

Studentská tvůrčí činnost 2009

Numerické řešení proudového pole v kompresorové lopatkové mříži

Balcarová Lucie

Vedoucí práce: Prof. Ing. P. Šafařík, CSc. a Ing. T. Hyhlík, PhD.

Numerické řešení proudového pole v kompresorové lopatkové mříži

Lucie Balcarová

1. Úvod

Cílem práce je připravit výpočtovou síť pro řešení dvourozměrného proudového pole stlačitelné tekutiny v kompresorové lopatkové mříži, formulovat okrajové podmínky pro výpočet proudového pole, provést výpočet a následně zhodnotit dosažené výsledky.

2. Postup

Z Ústavu termomechaniky AVČR, v.v.i. byla obdržena dokumentace [1], která sloužila jako podklad pro vytvoření prvotní geometrie lopatkové mříže v programu Gambit. Bylo zapotřebí importováním dat vykreslit profil lopatkové mříže, umístit ho do kanálu o konstantní rozteči a výpočtovou oblast vysítovat. Hustota sítě se postupně měnila od hrubší k jemnější, případně se zjemňovaly problémové oblasti v blízkosti profilu.

Takto vytvořená a převedená data byla dále zpracována v programu Fluent [2] ve 2D.

Po nastavení okrajových podmínek (tlaky, teplota, vstupní úhel) byla snaha přiblížit se co nejvíce reálným podmínkám.

3. Geometrie

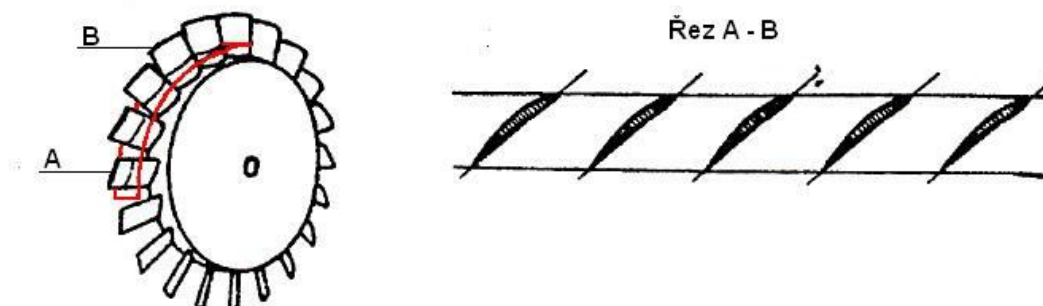
Pro vykreslení geometrie a vytvoření výpočtové sítě byl použit program Gambit.

3. 1 Definice a klasifikace lopatkových mříží

Lopatkovou mříž získáme, jestliže provedeme na daném poloměru lopatkového kola řez, který dále rozvineme do roviny. Vzniklé profily jsou od sebe vzdáleny o stejnou rozteč a nastaveny pod stejným úhlem (viz obr. 1) [3]. Mají zpravidla aerodynamický tvar.

Lopatkovou mříž lze definovat pomocí hlavních geometrických veličin: tvarem profilu, úhlem nastavení profilu v mříži, roztečí. A lze jí přiřadit aerodynamické veličiny: vektor vstupní a výstupní rychlosti a ztráty.

Použitá mříž odpovídá přibližně mřížím statorových řad u náboje aerodynamicky zatížených osových stupňů kompresorového typu.



Obr. 1 Řez lopatkovým kolem.

Rozeznáváme dvě základní úlohy teorie lopatkových mříží [3]: přímou (PÚ) a nepřímou úlohu (NÚ).

PÚ lze řešit experimentálně (EMT = experimentální mechanika tekutin) nebo počítačově (CFD = Computational Fluid Dynamics = počítačová mechanika tekutin). Přičemž obě metody spolu navzájem souvisejí a doplňují se. Při řešení PÚ je lopatková mříž zadána již zmíněnými geometrickými veličinami a aerodynamickými charakteristikami.

NÚ je obrácenou úlohou PÚ, kdy pro zadaný rychlostní trojúhelník (zakřivení proudu) a rozložení rychlosti profilu, hledáme co nejvhodnější geometrické veličiny profilu a mříže s minimálními ztrátami.

Z funkčního hlediska lze rozdělit lopatkové stroje na 2 typy:

- kompresorové mříže – mříže, ve kterých dochází ke zpomalení tekutiny mezi vstupem a výstupem,
- turbínové mříže – mříže, ve kterých je proudění urychleno, dají se dále rozdělit na přetlakové a rovnotlaké.

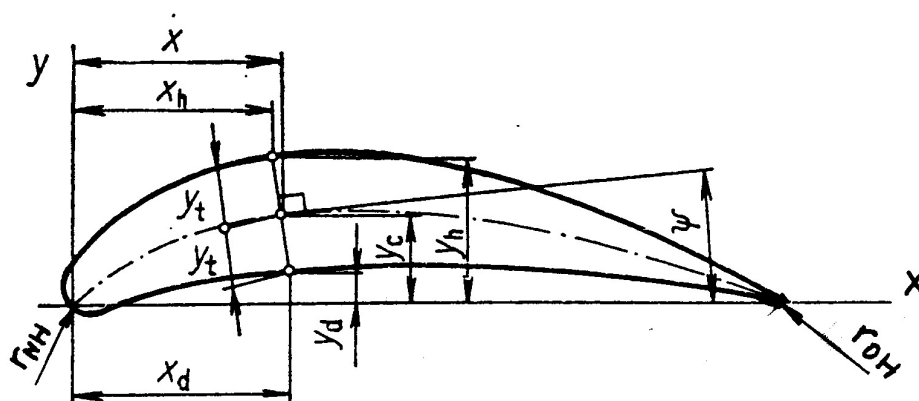
Proudění lopatkovou mříží je převážně prostorové, nestacionární a proudící tekutina je vazká a stlačitelná.

3. 2 Zdrojová data a geometrické veličiny lopatkové mříže [1]

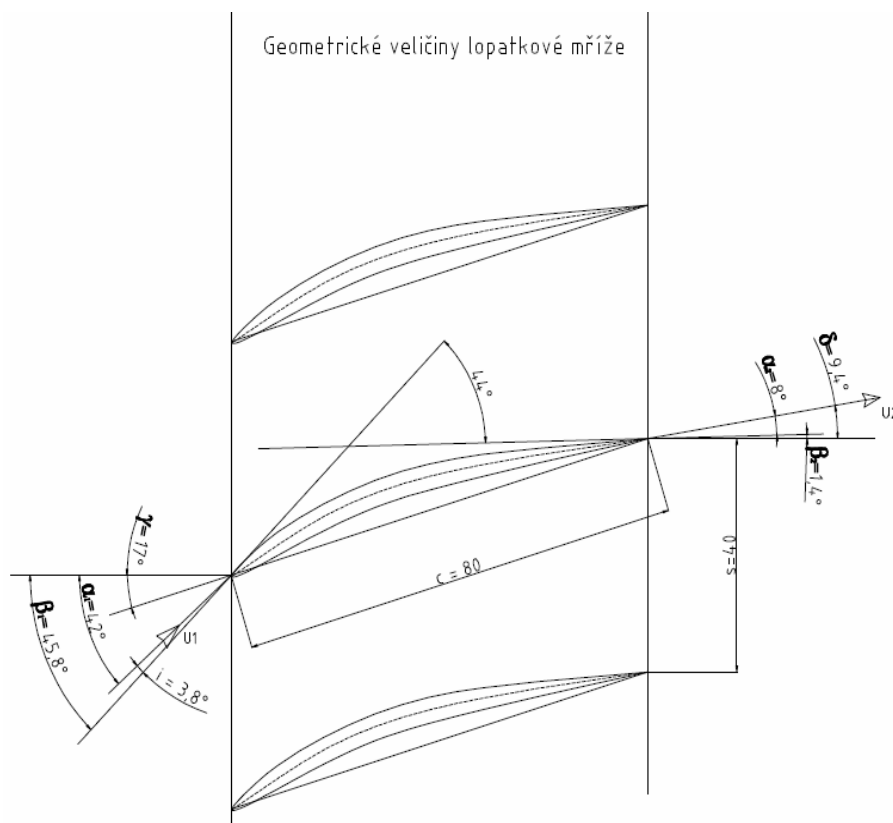
Každou lopatkovou mříž lze určit tvarem, tj. souřadnicemi profilu a jeho uspořádáním v mříži, a pokud je zadána níže uvedenými geometrickými veličinami, je možné najít aerodynamické veličiny [3]:

- vstupní rychlost u_1 , její směr α_1 a úhel náběhu ι ,
- výstupní rychlost u_2 , směr α_2 a deviace proudu δ ,
- zakřivení proudu $\varepsilon = \alpha_2 - \alpha_1$,
- ztráty v mříži ζ_p, ζ_s ,
- součinitel odporu c_{xp} a vztlaku c_z ,
- poměrný rozdíl statických tlaků před a za mříží,
- rozložení rychlosti/tlaku po povrchu profilu,
- cirkulace rychlosti.

Souřadnice horní (x_h, y_h) a spodní (x_d, y_d) strany profilu dle obr. 2 a zadané parametry geometrického upořádání lopatkové mříže dle obr. 3 uvedeny v [1].



Obr. 2 Souřadnice profilu.



Obr. 3 Geometrické parametry lopatkové mříže.

4. Výpočet

Pro výpočet proudového pole byl použit program Fluent.

4.1 Okrajové podmínky

Po vykreslení a úpravě profilu dle zadaných parametrů byl profil umístěn do kanálu o konstantní rozteči $s = 40$ mm. Byla vytvořena strukturovaná síť a nastaveny okrajové a počáteční podmínky pro výpočet:

- na vstupu: atmosférický tlak $p_0 = 101\,325$ Pa, $T_0 = 273,15$ K,
- na výstupu: $p_2 = 80\,000$ Pa,
- vstupní úhel proudu: $\alpha_1 = 42^\circ$.

Výpočet provádíme pro dvourozměrné, nestacionární proudění vazké, stlačitelné tekutiny.

Používáme $k - \epsilon$ model turbulence a schéma 2. řádu upwindu.

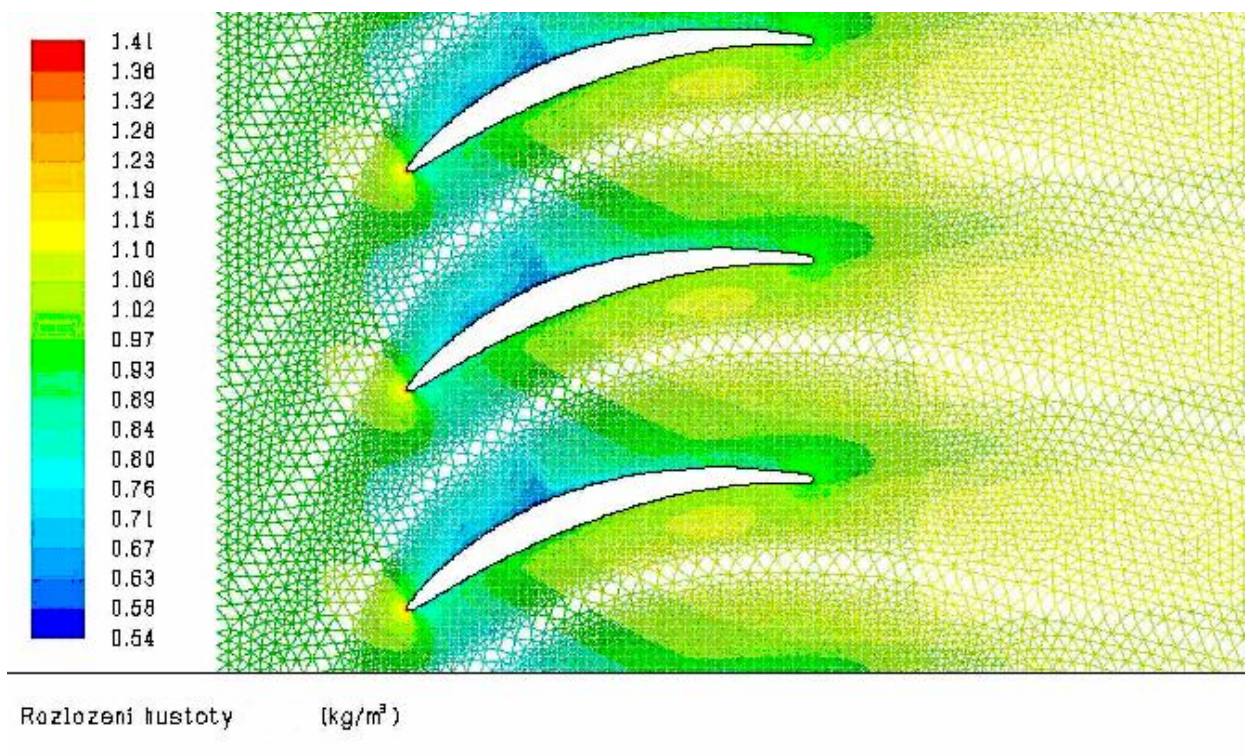
4.2 Zhodnocení dosažených výsledků

Pro posouzení výsledků byly vybrány následující obrázky:

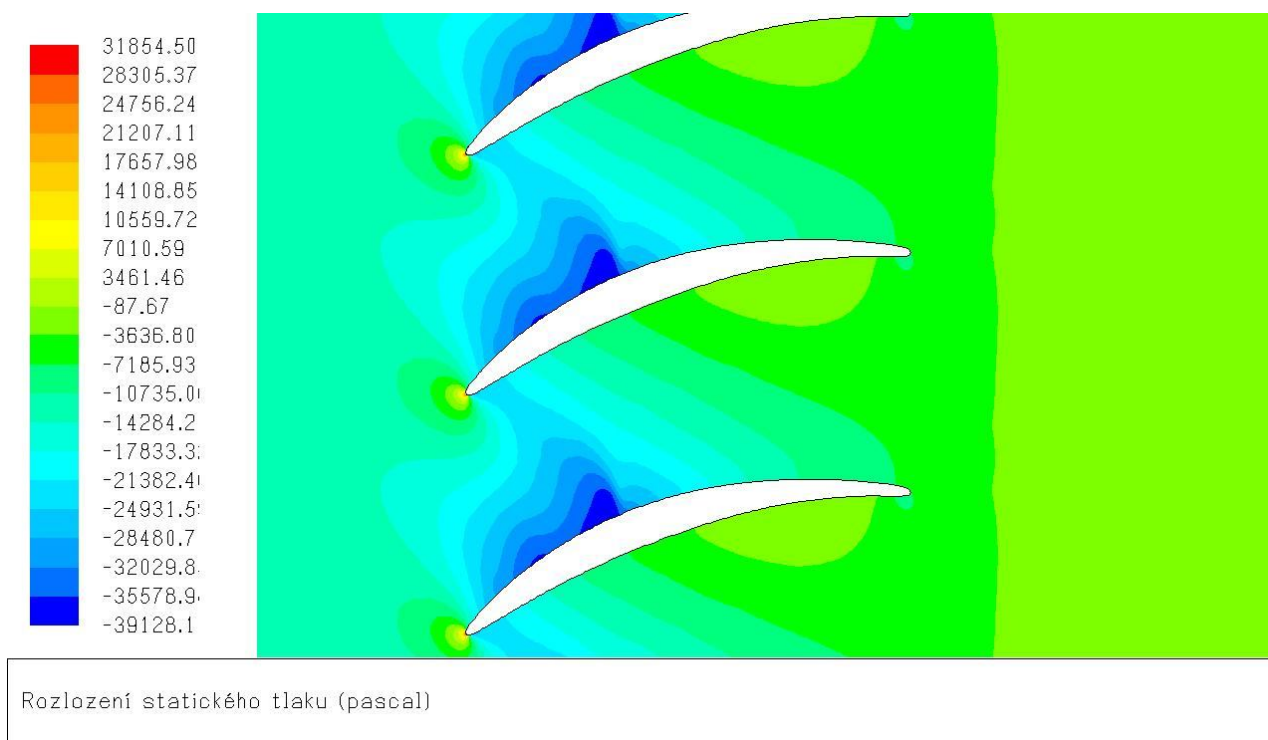
- obr. 5 – Rozložení hustoty s uvedením výpočtové sítě,
- obr. 6 – Rozložení statického tlaku,
- obr. 7 – Rozložení celkové rychlosti,
- obr. 8 – Rozložení Machova čísla.

Při dané geometrii a nastavení počátečních a okrajových podmínek je patrný vliv Machova čísla, které je v části proudového pole větší než jedna, tedy vyskytuje se místní nadzvuková oblast. Proudění v lopatkové mříži je transsonické. Místní supersonická oblast je ukončena rázovou vlnou, jejíž intenzita závisí na dosaženém Ma. Z výsledků lze

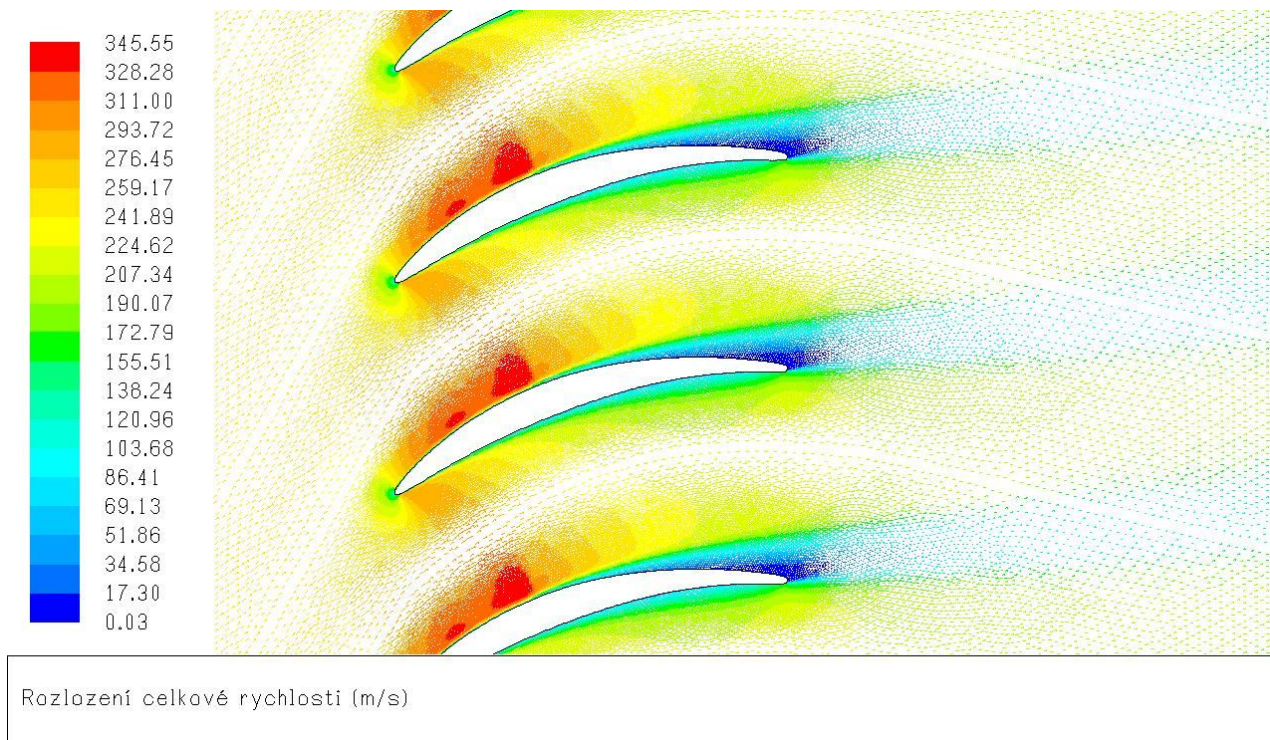
usoudit, že dochází k odtržení mezní vrstvy na horní straně profilu před odtokovou hranou, ke zvýšeným ztrátám v úplavu a k citelné odchylce výstupního úhlu proudu.



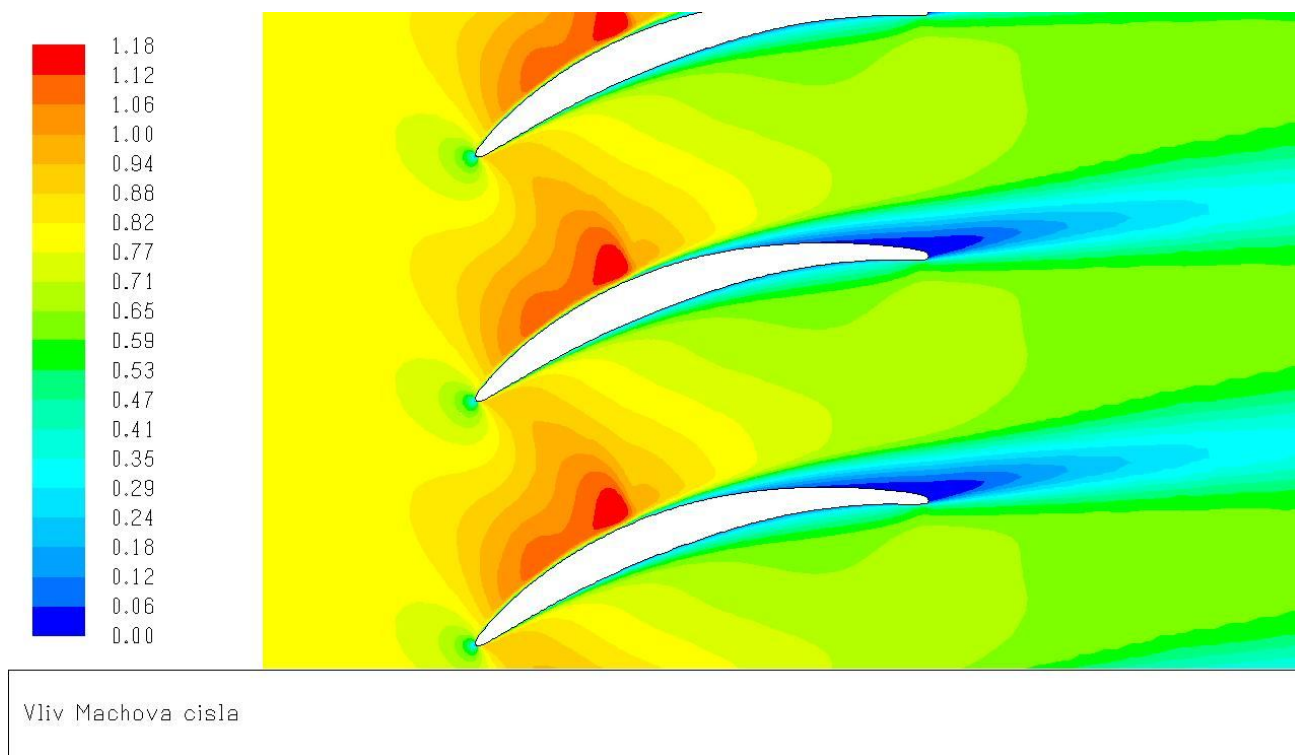
Obr. 4 Rozložení hustoty s uvedením výpočtové sítě



Obr. 5 Rozložení statického tlaku



Obr. 6 Rozložení celkové rychlosti



Obr. 8 Rozložení Machova čísla

5. Závěr

V úloze byla zpracována obdržená dokumentace, ze které byl vytvořen soubor dat a upraven pro zpracování v programu Gambit. S vytvořenou sítí byla data převedena do programu Fluent, ve kterém byly nastaveny počáteční a okrajové podmínky pro výpočet proudového pole.

Po provedení výpočtu je z výsledků patrné, že na podtlakové (horní) straně profilu dojde v proudovém poli k překročení rychlosti zvuku, k uzavření místní nadzvukové oblasti rázovou vlnou, ke zpomalení proudění, ke ztrátám a k odtržení proudu.

Při dalším výpočtu je možné se zaměřit na úpravu rozložení výpočtové sítě, na zjemnění v oblasti odtržení a vytvořit více výpočtových variant, ve kterých budou měněny okrajové podmínky.

Seznam symbolů

a	rychlost zvuku	$[m.s^{-1}]$
c	délka tětiny lopatky	$[m]$
c_{xp}	součinitel odporu	$[1]$
c_z	součinitel vztlaku	$[1]$
d	maximální tloušťka profilu	$[m]$
D_{ref}	difuzní faktor	$[1]$
h	výška lopatky	$[m]$
l	délka lopatky	$[m]$
Ma	Machovo číslo	$[1]$
p	statický tlak	$[Pa]$
p_0	atmosférický tlak	$[Pa]$
r_{NH}	poloměr náběžné hrany	$[m]$
r_{OH}	poloměr odtokové hrany	$[m]$
s	rozteč	$[m]$
u	rychlost	$[m.s^{-1}]$
x, y	pravoúhlé souřadnice	$[m]$
T	teplota	$[K]$
α_1	vstupní úhel lopatky	$[rad]$
α_2	výstupní úhel lopatky	$[rad]$
β_1	vstupní úhel proudu	$[rad]$
β_2	výstupní úhel proudu	$[rad]$
γ	úhel nastavení profilu	$[rad]$
ε	zakřivení proudu	$[rad]$
δ	deviace proudu	$[rad]$
ζ, ζ_p	ztrátový součinitel	$[1]$
ν	úhel zakřivení střednice	$[rad]$
ι	úhel náběhu	$[rad]$

Seznam použité literatury

- [1] Dokumentace Ústavu termomechaniky AVČR
- [2] Manuály pro použití komerčního programu
- [3] Citavý, Nožička: Lopatkové mříže, Nakladatelství ČVUT, Praha 2003, str. 200
- [4] Dvořák, Kozel: Matematické modelování v aerodynamice, Nakladatelství ČVUT, Praha 1996, str. 356