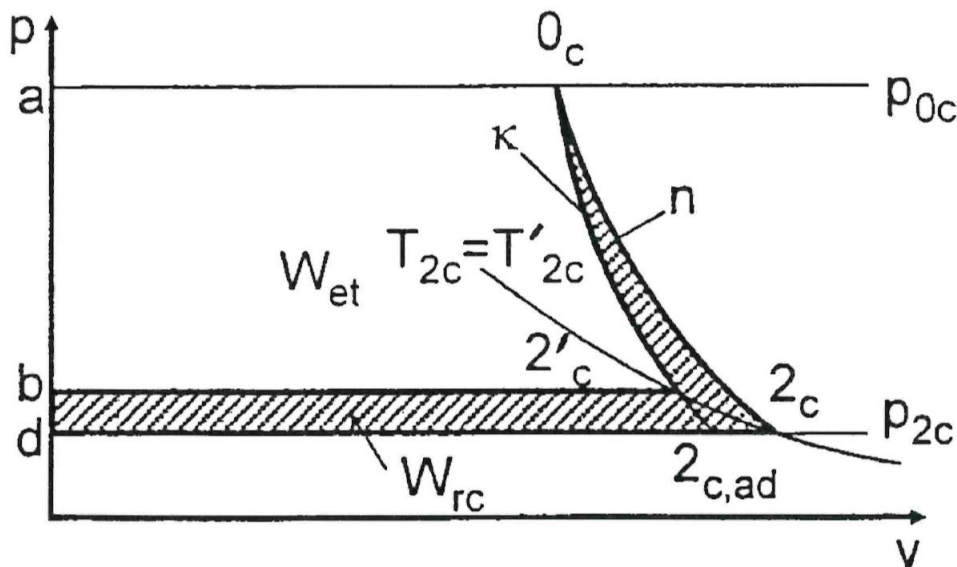
$$W_{et} = W_{pol,tc} + W_{rc}. \quad (9)$$

$$W_{et} = W_{st},$$

$$W_{pol,tc} = - \int_{0c}^{2c} \frac{dp_c}{\rho_c} = \frac{n}{n-1} r (T_{0c} - T_{2c}) \text{ je polytropická expanzí technická práce.}$$

W_{rc} je práce vynaložená na překonání ztrát.

Grafické vyjádření práce stupně turbíny je na Obrázek 9.



Obrázek 9: p-v diagram expanze ve stupni turbíny [5]

Polytropická technická práce získaná při expanzi $W_{pol,tc}$, je úměrná ploše (a, d, 2c, 0c, a).

Práce potřebná na překonání ztrát ve stupni turbíny W_{rc} je zobrazena plochou (b, d, 2c, 0c, 2'c, b).

Efektivní práce odvedená z turbínového stupně $W_{et} = W_{st}$ je vyjádřena plochou (a, b, 2'c, 0c, a).

Při ideální expanzi $W_{rc} = 0$, $n = \kappa$ a body $2_c \equiv 2_{c,ad} \equiv 2'_c$, je adiabatická expanze technická práce $W_{ad,tc}$ úměrná ploše (a, d, $2_{c,ad}$, 0_c , a) a rovnice pro tuto práci:

$$W_{ad,tc} = - \int_{0_c}^{2_{c,ad}} \frac{dp_c}{\rho_c} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} r (T_{0c} - T_{2_{c,ad}}). \quad (10)$$

Pro letecké motory je účinnost stupně turbíny definována jako poměr efektivní práce odvedené ze stupně ($W_{et} = W_{st}$) k práci adiabatické ($W_{ad,tc}$), získané při expanzi plynu bez ztrát

$$\eta_{tc} = \eta_{stc} = \frac{W_{et}}{W_{ad,tc}}. \quad (11)$$

Rovnici (10) adiabatické práce turbíny lze upravit do tvaru:

$$W_{ad,tc} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} r T_{0c} \left(1 - \frac{T_{2_{c,ad}}}{T_{0c}} \right), \quad (12)$$

kde

$$\frac{T_{2_{c,ad}}}{T_{0c}} = \left(\frac{p_{2c}}{p_{0c}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}. \quad (13)$$

Tlakový spád ve stupni turbíny je nejčastěji definován jako poměr celkových tlaků před a za stupněm:

$$\pi_{tc} = \pi_{stc} = \frac{p_{0c}}{p_{2c}}. \quad (14)$$

Dosažením z rovnice (13) a (14) do rovnice (12) dostanu:

$$W_{ad,tc} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} r T_{0c} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_{tc}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right). \quad (15)$$

Z rovnice (11) vyjádřením efektivní práce odvedenou ze stupně turbíny dostanu výraz, používaný pro letecké motory:

$$W_{et} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} r T_{0c} \left(1 - \left(\frac{1}{\pi_{tc}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \eta_{tc}. [5] \quad (16)$$

2.2.2. Diagram i-s

Tento diagram je grafickým vyjádřením expanze tekutiny na stupni turbíny. Někdy bývá označován jako Mollierův diagram, nebo diagram entropie a entalpie.

1-2 je průběh ztrátové expanze na statoru,

2-3 je průběh ztrátové expanze na rotoru,

1-2_s je bezztrátová (ideální) expanze na statoru,

2-3_s je bezztrátová (ideální) expanze na rotoru,

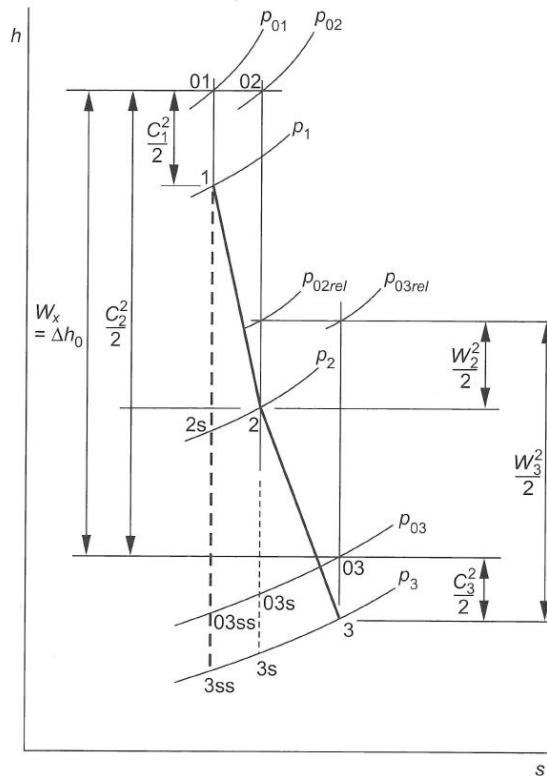
$\frac{c_1^2}{2}$ je kinetická energie tekutiny vstupující do stupně,

$\frac{C_2^2}{2}$ je kinetická energie tekutiny vystupující ze statoru,

$\frac{C_3^2}{2}$ je kinetická energie tekutiny vystupující ze stupně,

$\frac{w_2^2}{2}$ je relativní kinetická energie tekutiny vstupující do rotoru,

$\frac{w_3^2}{2}$ je relativní kinetická energie tekutiny vystupující z rotoru.



Obrázek 10: *i-s diagram turbíny [7]*

Jak lze vidět na Obrázek 7, celková rychlost na vstupu do rotoru je mnohem větší než relativní, a tak je i kinetická energie celkové rychlosti větší. V rotoru probíhá expanze relativně vůči lopatkové mříži, a tak roste velikost hlavně relativní rychlosti a tím i velikost kinetické energie relativní složky proudu. [7]

Na *i-s* diagramu lze doložit i platnost rovnice (3), že efektivní práce turbíny se rovná změně celkové entalpie.

2.2.3. Reakce

Reakce stupně je parametr udávající poměr, kterým je rozdělen proces expanze mezi stator a rotor. Reakce může být definována několika způsoby: například jako poměr adiabatické práce zpracované v rotoru k adiabatické práci zpracované celým stupněm (17), jako poměr rozdílů statické vstupní a výstupní entalpie k celkové vstupní a výstupní entalpii, anebo jako poměr rozdílů statického vstupního tlaku a výstupního tlaku v rotoru k rozdílu statického vstupního tlaku a výstupního tlaku ve stupni (18)

$$\Lambda = \frac{W_{ad,rot}}{W_{ad,st}}, \quad (17)$$

$$\Lambda = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_3}. \quad (18)$$

Záporná hodnota reakce značí, že je proud tekutiny zpomalen v rotoru. Pro turbíny jsou tudíž takové stupně nevhodné. Stupně s reakcí $\Lambda > 1$, kde dochází ke zpomalení proudu tekutiny na statoru, jsou také nevhodné pro turbíny.

Stupeň s reakcí $\Lambda = 0$ se nazývá rovnotlaký, nebo také akční. Tlak $p_1 = p_2$ a relativní rychlost $w_1 = w_2$. Při proudění v rovnotlakém stupni dochází k velkému urychlení proudu tekutiny ve statoru, a také veškerá expanze probíhá ve statoru. V rotoru dochází pouze k otočení proudu tak, aby relativní rychlost zůstala zachována. V takovém stupni je vlivem velkého ohnutí proudu, v některých případech až 150° , při zachování relativní rychlosti w velmi vysoká rychlost c_1 a nižší účinnost celého stupně. Proto se tyto turbíny v leteckých motorech nepoužívají. Na turbínovém stupni s reakcí $\Lambda = 1$, by k veškeré expanzi a urychlení došlo na rotoru, a takový stupeň by tedy nepotřeboval stator.

Turbínový stupeň s reakcí $0 < \Lambda < 1$ se nazývá přetlakový, nebo také reakční. Proces expanze je na takovém stupni rozdělen mezi stator i rotor. Speciálním případem takového stupně je ten s reakcí $\Lambda = 0,5$, expanze u tohoto stupně je rozdělena přesně na polovinu mezi rotor i stator a teoreticky by mohly být oba stupně identické a jen zrcadlově obrácené. V reálném stupni toho však vlivem dalších vlivů nemůže být dosaženo. V přetlakových stupních se tlak ve statoru i rotoru snižuje a rychlost c_1 díky tomu nebývá tak vysoká. Turbíny používané v leteckých motorech mívají reakci $\Lambda = 0,25$ až $0,5$, protože u nich bývá dosahováno nejvyšších účinností. [5], [7]

2.2.4. Výkonový součinitel

Je měřítkem výkonu, který turbína odvede a je definován jako poměr změny entalpie na stupni k druhé mocnině obvodové rychlosti:

$$\psi = \frac{\Delta h_0}{u^2}, \quad (19)$$

$$\Delta h_0 = c_p \cdot \Delta T = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot r \cdot \Delta T, \quad (20)$$

$$u = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n_T}{60}. \quad (21)$$

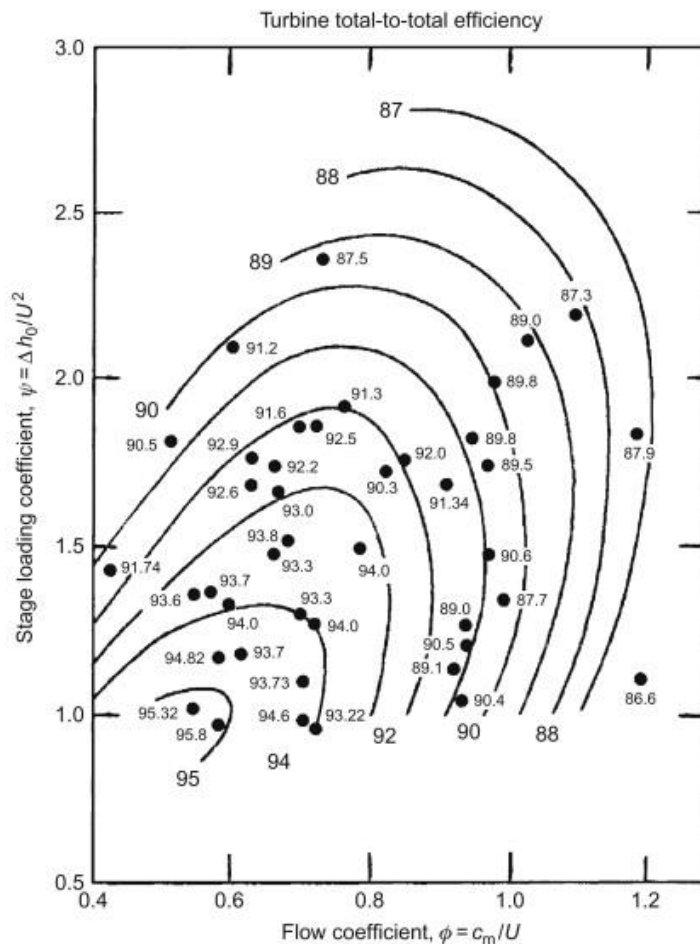
Po dosazení do rovnice 19 za jednotlivé členy bude výraz pro výkonový součinitel ve tvaru:

$$\psi = \frac{\frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot r \cdot 3600 \cdot \Delta T}{\pi^2 \cdot D_1^2 \cdot n_T^2}. \quad (22)$$

Společně s výkonovým součinitelem se používá ještě součinitel průtokový, který je definován jako poměr absolutní rychlosti k obvodové rychlosti:

$$\Phi = \frac{c_x}{u} \quad (23)$$

Praktickým využitím těchto dvou parametrů je zobrazení ve Smithově diagramu na Obrázek 11. Na vodorovné ose diagramu je průtokový součinitel ϕ a na svislé je výkonový součinitel ψ . Tento diagram, který byl sestaven na základě přibližně 70 experimentálních měření různých stupňů turbín firmy Rollce-Royce, publikovaných Smithem v roce 1965, nám názorně zobrazuje závislost účinnosti stupně právě na těchto dvou součinitelích. [7]



Obrázek 11: Smithův diagram účinnosti turbíny [7]

2.3. Ztráty

Při proudění tekutiny v profilové mříži turbíny vznikají ztráty, znalost těchto ztrát je základní předpoklad pro dosažení co možná nejvyšší účinnosti turbíny. Přesné stanovení velikosti ztrát je velice obtížné, protože se váží jak na konstrukční návrh, tak i na dílenské zpracování jednotlivých komponent v proudovém kanálu. Z toho vyplývá, že nejpřesněji se dají ztráty zjistit měřením jednotlivých turbín v aerodynamickém tunelu. Nicméně během času byla stanovena určitá kritéria, která se opírají o zevšeobecněné výsledky experimentů, a která nám umožní stanovení ztrát již při samotném návrhu, respektive jejichž dodržení budou ztráty udrženy v přijatelných mezích, v ideálním případě co nejbližší minimálním hodnotám.

Ztráty dělíme do několika kategorií podle způsobu vzniku:

- 1) Profilové ztráty – vznikají při obtékání tekutiny profilovou mříží.
- 2) Sekundární ztráty – vznikají druhotným prouděním uvnitř kanálu, vlivem konečné délky lopatky, interakcí apod.
- 3) Ztráty radiální vůlí – vznikají přetékáním tekutiny mezi koncem lopatky, nebo bandáží a tělesem skříně.
- 4) Ztráty na odtokové hraně.

Avšak nelze na ně hledět jen jako na oddělené procesy. Ztráty vzniklé v jednom místě ovlivňují další ztráty, a tak je nutno na ně hledět jako na jeden celek. Jelikož však ještě nebyla zvládnuta metoda výpočtu ztrát jako celku, pro výpočet se budu držet rozdělení do již zmíněných kategorií, a jednotlivé ztráty nakonec budou sečteny.

Základem použitého jednorozměrového návrhu je důsledně revidovaná práce autorů Ainleyho a Mathiesona, publikovaná v roce 1957. Tito autoři se ve zmíněné práci snažili o analytické vyhodnocení již zmíněných zkoušek provedených předcházející sestavení Smithova diagramu. Metoda Ainleyho a Mathiesona byla nadále dvakrát revidována, nejdříve to byli autoři Dunham a Came v roce 1970 a posléze Kacker a Okapuu v roce 1982. Tyto revize odstranily nedostatky původní metody a vytvořily z ní velmi vhodnou metodu pro řešení axiální turbíny umožňující stanovení základních parametrů stupně s přesností několika desetin procent. [12]

2.3.1. Princip metody

Ztráta celkového tlaku lopatkové mříže, vyjádřena jako výstupní dynamický tlak, je součtem ztrát profilových, sekundárních, ztrát na odtokové hraně a ztrát radiální vůlí. Profilové ztráty jsou navíc korigovány na vliv Reynoldsova čísla. Tvar vztahu pro výpočet ztráty celkového tlaku vyjadřuje následující rovnice:

$$Y_T = Y_P \cdot f_{Re} + Y_S + Y_{TE} + Y_{TC}. \quad (24)$$

Tento tvar vztahu pro ztráty celkového tlaku je odlišný od původního, předloženého Ainleyem a Mathiesonem (25)

$$Y_T = [(Y_P + Y_S) \cdot REFAC + Y_{TC}] \cdot Y_{TE}. \quad (25)$$

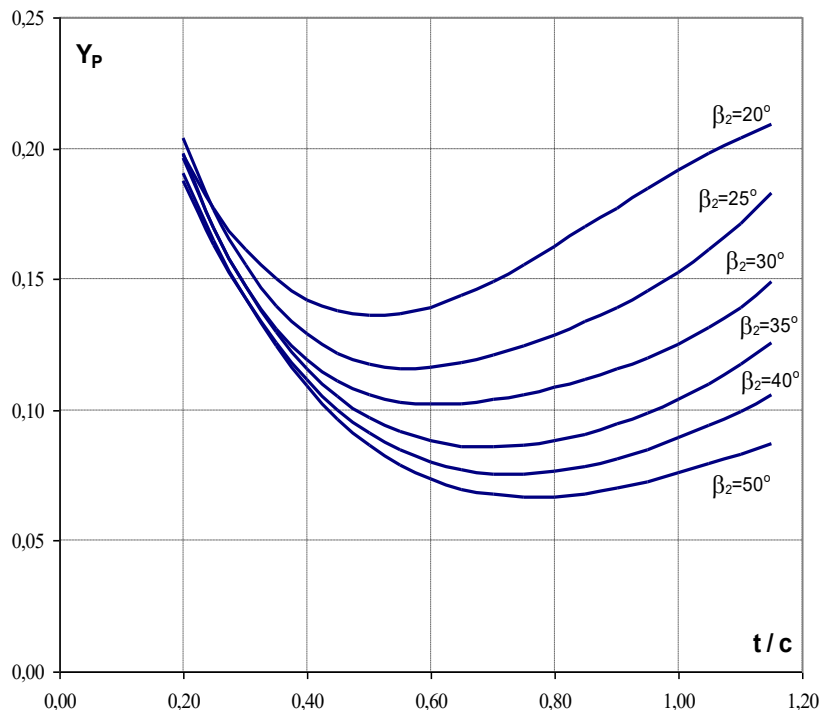
Z rovnice 24 je patrné, že vliv Reynoldsova čísla, reprezentovaný členem f_{Re} , je vztažen pouze na profilové ztráty, kdežto v původní metodě, vyjádřené rovnicí (25) byl vztažen i na sekundární ztráty Y_S . Dále je patrné, že koeficient ztrát v oblasti odtokové hrany Y_{TE} už není použit jako multiplikátor, ale jako samostatný člen. [13]

2.3.2. Profilové ztráty Y_p

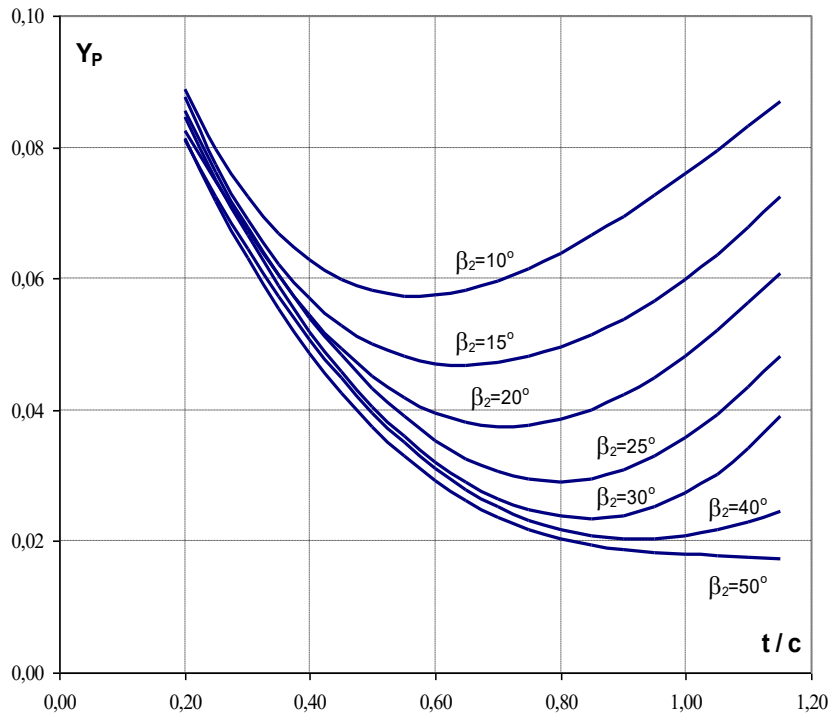
Koeficient profilových ztrát Y_p je vyjádřen vztahem:

$$Y_p = 0,914 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot Y_{P,AMDC} \cdot K_P + Y_{SHOCK} \right) \cdot CFM. \quad (26)$$

$Y_{P,AMDC}$ – Koeficient profilových ztrát určený dle metody Ainley-Mathieson, revidované Dunhamem a Camem. Stanovení velikosti tohoto součinitele vychází ze zkušebních měření lopatkových mříží. Tyto výsledky jsou vyjádřeny graficky jako závislosti velikosti součinitele profilových ztrát Y_p na poměru t/c (rozteč/těživa) pro různé hodnoty výstupních úhlů proudu z lopatkové řady β_2 a byly stanoveny pro dva extrémní případy. Nejprve pro mříže, kde nedochází k urychlení proudu a $\beta_1 = \beta_2$ (Obrázek 12), a dále pro mříže se značnou konfuzorností kanálu a s úhlem $\beta_1 = 90^\circ$ (Obrázek 13). [12] [13]



Obrázek 12: Koeficient profilových ztrát Y_p pro mříž $\beta_1 = \beta_2$ [12]

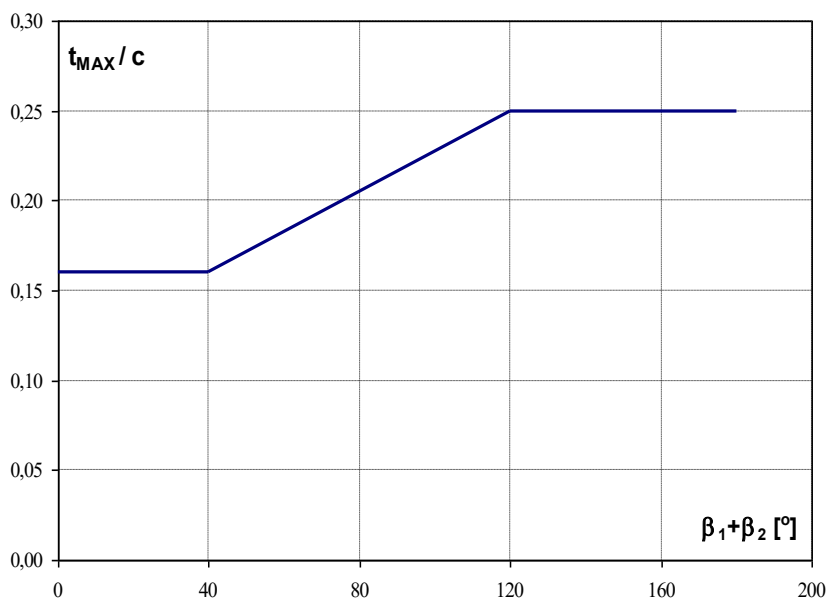


Obrázek 13: Koeficient profilových ztrát Y_p pr mříž $\beta_1=90^\circ$ [12]

Výpočet koeficientu profilových ztrát pro obecnou lopatkovou mříž je určen interpolačním vztahem (27):

$$Y_{P,AMDC} = \left(Y_{P(\beta_1=90^\circ)} + \left| \frac{90 - \beta_1}{90 - \beta_2} \right| \cdot \left(\frac{90 - \beta_1}{90 - \beta_2} \right) \cdot [Y_{P(\beta_1=\beta_2)} - Y_{P(\beta_1=90^\circ)}] \right) \cdot \left(\frac{t_{max}}{c} \right)^{\frac{90 - \beta_1}{90 - \beta_2}} \cdot \left(\frac{c}{0,2} \right)^{\frac{90 - \beta_1}{90 - \beta_2}} \quad (27)$$

t_{max}/c – poměr maximální tloušťky profilu a jeho těživy. Pro typickou turbínovou lopatkovou mříž jej lze určit z Obrázek 14. [12] [13]



Obrázek 14: Závislost t_{max}/c na velikosti úhlu proudu [12]

K_p – korekční faktor zahrnující vliv velikosti výstupního Machova čísla M_2 a vliv akcelerace kanálu na profilové ztráty. Jelikož byly profilové ztráty z Obrázek 12 a Obrázek 13 určeny pro nízké podzvukové rychlosti, jejich použití pro proudění s vyšším Machovým číslem vede k pesimističtějším výsledkům, než odpovídá reálnému stavu

$$K_p = 1 - K_2 \cdot (1 - K_1). \quad (28)$$

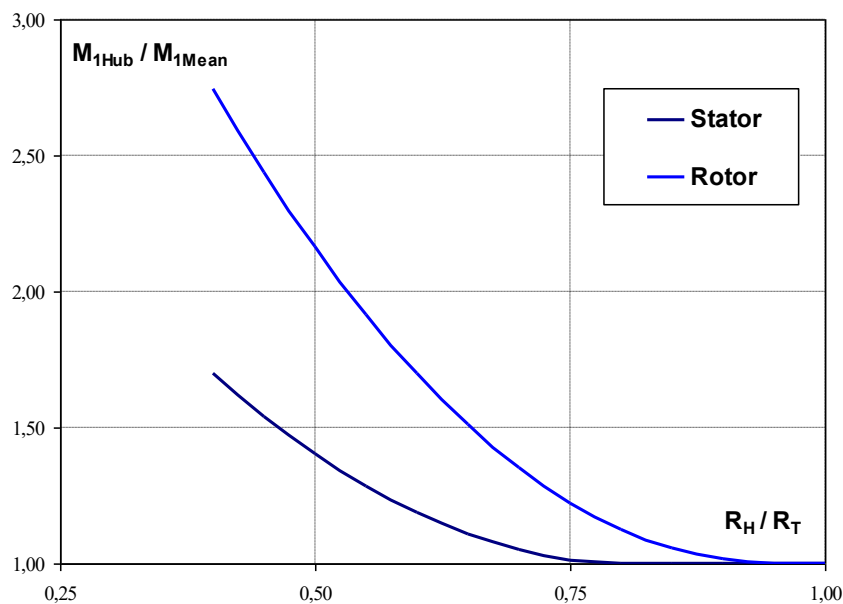
$$K_1 = 1 - \text{pro } M_2 \leq 0,2.$$

$$K_1 = 1 - 1,25 \cdot (M_2 - 0,2) - \text{pro } M_2 > 0,2.$$

$$K_2 = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2.$$

Y_{SHOCK} – koeficient ztrát rázem na náběžné hraně lopatky. Vlivem místního zrychlení proudu, které je způsobeno velkým zakřivením náběžné hrany, mohou vznikat rázy i při relativně nízkém Machově čísle.

Nejvyšší ztráty tohoto typu vznikají na patních řezech z důvodu vyššího Machova čísla oproti ostatním řezům. Nicméně tato ztráta je pouze lokální a projevuje se více u kratších lopatek než u těch dlouhých. [12]



Obrázek 15: Závislost Machova čísla na patě lopatky a na středním průměru a na poloměru špičky a paty lopatky. [12]

Obrázek 15 znázorňuje výsledek porovnání publikovaných výsledků měření pro statorové a rotorové mříže. Vlastní ztráta v blízkosti patního průměru je pak určena vztahem (29):

$$\left(\frac{\Delta P}{q_1} \right)_{HUB} = 0,75 \cdot (M_{1,HUB} - 0,4)^{1,75}. \quad (29)$$

Příspěvek k celkovým ztrátám rázem na střední proudnici je vyjádřen vztahem (30):

$$\left(\frac{\Delta P}{q_1} \right)_{SHOCK} = \left(\frac{R_H}{R_T} \right) \cdot \left(\frac{\Delta P}{q_1} \right)_{HUB}. \quad (30)$$

Výsledný vztah pro koeficient Y_{SHOCK} :

$$Y_{SHOCK} = \left(\frac{\Delta P}{q_1}\right)_{SHOCK} \cdot \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_1^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}{1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_2^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} \quad (31)$$

CFM – korekční faktor zavedený v důsledku rázových vln, objevujících se v režimu nadzvukových výstupních rychlostí. Pro rychlosti $M_2 < 1$ je $CFM = 1$. Vztah pro tento korekční faktor při $M_2 \geq 1$ je vyjádřen rovnicí (32):

$$CFM = 1 + 60 \cdot (M_2 - 1)^2. \quad (32)$$

Z předchozího tedy vyplývá, že vliv absolutní hodnoty Machova čísla na profilové ztráty je uvážen ze tří hlavních hledisek: především při překročení rychlosti zvuku, dále ztráta rázem v patním řezu a konečně jeho vliv na vlastnosti mezní vrstvy při různém stupni expanze v mezilopátkovém kanálu. [12]

2.3.3. Korekce na vliv Reynoldsova čísla f_{Re}

Vzhledem k tomu, že koeficient profilových ztrát Y_p je počítán při referenčním Reynoldsově čísle $Re = 2 \cdot 10^5$, určeném na základě skutečné tětivy profilu a podmínek na výstupu z lopátkové mříže, je potřeba pro jiná Reynoldsova čísla Re_c určit korekci.

Pro $Re_c \leq 2 \cdot 10^5$:

$$f_{Re} = \left(\frac{Re_c}{2 \cdot 10^5}\right)^{-0,4}. \quad (33)$$

Pro $2 \cdot 10^5 < Re_c < 2 \cdot 10^6$:

$$f_{Re} = 1,0. \quad (34)$$

Pro $Re_c \geq 2 \cdot 10^6$:

$$f_{Re} = \left(\frac{Re_c}{2 \cdot 10^6}\right)^{-0,2}. \quad (35)$$

Vliv Reynoldsova čísla je však ovlivněn tvarem lopatky a bez přesných znalostí tohoto tvaru nelze určit tento vliv přesně. [12] [13]

2.3.4. Sekundární ztráty Y_S

Vztah pro sekundární ztráty je vyjádřen rovnicí (36):

$$Y_S = 1,2 \cdot Y_{S,AMDC} \cdot K_S. \quad (36)$$

V původním vztahu pro výpočet sekundárních ztrát byl zahrnut i vliv tloušťky lopatky, a proto je třeba zohlednit tento fakt i v rovnici (36). Nárůst sekundárních ztrát je oproti původnímu vztahu 20 %, a tak byla do vztahu přidána konstanta 1,2.

$Y_{S,AMDC}$ – koeficient profilových ztrát určený dle metody AMDC

$$Y_{S,AMDC} = 0,0334 \cdot f_{AR} \cdot \frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} \cdot \left(\frac{C_L}{\frac{t}{c}}\right)^2 \cdot \frac{\sin^2 \beta_2}{\sin^2 \beta_m}. \quad (37)$$

C_L -součinitel vztaku profilu

$$\frac{C_L}{t} = 2 \cdot (\cot \beta_1 - \cot \beta_2) \cdot \sin \beta_m. \quad (38)$$

β_m -střední úhel proudu plynu

$$\beta_m = \cot^{-1} \left[\frac{1}{2} \cdot (\cot \beta_1 - \cot \beta_2) \right]. \quad (39)$$

f_{AR} - funkce štíhlosti lopatky. Štíhlost lopatky (aspect ratio) je definována jako poměr h/c . Pro $h/c \leq 2$ je funkce štíhlosti definována jako:

$$f_{AR} = \frac{1 - 0,25 \cdot \sqrt{2 - h/c}}{h/c}. \quad (40)$$

Pro $h/c > 2$ je potom f_{AR} definována jako:

$$f_{AR} = \frac{1}{h/c}. \quad (41)$$

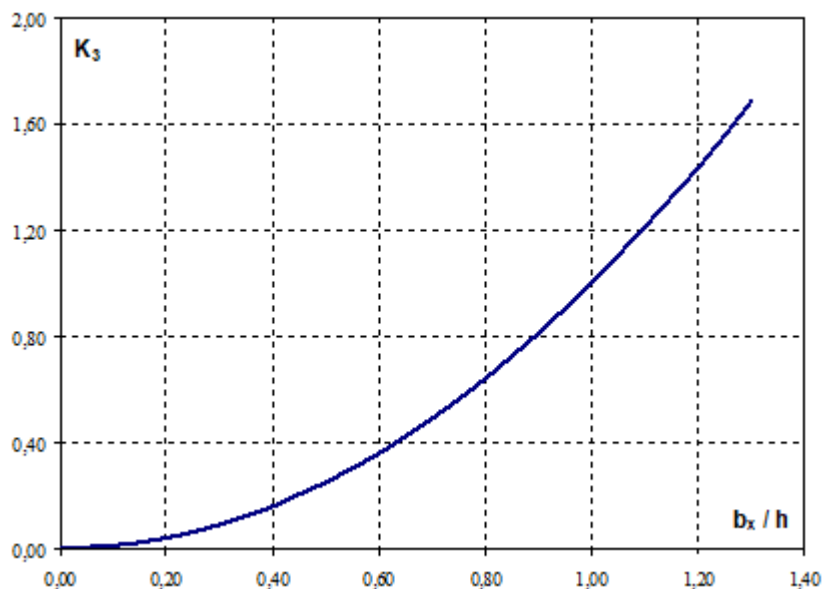
Z rovnic (40) a (41) je patrné, že pro štíhlost lopatky menší než dva, je uvažován menší nárůst sekundárních ztrát.

K_5 - korekční faktor zahrnující vliv akcelerace proudu, definovaný v rovnici (42)

$$K_5 = 1 - K_3 \cdot (1 - K_p). \quad (42)$$

Korekční součinitel byl definován již v rovnici (28) a součinitel K_3 je definován způsobem následujícím:

$$K_3 = \left(\frac{1}{h/b_x} \right)^2 \cdot [12] \quad (43)$$



Obrázek 16: Závislost korekčního faktoru K_3 na poměru b_x/h [12]

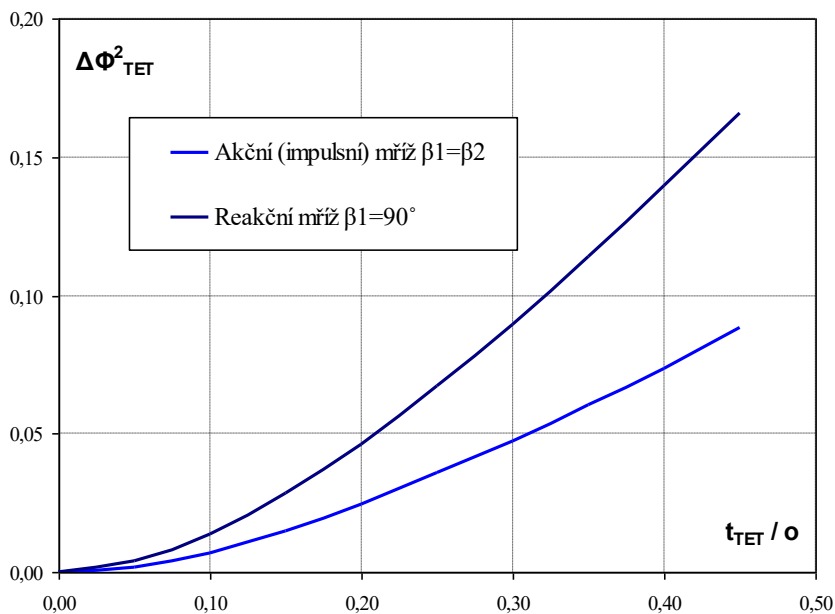
2.3.5. Ztráty v oblasti odtokové hrany Y_{TE}

Pro tyto ztráty byly stanoveny dva součinitele:

$\Delta\Phi_{TET}^2$ je součinitel ztrát energie.

t_{TET}/o je poměr tloušťky odtokové hrany k hrdlu kanálu.

Na základě měření byly poté stanoveny grafické závislosti (Obrázek 17) pro dva případy profilové mříže. Stejně jako v kapitole 2.3.2 to jsou mříže, kde nedochází k urychlení proudu a $\beta_1 = \beta_2$, a dále mříže se značnou konfuzorností kanálu a s úhlem $\beta_1 = 90^\circ$.



Obrázek 17: Grafická závislost koeficientu $\Delta\Phi_{TET}^2$ na poměru t_{TET}/o [12]

Pro jiné, než výše uvedené mříže byl pro koeficient $\Delta\Phi_{TET}^2$ stanoven interpolační vztah (44), podobně jako v rovnici (27)

$$\Delta\Phi_{TET}^2 = \Delta\Phi_{TET(\beta_1=90^\circ)}^2 + \left| \frac{90 - \beta_1}{90 - \beta_2} \right| \cdot \left(\frac{90 - \beta_1}{90 - \beta_2} \right) \cdot [\Delta\Phi_{TET(\beta_1=\beta_2)}^2 - \Delta\Phi_{TET(\beta_1=90^\circ)}^2]. \quad (44)$$

Součinitel ztrát celkového tlaku Y_{TE} je ve tvaru:

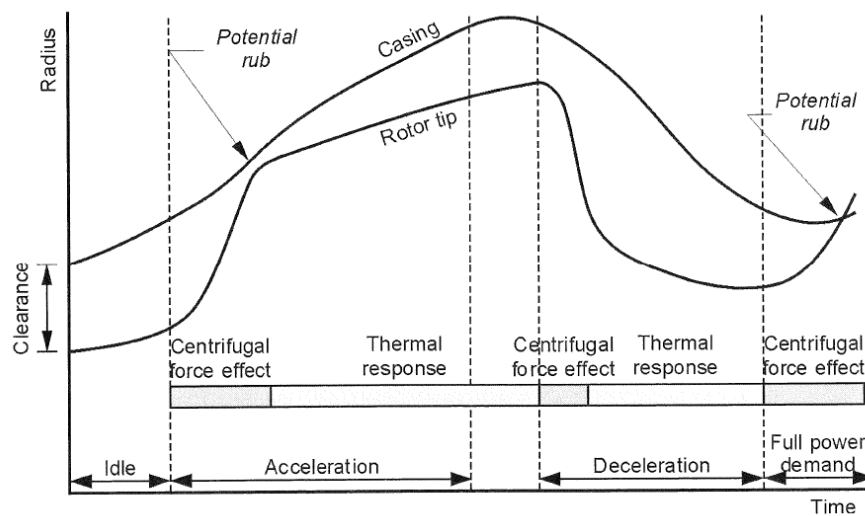
$$Y_{TE} = \frac{\left[1 - \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_2^2 \cdot \left(\frac{1}{1 - \Delta\Phi_{TET}^2} - 1 \right) \right]^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} - 1}{1 - \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot M_2^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}}. \quad [12] \quad (45)$$

2.3.6. Ztráty radiální vůlí Y_{TC}

Mezi vnějším průměrem rotoru a stěnou skříně musí být určitá mezera, kterou nazýváme radiální vůle. Tato vůle je nezbytná pro hladký chod rotoru za všech provozních režimů. Při návrhu je snaha tuto vůli co nejvíce minimalizovat, protože touto vůlí bude vždy proudit nějaká tekutina, která neodevzdá svoji energii lopatkám, což způsobuje nevratné ztráty. Tekutina protékající mezerou také může vytvářet vírové proudění, které nežádoucím způsobem ovlivňuje proud procházející lopatkovým kanálem. Snahy o minimalizaci vůle

však musí být opatrné, protože tato vůle závisí na provozních podmínkách, ale mění se také v čase při stejných provozních podmínkách. [12]

Na Obrázek 18 je znázorněn průběh změny velikosti radiální vůle turbíny leteckého motoru od startu, přes volnoběh, kdy velikost poloměrů rotoru i skříně rostou pomalu a přibližně stejně, a radiální vůle se tedy moc nemění. Poté následuje akcelerace, při níž je nárůst poloměru rotoru rapidní hlavně vlivem odstředivých sil, po vyrovnání odstředivých sil je následný růst poloměru rotoru pouze vlivem teplotní roztažnosti již menší. Poloměr skříně roste pouze vlivem teplotní roztažnosti, a tak je nárůst jejího poloměru plynulejší s menším celkovým přírůstkem. Při zpomalování je průběh podobný, u rotoru nastane nejdřív prudké zmenšení poloměru rotoru vlivem snížení odstředivé síly a následuje pozvolnější zmenšování poloměru od snížení teploty. U skříně je zmenšení poloměru opět jen vlivem snížení teploty a jeho pokles je tedy plynulejší. Problém může nastat při případné potřebě okamžitě zvýšit výkon motoru, protože nárůst poloměru rotoru vlivem odstředivých sil bude příliš rychlý. V takovém případě by mohlo dojít k tomu, že zvětšení poloměru skříně teplotní roztažností nebude dostatečné v tak krátkém časovém intervalu, a vnější průměr rotoru se začne třít o skříň. Pro tyto případy je v těchto místech stěna skříně tvořena vhodným abrazivním materiálem. [7]



Obrázek 18: Průběh změny velikosti radiální vůle během jednoho typického cyklu motoru [7]

Kacker a Okapuu na základě mnoha experimentálních měření, které vyhodnocovali vliv velikosti radiální vůle na účinnost turbíny, došli ke vztahu (46), dle něž lze spočítat změnu účinnosti turbíny s nebandážovanými lopatkami s přesností $\pm 2\%$

$$\frac{\Delta\eta/\eta_0}{\frac{\Delta\varepsilon}{h \cdot \cos \alpha_2} \frac{R_{TIP}}{R_{MEAN}}} = 0,93. \quad (46)$$

$\Delta\eta$ je změna velikosti účinnosti odpovídající příslušné změně radiální vůle $\Delta\varepsilon$.

η_0 je účinnost při nulové radiální vůli.

Pro bandážované lopatky byl Dunhamem a Camem modifikován původní vztah Ainleyho a Mathiesona do tvaru (47)

$$Y_{TE} = 0,36 \cdot \frac{c}{h} \cdot \left(\frac{\varepsilon'}{c}\right)^{0,78} \cdot \left(\frac{C_L}{S/c}\right) \cdot \frac{\cos^2 \beta_2}{\cos^3 \beta_m}, \quad (47)$$

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon}{(\text{počet břitů bandáže})^{0,42}} \cdot [13] \quad (48)$$

2.4. Účinnost turbíny

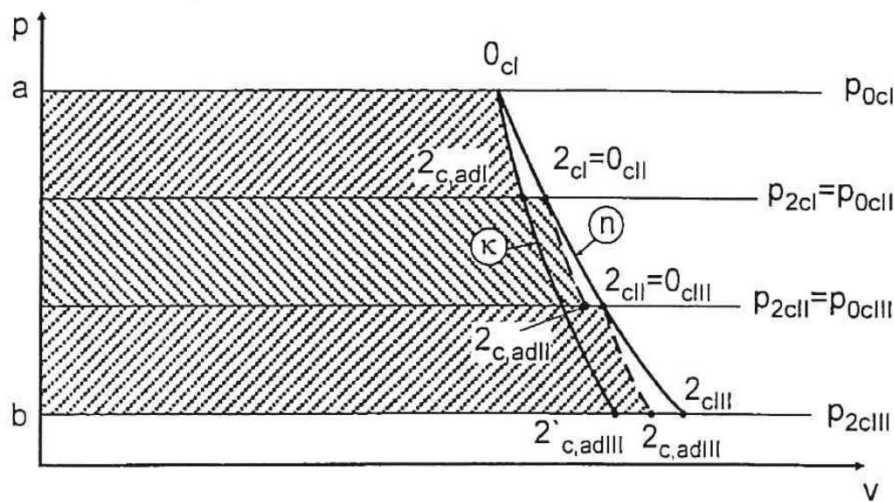
S vysokou účinností je jeden stupeň turbíny schopen zpracovat 200-300 kJ/kg. Pokud je měrná práce, kterou chceme v turbíně zpracovat, vyšší, je vhodně použít vícestupňovou turbínu. Adiabatická účinnost turbíny je vyjádřena vztahem (11). Dosazením ze vztahu (3), (12) a (15) vyjde vztah pro adiabatickou účinnost stupně turbíny

$$\eta_{st} = \frac{c_p \cdot (T_{0c} - T_{2c})}{c_p \cdot T_{0c} \left(1 - \left(\frac{p_{2c}}{p_{0c}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)} \quad (49)$$

Vztah lze zkrátit členem c_p

$$\eta_{st} = \frac{(T_{0c} - T_{2c})}{T_{0c} \left(1 - \left(\frac{p_{2c}}{p_{0c}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)} \quad (50)$$

Podobně by bylo možné vyjádřit i účinnost celé turbíny, a to jako poměr efektivní práce odvedené z turbíny k adiabatické práci získané při expanzi bez ztrát. Efektivní práce odvedená z turbíny je součtem prací odváděných z jednotlivých stupňů turbíny.



Obrázek 19: p-v diagram expanze třístupňové turbíny [5]

Z diagramu na Obrázek 19 lze vyčíst, že součet adiabatických prací jednotlivých stupňů je větší než adiabatická práce celé turbíny. Z čehož plyne, že účinnost vícestupňové turbíny bude větší než účinnost stupně zpracovávajícího stejný teplotní spád. [5]

3. Návrh dvoustupňové axiální turbíny

Tato diplomová práce si klade za cíl navrhnout náhradu současné jednostupňové volné turbíny turbínou dvoustupňovou. Hlavním úkolem je zlepšit účinnost této turbíny, jejíž hodnota momentálně činí 89 % při zachování stávajícího teplotního spádu, a tedy i výkonu.

Pro výpočet parametrů stupně turbíny revidovanou metodou Ainleyho a Mathiesona popsanou v předchozích kapitolách jsou potřeba vstupní parametry vycházející z tepelného oběhu motoru, z parametrů proudu vystupujícího z generátorové turbíny a dílčími parametry samotného stupně turbíny.

3.1. Vstupní parametry jednorozměrového návrhu stupně turbíny

Potřebné parametry vycházející z tepelného oběhu motoru:

$T_{4C} [K]$ - Celková teplota na vstupu do statoru.

$p_{4C} [Pa]$ - Celkový tlak na vstupu do statoru.

$\Delta T_C [K]$ - Teplotní spád stupně.

$Q_{pl4c} [kg/s]$ - Hmotnostní průtok.

$\kappa [-]$ - Adiabatický koeficient tekutiny.

Potřebné parametry vycházející z výstupu rotoru generátorové turbíny. Odpovídají příslušným parametrům na vstupu do statoru volné turbíny:

$D_2 [m]$ - Střední průměr.

$H_2 [m]$ - Výška lopatky.

$\alpha_2 [^\circ]$ - Úhel absolutní rychlosti proudu tekutiny.

Volené parametry stupně turbíny. Všechny poměrné veličiny jsou vztažené k těživě příslušného lopatkového kola:

$\Lambda [-]$ - Reakce.

$\Theta [-]$ - Poměr středních průměrů D_2/D_1 .

$\psi [-]$ - Součinitel zatížení stupně.

$c_s [m]$ - Tětiva statoru.

$c_R [m]$ - Tětiva rotoru.

$RV [-]$ - Poměrná radiální vůle.

$T_S [-]$ - Poměrná rozteč statoru.

$T_R [-]$ - Poměrná rozteč rotoru.

$R_{OHS} [-]$ - Poměrný poloměr odtokové hrany statoru.

$R_{OHR} [-]$ - Poměrný poloměr odtokové hrany rotoru.

$D_1 [m]$ - Střední průměr na vstupu do rotoru.

$N_B [m]$ - Počet břitů bandáže rotoru.

$\alpha_1 [^\circ]$ - Úhel absolutní rychlosti proudu tekutiny na výstupu do statoru.

Dále se také zadávají hodnoty vztahující se ke chlazení lopatek a materiálové hodnoty. Navrhovaná turbína chlazená není, a tak není potřeba tyto parametry uvažovat. Materiálové hodnoty slouží pro prvotní pevnostní kontrolu ve výpočtu.

3.2. Výpočet jednorozměrového návrhu na střední proudnici

Je prováděn formou návrhového programu vytvořeném v programovacím jazyku Pascal. Vstupní data se zadávají buď formou vstupního souboru nebo přímo z klávesnice. Jejich bližší popis je uveden v předchozí kapitole.

Při samotném výpočtu jsou nejdříve stanoveny parametry na vstupu do statoru a následuje výpočet ztrát pro každou lopatkovou řadu. Při výpočtu ztrát je jako první zvolena výška lopatky na výstupu ze statoru H_1 . Pro tuto výšku je proveden výpočet součinitele ztrát celkového tlaku Y_T podle vztahů uvedených v kapitole 2.3 a dalších podkapitolách. Ze součinitele ztrát celkového tlaku je následně ze vztahu (51) vypočten součinitel restituice celkového tlaku σ_S , pomocí kterého je vypočten celkový tlak na výstupu ze statoru

$$\sigma_S = \frac{1}{1 + Y_T \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \cdot \lambda_{c_1}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \right]} \quad (51)$$

Pro rotor je součinitel restituice celkového tlaku σ_R ve tvaru (52)

$$\sigma_S = \frac{1}{1 + Y_T \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \cdot \lambda_{w_2}^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \right]} \quad (52)$$

Se znalostí celkového tlaku na výstupu ze statoru program znovu spočítá správnou hodnotu výšky lopatky H_1 . Porovnáním této nové výšky a původně navržené je vypočten rozdíl, a pokud je tento rozdíl menší, než je povolená minimální hodnota, je výpočet ukončen. Pokud je rozdíl větší než minimální povolená hodnota, pokračuje program další iterací, dokud není splněna podmínka. Stejný postup je aplikován na rotor. [12]

3.2.1. Vstupní parametry pro první stupeň

Λ	0,4 [-]	T_S	0,79315 [-]
Θ	1,010007 [-]	T_R	0,707517 [-]
Ψ	1,221619 [-]	R_{OHS}	0,0108108 [-]
T_{0C}	983,6 [K] (teplota T_{4C} z oběhu)	R_{OHR}	0,0194444 [-]
p_{0C}	227097,0 [Pa] (tlak p_{4C} z oběhu)	D_0	0,19985 [m] (D_2 z GT)
ΔT_C	66,0 [K]	D_1	0,21485 [m]
α_0	119,492 [°] ($180 - \alpha_2$ z GT)	N_B	2 [-]
κ	1,3301 [-]	RV	0,0001 [-]
c_s	0,037 [m]	G_2	3,63 [kg·s ⁻¹] (Q_{pl4c} z oběhu)
c_R	0,018 [m]	α_1	29,0 [°]
H_0	0,03135 [m] (H_2 z GT)	$\Delta\beta$	0,5922 [°]

Tyto vstupní parametry byly nalezeny po několika iteracích, při kterých byly zkoušeny různé kombinace parametrů, které nevycházejí z termodynamického oběhu motoru ani z geometrických parametrů generátorové turbíny. Pro tyto vstupní parametry mi program vypočítal 9 variant prvního stupně turbíny. Tyto varianty se lišily charakteristikami rotorových mříží, výstupními parametry proudu tekutiny a účinnostmi celého stupně. S ohledem potřeby udržení úhlu, pod kterým se zvětšuje výška kanálu tak, aby nedocházelo k utržení proudu, jsem zvolil variantu, která má vhodnou výšku lopatky H_1 . Tato varianta zároveň měla stále dobrou účinnost.

3.2.2. Vstupní parametry pro druhý stupeň

Λ	0,4 [-]	T_S	0,968477 [-]
Θ	1 [-]	T_R	0,71611 [-]
ψ	1,222964 [-]	R_{OHS}	0,016 [-]
T_{0C}	917,6 [K] (teplota T_{2C} z prvního st.)	R_{OHR}	0,018919 [-]
p_{0C}	165932,4 [Pa] (tlak p_{2C} z 1. st.)	D_0	0,217 [m] (D_2 z prvního st.)
ΔT_C	71,5 [K]	D_1	0,2235 [m]
α_0	90,9675 [°] ($180 - \alpha_2$ z prvního st.)	N_B	2 [-]
κ	1,3301 [-]	RV	0,0001 [-]
c_s	0,025 [m]	G_2	3,63 [kg·s ⁻¹] (Q_{pl4c} z oběhu)
c_R	0,0185 [m]	α_1	26,0 [°]
H_0	0,055064 [m] (H_2 z prvního st.)	$\Delta\beta$	0,5922 [°]

Opět bylo provedeno několik výpočtů, při nichž byly iterativně upravovány jednotlivé vstupní parametry. Pro tento soubor vstupních parametrů jsem dostal 4 varianty stupně. Jelikož všechny 4 splňovali geometrické požadavky na tvar kanálu, zvolil jsem tu s nejvyšší vypočtenou účinností.

Otáčky společné hřídele jsou 22223,18 ot/min. Do výpočtu se nezadávají explicitně, ale jsou stanoveny pomocí výkonového součinitele. Otáčky původní volné turbíny jsou 31023,0 ot/min. Snížení otáček by znamenalo předělat reduktor, ale díky tomu by mohla být snížena jeho hmotnost díky jeho menšímu zatížení.

3.2.3. Parametry prvního stupně v návrhovém bodě

	Stator		Rotor
Z_S	23 [-]	Z_R	53 [-]
p_{1c}	222328,6 [Pa]	p_{2c}	165932,4 [Pa]
T_{1c}	983,6 [K]	T_{2c}	917,6 [K]
C_1	346,0806 [m·s ⁻¹]	C_2	159,2421 [m·s ⁻¹]
W_1	175,8617 [m·s ⁻¹]	W_2	300,7875 [m·s ⁻¹]
U_1	250,0 [m·s ⁻¹]	U_2	252,5018 [m·s ⁻¹]
β_1	72,5662 [°]	α_2	89,0325 [°]
Y_P	0,028554 [-]	β_2	31,961 [°]
Y_S	0,076078 [-]	Y_P	0,018735 [-]

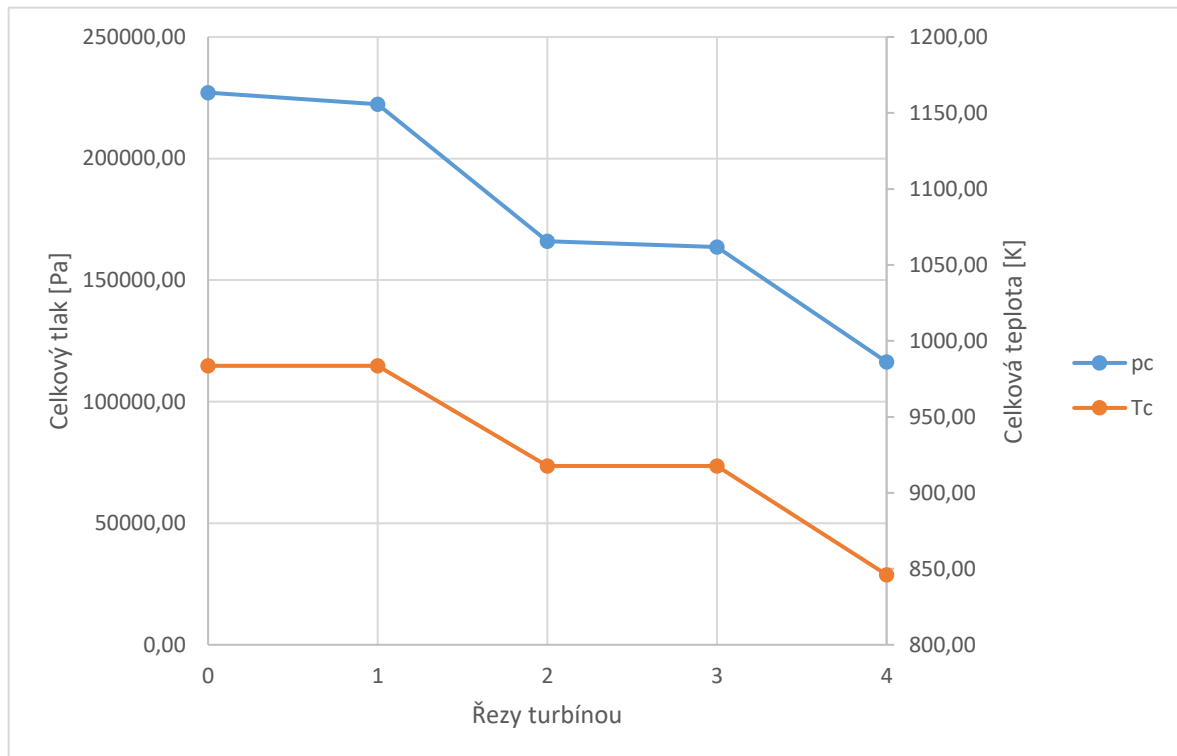
Y_{TE} 0,004832 [-]
 Y_{TC} 0,109566 [-]
 σ_S 0,979002 [-]

 Y_S 0,03764 [-]
 Y_{TE} 0,015859 [-]
 Y_{TC} 0,081719 [-]
 σ_R 0,987377 [-]

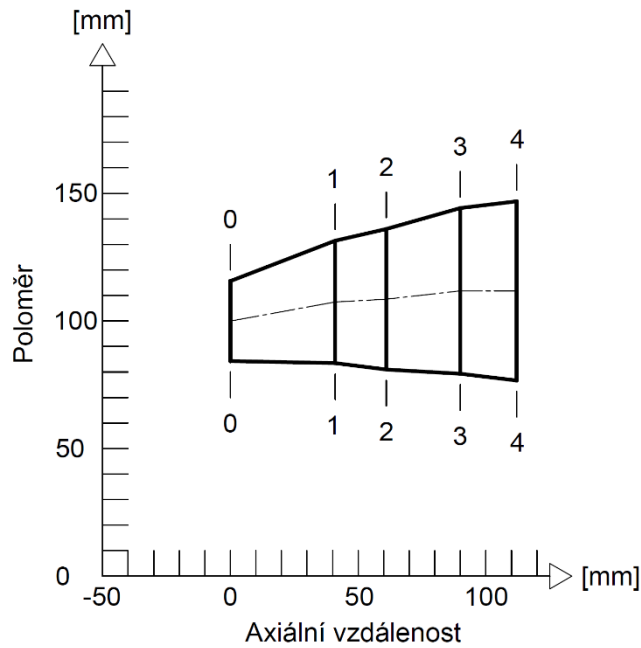
3.2.4. Parametry druhého stupně v návrhovém bodě

	Stator		Rotor
Z_S	29 [-]	Z_R	53 [-]
p_{1c}	163636,6 [Pa]	p_{2c}	116325,7 [Pa]
T_{1c}	917,6 [K]	T_{2c}	846,1[K]
C_1	350,5411 [m·s ⁻¹]	C_2	160,1529 [m·s ⁻¹]
W_1	163,2130 [m·s ⁻¹]	W_2	307,9546 [m·s ⁻¹]
U_1	260,0652 [m·s ⁻¹]	U_2	260,0652 [m·s ⁻¹]
β_1	70,3072 [°]	α_2	88,9317 [°]
Y_P	0,017424 [-]	β_2	31,3298[°]
Y_S	0,034033 [-]	Y_P	0,022649 [-]
Y_{TE}	0,009637 [-]	Y_S	0,031004 [-]
Y_{TC}	0,065694 [-]	Y_{TE}	0,015281 [-]
σ_S	0,9861165 [-]	Y_{TC}	0,082452 [-]
		σ_R	0,985728 [-]

Na Graf 1 je zobrazen průběh změn celkové teploty a celkového tlaku na jednotlivých řezech turbíny tak, jak jsou zobrazeny na Obrázek 20.

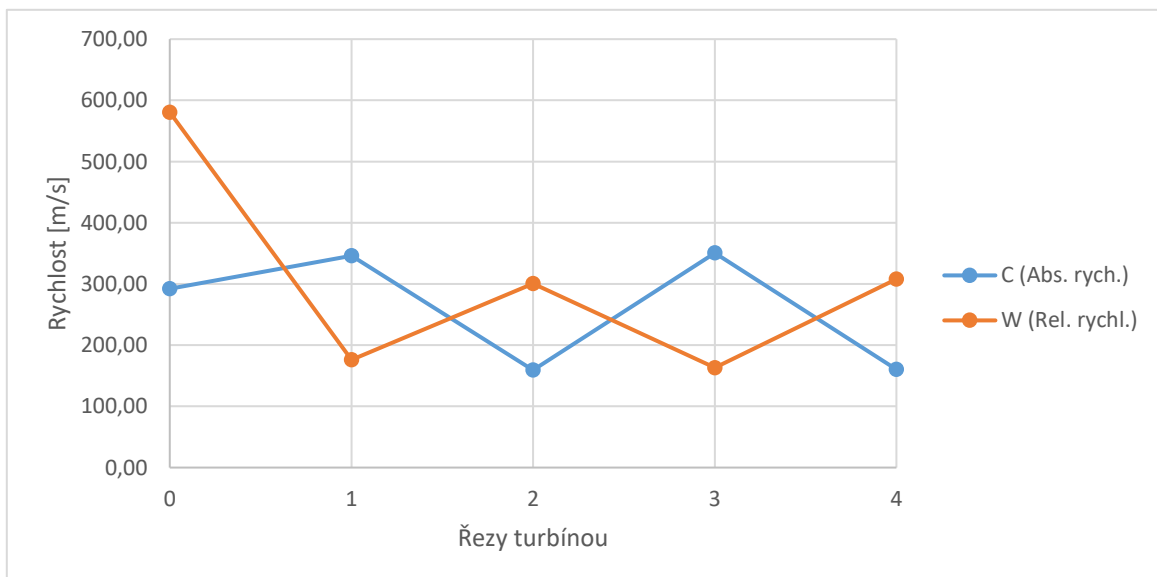


Graf 1: Změny celkového tlaku a celkové teploty v obou stupních turbíny

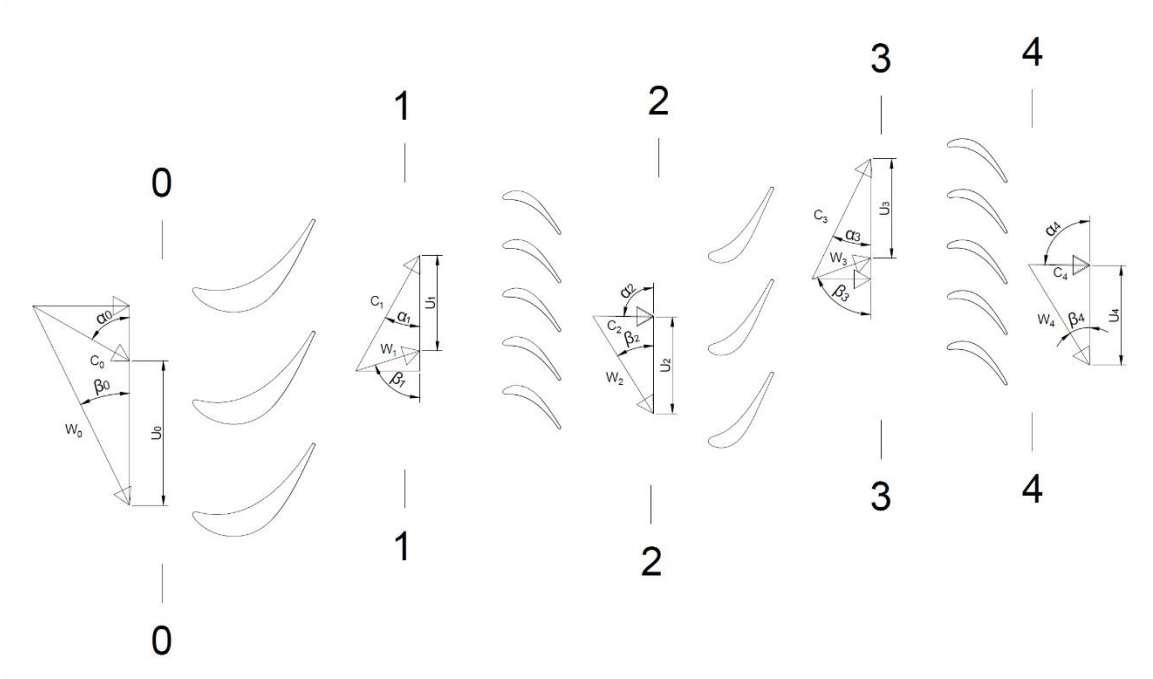


Obrázek 20: Meridiální řez turbínou

Graf 2 popisuje změny absolutní a relativní rychlosti napříč oběma stupni turbíny. Na Obrázek 21 jsou zobrazeny rychlostní trojúhelníky v jednotlivých řezech turbíny, tak jak byly navrženy v jednorozměrovém návrhu.



Graf 2: Změny rychlostí tekutiny v obou stupních turbíny



Obrázek 21: Rychlostní trojúhelníky v jednotlivých řezech turbíny

3.3. Výpočet parametrů po výšce turbíny

Po výšce lopatky budou stanoveny základní parametry proudu tekutiny v libovolných řezech, jimiž jsou rychlostní trojúhelníky a na nich závislé veličiny. Tyto hodnoty jsou důležité pro návrh jednotlivých profilů mříž. Základní vztah pro změnu parametrů:

$$\frac{dp}{dr} = \rho \cdot \frac{c_u^2}{r}. \quad (53)$$

Součinitelé restituce celkového tlaku σ_S a σ_R jsou po výšce lopatky konstantní a lze tedy použít hodnoty vypočtené v jednorozměrném návrhu. Rozložení výstupního úhlu proudu tekutiny α_1 ze satoru je dáno aproximačním vztahem 54

$$\cos^2 \alpha_1 = a + b \cdot \bar{r}. \quad (54)$$

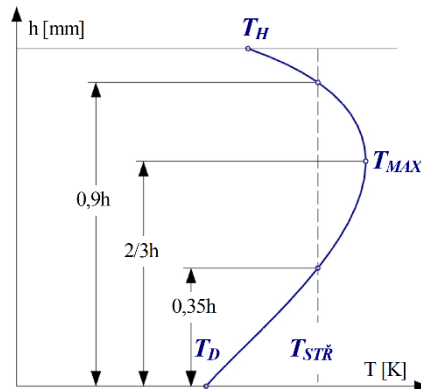
\bar{r} je poměrný poloměr D_2/D_1 , a a b jsou konstanty.

Rozložení výstupního úhlu β_2 z rotoru je dáno aproximačním vztahem 55

$$\beta_2 = L_1 + L_2 \cdot \bar{r} + L_3 \cdot \bar{r}^2. \quad (55)$$

\bar{r} je opět poměrný poloměr. L_1, L_2, L_3 jsou konstanty.

Aby proudění na patě a na špičce lopatky v návrhovém bodě probíhalo po proudnicích navržených v jednorozměrovém návrhu, je nutné po výšce lopatky zvolit vhodný průběh výstupního úhlu β_2 (neboli konstant L_1, L_2, L_3). Celkový tlak na vstupu do turbíny je konstantní. Teplotní profil, vyobrazený na Obrázek 22, vystupující ze spalovací komory, uvažujeme ve tvaru paraboly s vrcholem $T_{max} = 1,02416 \cdot T_{stř}$ ve dvou třetinách výšky kanálu. Střední hodnota je dána z cyklu motoru. Teplotní profil pro volnou turbínu už vychází z výstupního profilu rotoru generátorové turbíny. [11] [12]



Obrázek 22: Teplotní profil [12]

Řešení samotné radiální rovnováhy je opět provedeno formou výpočetního programu napsaného v jazyce pascal. Detailní postup je uveden v literatuře [12]. Stejně jako v případě jednorozměrového návrhu se do programu nahrává soubor se vstupními parametry. Část parametrů vychází v jednorozměrového návrhu, část je volena.

3.3.1. Vstupní parametry prvního stupně

Vycházející z jednorozměrového návrhu:

Adiabatický koeficient tekutiny:

$$\kappa = 1,3301[-]$$

Stř. celk. teplota vyrovnaného teplotního profilu na vstupu do statoru:

$$T_{0C} = 983,6 [K]$$

Celkový tlak na vstupu do statoru:

$$p_{0C} = 227097,0 [Pa]$$

Součinitel restituce tlaku statoru:

$$\sigma_S = 0,979002 [-]$$

Součinitel restituce tlaku rotoru:

$$\sigma_R = 0,987377 [-]$$

Poloviční průtočné množství:

$$G_{2/2} = 1,815 [kg/s]$$

Rozteč:

$$T = 0,012735 [m]$$

Lavalovo číslo pro rychlost C_1 (LAM1):

$$\lambda_{C1} = 0,609511 [-]$$

Lavalovo číslo pro rychlost U_1 (LAMU1):

$$\lambda_{U1} = 0,440269 [-]$$

Lavalovo číslo pro rychlost W_2 (LAMW2):

$$\lambda_{W2} = 0,54024 [-]$$

Střední průměr na vstupu do rotoru (D_1):

$$D_{STR} = 0,21485 [m]$$

Poměrný průměr na výstupu z rotoru vztahený ke střednímu průměru:

$$R_2 = 1,0100069 [-]$$

Parametry volené:

Poměrný krok ve směru poloměru vztahený k D_{STR} :

$$S = 0,01062934[-]$$

Horní mez poměrného průměru:

$$E = 1,25 [-]$$

Dolní mez poměrného průměru:

$$E = 0,75 [-]$$

Konstanty (horní polovina lopatky):

$$a = 0,542303 [-]$$

$$b = 0,222657 [-]$$

$$L_1 = 72,7419 [-]$$

$$L_2 = -40,377 [-]$$

Konstanty (dolní polovina lopatky):

$$L_3 = 0 [-]$$

$$a = 0,69794 [-]$$

$$b = 0,06702 [-]$$

$$L_1 = 39,983 [-]$$

$$L_2 = -7,942 [-]$$

$$L_3 = 0 [-]$$

Do vstupního souboru se zadávají také hodnoty teplotního profilu, které jsou vyjádřeny jako teploty na jednotlivých průměrech.

DOLNÍ POLOVINA LOPATKY - Určení konstant L_1, L_2, L_3 pro zvolený úhel β_{2i} a b_{2si}

1. Střední proudnice:

$$D_1 = 214,850 \text{ mm} \quad H_1 = 47,958 \text{ mm}$$

$$D_2 = 217,000 \text{ mm} \quad H_2 = 55,064 \text{ mm}$$

$$\beta_2 = 31,961^\circ$$

2. Patní proudnice:

$$D_{1i} = 166,892 \text{ mm} \quad R_{1i} = 0,776784$$

$$D_{2i} = 161,936 \text{ mm} \quad R_{2i} = 0,753717$$

$$D_{2si} = 0,000 \text{ mm} \quad R_{2si} = 0,000000$$

$$\beta_{2i} = \text{#####}^\circ \quad \beta_{2si} = ?^\circ$$

	$\beta_{2i} [^\circ]$	$\beta_{2si} [^\circ]$	L_1	L_2	L_3	$D_{2i} [\text{mm}]$	$\Delta D_{2i} [\text{mm}]$	R_2	ΔR_2	R_{2i}	
0,000000	31,961000	0,000000	31,96100000	0,00000000	0,00000000	160,1974	1,738600	0,745624	0,008092	0,753717	31,961000
0,961000	31,000000	0,000000	28,17382508	3,74965222	0,00000000	159,2893	2,646700	0,741398	0,012319	0,753717	30,953809
-2,800880	33,800880	0,000000	39,21172384	-7,17888487	0,00000000	161,7786	0,157400	0,752984	0,000733	0,753717	33,806139
-0,177101	33,977981	0,000000	39,90965710	-7,86990313	0,00000000	161,9211	0,014900	0,753647	0,000069	0,753717	33,978527
-0,018518	33,996499	0,000000	39,98263399	-7,94215697	0,00000000	161,9360	0,000000	0,753717	0,000000	0,753717	33,996499
0,000000	33,996499	0,000000	39,98263399	-7,94215697	0,00000000	161,9360	0,000000	0,753717	0,000000	0,753717	33,996499
#####	#####	0,000000	#####	#####	0,00000000	161,9360	0,000000	0,753717	0,000000	0,753717	#DĚLENÍ_NULOU

Obrázek 23: Určení konstant L_1, L_2 a L_3

Konstanty L_1, L_2 a L_3 byly počítány iterativně pomocí výpočtu sestaveného v programu Microsoft Excel. Výpis pro dolní polovinu lopatky z tohoto výpočtu je na Obrázek 23. Do výpočtu se v první části zadávají hodnoty geometrických parametrů vypočtených v jednorozměrovém návrhu. Poté se vypočte první iterace radiální rovnováhy. Z tohoto výpočtu se získá hodnota D_{2i} , která se zadá do příslušné buňky ve spodní tabulce. Pro druhou iteraci se zadá hodnota úhlu β_{2i} a vypočte se druhá iterace radiální rovnováhy s nově získanými konstantami L_1, L_2 a L_3 . Z této iterace se opět získá nová hodnota průměru D_{2i} . Pro následné iterace výpočet již navrhuje hodnoty úhlů β_{2i} sám, a tak je již jen potřeba provést dostatek iterací radiální rovnováhy, tak aby byly špičkové a patní proudnice na výstupu z rotoru na průměru odpovídajícímu jednorozměrovému návrhu. Tento výpočet se provádí pro horní i dolní polovinu lopatky.

3.3.2. Vstupní parametry druhého stupně

Vycházející z jednorozměrového návrhu:

Adiabatický koeficient tekutiny:	$\kappa = 1,3301[-]$
Stř. celk. teplota vyrovnaného teplotního profilu na vstupu do statoru:	$T_{0C} = 917,6 [K]$
Celkový tlak na vstupu do statoru:	$p_{0C} = 165932,4 [Pa]$
Součinitel restituce tlaku statoru:	$\sigma_S = 0,986105 [-]$
Součinitel restituce tlaku rotoru:	$\sigma_R = 0,985731 [-]$
Poloviční průtočné množství:	$G_2/2 = 1,815 [kg/s]$
Rozteč:	$T = 0,013248 [m]$
Lavalovo číslo pro rychlost C_1 (LAM1):	$\lambda_{C1} = 0,639184 [-]$
Lavalovo číslo pro rychlost U_1 (LAMU1):	$\lambda_{U1} = 0,474208 [-]$
Lavalovo číslo pro rychlost W_2 (LAMW2):	$\lambda_{W2} = 0,574708 [-]$
Střední průměr na vstupu do rotoru (D_1):	$D_{STR} = 0,2235 [m]$
Poměrný průměr na výstupu z rotoru vztahený ke střednímu průměru:	$R_2 = 1,0 [-]$
Parametry volené:	
Poměrný krok ve směru poloměru vztahený k D_{STR} :	$S = 0,013661447[-]$
Horní mez poměrného průměru:	$E = 1,301 [-]$
Dolní mez poměrného průměru:	$E = 0,69 [-]$
Konstanty (horní polovina lopatky):	$a = 0,639884 [-]$
	$b = 0,167947 [-]$
	$L_1 = 76,9483[-]$
	$L_2 = -45,6185 [-]$
	$L_3 = 0 [-]$
Konstanty (dolní polovina lopatky):	$a = 0,606253 [-]$
	$b = 0,201578 [-]$
	$L_1 = 83,1331 [-]$
	$L_2 = -51,80327 [-]$
	$L_3 = 0 [-]$

Stejně jako u prvního stupně byly hodnoty koeficientů získány iterativně pomocí výpočtu v programu Microsoft Excel

3.3.3. Výstupní parametry radiální rovnováhy

Výstupem z výpočtu radiální rovnováhy jsou parametry proudu tekutiny na určených proudnicích. Příklad výpisu první proudnice, která leží na středím průměru, je na Obrázek 24. Kompletní podrobný výpis i sumarizované výpisy na vstupu a výstupu z radiální rovnováhy jsou přiložené v příloze.

HORNÍ POLOVINA LOPATKY - Proudnice č. 1:

Vstup - 1		Výstup - 2		Parametry
D1=214.8500	R1=1.000000	D2=217.0000	R2=1.010007	dT/T=0.067003
LamC=0.609511	c=349.1075	LamC=0.290460	c=160.6955	ObSS= 0.43332
LamW=0.310889	w=174.5659	LamW=0.540240	w=303.4330	AxSS= 0.28016
LamU=0.436478	u=250.0003	LamU=0.456401	u=252.5020	Reakce=0.399194
Alfa= 29.0000		Alfa= 88.2408		dGV=-1.73086
Beta= 71.8950		Beta= 31.9610		GV= 0.08414
Tc=1000.881	pc=222328.4	Tc= 933.819	pc=166002.2	
Ts= 948.205	ps=178806.5	Ts= 922.658	ps=158151.2	
Tw= 961.909	pw=189021.0	Tw= 962.452	pw=187484.7	

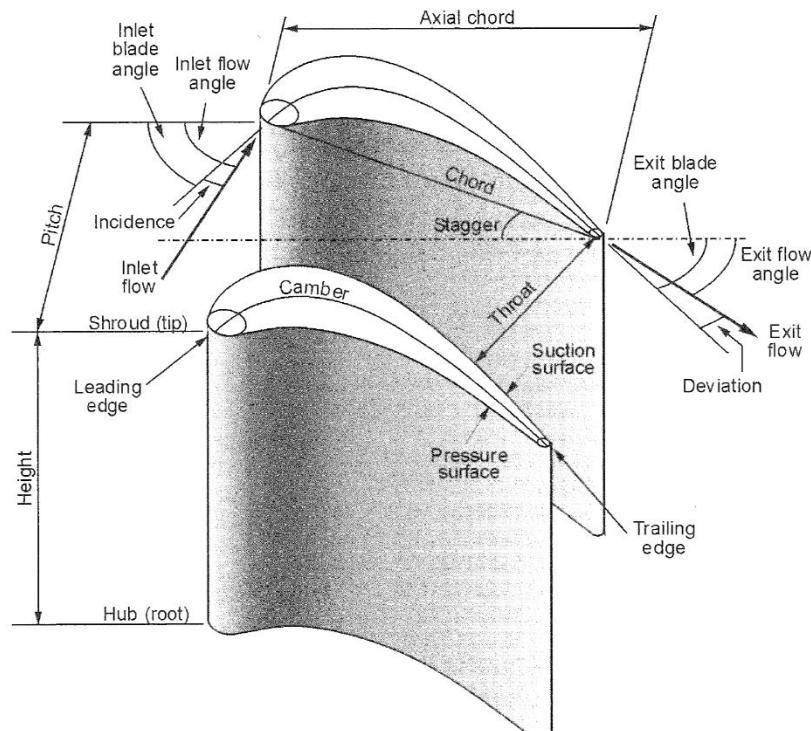
Obrázek 24: Příklad výstupních parametrů proudu radiální rovnováhy na střední proudnici

3.4. Návrh turbínových profilů na středním průměru

Proudění v turbíně probíhá se záporným tlakovým spádem, což má pozitivní vliv na rozhodování o základních parametrech mříže, jako je například poměrná rozteč, úhel náběhu, nebo směr proudu na výstupu. Avšak velké přípustné zakřivení profilu, některé požadavky na rozložení napětí v listu lopatky a také tvar obrysu lopatky jsou zdrojem nesnází.

Požadavky, které by měl turbínový profil splňovat, se dají shrnout do několika následujících požadavků:

- 1) Zajistit takové rozložení rychlosti podél profilu, aby byly minimalizovány profilové ztráty.
- 2) Změna křivosti obrysu na sací i tlakové straně profilu musí být (pokud možno) plynulá.
- 3) Šířka výstupního hrdla je funkcí požadovaného výstupního úhlu proudu, nejčastěji podle empirického pravidla $\sin \beta_{2m} = o/t$.
- 4) Délka tětiny a rozteč musí vyhovovat z hlediska přijatelné poměrné rozteče.
- 5) Průběh šířky mezilopátkového kanálu by měl být konvergentní. [12]



Obrázek 25: Názvosloví lopatkové mříže [7]

3.4.1. Beziérový křivky

Uvedené požadavky splňuje několik druhů křivek. Nejlepších výsledků pro náhradu sací a tlakové strany profilu je dosahováno s křivkami Beziérovými. Teorie těchto křivek byla vyvinuta nezávisle na sobě P. E. Beziérem a P. de Casteljaun v letech 1959 až 1962. Vývoj těchto křivek probíhal pro užití v CAD systémech určených pro navrhování karoserií automobilů.

Beziérová křivka stupně n je určena vztahem 56

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i \cdot B_i^n(t). \quad (56)$$

$t \in \langle 0,1 \rangle$ je parametr křivky ($t = 0$ začátek křivky, $t = 1$ konec křivky).

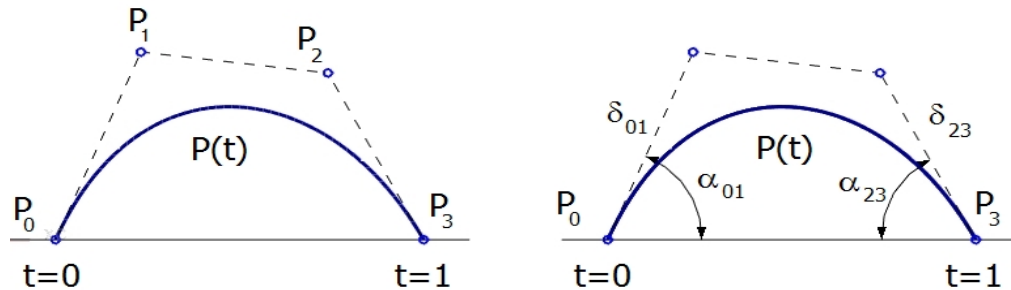
P_i je polohové vektory vrcholů řídicího polygonu (tzv. Beziérové body).

$B_i(t)$ jsou tzv. Bernsteinovy polynomy n -tého stupně, pro které platí výraz 57

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{i! \cdot (n-i)!} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i}, \quad (57)$$

kde $i = 0, 1, \dots, n$.

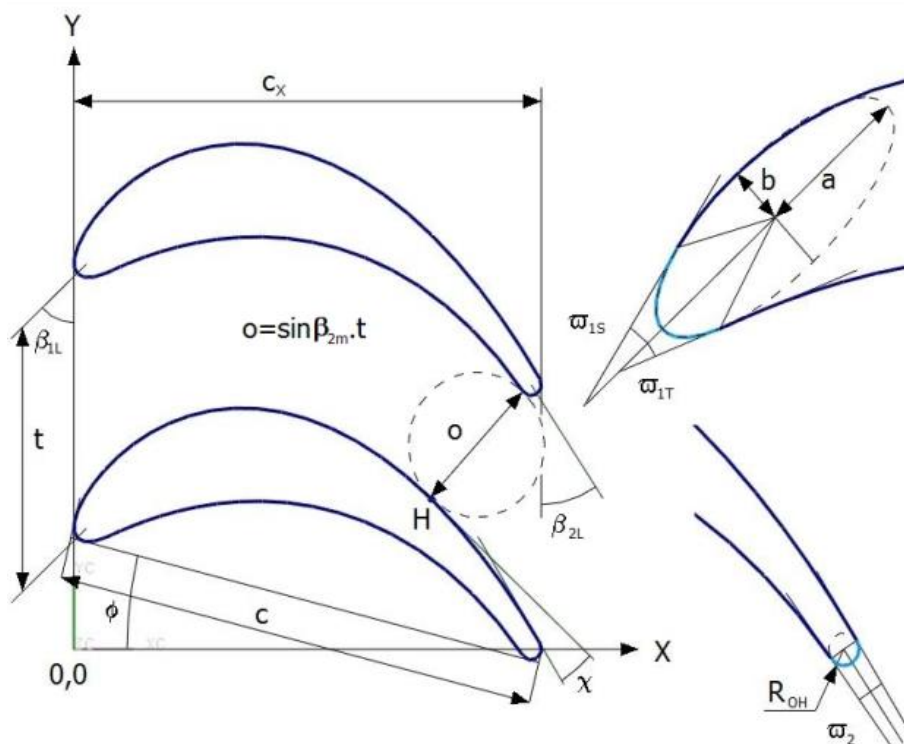
Na Obrázek 26 vlevo je vidět způsob vyjádření Beziérovky 3. stupně pomocí čtyř řídicích bodů. Druhou možností je definování počátečního a koncového bodu, úhlů křivky u obou bodů a vzdálenosti mezi soudními body. [12]



Obrázek 26: Dva možné způsoby vyjádření Beziérovky 3. stupně [12]

3.4.2. Základní parametry turbínových profilů

Osa Y souřadného systému základních geometrických parametrů zobrazených na Obrázek 27 je tečnou náběžné hrany profilu. Na kladné ose X leží střed zaoblení odtokové hrany. Z obrázku je také patrné, že náběžnou hranu tvoří elipsa, ta byla vybrána pro své nekonstantní rozložení křivosti, na rozdíl od kružnice, která má křivost po celé své délce konstantní.



Obrázek 27: Základní geometrické parametry turbínové mříže

Parametry dané jednorozměrovým návrhem:

c - tětiva profilu [mm].

c_x - axiální hloubka profilu [mm].

Φ - úhel nastavení profilu [°].

t - rozteč lopatkové mříže [mm].

R_{OH} - poloměr zaoblení odtokové hrany profilu [°].

o - hrdlo [mm], minimální vzdálenost mezi dvěma profily v lopatkové mříži, měřená jako nejmenší průměr kružnice tečné k oběma sousedním profilům.

β_{2M} - výstupní úhel mříže [°], $\sin \beta_{2M} = o/t$.

Volené parametry:

β_{1L} - vstupní úhel lopatky [°], definuje úhel náběhu (incidence) proudu tekutiny na profil.

β_{2L} - výstupní úhel lopatky [°], definuje úhel odklonu (deviace) proudu tekutiny od profilu, vytékající z profilové mříže.

a - velikost hlavní poloosy elipsy náběžné hrany [mm].

b - velikost vedlejší poloosy elipsy náběžné hrany [mm]

ω_{1S} - úhel klínu náběžné hrany k sací straně profilu [°].

ω_{1T} - úhel klínu náběžné hrany k tlakové straně profilu [°].

ω_2 - úhel klínu odtokové hrany profilu [°], definuje délku odtokové hrany.

γ - úhel volné části profilu [°]. Úhel, který svírá tečna vedená k lopatce v místě hrdla s tečnou vedenou bodem přechodu sací strany do odtokové hrany. Tento úhel je nepřímým měřítkem difúze, která probíhá v oblasti volné části profilu. [12]

3.4.2.1. Úhel incidence a deviace

V předchozí kapitole byly zmíněny úhly incidence a deviace. Tyto úhly jsou znázorněny na Obrázek 25. Jsou projevem rozdílu mezi úhlem lopatky na náběžné a odtokové hraně a úhly rychlosti proudu tekutiny. U statoru je počítáme z absolutních rychlostí a rotoru z relativních

$$i_S = \beta_{1L} - \alpha_0, \quad (58)$$

$$\delta_S = \beta_{2L} - \alpha_1, \quad (59)$$

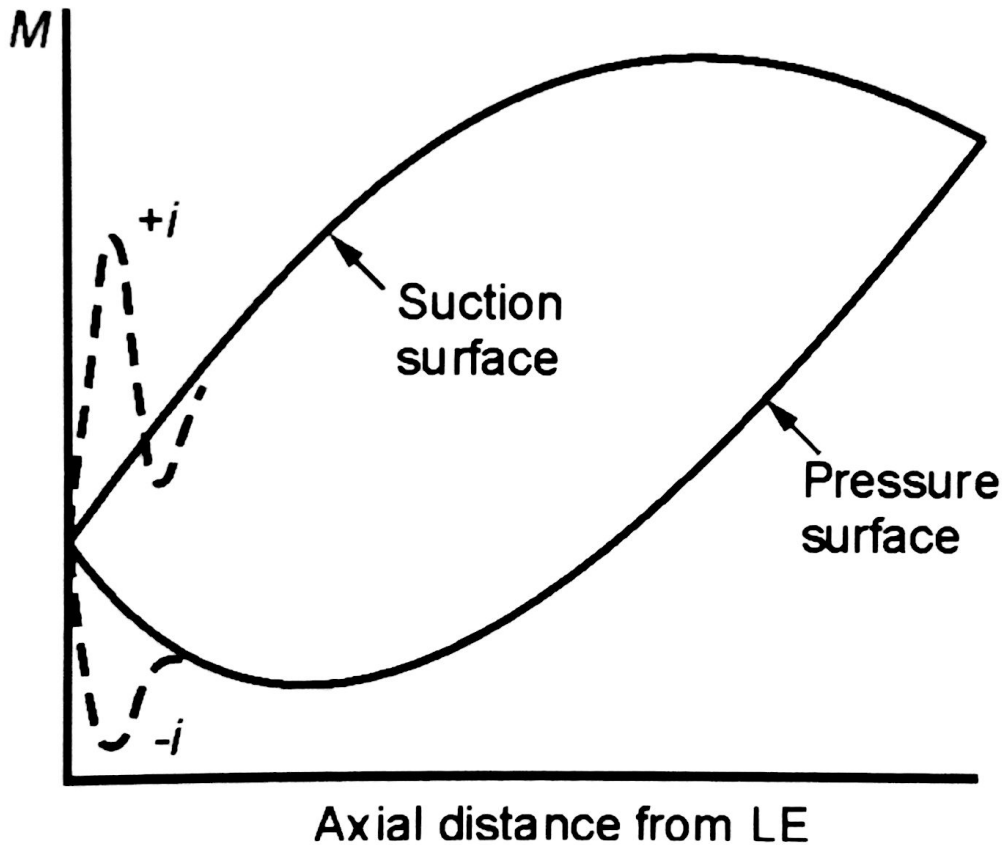
$$i_R = \beta_{1L} - \beta_1, \quad (60)$$

$$\delta_R = \beta_{2L} - \beta_2. \quad (61)$$

Úhel incidence je potřeba určit již při návrhu turbínových profilů, jelikož nejspíše nikdy nebude nulový, je totiž způsoben otáčením proudnic v lopatkové mříži. Kladný úhel incidence způsobuje lokální zrychlení proudu na sací straně a záporný úhel incidence způsobuje lokální zpomalení proudu na tlakové straně. Tento vliv úhlu incidence je vidět na Obrázek 28. Plnou čarou je ideální rozložení Machova čísla, čárkovaně je zobrazeno lokální zrychlení, respektive zpomalení proudu na náběžné hraně. Skokový nárůst rychlosti proudu při kladném úhlu incidence, může vést k utržívání proudu od profilu. Tento odtržený proud sice ve většině případů přilne zpět k profilu, ale i přesto zde vznikají další tlakové ztráty.

Záporný úhel incidence a následné zpomalení nemá za následek tak velké tlakové ztráty, jelikož proud tekutiny po prvotním zpomalení opět zrychluje podél tlakové strany

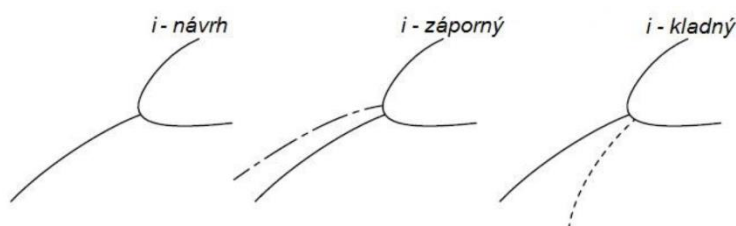
profilu a nedojde tak k utržení proudu a větším tlakovým ztrátám. Z toho plyne, že pokud se při návrhu turbínového profilu nelze vyhnout určitému úhlu incidence, je vhodné tento úhel volit mírně záporný. [7]



Obrázek 28: Vliv úhlu incidence na rozložení Machova čísla [7]

3.4.2.2. Stagnační bod

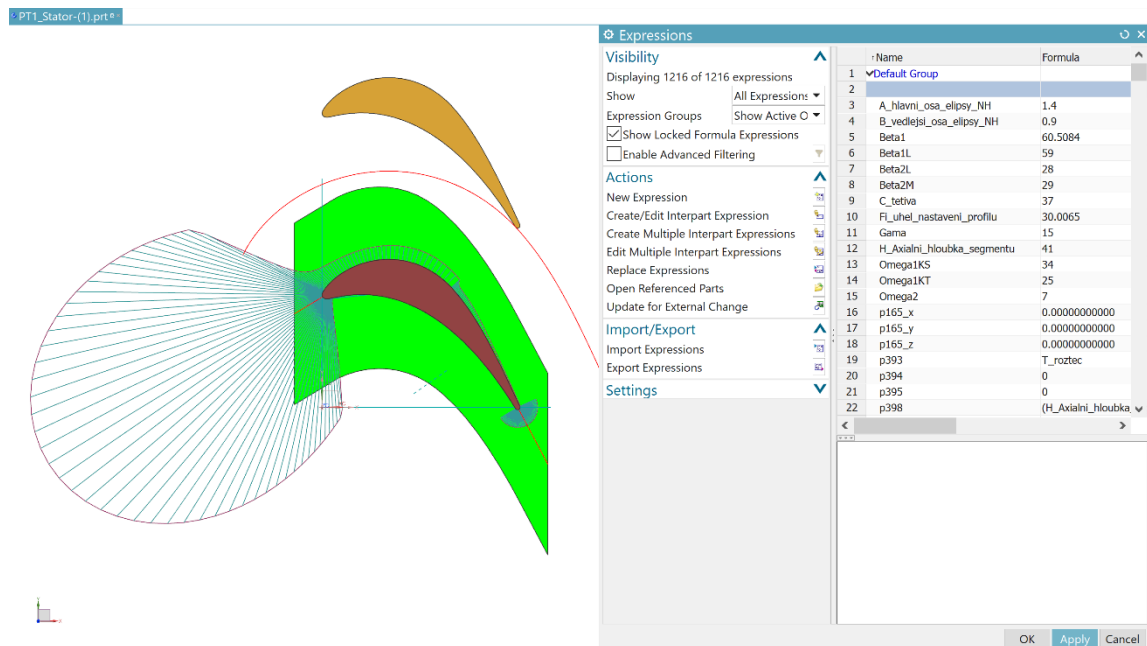
S úhlem incidence je spjatý ještě stagnační bod, čímž rozumíme místo na náběžné hraně profilu, kde je rychlost proudu nulová. Jelikož pozice tohoto bodu ovlivňuje rozložení Machova čísla na náběžné a sací straně. Na Obrázek 29 jsou vidět polohy stagnačního bodu v závislosti na úhlu incidence.



Obrázek 29: Vliv úhlu incidence na polohu stagnačního bodu [7]

3.5. Návrh lopatkování

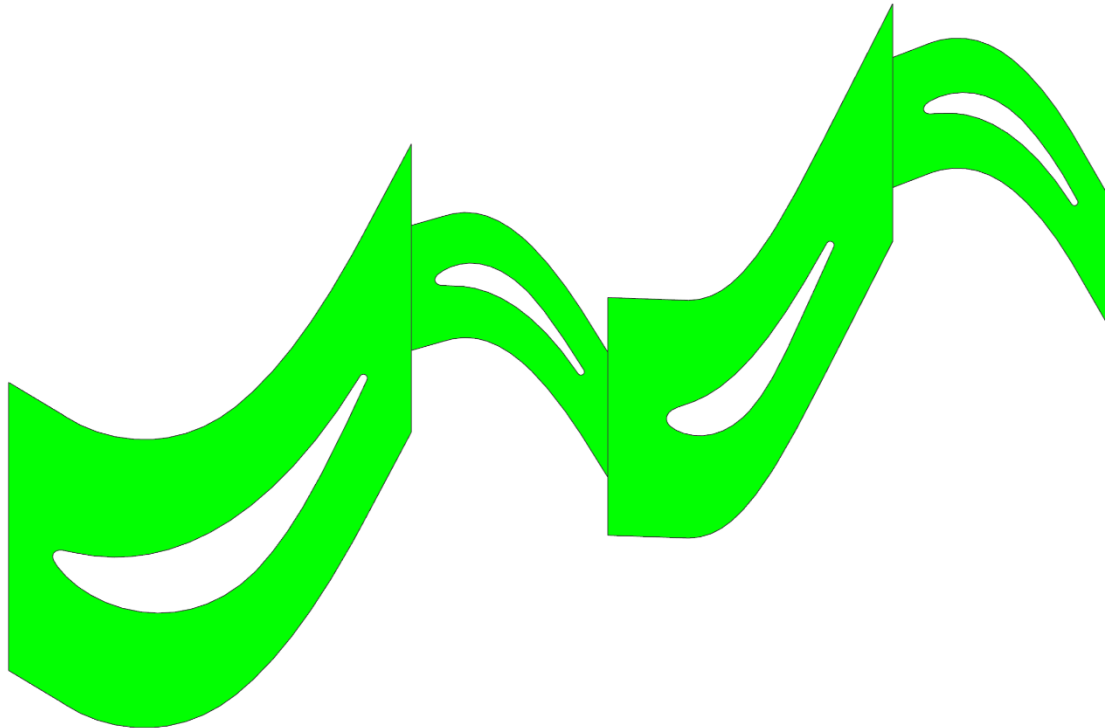
Tvar lopatky samotného profilu, jak již bylo popsáno, má vliv na rozložení parametrů proudu, hlavně rychlosti proudu, podél lopatky. Jelikož je tedy nutné tvar lopatky upravovat, aby bylo dosaženo uspokojivých výsledků rozložení parametrů proudu podél lopatky, bylo při návrhu využito CAD systému Siemens NX 12, ve kterém byl vytvořen parametrický model. Parametry modelu odpovídají výstupním parametrům z jednorozměrového návrhu. Tento model vytvoří jednak samotný profil, ale také proudovou cestu kolem profilu. Z tohoto modelu lze vygenerovat vstupní soubor do programu Ansys Workbench 2019 R2, který bude využit pro následné síťování a analýzu metodou konečných objemů (CFD).



Obrázek 30: Pracovní prostředí programu Siemens NX 12

Profil lopatky je v modelu rozdělen na několik částí, a to elipsa náběžné hrany, kružnice odtokové hrany, Beziérová křivka tlakové strany, sací strany a volné části profilu. Tvary Beziérových křivek je možné upravovat polohou řídicích bodů, které se pohybují po předem definovaných drahách. Proudová cesta je na Obrázek 30 znázorněna zelenou plochou. Smyslem proudové cesty je vymezení oblasti proudění tekutiny, ve které bude toto proudění vyšetřováno pomocí CFD analýzy. Vnější hranice proudové cesty jsou tvořeny odsazenou střední křivkou profilu o polovinu rozteče směrem nad sací stranu a pod tlakovou stranu profilu. Vstup a výstup z proudové cesty je tvořen prostými přímkami, které jsou v polovině mezery mezi jednotlivými lopatkovými mřížemi.

Na Obrázek 31 je vidět výsledná proudová cesta složená z proudových cest jednotlivých profilů, které byly vytvořeny dle popsaných postupů



Obrázek 31: Výsledná proudová cesta dvoustupňové volné turbíny

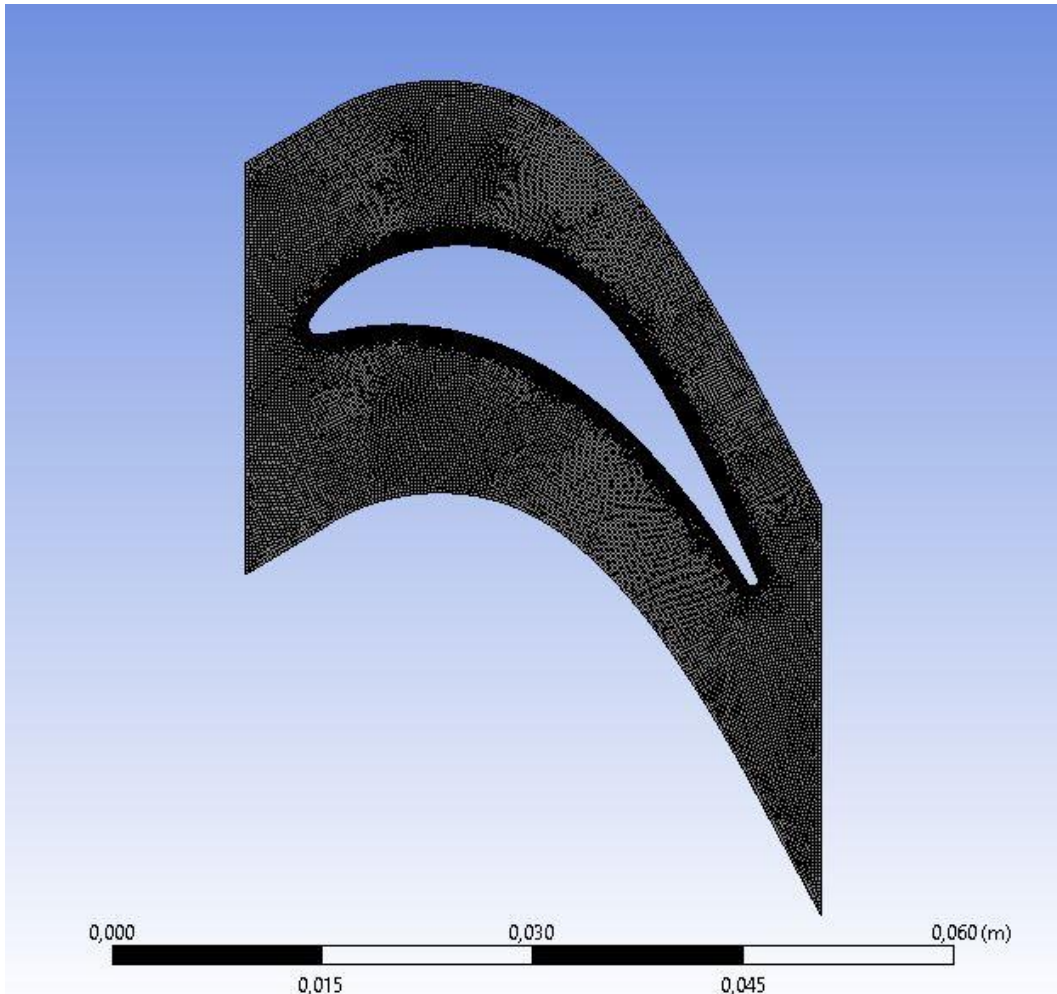
4. Síťování

Pro potřeby simulace proudění tekutiny v navržené volné turbíně metodou Computational Fluid Dynamics (CFD) v programu Fluent, je potřeba nejdříve z modelu proudové cesty vytvořit vhodnou výpočetní síť. Jelikož budu nejdříve modelovat proudění kolem izolovaných jednotlivých profilů, následně ještě odděleně v každém stupni turbíny a na konec v celé volné turbíně, bude potřeba vytvořit několik výpočetních sítí.

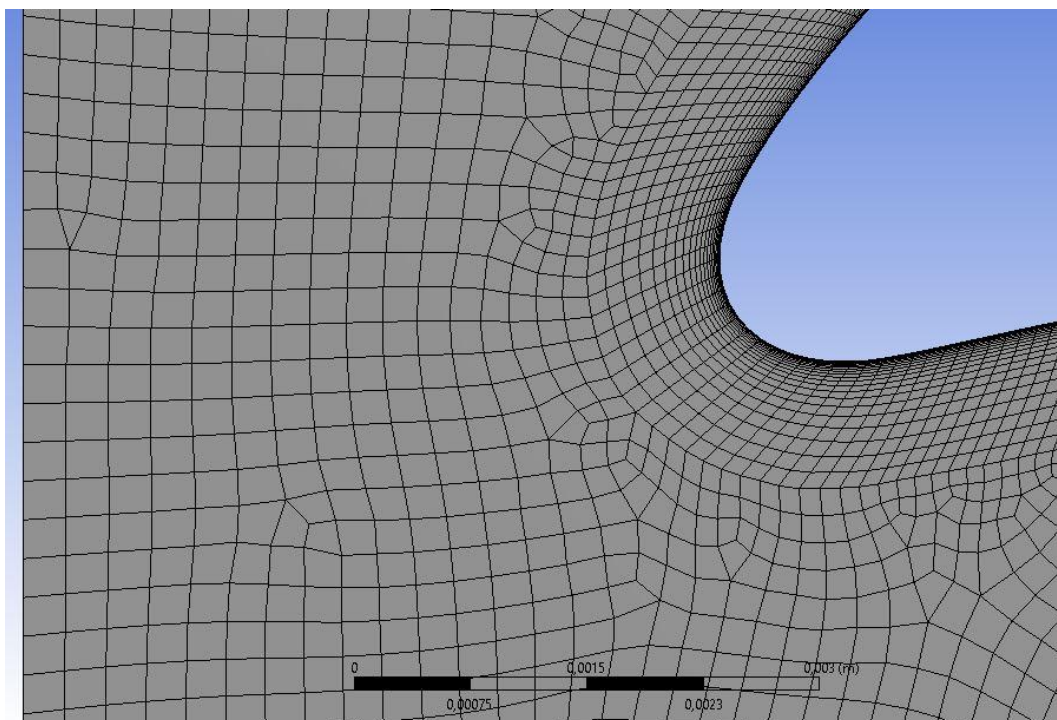
V prvním kroku byl z CAD modelu vygenerován model základní geometrie proudového pole ve formátu parasolid. Tento formát lze nahrát do projektu v programu Ansys Workbench. Následně v DesignModeleru je tato geometrie otevřena a jsou na ní pojmenovány jednotlivé hrany a plochy, které budou sloužit i v dalších krocích.

Výpočetní síť je v proudové cestě rozdělena na dvě oblasti. Vnější oblast kolem hranic proudové cesty a vnitřní oblast v blízkosti profilu. Ve vnější oblasti byla použita čtyřhranná nestrukturovaná síť. Jelikož je potřeba zohlednit, že simulace probíhá pouze na jedné lopatce celé mříže, je nutné dodržet stejný počet buněk na hranách proudové cesty tvořených odsazenou čarou středního profilu, pojmenovaných jako PER-1 a PER-2.

Ve vnitřní oblasti, která má pokrýt mezní vrstvu, byla použita čtyřhranná strukturovaná síť. Strukturované síti byla zadána podmínka odstupňování v normálovém směru ke stěnové okrajové podmínce. Odstupňování bylo nastaveno tak, aby u stěny byla vyšší koncentrace buněk a směrem k vnější výpočtové oblasti se tato koncentrace postupně snižovala. Důvodem pro odstupňování je, aby byly zachyceny gradienty rychlosti v mezní vrstvě.



Obrázek 32: Celá síť statoru 1. stupně



Obrázek 33: Detail sítě na náběžné hraně statoru 1. stupně

5. Výpočet proudění v turbíně

Pro potřeby prvotního ověření návrhu proudění tekutiny v turbíně se dnes místo drahých a technicky náročných experimentů používají CFD simulace. Jak již bylo zmíněno, já využiji program Ansys 2019 a do něj integrovaný Fluent. Využití CFD simulace nemusí vést vždy ke správným a fyzikálně smysluplným výsledkům, i přesto že simulace proběhne na první pokuy úspěšně. Pro úspěšné provedení simulace je velmi důležité, aby řešitel měl potřebné znalosti o použitých numerických modelech a dokázal zvolit správné nastavení a parametry modelu pro konkrétní problém. [9]

Pro výpočet proudění tekutiny využívá CFD metoda rovnici kontinuity (62), zákon zachování hybnosti (63) a energetickou rovnici pro přenos tepla (64)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = S_m, \quad (62)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla(\rho v v) = -\nabla p + (\nabla \cdot \tau) + f_b, \quad (63)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j i_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h. \quad (64)$$

S_m je zdroj hmoty přidané do spojitě fáze z dispergované druhé fáze (např. odpaření kapek), nebo uživatelsky definovaný jiný zdroj hmoty.

p je statický tlak.

τ je tenzor smykových napětí.

f_b je vnější objemové síly.

k_{eff} je efektivní vodivost ($k + k_t$ kde k_t je turbulentní tepelná vodivost definovaná zvoleným modelem turbulence).

\vec{J}_j vyjadřuje proměnlivost difuze složky j .

S_h je teplo přivedené chemickou reakcí, nebo jiné objemové složky tepla.

Pravá strana rovnice (64) představuje přenos energie kondukcí, difuzí složky j , viskózní disipací a teplem přidaným z chemické reakce, nebo jiné objemové složky tepla

$$E = i - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}. \quad (65)$$

Entalpie je pro ideální plyn definována vztahem (66)

$$i = \sum_j Y_j i_j. \quad (66)$$

Y_j je hmotnostní podíl složky j

$$i_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT. \quad (67)$$

i_j je entalpie složky j .

T_{ref} referenční teplota závisí na použitém modelu a řešiči. [8] [9]

5.1. Stanovení fyzikálních vlastností pracovní tekutiny

Hustota pracovní tekutiny pro výpočet vazkého stlačitelného proudění, které představuje proudící spaliny, je určena stavovou rovnicí pro ideální plyn ve stlačitelném proudě

$$\rho = \frac{p_{op} + p}{\frac{R}{M_w} T}. \quad (68)$$

R je univerzální plynová konstanta.

M_w je molární hmotnost plynu.

p je statický tlak plynu.

p_{op} je provozní tlak.

Měrná tepelná kapacita je určena polynomem pátého stupně

$$c_p = a_4 T^4 + a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0. \quad (69)$$

Hodnoty jednotlivých koeficientů jsou: $a_0 = 1044,411$; $a_1 = -0,3222754$;
 $a_2 = 9,784177 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = -6,834464 \cdot 10^{-7}$; $a_4 = 1,572441 \cdot 10^{-10}$.

Viskozita je určena vztahem dle Sutherlanda (70) se třemi koeficienty

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S}. \quad (70)$$

μ_0 je referenční hodnota viskozity.

T je statická teplota.

T_0 je referenční teplota.

S je efektivní teplota.

Teplotní vodivost je určena polynomem čtvrtého stupně

$$c_p = a_3 T^3 + a_2 T^2 + a_1 T + a_0. \quad (71)$$

Hodnoty jednotlivých koeficientů jsou: $a_0 = -0,01361389$; $a_1 = 1,729091 \cdot 10^{-4}$;
 $a_2 = -1,385093 \cdot 10^{-7}$; $a_3 = 4,668596 \cdot 10^{-11}$. [14]

5.2. Fyzikální modely a řešiče

Řešené proudění je dvourozměrné stacionární proudění vazké stlačitelné tekutiny, kterou jsou spaliny. Stavovou rovnici použijeme ve tvaru pro stlačitelné proudění. Jelikož proudění v turbíně bude turbulentní, je nutné vybrat vhodný model turbulence pro simulaci. Doposud neexistuje žádný univerzální model, který by dokázal obsáhnout všechny případy. Nejpoužívanějším modelem pro řešení inženýrských úloh jsou metody RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), které časově střeďuje veličiny pomocí Reynoldsovy rovnice.

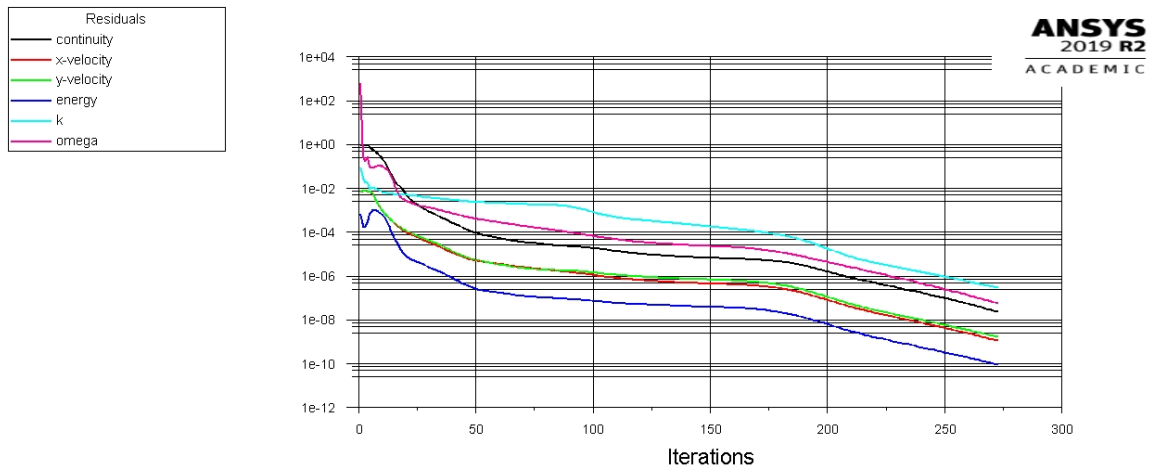
V simulaci byly konkrétně použity dvourovnicové modely k- ω , které řeší dvě dodatečné diferenciální rovnice. Rovnice pro specifickou disipaci energie ω má oproti rovnici pro ϵ několik výhod. Nejvýznamnějším z nich je, že rovnici lze integrovat bez dalších podmínek přes viskózní podvrstvu. Modely k- ω obvykle lépe predikují záporný tlakový spád,

mezni vrstvy a odtržení proudění. Model SST se od modelu Standard liší hlavně v postupné změně modelu Standard k- ω v oblastech poblíž stěn (inner layer) na model k- ϵ pro vysoká Reynoldsova čísla ve vzdálené oblasti od stěn (outer layer). Má také modifikovanou formulaci turbulentní viskozity s ohledem na transportní efekt hlavních turbulentních smykových napětí. [9]

5.3. Podmínky konvergence řešení

Pro rychlejší konvergenci byl řešičem pro stacionární proudění zvolen algoritmus Coupled. Iterativní řešení rovnic zákona zachování hybnosti a rovnice kontinuity definované na základě znalosti tlaků probíhají současně. Stavová rovnice pro ideální stlačitelný plyn a Sutherlandova rovnice pro viskozitu jsou iterativně řešeny zvlášť. [14]

Iterace diskreditovaných rovnic mechaniky tekutin probíhá, dokud není změna počítané proměnné dostatečně malá. Velikost změny je vyjádřena tzv. rezidui, která jsou zapisována po každé iteraci, dokud není dosaženo podmínek konvergence, nebo maximálního počtu iterací.



Obrázek 34: Příklad průběhu reziduí

Rozhodnutí o jednoznačné konvergenci podle reziduí nelze stanovit, protože pro případ simulace se mohou kritéria o konvergenci lišit. Z toho důvodu byly při výpočtech sledovány i průběhy změn relevantních veličin. Nicméně se všeobecně uznává, že při dosažení hodnot 10^{-6} u reziduí je řešení dostatečně zkonvergované. Tato hodnota byla tedy stanovena ve výpočtu jako podmínka konvergence. Pouze u energie byla hodnota snížena na 10^{-10} .

5.4. Stanovení výpočetní oblasti

Výpočetní oblast vymezuje navržená proudová cesta. Pro výpočet je potřeba stanovit okrajové podmínky, které simulují reálné podmínky na hranicích oblasti. Okrajové podmínky pro případ této simulace se dají rozdělit do tří kategorií: vstup a výstup, podmínky periodicity a profil.

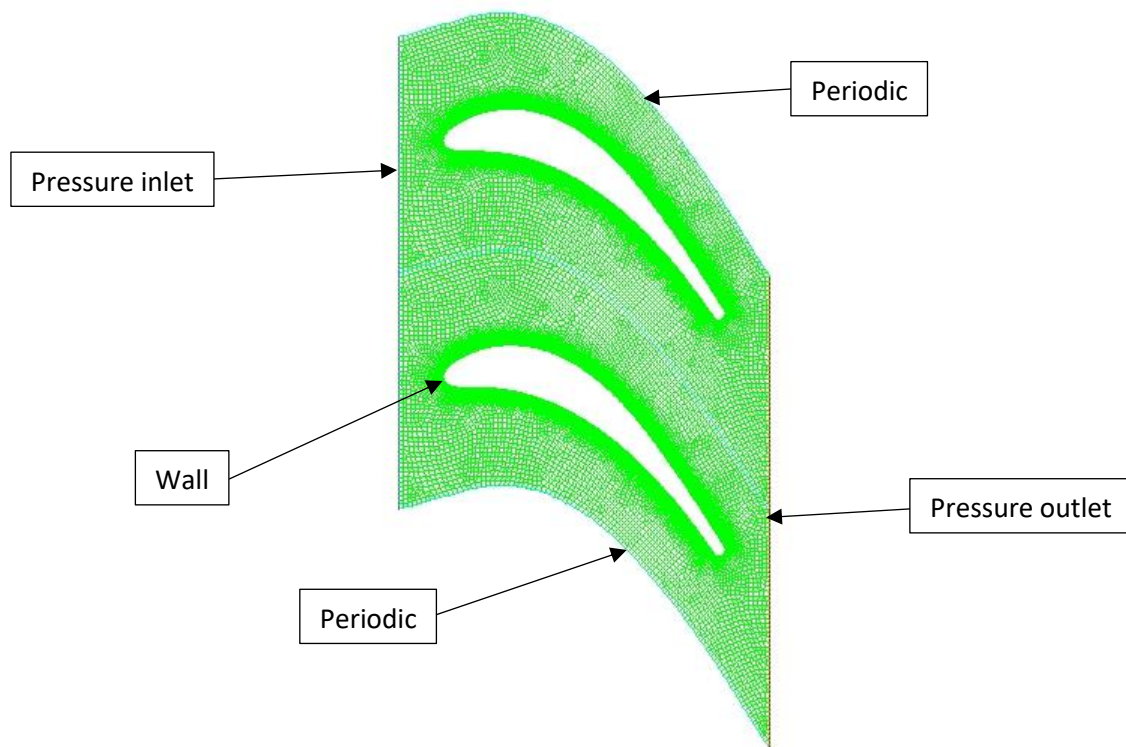
Profil je tvořený podmínkou wall, která předepisuje nulovou rychlost ve všech směrech na stěně. Podmínka periodicity zajišťuje napodobení interakce s proudovými

cestami sousedních profilů. Vstup a výstup definují vstupní a výstupní termodynamické parametry.

Vstup jsem zvolil jako pressure inlet, protože znám vstupní tlak. Zadávanými parametry tak jsou celkový tlak, statický tlak (absolutní pro stator, relativní pro rotor), sinová a kosinová složka vstupního úhlu (absolutní pro stator, relativní pro rotor), intenzita turbulence, rozteč a celková teplota.

Výstup jsem zvolil jako pressure outlet a zadávanými parametry jsou: statický tlak, intenzita turbulence, rozteč a celková teplota. Všechny tyto hodnoty jsou známe z jednorozměrového návrhu.

Pro stupeň a celou turbínu je ještě potřebná podmínka mixing plane, která umožní posuv rotoru ve svislé ose vzhledem ke statoru.



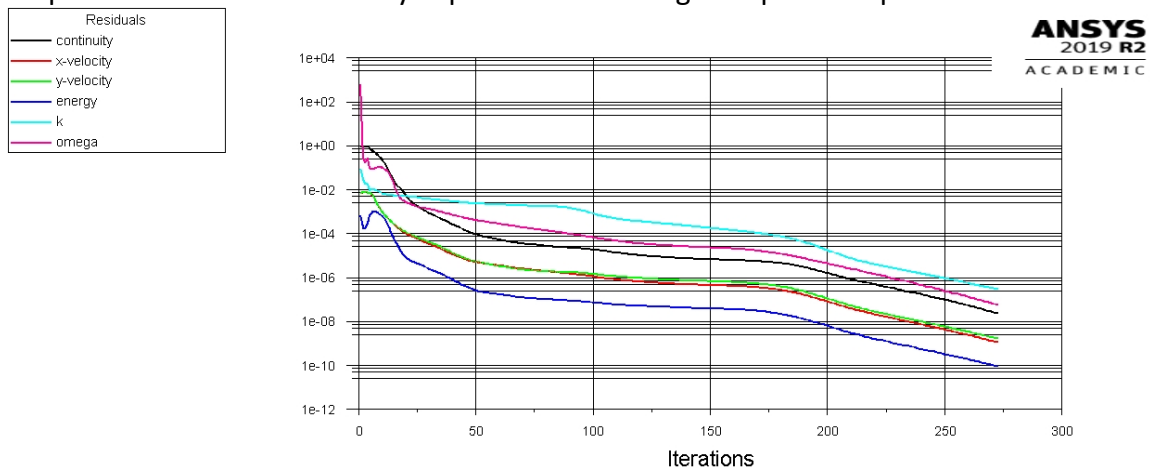
Obrázek 35: Okrajové podmínky výpočetní oblasti

5.5. Výpočet samostatných profilů

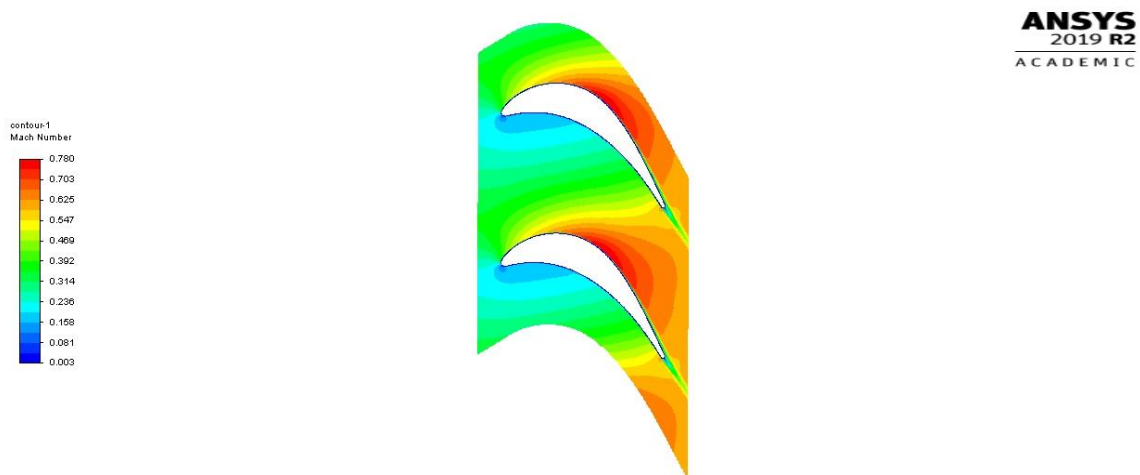
Pro ověření navržených profilů je potřeba nejprve provést simulaci odděleně. Rotory byly v tomto případě počítány v relativním systému, tj. nepohybující se mříž. Sledovanými veličinami budou rozložení Machova čísla v celé proudové cestě, průběh Machova čísla v určené vzdálenosti od profilu, statický tlak na stěně profilu.

5.5.1. Stator prvního stupně volné turbíny

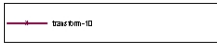
Celkový počet prvků sítě pro výpočet je 35993. Výpočet samostatného statoru 1. stupně dosáhl všech nastavených podmínek konvergence přibližně po 275 iteracích.



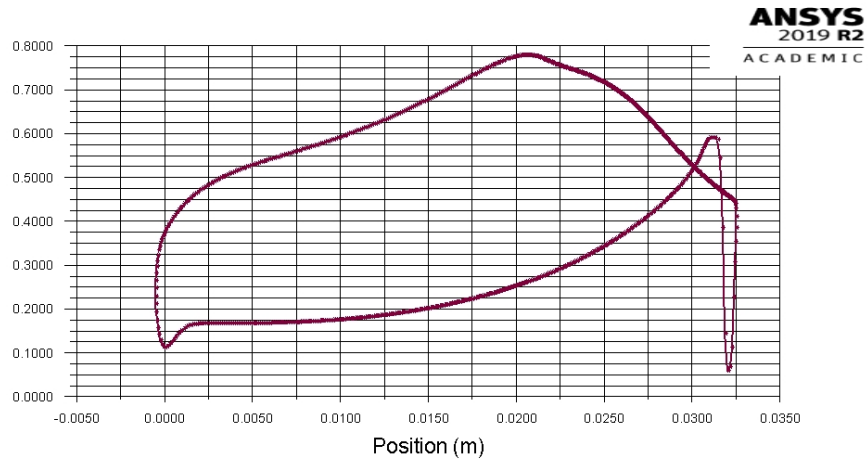
Obrázek 37: Průběh reziduí při výpočtu samostatného statoru 1. stupně



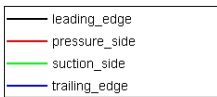
Obrázek 36: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli statoru 1. stupně



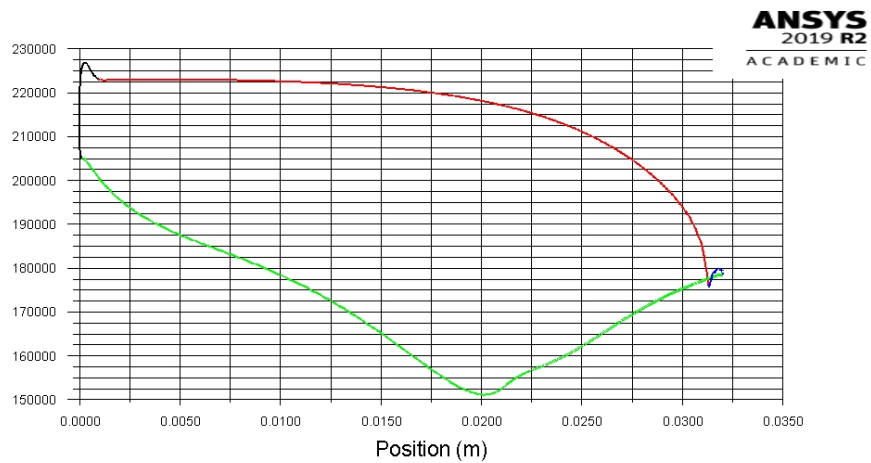
Mach
Number



Obrázek 38: Průběh Machova čísla podél lopatky statoru 1. stupně nad mezní vrstvou



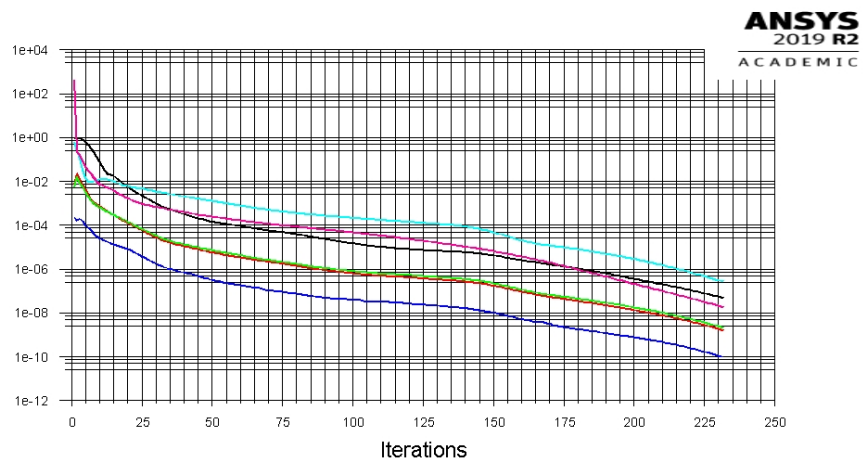
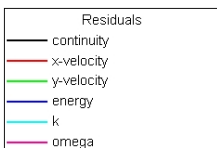
Static
Pressure
(pascal)



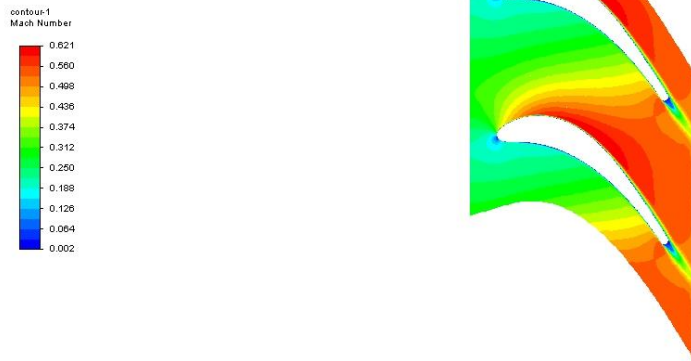
Obrázek 39: Průběh statického tlaku na stěně lopatky statoru 1. stupně

5.5.2. Rotor prvního stupně volné turbíny

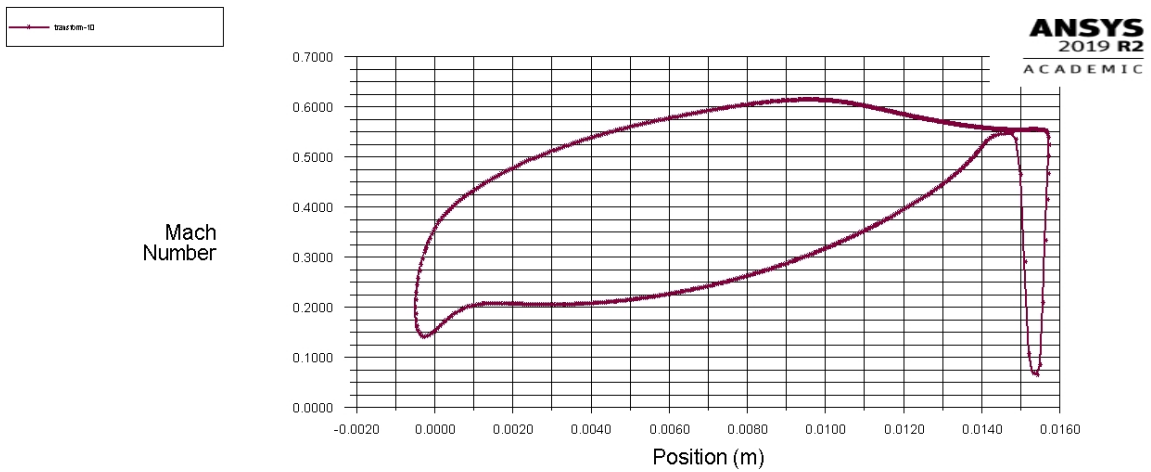
Celkový počet prvků sítě pro výpočet je 21601. Výpočet samostatného rotoru 1. stupně dosáhl všech nastavených podmínek konvergence přibližně po 225 iteracích.



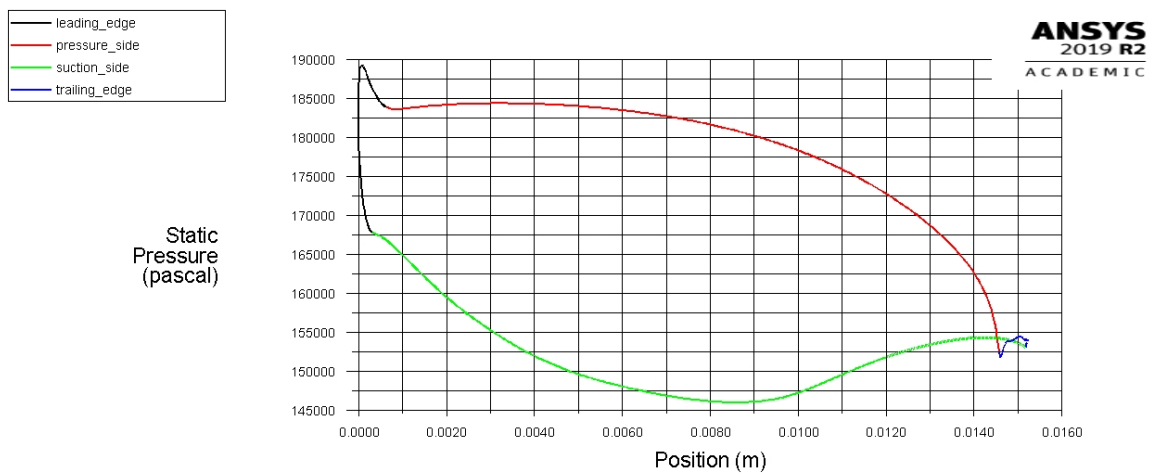
Obrázek 40: Průběh reziduí při výpočtu samostatného profilu rotoru 1. stupně



Obrázek 42: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli rotoru 1. stupně



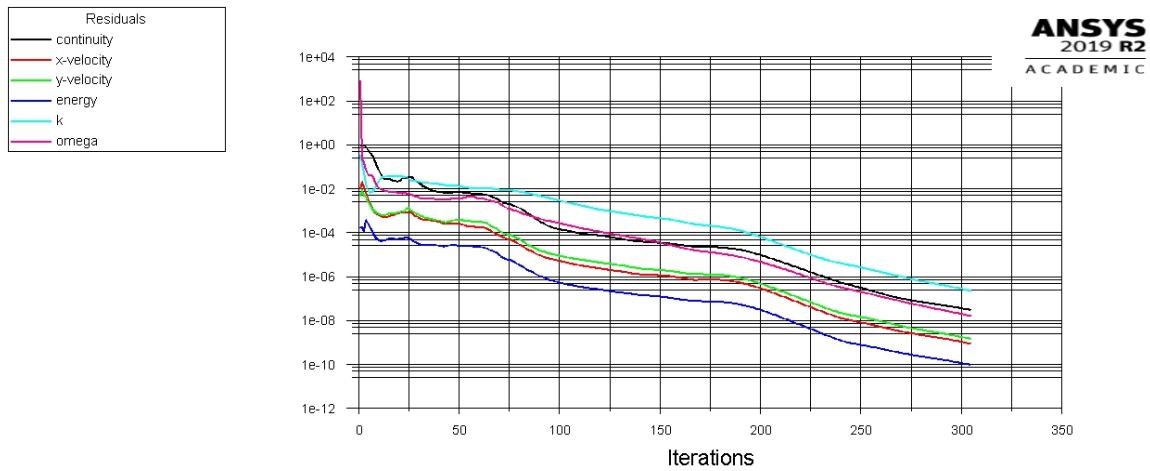
Obrázek 41: Průběh Machova čísla podél lopatky rotoru 1. stupně nad mezní vrstvou



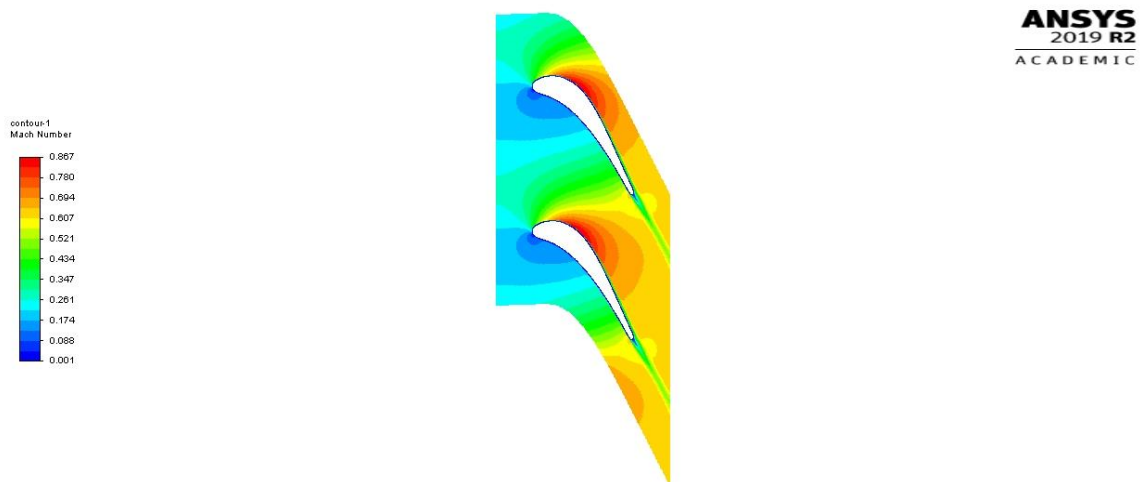
Obrázek 43: Průběh statického tlaku na lopatce rotoru 1. stupně

5.5.3. Stator druhého stupně volné turbíny

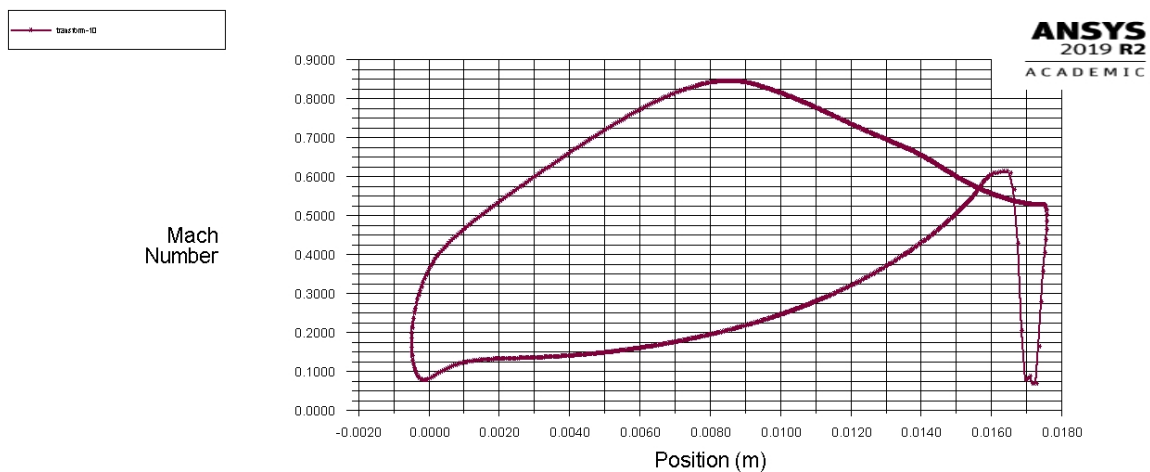
Celkový počet prvků sítě pro výpočet je 34161. Výpočet samostatného rotoru 1. stupně dosáhl všech nastavených podmínek konvergence přibližně po 300 iteracích.



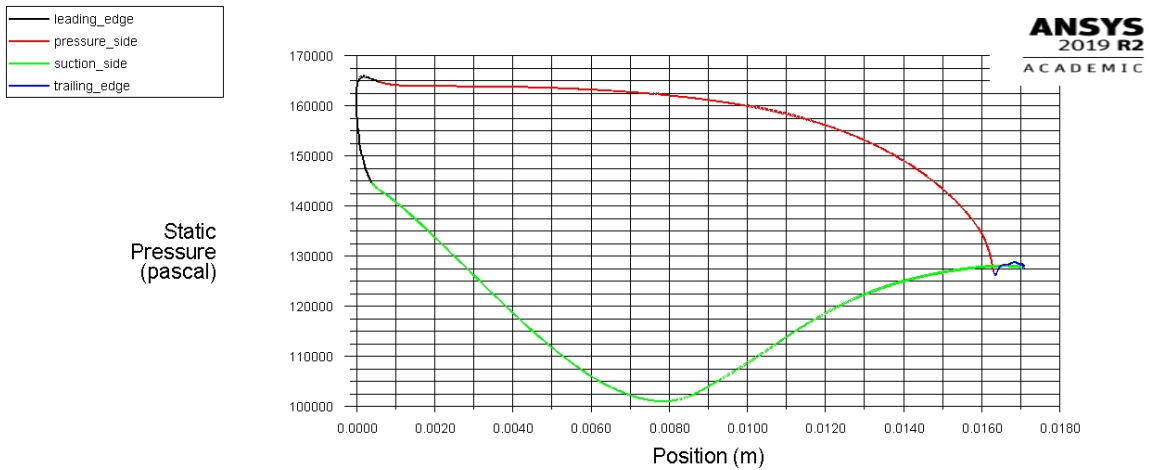
Obrázek 44: Průběh reziduí při výpočtu samostatného profilu statoru 2. stupně



Obrázek 45: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli statoru 2. stupně



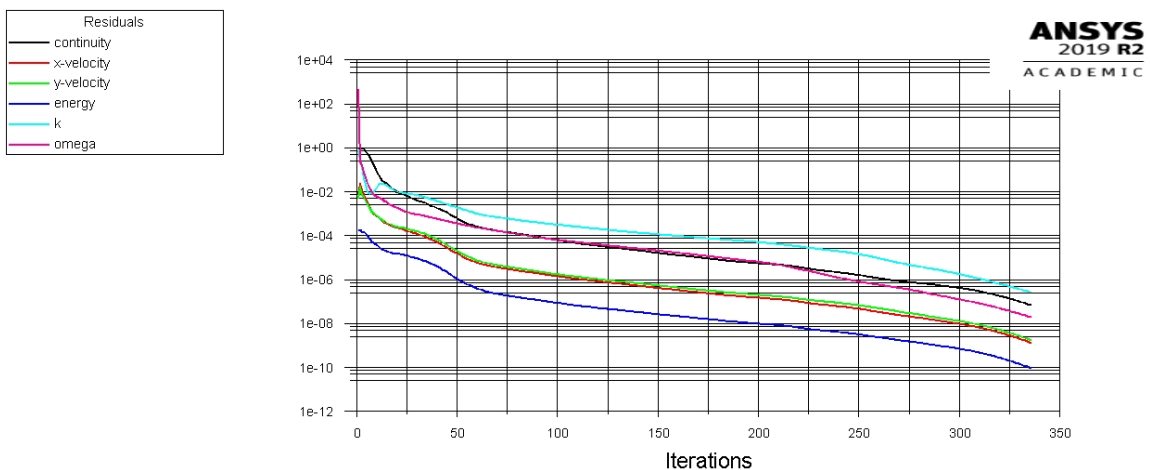
Obrázek 46: Průběh Machova čísla podél lopatky statoru 2. stupně nad mezní vrstvou



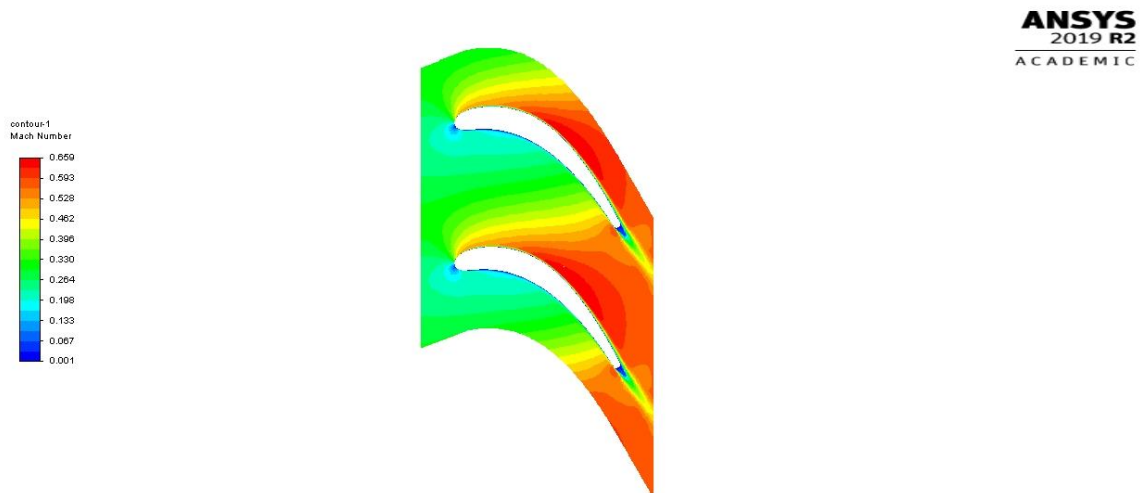
Obrázek 47: Průběh statického tlaku na lopatce statoru 2. stupně

5.5.4. Rotor druhého stupně

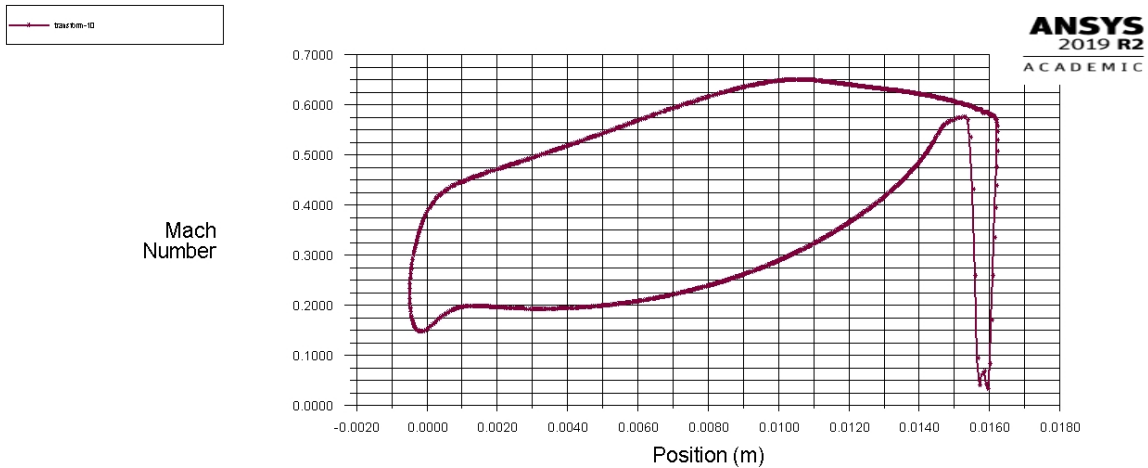
Celkový počet prvků sítě pro výpočet je 33132. Výpočet samostatného rotoru 1. stupně dosáhl všech nastavených podmínek konvergence přibližně po 330 iteracích.



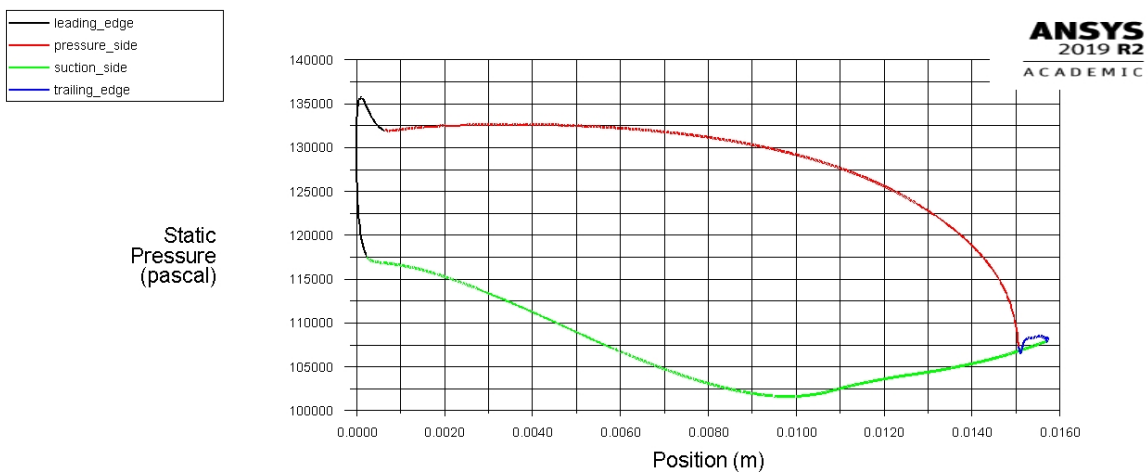
Obrázek 49: Průběh reziduí při výpočtu samostatného profilu rotoru 2. stupně



Obrázek 48: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli rotoru 2. stupně



Obrázek 51: Průběh Machova čísla podél lopatky rotoru 2. stupně nad mezní vrstvou



Obrázek 50: Průběh statického tlaku na lopatce rotoru 2. stupně

5.5.5. Shrnutí výsledků výpočtů samostatných profilů

U všech profilů je velice podobné rozložení Machova čísla v proudovém poli s maximem v hrdle lopatkové mříže. Nikde by dle výsledků nemělo dojít k utržení proudu tekutiny. Vzhledem k faktu, že jsem úhel incidence ve všech případech volil záporný, přibližně -2° , tak také průběh Machova čísla nad mezní vrstvou odpovídá předpokladům vyslovených v podkapitole 3.4.2.1. Průběh statického tlaku je také ve všech případech podobný s minimem v hrdle, což odpovídá tomu, že je v hrdle nejvyšší rychlost.

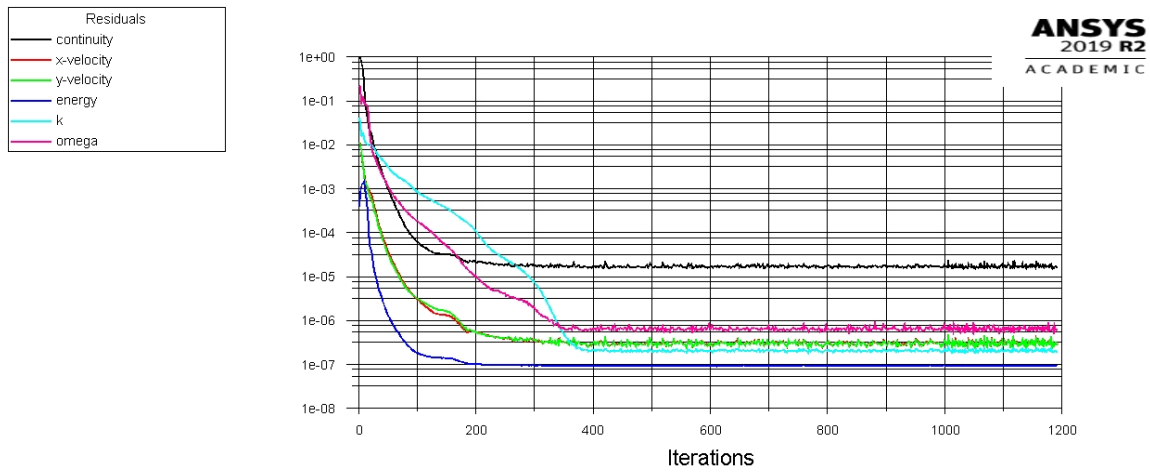
5.6. Výpočet izolovaných stupňů volné turbíny

Po ověření profilů, jsem přistoupil k ověření obou stupňů volné turbíny izolovaně. Modely pro sítě byly vytvořeny spojením jednotlivých profilů v CAD programu a následným exportem.

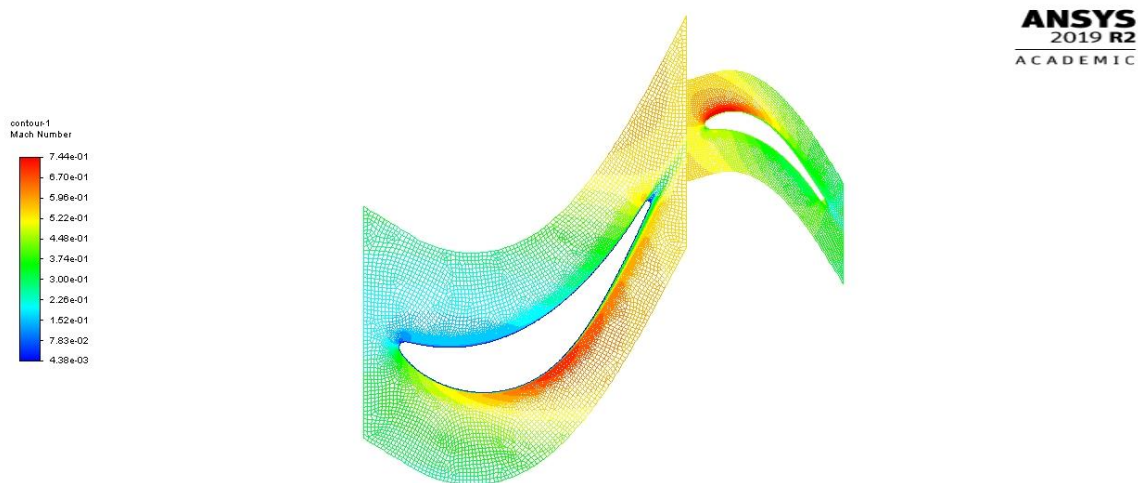
5.6.1. První stupeň volné turbíny

Celkový počet prvků sítě pro výpočet prvního stupně je 45557. Rezidua tentokrát nedosáhla požadovaných hodnot, nicméně se skoro všechna rezidua dostala pod hranici

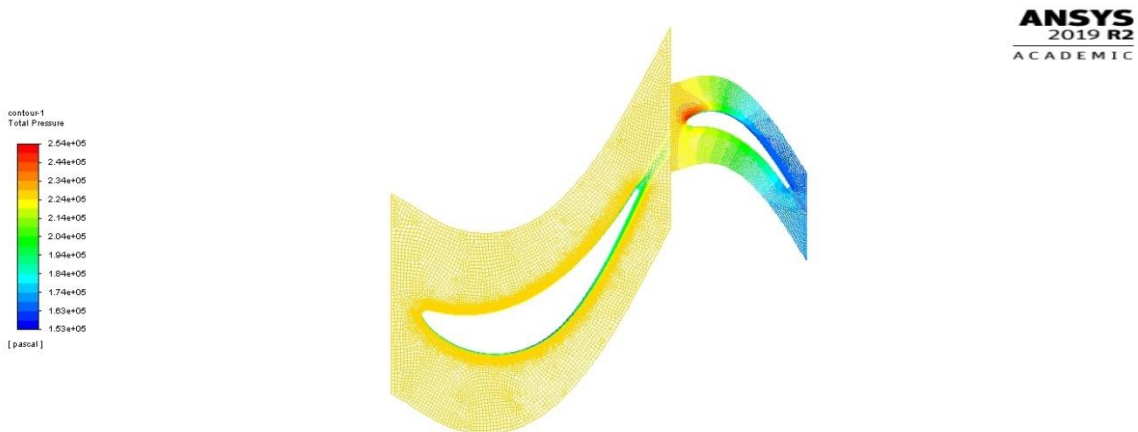
10^{-6} , až na kontinuitu, která dosáhla pouze hodnoty 10^{-4} . Jelikož se ale další sledované veličiny, jako např.: celkový tlak na výstupu z rotoru, nebo celková teplota na výstupu z rotoru již ustálily, bylo možno výpočet považovat za zkonvergovaný.



Obrázek 52: Průběh reziduí při výpočtu 1. stupně volné turbíny



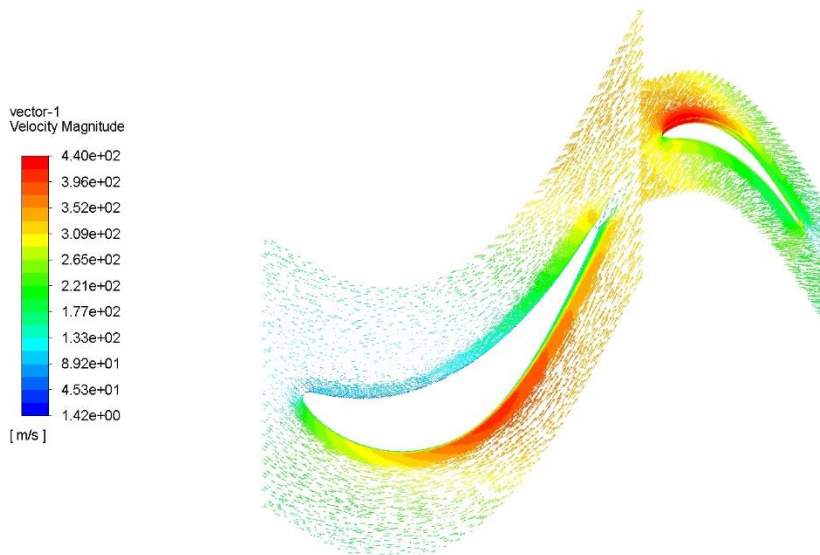
Obrázek 53: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli 1. stupně volné turbíny



Obrázek 54: Skalární pole celkového tlaku v proudovém poli 1. stupně volné turbíny



Obrázek 55: Skalární pole celkové teploty v proudovém poli 1. stupně volné turbíny

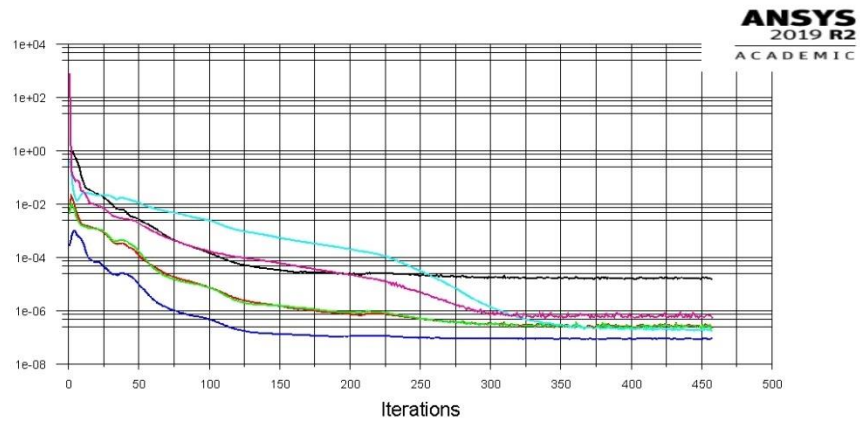
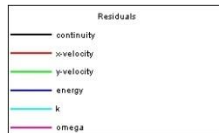


Obrázek 56: Vektorové pole absolutní rychlosti v proudovém poli 1. stupně volné turbíny

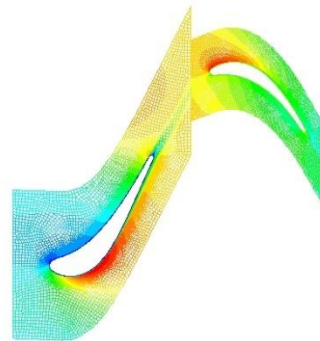
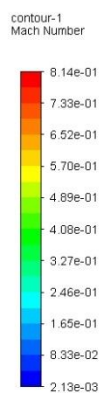
Celková teplota i celkový tlak se při průchodu statorem dle předpokladu příliš nezměnily. Stagnační bod na rotoru, viditelný na Obrázek 53 se výrazně neposunul oproti výpočtu samostatného profilu (Obrázek 42).

5.6.2. Druhý stupeň volné turbíny

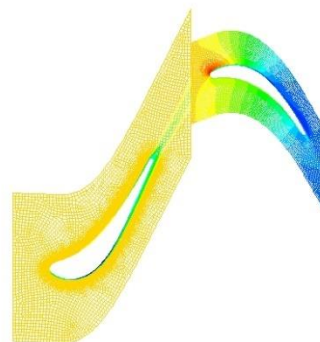
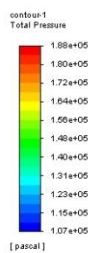
Celkový počet prvků sítě pro výpočet druhého stupně je 38100. Rezidua opět nedosáhla požadovaných hodnot. Kontinuita dosáhla opět pod hodnotu 10^{-4} , všechna ostatní rezidua dosáhla pod hranici 10^{-6} . Jelikož se ale další sledované veličiny, jako např.: celkový tlak na výstupu z rotoru, nebo celková teplota na výstupu z rotoru opět ustálily, bylo možno výpočet považovat za zkonvergovaný.



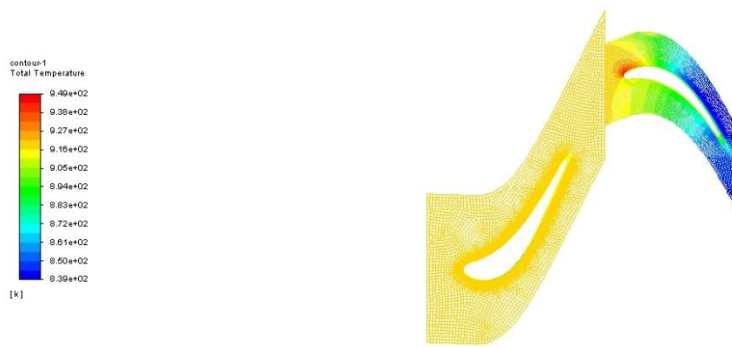
Obrázek 58: Průběh reziduí při výpočtu 2. stupně volné turbíny



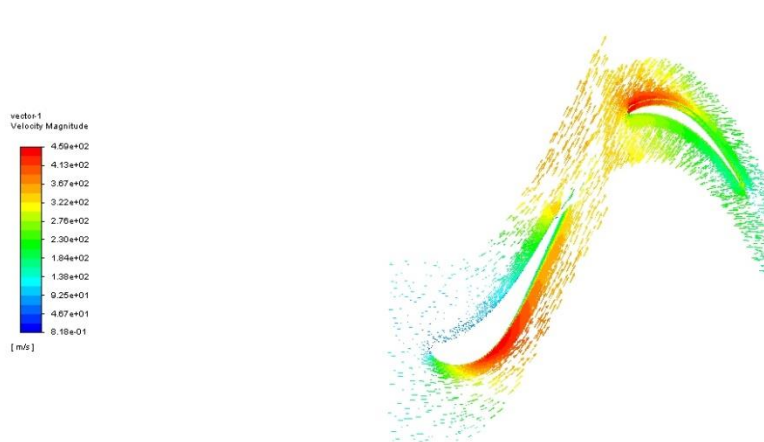
Obrázek 57: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli 2. stupně volné turbíny



Obrázek 59: Skalární pole celkového tlaku v proudovém poli 2. stupně volné turbíny



Obrázek 60: Skalární pole celkové teploty v proudovém poli 2. stupně volné turbíny

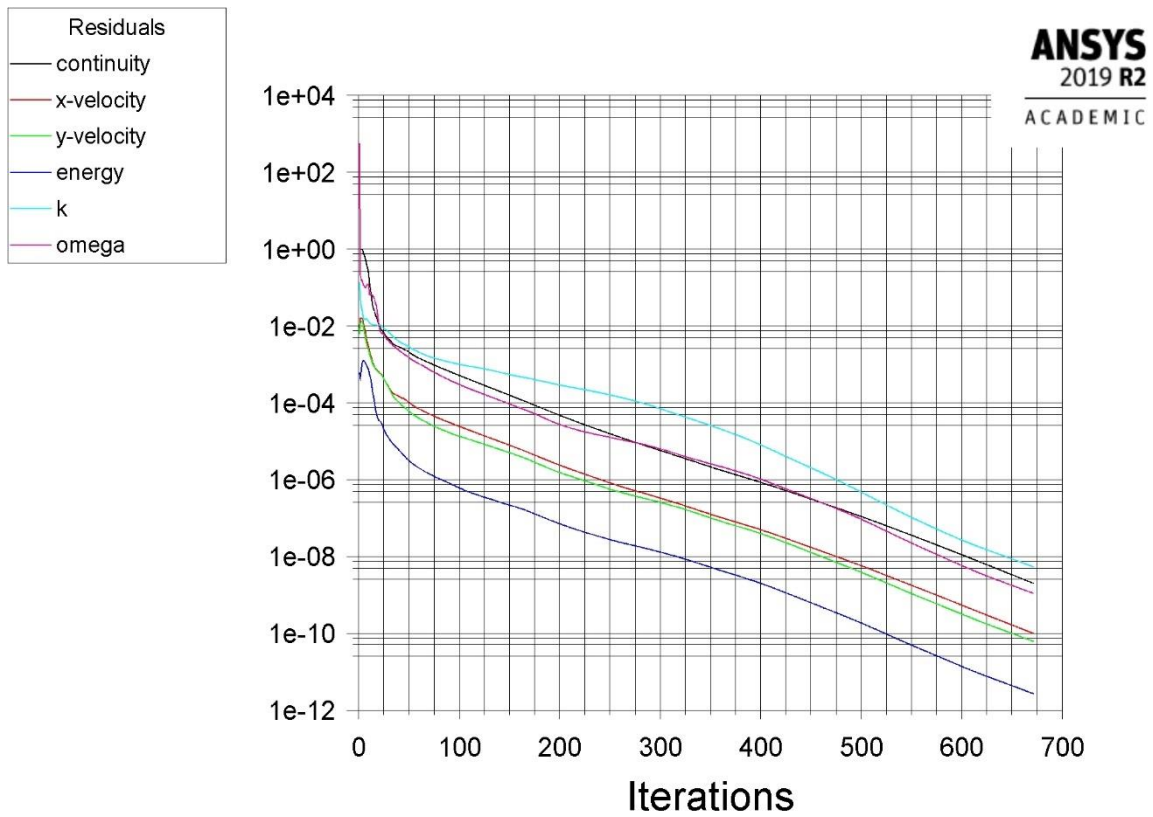


Obrázek 61: Vektorové pole absolutní rychlosti v proudovém poli 2. stupně volné turbíny

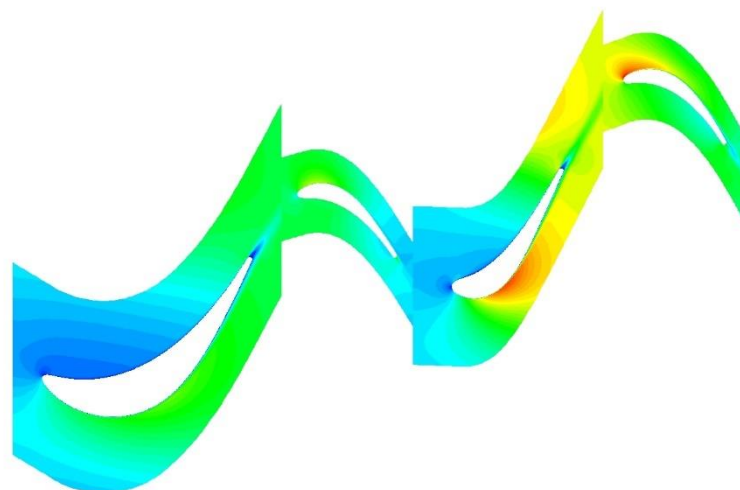
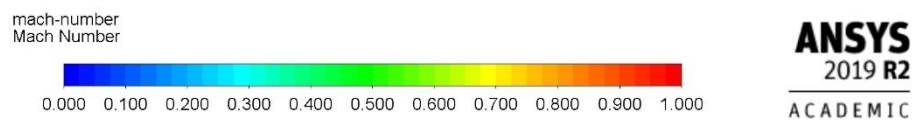
I u druhého stupně je dle předpokladu celková teplota a tlak na statoru konstantní. Stagnační bod na rotoru, viditelný na Obrázek 57, opět zůstal na stejném místě jako na Obrázek 45, což je správně a ukazuje to, že i když je úhel proudění dopočítáván a ne zadáván, liší se parametry proudu pouze málo.

5.7. Výpočet kompletní volné turbíny

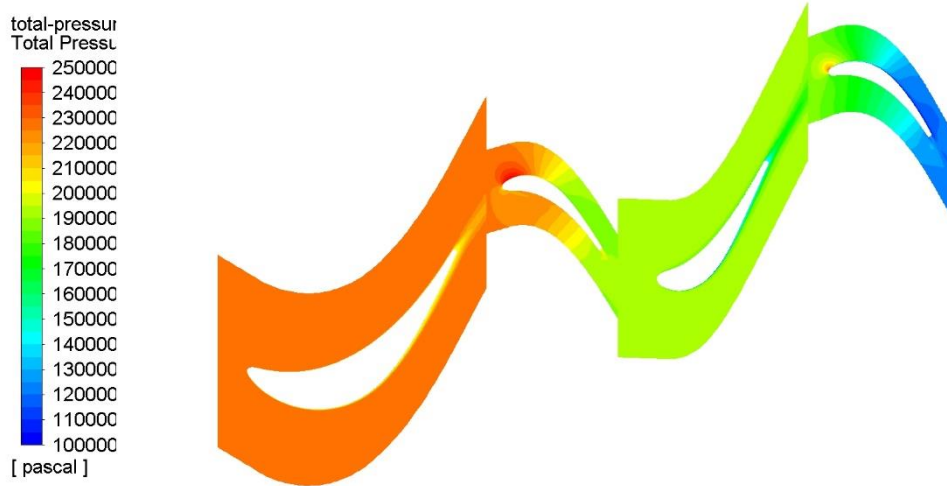
Jako poslední jsem provedl výpočet celé volné turbíny. Model jsem vytvořil spojením všech čtyř profilů v CAD programu. Celkový počet prvků sítě je pro celou volnou turbínu 89608. Rezidua energie a obou složek rychlosti dosáhla hodnoty 10^{-10} , na kterou byla nastavena podmínka výpočtu. Ostatní sledovaná rezidua dosáhla hodnoty 10^{-8} . Výpočet tak lze považovat za zkonvergovaný.



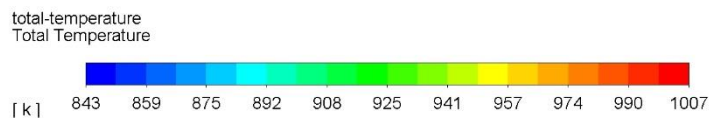
Obrázek 62: Průběh reziduí při výpočtu celé volné turbíny



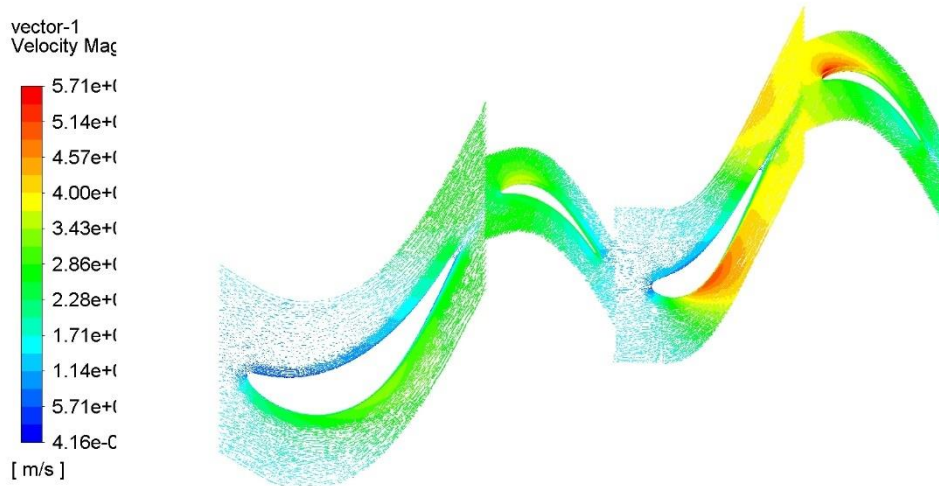
Obrázek 63: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli volné turbíny



Obrázek 65: Skalární pole celkového tlaku v proudovém poli volné turbíny



Obrázek 64: Skalární pole celkové teploty v proudovém poli volné turbíny



Obrázek 66: Vektorové pole absolutních rychlostí v proudovém poli volné turbíny

Opět lze konstatovat, že rozložení celkové teploty a celkového tlaku je dle předpokladů. Dle Obrázek 63 poloha stagnačního bodu na rotoru 1. stupně volné turbíny odpovídá poloze z předchozích výpočtů. Na statoru dochází k mírnému odklonu stagnačního bodu od tlakové k sací straně, nicméně ještě stále zůstává rozložení rychlostí příznivé. U rotoru 2. stupně došlo k většímu posunu směrem k sací straně. Celkově je z výsledku vidět, že rozložení Machova čísla neodpovídá předchozím výpočtům, důvodům, proč tomu tak je, se budu věnovat v následující kapitole.

5.8. Zhodnocení výsledků CFD simulací

V předchozích kapitolách jsem prezentoval výsledky CFD simulací, jednotlivých profilů, stupňů, a nakonec celé volné turbíny. V této kapitole bych tyto výsledky podrobněji rozebral a porovnal je s jednorozměrovým návrhem. K tomu využiji metody Mass-Weighted Average, kterou mohu získat hodnoty parametrů proudu na jednotlivých řezech turbíny.

V tabulce 1 nejsou uvedeny hodnoty vypočtené pro izolované profily, jelikož hodnoty pro rotor z výpočtů jsou pouze pro zastavený stav.

Tabulka 1: Porovnání jednotlivých metod výpočtu

	1D	Stupně	Turbína
p_{0c} [Pa]	227097,0	227097,0	227097,0
p_{1c} [Pa]	222328,5	225735,77	226160,47
p_{2c} [Pa]	165932,4	169075,22	190308,9
		165932,4	
p_{3c} [Pa]	163636,6	164618,42	188487,6
p_{4c} [Pa]	116325,7	117765,02	122380,1
T_{0c} [K]	983,600	983,600	983,600
T_{1c} [K]	983,600	983,5996	983,5997
T_{2c} [K]	917,600	918,254	944,32012
		917,600	
T_{3c} [K]	917,600	917,600	944,3201
T_{4c} [K]	846,100	846,025	851,056
$\Delta T_{1st.}$ [K]	66	65,346	39,280
$\Delta T_{2st.}$ [K]	71,5	71,575	93,264
ΔT_t [K]	137,5	137,575	132,644
α_0 [°]	60,5084	60,5084	60,5084
α_1 [°]	29,0	30,167	30,412
α_2 [°]	89,0325	81,830	73,264
		89,0325	
α_3 [°]	26,0	27,097	26,868
α_4 [°]	88,9317	84,331	70,507
$\eta_{1st.}$ [%]	89,561	94,095	93,062
$\eta_{2st.}$ [%]	92,334	95,618	95,162
η_t [%]	91,375	93,006	94,735
$W_{1st.}$ [J · kg ⁻¹]	7 635 121,53	7 559 463,42	4 544 049, 67
$W_{2st.}$ [J · kg ⁻¹]	8 271 381,57	8 280 057,84	10 789 133,29
W_t [J · kg ⁻¹]	15 906 501,10	15 915 177,37	15 333 172,96

Hodnoty účinnosti v tabulce byly počítány dle vztahu (50) a hodnoty měrné práce dle vztahu (3).

Na jednotlivé návrhy bych se mohl podívat z několika hledisek. První hledisko by byla účinnost jednotlivých stupňů a celé volné turbíny. V jednorozměrovém návrhu vyšla účinnost prvního stupně turbíny 89,6 %, druhého stupně 92,3 % a celé turbíny 91,3 %. Z výpočtu jednotlivých stupňů ve Fluentu vycházejí hodnoty účinnosti pro první stupeň 94,1 %, pro druhý stupeň 95,6 % a pro celou turbínu 93 %. Z výpočtu celé turbíny vyšly hodnoty účinnosti 93,1 % pro první stupeň, 95,2 % pro druhý stupeň a 94,7 % pro celou turbínu. Je však potřeba si uvědomit, že hodnoty účinnosti z výpočtu ve Fluentu jsou nadsazeny z důvodu zjednodušení na pouhý 2D výpočet. Pokud bych provedl simulace pro celé lopatky, dopadly by tyto výsledky nejspíš o něco hůře, protože by se v simulaci vyskytly další ztráty, které 2D výpočtem nejsou pokryty, a přitom v jednorozměrovém návrhu jsou zohledněny.

Pokud bych se na výpočty jednotlivých stupňů a volné turbíny podívali z hlediska odvedené práce, zjistím, že nejvíce práce odvede turbína z jednorozměrového návrhu. Pro výpočet měrné efektivní práce ze simulace jednotlivých stupňů ve Fluentu totiž nejde použít vztah (3), jelikož výstupní teplota z prvního stupně není shodná se vstupní teplotou do druhého stupně. To je způsobeno tím, že výstupní teplota z prvního stupně vychází ze simulace ve Fluentu, a vstupní teplotu pro druhý stupeň jsem použil z jednorozměrového návrhu. Je proto vhodnější sečíst práce odvedené jednotlivými stupni. V takovém případě by byla dosažena hodnota odvedené efektivní práce $W_t = 15\,839\,520,27\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Posledním parametrem, který bych mohl na uvedených výsledcích porovnávat, je výstupní úhel. Nejdůležitější úhel pro návrh je výstupní úhel z celé turbíny α_4 . Tento úhel je důležitý, protože je podle něj tvarován výstupní kanál spalín z motoru. Ideální případ je axiální výstup z volné turbíny tzn. $\alpha_4 = 90^\circ$. V jednorozměrovém návrhu byl navrhnut úhel $\alpha_4 = 89,56^\circ$, což by bylo velice příznivé pro tvar výstupního kanálu. Ze simulace jednotlivých turbín ve Fluentu vyšel úhel $\alpha_4 = 84,33^\circ$, to už je větší odklon od přímého axiálního směru, nicméně je to ještě akceptovatelný odklon, pro který by se dal navrhnout vhodný výstupní kanál. Pokud se podíváme na simulaci celé turbíny ve Fluentu, zjistíme, že výstupní úhel $\alpha_4 = 70,51^\circ$. To už je příliš velký odklon od axiálního směru a takový výstupní úhel z volné turbíny by již byl nevhodný. Ovšem i zde platí, že by simulaci bylo potřeba udělat ještě pro kompletní lopatku, je totiž možné, že by výsledky byly příznivější.

6. Závěr

V rešeršní části jsem provedl průzkum turbín používaných v leteckých motorech. Následně jsem popsal základní principy proudění ve stupni turbíny a tlakové ztráty vznikající při proudění.

Hlavním úkolem diplomové práce bylo navrhnout náhradu jednostupňové volné turbíny, turbínou dvoustupňovou. Dvoustupňová volná turbína měla mít lepší účinnost při zachování stejného teplotního spádu. Při porovnávání obou turbín vycházím z jednorozměrového návrhu na středním poloměru, protože pro původní turbíny výsledky CFD simulace k dispozici nemám.

Účinnost celé turbíny se podařilo zvýšit z 89,036 % na 91,375 %. Absolutní výstupní úhel původní volné turbíny je $87,9288^\circ$, výstupní úhel navržené dvoustupňové turbíny je $88,9317^\circ$. Otáčky byly sníženy z $31023 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$ na $22223 \text{ ot}\cdot\text{min}^{-1}$.

Toto zlepšení parametrů turbíny ovšem přineslo nárůst rozměrů volné turbíny. Výstupní průměr narostl o 29,27 mm z 264,4 mm na 293,67. V axiálním směru narostla turbína z 52,929 mm na 79,904 mm, což představuje nárůst 26,975 mm.

Zadaný úkol zvýšit účinnost volné turbíny byl tedy splněn, přičemž se podařilo i mírně zlepšit parametry výstupního proudu. Předpokládám, že by se mohla snížit i hmotnost reduktoru, jelikož snížením otáček by došlo ke snížení jeho zatížení. Na druhou stranu bylo vylepšení dosaženo za cenu mírného nárůstu rozměrů turbíny, kvůli čemuž by se musel kompletně předělat výstupní kanál spalin z motoru.

Navržená volná turbína při simulaci proudění v celém proudovém poli ovšem nebyla schopna dodržet podmínky navržené v jednorozměrovém návrhu. Bylo by proto dobré provést ještě návrh profilů po výšce lopatky dle vypočtených parametrů, vytvořit trojrozměrnou proudovou cestu turbíny a následně provést simulaci proudění, aby bylo dosaženo výsledků, které by se daly považovat za vskutku relevantní.

Seznam použité literatury

- [1] Rolls-Royce. The jet engine. 1996. Derby: The Technical Publications Department, 1996. ISBN 978-111-9065-999.
- [2] Jet Engine. Wikipedia [online]. 2019 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Jet_engine
- [3] Turboprop. Wikipedia [online]. 2019 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Turboprop>
- [4] KMOCH, Petr. Teorie leteckých motorů I: Základní rovnice, kompresory. Část I.. Brno: Vojenská akademie, 2002.
- [5] KMOCH, Petr. Teorie leteckých motorů II: (Turbíny, spalovací komory). Část II.. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2004.
- [6] KMOCH, Petr. Teorie leteckých motorů III: (Výstupní soustavy, jednoproudové, turbohřídelové, dvouproudové motory, vstupní soustavy). Část III.. Brno: Univerzita obrany, 2006.
- [7] MOUSTAPHA, Hany, Mark F. ZELESKY, Nicolas C. BAINES a David JAPIKSE. Axial and Radial Turbines. Vermont: Concept NREC, 2003. ISBN 0-933283-12-0.
- [8] MOUKALLED, F. a M. DARWISH. The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics: An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab®. Švýcarsko: Springer International Publishing, 2016. ISBN 978-3-319-16874-6.
- [9] VLČEK, Ing. Petr. MODELOVÁNÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ. Praha, 2013. Článek. České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
- [10] BRUŇATA CSC., Ing. Oto a MAŠEK. TECHNICKÁ ZPRÁVA T107: NÁVRH STUPNĚ OSOVÉ TURBÍNY. Praha, 1968.
- [11] BRUŇATA CSC., Ing. Oto a MAŠEK. TECHNICKÁ ZPRÁVA 110: JEDNODUCHÁ RADIÁLNÍ ROVNOVÁHA PRO STUPEŇ PLYNOVÉ TURBÍNY. Praha, 1968.
- [12] VESELKA, Ing. Roman. TECHNICKÁ ZPRÁVA 311: KOMPLEXNÍ NÁVRH STUPNĚ AXIÁLNÍ TURBÍNY. Praha, 2008.
- [13] KACKER, S. C. a U. OKAPUU. A Mean Line Prediction Method for Axial Flow Turbine Efficiency. Journal of Engineering for Power. 1982, 1982(104/11), 9.
- [14] „Ansys Fluent - User Guide 14.5". Ansys, 2012.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Turbínový motor.....	1
Obrázek 2: Turbodomchadlový motor.....	2
Obrázek 3: Schéma jednohřídelového turbovrtulového motoru	4
Obrázek 4: Schéma dvouhřídelového turbovrtulového motoru s jednorotorovým kompresorem	5
Obrázek 5: Schéma dvouhřídelového motoru s dvourotorovým kompresorem.....	6
Obrázek 6: Schéma tříhřídelového motoru.	6
Obrázek 7: Elementární stupeň osové turbíny	7
Obrázek 8: Schéma pro sestavení rovnice zákona zachování energie.....	8
Obrázek 9: p-v diagram expanze ve stupni turbíny	10
Obrázek 10: i-s diagram turbíny	12
Obrázek 11: Smithův diagram účinnosti turbíny	14
Obrázek 12: Koeficient profilových ztrát Y_p pro mříž $\beta_1=\beta_2$	16
Obrázek 13: Koeficient profilových ztrát Y_p pr mříž $\beta_1=90^\circ$	17
Obrázek 14: Závislost t_{maxc} na velikosti úhlu proudu.....	17
Obrázek 15: Závislost Machova čísla na patě lopatky a na středním průměru a na poloměru špičky a paty lopatky	18
Obrázek 16: Závislost korekčního faktoru K_3 na poměru bxh	20
Obrázek 17: Grafická závislost koeficientu $\Delta\Phi_{TET2}$ na poměru $tTETo$	21
Obrázek 18: Průběh změny velikosti radiální vůle během jednoho typického cyklu motoru	22
Obrázek 19: p-v diagram expanze třístupňové turbíny	23
Obrázek 20: Meridiální řez turbínou	28
Obrázek 21: Rychlostní trojúhelníky v jednotlivých řezech turbíny	29
Obrázek 22: Teplotní profil.....	30
Obrázek 23: Určení konstant L_1, L_2 a L_3	31
Obrázek 24: Příklad výstupních parametrů proudu radiální rovnováhy na střední proudnici	33
Obrázek 25: Názvosloví lopatkové mříže	34
Obrázek 26: Dva možné způsoby vyjádření Beziérový křivky 3. stupně	35
Obrázek 27: Základní geometrické parametry turbínové mříže.....	35
Obrázek 28: Vliv úhlu incidence na rozložení Machova čísla	37
Obrázek 29: Vliv úhlu incidence na polohu stagnačního bodu.....	37
Obrázek 30: Pracovní prostředí programu Siemens NX 12	38
Obrázek 31: Výsledná proudová cesta volné dvoustupňové volné turbíny	39
Obrázek 32: Celá síť statoru 1. stupně.....	40
Obrázek 33: Detail sítě na náběžné hraně statoru 1. stupně	40
Obrázek 34: Příklad průběhu reziduí	43
Obrázek 35: Okrajové podmínky výpočetní oblasti	44
Obrázek 36: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli statoru 1. stupně.....	45
Obrázek 37: Průběh reziduí při výpočtu samostatného statoru 1. stupně.....	45
Obrázek 38: Průběh Machova čísla podél lopatky statoru 1. stupně nad mezní vrstvou.....	46
Obrázek 39: Průběh statického tlaku na stěně lopatky statoru 1. stupně.....	46
Obrázek 40: Průběh reziduí při výpočtu samostatného profilu rotoru 1. stupně	46
Obrázek 41: Průběh Machova čísla podél lopatky rotoru 1. stupně nad mezní vrstvou	47
Obrázek 42: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli rotoru 1. stupně	47
Obrázek 43: Průběh statického tlaku na lopatce rotoru 1. stupně.....	47
Obrázek 44: Průběh Machova čísla podél lopatky statoru 2. stupně nad mezní vrstvou.....	48
Obrázek 45: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli statoru 2. stupně.....	48
Obrázek 46: Průběh reziduí při výpočtu samostatného profilu statoru 2. stupně	48
Obrázek 47: Průběh statického tlaku na lopatce statoru 2. stupně	49
Obrázek 48: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli rotoru 2. stupně	49
Obrázek 49: Průběh reziduí při výpočtu samostatného profilu rotoru 2. stupně	49
Obrázek 50: Průběh statického tlaku na lopatce rotoru 2. stupně.....	50
Obrázek 51: Průběh Machova čísla podél lopatky rotoru 2. stupně nad mezní vrstvou	50



Obrázek 52: Průběh reziduí při výpočtu 1. stupně volné turbíny	51
Obrázek 53: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli 1. stupně volné turbíny	51
Obrázek 54: Skalární pole celkového tlaku v proudovém poli 1. stupně volné turbíny	51
Obrázek 55: Skalární pole celkové teploty v proudovém poli 1. stupně volné turbíny	52
Obrázek 56: Vektorové pole absolutní rychlosti v proudovém poli 1. stupně volné turbíny	52
Obrázek 57: Průběh reziduí při výpočtu 2. stupně volné turbíny	53
Obrázek 58: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli 2. stupně volné turbíny	53
Obrázek 59: Skalární pole celkového tlaku v proudovém poli 2. stupně volné turbíny	53
Obrázek 60: Skalární pole celkové teploty v proudovém poli 2. stupně volné turbíny	54
Obrázek 61: Vektorové pole absolutní rychlosti v proudovém poli 2. stupně volné turbíny	54
Obrázek 62: Průběh reziduí při výpočtu celé volné turbíny	55
Obrázek 63: Skalární pole Machova čísla v proudovém poli volné turbíny	55
Obrázek 64: Skalární pole celkové teploty v proudovém poli volné turbíny	56
Obrázek 65: Skalární pole celkového tlaku v proudovém poli volné turbíny	56
Obrázek 66: Vektorové pole absolutních rychlostí v proudovém poli volné turbíny	57

Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání jednotlivých metod výpočtu	58
---	----

Přílohy
Příloha č. 1- Parametry tepelného oběhu

M601E - Navrhovy bod MSA - 4.7.2003

VSTUPNI DATA

Hu=43124.00 [KJ/kg]	sivst=1.000 [-]
etamvt=98.50 [%]	etamht=99.50 [%]
etared=97.50 [%]	mitr=1.000 [-]
sivystr=1.000 [-]	sitr=0.942 [-]
Rk=287.04 [J/kg/K]	Rt=287.10 [J/kg/K]
Qvnevr=2.00 [%]	Qvchs1=1.25 [%]
Qvchrl=1.20 [%]	Qvchs2=0.00 [%]

KOMPRESOR

T0c=288.1 [K]	p0c=101.325 [kPa]
T1c=288.1 [K]	p1c=101.325 [kPa]
T2c=554.9 [K]	p2c=673.811 [kPa]
dTkc=266.7 [K]	Pikc=6.650 [-]
E1c=288.285 [KJ/kg]	E2c=559.758 [kJ/kg]
kk=1.3927 [-]	cpk=1017.9 [J/kg/K]
etakc=76.30 [%]	Qv=3.637 [kg/s]

SPALOVACI KOMORA

Qvsk=3.476 [kg/s]	q=0.01880 [-]
etasp=98.50 [%]	sisk=0.980 [-]

TURBINA VTT

T3c=1230.0 [K]	p3c=660.335 [kPa]
T3r1=1222.2 [K]	p3r1=658.226 [kPa]
T3r2=988.5 [K]	p3r2=227.656 [kPa]
dTvt=233.7 [K]	Pivt=2.891 [-]
E3c=1343.441 [KJ/kg]	E3r1=1333.506 [kJ/kg]
E3r2=1053.974 [KJ/kg]	Qp13c=3.541 [kg/s]
Qp13r1=3.586 [kg/s]	Qp13r2=3.586 [kg/s]
kvt=1.3158 [-]	cpvt=1196.3 [J/kg/K]
etavt=85.00 [%]	A3c=1880.6

TURBINA HT

T4c=983.6 [K]	p4c=227.097 [kPa]
T4r1=983.6 [K]	p4r1=227.097 [kPa]
T5c=846.2 [K]	p5c=114.103 [kPa]
dTht=137.5 [K]	Piht=1.990 [-]
E4c=1048.031 [KJ/kg]	E4r1=1048.031 [kJ/kg]
E5c=889.011 [KJ/kg]	Qp14c=3.630 [kg/s]
Qp14r1=3.630 [kg/s]	Qp15c=3.630 [kg/s]
kht=1.3301 [-]	cpht=1156.7 [J/kg/K]
etaht=89.00 [%]	A4c=5013.2

VYSTUPNI ZARIZENI

T5c=846.2 [K]	p5c=114.103 [kPa]
T6c=846.2 [K]	p6c=114.103 [kPa]
Ttrc=846.2 [K]	ptrc=107.485 [kPa]
Ttr=833.7 [K]	Pitr=1.061 [-]
Qp15c=3.630 [kg/s]	Qp1tr=3.630 [kg/s]
ktr=1.3371 [-]	Latr=0.320 [-]
ctr=168.714 [m/s]	Dtr=0.2544 [m]
p0v=101.325 [kPa]	gama=25.00 [ř]

MOTOR

P= 560.0 [kW]	Pekv= 595.0 [kW]
cm=0.4200 [kg/kW/h]	cmekv=0.3953 [kg/kW/h]
Pm=153.95 [kWs/kg]	F= 555.1 [N]
Qp=235.180 [kg/h]	etaterm=19.88 [%]
Qv=3.637 [kg/s]	ng= 98.6 [%]

Příloha č. 2- Parametry původní turbíny

Název souboru : vtf_new.vys
Datum : 24.1.2008 7:14.47

NÁVRH STATORU pro $\alpha_1 = 24.7700$

ROVINA 0-0 (Vstup do statoru) :
 D0 = 0.199850 H0 = 0.031350 A0 = 0.017133
 T0C = 983.600 P0C = 227091.0 G0 = 3.6300
 LAM0 = 0.523011 C0 = 296.9804 M0 = 0.494197 ALFA0 =
 119.4520
 T0S = 945.454 P0S = 193655.5 RO0 = 0.713438 Q0 =
 0.737036
 DH0 = 0.062700 IT0 = 3.2688

Charakteristika statorové mříže :

1) Geometrie

Zs	Cs	Bx	ts	STAG	ARs
ROHs	ReCs				
19.0000	0.047520	0.038160	0.747402	36.5791	0.995370
0.008677	75776.1				

 2) Ztráty

YP	YPamdc	YS	YSamdc	Yshock	Ytet	YC
SIGs						
0.028018	0.051259	0.085470	0.095182	0.005616	0.005634	
0.119122	0.955990					

ROVINA 1-1 (Výstup ze statoru a vstup do rotoru) :
 D1 = 0.214800 H1 = 0.047300 A1 = 0.031919 G1 =
 3.6300
 T1C = 983.600 P1C = 217096.7 TW1 = 896.564 FW1 =
 149497.0
 LAMU1 = 0.614469 U1 = 348.9126 FI = 0.959512
 LAM1 = 0.897681 M1 = 0.883621 LAMW1 = 0.446482 MW1 =
 0.419594
 C1 = 509.7285 C1A = 213.5644 C1U = 462.8320 ALFA1 =
 24.7700
 W1 = 242.0483 W1A = 213.5644 W1U = 113.9193 BETA1 =
 61.9237
 T1S = 871.224 P1S = 133197.4 RO1 = 0.532516 Q1 =
 0.987696
 DH1 = 0.094600 IT1 = 2.9897

NÁVRH ROTORU č. 4 pro $\beta_1 = 61.9237$ a $\beta_2 = -35.9278$ (delH=
3.2001 mm)

Charakteristika rotorové mříže :

1) Geometrie

Zr	Cr	Bx	tr	STAG	ARr
ROHr	YTCr				
56.0000	0.015900	0.014769	0.757877	21.7368	3.176104
0.010522	0.023722				

 2) Ztráty

YP	YPamdc	YS	YSamdc	Yshock	Ytet	YC
SIGr						
0.033890	0.039635	0.046554	0.039545	0.016148	0.003803	
0.124397	0.960898					

ROVINA 2-2 (Výstup z rotoru) :
 D2 = 0.213900 H2 = 0.050500 A2 = 0.033935 G2 =
 3.6300
 T2C = 846.100 P2C = 111080.2 TW2 = 896.123 FW2 =
 143367.5
 LAMU2 = 0.661701 U2 = 347.4507 NT = 31023.00 PSI =
 0.955492
 LAM2 = 0.492707 M2 = 0.464508 LAMW2 = 0.812980 MW2 =
 0.791125
 C2 = 258.7138 C2A = 258.5448 C2U = -9.3502 ALFA2
 = -87.9288
 W2 = 440.6272 W2A = 258.5448 W2U = -356.8009 BETA2
 = -35.9278
 T2S = 812.151 P2S = 96469.1 RO2 = 0.413731 Q2 =
 0.971612
 dYh = 0.00115 dYd = 0.00205 DH2 = 0.101000 IT2 =
 3.3116

CHARAKTERISTIKA TURBÍNOVÉHO STUPNĚ č. 4

Reakce = 0.350150 HAP = 1.353184 delTC = 142.500 delH =
3.2001
 EtaN = 89.036 EtaN2 = 89.036 EtaCH = 89.036 EtaBV =
89.897
 PIN = 2.044387 PIN2 = 2.044387 PICH = 2.044387 D2/D1 =
0.995810
 KON = 431.442 LIN = 292.167 EXP = 272.806



Příloha č. 3- Parametry prvního stupně dvoustupňové turbíny

NÁVRH STATORU pro $\alpha_{f1} = 29.0000$
.....

ROVINA 0-0 (Vstup do statoru) :
 D0 = 0.199850 H0 = 0.031350 A0 = 0.017133
 T0C = 983.600 P0C = 227097.0 G0 = 3.6300
 LAM0 = 0.523036 C0 = 296.9800 M0 = 0.494245 ALFA0 =
 119.4920
 T0S = 945.480 P0S = 193661.1 RO0 = 0.713439 Q0 =
 0.737075
 DH0 = 0.062700 IT0 = 3.2688

Charakteristika statorové mříže :

1) Geometrie

Zs	Cs	Bx	ts	STAG	ARs
ROHs	ReCs				
23.0000	0.037000	0.032041	0.793150	30.0065	1.296161
0.010811	80750.0				

2) Ztráty

YP	YPamdc	YS	YSamdc	Yshock	Ytet	YC
SIGs						
0.028554	0.046399	0.076078	0.081821	0.010975	0.004832	
0.109566	0.979002					

ROVINA 1-1 (Výstup ze statoru a vstup do rotoru) :
 D1 = 0.214850 H1 = 0.047958 A1 = 0.032370 G1 =
 3.6300
 T1C = 983.600 P1C = 222328.5 TW1 = 945.200 PW1 =
 189368.6
 LAMU1 = 0.440296 U1 = 250.0000 FI = 0.955832
 LAM1 = 0.609511 M1 = 0.580162 LAMW1 = 0.315953 MW1 =
 0.294811
 C1 = 346.0806 C1A = 167.7832 C1U = 302.6890 ALFA1 =
 29.0000
 W1 = 175.8617 W1A = 167.7832 W1U = 52.6889 BETA1 =
 72.5662
 T1S = 931.833 P1S = 178806.6 RO1 = 0.668363 Q1 =
 0.821928
 DH1 = 0.095916 IT1 = 3.0621

NÁVRH ROTORU č. 3 pro $\beta_1 = 72.5662$ a $\beta_2 = -31.9610$ (delH=
7.1057 mm)
.....
...

Charakteristika rotorové mříže :

1) Geometrie

Zr	Cr	Bx	tr	STAG	ARr
ROHr	YTCr				
53.0000	0.018000	0.015167	0.707517	32.5838	3.059094
0.019444	0.000869				

2) Ztráty

YP	YPamdc	YS	YSamdc	Yshock	Ytet	YC
SIGr						
0.018735	0.031594	0.037640	0.031723	0.002160	0.015859	
0.081710	0.987377					

ROVINA 2-2 (Výstup z rotoru) :
 D2 = 0.217000 H2 = 0.055064 A2 = 0.037538 G2 =
 3.6300
 T2C = 917.600 P2C = 165932.4 TW2 = 945.744 PW2 =
 187411.8
 LAMU2 = 0.460417 U2 = 252.5018 NT = 22223.17 PSI =
 0.965393
 LAM2 = 0.290365 M2 = 0.270634 LAMW2 = 0.540240 MW2 =
 0.511191
 C2 = 159.2421 C2A = 159.2194 C2U = -2.6889 ALFA2
 = -89.0325
 W2 = 300.7875 W2A = 159.2194 W2U = -255.1907 BETA2
 = -31.9610
 T2S = 906.640 P2S = 158089.7 RO2 = 0.607345 Q2 =
 0.782362
 dYh = 0.00463 dYd = 0.00248 DH2 = 0.110127 IT2 =
 3.3485

CHARAKTERISTIKA TURBÍNOVÉHO STUPNĚ č. 3
.....

Reakce = 0.400000 HAP = 1.221619 delTC = 66.000 delH =
7.1057
 EtaN = 89.561 EtaN2 = 89.561 EtaCH = 89.561 EtaBV =
89.597
 PIN = 1.368611 PIN2 = 1.368611 PICH = 1.368611 D2/D1 =
1.010007
 KON = 234.928 LIN = 158.845 EXP = 148.307

Příloha č. 4- Parametry druhého stupně dvoustupňové turbíny
NÁVRH STATORU pro $\alpha_1 = 26.0000$

ROVINA 0-0 (Vstup do statoru) :

D0 = 0.217000	HO = 0.055064	A0 = 0.037533
TOC = 917.600	POC = 165932.4	G0 = 3.6300
LAM0 = 0.290364	CO = 159.2412	MO = 0.270632
ALFA0 = 26.0000		
TOS = 906.640	POS = 158089.8	ROO = 0.607345
Q0 = 0.444751		
DH0 = 0.110128	ITO = 3.3485	

Charakteristika statorové mříže :

1) Geometrie

Zs	Cs	Bx	ts	STAG	ARs
ROHs	ReCs				
29.0000	0.025000	0.017035	0.968477	47.0459	2.595407
0.016000	67279.9				

2) Ztráty

YP	YPamdc	YS	YSamdc	Yshock	Ytet	YC
SIGs						
0.017424	0.031803	0.034033	0.028594	0.000000	0.009637	
0.065694	0.986165					

ROVINA 1-1 (Výstup ze statoru a vstup do rotoru) :

D1 = 0.223500	H1 = 0.064885	A1 = 0.045559	G1 = 3.6300
T1C = 917.600	P1C = 163636.6	TW1 = 876.004	FW1 = 135737.0
LAMU1 = 0.474208	U1 = 260.0652	FI = 0.973039	
LAM1 = 0.639184	M1 = 0.610099	LAMW1 = 0.304590	MW1 = 0.284064
C1 = 350.5411	C1A = 153.6671	C1U = 315.0643	ALFA1 = 26.0000
W1 = 163.2130	W1A = 153.6671	W1U = 54.9991	BETA1 = 70.3072
T1S = 864.490	P1S = 128690.4	RO1 = 0.518505	Q1 = 0.847555
DH1 = 0.129770	IT1 = 3.0197		

NÁVRH ROTORU č. 1 pro $\beta_1 = 70.3072$ a $\beta_2 = -31.3298$ ($\Delta l_H = 5.2847$ mm)

Charakteristika rotorové mříže :

1) Geometrie

Zr	Cr	Bx	tr	STAG	ARr
ROHr	YTCr				
53.0000	0.018500	0.015661	0.716110	32.1621	3.792967
0.018919	0.000866				

2) Ztráty

YP	YPamdc	YS	YSamdc	Yshock	Ytet	YC
SIGr						
0.022649	0.033534	0.031004	0.026000	0.005042	0.015281	
0.082452	0.985728					

ROVINA 2-2 (Výstup z rotoru) :

D2 = 0.223500	H2 = 0.070170	A2 = 0.049270	G2 = 3.6300
T2C = 846.100	P2C = 116325.7	TW2 = 876.004	FW2 = 133799.9
LAMU2 = 0.493838	U2 = 260.0652	NT = 22223.17	PSI = 0.965589
LAM2 = 0.304115	M2 = 0.283615	LAMW2 = 0.574708	MW2 = 0.545357
C2 = 160.1529	C2A = 160.1251	C2U = -2.9861	ALFA2 = -88.9317
W2 = 307.9545	W2A = 160.1251	W2U = -263.0512	BETA2 = -31.3298
T2S = 835.014	P2S = 110305.2	RO2 = 0.460118	Q2 = 0.804136
dYh = 0.00264	dYd = 0.00264	DH2 = 0.140340	IT2 = 3.3378

CHARAKTERISTIKA TURBÍNOVÉHO STUPNĚ č. 1

Reakce = 0.400000	HAP = 1.222964	$\Delta l_{TC} = 71.500$	$\Delta l_H = 5.2847$
EtaN = 92.350	EtaN2 = 92.350	EtaCH = 92.350	EtaBV = 92.387
PIN = 1.426446	PIN2 = 1.426446	PICH = 1.426446	D2/D1 = 1.000000
KON = 318.781	LIN = 213.515	EXP = 199.243	



Příloha č. 5- Parametry po výšce lopatky na vstupu do rotoru prvního stupně volné turbíny

VSTUP - Horní polovina lopatky

D1[mm]	R1[mm]	Alfa1[o]	c1[m/s]	Beta1[o]	w1[m/s]	u1[m/s]	p1c[Pa]	pw1[Pa]	p1s[Pa]	T1c[K]	Tw1[K]	T1s[K]
214.8500	107.4250	29.0000	349.1075	71.8950	174.5659	250.0003	222328.4	189021.0	178806.5	1000.881	961.909	948.205
217.0299	108.5150	28.8471	346.7857	72.9803	171.5656	252.5368	222328.4	189285.1	179421.6	1003.007	964.262	951.029
219.2098	109.6049	28.6937	344.4520	74.1097	168.6251	255.0734	222328.4	189552.5	180024.6	1004.867	966.366	953.587
221.3897	110.6949	28.5398	342.1012	75.2862	165.7453	257.6099	222328.4	189823.1	180615.7	1006.430	968.189	955.847
223.5696	111.7848	28.3853	339.7280	76.5128	162.9281	260.1465	222328.4	190097.1	181195.4	1007.662	969.701	957.778
225.7495	112.8748	28.2303	337.3276	77.7924	160.1758	262.6830	222328.4	190374.9	181763.7	1008.530	970.868	959.348
227.9295	113.9647	28.0747	334.8951	79.1283	157.4919	265.2196	222328.4	190656.6	182321.2	1009.001	971.659	960.526
230.1094	115.0547	27.9186	332.4258	80.5238	154.8804	267.7561	222328.4	190942.7	182868.0	1009.042	972.042	961.280
232.2893	116.1446	27.7619	329.8668	81.9966	152.3185	270.2927	222328.4	191233.0	183404.5	1008.325	971.701	961.295
234.4692	117.2346	27.6045	327.2524	83.5395	149.8372	272.8292	222328.4	191528.6	183930.8	1007.050	970.829	960.763
236.6491	118.3245	27.4466	324.5985	85.1496	147.4549	275.3658	222328.4	191830.4	184447.3	1005.309	969.514	959.769
238.8290	119.4145	27.2881	321.9066	86.8275	145.1820	277.9023	222328.4	192139.0	184954.2	1003.109	967.764	958.321
241.0089	120.5045	27.1289	319.1786	88.5734	143.0291	280.4389	222328.4	192454.9	185451.8	1000.455	965.585	956.424
243.1888	121.5944	26.9691	316.4160	90.3871	141.0068	282.9754	222328.4	192779.0	185940.2	997.357	962.985	954.084
245.3687	122.6844	26.8087	313.6202	92.2674	139.1260	285.5120	222328.4	193111.8	186419.7	993.820	959.970	951.309
247.5486	123.7743	26.6476	310.7929	94.2127	137.3972	288.0485	222328.4	193454.2	186890.5	989.852	956.547	948.104
249.7285	124.8643	26.4858	307.8837	96.2408	135.8137	290.5851	222328.4	193807.3	187352.8	985.130	952.406	944.160
251.9085	125.9542	26.3233	304.9467	98.3286	134.4073	293.1216	222328.4	194171.8	187806.8	979.996	947.876	939.804
254.0884	127.0442	26.1601	301.9971	100.4663	133.1918	295.6582	222328.4	194548.3	188252.8	974.547	943.052	935.128
256.2683	128.1341	25.9962	299.0423	102.6459	132.1762	298.1947	222328.4	194937.5	188690.9	968.832	937.981	930.181
258.4482	129.2241	25.8316	296.0897	104.8582	131.3681	300.7313	222328.4	195340.0	189121.3	962.902	932.711	925.010
260.6281	130.3140	25.6662	293.1466	107.0935	130.7726	303.2678	222328.4	195756.1	189544.2	956.806	927.291	919.664
262.8080	131.4040	25.5000	290.2202	109.3414	130.3932	305.8044	222328.4	196186.3	189959.7	950.594	921.768	914.190
264.9879	132.4940	25.3330	287.4633	111.5284	130.2397	308.3409	222328.4	196625.3	190368.1	945.274	917.115	909.558
267.1678	133.5839	25.1653	284.6305	113.7526	130.2878	310.8775	222328.4	197082.0	190769.5	939.242	911.784	904.226

VSTUP - Dolní polovina lopatky

D1[mm]	R1[mm]	Alfa1[o]	c1[m/s]	Beta1[o]	w1[m/s]	u1[m/s]	p1c[Pa]	pw1[Pa]	p1s[Pa]	T1c[K]	Tw1[K]	T1s[K]
214.8500	107.4250	29.0000	349.1075	71.8950	174.5659	250.0003	222328.4	189021.0	178806.5	1000.881	961.909	948.205
212.6701	106.3350	29.0459	351.4462	70.6918	177.2109	247.4637	222328.4	188707.5	178178.3	998.640	959.384	945.255
210.4902	105.2451	29.0918	353.7867	69.5255	179.9344	244.9272	222328.4	188396.3	177535.8	996.179	956.653	942.081
208.3103	104.1551	29.1376	356.1321	68.3947	182.7351	242.3906	222328.4	188087.2	176878.7	993.516	953.733	938.699
206.1304	103.0652	29.1834	358.4856	67.2983	185.6123	239.8541	222328.4	187780.0	176206.5	990.668	950.641	935.124
203.9505	101.9752	29.2291	360.8507	66.2349	188.5655	237.3175	222328.4	187474.8	175518.7	987.652	947.394	931.372
201.7705	100.8853	29.2748	363.2308	65.2033	191.5945	234.7810	222328.4	187171.4	174814.9	984.485	944.007	927.460
199.5906	99.7953	29.3205	365.6370	64.2010	194.7057	232.2444	222328.4	186870.1	174094.4	981.225	940.536	923.442
197.4107	98.7054	29.3661	368.0701	63.2275	197.8973	229.7079	222328.4	186570.7	173356.9	977.870	936.981	919.315
195.2308	97.6154	29.4116	370.5280	62.2827	201.1655	227.1713	222328.4	186273.1	172601.6	974.406	933.327	915.067
193.0509	96.5255	29.4572	373.0133	61.3655	204.5103	224.6348	222328.4	185977.2	171828.2	970.843	929.584	910.705
190.8710	95.4355	29.5026	375.5286	60.4751	207.9317	222.0982	222328.4	185682.9	171035.8	967.189	925.760	906.237
188.6911	94.3455	29.5480	378.0766	59.6106	211.4303	219.5617	222328.4	185390.3	170224.0	963.454	921.865	901.672
186.5112	93.2556	29.5934	380.6603	58.7710	215.0065	217.0251	222328.4	185099.3	169392.0	959.647	917.907	897.018
184.3313	92.1656	29.6388	383.2826	57.9555	218.6614	214.4886	222328.4	184810.0	168539.2	955.777	913.895	892.282
182.1514	91.0757	29.6841	385.8850	57.1705	222.3422	211.9520	222328.4	184519.4	167664.8	951.550	909.544	887.190
179.9715	89.9857	29.7293	388.5329	56.4072	226.1037	209.4155	222328.4	184230.3	166768.2	947.288	905.166	882.042
177.7915	88.8958	29.7745	391.2401	55.6639	229.9570	206.8789	222328.4	183943.3	165848.5	943.050	900.819	876.892
175.6116	87.8058	29.8197	394.0174	54.9391	233.9104	204.3424	222328.4	183658.8	164905.0	938.878	896.542	871.777
173.4317	86.7159	29.8649	396.8759	54.2319	237.9732	201.8058	222328.4	183377.3	163936.7	934.814	892.376	866.735
171.2518	85.6259	29.9099	399.8273	53.5409	242.1551	199.2693	222328.4	183099.3	162942.9	930.897	888.361	861.803
169.0719	84.5360	29.9550	402.8838	52.8654	246.4668	196.7327	222328.4	182825.3	161922.6	927.170	884.536	857.015
166.8920	83.4460	30.0000	406.0582	52.2044	250.9195	194.1962	222328.4	182556.1	160874.8	923.674	880.942	852.409
164.7121	82.3560	30.0450	409.4516	51.5501	255.6056	191.6596	222328.4	182297.1	159798.6	920.844	877.999	848.383
162.5322	81.2661	30.0899	412.9679	50.9113	260.4375	189.1231	222328.4	182043.0	158692.9	918.219	875.263	844.508

Příloha č. 6- Parametry po výšce lopatky na výstupu z rotoru prvního stupně volné turbíny

VYSTUP - Horní polovina lopatky

D2[mm]	R2[mm]	Alfa2[o]	c2[m/s]	Beta2[o]	w2[m/s]	u2[m/s]	p2c[Pa]	pw2[Pa]	p2s[Pa]	T2c[K]	Tw2[K]	T2s[K]
217.0000	108.5000	88.2408	160.6955	31.9610	303.4330	252.5020	166002.2	187484.7	158151.2	933.819	962.452	922.658
219.4570	109.7285	88.1780	159.1523	31.4176	305.1608	255.3610	165843.8	187786.6	158161.8	935.581	964.882	924.633
221.9132	110.9566	88.1197	157.5604	30.8745	306.8749	258.2190	165683.4	188093.6	158170.8	937.091	967.064	926.361
224.3690	112.1845	88.0680	155.9167	30.3314	308.5704	261.0766	165521.1	188405.9	158178.5	938.320	968.967	927.813
226.8253	113.4126	88.0251	154.2184	29.7882	310.2424	263.9348	165357.0	188723.9	158184.9	939.237	970.559	928.958
229.2826	114.6413	87.9931	152.4627	29.2447	311.8861	266.7941	165191.3	189048.0	158190.1	939.812	971.808	929.766
231.7417	115.8709	87.9745	150.6469	28.7009	313.4966	269.6555	165024.0	189378.8	158194.3	940.015	972.684	930.206
234.2033	117.1017	87.9721	148.7686	28.1565	315.0690	272.5199	164855.5	189716.8	158197.9	939.815	973.155	930.249
236.6682	118.3341	88.0043	146.8022	27.6114	316.5519	275.3880	164685.7	190062.6	158200.8	938.907	972.902	929.593
239.1372	119.5686	88.0627	144.7648	27.0654	317.9772	278.2609	164515.4	190417.3	158203.7	937.479	972.122	928.422
241.6110	120.8055	88.1440	142.6637	26.5183	319.3594	281.1395	164345.1	190782.2	158207.0	935.618	970.903	926.821
244.0907	122.0454	88.2495	140.5000	25.9700	320.6999	284.0249	164175.2	191158.1	158211.1	933.330	969.251	924.798
246.5771	123.2885	88.3807	138.2744	25.4201	322.0000	286.9180	164006.3	191546.1	158216.6	930.624	967.174	922.360
249.0712	124.5356	88.5393	135.9877	24.8685	323.2611	289.8201	163838.9	191947.2	158223.7	927.507	964.679	919.514
251.5740	125.7870	88.7271	133.6407	24.3151	324.4845	292.7324	163673.3	192362.7	158232.9	923.986	961.774	916.266
254.0866	127.0433	88.9463	131.2342	23.7594	325.6717	295.6561	163510.2	192793.8	158244.8	920.069	958.467	912.625
256.6103	128.3051	89.2212	128.7469	23.2013	326.7697	298.5927	163350.9	193242.8	158260.7	915.458	954.445	908.294
259.1463	129.5731	89.5332	126.2034	22.6405	327.8353	301.5436	163195.6	193710.6	158280.4	910.472	950.041	903.588
261.6960	130.8480	89.8788	123.6103	22.0766	328.8851	304.5104	163044.4	194198.3	158304.1	905.202	945.348	898.598
264.2608	132.1304	-89.7425	120.9693	21.5094	329.9282	307.4949	162897.7	194707.2	158332.3	899.693	940.415	893.368
266.8426	133.4213	-89.3312	118.2785	20.9384	330.9741	310.4990	162755.4	195238.5	158365.0	893.992	935.291	887.946
269.4429	134.7215	-88.8879	115.5383	20.3634	332.0325	313.5248	162617.6	195793.6	158402.6	888.147	930.025	882.378
272.0640	136.0320	-88.4136	112.7492	19.7837	333.1136	316.5746	162484.4	196373.6	158445.1	882.204	924.665	876.709
274.7079	137.3539	-87.9928	109.9663	19.1990	334.3956	319.6511	162349.0	196971.4	158485.9	877.087	920.185	871.861
277.3773	138.6886	-87.4856	107.0910	18.6087	335.5998	322.7572	162222.7	197601.7	158536.0	871.325	915.037	866.368

VYSTUP - Dolní polovina lopatky

D2[mm]	R2[mm]	Alfa2[o]	c2[m/s]	Beta2[o]	w2[m/s]	u2[m/s]	p2c[Pa]	pw2[Pa]	p2s[Pa]	T2c[K]	Tw2[K]	T2s[K]
217.0000	108.5000	88.2408	160.6955	31.9610	303.4330	252.5020	166002.2	187484.7	158151.2	933.819	962.452	922.658
214.5430	107.2715	88.3084	161.7079	32.4289	301.4207	249.6430	166115.4	187134.5	158145.4	931.886	959.852	920.583
212.0853	106.0427	88.3777	162.6761	32.8968	299.3970	246.7832	166225.5	186788.6	158137.9	929.742	957.047	918.304
209.6264	104.8132	88.4477	163.6019	33.3650	297.3644	243.9221	166332.3	186446.7	158128.7	927.405	954.055	915.837
207.1657	103.5829	88.5175	164.4872	33.8336	295.3254	241.0588	166436.0	186108.5	158117.7	924.889	950.892	913.195
204.7026	102.3513	88.5860	165.3336	34.3026	293.2824	238.1927	166536.3	185773.9	158104.9	922.212	947.573	910.397
202.2366	101.1183	88.6525	166.1432	34.7722	291.2379	235.3233	166633.5	185442.8	158090.3	919.387	944.117	907.457
199.7671	99.8835	88.7143	166.9214	35.2424	289.2004	232.4497	166727.7	185115.2	158074.1	916.471	940.577	904.428
197.2935	98.6467	88.7714	167.6686	35.7134	287.1698	229.5714	166819.0	184791.2	158056.3	913.462	936.954	901.311
194.8153	97.4076	88.8242	168.3842	36.1853	285.1440	226.6878	166907.1	184470.4	158036.7	910.345	933.233	898.091
192.3319	96.1660	88.8722	169.0693	36.6582	283.1245	223.7981	166992.1	184152.8	158015.3	907.131	929.422	894.776
189.8429	94.9215	88.9150	169.7255	37.1321	281.1127	220.9019	167074.1	183838.3	157992.1	903.827	925.531	891.376
187.3477	93.6738	88.9520	170.3541	37.6073	279.1100	217.9985	167153.1	183526.9	157967.1	900.442	921.569	887.899
184.8457	92.4229	88.9826	170.9565	38.0837	277.1180	215.0872	167229.2	183218.5	157940.3	896.985	917.545	884.353
182.3365	91.1682	89.0065	171.5343	38.5615	275.1383	212.1674	167302.3	182913.2	157911.8	893.465	913.467	880.748
179.8194	89.9097	89.0344	172.0605	39.0408	273.1281	209.2386	167369.9	182607.9	157879.0	889.603	909.050	876.807
177.2940	88.6470	89.0541	172.5652	39.5216	271.1344	206.3000	167434.7	182305.7	157844.5	885.703	904.606	872.833
174.7597	87.3799	89.0632	173.0548	40.0042	269.1660	203.3510	167497.5	182007.1	157808.8	881.823	900.193	868.879
172.2160	86.1080	89.0602	173.5343	40.4886	267.2292	200.3911	167558.6	181712.7	157772.4	878.002	895.851	864.986
169.6622	84.8311	89.0437	174.0087	40.9748	265.3305	197.4196	167618.8	181423.0	157735.7	874.278	891.619	861.191
167.0980	83.5490	89.0120	174.4835	41.4631	263.4763	194.4359	167678.6	181138.7	157699.2	870.693	887.538	857.534
164.5228	82.2614	88.9638	174.9642	41.9535	261.6733	191.4394	167738.9	180860.5	157663.5	867.284	883.648	854.053
161.9360	80.9680	88.8978	175.4566	42.4460	259.9279	188.4294	167800.3	180589.2	157629.2	864.092	879.988	850.787
159.3372	79.6686	88.7996	176.0059	42.9409	258.3032	185.4054	167868.6	180330.9	157601.3	861.532	876.980	848.143
156.7260	78.3630	88.6848	176.5697	43.4381	256.7347	182.3669	167938.7	180080.1	157575.0	859.165	874.178	845.690



Příloha č. 7- Parametry po výšce lopatky na vstupu do rotoru druhého stupně volné turbíny

VSTUP - Horní polovina lopatky

D1[mm]	R1[mm]	Alfa1[o]	c1[m/s]	Beta1[o]	w1[m/s]	u1[m/s]	p1c[Pa]	pw1[Pa]	p1s[Pa]	T1c[K]	Tw1[K]	T1s[K]
214.8500	107.4250	29.0000	349.1075	71.8950	174.5659	250.0003	222328.4	189021.0	178806.5	1000.881	961.909	948.205
217.1337	108.5669	28.8398	346.6749	73.0330	171.4242	252.6576	222328.4	189297.8	179450.6	1003.102	964.368	951.157
219.4174	109.7087	28.6791	344.2290	74.2197	168.3482	255.3149	222328.4	189578.1	180081.4	1005.030	966.552	953.815
221.7011	110.8506	28.5177	341.7636	75.4583	165.3390	257.9723	222328.4	189862.0	180699.2	1006.627	968.425	956.144
223.9849	111.9924	28.3558	339.2730	76.7523	162.3988	260.6296	222328.4	190149.7	181304.5	1007.856	969.950	958.106
226.2686	113.1343	28.1933	336.7515	78.1052	159.5305	263.2870	222328.4	190441.6	181897.5	1008.679	971.091	959.666
228.5523	114.2761	28.0302	334.1936	79.5208	156.7382	265.9443	222328.4	190737.9	182478.5	1009.058	971.811	960.786
230.8360	115.4180	27.8664	331.5868	81.0048	154.0227	268.6016	222328.4	191039.0	183048.0	1008.912	972.033	961.390
233.1197	116.5599	27.7020	328.8756	82.5765	151.3622	271.2590	222328.4	191344.9	183606.2	1007.895	971.421	961.147
235.4034	117.7017	27.5369	326.1198	84.2213	148.8035	273.9163	222328.4	191657.2	184153.4	1006.361	970.319	960.393
237.6871	118.8436	27.3712	323.3212	85.9401	146.3583	276.5736	222328.4	191976.5	184689.9	1004.318	968.734	959.136
239.9709	119.9854	27.2048	320.4820	87.7336	144.0386	279.2310	222328.4	192303.5	185216.0	1001.775	966.675	957.383
242.2546	121.1273	27.0377	317.6041	89.6016	141.8568	281.8883	222328.4	192639.1	185731.9	998.739	964.150	955.141
244.5383	122.2691	26.8699	314.6891	91.5433	139.8251	284.5457	222328.4	192984.0	186238.0	995.219	961.167	952.417
246.8220	123.4110	26.7014	311.7388	93.5572	137.9559	287.2030	222328.4	193339.0	186734.5	991.222	957.733	949.219
249.1057	124.5529	26.5321	308.7194	95.6544	136.2491	289.8603	222328.4	193705.2	187221.5	986.532	953.639	945.339
251.3894	125.6947	26.3621	305.6474	97.8267	134.7253	292.5177	222328.4	194083.9	187699.5	981.249	948.983	940.871
253.6731	126.8366	26.1913	302.5595	100.0557	133.4081	295.1750	222328.4	194475.7	188168.5	975.607	943.991	936.041
255.9569	127.9784	26.0197	299.4644	102.3323	132.3087	297.8324	222328.4	194881.2	188628.8	969.663	938.718	930.903
258.2406	129.1203	25.8473	296.3706	104.6463	131.4359	300.4897	222328.4	195301.1	189080.7	963.475	933.220	925.511
260.5243	130.2621	25.6741	293.2864	106.9867	130.7961	303.1470	222328.4	195736.0	189524.2	957.099	927.551	919.922
262.8080	131.4040	25.5000	290.2202	109.3415	130.3932	305.8044	222328.4	196186.3	189959.7	950.594	921.768	914.190
265.0917	132.5459	25.3251	287.3304	111.6334	130.2374	308.4617	222328.4	196646.6	190387.4	945.505	916.878	909.322
267.3754	133.6877	25.1493	284.3553	113.9668	130.3032	311.1191	222328.4	197126.6	190807.4	938.620	911.231	903.672

VSTUP - Dolní polovina lopatky

D1[mm]	R1[mm]	Alfa1[o]	c1[m/s]	Beta1[o]	w1[m/s]	u1[m/s]	p1c[Pa]	pw1[Pa]	p1s[Pa]	T1c[K]	Tw1[K]	T1s[K]
214.8500	107.4250	29.0000	349.1075	71.8950	174.5659	250.0003	222328.4	189021.0	178806.5	1000.881	961.909	948.205
212.5663	106.2831	29.0481	351.5576	70.6354	177.3389	247.3429	222328.4	188692.6	178148.0	998.528	959.258	945.109
210.2826	105.1413	29.0962	354.0098	69.4163	180.1978	244.6856	222328.4	188366.8	177473.8	995.934	956.383	941.768
207.9989	103.9994	29.1442	356.4677	68.2360	183.1415	242.0282	222328.4	188043.2	176783.6	993.120	953.302	938.199
205.7151	102.8576	29.1921	358.9351	67.0932	186.1690	239.3709	222328.4	187721.7	176076.7	990.106	950.034	934.422
203.4314	101.7157	29.2400	361.4159	65.9864	189.2798	236.7136	222328.4	187402.4	175352.6	986.911	946.599	930.455
201.1477	100.5739	29.2879	363.9141	64.9142	192.4739	234.0562	222328.4	187085.0	174610.7	983.555	943.016	926.316
198.8640	99.4320	29.3357	366.4455	63.8733	195.7610	231.3989	222328.4	186770.1	173850.5	980.119	939.363	922.080
196.5803	98.2901	29.3834	369.0034	62.8643	199.1333	228.7416	222328.4	186457.1	173071.3	976.563	935.600	917.711
194.2966	97.1483	29.4311	371.5897	61.8863	202.5896	226.0842	222328.4	186146.1	172272.4	972.891	931.734	913.211
192.0129	96.0064	29.4788	374.2072	60.9382	206.1299	223.4269	222328.4	185836.8	171453.2	969.113	927.773	908.590
189.7291	94.8646	29.5264	376.8590	60.0191	209.7546	220.7695	222328.4	185529.4	170613.0	965.242	923.728	903.858
187.4454	93.7227	29.5740	379.5485	59.1278	213.4643	218.1122	222328.4	185223.8	169751.1	961.286	919.610	899.023
185.1617	92.5809	29.6215	382.2789	58.2634	217.2598	215.4549	222328.4	184920.0	168866.6	957.258	915.429	894.095
182.8780	91.4390	29.6690	385.0608	57.4240	221.1484	212.7975	222328.4	184618.3	167958.7	953.202	911.228	889.117
180.5943	90.2971	29.7164	387.8955	56.6091	225.1297	210.1402	222328.4	184318.6	167026.7	949.115	907.006	884.083
178.3106	89.1553	29.7638	390.7805	55.8186	229.1998	207.4828	222328.4	184020.7	166069.6	944.978	902.742	878.975
176.0269	88.0134	29.8111	393.7185	55.0516	233.3597	204.8255	222328.4	183724.5	165086.6	940.793	898.441	873.794
173.7431	86.8716	29.8584	396.7123	54.3074	237.6103	202.1682	222328.4	183430.0	164076.6	936.567	894.106	868.545
171.4594	85.7297	29.9057	399.7648	53.5853	241.9528	199.5108	222328.4	183137.1	163038.7	932.302	889.742	863.229
169.1757	84.5879	29.9528	402.8790	52.8845	246.3886	196.8535	222328.4	182845.8	161971.8	928.003	885.352	857.850
166.8920	83.4460	30.0000	406.0582	52.2044	250.9195	194.1961	222328.4	182556.1	160874.8	923.674	880.942	852.409
164.6083	82.3041	30.0471	409.3133	51.5436	255.5542	191.5388	222328.4	182268.4	159746.6	919.353	876.547	846.941
162.3246	81.1623	30.0942	412.6339	50.9027	260.2822	188.8815	222328.4	181981.9	158586.1	914.981	872.110	841.390

Příloha č. 8- Parametry po výšce lopatky na výstupu z rotoru druhého stupně volně turbíny

VYSTUP - Horní polovina lopatky												
D2[mm]	R2[mm]	Alfa2[o]	c2[m/s]	Beta2[o]	w2[m/s]	u2[m/s]	p2c[Pa]	pw2[Pa]	p2s[Pa]	T2c[K]	Tw2[K]	T2s[K]
217.0000	108.5000	88.2408	160.6955	31.9610	303.4330	252.5020	166002.2	187484.7	158151.2	933.819	962.452	922.658
219.5740	109.7870	88.2651	159.4583	31.4773	305.2419	255.4972	165873.8	187801.1	158162.4	935.711	964.992	924.721
222.1408	111.0704	88.2951	158.1784	30.9949	307.0296	258.4839	165743.4	188121.8	158171.9	937.327	967.256	926.512
224.7009	112.3505	88.3333	156.8531	30.5138	308.7901	261.4628	165611.0	188447.0	158179.8	938.630	969.209	927.997
227.2548	113.6274	88.3821	155.4794	30.0338	310.5175	264.4345	165476.9	188777.1	158186.3	939.588	970.814	929.139
229.8030	114.9015	88.4441	154.0547	29.5549	312.2057	267.3996	165341.2	189112.4	158191.6	940.163	972.035	929.906
232.3461	116.1730	88.5222	152.5765	29.0770	313.8488	270.3587	165204.1	189453.5	158195.8	940.323	972.835	930.261
234.8845	117.4423	88.6216	151.0392	28.6000	315.4341	273.3125	165065.9	189800.9	158199.3	939.992	973.136	930.132
237.4189	118.7095	88.7618	149.4171	28.1237	316.9666	276.2615	164926.7	190155.1	158202.1	938.847	972.605	929.198
239.9498	119.9749	88.9264	147.7398	27.6480	318.3223	279.2065	164787.5	190517.6	158205.1	937.222	971.584	927.788
242.4777	121.2388	89.1165	146.0091	27.1730	319.6819	282.1479	164648.9	190889.2	158208.7	935.124	970.081	925.910
245.0032	122.5016	89.3335	144.2268	26.6984	320.9865	285.0866	164511.2	191270.9	158213.3	932.562	968.104	923.572
247.5267	123.7634	89.5788	142.3948	26.2241	322.2368	288.0230	164375.2	191663.6	158219.4	929.546	965.661	920.782
250.0490	125.0245	89.8540	140.5151	25.7501	323.4337	290.9580	164241.4	192068.3	158227.6	926.082	962.762	917.548
252.5706	126.2853	-89.8391	138.5890	25.2762	324.5780	293.8921	164110.2	192486.2	158238.2	922.180	959.413	913.879
255.0921	127.5460	-89.4845	136.5997	24.8023	325.6334	296.8261	163982.7	192918.9	158252.4	917.640	955.405	909.576
257.6140	128.8070	-89.0851	134.5545	24.3284	326.6156	299.7606	163859.3	193367.9	158270.7	912.557	950.837	904.732
260.1371	130.0685	-88.6530	132.4701	23.8542	327.5629	302.6965	163740.0	193833.6	158293.2	907.148	945.935	899.564
262.6619	131.3310	-88.1895	130.3502	23.3797	328.4844	305.6344	163625.2	194317.1	158320.1	901.468	940.753	894.124
265.1893	132.5946	-87.6963	128.1985	22.9048	329.3893	308.5752	163515.1	194819.3	158351.6	895.569	935.348	888.466
267.7198	133.8599	-87.1751	126.0183	22.4292	330.2872	311.5198	163409.8	195340.9	158388.1	889.506	929.776	882.643
270.2544	135.1272	-86.6281	123.8126	21.9529	331.1879	314.4690	163309.5	195882.6	158429.5	883.332	924.091	876.707
272.7938	136.3969	-86.1348	121.6473	21.4756	332.2737	317.4239	163207.4	196437.0	158469.5	878.009	919.303	871.613
275.3390	137.6695	-85.5620	119.4103	20.9973	333.2463	320.3855	163114.9	197017.9	158519.0	871.962	913.761	865.799
VYSTUP - Dolní polovina lopatky												
D2[mm]	R2[mm]	Alfa2[o]	c2[m/s]	Beta2[o]	w2[m/s]	u2[m/s]	p2c[Pa]	pw2[Pa]	p2s[Pa]	T2c[K]	Tw2[K]	T2s[K]
217.0000	108.5000	88.2408	160.6955	31.9610	303.4330	252.5020	166002.2	187484.7	158151.2	933.819	962.452	922.658
214.4260	107.2130	87.8967	160.0355	32.0562	301.3238	249.5069	165949.2	187118.0	158145.2	931.549	959.723	920.480
211.8229	105.9115	87.5492	159.3586	32.1524	299.1751	246.4780	165894.5	186750.4	158137.4	929.054	956.763	918.078
209.1900	104.5950	87.1970	158.6667	32.2497	296.9900	243.4143	165838.2	186381.7	158127.7	926.351	953.593	915.470
206.5262	103.2631	86.8384	157.9618	32.3482	294.7717	240.3147	165780.1	186012.0	158115.9	923.459	950.230	912.675
203.8306	101.9153	86.4719	157.2459	32.4478	292.5233	237.1780	165720.3	185640.9	158102.2	920.397	946.694	909.710
201.1020	100.5510	86.0959	156.5213	32.5487	290.2480	234.0030	165658.8	185268.7	158086.3	917.182	943.005	906.594
198.3393	99.1697	85.7061	155.7958	32.6508	287.9581	230.7884	165596.1	184895.5	158068.7	913.892	939.241	903.402
195.5414	97.7707	85.3033	155.0667	32.7542	285.6479	227.5327	165531.8	184521.2	158049.0	910.489	935.362	900.096
192.7069	96.3534	84.8867	154.3354	32.8590	283.3184	224.2345	165465.9	184145.6	158027.1	906.975	931.374	896.680
189.8345	94.9172	84.4546	153.6038	32.9652	280.9716	220.8921	165398.6	183768.8	158002.9	903.363	927.286	893.165
186.9227	93.4613	84.0058	152.8743	33.0728	278.6093	217.5039	165329.9	183390.7	157976.5	899.661	923.110	889.560
183.9699	91.9850	83.5386	152.1492	33.1820	276.2336	214.0681	165259.9	183011.5	157947.8	895.880	918.855	885.875
180.9746	90.4873	83.0516	151.4311	33.2927	273.8465	210.5827	165188.7	182631.1	157916.8	892.031	914.532	882.119
177.9349	88.9674	82.5418	150.7261	33.4051	271.4551	207.0457	165117.0	182250.0	157883.7	888.155	910.185	878.336
174.8489	87.4244	82.0079	150.0363	33.5192	269.0598	203.4548	165044.8	181868.2	157848.4	884.251	905.811	874.522
171.7145	85.8573	81.4495	149.3623	33.6350	266.6582	199.8077	164972.0	181485.6	157810.7	880.300	901.391	870.658
168.5296	84.2648	80.8651	148.7071	33.7528	264.2519	196.1017	164898.8	181102.2	157770.6	876.306	896.929	866.748
165.2918	82.6459	80.2531	148.0742	33.8724	261.8423	192.3341	164825.4	180718.1	157727.8	872.273	892.429	862.796
161.9983	80.9992	79.6118	147.4674	33.9942	259.4310	188.5019	164752.2	180333.4	157682.4	868.205	887.895	858.806
158.6465	79.3233	78.9394	146.8911	34.1181	257.0198	184.6017	164679.4	179948.2	157634.2	864.107	883.332	854.781
155.2332	77.6166	78.2340	146.3501	34.2443	254.6106	180.6300	164607.4	179562.6	157583.2	859.982	878.744	850.725
151.7551	75.8775	77.4926	145.8531	34.3728	252.2101	176.5828	164537.0	179177.4	157529.7	855.869	874.167	846.674
148.2083	74.1042	76.7155	145.3998	34.5040	249.8117	172.4558	164467.9	178791.7	157472.9	851.710	869.545	842.572