

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: **N 2301 Strojní inženýrství**

Studijní zaměření: **Stavba energetických strojů a zařízení**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Porovnání výpočtových metod používaných při návrhu lopatkování  
parních turbín

Autor: **Bc. Lukáš Čierny**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Žitek**

Akademický rok: 2017/2018

## **Zadání DP**

## **Zadání DP**

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

**V Plzni dne:** .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Čierny	Jméno Lukáš	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N 2301 Strojní inženýrství		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Žitek	Jméno Pavel	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Porovnání výpočtových metod používaných při návrhu lopatkování parních turbín		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	75	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	75	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato práce pojednává o metodách návrhu turbínových stupňů, konkrétně pomocí 1D (mean-line) a 2D (through-flow). Diplomová práce je zaměřena především na zkoumání odlišností zmíněných přístupů v uvažování hmotové bilance stupněm. Jsou analyzovány vlivy uvažovaných zjednodušení na základní proudové charakteristiky stupně (reakce, průtočnost apod). Rozbory jsou provedeny na několika vybraných stupních s různou reakčností a s případným uvažováním vyrovnávacích otvorů.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	mean-line, through-flow, bilance průtoku, úniky, porovnání

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Čierný	<b>Name</b> Lukáš
<b>FIELD OF STUDY</b>	N 2301 Strojní inženýrství	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Žitek	<b>Name</b> Pavel
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b><del>BACHELOR</del></b> <b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Comparison of the calculation methods used in the design of steam turbine blades	

<b>FAKULTA</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and equivalents A4)

<b>TOTALY</b>	75	<b>TEXT PART</b>	75	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
---------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This thesis discusses methods of designing turbine stages by using 1D (mean-line) and 2D (through-flow). The diploma thesis is focused mainly on researching differences already mentioned approaches at considering balance of mass flow rate through stage. The effects of simplification considered on the basic current characteristic of the stage (reaction, flow rate, etc.) are analyzed. The analyses are performed on several selected stages with different reactions and with possible consideration of balancing holes.
<b>KEY WORDS</b>	mean-line, through-flow, mass flow balance, leakages, comparing

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Pavlu Žitkovi za ochotu a vstřícný přístup během zpracovávání této práce.

Poděkování patří rovněž i mému konzultantovi Ing. Petru Milčákovi, PhD za velmi cenné a přínosné rady při řešení této práce a za konstruktivní připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat samozřejmě všem kolegům z firmy Doosan Škoda Power s.r.o., kteří mi byli nápomocni během zpracovávání mé diplomové práce.

Velké poděkování náleží i mé rodině a přátelům, kteří mne během studia podporovali.

## Obsah

1	Úvod .....	10
2	Parní turbína .....	11
2.1	Typy turbínových stupňů .....	11
2.1.1	Rovnotlaký stupeň .....	13
2.1.2	Přetlakový stupeň .....	14
2.2	Únik pracovní látky vnitřními netěsnostmi .....	15
2.2.1	Rovnotlaký stupeň .....	15
2.2.2	Přetlakový stupeň .....	16
3	Vývoj metod výpočtu turbínových stupňů .....	18
4	Metody návrhu turbínových stupňů .....	20
4.1	Metoda mean-line 1D .....	20
4.1.1	Rychlostní trojúhelníky .....	20
4.1.2	Expanze páry ve stupni .....	21
4.1.3	Účinnost stupně .....	24
4.1.4	Spád na stupeň .....	24
4.1.5	Vlastní zpracování 1D návrhu .....	26
4.1.5.1	Bilance hmotnostního průtoku .....	28
4.2	Metoda through-flow 2D .....	30
4.2.1	Meridionální souřadný systém .....	30
4.2.2	Fyzikální principy .....	31
4.2.3	Popis výpočtu a zakřivení proudnic .....	33
5	Popis problematiky výpočtu .....	36
5.1	Popis modifikace 2D výpočtu s uvažováním úniků páry .....	38
6	Popis a výsledky rozborů 1D .....	40
6.1	Přetlakový stupeň .....	40
6.2	Nízkoreakční stupeň .....	47
6.2.1	Stupeň bez vyrovnávacích otvorů .....	47
6.2.2	Stupeň s vyrovnávacími otvory .....	53
7	Porovnání výsledků 1D s proudovými výpočty .....	60
7.1	Přetlakový stupeň .....	60
7.2	Nízkoreakční stupeň .....	63
7.2.1	Stupeň bez vyrovnávacích otvorů .....	64
7.2.2	Stupeň s vyrovnávacími otvory .....	66
8	Závěr .....	68



9	Seznam použitých zdrojů .....	69
10	Použité zkratky a symboly .....	70
11	Seznam obrázků .....	71
12	Seznam tabulek .....	72
13	Seznam grafů.....	72

## 1 Úvod

Cílem této práce je porovnat rozdíly v návrhu turbínových stupňů pomocí 1D (mean-line) a 2D (through-flow) metod a popsat možné dopady uvažovaných zjednodušení. Práce je zaměřena především na odlišnosti přístupů v uvažování hmotové bilance stupněm. Jsou analyzovány vlivy na základní proudové charakteristiky stupně (reakce, zatížení, průtočnost). Rozbory jsou provedeny na sadě vybraných stupňů pomocí interních softwarových nástrojů společnosti Doosan Škoda Power s.r.o.

Na začátku této práce jsou popsány typy turbínových stupňů, které jsou rozčleněny podle stupně reakce. Následně je přiblížena problematika týkající se úniků páry ve stupni parní turbíny a jsou uvedeny možnosti konstrukčního provedení jednotlivých turbínových stupňů podle reakce.

Dále je stručně popsána evoluce výpočetních metod používaných při návrzích turbínových stupňů, od samotného vzniku, až do současnosti. Výpočtové metody „*mean-line*“ a „*through-flow*“ jsou podrobně popsány, vysvětleny jsou fyzikální principy a podstata jednotlivých metod, z níž vyplývají jistá omezení daných přístupů.

Pro účely této práce byl v programu Microsoft Excel vytvořen 1D výpočet stupně parní turbíny, pomocí kterého jsou vypočítány proudové parametry vybraných turbínových stupňů. Tyto parametry jsou následně porovnávány s proudovým výpočtem a vyhodnoceny v příslušných grafech a tabulkách.

## 2 Parní turbína

Parní turbína je točivý tepelný stroj, v němž se mechanická energie získává přeměnou tlakové a kinetické energie, tedy expanzí vodní páry v jednom nebo postupně v několika turbínových stupních, které jsou tvořeny rozváděcím a oběžným kolem s věncem lopatek. Turbína se zpravidla nachází na společné hřídeli s elektrickým generátorem a dohromady tvoří tzv. turbogenerátor.

Většina parních turbín je konstruována v axiálním provedení, u něhož pára protéká turbínou prakticky v axiálním směru. Parní turbíny lze kategorizovat podle mnoha kritérií. Pro účely této práce budeme parní turbíny dělit z hlediska stupně reakce.[4][6][7]

### 2.1 Typy turbínových stupňů

U parních turbín se zpravidla využívá dvou vyhraněných typů stupňů; rovnotlaký (akční) a přetlakový (reakční). Tyto dva typy se zásadně liší v konstrukčním provedení. Rovnotlaké turbíny mají oběžné lopatky zasazené do disku kola, tzv. kolová konstrukce. Kdežto přetlakové turbíny mají oběžné lopatky upevněné v drážkách bubnového rotoru, tzv. bubnová konstrukce.

Volbou stupně reakce se tedy zároveň určuje konstrukční provedení turbíny. Při zvyšování stupně reakce se zároveň zlepšuje proudění v oběžných lopatkách, což samozřejmě vede ke zlepšení účinnosti stupně (výhoda reakčních stupňů). Na druhé straně se tím zvyšuje i únik páry kolem oběžných lopatek, což naopak účinnost zhoršuje. Z tohoto důvodu jsou stupně opatřeny hřídelovými a nadbandážovými ucpávkami, které kladou unikající páře při průchodu ucpávkami odpor a tedy fungují jako těsnění. [1]

Stupeň reakce udává rozdělení celkového entalpického spádu mezi rotorovou a statorovou část stupně. Jedná se o podíl entalpického spádu na rotorovou část stupně ku celkovému entalpickému spádu (Obr. 1).

Reakci lze definovat k celkovému počátečnímu stavu (2.1) anebo k počátečnímu statickému stavu (2.2).

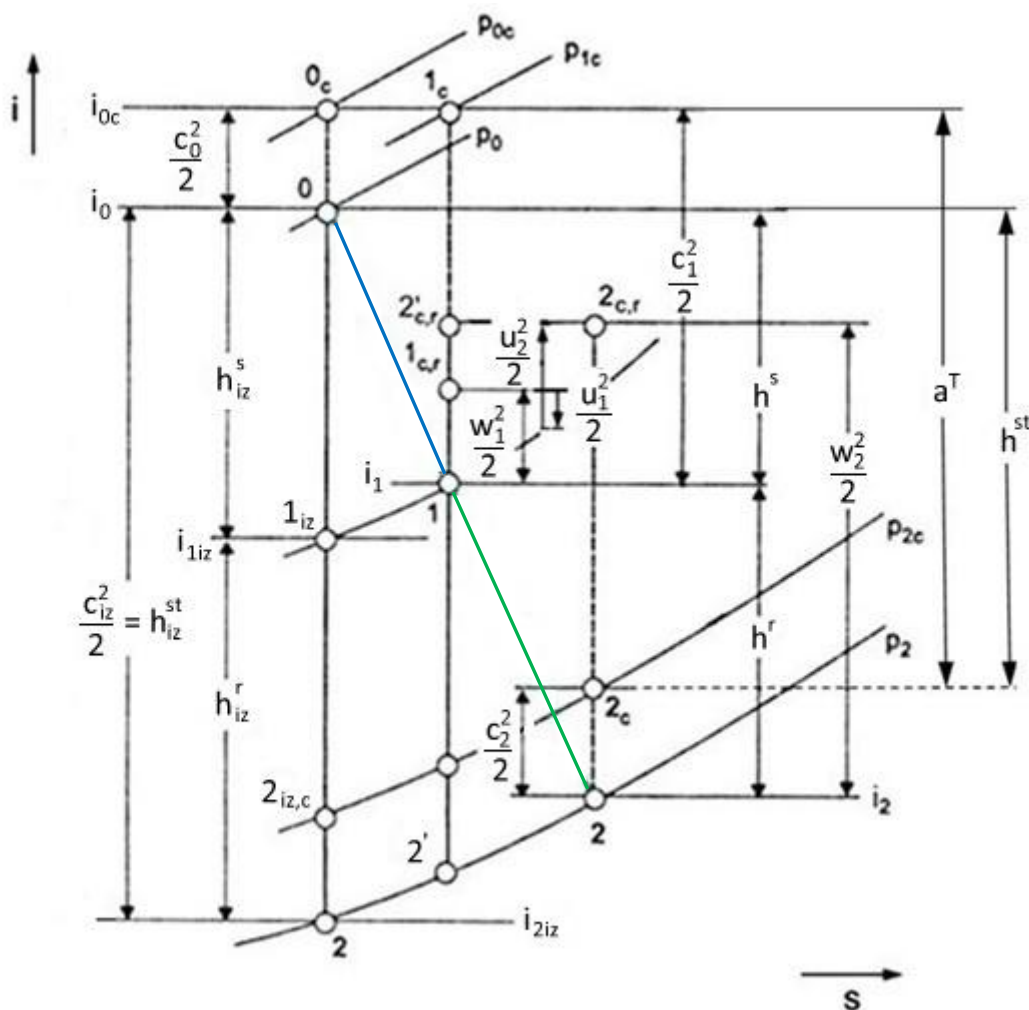
Reakce definovaná k celkovému počátečnímu stavu

$$\rho_{ts} = \frac{h_{iz}^r}{h_{iz}^{st} + \frac{c_0^2}{2}} \quad (2.1)$$

Reakce k počátečnímu statickému stavu

$$\rho_{ss} = \frac{h_{iz}^r}{h_{iz}^{st}} \quad (2.2)$$

Rovnice (2.2) definuje stupeň reakce vztažený k počátečnímu statickému stavu, tedy zpracovaný spád v oběžném kole ku celkovému spádu ve stupni, na Obr. 1 je grafické znázornění expanze ve stupni turbíny. Je-li reakce stupně  $\rho = 0$ , v oběžných lopatkách tedy nedochází k expanzi páry, takový stupeň se nazývá **rovnotlaký**. Jako rovnotlaký stupeň se uvažuje i stupeň s malou reakcí přibližně do 5 %. Je-li reakce významná ( $\rho = 0,4 \div 0,6$ ), jedná se již o stupeň **přetlakový**. [2][3]

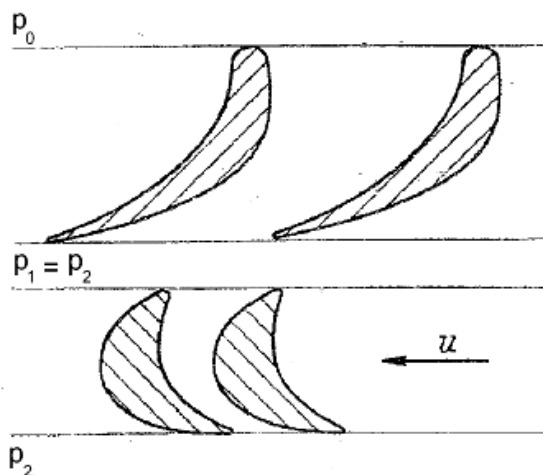


Obr. 1 Definice stupně reakce

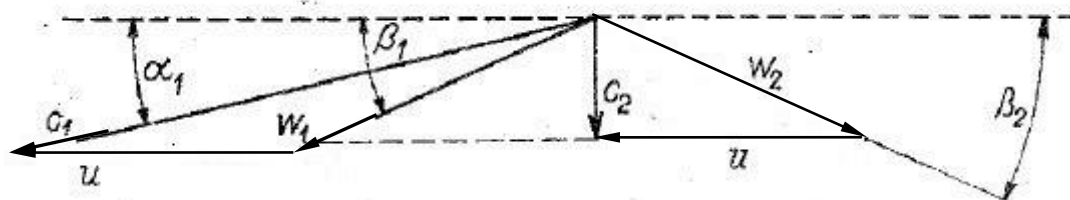
Rozdíl tlaků  $p_1$  a  $p_2$  působí u stupňů s diskovou konstrukcí nejen na plochu axiálního průmětu lopatkové řady, ale na plochu disku oběžného kola. S rostoucím stupněm reakce vzrůstá i axiální síla, která si může vyžádat složitější konstrukci turbíny, např. rozdělení do více proudů apod. Zvýšení reakce způsobuje zvýšení počtu stupňů z důvodu zmenšení zpracovaného tlakového spádu ve stupni. [1]

### 2.1.1 Rovnotlaký stupeň

Veškerý entalpický spád stupně, tedy rozdíl entalpie před a za stupněm, je zpracován v kanálech rozváděcích kol. Stupeň reakce je tedy roven nule. Tlak před oběžným kolem  $p_1$  a za oběžným kolem  $p_2$  je stejný, expanze páry probíhá výhradně v rozváděcích kolech. Ve skutečnosti tento ideální stav neexistuje a podle podmínek se může na oběžné lopatkování nastavit určitý přetlak. Charakteristickým znakem tohoto typu turbíny je uložení rozváděcích lopatek v rozváděcím kole. Oběžné lopatky jsou uchyceny na disku a spolu s ním tvoří oběžné kolo (viz Obr. 6).[2][3][6]



Obr. 2 Rozvinutý válcový řez rovnotlakým axiálním stupněm



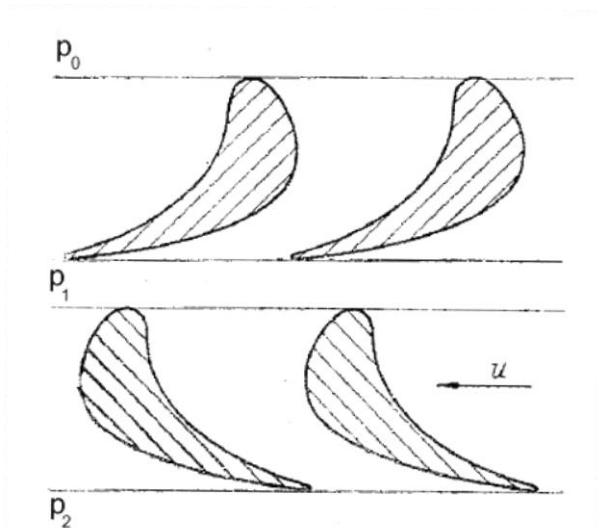
Obr. 3 Rychlostní trojúhelníky rovnotlakého stupně [6]

### 2.1.2 Přetlakový stupeň

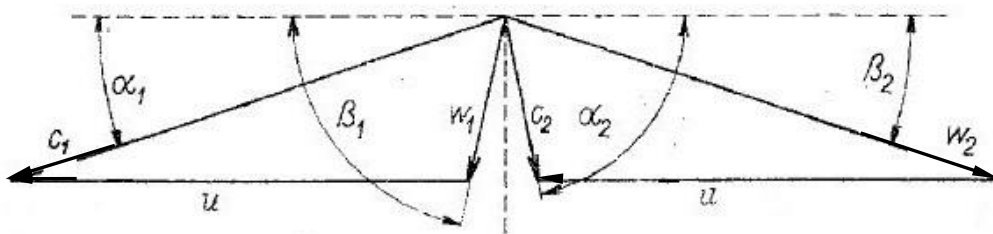
Kromě expanze v rozváděcích lopatkách dochází k expanzi páry i v oběžných lopatkách. Před oběžnými lopatkami je vyšší tlak než za nimi, oběžné lopatky jsou tedy zatíženy přetlakem a zpracovávají značnou část entalpického spádu stupně. Pro tento typ turbíny je charakteristické zasazení rozváděcích lopatek přímo do tělesa turbíny, oběžné lopatky jsou uchyceny v rotoru bubnového provedení.

Za čistě přetlakový stupeň je považován stupeň s reakcí  $\rho = 0,5$ , neboli polovina spádu je zpracována v rozváděcích lopatkách a druhá polovina v oběžných lopatkách. Oběžné lopatkování přetlakového stupně je vystaveno polovině tlakového spádu na stupeň a vlivem toho, na rozdíl od rovnotlakového stupně, je výraznější ztráta únikem pracovní látky nadbandážovými ucpávkami. Tato ztráta významně ovlivňuje účinnost přetlakového stupně.

V případě  $\rho = 0,5$  mají obě lopatkové řady shodné (kongruentní) lopatkování a také shodné rychlostní trojúhelníky (Obr. 5).[2][3][6]



Obr. 4 Rozvinutý válcový řez přetlakovým axiálním stupněm



Obr. 5 Rychlostní trojúhelníky přetlakového stupně s 50 % reakcí [6]

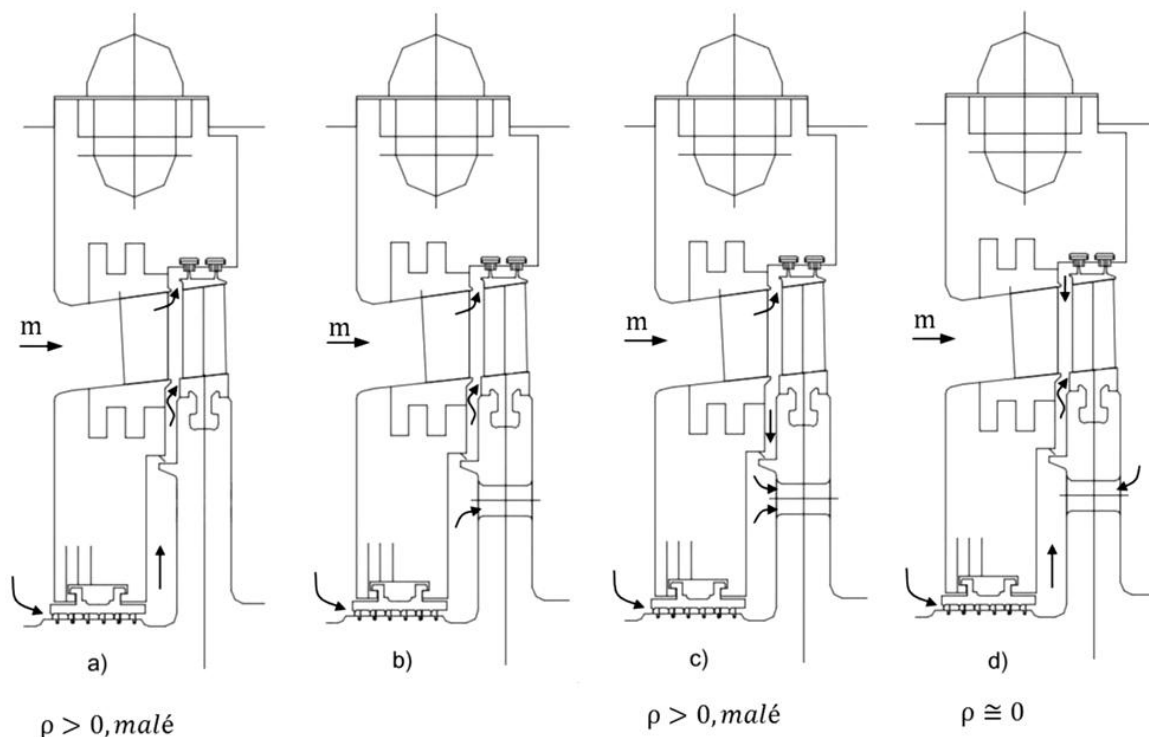
## 2.2 Únik pracovní látky vnitřními netěsnostmi

Kromě průtoku páry přes lopatkové kanály dochází vlivem vůlí mezi statorovými a rotorovými díly k parazitním tokům (únikům páry z hlavního proudu). Tyto toky se snažíme eliminovat použitím různých těsnění. Uspořádání stupně (kolové nebo bubnové) má vliv na charakter těchto parazitních toků a ovlivňuje množství skutečně proudící přes lopatkové kanály. Cílem práce je posoudit rozdílnosti v 1D a 2D návrhu právě na základě těchto parazitních toků.

### 2.2.1 Rovnotlaký stupeň

Úniky pracovní látky vnitřní netěsností u rovnotlakého stupně, odsávání nebo vefukování pracovní látky z nebo do hlavního proudu páry je znázorněno pro různé konstrukční provedení stupně a různé tlakové poměry před a za oběžným kolem na Obr. 6.

Pro kolové uspořádání stupně bez vyrovnávacích otvorů jsou toky dle Obr. 6a. Určité množství páry uniká vždy přes hřídelovou ucpávku, takže obtéká rozváděcí lopatky a vrací se zpět do hlavního proudu pracovní látky  $m$ . Část páry rovněž uniká nadbandážovou ucpávkou.



Obr. 6 Různé úniky a přísávání (vefukování) u rovnotlakého stupně

Pokud jsou v disku kola vyrovnávací otvory, které jsou vytvořeny k vyrovnání tlaků na obou stranách disku a tím k zabránění zvyšování axiální síly; a tyto otvory jsou nedostatečně dimenzovány, aby pobraly celé množství uniklé páry z hřídelové ucpávky, dochází k vefukování axiální mezerou na patě mezi rozváděcími a oběžnými lopatkami. Viz. Obr. 6b.

Naopak v případě, že jsou vyrovnávací otvory naddimenzovány, dochází k odsávání páry axiální mezerou na patě (Obr. 1).

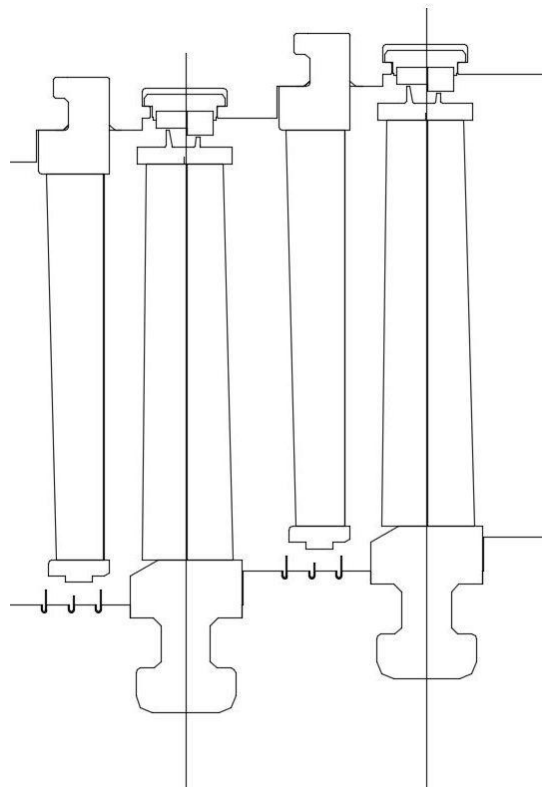
Speciální případ může nastat při nulové reakci nebo dokonce záporné reakci (např. při nenávrhových stavech), kdy pára může proudit přes vyrovnávací otvory a nadbandážovou ucpávku opačným směrem (Obr. 6d).

Množství vefukované páry je závislé na stupni reakce na patě lopatky. V případě, že je pára z prostoru mezi rozváděcím a oběžným kolem odsávána v okolí paty lopatky, dochází k určitému zlepšení proudění na spodním okraji, protože je pára odsávána z mezní vrstvy. V praxi je obvyklé dimenzovat vyrovnávací otvory pro mírné odsávání. Výpočet bilancí hmotnostního průtoku v axiální mezeře a to, zda bude pára vefukována nebo odsávána závisí na správném určení tlakových poměrů a průtokových součinitelích.[1]

### 2.2.2 Přetlakový stupeň

Na Obr. 7 je znázorněno typické konstrukční provedení přetlakového stupně s rotorovými i nadbandážovými ucpávkami. V některých případech je možné, aby byl stupeň bez bandáží, ale je třeba zvážit možné dopady do účinnosti stupně.

U přetlakového stupně je tlakový spád na oběžné kolo značný, tedy i axiální síla, která na oběžné kolo působí. Kdyby bylo použito kolové (diskové) koncepce rotoru, jak je obvyklé u rovnotlakých stupňů (Obr. 6), axiální síla by dosáhla úrovně, kterou by bylo obtížné zachytit v axiálním ložisku (u vícestupňových turbín). Z tohoto důvodu je u přetlakových stupňů používána bubnová konstrukce rotoru, viz Obr. 7.[1]; navíc je snaha axiální sílu co nejvíce kompenzovat použitím vyrovnávacího pístu. Bubnová koncepce stupně nedovoluje použití vyrovnávacích kanálů a tedy pro přetlakové stupně je typické, že se pára, která unikla hřídelovou ucpávkou, vrací axiální mezerou zpět do stupně. Pro snížení vlivu vefukování je obvyklé použití tvarování patních omezujících stěn oběžných lopatek pro lepší nasměrování uniklé páry zpět do hlavního proudu páry.

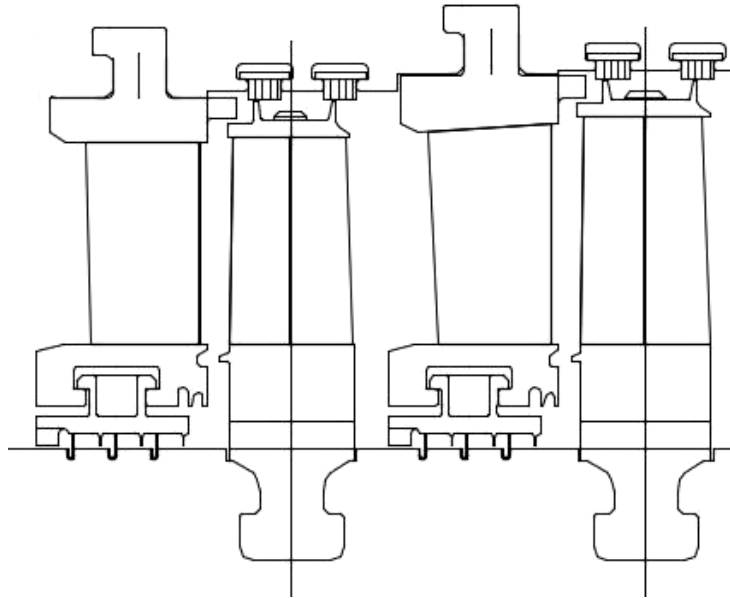


Obr. 7 Přetlakový stupeň s bubnovou konstrukcí rotoru

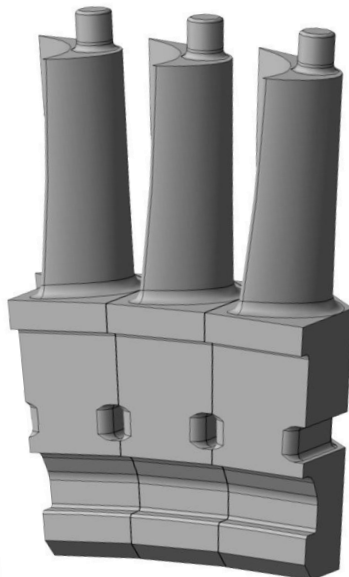
Použití rovnotlakých stupňů v bubnové koncepci rotoru se většinou realizuje pomocí tzv. stupňů se zvýšenou patní reakcí, přibližně  $\rho_h = 10 \div 15 \%$ . Tento typ stupně má díky urychlení proudu v oběžných lopátkách nižší ztráty než čistě rovnotlaký stupeň. Díky nízké



patní reakci nevzniká výrazná axiální síla i přes použití malých disků, ve kterých jsou pro výhodu mírného odsávání axiální mezerou realizovány vyrovnávací štěrbininy. Odsáváním proudu páry z mezní vrstvy se zlepšuje účinnost stupně. Na Obr. 8 je znázorněn popisovaný stupeň s mini-disky a vyrovnávacími štěrbinami. Obr. 9 ukazuje 3D model lopatek popsaného oběžného kola, na kterém je vidět konstrukční provedení štěrbin na patě lopatky.



**Obr. 8** Bubnové uspořádání se štěrbinami



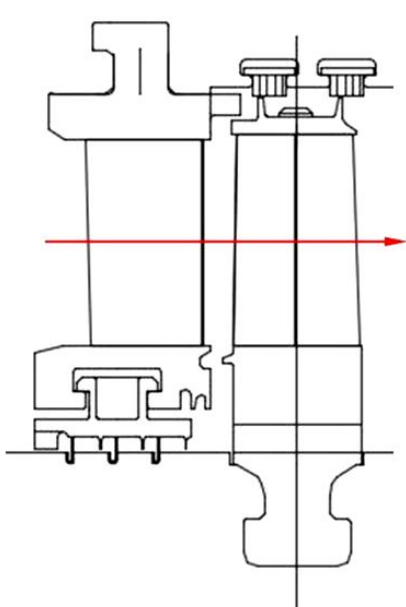
**Obr. 9** 3D model lopatek se štěrbinami

### 3 Vývoj metod výpočtu turbínových stupňů

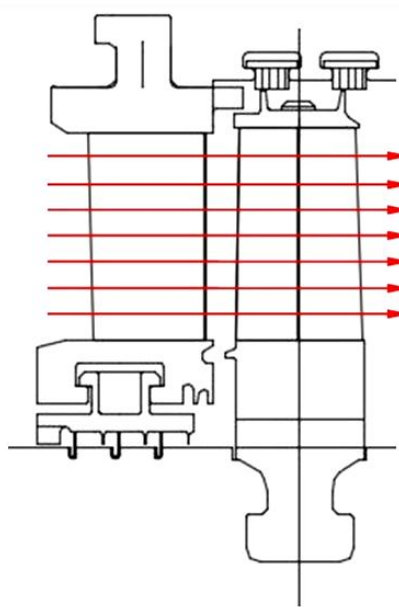
Na počátku 20. století (1900 – 1940) byla pro návrh parních turbín používána tzv. mean-line metoda. Tato metoda vychází z výpočtu referenční proudové čáry (proudnic<sup>1</sup>) na referenčním poloměru lopatky (Obr. 10). Předpokládají se stejné nebo podobné proudové parametry po celé délce lopatky (relativně krátké lopatky).

Postupem času (1950) se začala využívat rovnice radiální rovnováhy (3.1) pro zjištění změny proudových parametrů po výšce lopatky, což vedlo k rozkrouceným lopatkám (výpočet je realizován na více poloměrech). Tento přístup je poměrně jednoduchý, neboť je zaveden zjednodušující předpoklad proudění po válcových (kuželových) plochách. Vliv zakřivení proudnic je zanedbáván. (Obr. 11)

$$\frac{d_p}{d_r} = \rho \frac{c_u^2}{r} \quad (3.1)$$



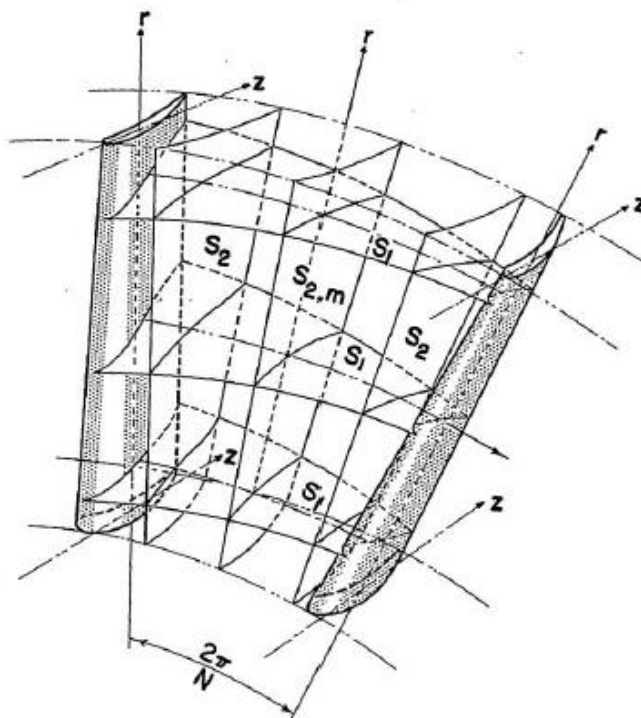
Obr. 10 1D mean-line



Obr. 11 2D - proudění po válcových plochách

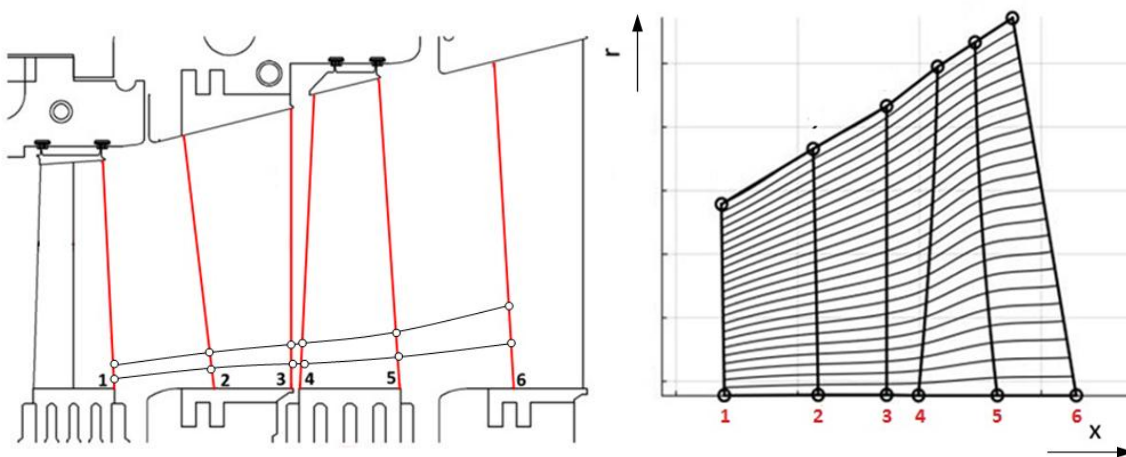
Počátkem 50. let 20. století publikoval Wu [8] teorii pro výpočet trojdimenzionálního proudění v lopatkových strojích. Princip této metody je zobrazen na Obr. 12.

Trojdimenzionální řešení je získáno na základě iterování mezi řešeními v plochách  $S_2$  (meridionální rovina) a plochách  $S_1$  (plochy v obvodovém směru, tzv. *blade to blade*). Tato teorie byla však natolik nadčasová, že svou komplexností předčila výpočtové možnosti tehdejší výpočetní techniky, takže byla málokdy využívána v plném rozsahu. Výpočty se omezovaly pouze na jednu meridionální rovinu  $S_2$  a jednu nebo několik nezkroutěných ploch  $S_1$ . Pro výpočet v rovině  $S_2$  je nejčastěji používána metoda zakřivení proudnic (*streamline curvature method, through-flow*). Tato metoda se stala dominantní zejména pro svou jednoduchost a efektivitu při řešení nadzvukového proudění a stala se jednou ze základních metod při návrzích lopatkových strojů a to až do současnosti, kdy výpočetní technika umožňuje realizaci komplexních úloh proudění pomocí CFD. [9](str.18)



Obr. 12 Princip řešení trojdimenzionálního proudění podle Wu [8]

Metoda *streamline<sup>1</sup> curvature*, která respektuje prostorový charakter proudění, zaznamenala rozmach převážně v 70. letech minulého století, zejména díky pokroku ve výpočetní technice. Bližší informace o vývoji návrhových metod lopatkových strojů popisuje Denton v [10] [11] nebo Turinský v [12].



Obr. 13 Metoda streamline curvature

<sup>1</sup> „Proudnice (streamline) je trajektorie pohybu jednotlivých částic při proudění kapalin. Rychlost částice v libovolném místě proudu je tečnou k proudnici. Každým bodem proudící kapaliny prochází v jednom okamžiku právě jedna proudnice. Proudnice se nemohou vzájemně protínat. Proudnice lze využít ke grafickému zobrazení proudění. Jsou-li proudnice rovnoběžné, jde o laminární proudění, jsou-li proudnice různě zakřivené nebo stočené, jedná se o turbulentní proudění.“ [13]

## 4 Metody návrhu turbínových stupňů

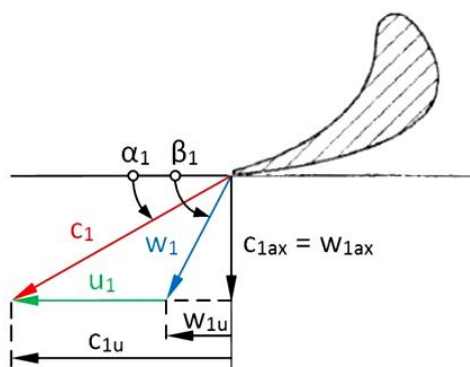
V této kapitole budou podrobněji popsány metody návrhu turbínových stupňů. Nejdříve bude přiblížena metoda *mean-line* (1D) a následně *streamline curvature* neboli *through-flow* (2D).

### 4.1 Metoda mean-line 1D

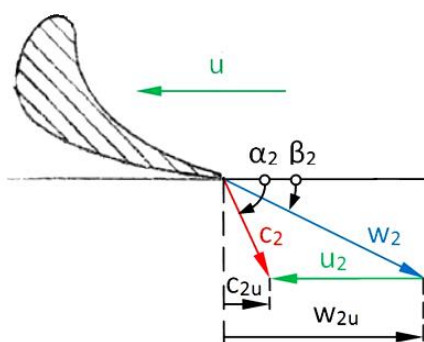
Jak již bylo diskutováno v kapitole 3, tato metoda je založena na výpočtu referenční proudnice na středním průměru stupně. Při výpočtu je použito mnoho zjednodušení, aby byl výpočet jednoduchý, ale zároveň dostatečně vypovídající o proudění ve stupni. Používá se zejména při prvotním výpočtu, který slouží k předběžnému návrhu nebo pro výpočet stupňů, u kterých je možné zanedbat vliv prostorového proudění, u nichž se rychlostní trojúhelníky po výšce lopatky mění minimálně. Předpokládat neměnné parametry po výšce lopatky lze odůvodněně u stupňů s poměrem  $l/d < 0,1$ .

#### 4.1.1 Rychlostní trojúhelníky

Rychlostní trojúhelník je grafické znázornění absolutní, relativní a obvodové rychlosti rotoru. Absolutní rychlost  $c$  je vektorovým součtem relativní rychlosti páry  $w$  a obvodové rychlosti rotoru  $u$ . Relativní rychlost proudu  $w$  je vnímána pozorovatelem, který se pohybuje s rotující mříží lopatkového stroje. Relativní a absolutní rychlost může mít axiální, obvodovou nebo v případě prostorové úlohy i radiální složku.[14]



Obr. 14 Rychlostní trojúhelník - vstup do rotoru



Obr. 15 Rychlostní trojúhelník - výstup z rotoru

„*Obvodová rychlost je funkcí poloměru  $r$  a úhlové rychlosti  $\omega$ , nemá žádné složky v axiálním a radiálním směru, jako absolutní nebo relativní rychlost. Obvodová rychlost leží v rovině kolmé na axiální směr.*“ [15] Vztah pro výpočet obvodové rychlosti udává následující rovnice

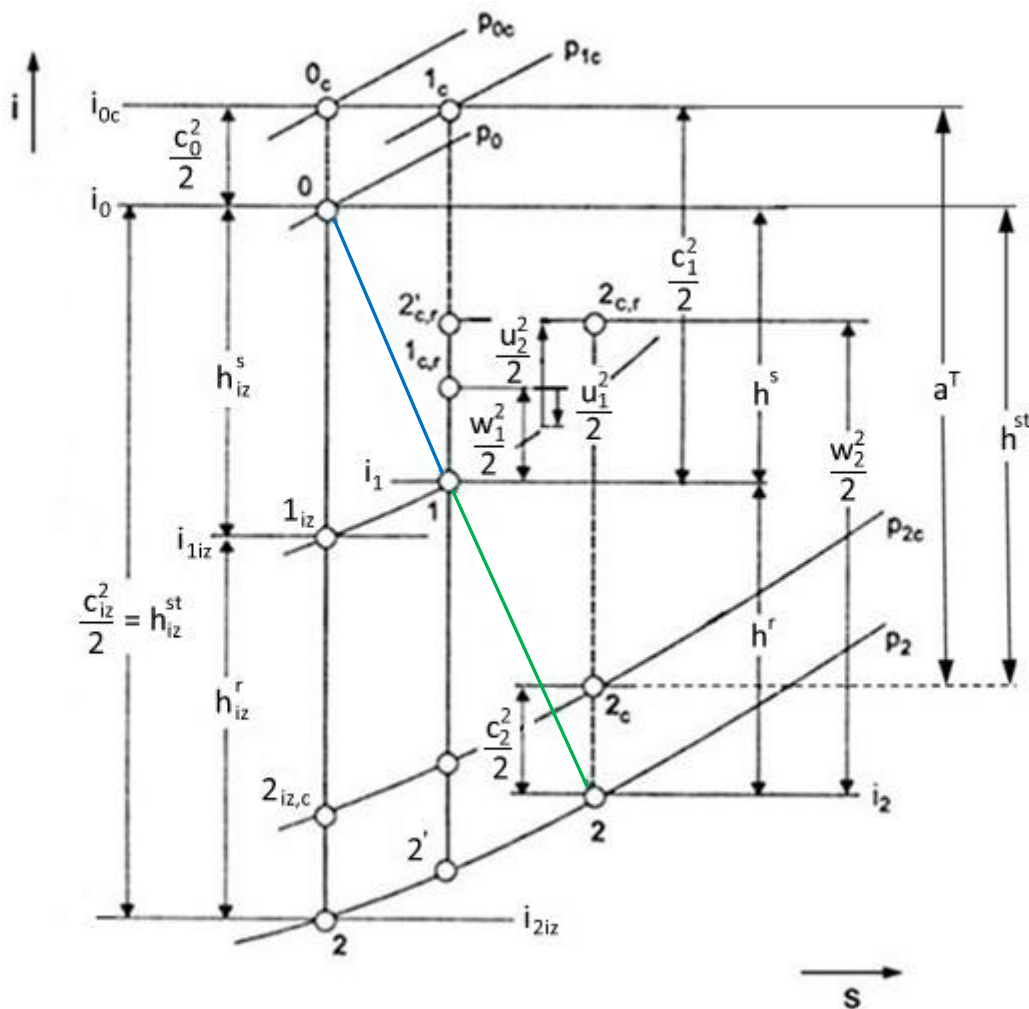
$$u = r \cdot \omega = \pi \cdot d \cdot n \quad (4.1)$$

Rychlosti pro rychlostní trojúhelník se počítají dle výše uvedeného vztahu anebo z obvodové práce [16], která vychází z celkové energetické bilance stupně.[14] Jednotlivé složky rychlostí v obvodovém či axiálním směru lze vypočítat pomocí známých trigonometrických metod (Pythagorova věta, goniometrické funkce apod.).

Rychlostní trojúhelníky se kreslí v rovině proudění a povětšinou jsou vykreslovány mimo lopatkové mříže kvůli přehlednosti. Úhly jsou kótovány podle konvencí Doosan Škoda Power s.r.o. od obvodového směru (Obr. 14 a Obr. 15).

#### 4.1.2 Expanze páry ve stupni

Jak již bylo zmíněno, stupeň parní turbíny se skládá z rozváděcího a oběžného kola. Pára o určitém tlaku, teplotě a rychlosti vstupuje do rozváděcího kola, kde dochází k expanzi páry a přeměně tlakové energie na kinetickou. Díky tvaru lopatek dochází v rozváděcím kole k nárůstu obvodové složky rychlosti. V oběžném kole pára vyvozuje na lopatky sílu a její kinetická energie je přeměněna na mechanickou práci, tedy rotaci hřídele. V případě, že pára v oběžných lopátkách neexpanduje, hovoříme o čistě rovnotlakém stupni. Prakticky je tento případ spíše teoretický. Cílem je navrhnout reakci větší než nula, pro urychlení proudu v oběžných lopátkách. V takovém případě závisí na velikosti reakce, tedy jak je ve stupni přerozdělen entalpický spád mezi rozváděcí a oběžné lopatky. Na Obr. 16 je zobrazena expanze ve stupni parní turbíny v diagramu  $i$ - $s$ .



Obr. 16 Průběh expanze ve stupni parní turbíny v  $i$ - $s$  diagramu

Z energetické rovnice pro rozváděcí lopatkovou řadu platí následující vztah

$$i_{0c} = i_0 + \frac{c_0^2}{2} = i_1 + \frac{c_1^2}{2} = i_{1c} \quad (4.2)$$

z toho jasně vyplývá, že na rozváděcí lopatkové řadě je celková entalpie konstantní a tedy celkový rozdíl entalpií ve statoru je roven nule

$$i_{0c} = i_{1c} \quad (4.3)$$

Je to dané tím, že z rozváděcí lopatkové řady není odváděna žádná práce a rovněž není přiváděno ani odváděno žádné teplo

$$\frac{c_1^2}{2} = h^s + \frac{c_0^2}{2} = i_{0c} - i_1 \quad (4.4)$$

V případě, že by proudění ve statorové řadě probíhalo beze ztrát, rychlost na výstupu by byla následující

$$\frac{c_{1iz}^2}{2} = i_{0c} - i_{1iz} = h_{iz}^s + \frac{c_0^2}{2} \quad (4.5)$$

Mezi rychlostmi  $c_1$  a  $c_{1iz}$  platí vztah (4.6), kde  $\eta^s$  je účinnost turbínové mříže statoru a  $\varphi$  je tzv. rychlostní součinitel.

$$\eta^s = \frac{\frac{c_1^2}{2}}{\frac{c_{1iz}^2}{2}} = \frac{i_{1c} - i_1}{i_{0c} - i_{1iz}} = \varphi^2 \quad (4.6)$$

Energetická rovnice pro oběžnou lopatkovou řadu má tvar

$$i_2 + \frac{w_2^2}{2} = i_1 + \frac{w_1^2}{2} + a_{s1,2} \quad (4.7)$$

kde  $a_{s1,2}$  je práce setrvačných (odstředivých) sil mezi stavy 1-2, které leží na stejném proudové čáře

$$a_{s1,2} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \quad (4.8)$$

Dosažením do vztahu (4.7) dostaneme

$$\frac{w_2^2}{2} = h^r + \frac{w_1^2}{2} + \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \quad (4.9)$$

Pro expanzi v oběžné lopatkové řadě beze ztrát platí analogicky

$$\frac{w_{2iz}^2}{2} = h_{iz}^r + \frac{w_1^2}{2} + \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \quad (4.10)$$

Obdobně pro účinnost oběžné řady lopatek platí

$$\eta^r = \frac{\frac{w_2^2}{2}}{\frac{w_{2iz}^2}{2}} = \frac{i_{2c,r} - i_2}{i_{2c,r} - i_2'} = \psi^2 \quad (4.11)$$

Energetická rovnice pro celý stupeň má následující tvar

$$a^T = i_{0c} - i_{2c} = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} + \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} + \frac{u_1^2}{2} - \frac{u_2^2}{2} = u_1 \cdot c_{1u} - u_2 \cdot c_{2u} = l_u \quad (4.12)$$

kde  $l_u$  je obvodová práce stupně.

Pro normální stupeň<sup>2</sup> axiální turbíny se vztah (4.12) zjednoduší následovně

$$a^T = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_0^2}{2} + \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2} = u(c_{1u} - c_{2u}) = l_u \quad (4.13)$$

---

<sup>2</sup> Zanedbáme-li malé změny poloměru v rozsahu stupně a dále také vliv relativního víru v mezilopátkovém kanálu, potom jsou proudové plochy u **normálního elementárního stupně** válcové, jejichž osa je totožná s osou rotace stroje. Předpokládáme, že rychlost páry na vstupu do stupně má stejnou velikost i směr jako rychlost na výstupu ze stupně. Kinetická energie odpovídající vstupní rychlosti je totožná s kinetickou energií výstupní rychlosti, tudíž je odvedená, respektive přivedená práce rovna pouze změně entalpie páry. [1]

### 4.1.3 Účinnost stupně

Užitečný entalpický spád stupně je vždy rozdíl celkové entalpie na vstupu do stupně  $i_{0c}$  a celkové entalpie na výstupu ze stupně  $i_{2c}$ . Tento rozdíl představuje obvodovou práci stupně (4.12). Účinnost stupně je dána podílem skutečně vykonané práce a teoreticky dosažitelné (izoentropické).

V případě, že se jedná o stupeň umístěný uvnitř (*u vícestupňových strojů, kromě posledního stupně*), potom rychlost na výstupu ze stupně  $c_2$  není vnímána jako ztráta, protože se dál využije v následujícím stupni. Pro tento stupeň je výhodné definovat účinnost tzv. **total to total** a vypočte se dle následujícího vztahu

$$\eta^{tt} = \frac{i_{0c} - i_{2c}}{i_{0c} - i_{2iz} - \frac{c_2^2}{2}} \quad (4.14)$$

Pro jednostupňové turbíny nebo pro poslední stupeň vícestupňové turbíny je výstupní rychlost  $c_2$  ztrátou (*tzv. ztráta výstupní rychlosti*). V tomto případě hovoříme o účinnosti **total to static** a rovnice (4.14) se změni na tvar

$$\eta^{ts} = \frac{i_{0c} - i_{2c}}{i_{0c} - i_{2iz}} \quad (4.15)$$

Účinnost **static to static** je obdobou účinnosti **total to total**, s tím rozdílem, že vstupní rychlost  $c_0$  je přibližně stejná jako výstupní rychlosti  $c_2$  nebo v případě, že jsou tyto rychlosti zanedbatelné. Vztah pro výpočet účinnosti **static to static** udává následující rovnice

$$\eta^{ss} = \frac{i_0 - i_2}{i_0 - i_{2iz}} \quad (4.16)$$

### 4.1.4 Spád na stupeň

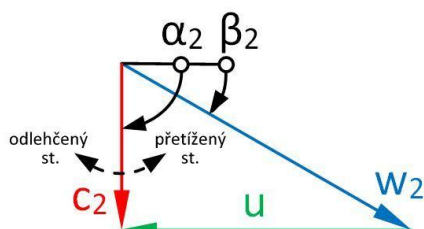
Spád stupně je možné definovat k celkovému počátečnímu stavu (*total to static*), tedy spád vypočtený z rozdílu celkové entalpie na vstupu  $i_{0c}$  a statické izoentropické entalpie na výstupu  $i_{2iz}$ , při ideální expanzi beze ztrát. Tepelný spád tzv. *static to static* je dán rozdílem statické entalpie na vstupu do stupně  $i_0$  a statické izoentropické entalpie na výstupu  $i_{2iz}$ . Tyto spády vstupují do výpočtů účinností stupně (viz. předchozí kapitola 4.1.3).

Zároveň se na základě tepelného spádu odvozuje podobnostní číslo  $\left(\frac{u}{c}\right)$ , které dává do vztahu obvodovou rychlost  $u$  a fiktivní rychlost  $c$ , kterou by teoreticky měla pára při izoentropickém proudění a entalpickém spádu  $h_{iz}^{st}$ . V této práci se uvažuje obvodová rychlost  $u$  na středu a rychlost  $c$  se uvažuje dle definice spádu **static to static**.



Parametr  $\left(\frac{u}{c}\right)$  vypovídá o zatížení stupně. Je obvyklé vynášet účinnost v závislosti na zatížení stupně. Při optimálním poměru  $\left(\frac{u}{c}\right)_{opt}$  má stupeň nejvyšší obvodovou účinnost a proud má přibližně axiální výstup ze stupně. Pokud je rychlostní poměr  $\left(\frac{u}{c}\right)$  pod optimální hodnotou, tak při stejné obvodové rychlosti dojde ke zvýšení entalpického spádu a zároveň ke snížení účinnosti. Úhel absolutní rychlosti na výstupu  $\alpha_2 < 90^\circ$  (Obr. 17). V takovém případě hovoříme o přetíženém stupni. Stupeň lze přetížit snížením patního průměru nebo změnou tlakového spádu. U vícestupňových turbín lze přetěžováním stupňů zredukovat počet stupňů a tím zmenšit axiální délku celého stroje.

Naopak zvýšení rychlostního poměru  $\left(\frac{u}{c}\right)$  nad optimální hodnotu způsobí při stejné obvodové rychlosti snížení tepelného spádu stupně, rovněž snížení účinnosti. Úhel absolutní rychlosti na výstupu ze stupně  $\alpha_2 > 90^\circ$  (Obr. 17). Stupeň je tzv. odlehčený.



Obr. 17 Zatížení stupně

Při proudění beze ztrát je celkový izentropický entalpický spád vztažený k parametrům zabrzděného proudu

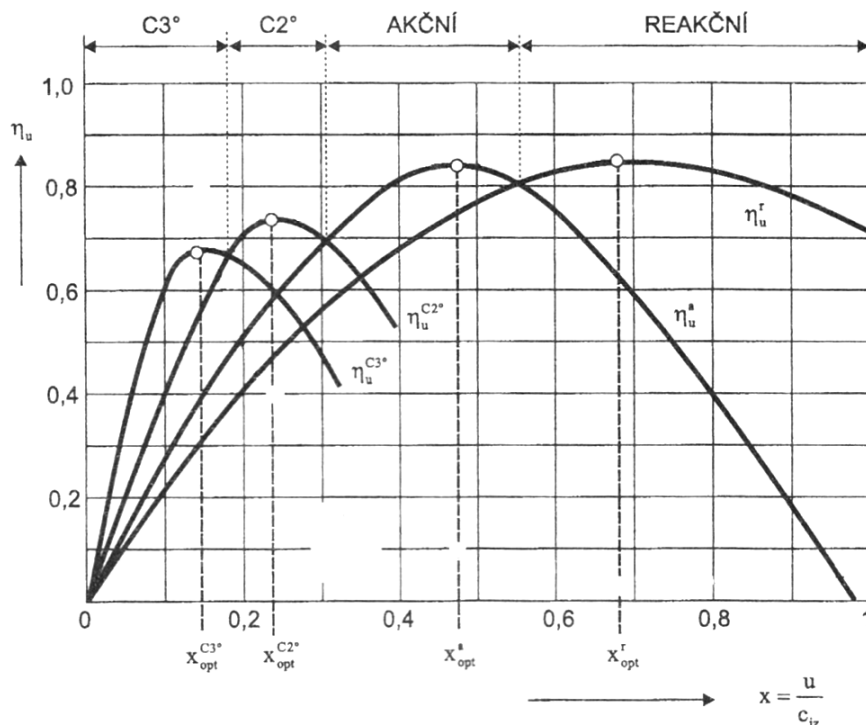
$$h_{iz}^{st} = \frac{c_{iz}^2}{2} \quad (4.17)$$

V následující tabulce jsou vyneseny intervaly optimálních hodnot  $\left(\frac{u}{c}\right)$  a pro názornost z nich vypočítány tepelné spády pro rovnotlaký a přetlakový stupeň. Je zřejmé, že při stejné geometrii a otáčkách je rovnotlaký stupeň schopen zpracovat dvakrát větší tepelný spád než stupeň přetlakový.

Na Obr. 18 jsou znázorněny obvodové účinnosti v závislosti na parametru  $\left(\frac{u}{c}\right)$  pro různé typy stupňů. Je patrné, že obvodová účinnost přetlakového stupně má v okolí maxima plošší průběh, než účinnost rovnotlakého stupně. Přetlakový stupeň tedy není tolik citlivý na změnu otáček, respektive zatížení. Plošší průběh účinnosti rovněž umožňuje volit nižší nebo naopak vyšší rychlostní poměr  $\left(\frac{u}{c}\right)$ , než je optimální, aniž by se to výrazně projevilo na účinnosti.

**Tab. 1** Přehled optimálních rychlostních poměrů a tep. spádů

Rovnotlaký st.	Přetlakový st.
$\left(\frac{u}{c}\right)_{opt} \sim 0,45 \div 0,5$	$\left(\frac{u}{c}\right)_{opt} \sim 0,65 \div 0,7$
$\frac{u}{c} = 0,5 \rightarrow c = 2u$	$\frac{u}{c} = 0,7 \rightarrow c = \frac{10}{7}u$
$h_{iz}^{st} = \frac{4 \cdot u^2}{2} = 2 \cdot u^2$	$h_{iz}^{st} = \frac{100}{49} \cdot \frac{u^2}{2} = u^2$



**Obr. 18** Porovnání průběhu obvodové účinnosti pro jednotlivé typy stupňů [1]

#### 4.1.5 Vlastní zpracování 1D návrhu

Pro účely této práce byl vytvořen v programu Microsoft Excel výpočet turbínového stupně. Výpočet uvažuje konstantní otáčky. Tlakový spád (zatížení stupně) je nastaven pomocí parametru  $\left(\frac{u}{c}\right)$ . Stavové veličiny páry jsou získávány z tabulek pro vodu a vodní páru IAPWS-IF97.

**Vstupní hodnoty výpočtu:**

- patní průměr, délka lopatky, tětíva
- teplota, tlak na vstupu do stupně
- otáčky, rychlostní poměr  $\left(\frac{u}{c}\right)$ , účinnosti mříží
- úhly  $\alpha_1, \beta_2$
- úniky přes ucpávky a vyrovnávacími otvory

Na základě aritmetického průměru tlaků na vstupu a výstupu ze stupně získána inicializační hodnota statického dělicího tlaku  $p_{1s}$ . Následně je dopočten tlak  $p_{1s}$  tak, aby množství páry protékající rozváděcím i oběžným kolem respektovalo rovnici kontinuity (hmotnostní průtok stupněm je konstantní). Výpočet je proveden pro střední průměr, reakce na patě a špičce lopatky jsou přepočteny pomocí vztahu (4.18), který vychází ze zjednodušené rovnice radiální rovnováhy a zákona lopatkování s konstantním úhlem  $\alpha_1$ .

$$\frac{1 - \rho_i}{1 - \rho_m} = \left(\frac{r_i}{r_m}\right)^{-m} \quad (4.18)$$

kde

$\rho_i$  - reakce na libovolném poloměru

$\rho_m$  - reakce na středním poloměru

$r_i$  - libovolný poloměr

$r_m$  - střední poloměr

Index  $m$  se vztahuje ke střednímu poloměru, na kterém jsou známy všechny proudové parametry

$$m = 2 \cdot \varphi^2 \cdot \cos^2 \alpha_1 \quad (4.19)$$

kde

$\varphi$  - rychlostní součinitel, jehož kvadrát určuje účinnost rozváděcí mříže

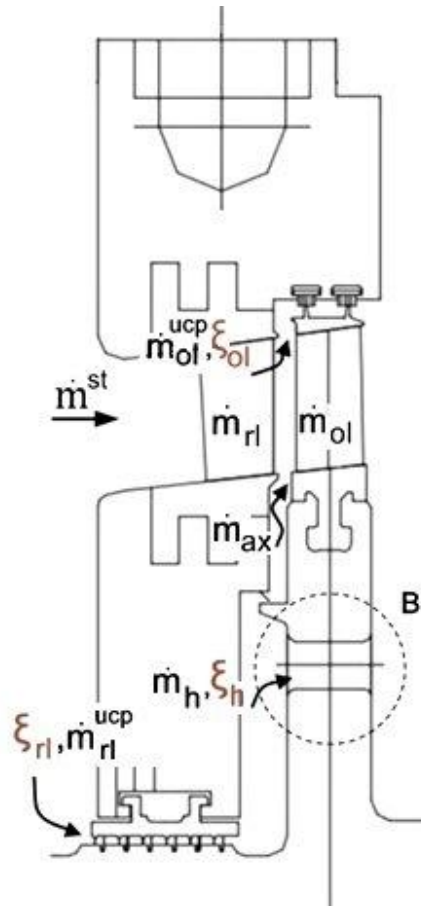
$\alpha_1$  - úhel relativní rychlosti proudu na výstupu z rozváděcích lopatek

**Výstupní hodnoty výpočtu:**

- Rychlosti, úhly
- Reakce
- Hmotnostní průtoky
- Síly, kroutící moment, výkon

#### 4.1.5.1 Bilance hmotnostního průtoku

Bilance hmotnostního průtoku stupněm je demonstrována na Obr. 19. Hmotnostní průtoky přes rozváděcí lopatky  $\dot{m}_{rl}$  a oběžné lopatky  $\dot{m}_{ol}$  se mohou měnit na základě úniků páry přes ucpávky ( $\xi_{rl}$ ,  $\xi_{ol}$ ) nebo únikem přes vyrovnávací otvory ( $\xi_h$ ) v případě jejich použití.



Obr. 19 Znázornění toků ve stupni

Následující vztahy popisují bilance hmotnostních toků ve stupni. V případě, že žádná pára neuniká ucpávkami ani vyrovnávacími otvory, hmotnostní průtok stupněm se vypočte následovně

$$\dot{m} = c_{1a} \cdot S_1 \cdot \rho_1 = w_{2a} \cdot S_2 \cdot \rho_2 \quad (4.20)$$

Nyní je nutné definovat hmotnostní toky jednotlivými doménami, jakožto hmotnostní průtoky, ve kterých jsou zahrnuty zmiňované úniky páry.

Hmotnostní průtok statorovou doménou se zahrnutím úniku páry přes hřídelovou ucpávku

$$\dot{m}_{rl}^{\xi} = \frac{c_{1a} \cdot S_1 \cdot \rho_1}{1 - \xi_{rl}} \quad (4.21)$$

Hmotnostní průtok rotorovou doménou se zahrnutím úniku nadbandážovou ucpávkou a únikem vyrovnávacími otvory

$$\dot{m}_{ol}^{\xi} = \frac{w_{2a} \cdot S_2 \cdot \rho_2}{1 - \xi_{ol} - \xi_h} \quad (4.22)$$

Jelikož musí být splněna podmínka konstantního průtoku stupněm, potom platí

$$\dot{m}_{rl}^{\xi} = \dot{m}_{ol}^{\xi} = \dot{m}^{st} \quad (4.23)$$

Úniky páry ucpávkami a vyrovnávacími otvory jsou zadávány jako procentuální podíl z celkového množství protékajícího stupněm.

Průtok hřídelovou ucpávkou

$$\dot{m}_{rl}^{ucp} = \xi_{rl} \cdot \dot{m}^{st} \quad (4.24)$$

Průtok nadbandážovou ucpávkou

$$\dot{m}_{ol}^{ucp} = \xi_{ol} \cdot \dot{m}^{st} \quad (4.25)$$

Hmotnostní tok rozváděcími lopatkami

$$\dot{m}_{rl} = \dot{m}_{rl}^{\xi} \cdot (1 - \xi_{rl}) \quad (4.26)$$

Hmotnostní tok oběžnými lopatkami

$$\dot{m}_{ol} = \dot{m}_{ol}^{\xi} \cdot (1 - \xi_{ol} - \xi_h) \quad (4.27)$$

Průtok vyrovnávacími otvory  $\dot{m}_h$  se vypočte dle následujícího vztahu, kde koeficient  $k \geq 0$  rozhoduje o tom, jaké množství pobere vyrovnávací otvor, tedy zda bude pára axiální mezerou vefukována nebo odsávána. V případě, že je  $k = 0$ , výpočet neuvažuje vyrovnávací otvory a uniklá pára z hřídelové ucpávky je vefukována zpět do hlavního proudu páry. Pokud je  $k = 1$ , pak vyrovnávací otvory pojmou všechnu uniklou páru hřídelovou ucpávkou a žádná pára není vefukována, ani přisávána. Když je  $k \geq 1$ , tak je vyrovnávacími otvory pobrána uniklá pára z hřídelové ucpávky a zároveň je odsáváno určité množství páry z hlavního proudu axiální mezerou.

$$\dot{m}_h = \xi_h \cdot \dot{m}^{st} = k \cdot \xi_{rl} \cdot \dot{m}^{st} \quad (4.28)$$

Pro průtok axiální mezerou platí

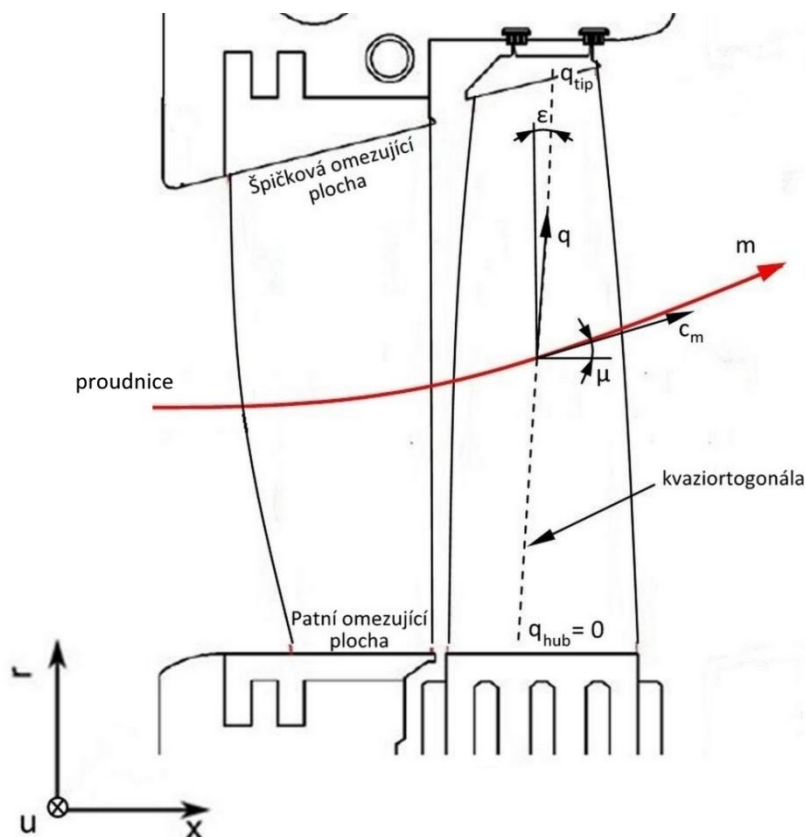
$$\dot{m}_{ax} = -(\dot{m}_h + \dot{m}_{rl}^{ucp}) \quad (4.29)$$

## 4.2 Metoda through-flow 2D

Jde o podobný postup jako v předchozím případě (*mean-line*), ale na rozdíl od „*mean-line*“ metod je řešeno také radiální rozložení proudových veličin v několika radiálních pozicích. To umožňuje zohlednit prostorový charakter proudového pole při návrzích rozkroucení lopatek. Radiální rozložení proudových veličin je řešeno na základě bilance sil působících v tekutině, tzv. rovnice radiální rovnováhy. Ta je u „*mean-line*“ metody řešena pouze zjednodušeně pomocí analytického vzorce na rozložení reakce po výšce (4.18). V literatuře lze nalézt řadu realizací „*through-flow*“ metod pro výpočty parních turbín. V této práci je použit přístup dle [9], který je blíže popsán v této kapitole.

### 4.2.1 Meridionální souřadný systém

Na Obr. 20 je schematicky znázorněn řez lopatkovými řadami turbínového stupně, který je omezen zdola patní a shora špičkovou omezující plochou. Při výpočtu jsou voleny výpočetní roviny, které se nazývají *kvaziortogonály*. Jsou ztotožňovány s náběžnými a odtokovými hranami lopatek, popřípadě mohou být umístěny v prostoru uvnitř lopatkových řad nebo mezi nimi. Na obrázku je zvolena kvaziortogonála uvnitř oběžných lopatek. Souřadnice  $q$  sleduje tvar výpočetní roviny a je to vzdálenost po délce kvaziortogonály od patní omezující plochy. Odklon kvaziortogonály od radiálního směru  $r$  je značen  $\varepsilon$ . Souřadnice  $m$  udává vzdálenost podél proudnice a je měřena od vstupu do výpočetní oblasti. Odklon tečny k proudnici, která je ve směru meridionální rychlosti  $c_m$ , od axiální souřadnice  $x$  je označen jako meridionální úhel  $\mu$ . Obvodový (unášivý) směr je označen  $u$  a jeho kladný směr je shodný se směrem rotace oběžných lopatek. [9] (str.9)



Obr. 20 Meridionální souřadný systém

#### 4.2.2 Fyzikální principy

V této kapitole budou blíže popsány fyzikální principy, na kterých je založena výpočetní metoda.

- **Eulerova turbínová věta a zákon zachování energie**

Eulerova turbínová věta vyjadřuje vztah mezi změnou obvodové rychlosti a prací vykonanou ve stupni. Uvažujeme-li oběžnou lopatkovou řadu (Obr. 21), jejíž vstupní hranu označíme indexem 1 a výstupní hranu indexem 2 a uvnitř proudovou trubici o tloušťce  $\Delta q$ , kterou teče určité množství páry  $\dot{m}$ , potom pro výkon  $P$  v obvodovém směru  $u$  platí na základě věty o změně toku hybnosti následující vztah

$$P = \dot{m}(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}) \quad (4.30)$$

Z energetické rovnice platí pro výkon  $P$  také

$$P = \dot{m}(i_{1c} - i_{2c}) \quad (4.31)$$

Kombinací vztahů (4.30) a (4.31) dostaneme

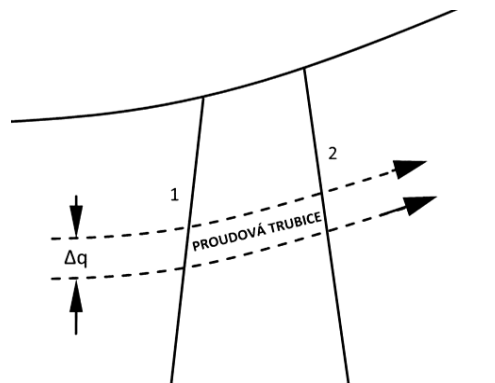
$$I = i_c - u c_u = konst., \quad (4.32)$$

kde veličina  $I$  je tzv. rothalpie a podél proudnice je konstantní. Vzhledem k faktu, že se rozváděcí lopatková řada neotáčí, je tedy nulová obvodová rychlost  $u$ . Pro stator platí vztah

$$I = i_c = konst. \quad (4.33)$$

Pro oběžné lopatky se vztah (4.32) změní následovně

$$I = i_w - \frac{1}{2}u^2 = konst. \quad (4.34)$$



Obr. 21 Proudová trubice

- **Rovnice kontinuity**

Hmotnostní průtok výpočetní rovinou  $\dot{m}$  se určí pomocí vztahu

$$\dot{m} = \int_0^{a_{tip}} 2\pi r \frac{1}{v} c_m \cos(\varepsilon + \mu) dq \quad (4.35)$$

Řešení je splněno, pokud je průtok všemi výpočetními rovinami konstantní.

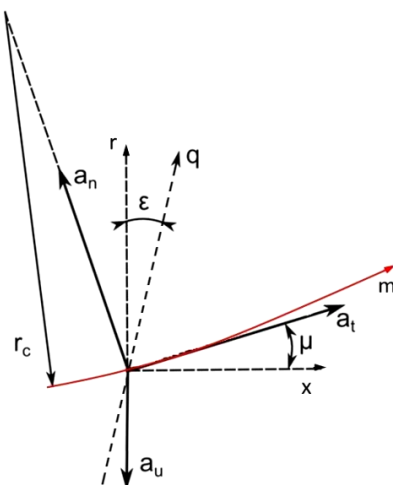
- **Rovnice radiální rovnováhy (pohybová rovnice)**

Pomocí rovnice radiální rovnováhy lze určit rozložení tlaku nebo rychlosti po výšce lopatky, podél kvaziortogonály. Rovnice radiální rovnováhy ve formě pro tlak pro meridionální souřadný systém je uvedena níže. Její princip spočívá ve vyjádření jednotlivých složek zrychlení, která jsou zobrazena na Obr. 22. Zrychlení  $a_t$  a  $a_n$  jsou tečné a normálové zrychlení v meridionální rovině zapříčiněné křivočarým pohybem podél proudnice. Normálové zrychlení směřuje do středu křivosti. Zrychlení  $a_u$  je dostředivé zrychlení způsobené rotací v čelní rovině. Parametr  $r_c$  je poloměr křivosti proudnice ve sledovaném bodě. V rovnici (4.32) jsou tyto zrychlení vyjádřeny promítnuté do směru kvaziortogonály. [9]

Rovnice radiální rovnováhy

$$\underbrace{\frac{\partial p}{\partial q}}_{f_p} = -\rho c_m \underbrace{\frac{\partial c_m}{\partial m} \sin(\varepsilon + \mu)}_{f_t} - \rho \underbrace{\frac{c_m^2}{r_c} \cos(\varepsilon + \mu)}_{f_n} + \rho \underbrace{\frac{c_u^2}{r} \cos(\varepsilon)}_{f_u} + f_q, \quad (4.36)$$

kde  $f_p$  je tlaková síla,  $f_t$ ,  $f_n$ ,  $f_u$  jsou síly způsobené zmiňovanými zrychleními a  $f_q$  je síla způsobená vnějšími vlivy (na tekutinu vlivem lopatek). Síla  $f_q$  se pro radiálně sestavené lopatky (bez obvodového náklonu) uvažuje nulová. [9] str.13



Obr. 22 Zrychlení v tekutině [9]



- **Stavová rovnice**

Pro výpočet jsou využívány tabulky vodní páry IAPWS-IF97 nebo rovnice pro ideální plyn.

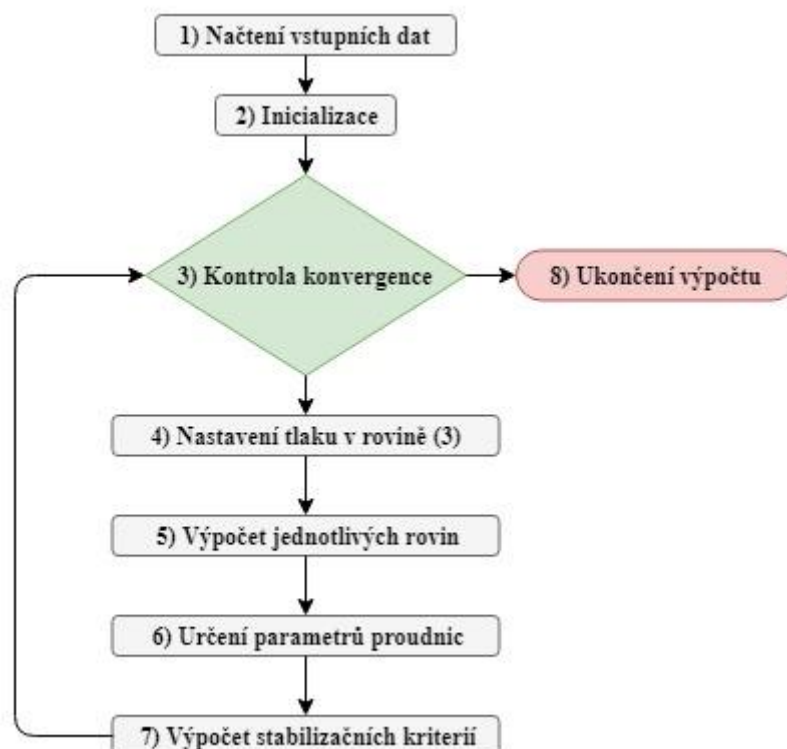
#### 4.2.3 Popis výpočtu a zakřivení proudnic

V této kapitole je popsán princip výpočtu s uvažováním prostorového charakteru proudění. Metoda *through-flow* respektuje fyzikální principy uvedené v předchozí kapitole 4.2.2, podle kterých jsou počítány proudové veličiny.

Výpočetní roviny, tzv. kvaziortogonály jsou vyznačeny na Obr. 24 (1 až 6). Vstupní rovina (1) je pro výpočet pokud možno uvažována na odtokové hraně oběžné lopatky předešlého stupně. V této rovině jsou zadávány radiálně rozložené vstupní proudové parametry ( $p_{c1}, i_{c1}, \mu_1, \alpha_1, c_{m1}$ ), jako okrajové podmínky.

Na zbývající roviny se zadávají radiální rozložení účinnosti vůči předchozí výpočetní rovině, kvaziortogonále a na odtokové hrany (3) a (5) se zadávají navíc radiální rozložení výstupních úhlů z lopatek  $\alpha_3$  a  $\beta_5$ . Výstupní okrajovou podmínkou je tlak na středním průměru  $p_{5mid}$  v rovině (5). Dále jsou dány otáčky a obrysy výpočetních rovin specifikované souřadnicemi  $x$  a  $r$ .

Výpočetní algoritmus proudového výpočtu je zobrazen na Obr. 23.



Obr. 23 Výpočetní algoritmus proudového výpočtu [9]

Po spuštění výpočtu nejprve proběhne načtení vstupních dat. Po první iteraci jsou inicializovány proudové parametry ( $p_3, v, c_m, c_u, \dot{m}$ ), které jsou voleny manuálně nebo určeny automaticky pomocí předřazeného 1D výpočtu. Dále jsou odhadnuty parametry proudnic v jednotlivých výpočetních rovinách.

Výpočet pokračuje nastavením tlaku na středu na rovině (3)  $p_{3mid}$ . V rovině (3) je požadováno, aby byla hodnota tlaku na středním průměru  $p_{3mid}$  taková, aby byl zajištěn stejný průtok pracovní látky rovinami (3) a (5). Hodnota tohoto tlaku je v průběhu několika prvních iterací (asi 5 iterací) nastavena z inicializace. Poté je na základě hodnot z předchozích iterací odhadnuta změna tlaku v rovině (3) taková, aby se průtok v rovině (3)  $\dot{m}_3$  a rovině (5)  $\dot{m}_5$  přibližoval hodnotě  $\dot{m}_{target}$ . Tato hodnota je také použita pro výpočet parametrů v rovině (1) a je v každé iteraci počítána podle následujícího vztahu

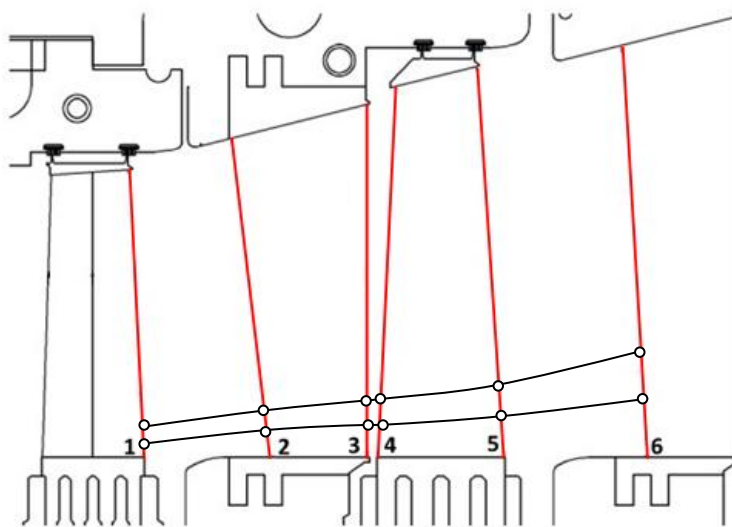
$$\dot{m}_{target} = \frac{\dot{m}_3 + \dot{m}_5}{2} \quad (4.37)$$

Program poté pokračuje výpočty proudových parametrů v jednotlivých rovinách.

V rovině (1) jsou stanoveny z celkových stavů statické stavy, tak aby byla splněna podmínka průtoku  $\dot{m}_{target}$ . To je dosaženo iteračně změnou meridionální rychlosti na středním průměru  $c_{m1}$ .

V rovinách (2), (4), (6), tzv. „difuzorových rovinách“ je radiální rozložení proudových parametrů po výšce výpočetních rovin takové, aby byl docílen shodný průtok mezi jednotlivými proudnicemi vůči předešlé rovině. Shodného průtoku mezi jednotlivými proudnicemi je dosaženo iteračně úpravou meridionální rychlosti na jednotlivých poloměrech  $c_{mi}$ .

V rovinách (3) a (5), výstupy z lopatkových řad, je nejprve stanoveno rozložení tlaku po výšce na základě integrace rovnice radiální rovnováhy. Poté jsou určeny pomocí energetické a stavové rovnice další proudové veličiny (entalpie, rychlosti, apod.) V případě nadzvukového proudění je aerodynamické ucpání řešeno pomocí úpravy výstupního úhlu, tj. aplikací modelu nadzvukového odklonu proudu. Následně je dopočten průtok výpočetní rovinou.



Obr. 24 Řez turbínovým stupněm s označenými výpočetními rovinami

Dalším krokem výpočtu je upřesnění parametrů proudnic.

Pro výpočet je předpokládán určitý tvar proudnic, z čehož jsou určeny některé podstatné výpočetní parametry. Jedná se o sklon tečny k proudnici, odpovídající meridionálnímu úhlu proudu  $\mu$  a poloměr zakřivení proudnic  $r_c$ . Křivka proudové čáry je daná funkcí  $r(x)$  a úhel  $\mu$ , který svírá tečna s osou  $x$  je vypočten pomocí první derivace jako

$$\mu = \operatorname{atan} \left( \frac{d_r}{d_x} \right) \quad (4.38)$$

Poloměr křivosti v daném bodě je určen pomocí následujícího vztahu

$$r_c = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{d_r}{d_x} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{\frac{d^2 r}{d x^2}} \quad (4.39)$$

Poloha proudnic je během výpočtu v každé iteraci upravována tak, **aby mezi sousedními proudnicemi protékalo vždy stejné množství páry**. Tvar proudnice je aproximován parabolickou křivkou, která je určena třemi body, tzn. řešeným bodem v dané výpočtové rovině a dalšími dvěma body, přičemž jeden z nich je z přecházející a druhý z následující výpočetní roviny. Celá proudnice je takto poskládaná z tzv. lokálních parabol.

Výstupem výpočtu jsou proudové veličiny radiálně rozložené podél kvaziortogonál. Výpočet je ukončen, pokud jsou splněny, tzv. stabilizační kritéria.

Tento způsob výpočtu podrobněji popisuje Ing. Libor Sova, PhD ve své disertační práci, odkud je tento popis výpočtu převzat [9].

## 5 Popis problematiky výpočtu

Z předchozích kapitol je patrné jisté omezení výpočetních metod lopatkování parních turbín. Metoda „*mean-line*“, jak již bylo zmíněno, uvažuje výpočet proudových parametrů pouze na referenčním poloměru. Je však možné pomocí rovnice (4.18) přepočítat stupeň reakce pro různé poloměry, například určit reakci na patě a na špičce lopatky. Jistou výhodou „*mean-line*“ metody je, že je možné nasimulovat úniky páry přes ucpávky, případně vyrovnávacími otvory.

Metoda „*through-flow*“ popisuje proudové pole ve stupni parní turbíny detailněji, než je tomu u „*mean-line*“. Výpočet je proveden na několika radiálních pozicích, tím jsou zjištěny proudové parametry po výšce lopatky. Tato metoda, jak je popsána v kapitole 4.2, neumožňuje uvažovat výpočet se zahrnutím úniků páry přes ucpávky nebo vyrovnávací otvory. Z toho důvodu může být v určitých případech „*through-flow*“ metoda paradoxně méně přesná oproti „*mean-line*“.

Z principu metody 2D (*through-flow*) protéká stejné množství páry přes rozváděcí i oběžné lopatky, jelikož referenčním hmotnostním průtokem je průtočné množství zadávané na rozváděcí lopatky. Z toho vyplývá, že jakákoliv změna průtoku v oběžných lopatkách nebude 2D výpočtem registrována.

V této práci jsou zpracovány návrhy tří stupňů s různou reakčností a konstrukčním provedením.

### a) Přetlakový stupeň

U tohoto stupně je očekáván téměř stejný hmotnostní průtok rozváděcími i oběžnými lopatkami (reakce 50%, tzn. téměř stejný tlakový rozdíl na ucpávky) a tedy vliv úniků páry ucpávkami je očekáván minimální. Pro relativně dlouhé stupně, kde je reakce na patě kolem 30% a na špičce 60% tuto úvahu není možné úplně uplatnit.

### b) Nízkoreakční stupeň

Pro tento typ stupně jsou uvažovány dvě konstrukční možnosti. Jednou z nich je stupeň bez vyrovnávacích otvorů, pro který platí obdobně to samé, co pro přetlakový stupeň. Druhým konstrukčním provedením je stupeň s vyrovnávacími otvory (štěrbínami). U tohoto stupně je očekáván největší vliv na výpočet, protože množství páry uniklé hřídelovou ucpávkou se nevrátí zpět do hlavního proudu páry, nýbrž je pohlceno vyrovnávacími otvory. Zároveň je i odsáváno určité množství páry z hlavního proudu páry.

**Pro každý stupeň jsou uvažovány dvě varianty, které lze interpretovat následovně:**

### **Varianta 1**

Ve 2D je při uvažování konstantního průtoku rovinami navržena geometrie stupně - výstupní úhly z lopatek  $\alpha_1$  a  $\beta_2$ . Z navržené geometrie vyplývá určitý stupeň reakce a hmotnostní průtok. Následně je tato geometrie uvažována s různými úniky páry ucpávkami, což v případě 2D není respektováno, ale v případě 1D dojde k ovlivnění hmotnostního průtoku rovinami oběžných lopatek a je sledována změna reakce a dalších parametrů.

### **Varianta 2**

V 1D je navržen stupeň s určitou úrovní reakce a výstupním úhlem  $\beta_2$ . Aby bylo možné tuto reakci zachovat při změnách průtoku způsobenými úniky páry ucpávkami, je nutné měnit výstupní úhel  $\alpha_1$ . Změnu průtoku výpočetními rovinami však 2D výpočet nepostihne a dle tohoto výpočtu vyjde jiný výstupní úhel  $\alpha_1$  oproti výpočtu v 1D přístupu. V této variantě je tedy sledována změna úhlu  $\alpha_1$  v závislosti na změně průtoku.

Cílem práce je ukázat možné dopady proudového výpočtu, který nerespektuje úniky páry do geometrie nebo reakce (zatížení stupně) při nerespektování úniků páry ucpávkami nebo vyrovnávacími otvory. Jistým řešením tohoto problému by bylo použití modifikovaného výpočtu, který je diskutován v kapitole 5.1, se zahrnutím tzv. „*leakages*“.

## 5.1 Popis modifikace 2D výpočtu s uvažováním úniků páry

V kapitole 4.2.3 je popsána metoda „*through-flow*“, která uvažuje konstantní hmotnostní průtok mezi jednotlivými výpočetními rovinami. V této kapitole je popsána modifikace tohoto postupu zohledňující možnost rozdílného průtoku výpočetními rovinami, čímž je možno zohlednit úniky páry mimo lopatkové řady, typicky úniky páry ucpávkami.

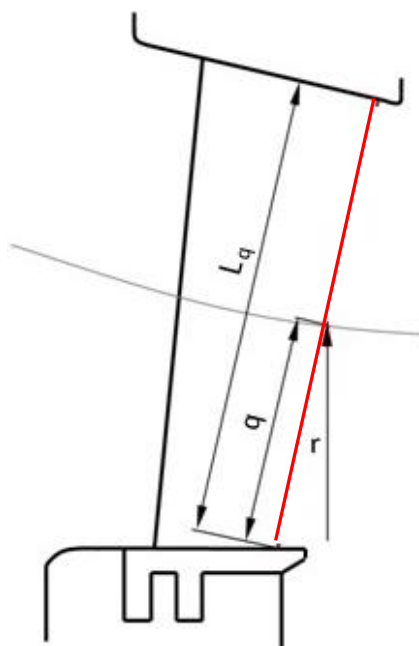
V modifikovaném výpočtu je upravena bilance hmotnostních toků jednotlivými výpočetními rovinami tak, aby platila bilance

$$\dot{m}_{stg} = \dot{m}_{pl,i} + \dot{m}_{lkg,i} \quad (5.1)$$

kde  $\dot{m}_{stg}$  je hmotnostní průtok stupněm,  $\dot{m}_{pl,i}$  jsou průtoky jednotlivými rovinami  $i$  a  $\dot{m}_{lkg,i}$  jsou úniky pracovní látky, tzv. „*leakages*“. V původním výpočtu je řešena bilance bez uvažování  $\dot{m}_{lkg,i}$ , tedy  $\dot{m}_{lkg,i} = 0$ . Díky této úpravě jsou ovlivněny proudové poměry ve stupni. Vůči původní verzi programu lze očekávat odchylky, zejména pokud budou výrazně různé průtoky hřídelovou a nadbandážovou ucpávkou a pokud budou tyto průtoky dostatečně významné vůči průtoku v lopatkových řadách. Takováto nerovnováha bude poté patrná zejména na posunu hodnoty statického tlaku na středu za rozváděcí lopatkovou řadou. Tento posun je možno interpretovat také jako posun hodnoty reakce stupně na středu.

Výpočetní program nastavuje během každé iterace polohu řídicích bodů proudnic. Ty jsou nastaveny na základě splnění podmínky takové, aby mezi sousedními proudnicemi protékalo vždy stejné absolutní průtočné množství, které je vyjádřeno v kg/s. Vzhledem k tomu, že v každé výpočetní rovině může protékat rozdílné množství média, tak bylo nutné tuto podmínku upravit. V upravené verzi se nastavují polohy proudnic tak, aby byla splněna podmínka taková, že mezi sousedními proudnicemi protéká vždy shodné relativní průtočné množství, které je vyjádřeno v procentech.

Následující vztahy popisují blíže postup výpočtu relativních souřadnic a relativního hmotnostního průtoku. Na Obr. 25 je vyznačena délka kvaziortogonály  $L_q$  a souřadnice  $q$ , která udává vzdálenost mezi jednotlivými proudnicemi ve směru kvaziortogonály.



Obr. 25 Znárodnění rozměrů pro výpočet relativních veličin

Hmotnostní průtok od paty ke sledované proudnici

$$\dot{m}_q = \int_0^q 2\pi r \frac{1}{v} c_m \cos(\varepsilon + \mu) dq \quad (5.2)$$

Hmotnostní průtok výpočetní rovinou (kvaziortogónálou)

$$\dot{m} = \int_0^{L_q} 2\pi r \frac{1}{v} c_m \cos(\varepsilon + \mu) dq \quad (5.3)$$

Relativní průtok výpočetní rovinou  $\dot{m}_{rel}$  je podílem průtoku  $\dot{m}_q$  a  $\dot{m}$

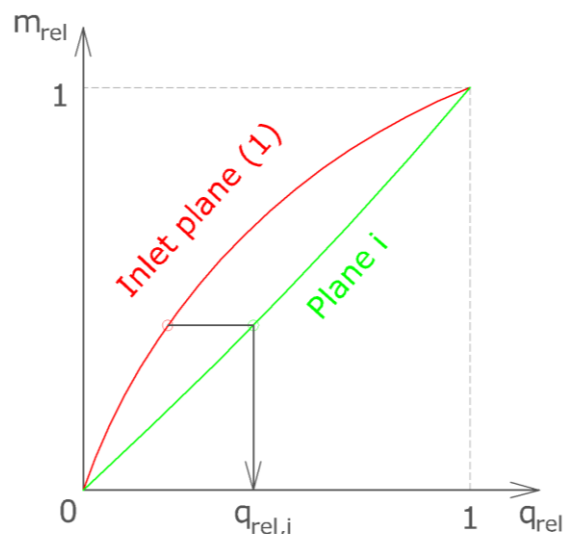
$$\dot{m}_{rel} = \frac{\dot{m}_q}{\dot{m}} \quad (5.4)$$

Vztah pro výpočet relativní souřadnice ve směru kvaziortogónály  $q_{rel}$  je dán následovně

$$q_{rel} = \frac{q}{L_q} \quad (5.5)$$

Na Obr. 26 je znázorněna závislost relativní vzdálenosti ve směru kvaziortogónály na relativním průtoku.

Na ose  $\dot{m}_{rel}$  je relativní průtok od paty. Na „Inlet plane“ se zvolí poloha  $q_{rel}$  (zvolí se proudnice, která je řešena). V každé další rovině  $i$  (Plane  $i$ ) musí platit, že pro odpovídající polohu proudnice je stejný relativní průtok  $\dot{m}_{rel}$ , jako v rovině (1). Poté je snadno určena odpovídající poloha proudnice od paty  $q_{rel,i}$ .



**Obr. 26** Závislost relativní vzdálenosti na relativním průtoku [17]

## 6 Popis a výsledky rozborů 1D

V této kapitole budou popsány výsledky výpočtů jednotlivých stupňů a jejich modifikací. Únik páry hřídelovou ucpávkou je uvažován konstantních 5% a únik nadbandážovou ucpávkou se mění v rozmezí od 1% až do 9%.

Jednotlivé modifikace variant jsou prezentovány (porovnávány) přes poměr průtoku rozváděcími lopatkami ( $\dot{m}_{rl}$ ) ku průtoku oběžnými lopatkami ( $\dot{m}_{ol}$ ).

### 6.1 Přetlakový stupeň

- *Varianta 1 - konstantní úhly  $\alpha_1, \beta_2$*

V této variantě je nastaven výchozí stav (žlutý sloupec v Tab. 2), s reakcí na středním průměru 50 % a úhlem absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola  $\alpha_2 \approx 90^\circ$ . Únik přes hřídelovou ucpávku  $\xi_{rl}$  je 5 % z celkového hmotnostního průtoku stupněm, totéž platí pro nadbandážovou ucpávku ( $\xi_{ol}$ ). Hmotnostní průtok přes rozváděcí i oběžné lopatky je tedy stejný, což odpovídá i proudovému výpočtu. Výstupní úhel relativní rychlosti z oběžné lopatkové řady  $\beta_2$  je nastaven na  $14,5^\circ$  a výstupní úhel z rozváděcího kola  $\alpha_1$  je nastaven tak, aby byl docílen stupeň reakce 50 % na středním průměru. Oba tyto úhly jsou pro všechny další modifikace konstantní. Výpočet je uvažován s konstantními otáčkami bez vyrovnávacích otvorů v oběžném kole, tzn., že únik hřídelovou ucpávkou je vefukován zpět do oběžného kola. Tlakový spád na stupeň je konstantní pro všechny modifikace.

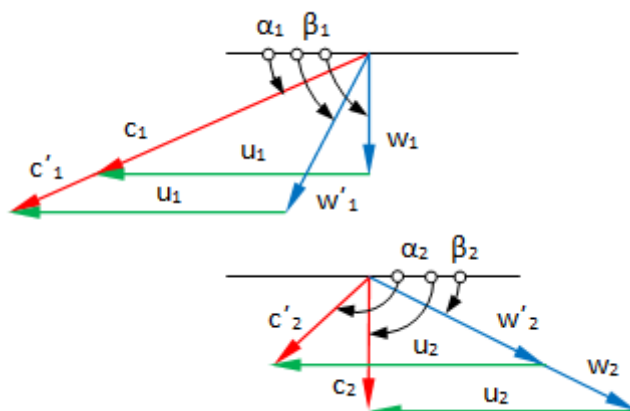
Tabulka parametrů vypočítaných variant										
$\rho_{ss}$	[%]	52,21	51,67	51,14	50,55	50,03	49,46	48,89	48,31	47,72
$\alpha_1$	[°]	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80
$\beta_1$	[°]	94,400	93,187	91,973	90,680	89,548	88,336	87,117	85,917	84,728
$\alpha_2$	[°]	85,745	86,741	87,763	88,887	89,888	91,008	92,131	93,285	94,458
$\beta_2$	[°]	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\dot{m}^{st}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,5362	0,5392	0,5422	0,5452	0,5482	0,5507	0,5544	0,5575	0,5607
$\dot{m}_{rl}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,5096	0,5123	0,5152	0,5182	0,5209	0,5237	0,5267	0,5296	0,5326
$\dot{m}_{ol}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,5308	0,5284	0,5259	0,5232	0,5208	0,5182	0,5156	0,5130	0,5103
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	0,970	0,980	0,990	1,000	1,011	1,021	1,032	1,044

Tab. 2 Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 1

V dalších modifikacích se nejprve zvyšuje únik nadbandážovou ucpávkou  $\xi_{ol}$  z 5 % až na 9 %, přičemž únik rotorovou ucpávkou  $\xi_{rl}$  je stále konstantních 5 %. Hmotnostní průtok oběžnými lopatkami klesá a při respektování rovnice kontinuity musí klesat i axiální složka relativní rychlosti na výstupu z oběžného kola  $w_{2ax}$ . Protože je úhel  $\beta_2$  konstantní, bude klesat i rychlost  $w_2$  (Graf 5). S klesající rychlostí  $w_2$  klesá stupeň reakce a zároveň narůstá

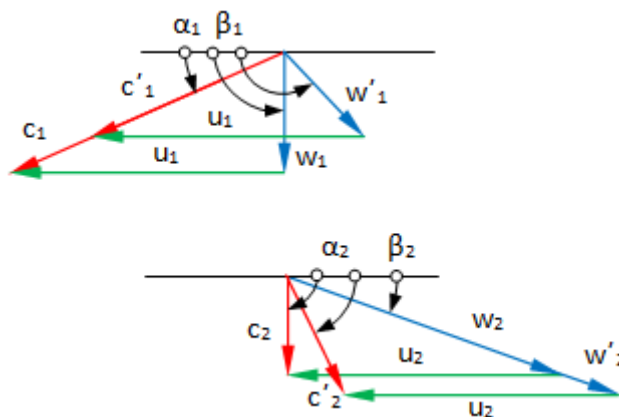


rychlost  $c_1$  (Graf 4), která má konstantní úhel  $\alpha_1$ . S klesající rychlostí  $w_2$  s konstantním úhlem  $\beta_2$ , se při neměnné obvodové rychlosti zvětšuje výstupní úhel z oběžného kola  $\alpha_2$ , který je větší než  $90^\circ$ , tudíž se stupeň odlehčuje Obr. 27.



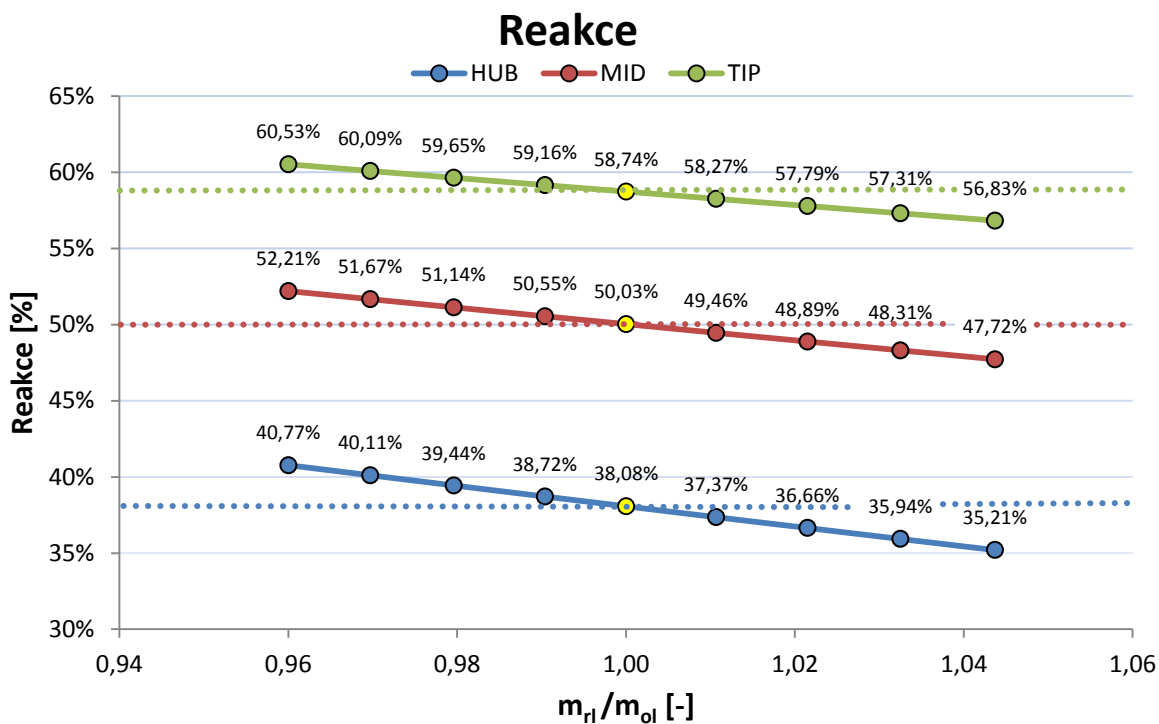
Obr. 27 Rychlostní trojúhelníky – odlehčený st.

Naopak s postupně se snižujícím únikem nadbandážovou ucpávkou  $\xi_{ol}$  z 5 % až na 1 % a zároveň konstantním 5 % únikem přes hřídelovou ucpávku, hmotnostní průtok oběžnými lopatkami roste. Z rovnice kontinuity vyplývá, že při neměnné geometrii musí zákonitě narůstat i rychlost  $w_2$  (Graf 5), což způsobí postupné zvyšování reakce a snižování rychlosti  $c_1$  (Graf 4). S rostoucí rychlostí  $w_2$  s konstantním úhlem  $\beta_2$  se při neměnné obvodové rychlosti zmenšuje úhel  $\alpha_2$ , který je menší než  $90^\circ$ , stupeň je tedy přetížený Obr. 28.

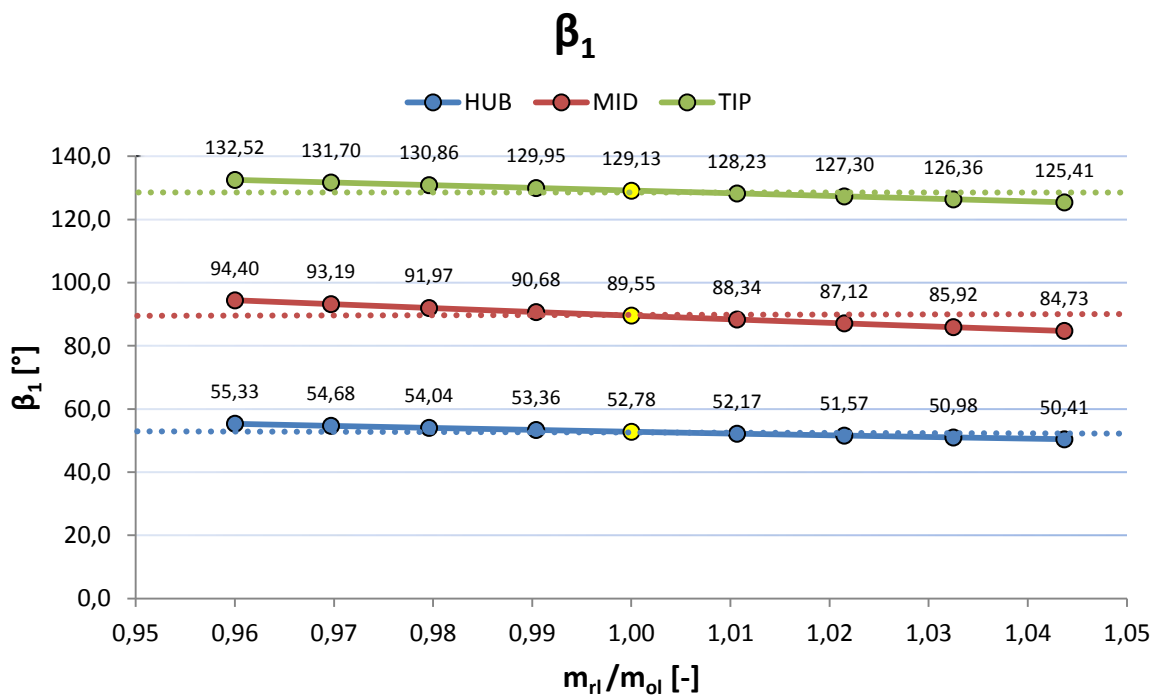


Obr. 28 Rychlostní trojúhelníky – přetížený st.

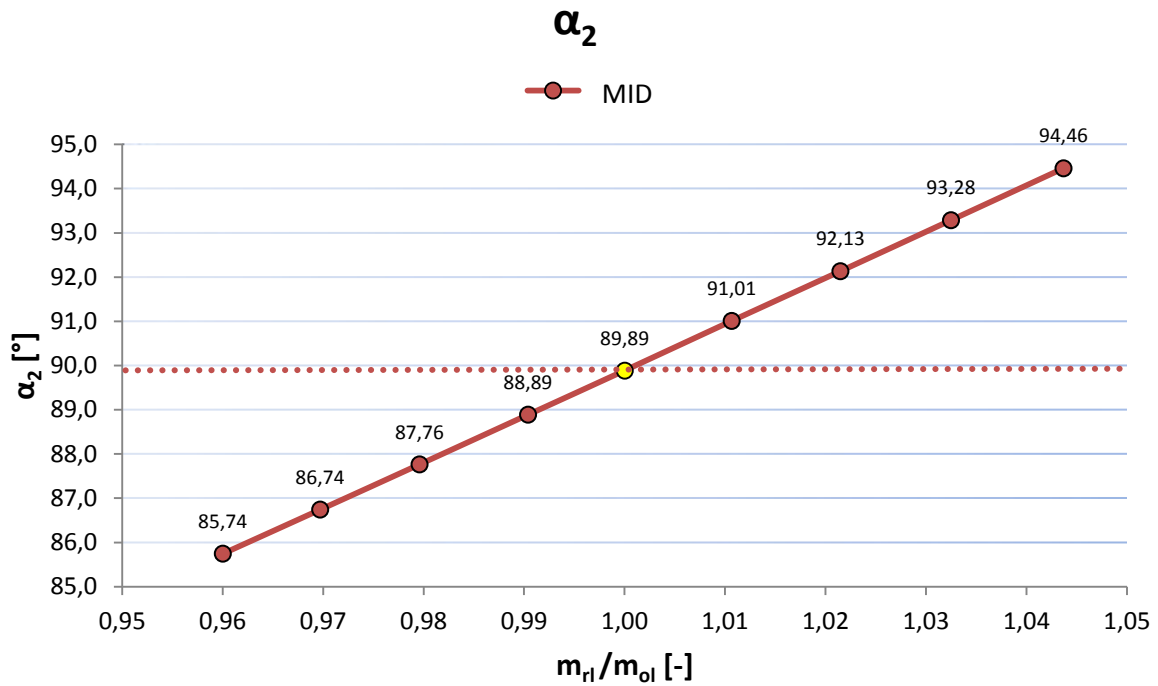
V grafech níže jsou znázorněny změny některých parametrů daných variant. Z Graf 1 je patrné, že reakce na středu je při 9 % úniku nadbandážovou ucpávkou o 2,31 % nižší oproti proudovému (2D) výpočtu (žlutý bod), naopak při úniku 1 % je reakce o 2,17 % vyšší. Tento fakt je způsoben tím, že u proudového výpočtu je nastaven hmotnostní průtok stupněm podle průtoku rozváděcím kolem. Změny průtoku oběžným kolem, zapříčiněné úniky přes nadbandážovou ucpávku proudový výpočet neuvažuje, kdežto 1D výpočet je zohledňuje.



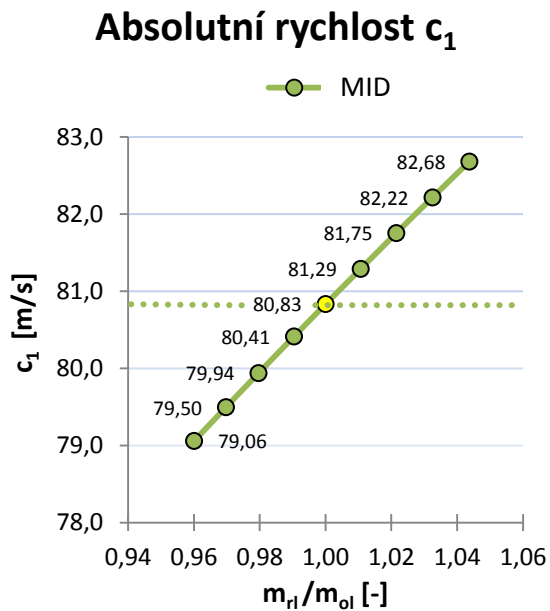
Graf 1 Změna reakce



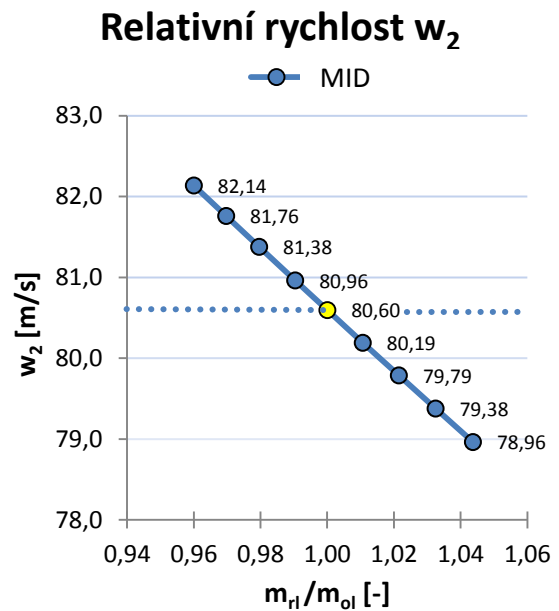
Graf 2 Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



**Graf 3** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek



**Graf 4** Změna rychlosti  $c_1$



**Graf 5** Změna rychlosti  $w_2$

• **Varianta 2 – konstantní reakce a úhel  $\beta_2$**

V této variantě je nastaven výchozí stav (žlutý sloupec v Tab. 3), s reakcí na středním průměru 50 % a úhlem absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola  $\alpha_2 \approx 90^\circ$ . Únik přes hřídelovou ucpávku  $\xi_{rl}$  je 5 % z celkového hmotnostního průtoku stupněm. Totéž platí pro nadbandážovou ucpávku (5 %). Hmotnostní průtok přes rozváděcí i oběžné lopatky je tedy stejný, což odpovídá i proudovému výpočtu. Výstupní úhel z oběžné lopatkové řady  $\beta_2$  je nastaven na  $14,5^\circ$  a výstupní úhel z rozváděcího kola  $\alpha_1$  je nastaven tak, aby byl docílen stupeň reakce 50 % na středním průměru. Pro všechny další modifikace platí, že úhel  $\beta_2$  je konstantní a reakce na středním poloměru je držena na 50 %. Výpočet je uvažován s konstantními otáčkami bez vyrovnávacích otvorů v oběžném kole., tzn., že únik hřídelovou ucpávkou je vefukován zpět do oběžného kola. Tlakový spád na stupeň je konstantní pro všechny modifikace.

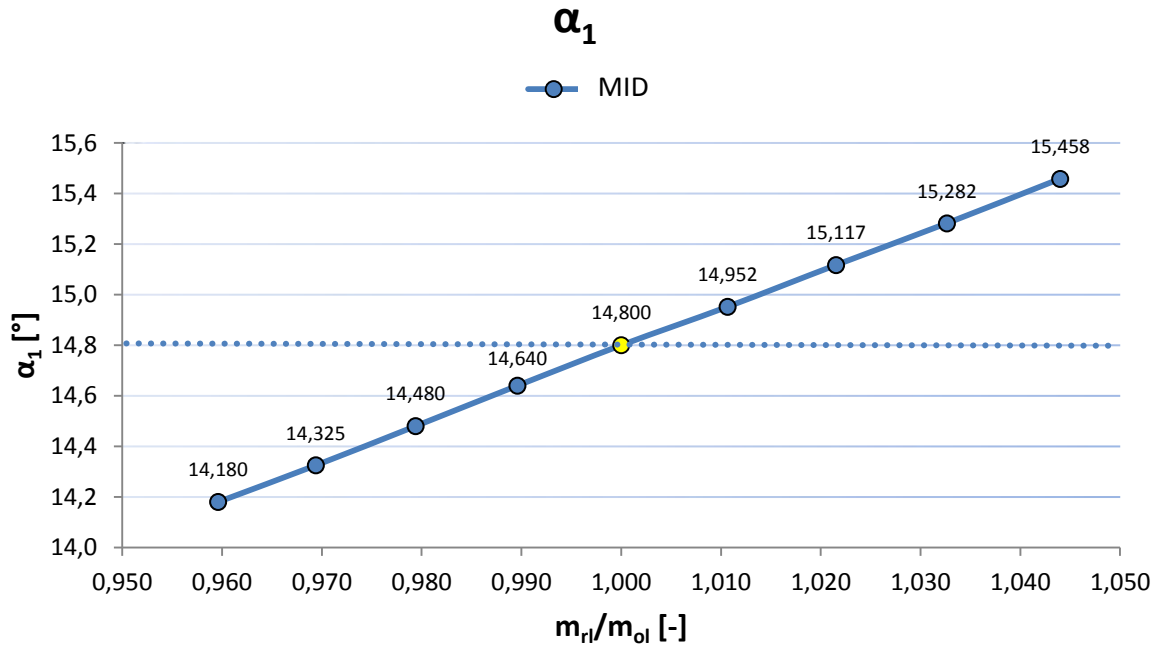
Tabulka parametrů vypočítaných variant										
$\rho_{ss}$	[%]	50,00	49,99	50,00	50,02	50,03	50,00	50,00	50,00	50,00
$\alpha_1$	[°]	14,180	14,325	14,480	14,640	14,800	14,952	15,117	15,282	15,458
$\beta_1$	[°]	89,429	89,417	89,461	89,518	89,548	89,488	89,503	89,486	89,539
$\alpha_2$	[°]	90,551	90,434	90,256	90,060	89,888	89,798	89,631	89,482	89,292
$\beta_2$	[°]	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50	14,50
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\dot{m}^{st}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,5245	0,5302	0,5361	0,5421	0,5482	0,5544	0,5607	0,5675	0,5732
$\dot{m}_{rl}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,4983	0,5037	0,5093	0,5150	0,5209	0,5266	0,5327	0,5388	0,5452
$\dot{m}_{ol}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,5193	0,5196	0,5200	0,5204	0,5208	0,5211	0,5215	0,5218	0,5223
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	0,969	0,979	0,990	1,000	1,011	1,022	1,033	1,044

Tab. 3 Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 2

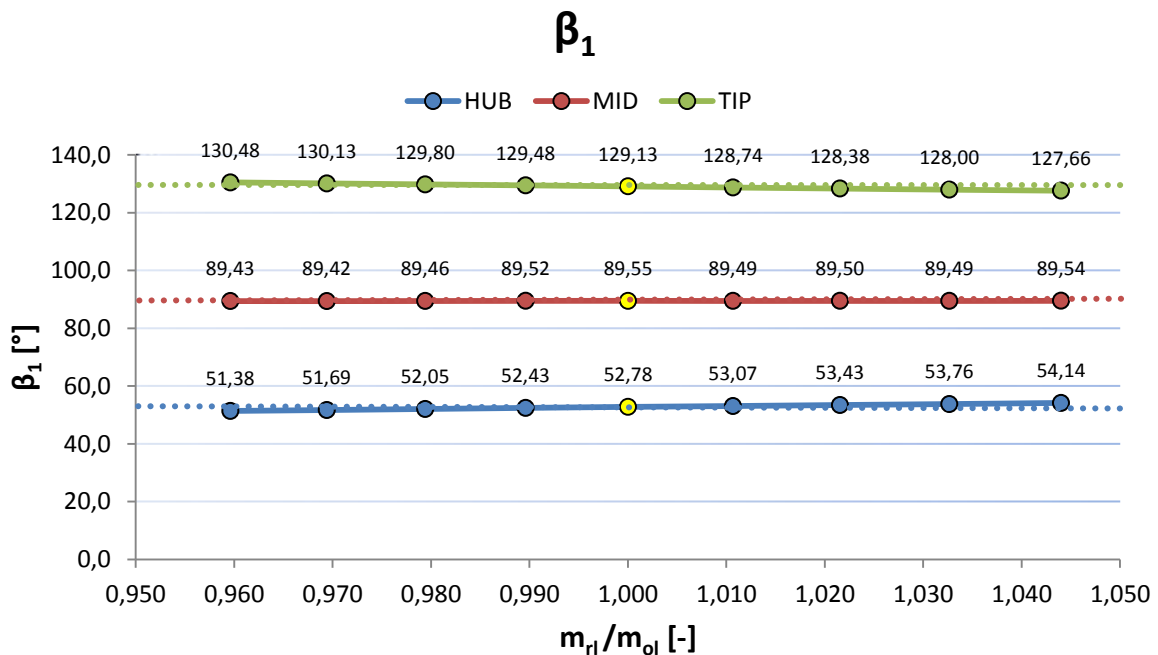
V dalších modifikacích se nejprve zvyšuje únik nadbandážovou ucpávkou  $\xi_{ol}$  z 5 % na 9 %, přičemž únik hřídelovou ucpávkou  $\xi_{rl}$  je stále konstantních 5 %. Aby byla zachována reakce na středě 50 %, musí se zvětšovat úhel  $\alpha_1$ , čímž se zvětší axiální průtočná plocha a tím poklesne absolutní rychlost  $c_1$  a zároveň vzroste relativní rychlost  $w_2$ . Rychlost  $w_2$  se zvětšuje jen nepatrně, zároveň při neměnné obvodové rychlosti a konstantním úhlu  $\beta_2$ , se výstupní úhel  $\alpha_2$  zmenšuje a stupeň se mírně přetěžuje.

V dalších případech je postupně snižován únik nadbandážovou ucpávkou z 5 % na 1 % a zároveň únik přes rotorovou ucpávku je konstantních 5 %. Aby bylo dosaženo 50 % reakce na středě, musí se korigovat úhel  $\alpha_1$  a to tak, že je zmenšován. Axiální průtočná plocha se zmenšuje se zmenšujícím se úhlem  $\alpha_1$  a pokud má rozváděcím kolem protéct stejné množství, tak se absolutní rychlost  $c_1$  musí zvyšovat. S klesající rychlostí  $w_2$  a konstantním úhlem  $\beta_2$  se při neměnné obvodové rychlosti nepatrně zvětšuje úhel  $\alpha_2$ , stupeň je mírně odlehčen.

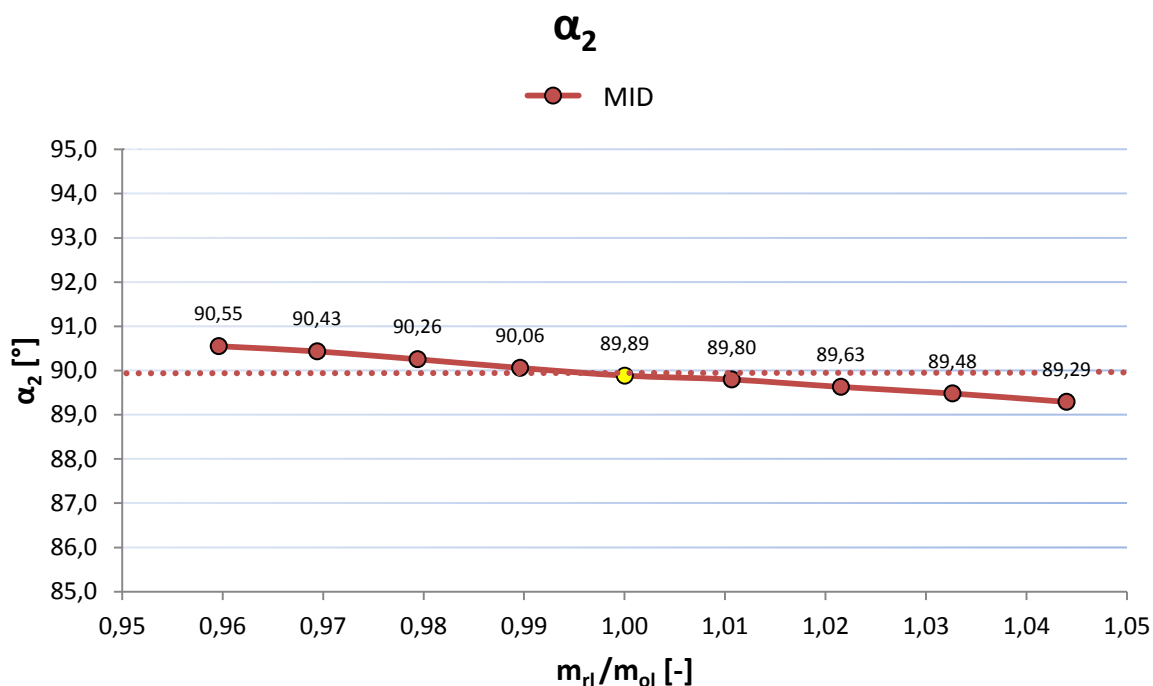
V Graf 6 je znázorněna změna výstupního úhlu relativní rychlosti  $\alpha_1$ . Výchozí stav (žlutý bod) představuje proudový výpočet. Je patrné, že při 9 % úniku přes nadbandážovou ucpávku se úhel  $\alpha_1$  liší od proudového výpočtu o  $+0,66^\circ$  a při úniku nadbandážovou ucpávkou 1 % je oproti 2D menší o  $0,62^\circ$  (Graf 6).



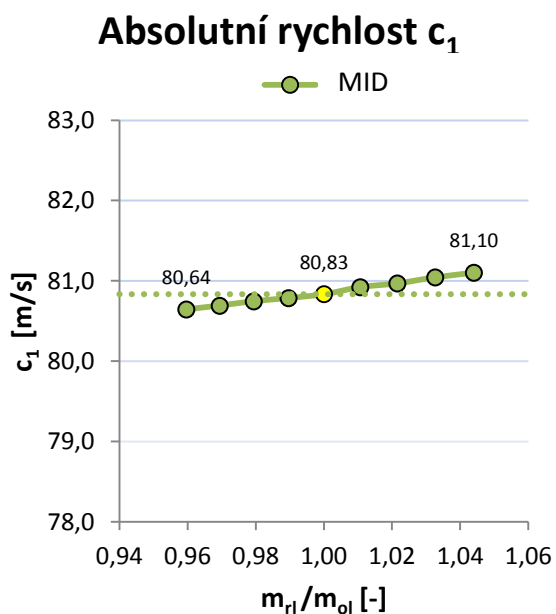
**Graf 6** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



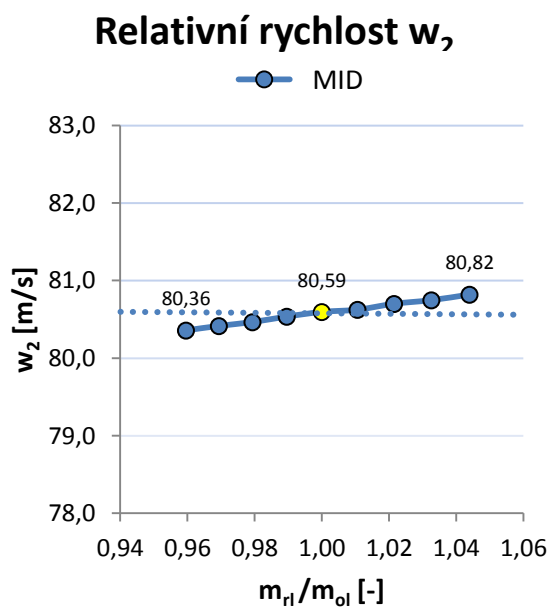
**Graf 7** Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



**Graf 8** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek



**Graf 9** Změna absolutní rychlosti  $c_1$



**Graf 10** Změna relativní rychlosti  $w_2$

## 6.2 Nízkoreakční stupeň

V této kapitole budou popsány výsledky výpočtu nízkoreakčního stupně, s reakcí na středním poloměru 30%.

### 6.2.1 Stupeň bez vyrovnávacích otvorů

- *Varianta 1 - konstantní úhly  $\alpha_1, \beta_2$*

V této variantě je určen výchozí návrh stupně s 30% reakcí na středním poloměru s optimálním zatížením (žlutý sloupec, Tab. 4).

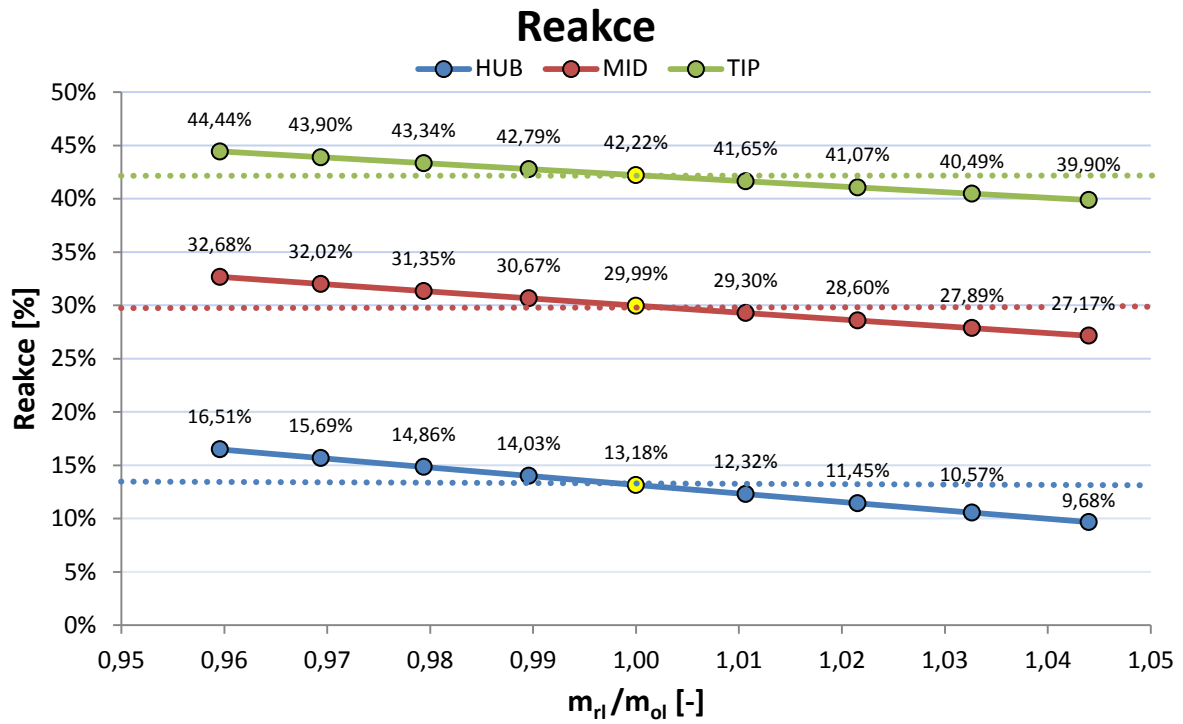
Při zvyšování úniku páry nadbandážovou ucpávkou z 5% až na 9% klesá hmotnostní průtok oběžnými lopatkami. Tím pádem klesá relativní rychlost  $w_2$  a zároveň roste absolutní rychlost  $c_1$ . V důsledku toho klesá reakce. Úhel absolutní rychlosti  $\alpha_2$  roste ( $\alpha_2 > 90^\circ$ ), stupeň se odlehčuje.

Naopak s klesajícím únikem páry nadbandážovou ucpávkou z 5% až na 1% hmotnostní průtok oběžnými lopatkami vzrůstá. Relativní rychlost  $w_2$  roste a absolutní rychlost  $c_1$  klesá. Díky tomu se zvyšuje reakce. Úhel absolutní rychlosti  $\alpha_2$  se zmenšuje ( $\alpha_2 < 90^\circ$ ), stupeň se přetěžuje.

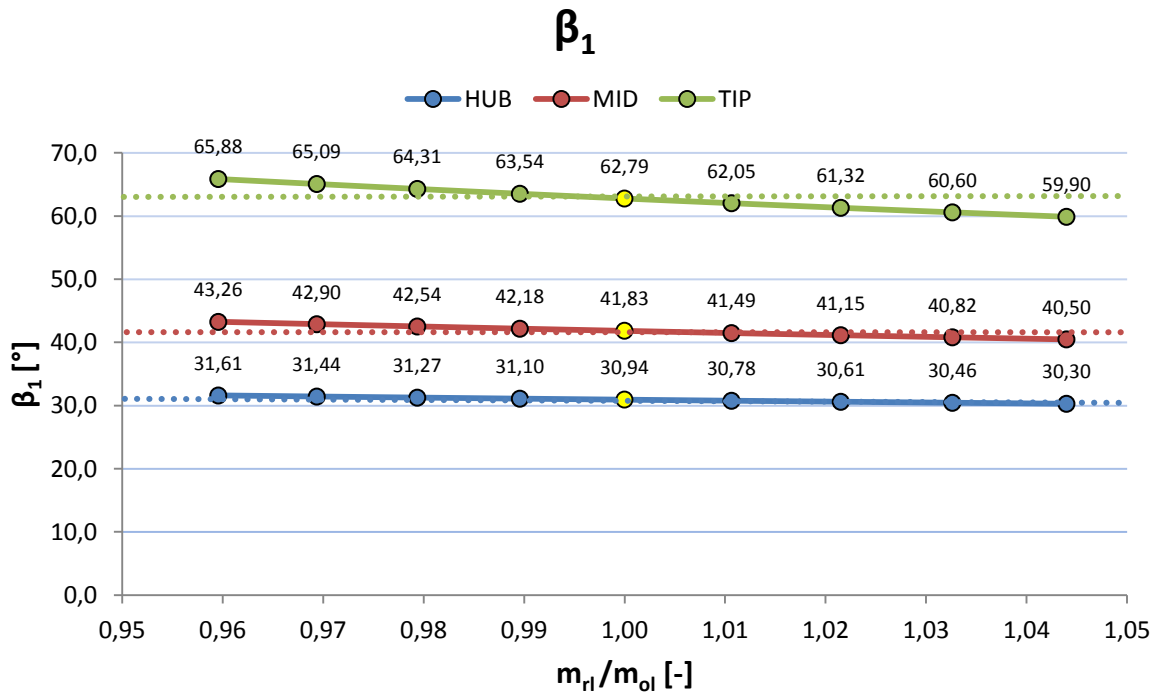
V Graf 11 je znázorněna změna reakce, žlutý bod představuje výchozí stav shodný s proudovým výpočtem. Reakce na středním poloměru v případě 9% úniku páry nadbandážovou ucpávkou o 2,82% nižší vůči proudovému výpočtu a při 1% úniku je o 2,69% vyšší.

Tabulka parametrů vypočítaných variant										
$\rho_{ss}$	[%]	32,68	32,02	31,35	30,67	29,99	29,30	28,60	27,89	27,17
$\alpha_1$	[°]	14,455	14,455	14,455	14,455	14,455	14,455	14,455	14,455	14,455
$\beta_1$	[°]	43,262	42,896	42,535	42,181	41,834	41,491	41,154	40,823	40,497
$\alpha_2$	[°]	86,747	87,605	88,485	89,386	90,311	91,254	92,221	93,211	94,223
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\dot{m}^{st}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,731	0,734	0,738	0,741	0,745	0,748	0,752	0,755	0,759
$\dot{m}_{rl}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,694	0,697	0,701	0,704	0,707	0,711	0,714	0,718	0,721
$\dot{m}_{ol}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,723	0,719	0,716	0,712	0,707	0,703	0,699	0,695	0,691
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	0,969	0,979	0,990	1,000	1,011	1,021	1,033	1,044

Tab. 4 Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 1

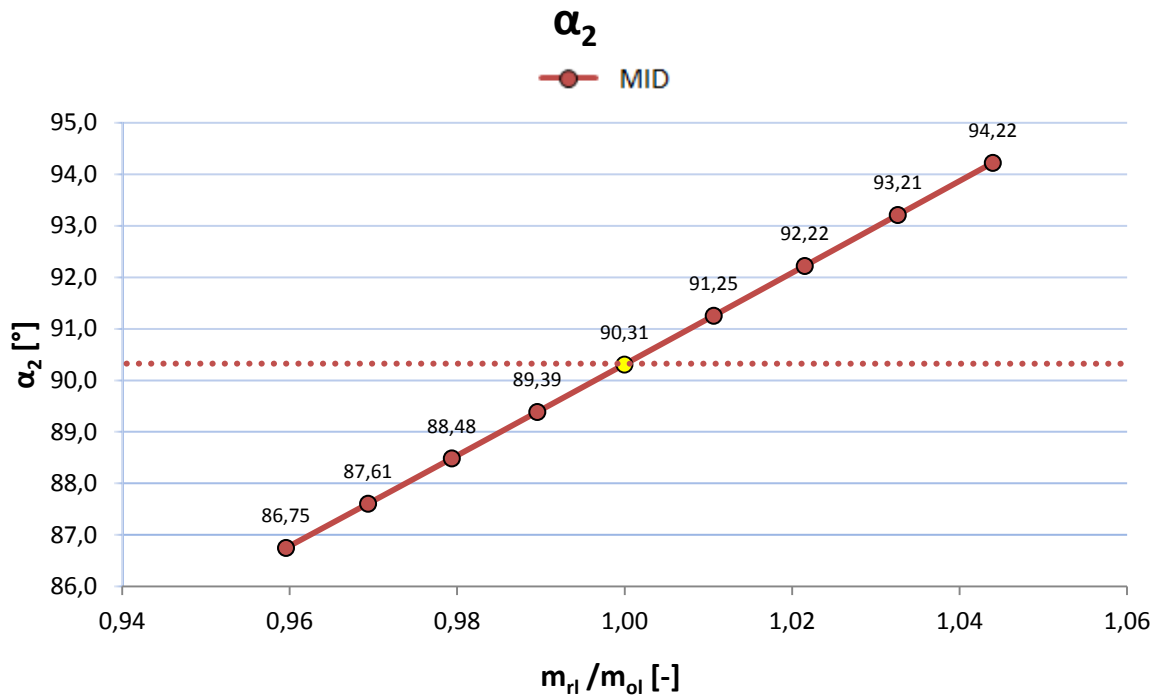


Graf 11 Změna reakce

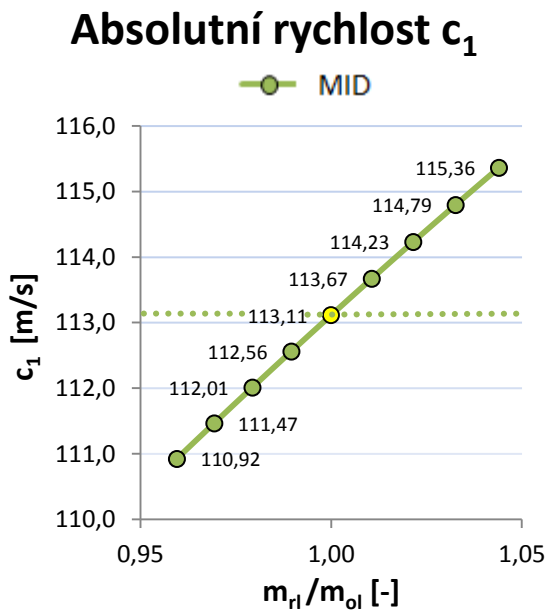


Graf 12 Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek

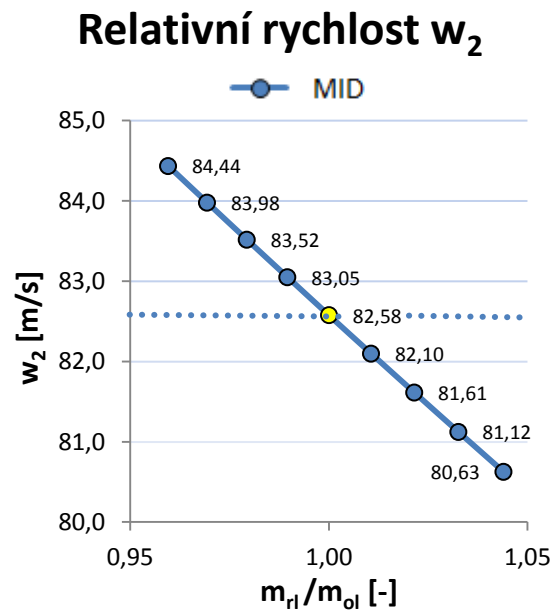




**Graf 13** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek



**Graf 14** Změna absolutní rychlosti  $c_1$



**Graf 15** Změna relativní rychlosti  $w_2$

• **Varianta 2 – konstantní reakce a úhel  $\beta_2$**

V této variantě je určen výchozí stupeň navržený tak, aby reakce na středním poloměru byla 30% a optimální zatížení (žlutý sloupec, Tab. 5). Úhel  $\beta_2$  je pro všechny modifikace konstantní a reakce na střením poloměru je držena na 30%. Sledována je změna úhlu  $\alpha_1$ .

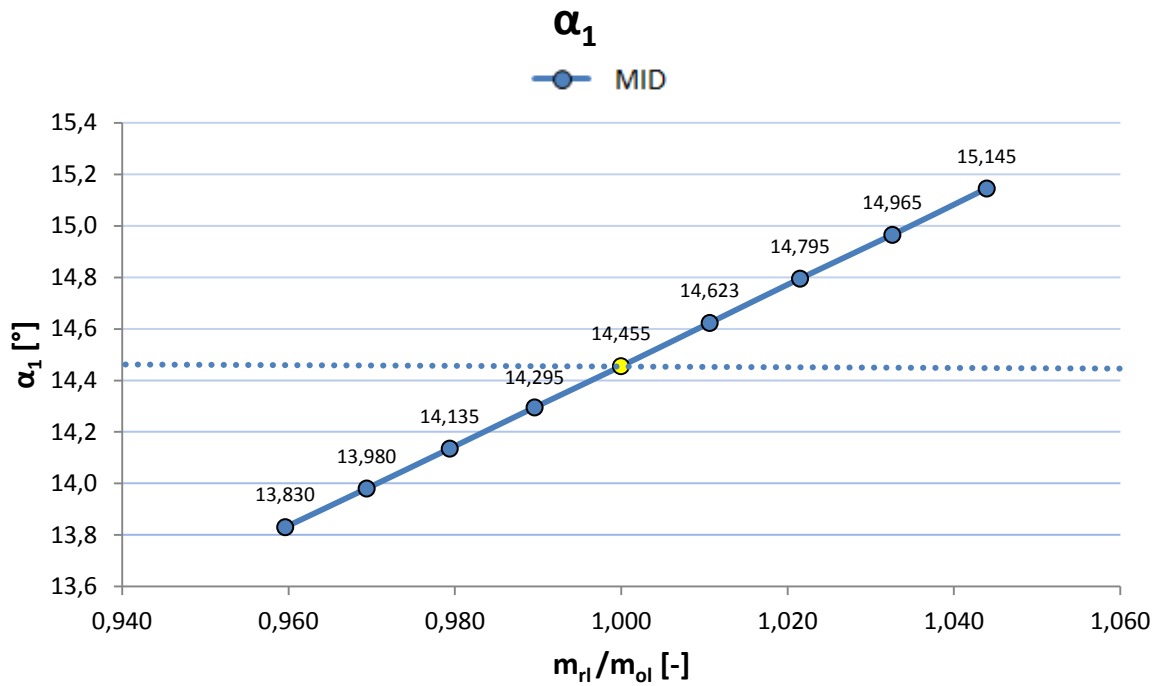
Při zvyšování úniku páry nadbandážovou ucpávkou z 5% až na 9% klesá průtok oběžnými lopatkami, tudíž klesá relativní rychlost  $w_2$  (Graf 15), absolutní rychlost  $c_1$  narůstá (Graf 14). Tím pádem klesá i reakce (Graf 11). Aby byla docílena 30% reakce na středním poloměru, musí být zvětšován výstupní úhel absolutní rychlosti z rozváděcích lopatek  $\alpha_1$  (Graf 16). Axiální průtočná plocha se zvětší a v důsledku toho klesne absolutní rychlost  $c_1$ . Úhel absolutní rychlosti  $\alpha_2$  klesá ( $\alpha_2 < 90^\circ$ ), stupeň se přetěžuje.

V případě snižování úniku páry z 5% až na 1% hmotnostní průtok oběžnými lopatkami roste, s tím i relativní rychlost  $w_2$  (Graf 15) a absolutní rychlost  $c_1$  klesá (Graf 14). Důsledkem je nárůst reakce (Graf 11). Aby byla udržena na požadovaných 30%, musí být úhel  $\alpha_1$  snižován (Graf 16). V důsledku toho se zmenšuje axiální průtočná plocha a narůstá absolutní rychlost  $c_1$ . Úhel absolutní rychlosti  $\alpha_2$  roste ( $\alpha_2 > 90^\circ$ ), stupeň se odlehčuje.

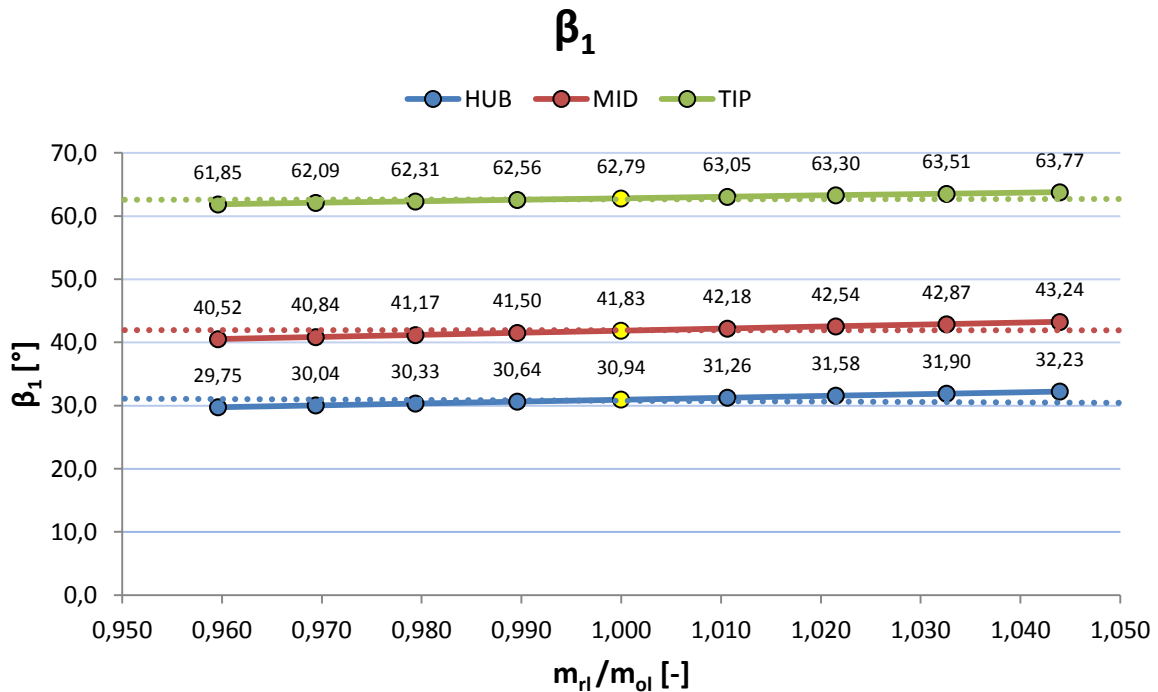
V Graf 16 je znázorněna změna výstupního úhlu relativní rychlosti  $\alpha_1$  na středním poloměru. Výchozí stav (žlutý bod) představuje proudový výpočet. Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou se úhel  $\alpha_1$  liší od proudového výpočtu o  $+0,69^\circ$  a při úniku nadbandážovou ucpávkou 1% je menší o  $0,63^\circ$ .

Tabulka parametrů vypočítaných variant										
$\rho_{ss}$	[%]	30,00	29,99	29,99	30,00	29,99	30,00	30,00	29,99	29,99
$\alpha_1$	[°]	13,830	13,980	14,135	14,295	14,455	14,623	14,795	14,965	15,145
$\beta_1$	[°]	40,520	40,844	41,165	41,505	41,833	42,185	42,539	42,874	43,239
$\alpha_2$	[°]	91,078	90,917	90,707	90,499	90,309	90,086	89,851	89,653	89,410
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\dot{m}^{st}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,712	0,718	0,728	0,736	0,745	0,753	0,763	0,772	0,781
$\dot{m}_{rl}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,676	0,683	0,691	0,699	0,707	0,716	0,725	0,733	0,743
$\dot{m}_{ol}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,704	0,705	0,706	0,707	0,707	0,708	0,709	0,710	0,711
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	0,969	0,979	0,990	1,000	1,011	1,021	1,033	1,044

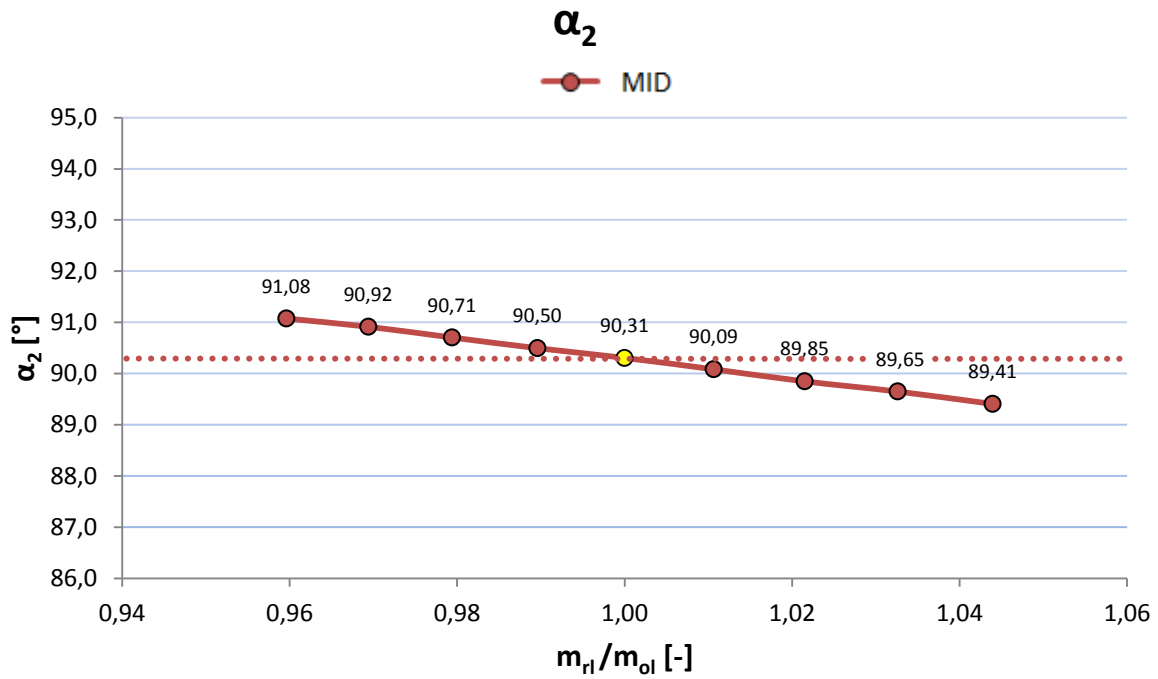
Tab. 5 Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 2



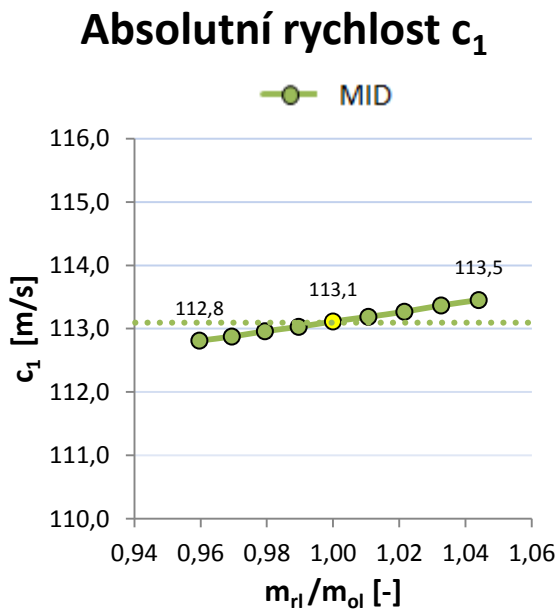
Graf 16 Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



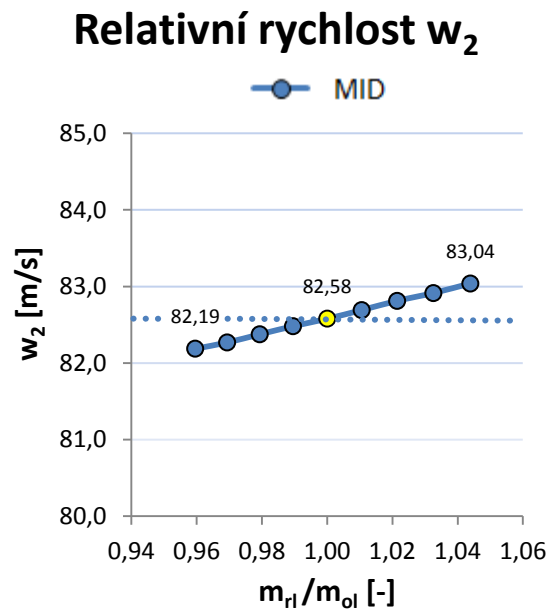
Graf 17 Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



**Graf 18** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek



**Graf 19** Změna absolutní rychlosti  $c_1$



**Graf 20** Změna relativní rychlosti  $w_2$

### 6.2.2 Stupeň s vyrovnávacími otvory

- **Varianta 1** - konstantní úhly  $\alpha_1, \beta_2$

V této variantě jsou uvažovány vyrovnávací otvory (štěrbiny), které jsou nadimenzovány tak, aby absorbovaly únik hřídelovou ucpávkou a navíc ještě 5%, aby docházelo k odsávání páry z hlavního proudu. Únik vyrovnávacími otvory je tedy dán následujícím vztahem

$$\xi_h = 1,05 \cdot \xi_{rl} \quad (6.1)$$

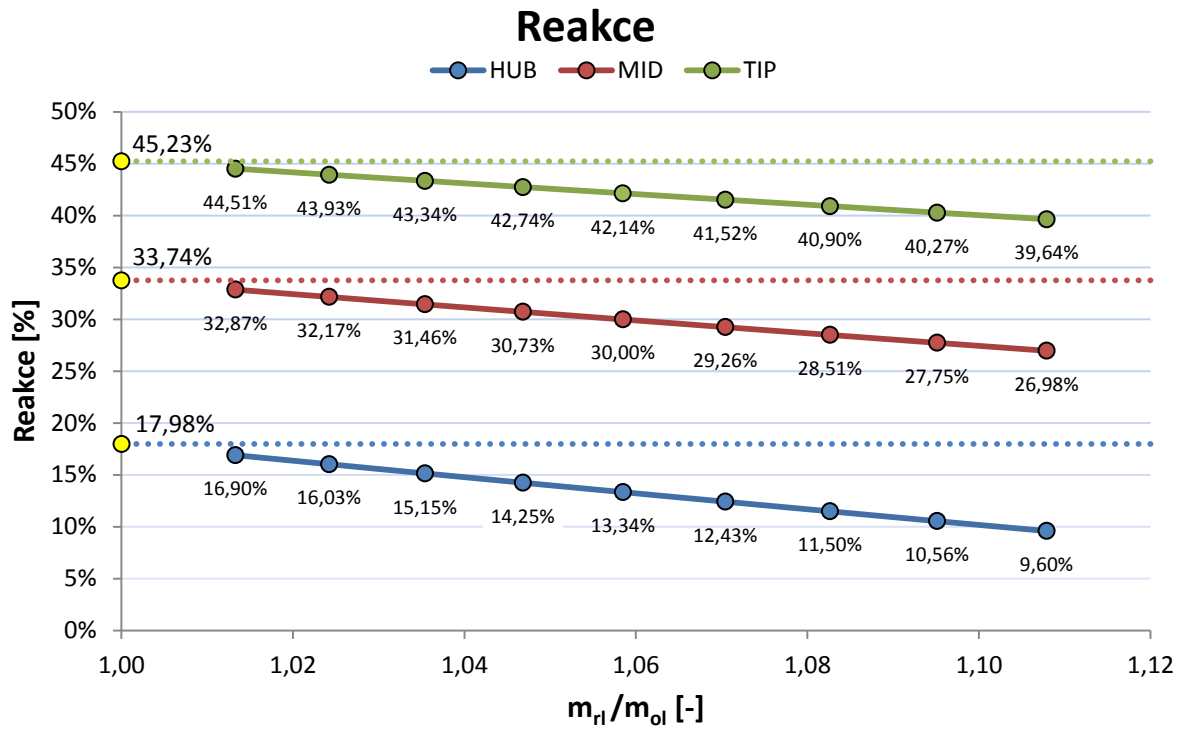
Proudový výpočet reprezentuje žlutý sloupec v Tab. 6 (referenční stav). Únik hřídelovou a nadbandážovou ucpávkou je stejný (5%) a únik vyrovnávacími otvory není uvažován. Přes rozváděcí i oběžné lopatky teče stejné množství páry, což vyplývá z podstaty 2D výpočtu. Další varianty (v tab. 6) ve 2D nelze simulovat, jelikož proudový výpočet neregistruje změny průtoku v oběžné lopatkové řadě.

Při zvyšování úniku páry nadbandážovou ucpávkou z 1% až na 9% klesá hmotnostní průtok oběžnými lopatkami (Tab. 6). Tím pádem klesá relativní rychlost  $w_2$  (Graf 25) a zároveň roste absolutní rychlost  $c_1$  (Graf 24). V důsledku toho klesá reakce (Graf 21). Úhel absolutní rychlosti  $\alpha_2$  postupně roste a z přetíženého stupně se stává odlehčený (Graf 23).

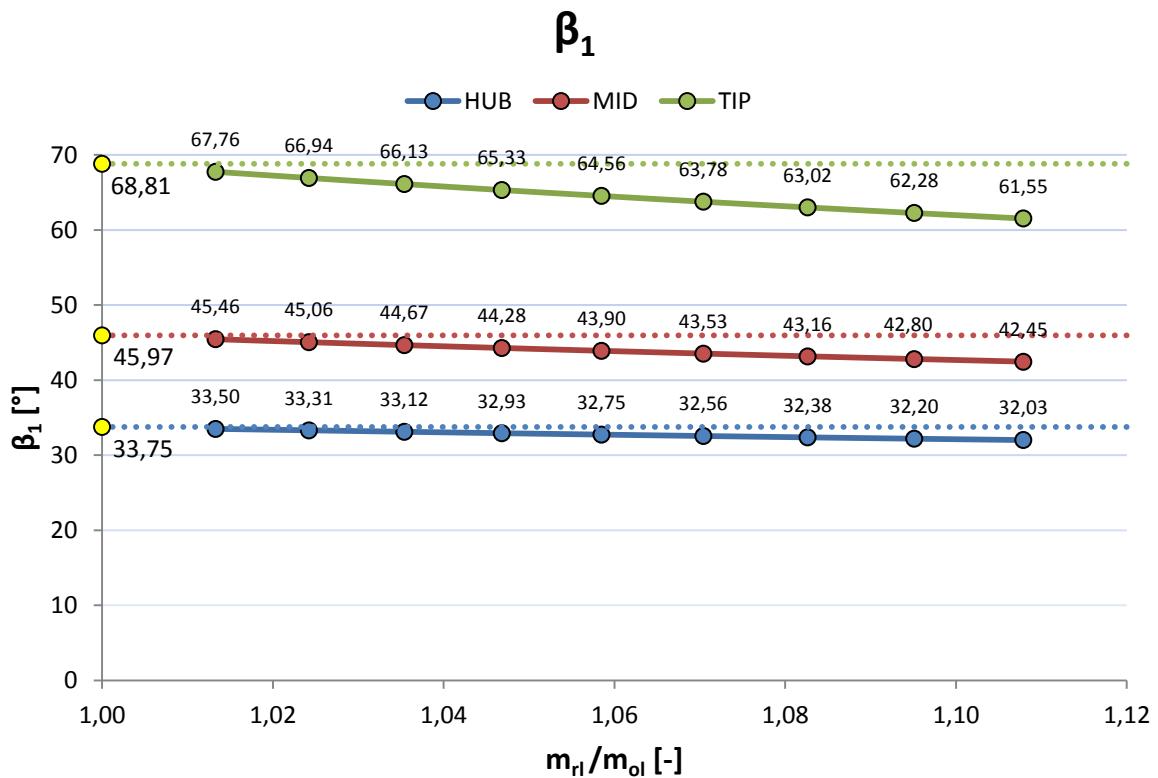
V grafech níže jsou znázorněny změny proudových parametrů, žluté body reprezentují proudový výpočet (žlutý sloupec v tab. 6). Reakce na středním poloměru je v případě 1% úniku páry nadbandážovou ucpávkou o 0,87 % nižší, než reakce odpovídající proudovému výpočtu a při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je nižší dokonce o 6,76%.

Tabulka parametrů vypočítaných variant											
$\rho_{ss}$	[%]	32,87	32,17	31,46	30,73	30,00	29,26	28,51	27,75	26,98	33,74
$\alpha_1$	[°]	15,357	15,357	15,357	15,357	15,357	15,357	15,357	15,357	15,357	15,357
$\beta_1$	[°]	45,461	45,061	44,669	44,282	43,904	43,529	43,162	42,801	42,447	45,973
$\alpha_2$	[°]	86,142	87,035	87,950	88,890	89,857	90,843	91,856	92,895	93,959	85,064
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	5,00
$\xi_h$	[%]	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	0,00
$\dot{m}^{st}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,775	0,779	0,783	0,787	0,790	0,795	0,799	0,803	0,807	0,769
$\dot{m}_{rl}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,736	0,740	0,743	0,747	0,751	0,755	0,759	0,763	0,767	0,731
$\dot{m}_{ol}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,726	0,722	0,718	0,714	0,710	0,705	0,701	0,696	0,692	0,731
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	1,013	1,024	1,035	1,047	1,058	1,070	1,083	1,095	1,108	1,000

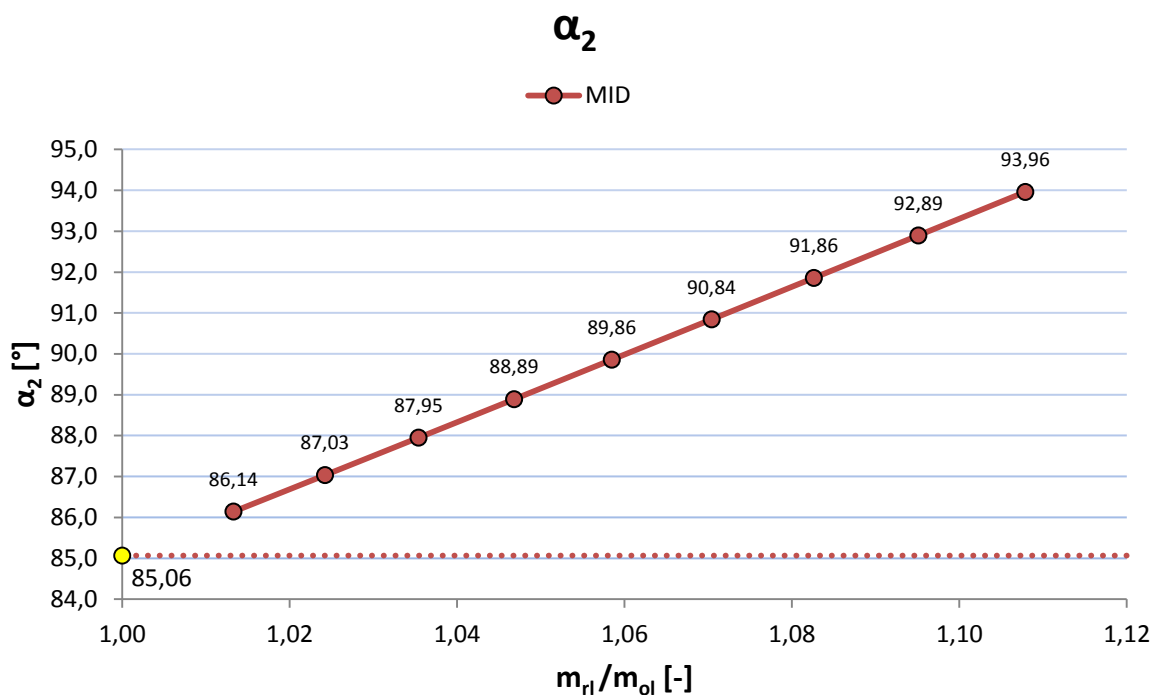
Tab. 6 Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var.1



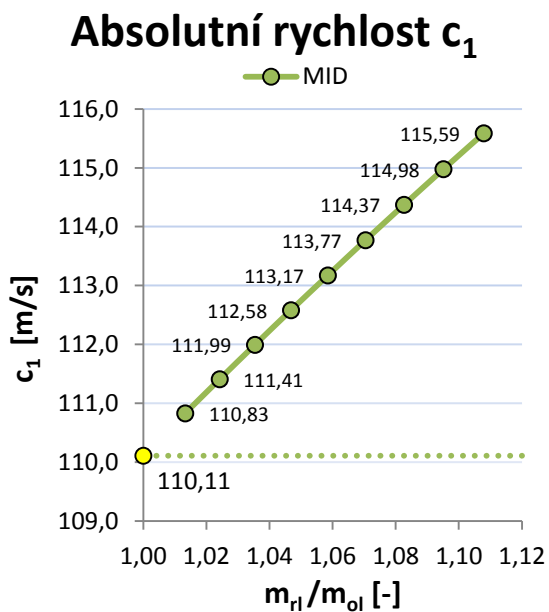
Graf 21 Změna reakce



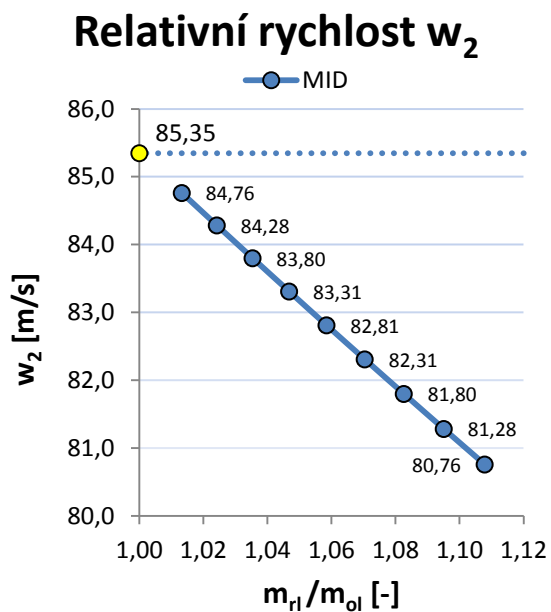
Graf 22 Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



**Graf 23** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek



**Graf 24** Změna absolutní rychlosti  $c_1$



**Graf 25** Změna relativní rychlosti  $w_2$

• **Varianta 2 – konstantní reakce a úhel  $\beta_2$**

V této variantě jsou uvažovány vyrovnávací otvory (štěrbiny), které jsou nadimenzovány tak, aby absorbovaly únik hřídelovou ucpávkou a navíc ještě 5%, aby docházelo k odsávání páry z hlavního proudu. Únik vyrovnávacími otvory je tedy dán následujícím vztahem

$$\xi_h = 1,05 \cdot \xi_{rl} \quad (6.1)$$

Proudový výpočet reprezentuje žlutý sloupec v Tab. 7 (referenční stav). Únik hřídelovou a nadbandážovou ucpávkou je stejný (5%) a únik vyrovnávacími otvory není uvažován. Přes rozváděcí i oběžné lopatky teče stejné množství páry, což vyplývá z podstaty 2D výpočtu. Další varianty (v tab. 7) ve 2D nelze simulovat, jelikož proudový výpočet neregistruje změny průtoku v oběžné lopatkové řadě.

Při zvyšování úniku páry nadbandážovou ucpávkou z 1% až na 9% klesá hmotnostní průtok oběžnými lopatkami (Tab. 6). Tím pádem klesá relativní rychlost  $w_2$  (Graf 25) a zároveň roste absolutní rychlost  $c_1$  (Graf 24). V důsledku toho klesá reakce (Graf 21). Aby bylo docíleno požadované 30% reakce na středním poloměru, musí se postupně zvětšovat výstupní úhel absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek  $\alpha_1$ . Se zvětšujícím se úhlem  $\alpha_1$  se zvětšuje axiální průtočná plocha rozváděcích lopatek a v důsledku toho klesá rychlost  $c_1$ .

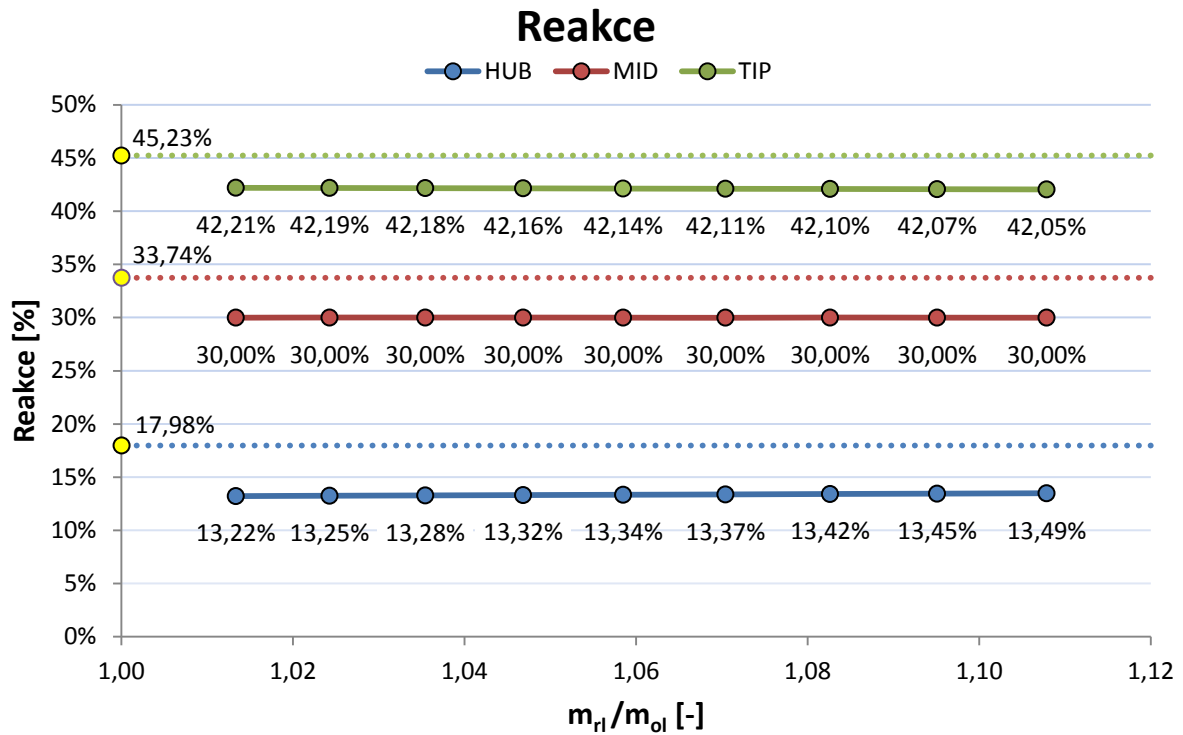
V grafech níže jsou znázorněny změny proudových parametrů, žluté body reprezentují proudový výpočet (žlutý sloupec v tab. 7).

Reakce na středním poloměru odpovídající proudovému výpočtu je o 3,74% vyšší oproti 1D (Graf 26). V Graf 27 je znázorněna změna výstupního úhlu relativní rychlosti  $\alpha_1$ . Výchozí stav (žlutý bod) představuje proudový výpočet. Při 9 % úniku nadbandážovou ucpávkou se úhel  $\alpha_1$  liší od proudového výpočtu o +0,79° a při úniku nadbandážovou ucpávkou 1 % je oproti 2D menší o 0,71°.

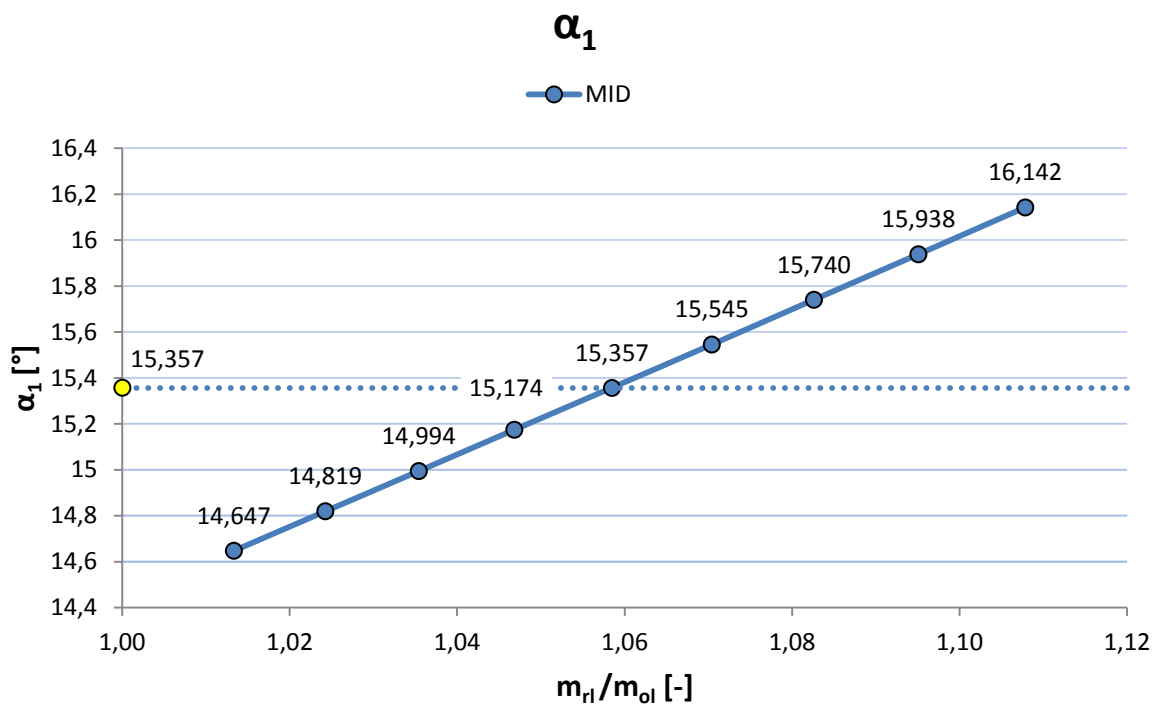
Tabulka parametrů vypočítaných variant											
$\rho_{ss}$	[%]	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	33,74
$\alpha_1$	[°]	14,647	14,819	14,994	15,174	15,357	15,545	15,740	15,938	16,142	15,357
$\beta_1$	[°]	42,475	42,829	43,182	43,546	43,902	44,268	44,648	45,026	45,413	45,973
$\alpha_2$	[°]	90,800	90,571	90,340	90,104	89,854	89,600	89,322	89,050	88,766	85,064
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500	19,500
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	5,00
$\xi_h$	[%]	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	0,00
$\dot{m}^{st}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,753	0,762	0,771	0,780	0,791	0,801	0,812	0,822	0,833	0,769
$\dot{m}_{rl}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,715	0,724	0,732	0,742	0,751	0,761	0,771	0,781	0,791	0,731
$\dot{m}_{ol}$	[kg·s <sup>-1</sup> ]	0,705	0,706	0,707	0,708	0,710	0,711	0,712	0,713	0,714	0,731
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	1,013	1,024	1,035	1,047	1,058	1,070	1,083	1,095	1,108	1,000

**Tab. 7** Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 2

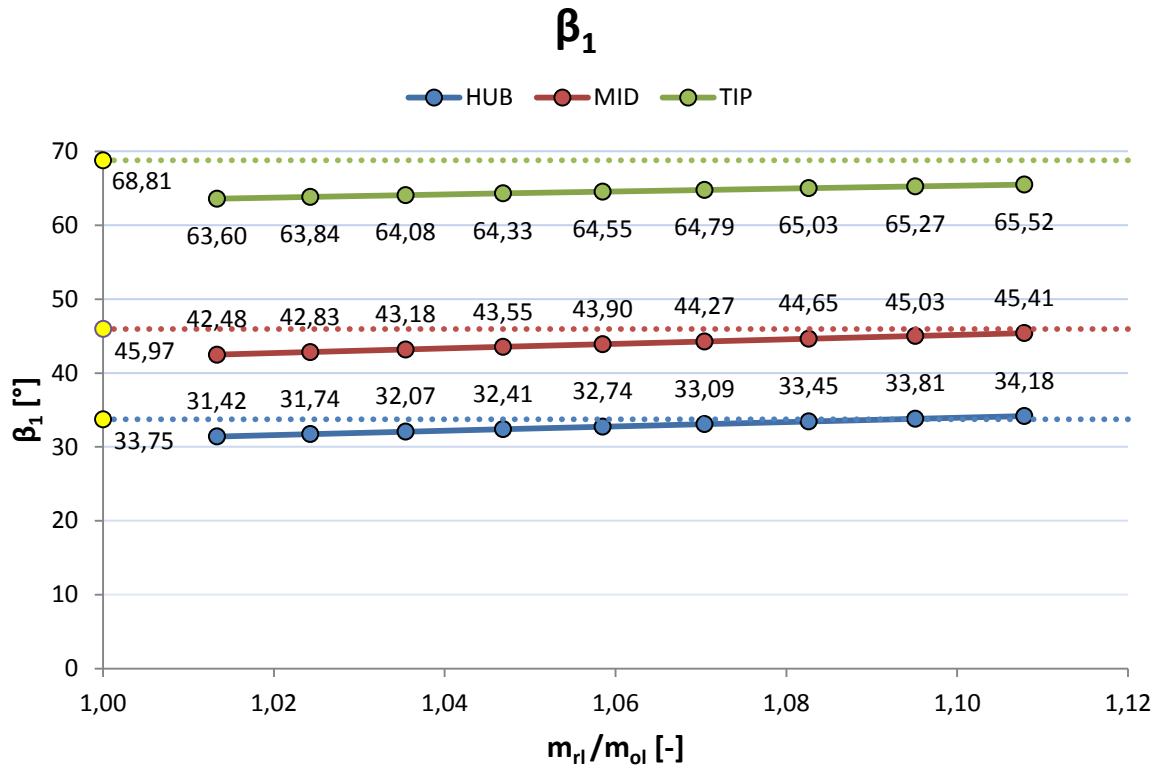




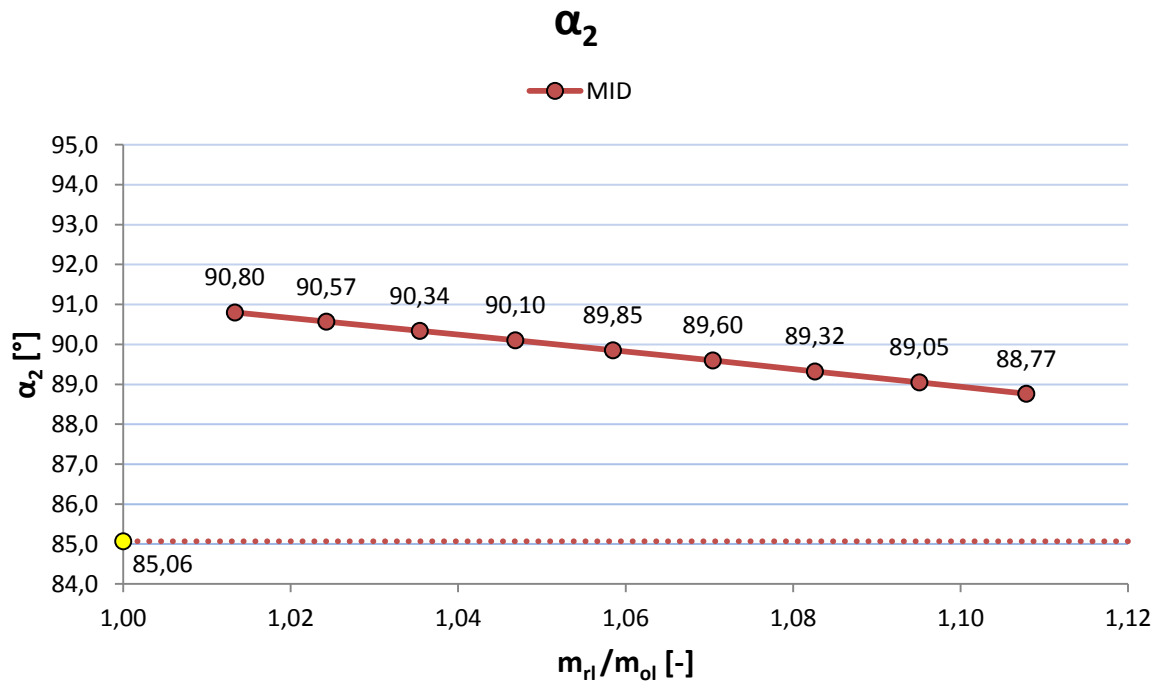
Graf 26 Průběh reakce



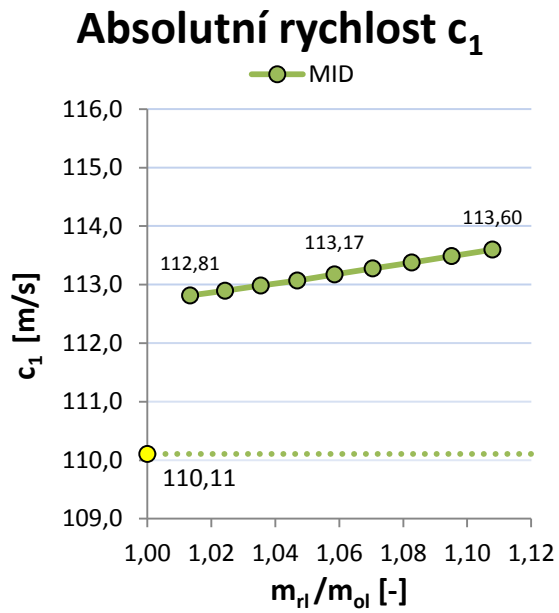
Graf 27 Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



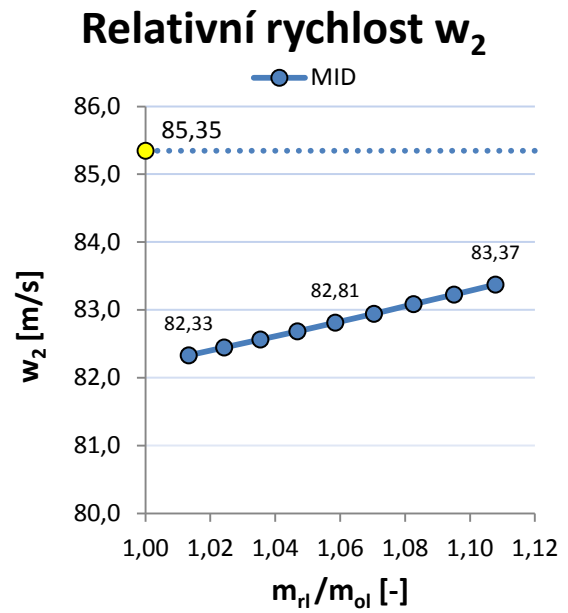
**Graf 28** Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek



**Graf 29** Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek



**Graf 30** Změna absolutní rychlosti  $c_1$



**Graf 31** Změna relativní rychlosti  $w_2$

## 7 Porovnání výsledků 1D s proudovými výpočty

V této kapitole jsou porovnány výsledky 1D výpočtu, proudového výpočtu a proudového výpočtu s uvažováním úniků páry ucpávkami nebo vyrovnávacími otvory (štěrbínami). V tabulkách jsou shrnuty výsledky výpočtů proudových parametrů, vypočtených na středním poloměru. Reakce je vynesena pro patu, střed a špičku lopatky. Jednotlivé varianty odpovídají těm, které jsou popsány v kapitole 5. Proudové parametry vypočtené 1D metodou byly převzaty z příslušných tabulek vypočtených hodnot v kapitole 6.

### 7.1 Přetlakový stupeň

- *Varianta 1 - konstantní úhly  $\alpha_1, \beta_2$*

V Tab. 8 jsou vyneseny hodnoty proudových parametrů vypočtených jednotlivými výpočtovými metodami. Pro názornost byly výpočty provedeny pro mezní úniky páry nadbandážovou ucpávkou 1, 5, 9 %.

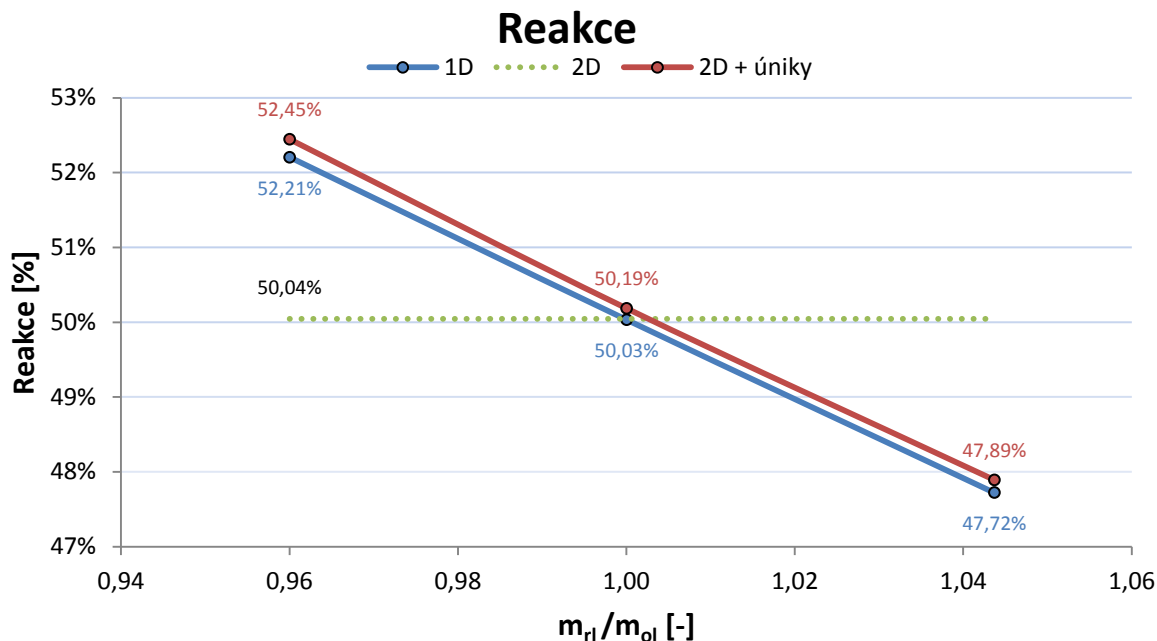
V Graf 32 je znázorněna změna reakce na středním poloměru pro jednotlivé výpočtové metody. V případě 2D výpočtu, nejsou respektovány úniky páry, a z podstaty této metody vyplývá, že hmotnostní průtok oběžnými lopatkami je stejný jako rozváděcími. Z tohoto důvodu jsou všechny proudové parametry s měnícím se průtokem oběžnými lopatkami konstantní.

Kdežto 2D výpočet, který respektuje úniky páry (viz. 5.1) ukazuje, jaká je změna reakce se změnou hmotnostního průtoku oběžnými lopatkami (Graf 32). Metoda „*mean-line*“ (1D) dává poměrně shodné výsledky s touto metodou.

V porovnání s proudovým výpočtem je při 1% úniku nadbandážovou ucpávkou reakce u 1D výpočtu větší o 2,17% a u 2D výpočtu s uvažováním úniků páry je reakce vyšší o 2,41%. Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je reakce u 1D metody o 2,32% nižší a u 2D s respektováním úniků páry je nižší o 2,15%.

Tabulka parametrů vypočítaných variant								
---		1D			2D	2D + úniky		
$\rho_{SS}^{MID}$	[%]	52,21	50,03	47,72	50,04	52,45	50,19	47,89
$\rho_{SS}^{HUB}$		40,77	38,08	35,21	38,21	41,75	39,00	36,22
$\rho_{SS}^{TIP}$		60,53	58,74	56,83	57,90	59,77	57,83	55,87
$\alpha_1$	[°]	14,80	14,80	14,80	14,766	14,766	14,766	14,766
$\beta_1$	[°]	94,400	89,548	84,728	90,905	95,396	90,490	85,369
$\alpha_2$	[°]	85,745	89,888	94,458	89,389	84,448	88,735	93,202
$\beta_2$	[°]	14,500	14,500	14,500	14,460	14,460	14,460	14,460
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	5,00	9,00	5,00	1,00	5,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	1,000	1,044	1,000	0,960	1,000	1,044

Tab. 8 Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočtních metod



**Graf 32** Změna reakce pro jednotlivé výpočtové metody

- **Varianta 2** – konstantní reakce a úhel  $\beta_2$

V Tab. 9 jsou vyneseny hodnoty proudových parametrů vypočtených jednotlivými výpočtovými metodami. Pro názornost byly výpočty provedeny pro mezní úniky páry nadbandážovou ucpávkou 1, 5, 9 %.

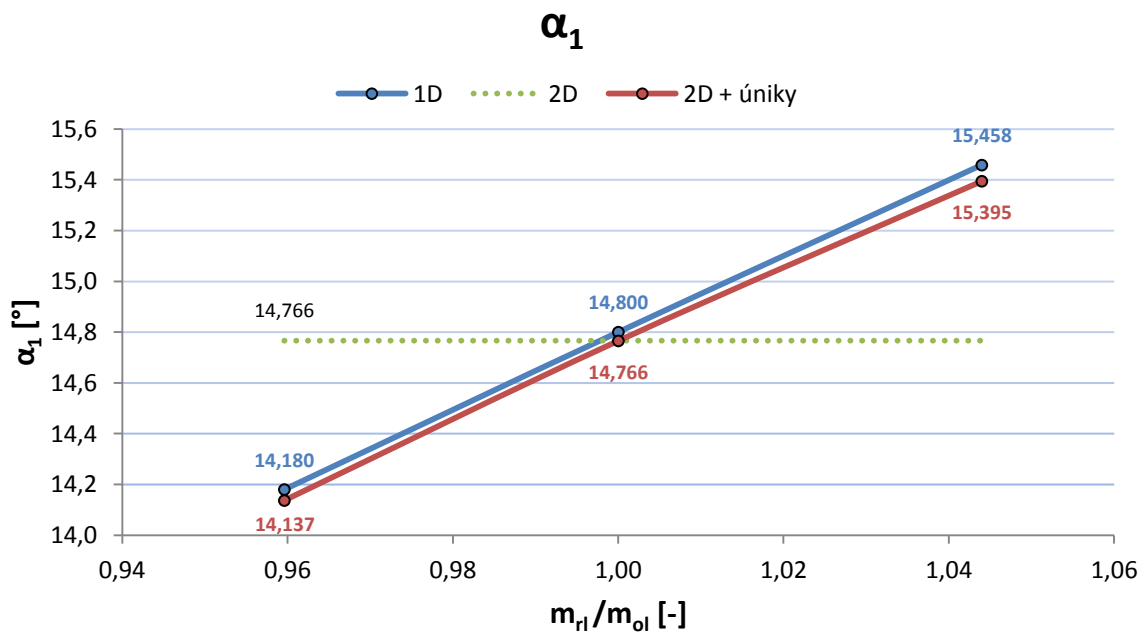
V grafu 33 je znázorněna změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek  $\alpha_1$  na středním poloměru pro jednotlivé výpočtové metody. V případě 2D výpočtu, nejsou respektovány úniky páry, a z podstaty této metody vyplývá, že hmotnostní průtok oběžnými lopatkami je stejný jako rozváděcími. Z tohoto důvodu jsou všechny proudové parametry s měnícím se průtokem oběžnými lopatkami konstantní.

Kdežto 2D výpočet, který respektuje úniky páry (viz., 5.1) ukazuje, jaká je změna úhlu  $\alpha_1$  se změnou hmotnostního průtoku oběžnými lopatkami (Graf 33). Metoda „mean-line“ (1D) dává poměrně shodné výsledky s touto metodou.

V porovnání s proudovým výpočtem je při 1% úniku nadbandážovou ucpávkou úhel  $\alpha_1$  u 1D výpočtu menší o  $0,59^\circ$  a u 2D výpočtu s uvažováním úniků páry je úhel  $\alpha_1$  menší o  $0,63^\circ$ . Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je úhel  $\alpha_1$  u 1D metody o  $0,69^\circ$  vyšší a u 2D s respektováním úniků páry je vyšší o  $0,63^\circ$ .

Tabulka parametrů vypočítaných variant								
---		1D			2D	2D + úniky		
$\rho_{SS}^{MID}$		50,00	50,03	50,00	50,045	50,181	50,185	50,106
$\rho_{SS}^{HUB}$	[%]	37,96	38,08	38,12	38,205	38,147	38,998	38,277
$\rho_{SS}^{TIP}$		58,75	58,74	58,66	57,898	58,447	57,834	58,137
$\alpha_1$	[°]	<b>14,180</b>	<b>14,800</b>	<b>15,458</b>	<b>14,766</b>	<b>14,137</b>	<b>14,766</b>	<b>15,395</b>
$\beta_1$	[°]	89,429	89,548	89,539	90,905	90,174	90,431	90,212
$\alpha_2$	[°]	90,551	89,888	89,292	89,389	89,028	88,676	88,111
$\beta_2$	[°]	14,500	14,500	14,500	14,460	14,460	14,460	14,460
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	5,00	9,00	5,00	1,00	5,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	1,000	1,044	1,000	0,960	1,000	1,044

Tab. 9 Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod



Graf 33 Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek pro jednotlivé výpočtové metody

## **7.2 Nízkoreakční stupeň**

Výpočty nízkoreakčního stupně byly provedeny pro mezní úniky páry nadbandážovou ucpávkou 1, 5, 9 %. V Tab. 10, Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13 jsou vyneseny hodnoty proudových parametrů vypočtených jednotlivými výpočtovými metodami. Pro proudový výpočet platí totéž, co už bylo několikrát zmiňováno, tedy, že průtok oběžnými lopatkami je shodný s průtokem rozváděcími lopatkami. Z tohoto důvodu jsou všechny proudové parametry při změnách průtoku oběžnými lopatkami konstantní.

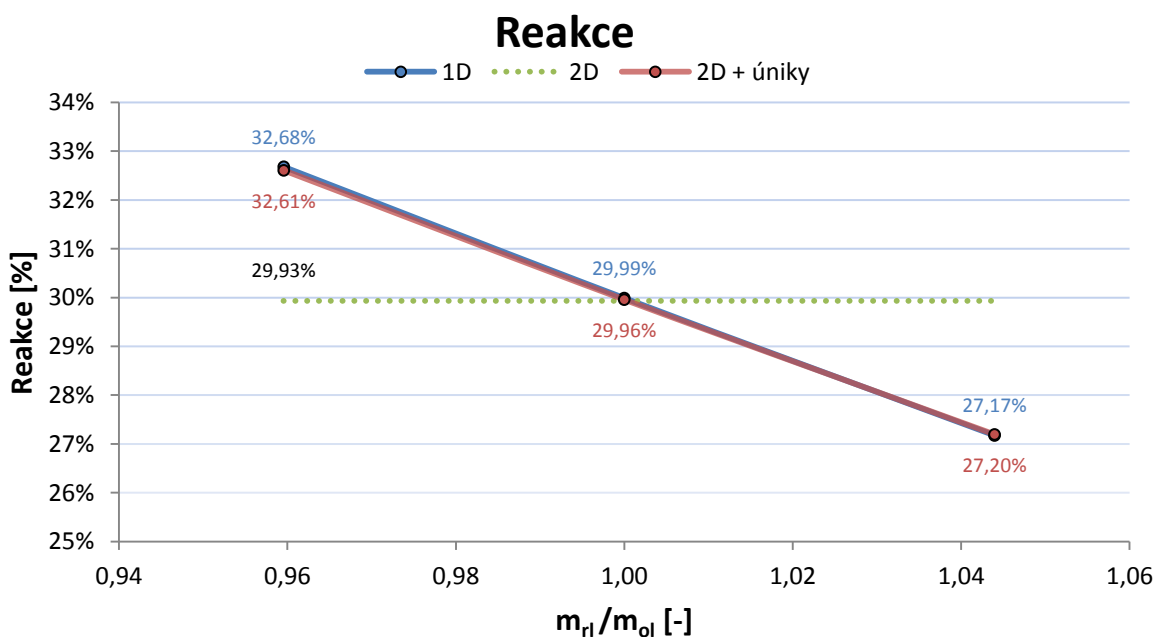
### 7.2.1 Stupeň bez vyrovnávacích otvorů

- **Varianta 1** - konstantní úhly  $\alpha_1, \beta_2$

V Graf 34 je znázorněna změna reakce na středním poloměru pro jednotlivé výpočtové metody. V porovnání s proudovým výpočtem je při 1% úniku nadbandážovou ucpávkou reakce u 1D výpočtu větší o 2,76% a u 2D výpočtu s uvažováním úniků páry je reakce vyšší o 2,68%. Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je reakce u 1D metody o 2,76% nižší a u 2D s respektováním úniků páry je nižší o 2,73%.

Tabulka parametrů vypočítaných variant								
---		1D			2D	2D + úniky		
$\rho_{SS}^{MID}$		32,68	29,99	27,17	29,93	32,61	29,96	27,20
$\rho_{SS}^{HUB}$	[%]	16,51	13,18	9,68	12,955	16,786	13,566	10,220
$\rho_{SS}^{TIP}$		44,44	42,22	39,90	41,099	42,932	40,646	38,256
$\alpha_1$	[°]	14,455	14,455	14,455	14,406	14,406	14,406	14,406
$\beta_1$	[°]	43,262	41,834	44,343	41,140	43,639	41,127	38,679
$\alpha_2$	[°]	86,747	90,311	94,223	89,480	85,591	89,192	93,150
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,530	19,530	19,530	19,530
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	5,00	9,00	5,00	1,00	5,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	1,000	1,044	1,000	0,960	1,000	1,044

Tab. 10 Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod



Graf 34 Změna reakce pro jednotlivé výpočtové metody

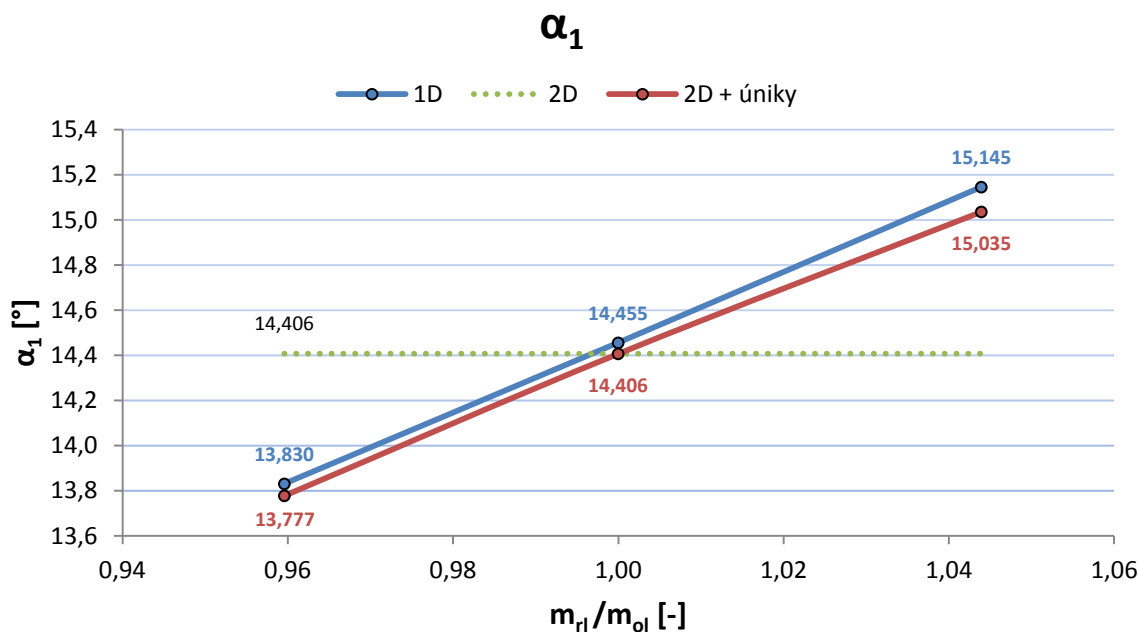


• **Varianta 2 – konstantní reakce a úhel  $\beta_2$**

V grafu 35 je znázorněna změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek na středním poloměru pro jednotlivé výpočtové metody. V porovnání s proudovým výpočtem při 1% úniku nadbandážovou ucpávkou je úhel  $\alpha_1$  u 1D výpočtu menší o  $0,58^\circ$  a u 2D výpočtu s uvažováním úniků páry je úhel  $\alpha_1$  menší o  $0,63^\circ$ . Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je úhel  $\alpha_1$  u 1D metody o  $0,74^\circ$  vyšší a u 2D s respektováním úniků páry je vyšší o  $0,63^\circ$ .

Tabulka parametrů vypočítaných variant								
---		1D			2D	2D + úniky		
$\rho_{SS}^{MID}$		30,00	29,99	29,99	29,93	29,98	29,96	29,79
$\rho_{SS}^{HUB}$	[%]	13,09	13,18	13,30	12,96	13,48	13,57	13,49
$\rho_{SS}^{TIP}$		42,29	42,22	42,15	41,10	40,87	40,65	40,28
$\alpha_1$	[°]	<b>13,830</b>	<b>14,455</b>	<b>15,145</b>	<b>14,406</b>	<b>13,777</b>	<b>14,406</b>	<b>15,035</b>
$\beta_1$	[°]	40,520	41,833	43,239	41,140	41,021	41,127	41,231
$\alpha_2$	[°]	91,078	90,309	89,410	89,480	89,966	89,192	88,997
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,530	19,530	19,530	19,530
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	5,00	9,00	5,00	1,00	5,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	1,000	1,044	1,000	0,960	1,000	1,044

Tab. 11 Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod



Graf 35 Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek pro jednotlivé výpočtové metody

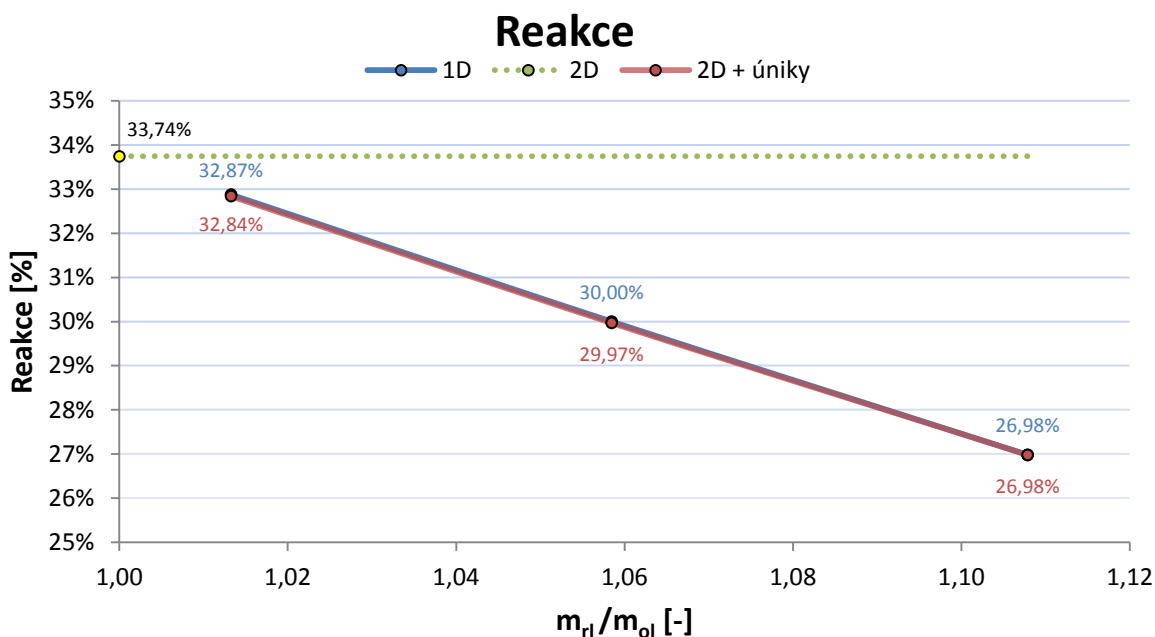
### 7.2.2 Stupeň s vyrovnávacími otvory

- **Varianta I** - konstantní úhly  $\alpha_1, \beta_2$

V Graf 36 je znázorněna změna reakce na středním poloměru pro jednotlivé výpočtové metody. V porovnání s proudovým výpočtem při 1% úniku nadbandážovou ucpávkou je reakce u 1D výpočtu menší o 0,87% a u 2D výpočtu s uvažováním úniků páry je reakce nižší o 0,90%. Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je reakce u 1D metody o 6,76% nižší a u 2D s respektováním úniků páry je nižší rovněž o 6,76%.

Tabulka parametrů vypočítaných variant								
---		1D			2D	2D + úniky		
$\rho_{SS}^{MID}$		32,87	30,00	26,98	33,74	32,84	29,97	26,98
$\rho_{SS}^{HUB}$	[%]	16,90	13,34	9,60	17,94	17,26	13,77	10,15
$\rho_{SS}^{TIP}$		44,51	42,14	39,64	43,95	42,83	40,34	37,74
$\alpha_1$	[°]	15,357	15,357	15,357	15,305	15,305	15,305	15,305
$\beta_1$	[°]	45,461	43,904	42,447	45,505	44,411	41,668	39,012
$\alpha_2$	[°]	86,142	89,857	93,959	84,699	85,262	89,111	93,346
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,530	19,530	19,530	19,530
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	5,00	9,00	5,00	1,00	5,00	9,00
$\xi_h$	[%]	5,25	5,25	5,25	0,00	5,25	5,25	5,25
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	1,013	1,058	1,108	1,000	1,013	1,058	1,108

Tab. 12 Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod



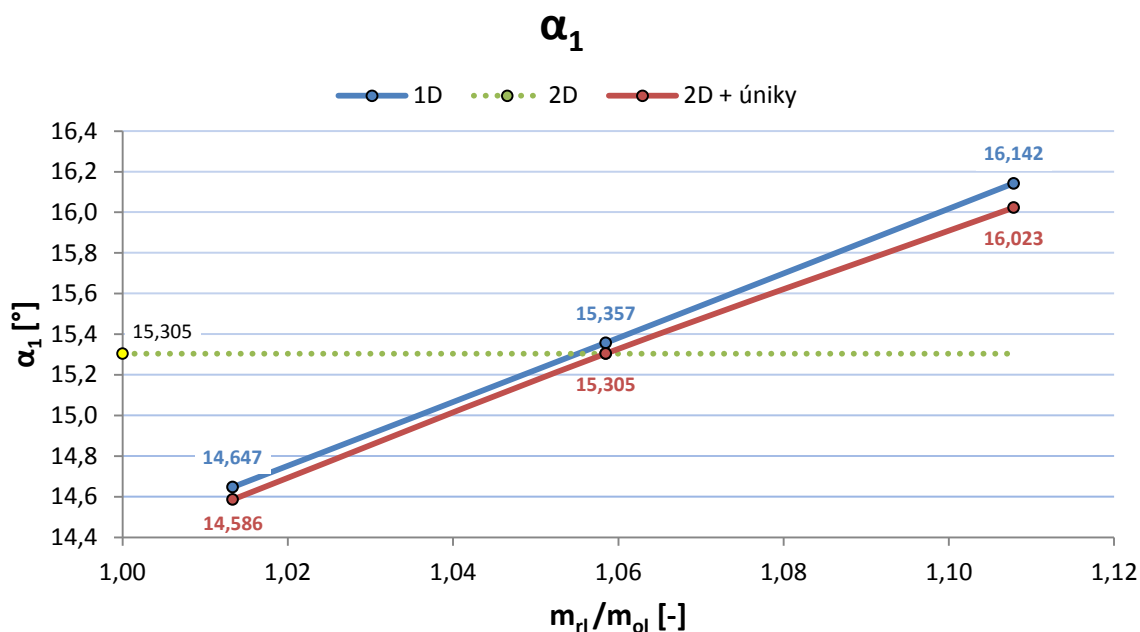
Graf 36 Změna reakce pro jednotlivé výpočtové metody

• **Varianta 2 – konstantní reakce a úhel  $\beta_2$**

V Graf 37 je znázorněna změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek na středním poloměru pro jednotlivé výpočtové metody. V porovnání s proudovým výpočtem při 1% úniku nadbandážovou ucpávkou je úhel  $\alpha_1$  u 1D výpočtu menší o  $0,66^\circ$  nižší a u 2D výpočtu s uvažování úniků páry je úhel  $\alpha_1$  menší o  $0,72^\circ$ . Při 9% úniku nadbandážovou ucpávkou je úhel  $\alpha_1$  u 1D metody o  $0,84^\circ$  vyšší a u 2D s respektováním úniků páry je vyšší o  $0,72^\circ$ .

Tabulka parametrů vypočítaných variant								
---		1D			2D	2D + úniky		
$\rho_{SS}^{MID}$		30,00	30,00	30,00	33,74	29,968	29,969	29,790
$\rho_{SS}^{HUB}$	[%]	13,22	13,34	13,49	17,94	13,63	13,77	13,70
$\rho_{SS}^{TIP}$		42,21	42,14	42,05	43,95	40,59	40,34	39,91
$\alpha_1$	[°]	14,647	15,357	16,142	15,305	14,586	15,305	16,023
$\beta_1$	[°]	42,475	43,902	45,413	45,505	41,419	41,668	41,767
$\alpha_2$	[°]	90,800	89,854	88,766	84,699	89,796	89,111	88,647
$\beta_2$	[°]	19,500	19,500	19,500	19,530	19,530	19,530	19,530
$\xi_{rl}$	[%]	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
$\xi_{ol}$	[%]	1,00	5,00	9,00	5,00	1,00	5,00	9,00
$\xi_h$	[%]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\frac{\dot{m}_{rl}}{\dot{m}_{ol}}$	[-]	0,960	1,000	1,044	1,000	0,960	1,000	1,044

Tab. 13 Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod



Graf 37 Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek pro jednotlivé výpočtové metody

## 8 Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnání jednotlivých metod návrhu turbínových stupňů. Porovnávány byly metody „mean-line“ (1D) a „through-flow“ (2D). Práce byla zaměřena především na zkoumání odlišností jednotlivých výpočetních metod v uvažování hmotové bilance stupněm. Analyzovány byly vlivy jednotlivých metod na základní proudové parametry (reakce, průtočnost atd.), přičemž rozborů byly provedeny na třech stupních s různou reakčností a možným uvažováním vyrovnávacích otvorů (šterbin). Konkrétně šlo o přetlakový stupeň (50% reakce na stř. poloměru) a nízkoreakční stupeň s reakcí na středním poloměru 30%, přičemž nízkoreakční stupeň byl uvažován bez vyrovnávacích otvorů i s nimi.

Pro každý stupeň byly uvažovány dvě varianty. V první variantě byl navržen referenční stupeň s fixní geometrií. Následně byla tato geometrie uvažována s různými úniky páry ucpávkami, což proudový výpočet nerespektoval, ale v případě 1D došlo k ovlivnění hmotnostního průtoku rovinami oběžných lopatek. Sledována byla změna reakce.

Ve druhé variantě byl v 1D navržen referenční stupeň s určitou úrovní reakce a výstupním úhlem  $\beta_2$ . Aby bylo možné tuto reakci zachovat při změnách průtoku zapříčiněnými úniky páry ucpávkami, bylo nutné patřičně korigovat výstupní úhel  $\alpha_1$ . Sledována byla tedy změna úhlu  $\alpha_1$  v závislosti na změně průtoku.

V kapitolách 6 a 7 jsou provedeny rozborů výsledků jednotlivých výpočetních metod aplikovaných na vybrané turbínové stupně.

Výsledky ukázaly, že největší odchylky proudového výpočtu od 1D jsou u nízkoreakčního stupně s vyrovnávacími otvory. Jelikož jsou vyrovnávací otvory nadimenzovány tak, aby pobraly veškerý únik hřídelovou ucpávkou a zároveň aby bylo určité množství páry odsáváno z hlavního proudu, jsou s rostoucím únikem páry nadbandážovou ucpávkou změny proudových parametrů značné. Reakce se v případě 1% úniku liší od proudového výpočtu o 0,87%, ale v případě 9% úniku je to již 6,76%. Odchylka úhlu  $\alpha_1$  od proudového výpočtu se pohybuje v rozmezí - 0,7° až + 0,8°.

U přetlakového a nízkoreakčního stupně bez vyrovnávacích otvorů je únik hřídelovou ucpávkou vefukován zpět do hlavního proudu páry. Z tohoto důvodu není bilance průtočného množství protékaného oběžnými lopatkami tolik narušena, jako je tomu v případě stupně s vyrovnávacími otvory.

Pro úniky páry ucpávkami 1% až 9% jsou u přetlakového stupně odchylky reakce od proudového výpočtu v rozmezí + 2,17 až - 2,32%. Úhel absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek  $\alpha_1$  má odchylku od proudového výpočtu od - 0,6° do + 0,7°.

U nízkoreakčního stupně bez vyrovnávacích otvorů jsou odchylky reakce od proudového výpočtu pro úniky 1% až 9% v rozmezí + 2,75 až - 2,76%. Úhel absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek  $\alpha_1$  má odchylku od proudového výpočtu od - 0,6° do + 0,7°.

Z uvedených výsledků vyplývají rozdílnosti jednotlivých výpočetních metod. Shrnutím výše uvedeného je patrné, že odchylky proudových parametrů jednotlivých metod od proudového výpočtu budou tím větší, čím větší bude rozdíl mezi průtokem rozváděcími a oběžnými lopatkami, což je přímo spojeno s použitím vyrovnávacích otvorů.

Pro praktický návrh turbínového stupně se jeví jako vhodné řešení vylepšený 2D výpočet s uvažováním úniků páry, který dává přesnější, méně zkreslené výsledky proudových parametrů.

## 9 Seznam použitých zdrojů

- [1] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Tepelné turbíny a turbokompresory 1: Základy teorie a výpočtů*. 1. Brno, 2004. ISBN 80-7204-346-3.
- [2] KRAJÍČ, Ladislav. *Parní turbíny a příslušenství*. 1. ZČU v Plzni, 2017. ISBN 978-80-261-0731-6.
- [3] ŠKOPEK, Jan. *TEPELNÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY*. 1. ZČU v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [4] *Wikipedie: Parní turbína* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_turb%C3%ADna](https://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_turb%C3%ADna)
- [5] ŠČEGLJAJEV, Andrej Vladimirovič. *Parní turbíny 1. svazek: Teorie tepelného děje a konstrukce turbín*. SNTL, 1981.
- [6] BEČVÁŘ, Josef. *Tepelné turbíny*. Praha: SNTL, 1968. ISBN 04-213-68.
- [7] *Parní turbína* [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/par\\_turb.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/par_turb.html).
- [8] WU, Chung Hua. *A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbomachines of axial-, radial-, and mixed-flow types*. Washington: NACA, 1952. Dostupné také z: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1952/naca-tn-2604.pdf>.
- [9] SOVA, Libor. *Výpočetní modelování proudění páry v turbíně*. Plzeň, 2017. Disertační práce. ZČU v Plzni.
- [10] DENTON, John. THE EVOLUTION OF TURBOMACHINERY DESIGN (METHODS).
- [11] DENTON, J. D. Throughflow Calculations for Transonic Axial Flow Turbines, 1978.
- [12] TURINSKÝ, Miloslav. *Proudění ve stupni tepelné turbíny s relativně dlouhou lopatkou*, 1968.
- [13] Proudění. *Wikipedie* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Proud%C4%9Bn%C3%AD#Proudnice>
- [14] Návrh axiálních stupňů lopatkových strojů. *TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/19.html#stupne-s-primymi-lopatkami>
- [15] Lopatkový stroj. *TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/11.html#rychlostni-trojuhelnik>
- [16] Základní rovnice lopatkových strojů: Obvodová práce. *TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/12.html#obvodova-prace>
- [17] SOVA, Libor. *STF lekce 2: Výpočetní kód*. Doosan Škoda Power s.r.o., 2018.

## 10 Použité zkratky a symboly

$\alpha$	- úhel absolutní rychlosti	°
$\beta$	- úhel relativní rychlosti	°
$c$	- absolutní rychlost	m/s
$w$	- relativní rychlost	m/s
$u$	- obvodová rychlost	m/s
$p$	- tlak	MPa
$d$	- průměr	m
$l$	- délka lopatky	m
$n$	- otáčky	min <sup>-1</sup>
$P$	- výkon	W
$\omega$	- omega	rad/s
$r$	- poloměr	m
$h$	- entalpický spád	kJ/kg
$i$	- entalpie	kJ/kg
$I$	- rothalpie	kJ/kg
$\dot{m}$	- hmotnostní průtok	kg/s
$\rho$	- stupeň reakce	%
$v$	- měrný objem	m <sup>3</sup> /kg
$\eta$	- účinnost	-
$\varphi, \psi$	- rychlostní součinitel	kJ/kgK
$\xi$	- únik páry	%
$\varepsilon$	- odklon kvaziortogonály	°
$\mu$	- meridionální úhel	°
$a$	- práce - zrychlení	kJ/kg m/s <sup>2</sup>
HUB, MID, TIP	- pata, střed, špička	-

## 11 Seznam obrázků

Obr. 1	Definice stupně reakce.....	12
Obr. 2	Rozvinutý válcový řez rovnotlakým axiálním stupněm .....	13
Obr. 3	Rychlostní trojúhelníky rovnotlakého stupně [6] .....	13
Obr. 4	Rozvinutý válcový řez přetlakovým axiálním stupněm .....	14
Obr. 5	Rychlostní trojúhelníky přetlakového stupně s 50 % reakcí [6].....	14
Obr. 6	Různé úniky a přísávání (vefukování) u rovnotlakého stupně .....	15
Obr. 7	Přetlakový stupeň s bubnovou konstrukcí rotoru .....	16
Obr. 8	Bubnové uspořádání se štěrbinami .....	17
Obr. 9	3D model lopatek se štěrbinami .....	17
Obr. 10	1D mean-line.....	18
Obr. 11	2D - proudění po válcových plochách .....	18
Obr. 12	Princip řešení trojdimenzionálního proudění podle Wu [8].....	19
Obr. 13	Metoda streamline curvature.....	19
Obr. 14	Rychlostní trojúhelník - vstup do rotoru .....	20
Obr. 15	Rychlostní trojúhelník - výstup z rotoru .....	20
Obr. 16	Průběh expanze ve stupni parní turbíny v i-s diagramu.....	21
Obr. 17	Zatížení stupně .....	25
Obr. 18	Porovnání průběhu obvodové účinnosti pro jednotlivé typy stupňů [1].....	26
Obr. 19	Znázornění toků ve stupni.....	28
Obr. 20	Meridionální souřadný systém .....	30
Obr. 21	Proudová trubice .....	31
Obr. 22	Zrychlení v tekutině [9] .....	32
Obr. 23	Výpočetní algoritmus proudového výpočtu [9] .....	33
Obr. 24	Řez turbínovým stupněm s označenými výpočetními rovinami.....	34
Obr. 25	Znázornění rozměrů pro výpočet relativních veličin .....	38
Obr. 26	Závislost relativní vzdálenosti na relativním průtoku [17] .....	39
Obr. 27	Rychlostní trojúhelníky – odlehčený st.....	41
Obr. 28	Rychlostní trojúhelníky – přetížený st. ....	41

## 12 Seznam tabulek

Tab. 1	Přehled optimálních rychlostních poměrů a tep. spádů .....	26
Tab. 2	Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 1 .....	40
Tab. 3	Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 2 .....	44
Tab. 4	Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 1 .....	47
Tab. 5	Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 2 .....	50
Tab. 6	Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 1 .....	53
Tab. 7	Vypočtené proudové parametry na středním poloměru - var. 2 .....	56
Tab. 8	Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod .....	60
Tab. 9	Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod .....	62
Tab. 10	Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod .....	64
Tab. 11	Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod .....	65
Tab. 12	Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod .....	66
Tab. 13	Vypočtené proudové parametry jednotlivých výpočetních metod .....	67

## 13 Seznam grafů

Graf 1	Změna reakce .....	42
Graf 2	Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	42
Graf 3	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek .....	43
Graf 4	Změna rychlosti $c_1$ .....	43
Graf 5	Změna rychlosti $w_2$ .....	43
Graf 6	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	45
Graf 7	Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	45
Graf 8	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek .....	46
Graf 9	Změna absolutní rychlosti $c_1$ .....	46
Graf 10	Změna relativní rychlosti $w_2$ .....	46
Graf 11	Změna reakce .....	48
Graf 12	Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	48
Graf 13	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek .....	49
Graf 14	Změna absolutní rychlosti $c_1$ .....	49
Graf 15	Změna relativní rychlosti $w_2$ .....	49
Graf 16	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	51
Graf 17	Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	51
Graf 18	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek .....	52



Graf 19	Změna absolutní rychlosti $c_1$ .....	52
Graf 20	Změna relativní rychlosti $w_2$ .....	52
Graf 21	Změna reakce .....	54
Graf 22	Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek.....	54
Graf 23	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek .....	55
Graf 24	Změna absolutní rychlosti $c_1$ .....	55
Graf 25	Změna relativní rychlosti $w_2$ .....	55
Graf 26	Průběh reakce .....	57
Graf 27	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek .....	57
Graf 28	Změna úhlu relativní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek.....	58
Graf 29	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z oběžných lopatek .....	58
Graf 30	Změna absolutní rychlosti $c_1$ .....	59
Graf 31	Změna relativní rychlosti $w_2$ .....	59
Graf 32	Změna reakce pro jednotlivé výpočtové metody .....	61
Graf 33	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek pro jednotlivé výpočtové metody .....	62
Graf 34	Změna reakce pro jednotlivé výpočtové metody .....	64
Graf 35	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek pro jednotlivé výpočtové metody .....	65
Graf 36	Změna reakce pro jednotlivé výpočtové metody .....	66
Graf 37	Změna úhlu absolutní rychlosti na výstupu z rozváděcích lopatek pro jednotlivé výpočtové metody .....	67



