

3D CFD simulace proudění v turbinovém stupni

Bc. Petr Toms

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Hyhlík Ph.D.

Abstrakt

Tato studie se zabývá vlivem přesahu délky oběžné lopatky vůči rozváděcí na účinnost stupně. Přesahem se rozumí rozdíl mezi špičkovými poloměry náběžné hrany lopatky a odtokové hrany rozváděcí lopatky. Má umožnit, aby hlavní proud pracovního média po opuštění rozváděcí mříže s co nejmenšími ztrátami natekl pod bandáž oběžné lopatky. Ze závislosti účinnosti na přesahu bude odvozeno doporučení na jeho optimální hodnotu.

Klíčová slova

Turbinový stupeň, CFD, Fluent, rozváděcí lopatky, oběžné lopatky, účinnost

1 Úvod

Tento článek je věnován problému proudění vodní páry v turbinovém stupni a jeho účinnosti, která zde bude ovlivňována rozdílnou velikostí přesahu délky oběžné lopatky vůči délce rozváděcí lopatky. Přesahem se rozumí rozdíl mezi špičkovými poloměry náběžné hrany oběžné lopatky a odtokové hrany rozváděcí lopatky. Tento přesah má umožnit, aby hlavní proud pracovního média, v našem případě vodní pára, po opuštění rozváděcích lopatek s co nejmenšími ztrátami natekl pod bandáž oběžné lopatky. Budou zde provedeny tři výpočty s různými přesahy oběžné lopatky, z jejichž výsledků budou vyhodnoceny účinnosti stupně. Ze závislosti účinnosti na velikosti přesahu bude odvozena jeho optimální hodnota.

Daný problém bude řešen pomocí numerické simulace, která bude provedena pomocí výpočetního programu Fluent, ve kterém bude i vyhodnocována.

2 Vysvětlení pojmů

V následujících řádcích budou vysvětleny základní pojmy z odvětví turbinového názvosloví, které budou v tomto článku použity a umožní tak lepší porozumění nejen článku, ale i celého problému, který je zde řešen.

Turbinový stupeň- část turbíny, která se skládá z rozváděcího (nepohyblivého) lopatkového kola a oběžného (pohyblivého) lopatkového kola (na Obr.2 je znázorněn model turbinového stupně, který je zde řešen) (obr.1)

Rozváděcí lopatka- část rozváděcího lopatkového kola, které se nepohybuje a slouží k usměrnění proudu do oběžného lopatkového kola(obr.1)

Oběžná lopatka- součást oběžného lopatkového kola, které se pohybuje a slouží k převodu kinetické energie proudu v mechanickou práci, konanou oběžnými lopatkami stupně(obr.1)

Mezilopatkový kanál- prostor vytvořený sousedními lopatkami

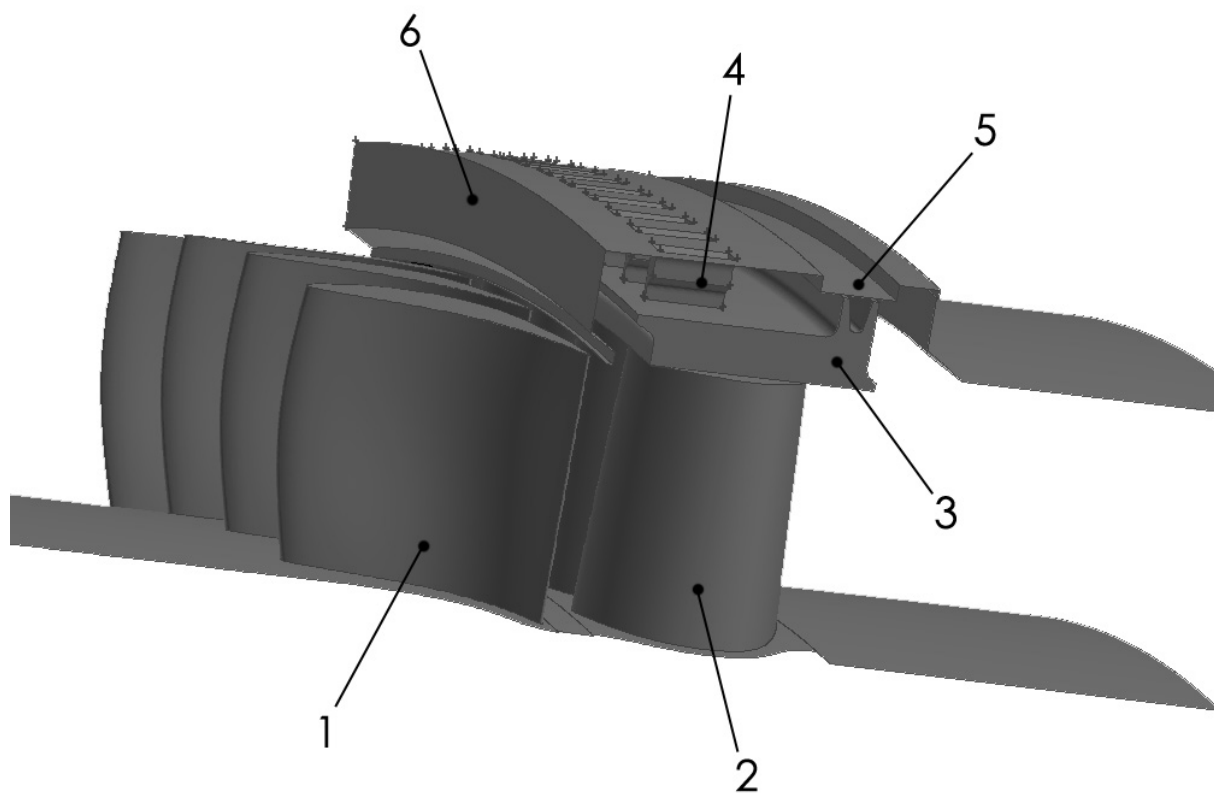
Přesah- rozdíl mezi špičkovými poloměry náběžné hrany oběžné lopatky a odtokové hrany rozváděcí lopatky (Obr.5)

Bandáž- je pohyblivý prstenec, který se nachází na špičce oběžné lopatky a je s ní pevně spojen. Zabraňuje přetékání páry přes okraj lopatky. Toto opatření zlepšuje proudění páry v turbíně a zvyšuje její účinnost(obr.1)

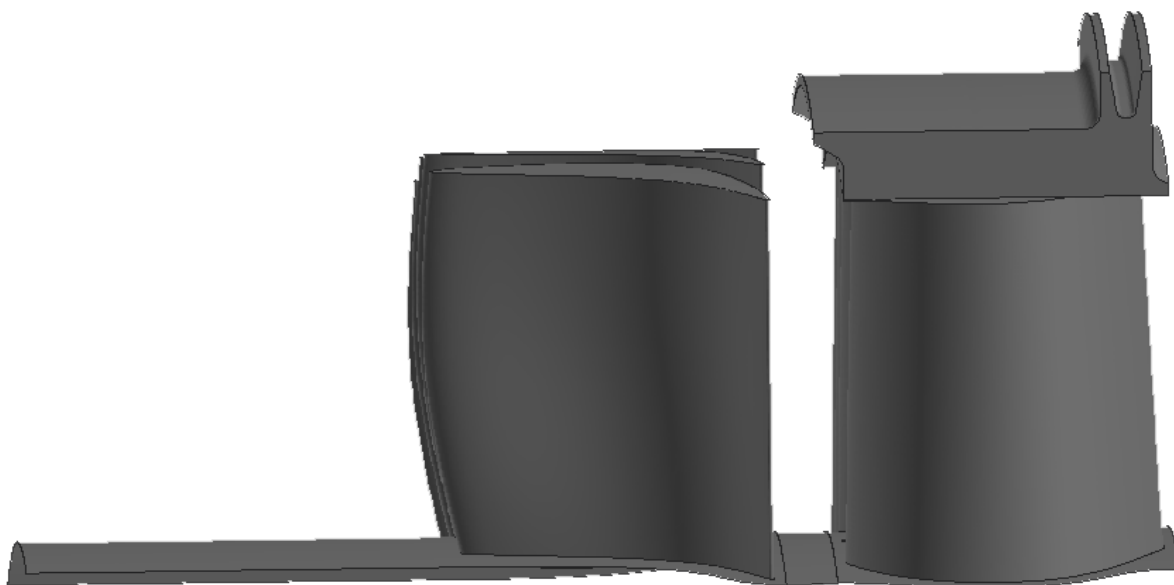
Nadbandážový prostor- prostor mezi bandáží a stěnou skříně turbíny

Nadbandážová ucpávka- nachází se na stěně turbinové skříně a slouží k částečnému ucpání prostoru mezi oběžnou lopatkou s bandáží a skříní turbíny. (obr.1)

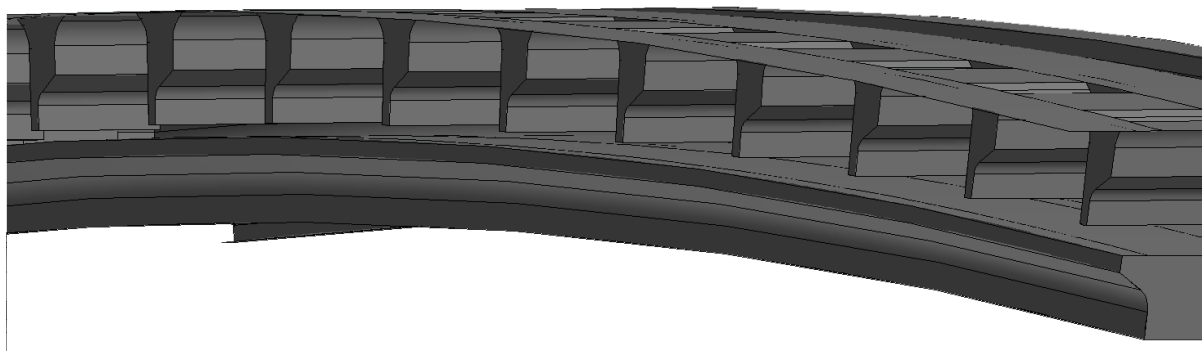
Aerodynamické tangenciální brzdíčky- nacházejí se v nadbandážové prostoru, jsou nepohyblivé a slouží k usměrnění proudu páry do nadbandážového prostoru (Obr.1 a 3)



Obrázek 1- Výpočetní model (1-rozváděcí lopatky, 2-oběžné lopatky, 3-bandáž, 4-aerodynamické tangenciální brzdíčky, 5-nadbandážová ucpávka, 6-stěna turbinové skříně)



Obrázek 2- Turbinový stupeň s nadbandážovou ucpávkou



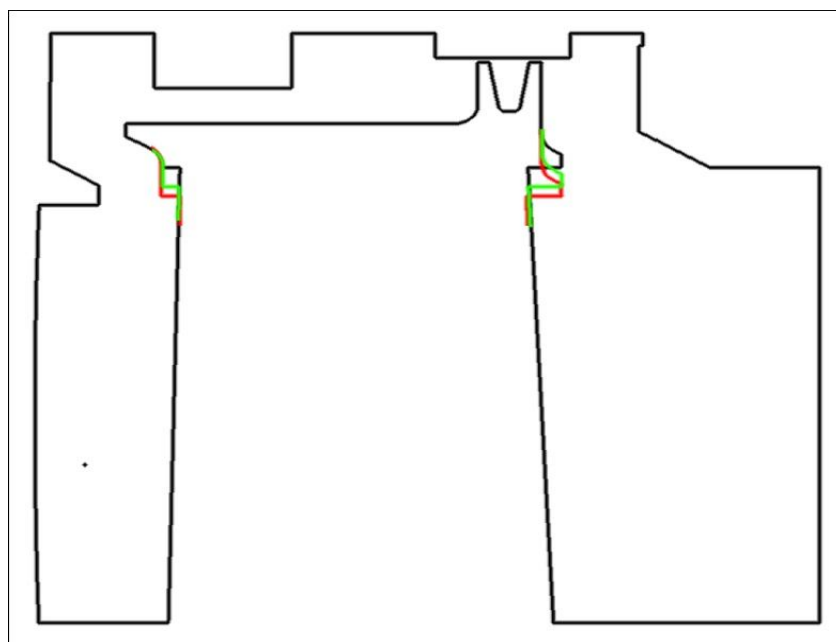
Obrázek 3- Tangenciální brzdičky nad nadbandážovou ucpávkou

3 Cíl práce

Cílem této práce je provést výpočet a vyhodnocení účinností tří geometrických variant, které se od sebe liší velikostí přesahu. Na základě vypočtených účinností bude doporučena hodnota ideální velikosti přesahu.

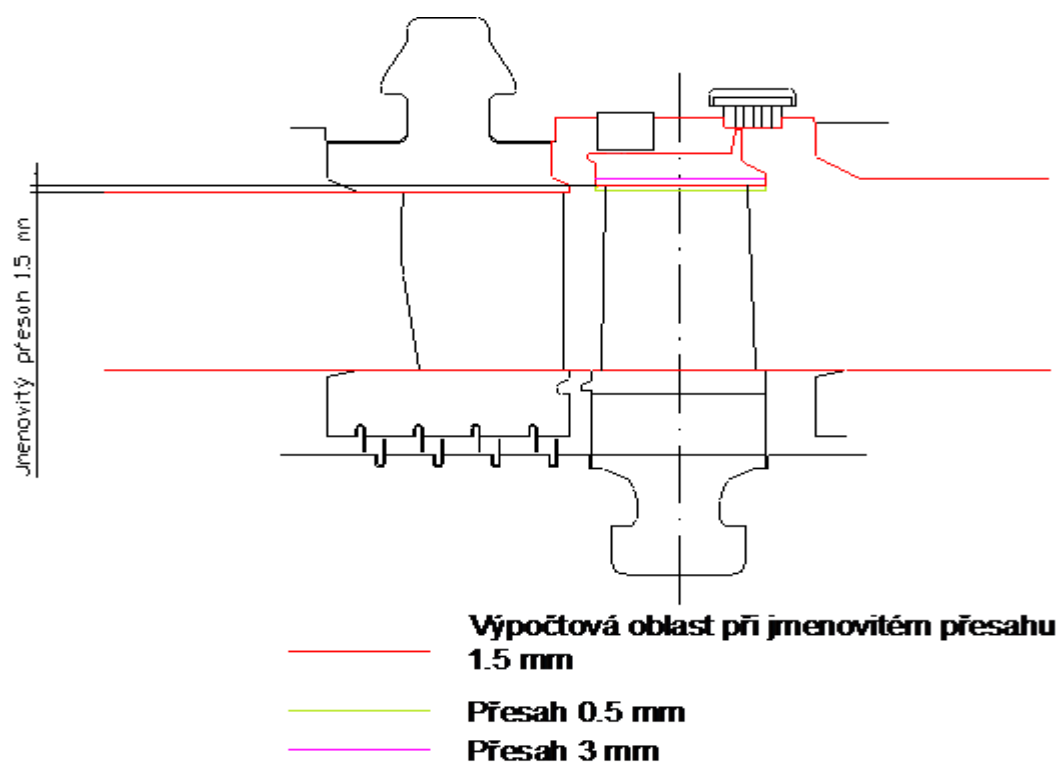
Výpočtová oblast (obr.1) bude obsahovat průtočnou část stupně s lopatkami a nadbandážový prostor, ve kterém se bude nacházet řada aerodynamických tangenciálních brzdiček a nadbandážové ucpávka.

Počty lopatek pro CFD simulaci jsou v poměru 4 : 5, tak aby zůstal zachován navržený tvar kanálu. Z celého kola lopatkových mříží se jedná o úsek 15°.



Obrázek 4- Geometrické změny v jednotlivých variantách

(var č.1-zeleně, var č.2- červeně, var č.3-černě)



Obrázek 5- varianty s vyobrazením přesahu

4 Okrajové podmínky, popis výpočtových variant a vyhodnocení kvality výpočtových sítí

V úloze, zakládající se na reálném problému z praxe, se bude simulovat proudění páry nejen samotným turbinovým stupněm, ale bude zde simulováno i proudění páry v nadbandážovém prostoru s aerodynamickými tangenciálními brzdíčkami a nadbandážovou ucpávkou (obr.1). Tato část se nachází nad bandáží, která je pevně spojena s oběžnými lopatkami a tvoří na něm uzavřený prstenec (obr.2), který vůči ostatním částem rotuje.

4.1 Varianty

Rozdíly ve variantách

V této práci budou řešeny 3 variant, které se od sebe liší velikostí přesahu oběžné lopatky vůči rozváděcí lopatce. Výpočetní oblast se skládá ze tří částí. První je část se čtyřmi rozváděcími lopatkami a volnou částí před nimi, která slouží k ustálení vstupního proudu páry. Tato část je pro všechny varianty stejná jak svou geometrií, tak počtem buněk, ve výpočetní oblasti. Druhá část se skládá z pěti oběžných lopatek, ty se v každé variantě liší svou výškou, takže je v každé variantě rozlišná geometrie a liší se zde i počet buněk ve výpočetní oblasti. Poslední třetí část se skládá z mezikusu, který se nachází mezi rozváděcími a oběžnými lopatkami, nadbandážovým prostorem s 11 tangenciálními aerodynamickými brzdíčkami, bandáží a nadbandážovou ucpávkou, a následnou částí za oběžnými lopatkami, kde se nachází vyhodnocovací rovina. Tato část se liší ve variantách jak geometrií, tak i počtem buněk, stejně jako část s oběžnými lopatkami. Rozlišná geometrie se nachází pouze v oblasti bandáže, oblast, kde se nachází vyhodnocovací rovina, je geometricky stejná ve všech variantách. Počty buněk v jednotlivých částech výpočtového modelu a celkový počet buněk výpočtového modelu jsou uvedeny v tabulce č.1. V tabulce č.2 je shrnuta kvalita výpočtových sítí.

Varianta č.1

Varianta č.1 je varianta s přesahem 1,5mm oběžné lopatky vůči rozváděcí lopatce. Je to základní varianta, ze které se zde bude vycházet. A bude sloužit k následnému porovnání s ostatními variantami

Varianta č.2

Varianta č.2 je varianta s přesahem 0,5mm oběžné lopatky vůči rozváděcí. V této variantě byla výška oběžné lopatky snížena o 1mm, vůči variantě č.1., naopak byla zvýšena část bandáže nad oběžnou lopatkou.

Varianta č.3

Varianta č.3 je varianta s přesahem 3,0mm oběžné lopatky vůči rozváděcí. V této variantě byla výška oběžné lopatky zvýšena o 1,5mm, vůči variantě č.1., zde už byla nejen snižená část bandáže, ale musela být i upravena část bandáže na odtokové hraně.

Tabulka č. 1 – Počet buněk jednotlivých variant

Varianta	rozváděcí lopatky	oběžné lopatky	část s bandáží	počet buněk
č. 1 1,5mm	4449312	3347800	6207300	14004412
č. 2 0,5mm		3847690	6231060	14528062
č. 3 3,0mm		3736040	5926140	9662180

Tabulka č. 2 – Kvalita výpočtových sítí

rozváděcí lopatky	4449312	[%]	místo s nejhorší buňkou	
EquiAngle Skew >0,3	33650	0,76	v mezilopátkovém kanále	0,52
Aspect Ratio >8	124700	2,8	na odtokové hraně	9,467
Size chance >2	280	0,01	na odtokové hraně	2,11

Varianta	č.1		č.2		č.3	
Oběžné lopatky	3347800	[%]	3847690	[%]	3736040	[%]
EquiAngle Skew >0,3	66221	1,98	65671	1,71	59210	1,58
Aspect Ratio >8	145065	4,33	137224	3,57	128304	3,43
Size chance >2	6454	0,19	27274	0,71	77471	2,07

Varianta	č.1		č.2		č.3	
část s bandáží	6207300	[%]	6231060	[%]	5926140	[%]
EquiAngle Skew >0,3	247943	3,99	254837	4,09	262674	4,43
Aspect Ratio >8	109014	1,76	109014	1,75	109014	1,84
Size chance >2	11571	0,19	12066	0,19	11571	0,2

Nejhorší buňka

Varianta	č.1		č.2		č.3	
Oběžné lopatky	pozice		pozice		pozice	
EquiAngle Skew	u středu kanálu	0,684	u středu kanálu	0,766	střed kanálu	0,919
Aspect Ratio	náběžné hrany	17,86	u středu kanálu	17,8	pressure side	18,44
Size chance	u středu kanálu	2,2	u středu kanálu	2,434	suction side	2,4

Varianta	č.1		č.2		č.3	
část s bandáží	pozice		pozice		pozice	
EquiAngle Skew	nadbandáž. u.	0,703	nadbandáž. u.	0,703	u "zobáčku"	0,818
Aspect Ratio	konec modelu	9,191	konec modelu	9,191	konec modelu	9,191
Size change	u tang.brzd	6,48	u tang.brzd	6,48	u tang.brzd	6,48

4.1.1 Hodnotící kritéria

Sítě byly hodnoceny podle následujících tří kritérií EquiAngle Skew, Aspect Ratio a Size change.

EquiAngle Skew – šikmost buněk – kritérium hodnotí šikmost buněk na rozsahu $<0; 1>$, kde 0 je nejlepší a 1 nejhorší. Přijatelné hodnoty tohoto kritéria se nacházejí v intervalu $<0;0,65>$.

Aspect Ratio – protáhlost buněk – kritérium hodnotí protáhlost buněk na rozsahu $<0; 20>$, kde 0 je nejlepší a 20 nejhorší. Nejprotáhlejší buňky by měly být v mezní vrstvě u obtékaného tělesa. Přijatelné hodnoty tohoto kritéria se nacházejí v intervalu $<0; 10>$.

Size change – změna velikosti buňky – kritérium hodnotí změnu velikosti buňky vůči sousedním buňkám.

4.2 Okrajové podmínky

Všechny výpočtové varianty budou počítány se stejnými okrajovými podmínkami a vlastnostmi proudícího média.

- vstup:
 - celkový tlak = 13,3630MPa
 - celková teplota na vstupu = 529,53°C = 802,68K
- výstup:
 - celkový tlak 12,04155MPa
- médium - přehřátá pára, kterou lze nahradit ideálním plynem s těmito parametry:
 - molekulová hmotnost = 19,854 kg.kmol⁻¹
 - měrné teplo při stálém tlaku = 1850.3 J.kg⁻¹.K⁻¹
 - dynamická viskozita = 2.9957*10⁻⁵ N.s.m⁻²
 - tepelná vodivost = 0.08034 W.m⁻¹.K⁻¹

Otáčky rotoru 3000ot.min⁻¹.

4.3 Nastavení výpočtového modelu

Nastavení výpočtového programu Fluent je uvedeno v Tabulce č.3

Tabulka č. 3 – Nastavení výpočtového programu Fluent

Model	Nastavení
Dimenze	3D
Čas	stacionární
Model turbulence	Spalart-Allmaras

Model turbulence pro danou úlohu byl vybrán s ohledem na výsledky, které byly uvedeny v disertační práci Ing. Zdeňka Jůzy Ph.D. [1].

Pro simulaci vzájemného pohybu oběžných lopatek vůči rozváděcím lopatkám byla využita metoda sliding mesh. U této metody nedochází na hranicích jednotlivých částí k průměrování hodnot jako např. u metody mixing plane, dochází k zachování úplavů a vírů, které přecházejí přes hranice částí.

5 Teorie pro daný problém

Protože stupeň se nachází uvnitř průtočné části vysokotlakého turbinového dílu (není poslední), bude vyhodnocována účinnost s předpokládaným plným využitím výstupní rychlosti v následujícím stupni (TT = Total-to-Total):

Pro ideální plyn ($C_p = \text{konst.}$):

$$\eta_{TT} = \frac{T_{0t} - T_{2t}}{\left[T_{0t} - T_{2is} - \frac{c_2^2}{2 \cdot C_p} \right]} \quad (1)$$

kde

T_{0t} celková teplota na vstupu
 T_{2t} celková teplota na výstupu
 T_{2is} isoentropická statická teplota na výstupu
 c_p měrné tepelo při stálém tlaku
 c_2 absolutní rychlost na výstupu

Isoentropická statická teplota je pak počítána z (2)

$$T_{2is} = T_{0t} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (2)$$

kde

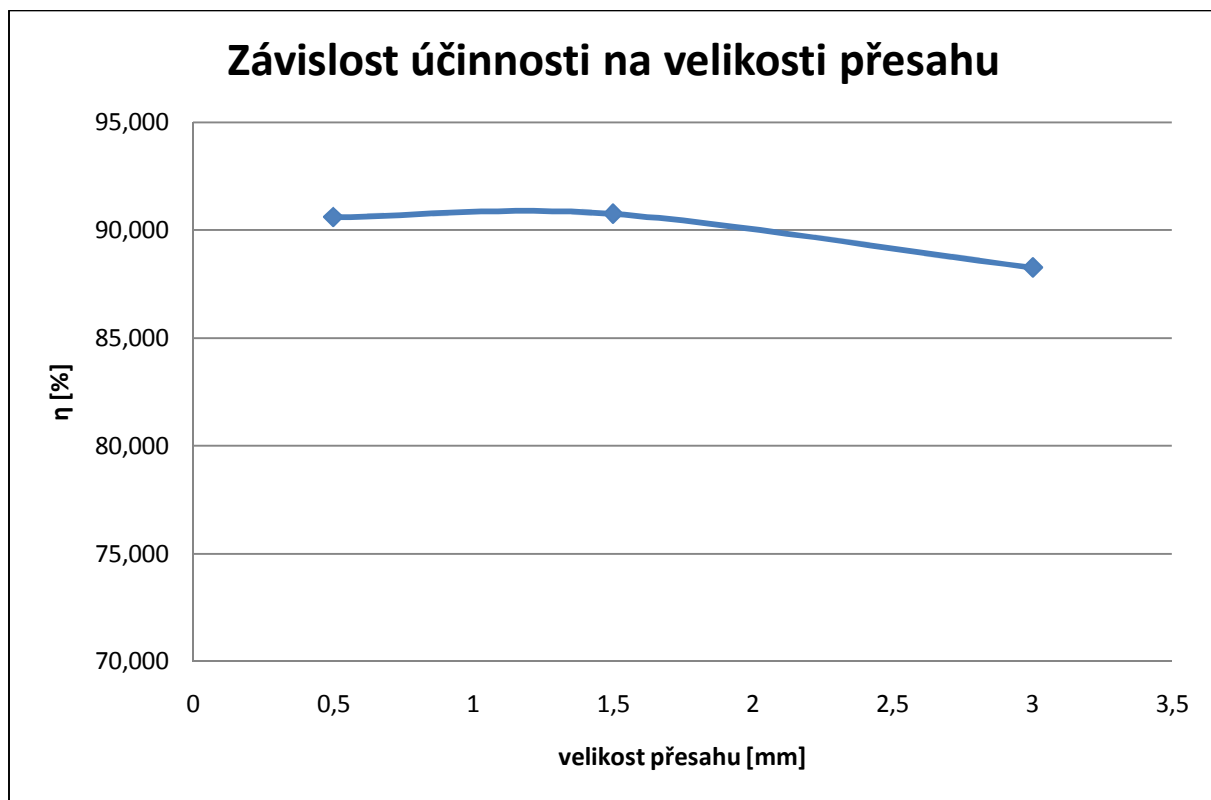
p_1 statický tlak na vstupu
 p_2 statický tlak na výstupu

6 Číselné a grafické vyhodnocení výsledků

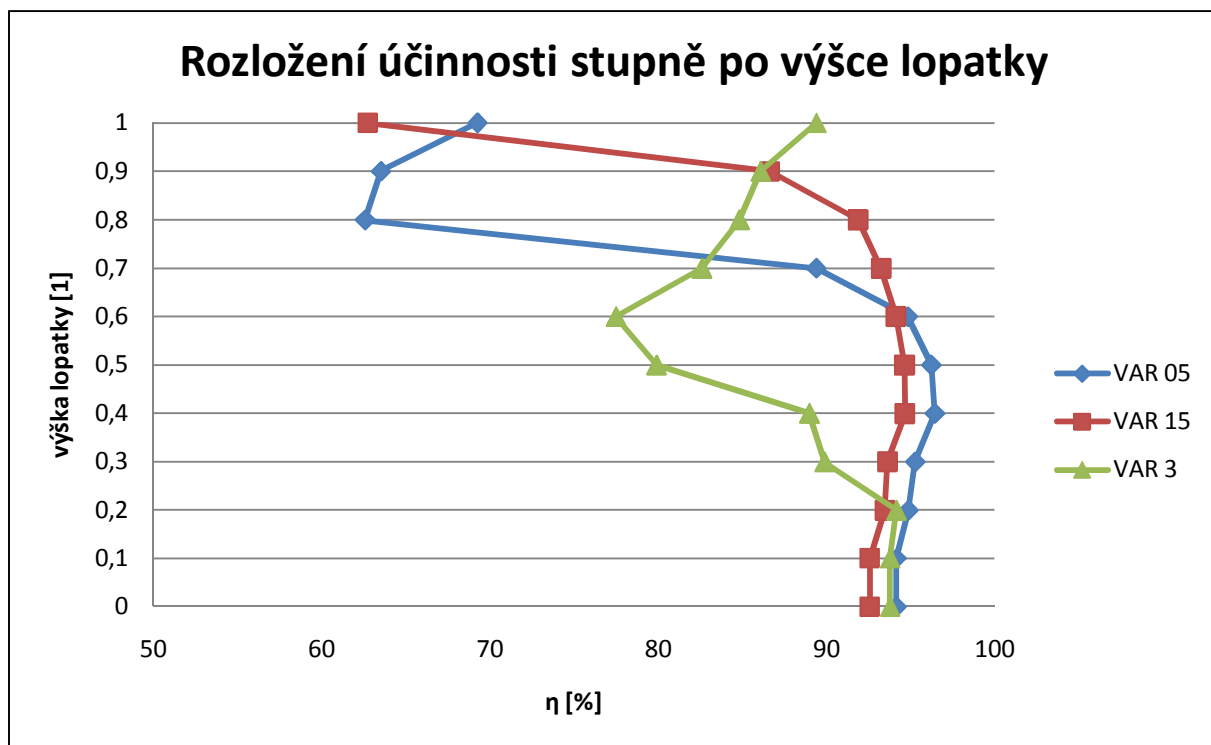
Cílem této úlohy bylo provést numerickou simulaci prodění v turbinovém stupni na několika variantách, které se od sebe lišily velikostí přesahu. Z těchto výpočtů byla následně vyhodnocena účinnost turbinového stupně podle vztahu (1). Účinnosti jednotlivých variant jsou uvedeny v Tabulce č.4

Tabulka č. 4- účinnost stupně jednotlivých variant

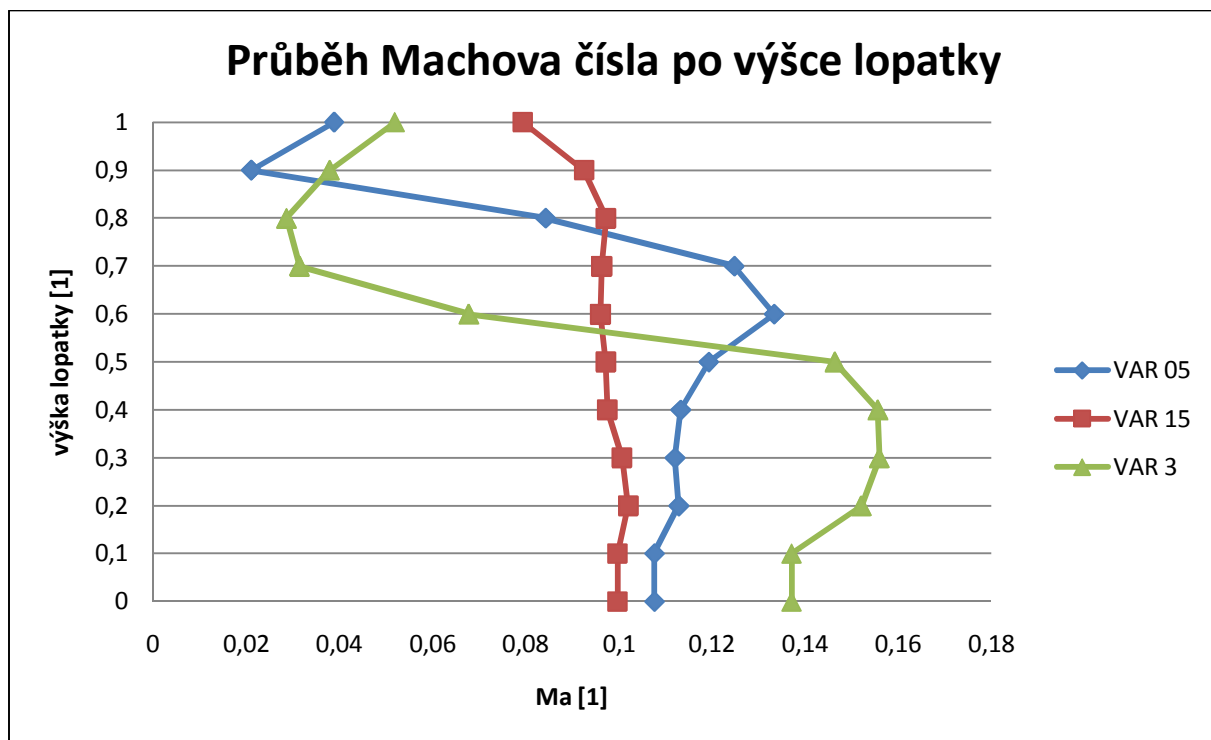
Velikost přesahu [mm]	η [%]
0,5	90,598
1,5	90,754
3,0	88,273



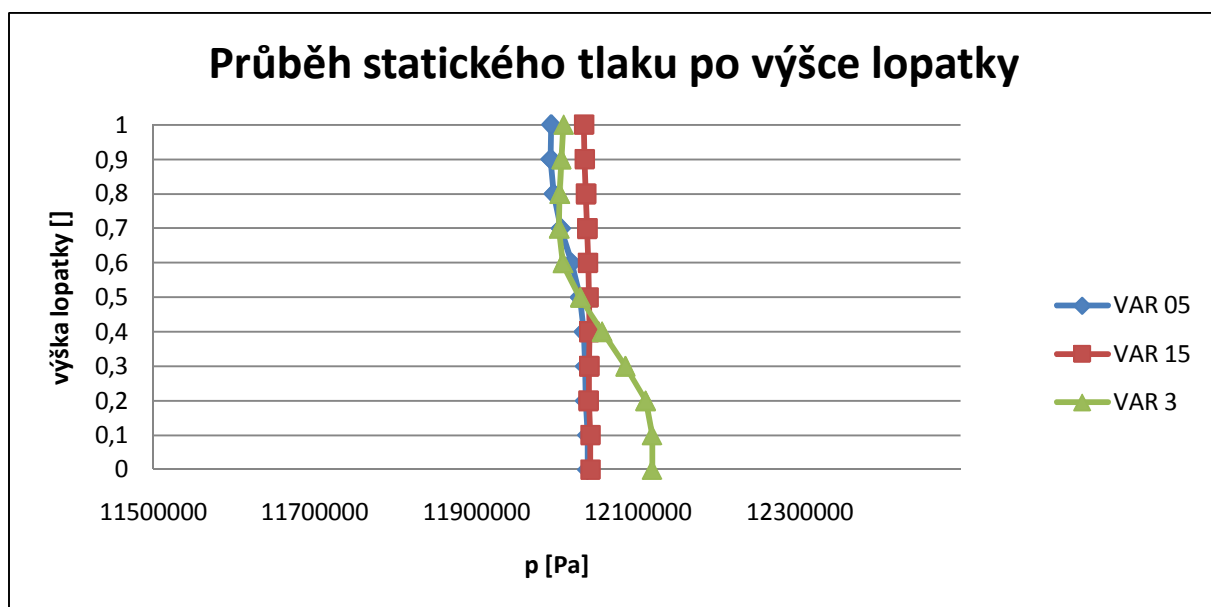
Obrázek 6- Závislost účinnosti na velikosti přesahu



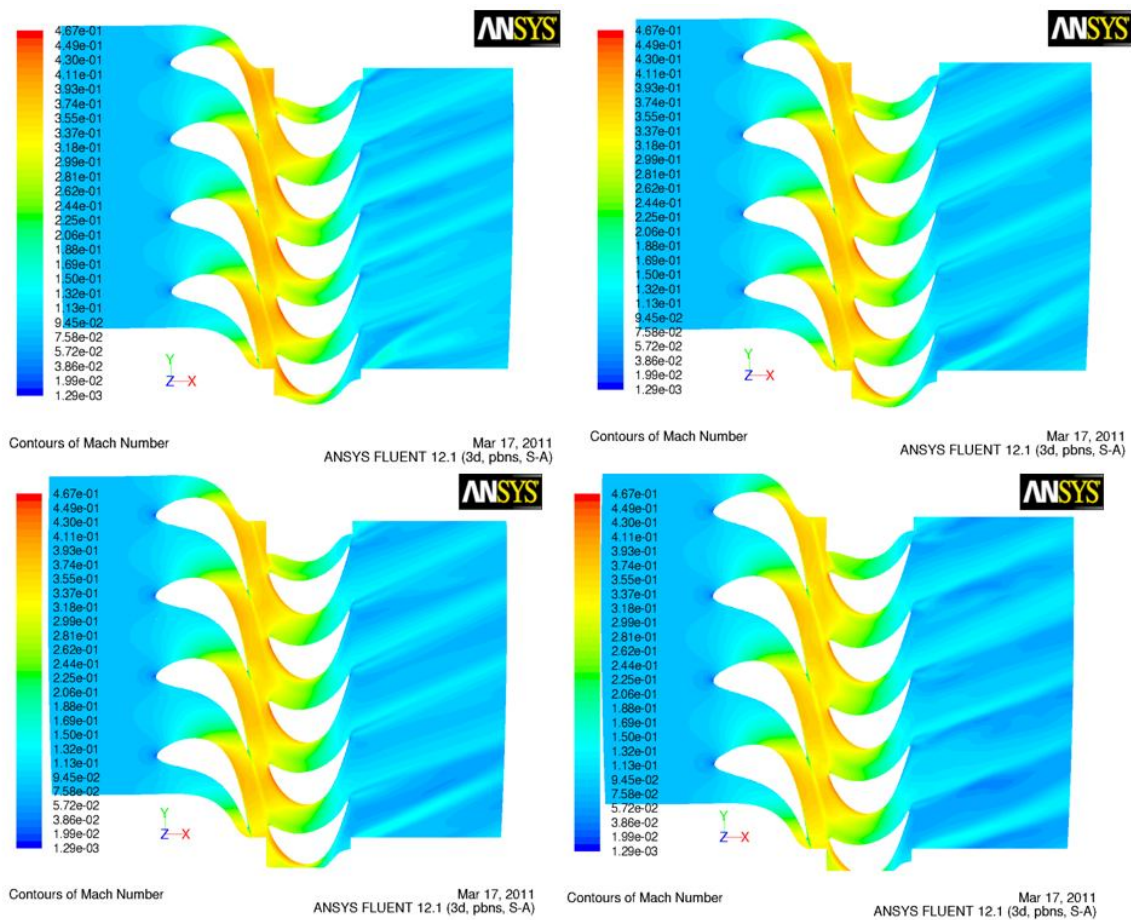
Obrázek 7- Rozložení účinnosti stupně po výšce lopatky



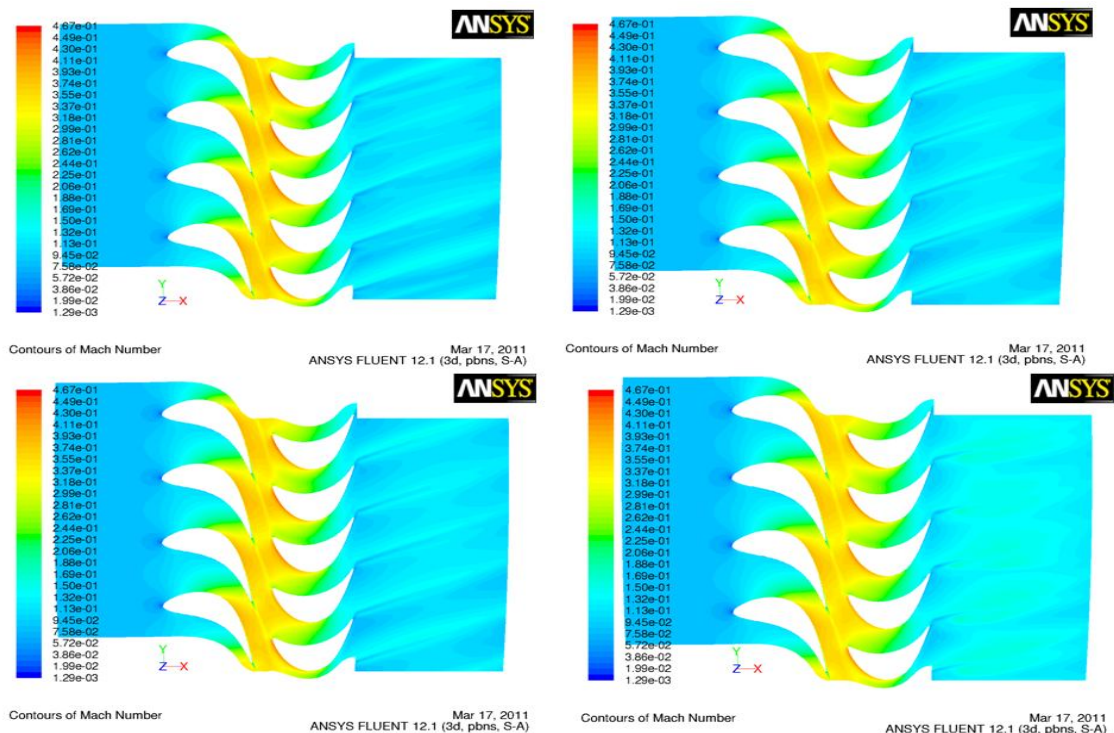
Obrázek 8- Průběh Machova čísla po výšce lopatky



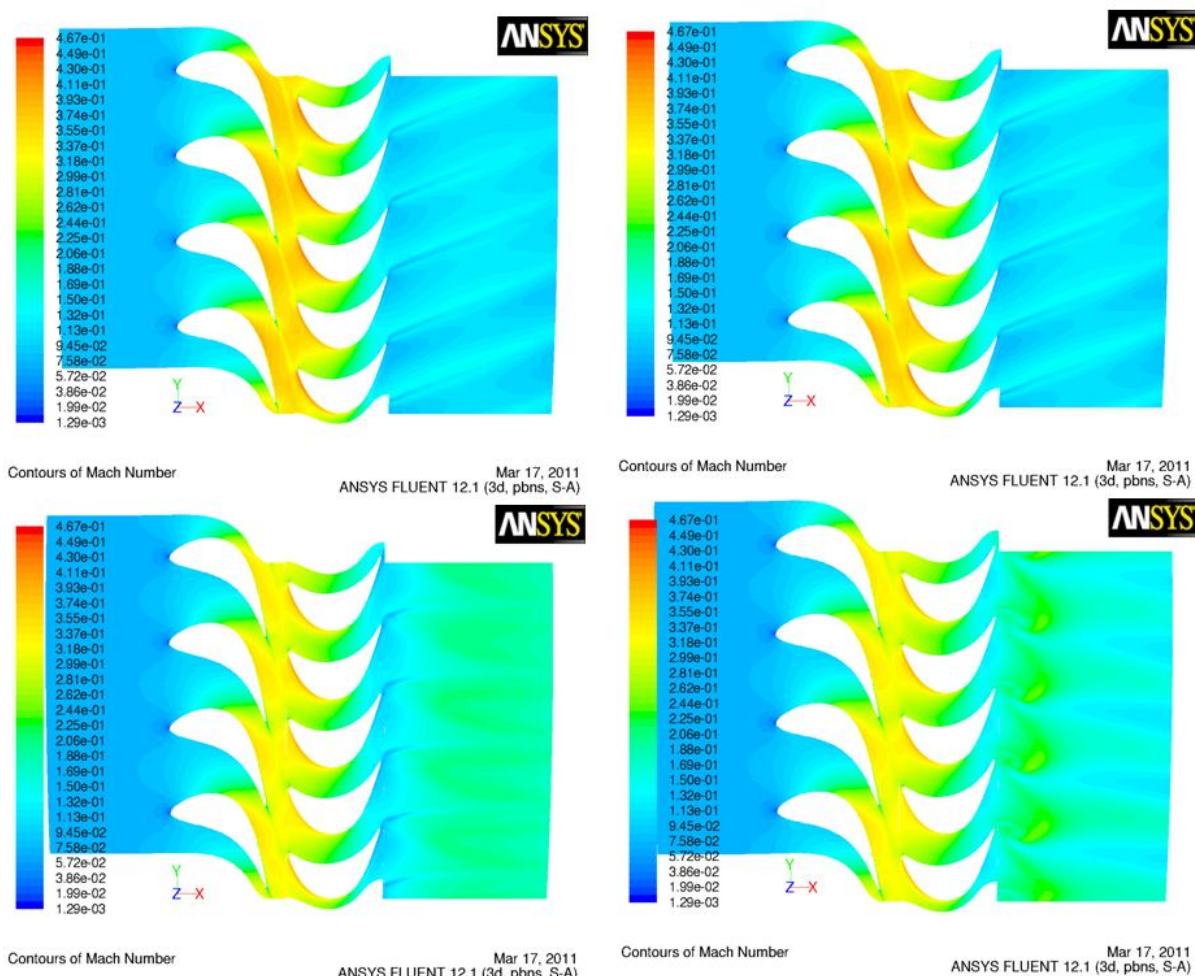
Obrázek 9- Průběh statického tlaku po výšce lopatky



Obrázek 10- Průběh Machova čísla v řezech varianty č.1



Obrázek 11- Průběh Machova čísla v řezech varianty č.2



Obrázek 12- Průběh Machova čísla v řezu varianty č.3

7 Vyhodnocení výsledků

Z Tabulky č.4 je vidět, že varianta s nejvyšší účinností, která byla počítána, je varianta č.1 s velikostí přesahu 1,5mm.

Na následujících obrázcích, kde je vyobrazen průběh účinnosti (obr.5), Machova čísla (obr.6) a statického tlaku (obr.7) je vidět, že ve špičkové části lopatky dochází k odtržení proudu a tlakovým ztrátám, které způsobují daný pokles účinnosti

Na obrázcích 10 až 12 je vidět na několik řezech průběh Machova čísla. Řezy se nacházejí v rovinách 0,2; 0,4; 0,6 a 0,8 velikosti oběžné lopatky. Na obr.10 vidíme, jak proudové pole není narušováno skoro žádnými víry, až na posledním, kde je vyobrazen řez nejblíže špičce lopatek. U ostatních variant je vidět, že víry jsou významnějšího charakteru a velkým způsobem ovlivňují proudění za oběžnými lopatkami, což má za následek snížení účinnosti turbínového stupně.

8 Závěr

Cílem této práce bylo provést numerickou simulaci proudění v turbínovém stupni v několika variantách, které se od sebe lišily velikostí přesahu délky oběžné lopatky vůči rozváděcí a zjistit jaký má velikost přesahu vliv na účinnost stupně. Byly zde spočteny 3 varianty s přesahy o hodnotách 0,5mm, 1,5mm a 3mm. Ze spočítaných variant se ukázala jako nejlepší výchozí varianta č.1 s přesahem o velikosti 1,5mm. Jako nejhorší se ukázala varianta

č.3, kde účinnost byla nejnižší. Z grafu závislosti účinnosti na velikosti přesahu je ovšem vidět, že maximální hodnota se nachází mezi hodnotami přesahu (5; 10), tudíž by bylo potřeba spočítat další varianty, které by ve výsledku mohly mít lepší účinnost než je dosavadní užívaná varianta.

S ohledem na výpočetní čas, který se zde pohyboval kolem 120 hodin na výpočet jedné varianty (neuvažuje se čas, který je potřeba k přípravě geometrie a výpočtové sítě), bych doporučil, aby další varianty měly hodnoty přesahu 10mm a 22,5mm, tyto varianty se nacházejí svými hodnotami mezi již spočítanými variantami. Tím by se dala lépe vyhodnotit závislost účinnosti na velikosti přesahu.

Seznam symbolů

p	statický tlak	[Pa]
Ma	Machovo číslo	[1]
T	teplota	[K]
κ	Poissonova konstanta	[1]
η	účinnost	[%]
c	absolutní rychlost	[m.s ⁻¹]
c_p	měrná tepelná kapacita při stálém tlaku	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]

Seznam použité literatury

- [1] JÚZA, Zdeněk. Numerická simulace v turbínovém stupni s nadbandážovou ucpávkou. 2008. ZČU. Disertační práce.
- [2] TOMS, Petr. Numerické řešení proudění v turbínovém stupni. 2009. ČVUT. Bakalářská práce.
- [3] CITAVÝ, Jan, NOŽIČKA, Jiří. *Lopatkové mříže*. 2003.
- [4] ŠIMKA, Zdeněk. Specifikace studie vlivu přesahu oběžné lopatky na účinnost stupně VT3 turbíny 250 MW. Škoda POWER a.s. 2008.
- [4] FLUENT Version 12 User Manual [online]. Dostupné na WWW: <http://man.fs.cvut.cz/>
- [5] GAMBIT Verison 2.4 User Manual [online]. Dostupné na WWW: <http://man.fs.cvut.cz/>