

# Projekt TAČR TK03030121 KOBRA

## Software pro simulace proudění v turbínách a kompresorech

Jiří Fůrst

Jiri.Furst@fs.cvut.cz

2023

### Abstrakt

Tato zpráva popisuje software pro simulace proudění v turbínách a kompresorech. Výpočet je prováděn v meridiální rovině a omezuje se na výpočty rozložení veličin na vstupním řezu, podél náběžných a odtokových hran lopatkových řad a ve výstupním řezu. Parametry proudových polí jsou přitom určovány řešením rovnice radiální rovnováhy vycházející z Eulerových rovnic s uvažováním zakřivení proudnic. Software uvažuje zjednodušené zadání reálného tvaru lopatek. Vliv lopatek na proudové pole je přitom modelován s pomocí empirických modelů pro odklon proudu a pro energetické ztráty.

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Metoda výpočtu</b>	<b>4</b>
2.1	Výpočet na vstupním řezu . . . . .	4
2.2	Výpočet na kvazinormálách pro bezlopatkové oblasti . . . . .	4
2.3	Výpočet na kvazinormálách odtokových hranách lopatkových řad . . . . .	5
2.4	Úprava tvaru proudnic . . . . .	6
2.5	Algoritmus výpočtu . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Implementované modely plynu a empirické modely odklonu a ztrát</b>	<b>7</b>
3.1	Termodynamický model perfektního plynu . . . . .	7
3.2	Model reálného plynu s kubickou stavovou rovnicí dle Aungiera, Redlicha a Kwonga [1] . . . . .	7
3.3	Sutherlandův vztah pro viskozitu . . . . .	9
3.4	Empirický model AMDC-KO dle [2] . . . . .	9
3.5	Empirický model dle Liebleina [1] . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Formát vstupního souboru</b>	<b>12</b>
4.1	Sekce <code>machine</code> . . . . .	12
4.2	Sekce <code>thermo</code> . . . . .	14
4.3	Sekce <code>boundary_conditions</code> . . . . .	15
4.4	Sekce <code>solver, results, reports a plots</code> . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Spuštění programu</b>	<b>18</b>
<b>A</b>	<b>Příklad vstupního souboru a výsledků pro jeden stupeň axiálního kompresoru</b>	<b>20</b>
<b>B</b>	<b>Obsah souboru s výsledky a jeho načtení</b>	<b>25</b>

## Seznam značení a symbolů

### Latinka

$a$	rychlost zvuku	$\text{m s}^{-1}$
$C$	absolutní rychlost	$\text{m s}^{-1}$
$H$	celková enthalpie	$\text{J kg}^{-1}$
$I$	rothalpie	$\text{J kg}^{-1}$
$M$	Machovo číslo	
$\dot{m}$	hmotnostní tok	$\text{kg/s}$
$m$	meridionální souřadnice	$\text{m}$
$p$	tlak	$\text{Pa}$
$y$	radiální souřadnice	$\text{m}$
$s$	entropie	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$T$	teplota	$\text{K}$
$W$	relativní rychlost	$\text{m s}^{-1}$
$Y$	ztrátový koeficient celkového tlaku	
$y$	kvazinormální souřadnice	$\text{m}$
$m$	meridionální složka	
$z$	axiální souřadnice	$\text{m}$

### Řecké písmeno

$\delta$	úhel odklonu proudu $\delta = \beta_2 - \beta_{2g}$	$^\circ$
$\varepsilon$	úhel mezi směrem meridionální rychlosti a kolmicí ke kvasinormále, viz obr. 1	$^\circ$
$\varphi$	úhel mezi směrem meridionální rychlosti a osu stroje, viz obr. 1	$^\circ$
$\kappa_m$	křivost meridionální proudnice	$\text{m}^{-1}$
$\lambda$	úhel mezi kvazinormálou a radiálou, viz obr. 1	$^\circ$
$\omega$	úhlová rychlost stroje (pro stator je $\omega = 0$ )	$\text{s}^{-1}$
$\rho$	hustota	$\text{kg m}^{-3}$
$\theta$	obvodová složka	

### Horní index

$'$       relativní veličina  
 $turb$     úhel dle konvence použité v [2]

**Dolní index**

1      stav na náběžné hraně  
2      stav na odtokové hraně  
 $g$       geometrický úhel lopatky  
 $in$     hodnota na vstupním řezu  
 $tot$     celkový stav

◦

# 1 Úvod

Tato zpráva slouží jako popis softwaru pro analýzu proudění v turbínách a kompresorech a jako návod pro jeho použití. Software je navržen tak, aby pracoval se zjednodušeným zadáním tvaru turbostroje, viz kapitola 4. Výpočty pak provádí na vstupním řezu, na náběžných a odtokových hranách lopatkových řad a na výstupním řezu. Při výpočtech je možné uvažovat model plynu řídicí se stavovou rovnicí ideálního plynu nebo model reálného plynu se stavovou rovnicí kubického typu.

## 2 Metoda výpočtu

Výpočet vychází z řešení Eulerových rovni pro osově symetrické proudění. Výpočet je prováděn v meridionální rovině v souřadném systému daném zakřivenými proudnicemi (souřadnice  $m$ ) a kvazinnormálami (souřadnice  $y$ ), viz obr. 1. kvazinnormály přitom odpovídají vstupnímu řezu, obrysům náběžných a odtokových hran a výstupnímu řezu. Tvary proudnic jsou určovány v průběhu výpočtu.

### 2.1 Výpočet na vstupním řezu

Na vstupním řezu jsou zadány okrajové podmínky pro celkový tlak  $p_{tot,in}$ , celkovou teplotu  $T_{tot,in}$  a hmotnostní průtok  $\dot{m}_{in}$ . Ze zadaných hodnot je určena entropie  $s_{in}$  a celková entalpie  $H_{in}$  na vstupním řezu.

$$s_{in} = \text{entropy\_pT}(p_{tot,in}, T_{tot,in}), \quad (1)$$

$$H_{in} = \text{enthalpy\_pT}(p_{tot,in}, T_{tot,in}). \quad (2)$$

Meridionální složka rychlosti na vstupním řezu je určena řešením nelineární rovnice tak, aby bylo dosaženo požadovaného hmotnostního průtoku  $\dot{m}_{in}$ , tj.

$$\dot{m}_{in} = \int_0^{y_s} 2\pi r \rho_{in} C_{m,in} \cos \varepsilon dy, \quad (3)$$

kde

$$\rho_{in} = \text{density\_hs}(H_{in} - C_{m,in}^2/2, s_{in}). \quad (4)$$

Obvodová složka rychlosti  $C_{\theta,in}$  je 0 a ostatní veličiny jsou určeny z termodynamických vztahů.

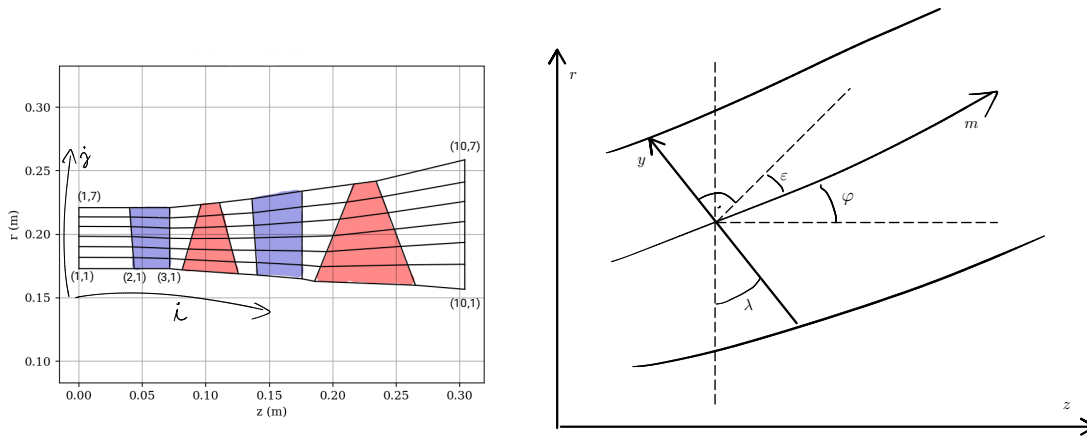
Hodnoty jednotlivých veličin na vstupním řezu jsou pak uloženy do prvního sloupce datového pole ( $i = 1$ ).

### 2.2 Výpočet na kvazinnormálách pro bezlopatkové oblasti

V případě oblasti bez lopatek je obvodová složka rychlosti  $C_{\theta}$  určena ze zákona zachování momentu hybnosti, tj.

$$C_{\theta}(i+1, j) = C_{\theta}(i, j) \frac{r(i, j)}{r(i+1, j)}. \quad (5)$$

Index  $i$  přitom odpovídá kvazinnormále a index  $j$  odpovídá jednotlivým proudnicím, viz obr. 1.



Obrázek 1: Výpočetní síť a meridionální souřadnice.

Dále se podél proudnice zachovává celková enthalpie a entropie, tj.

$$H(i+1, j) = H(i, j), \quad (6)$$

$$s(i+1, j) = s(i, j). \quad (7)$$

Ostatní veličiny jsou získány řešením rovnice radiální rovnováhy ve tvaru (odvození viz [1] nebo [2])

$$\frac{\partial C_m}{\partial y} = f_1(y)C_m + \frac{f_3(y)}{C_m}, \quad (8)$$

kde

$$f_1(y) = -\kappa_m \cos \varepsilon + \frac{\sin \varepsilon}{C_m} \frac{\partial C_m}{\partial m}, \quad (9)$$

$$f_3(y) = \frac{\partial H}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} - \frac{C_\theta}{r} \frac{\partial (rC_\theta)}{\partial y}. \quad (10)$$

Zde  $\kappa_m = -\partial\varphi/\partial m$  je křivost proudnice a hodnota  $\partial C_m/\partial m$  je určena aproximována jako (viz [1])

$$\frac{1}{C_m} \frac{\partial C_m}{\partial m} (1 - M_m^2) = -(1 + M_\theta^2) \frac{\sin \varphi}{r} - \frac{1}{\cos \varepsilon} \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \kappa_m \tan \varepsilon, \quad (11)$$

kde  $M_m = C_m/a$  a  $M_\theta = W_\theta/a$  jsou Machova čísla v meridionální a obvodové složce rychlosti (pro bezlopatkovou oblast je  $C_\theta = W_\theta$ ).

Počáteční podmínka pro rovnici (8) je určena tak, aby bylo na kvazinormále dosaženo zadaného hmotnostního toku.

### 2.3 Výpočet na kvazinormálách odtokových hranách lopatkových řad

Pro kvazinormály odpovídající odtokovým hranám se výpočet provádí v relativním souřadném systému spojeném s lopatkou. Pro stator se uvažuje nulová rychlost rotace  $\omega = 0$ , tj. relativní systém je totožný s absolutním.

Pomocí empirického modelu a hodnot z minulé iterace je určen úhel výstupního proudu  $\beta$ . Ztráta celkového tlaku z empirického modelu je přepočtena na přírůstek entropie  $\Delta s$ . Pro turbíny turbíny je ztrátový koeficient definován jak

$$Y = \frac{p'_{tot,1} - p'_{tot,2}}{p'_{tot,2} - p_2}, \quad (12)$$

kde indexy 1 a 2 označují stav na náběžné a odtokové hraně lopatkové řady. Pro kompresory je ztrátový koeficient definován jako

$$Y = \frac{p'_{tot,1} - p'_{tot,2}}{p'_{tot,1} - p_1}. \quad (13)$$

V obou případech je ze ztrátového koeficientu a známé hodnoty  $p'_{tot,1}$  a  $p_2$  resp.  $p_1$  určena hodnota  $p'_{tot,2}$ . Přírůstek entropie je pak určen jako

$$\Delta s = \text{entropy\_ph}(p'_{tot,2}, H_2) - s_1. \quad (14)$$

Podél proudnice se zachovává rothalpie  $I = H' - (\omega r)^2/2$  a tedy

$$I(i+1, j) = I(i, j), \quad (15)$$

$$s(i+1, j) = s(i, j) + \Delta s. \quad (16)$$

Ostatní veličiny jsou opět získány řešením rovnice radiální rovnováhy ve tvaru, odvození viz [1] nebo [2]

$$\frac{\partial C_m}{\partial y} = f_1(y)C_m + f_2(y) + \frac{f_3(y)}{C_m}, \quad (17)$$

kde

$$f_1(y) = \cos^2 \beta \left[ -\kappa_m \cos \epsilon - \frac{\tan \beta}{r} \frac{\partial(r \tan \beta)}{\partial y} + \frac{\sin \epsilon}{W_m} \frac{\partial W_m}{\partial m} \right], \quad (18)$$

$$f_2(y) = -2\omega \cos \beta \sin \beta \cos \lambda, \quad (19)$$

$$f_3(y) = \cos^2 \beta \left[ \frac{\partial I}{\partial y} - T \frac{\partial s}{\partial y} \right]. \quad (20)$$

Hodnota  $\partial C_m / \partial m$  je určena stejně jako v předchozím případě.

Počáteční podmínka pro rovnici (17) je opět určena tak, aby bylo na kvazinnormále dosaženo zadaného hmotnostního toku.

## 2.4 Úprava tvaru proudnic

Po výpočtu na všech kvazinnormálách je upraven tvar proudnic tak, aby každé proudnici odpovídal stejný díl hmotnostního průtoku. Nové polohy dělicích bodů  $y(i, j)$  na  $i$ -té kvazinnormále jsou určeny řešením rovnice

$$\int_0^{y(i,j)} 2\pi r \rho C_m \cos \epsilon dy = \dot{m}_{in} \frac{j-1}{ns-1}, \quad (21)$$

kde  $ns$  je počet dělicích bodů na kvazinnormále (počet proudnic).

Po výpočtu nových poloh proudnic jsou opraveny hodnoty úhlů  $\lambda$ ,  $\varphi$ ,  $\epsilon$  a křivost  $\kappa_m$ .

## 2.5 Algoritmus výpočtu

Celý výpočet pak probíhá v iteračním cyklu dle následujícího schématu:

1. Nejprve se stanoví parametry na vstupním řezu.
2. Provede se úprava rozdělení proudnic na vstupním řezu a inicializuje se počáteční odhad tvaru proudnic na dalších kvazinormálách.
3. Provede se výpočet parametrů proudového pole na kvazinormálách.
4. Provede se úprava tvaru proudnic.
5. Pokud nebylo dosaženo konvergence ke stacionárnímu stavu, pokračuje se bodem 3.

Poznámka: v aktuální verzi programu je iterační proces ukončen po předepsaném počtu iterací.

## 3 Implementované modely plynu a empirické modely odklonu a ztrát

### 3.1 Termodynamický model perfektního plynu

Model termodynamicky perfektního plynu uvažuje stavovou rovnici ideálního plynu (zde  $r$  je specifická plynová konstanta)

$$p = \rho r T. \quad (22)$$

Tepelná kapacita při konstantním tlaku  $c_p$  je uvažována konstantní a je zadána uživatelem.

Specifická enthalpie je pak určena jako

$$h = c_p T, \quad (23)$$

a specifická entropie jako

$$s = c_p \log(T) - r \log(p). \quad (24)$$

Rychlost zvuku je pak

$$a = \sqrt{\gamma r T} \quad (25)$$

kde  $\gamma = c_p / (c_p - r)$ .

### 3.2 Model reálného plynu s kubickou stavovou rovnicí dle Aungiera, Redlicha a Kwonga [1]

Model reálného plynu uvažuje stavovou rovnici kubického typu dle Aungiera, Redlicha a Kwonga [1] spolu polynomiálním vztahem pro ideální část tepelné kapacity  $c_p$ .

Stavová rovnice dle Aungiera, Redlicha a Kwonga je

$$p = \frac{rT}{v - b + c} - \frac{a}{v(v + b)T_r^n} \quad (26)$$

kde



- $v = 1/\rho$  je specifický objem,
- $T_r = T/T_c$  je redukováná teplota.
- $\omega$  je accentrický faktor,
- $a = 0.42747r^2T_c^2/p_c$  je parametr korigující vliv mezimolekulových interakcí,
- $b = 0.0664rT_c/p_c$  je parametr korigující objem molekul molekul,
- $n = 0.4986 + 1.1735\omega + 0.4754\omega^2$  je parametr stavové rovnice,
- $c$  je parametr určený ze stavové rovnice v kritickém bodě,
- $T_c, v_c, p_c$  jsou kritická teplota, kritický specifický objem a kritický tlak.

Ideální část  $c_p$  je uvažována jako polynomiální funkce teploty  $T$ :

$$c_p^0(T) = \sum_{j=0}^m a_j T^j. \quad (27)$$

Ideální část entalpie a entropie je pak

$$h^0(T) = h_0^0 + \sum_{j=0}^m \frac{a_j}{j+1} T^{j+1},$$

$$s_0(p, T) = s_0^0 - r \log(p) + a_0 \log(T) + \sum_{j=1}^m \frac{a_j}{j} T^j,$$

Integrační konstanty  $h_0^0$  a  $s_0^0$  jsou pak voleny tak, aby entalpie a entropie (včetně příspěvků pro neideální plyn) nabývaly v referenčním stavu zvolených referenčních hodnot.

Příspěvky od neideálního chování plynu jsou

$$c_p^r(p, T) = p \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - r + \frac{\alpha(T)}{b} \frac{n(n+1)}{T} \log \left( \frac{v+b}{v} \right) + \alpha(T)(n+1) \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \frac{1}{v(v+b)},$$

$$h^r(p, T) = pv - rT - \frac{a}{b} (n+1) T r^{-n} \log \left( \frac{v+b}{v} \right),$$

$$s^r(p, T) = -r \log(T) + r \log(v-b+c) - \frac{n\alpha(T)}{bT} \log \left( \frac{v+b}{v} \right) + r \log(p).$$

kde  $\alpha(T) = aT_r^{-n}$ .

Hodnota  $c_p, h,$  a  $s$  je potom

$$c_p(p, T) = c_p^0(T) + c_p^r(p, T),$$

$$h(p, T) = h^0(T) + h^r(p, T),$$

$$s(p, T) = s^0(p, T) + s^r(p, T).$$

### 3.3 Sutherlandův vztah pro viskozitu

Viskozita je uvažována jako funkce teploty a řídí se Sutherlandovým vztahem

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (28)$$

kde  $\mu_0 = 1.716 \times 10^{-5}$  Pa s,  $T_0 = 273.15$  K a  $S = 110.4$  K.

### 3.4 Empirický model AMDC-KO dle [2]

Empirický model pro úhel odklonu proudu a pro energetické ztráty v turbínách je implementován dle [2]. Ve stávajícím programu je však použita odlišná konvence pro geometrické úhly a úhly proudu. V [2] jsou úhly měřeny od roviny kolmé k ose stroje zatímco v programu jsou úhly měřeny od osy stroje. Převod mezi těmito úhly je pak

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 90^\circ - \beta_{1g}^{turb}, \\ \beta_2 &= \beta_2^{turb} - 90^\circ, \end{aligned}$$

kde index *turb* značí, že se jedná o úhel dle konvence použité v [2].

Pro  $M_2' < 0.5$  je úhel odklonu proudu dán vztahem (trigonometrické funkce jsou ve stupních!)

$$\delta_0 = \arcsin \left[ (o/s) \left( 1 + (1 - o/s)(\beta_{2g}^{turb}/90^\circ) \right) \right] - \beta_{2g}^{turb} \quad (29)$$

Pro  $0.5 < M_2' < 1$  je úhel odklonu proudu dán vztahem

$$\delta = \delta_0 \left[ 1 - 10X^3 + 15X^4 - 6X^5 \right], \quad (30)$$

kde  $X = 2M_2' - 1$ .

Pro  $M_2' > 1$  je odklon dán vztahem

$$\delta = \arcsin \left[ (o/s) \rho_* W_* / \rho_2 W_2 \right] - \beta_{2g}^{turb}, \quad (31)$$

kde  $\rho_*$  a  $W_*$  jsou hustota a velikost rychlosti odpovídající sonickému stavu.

Ztrátový koeficient je pro turbíny definován vztahem

$$Y = \frac{p'_{tot,1} - p'_{tot,2}}{p'_{tot,1} - p_2}. \quad (32)$$

Ve stávající verzi programu je implementován pouze model profilových ztrát a ztrát vlivem nenulové tloušťky odtokové hrany, tedy

$$Y = Y_p + Y_{TE}. \quad (33)$$

Profilové ztráty jsou modelovány jako

$$Y_p = K_{mod} K_{inc} K_M K_p K_{Re} \left\{ \left[ Y_{p1} + \zeta^2 (Y_{p2} - Y_{p1}) \right] (5t_{max}/c)^\zeta - \Delta Y_{TE} \right\}. \quad (34)$$

Jednotlivé faktory mají následující význam:

$K_{mod}$  - korekční koeficient související s typem lopatky a technologickým postupem její výroby, standardně nabývá hodnotu 1 pro starší typy lopatek a 0.67 pro novější typy lopatek,

$K_{inc}$  - korekce na incidenci nabíhajícího proudu,

$K_M$  - korekce na vliv Machova čísla,

$K_p$  - korekce na vliv stlačitelnosti,

$K_{Re}$  - korekce na vliv Reynoldsova čísla,

$Y_{p1}$  - ztrátový koeficient pro rozváděcí profily ( $\beta_1 = 0^\circ$ ),

$Y_{p1}$  - ztrátový koeficient pro impulzové profily ( $\beta_2 = -\beta_{1g}$ ),

$\zeta$  - koeficient  $\zeta = -\beta_{1g}/\beta_2 = (90^\circ - \beta_{1g}^{turb})/(90^\circ - \beta_2^{turb})$ .

Vztahy pro výpočet jednotlivých příspěvků jsou uvedeny v [2].

### 3.5 Empirický model dle Liebleina [1]

Empirický model vhodný pro simulace proudění v axiálních kompresorech je implementován ve verzi popsané v [1]. Model byl původně navržen pro lopatky s profily NACA 65 a tak je pro jiné typy profilů nutná kalibrace modelu.

Model odklonu proudu se skládá z modelu pro případ s optimálním úhlem incidence a z korekcí pro nenávrhové režimy. Odklon s optimální incidencí (tj. pro návrhový režim) je

$$\delta^* = K_{sh} K_{t\delta} (\delta_0^*)_{10} + m\theta \quad (35)$$

kde  $K_{sh}$  je tzv. tvarový součinitel shodný s tvarovým součinitelem ve ztrátovém modelu ( $K_{sh} = 1$  pro profily NACA 65, pro jiné typy profilů je třeba tyto hodnoty vhodně kalibrovat).  $K_{t,\delta}$  je korekce na tloušťku profilu,  $m$  je parametr strmosti nárůstu odklonu a  $(\delta_0^*)_{10}$  je odklon pro lopatku s nulovým prohnutím.

Jednotlivé části jsou vypočteny jako

$$\delta_0^* = 0.01\sigma\beta_{1lim} + (0.74\sigma^{1.9} + 3\sigma) \left( \frac{\beta_{1lim}}{90} \right)^{1.67+1.09\sigma} \quad (36)$$

kde  $\beta_{1lim} = \max(\min(\beta_1, 70), 0)$ ,

$$K_{t\delta} = 6.25 \frac{t}{c} + 37.5 \left( \frac{t}{c} \right)^2 \quad (37)$$

$$m = m_1/\sigma^b, \quad (38)$$

$$b = 0.9625 - 0.17x - 0.85x^3, \quad (39)$$

$$m_1 = 0.17 - 0.0333x + 0.333x^2, \quad (40)$$

kde  $x = \beta_{1lim}/100$ .

Tvar koeficientu  $m_1$  závisí na tvaru profilu. Zde uvedená hodnota je pro profily NACA 65. V případě jiných profilů je opět třeba provést kalibraci modelu.

Korekce pro nenávrhový režim je

$$\delta = \delta^* + \left( \frac{\partial \delta}{\partial i} \right)^* (i - i^*) + 10(1 - W_{m2}/W_{m1}) \quad (41)$$

kde

$$\left( \frac{\partial \delta}{\partial i} \right)^* = (1 + (\sigma + 0.25\sigma^4)/(\beta_{1lim}/53)^{2.5}) \exp(-3.1\sigma), \quad (42)$$

a  $i = \beta_1 - \beta_{1g}$  je incidence a  $i^*$  je návrhová incidence.

Návrhová incidence  $i^*$  je určena jako

$$i^* = K_{sh} K_{ti} (i_0^*)_{10} + n\theta \quad (43)$$

kde  $K_{sh}$  je dříve zmíněný tvarový součinitel,  $K_{ti}$  je korekce na tloušťku lopatky,  $i_0^*$  je incidence pro neprohnutou lopatku a  $n$  je součinitel strmosti nárůstu incidence.

$$i_0^* = \frac{\beta_{1lim}^p}{5 + 46 \exp(-2.3\sigma)} - 0.1\sigma^3 \exp((\beta_{1lim} - 70)/4), \quad (44)$$

$$p = 0.914 + \sigma^3/160, \quad (45)$$

$$n = 0.025\sigma - 0.06 - \frac{(\beta_{1lim}/90)^{1+1.2\sigma}}{1.5 + 0.43\sigma}, \quad (46)$$

$$K_{ti} = (10t/c)^{\frac{0.28}{0.1+(t/c)^{0.3}}}. \quad (47)$$

Ztrátový koeficient pro návrhový režim je potom

$$\omega^* = \frac{2\sigma}{\beta_2^*} \left( \frac{W_2^*}{W_1^*} \right)^2 f(D_{eq}^*), \quad (48)$$

kde  $W_1^* = W_{m1}/\cos(\beta_1^*)$ ,  $W_2^* = W_{m2}/\cos(\beta_2^*)$ , a

$$f(D_{eq}^*) = K_1 (K_2 + 3.1(D_{eq}^* - 1)^2 + 0.4(D_{eq}^* - 1)^8) \quad (49)$$

s  $K_1 = 0.004$  a  $K_2 = 1$  pro profily typu NACA 65.

Ekvivalentní faktor difusorovitosti je

$$D_{eq}^* = \left( \frac{W_1^*}{W_2^*} \right) \left( 1.12 + 0.61 \frac{\cos^2(\beta_1^*)}{\sigma} (\tan(\beta_1^*) - \tan(\beta_2^*)) \right). \quad (50)$$

Korekce pro nenávrhové režimy je popsána v [1], kapitola 6.

## 4 Formát vstupního souboru

Program uvažuje vstupní soubor ve formátu TOML. Soubor je rozdělen do následujících sekcí:

- `[machine]` - určuje type turbostroje a popisuje tvar náboje, pláště a samostatných podsekcích zjednodušený popis tvarů lopatek.
- `[thermo]` - část definující parametry proudícího plynu.
- `[boundary_conditions]` - okrajové podmínky a rychlost rotace turbostroje.
- `[solver]` - nastavení parametrů výpočetní metody.
- `[results]` - nastavení výstupu výsledků pro pozdější zpracování externími nástroji.
- `[reports]` - nastavení výpisu z programu.
- `[plots]` - nastavení grafického výstupu.

V následujícím textu jsou podrobněji popsány jednotlivé sekce vstupního souboru. Při popisuje se využívá jak ukázkový příklad případ simulace proudění první stupněm axiálního kompresoru s modelem ideálního plynu.

### 4.1 Sekce `machine`

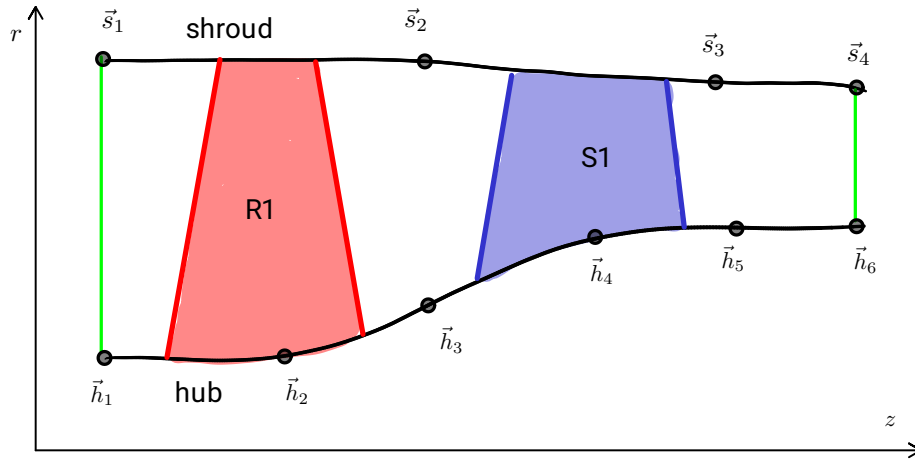
Tato sekce popisuje geometrii turbostroje. Sekce je uvozena názvem `[machine]`. Dále je pomocí klíčového slova `type` určen typ turbostroje. V současné době je možné použít pouze hodnotu "compressor" nebo "turbine". Dále definován tvar náboje, pláště. Ty jsou zadávány pomocí souřadnic bodů  $\vec{h}_1$  až  $\vec{h}_n$  pro náboj a  $\vec{s}_1$  a  $\vec{s}_m$  pro plášť. Souřadnice bodů jsou zadávány vždy jako dvojice  $(z, r)$  v pořadí od vstupního řezu k výstupnímu. Viz obrázek 2 a příklad 1.

Po úvodní části následuje popis jednotlivých lopatkových řad. Ty jsou zadávány v pořadí od vstupního řezu k výstupnímu. Pro každou z řad je definováno jméno (položka `name`), počet lopatek (položka `number_of_blades`) a informace o tom, zda se jedná o rotor nebo stator (položka `rotating`).

Dále je pomocí série bodů  $\vec{l}_1$  až  $\vec{l}_k$  definován tvar náběžné hrany lopatkové řady lopatky a pomocí bodů  $\vec{t}_1$  až  $\vec{t}_k$  tvar odtokové hrany v  $z, r$  rovině, viz obr. 4. První a poslední body na náběžné či odtokové hraně nemusí ležet na náboji a plášti. Program si automaticky náběžnou a odtokovou hranu prodlouží či ořízne zadanými tvary náboje a pláště. Konkrétní tvar lopatky je zadán ve zjednodušené verzi pomocí geometrických úhlů náběhu a odtoku (položky `inlet_angle` a `outlet_angle`). Úhly jsou náběhu jsou zadávány ve stupních v bodech  $\vec{l}_1$  až  $\vec{l}_k$  a úhly odtoku v bodech  $\vec{t}_1$  až  $\vec{t}_k$ . Při zadání je využívána znaménková konvence naznačená na obrázku 3 Dále je zadána délka tětivy (položka `chord`), maximální relativní tloušťka profilu (položka `relative_thickness`, tloušťka je vztažena k délce tětivy). Tětiva a tloušťka je přitom vztažena pro kompresor k bodům na náběžné hraně a pro turbínu k bodům na odtokové hraně.

Poslední položkou je nastavení empirického modelu pro odklon a energetické ztráty v položce `performance_model.type`. V aktuální verzi programu jsou implementovány následující modely:

- "const" - model s explicitně zadáním konstantním odklonem a ztrátami celkového tlaku,
- "aungier" - model AMDC-KO dle [2] vhodný pro turbíny,



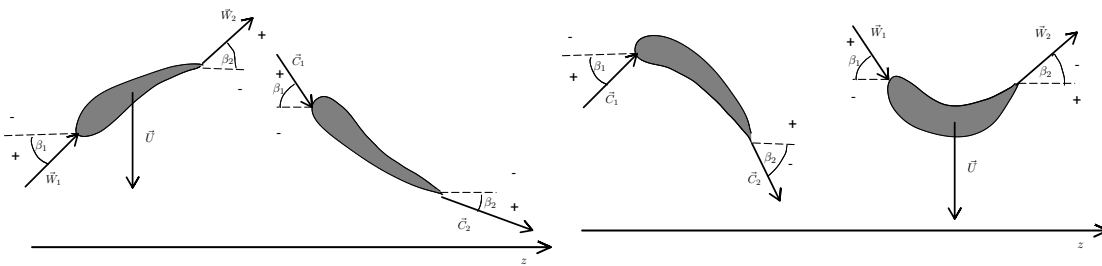
Obrázek 2: Zadání tvaru náboje a pláště.

Listing 1: Úvodní část sekce machine.

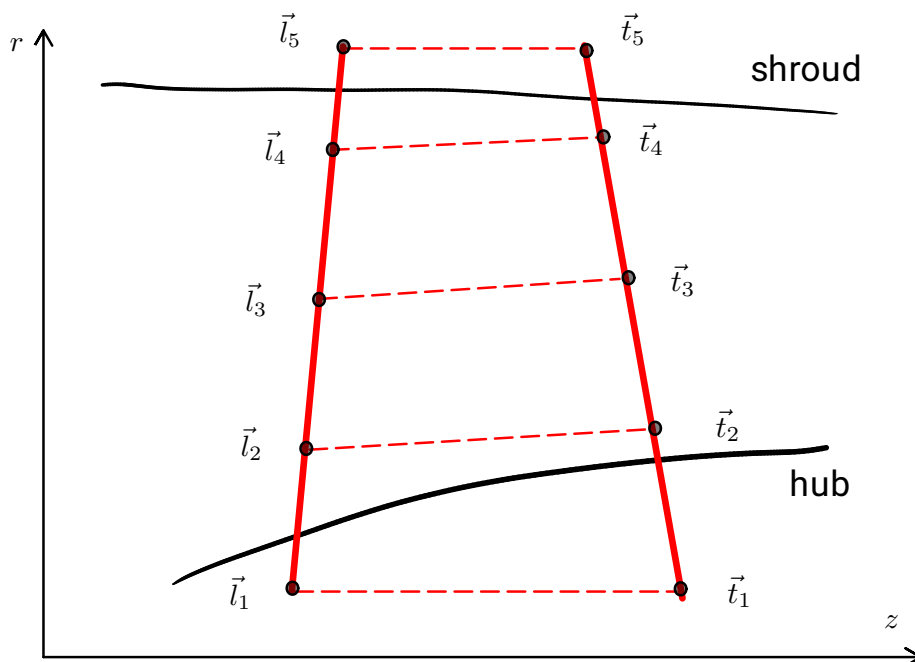
```
[machine]
type = "compressor"

hub_outline = [
    [-0.057, 0.093188 ],
    [-0.017, 0.093188 ],
    [ 0.029, 0.098655 ],
    [ 0.054, 0.098655 ],
    [ 0.136, 0.100246 ],
    [ 0.175, 0.100246 ]
]

shroud_outline = [
    [-0.057, 0.135 ],
    [ 0.175, 0.135 ]
]
```



Obrázek 3: Orientace úhlů náběhu a odtoku pro kompresor a turbínu.



Obrázek 4: Zadání tvaru lopatkové řady.

- "lieblein" - model dle [1] vhodný pro kompresory.

Pro model s konstantním odklonem a ztrátou je nutno tyto hodnoty explicitně zadat. To se provádí pomocí položek `deviation` a `pressure_loss`. Odklon se přitom zadává ve stupích. Ztrátový koeficient celkového tlaku pak v absolutní velikosti (tj. např. 0.02 odpovídá 2%).

Model AMDC-KO umožňuje nastavení parametru  $K_{mod}$  (parametr `Kmod`) a drsnosti lopatky (parametr `surface_roughness`, defaultně hodnota  $1 \times 10^{-16}$ , drsnost je relativní vztahovaná k délce tětiny). Význam parametrů je spolu s jejich standardními hodnotami uveden v kapitole 3.4.

Pro Liebleinův model je možné zadat parametry  $K_{sh}$  (parametr `Ksh`), koeficienty  $K_1$  a  $K_2$  (parametry `K1` a `K2`) a koeficienty polynomu  $m_1$  (parametr `m1`). Význam parametrů je spolu s jejich standardními hodnotami uveden v kapitole 3.5.

Popis jedné lopatkové řady je uveden v ukázce 2. Podobným způsobem jsou pak zadány i další řady. V případě, že se je stroj konstruován tak, že se geometrie lopatkových řad opakuje, je možné sekci zopakovat a doplnit klíčovým slovem `axial_offset`. O tuto hodnotu je pak posunuta geometrie lopatkové řady.

## 4.2 Sekce thermo

V této části jsou definovány parametry proudícího plynu. Sekce je uvozena názvem `[thermo]`. Pomocí klíčového slova `model` je určen modelu plynu. V současné době je možné použít

- "perfect\_gas" - model plynu řídicí se stavovou rovnicí ideálního plynu s konstantní hodnotou  $c_p$  a konstantní dynamickou viskozitou  $\mu$ .

Listing 2: Popis jedné lopatkové řady.

---

```

[[ machine.blade_row ]]
  name = "R1"
  rotating = true
  number_of_blades = 11
  leading_edge = [
    [-0.016120, 0.093000],
    [-0.012625, 0.114000],
    [-0.010111, 0.135000]
  ]
  trailing_edge = [
    [ 0.030103, 0.093000],
    [ 0.023516, 0.114000],
    [ 0.018109, 0.135000]
  ]
  inlet_angle = [ 53.029, 59.621, 64.936 ]
  outlet_angle = [ -7.725, 23.717, 42.544 ]
  chord = [ 0.05310, 0.05225, 0.05140 ]
  relative_thickness = [ 0.06, 0.06, 0.06 ]
  performance_model.type = "lieblein"
  performance_model.lieblein.Ksh = 1.0 # optional, default value is 1.0
  performance_model.lieblein.K1 = 0.004 # optional, default value is 0.004
  performance_model.lieblein.K2 = 4.0 # optional, default value is 4.0
  performance_model.lieblein.ml = [0.17, -0.0333, 0.33] # optional

```

---

Listing 3: Definice perfektního plynu.

---

```

[thermo]
  model = "perfect_gas"
  perfect_gas.r = 287.058
  perfect_gas.cp = 1004.0
  perfect_gas.mu = 1.8e-5

```

---

- **"aungier"** - model řídicí se Aungierovou modifikací Redlichovy-Kwongovy stavové rovnice s polynomiálním modelem pro ideální část  $c_p^0$  a Sutherlanovým modelem pro dynamickou viskozitu  $\mu$ .

V případě použití modelu **"perfect\_gas"** je nutno zadat hodnotu specifické plynové konstanty  $r$  a specifické tepelné kapacity  $c_p$  (obě v  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) a dynamickou viskozitu  $\mu$  (v Pa s), viz příklad 3.

Pro model **"aungier"** je nutno zadat specifickou plynovou konstantu, kritické parametry plynu, accentrický faktor a parametry pro výpočet dynamické viskozity pomocí Sutherlanova modelu. Viz příklad 4.

### 4.3 Sekce `boundary_conditions`

Aktuální verze programu je možná pouze na jeden typ okrajových podmínek a to konkrétně na kombinaci zadaného celkového tlaku a celkové teploty na vstupním řezu spolu s hmotnostním průtokem. Důsledkem je, že stávající verze programu není vhodná pro režimy s aerodynamickým ucpáním.



Listing 4: Definice modelu reálného plynu.

---

```
[thermo]
model = "aungier"
aungier.r      = 296.80          # Specific gas constant in J/(kg.K)
# Coeffs for cp0(T) polynomial (T in K, cp0 in J/(kg.K))
aungier.cp0    = [1.0480e+03, -3.6703e-02, -1.4929e-04,
                  7.2281e-07, -4.1814e-10]
aungier.h_std  = 309269.90      # Enthalpy at p = 1e5 Pa and T = 298.15 K
aungier.s_std  = 6839.21        # Entropy at p = 1e5 Pa and T = 298.15 K
aungier.T_crit = 126.20         # Critical temperature in K
aungier.p_crit = 3.3980e6       # Critical pressure in Pa
aungier.V_crit = 0.003216       # Critical specific volume in m3/kg
aungier.acentric_factor = 0.037
aungier.mu0    = 1.716e-5       # Dynamic viscosity at T0 in Pa.s
aungier.T0     = 273.15         # Reference temperature, in K
aungier.S      = 110.4         # Sutherland's temperature, in K
```

---

Listing 5: Definice okrajových podmínek.

---

```
[boundary_conditions]
rpm = 17500
ptot_in = 7.5e6
Ttot_in = 333.15
mdot_in = 274.0
```

---

Sekce je uvozena názvem `[boundary_conditions]`. V této sekci je pomocí klíčového slova `rpm` zadána rychlost rotace turbostroje v otáčkách za minutu. Dále je pomocí klíčových slov `ptot_in`, `ttot_in` a `mdot` zadán celkový tlak, celková teplota a hmotnostní tok v Pa, K a  $\text{kg s}^{-1}$  na vstupním řezu. Viz příklad 5.

#### 4.4 Sekce `solver`, `results`, `reports` a `plots`

Ve zbývajících sekcích jsou pak definovány parametry výpočtu, výstupu a výpisu. Sekce `[solver]` obsahuje jedinou položku udávající počet dělení po délce lopatek (tj. počet proudnic).

Sekce `results` pak udává jméno souboru pro uložení výsledků. Soubor s výsledky je uložen ve formátu kompatibilním s programem *Matlab* a *Octave* a obsahuje hodnoty jednotlivých veličin na vstupním řezu, naběžných a odtokových hranách lopatkových řad a na výstupním řezu. Hodnoty jednotlivých veličin jsou uloženy ve dvourozměrných polích, první index přitom určuje číslo řezu, druhý index pak pozici bodu na řezu v pořadí od paty lopatky ke špičce. Veličiny jsou uloženy v polích s následujícími názvy:

**z** - axiální souřadnice v m,

**r** - radiální souřadnice v m,

**p** - tlak v Pa,

**T** - teplota v K,

**rho** - hustota v  $\text{kg m}^{-3}$ ,

Listing 6: Nastavení řešiče a výstupů.

---

```
[ solver ]
number_of_streamlines = 15

[ results ]
file = "results.mat"

[ reports ]
screen = true
file = "report.txt"

[ plots ]
python = "python3"
dpi = 150
format = "png"
plot_all = true
```

---

**S** - entropie v  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ,

**Htot** - celková entalpie v  $\text{J kg}^{-1}$ ,

**Cm** - meridionální rychlost v  $\text{m s}^{-1}$ ,

**Ct** - absolutní tangenciální rychlost v  $\text{m s}^{-1}$ .

Sekce **reports** pak obsahuje položky pro výpis z programu. Výpis může být zobrazen na obrazovku nebo uložen do souboru.

Sekce **plots** pak obsahuje položky pro grafický výstup. Pro jeho využití je nutno mít nainstalovaný *python* spolu s knihovnamí *numpy* a *matplotlib*. V případě, že tyto dodatečné balíky nejsou nainstalovány, je možné grafický výstup vypnout smazáním sekce **plots** ze vstupního souboru nebo nastavením **plot\_all** na hodnotu **false**.

Příklad nastavení těchto sekcí je ve výpisu 6.

## 5 Spuštění programu

Program se spouští z příkazové řádky pomocí

Listing 7: Spuštění výpočtu.

```
./TFana --input=input.toml
```

Výpočet proběhne během několika sekund a na obrazovce se objeví zpráva o úspěšném dokončení programu. Současně program vypíše dle nastavení v sekci **reports** některé výsledky na obrazovku a do souboru. Kompletnější soubor s výsledky pro pozdější zpracování se uloží ve formátu pro Matlab do souboru **results.mat** (lze nastavit ve vstupním souboru v sekci **results**).

V případě nevhodně zvolených okrajových podmínek může program skončit chybou. V takovém případě je nutno zkontrolovat vstupní soubor a případně upravit okrajové podmínky.

## Odkazy

- [1] Ronald H. Aungier. „Axial-flow compressors : a strategy for aerodynamic design and analysis“. In: (2003), s. 361.
- [2] Ronald H. Aungier. *Turbine Aerodynamics: Axial-Flow and Radial-Flow Turbine Design and Analysis*. 2010. DOI: 10.1115/1.802418.

## A Příklad vstupního souboru a výsledků pro jeden stupeň axiálního kompresoru

V následujícím výpisu je uveden kompletní vstupní soubor pro výpočet prvního stupně kompresoru. Dále je uveden výstupní soubor (výpis ??) z výpočtu. Obrázky 5 a 6 pak ukazují příklad grafického výstupu programu.

Listing 8: Vstupní soubor pro první stupeň kompresoru.

```
[machine]
type = "compressor"

hub_outline = [
  [-0.057, 0.093188 ],
  [-0.017, 0.093188 ],
  [ 0.029, 0.098655 ],
  [ 0.054, 0.098655 ],
  [ 0.136, 0.100246 ],
  [ 0.175, 0.100246 ]
]

shroud_outline = [
  [-0.057, 0.135 ],
  [ 0.175, 0.135 ]
]

[[machine.blade_row]]
name = "R1"
rotating = true
number_of_blades = 11
leading_edge = [ [-0.016120, 0.093000],
                 [-0.012625, 0.114000],
                 [-0.010111, 0.135000] ]
trailing_edge = [ [ 0.030103, 0.093000],
                  [ 0.023516, 0.114000],
                  [ 0.018109, 0.135000] ]
inlet_angle = [ 53.029, 59.621, 64.936 ]
outlet_angle = [ -7.725, 23.717, 42.544 ]
chord = [ 0.05310, 0.05225, 0.05140 ]
relative_thickness = [ 0.06, 0.06, 0.06 ]
performance_model.type = "lieblein"

[[machine.blade_row]]
name = "S1"
rotating = false
number_of_blades = 13
leading_edge = [ [ 0.049987, 0.099000],
                 [ 0.049589, 0.117000],
                 [ 0.049491, 0.135000] ]
trailing_edge = [ [ 0.139000, 0.099000],
                  [ 0.138000, 0.117000],
                  [ 0.137100, 0.135000] ]
inlet_angle = [ 40.950, 37.920, 35.633 ]
outlet_angle = [ -10.000, -8.500, -7.000 ]
chord = [ 0.09570, 0.09435, 0.09300 ]
relative_thickness = [ 0.06, 0.06, 0.06 ]#
performance_model.type = "lieblein"

[thermo]
model = "perfect_gas"
perfect_gas.r = 287.058
perfect_gas.cp = 1004.0
perfect_gas.mu = 1.8e-5

[boundary_conditions]
rpm = 17500
```

```

ptot.in = 7.5e6
Ttot.in = 333.15
mdot.in = 274.0

[solver]
number_of_streamlines = 15

[results]
file = "results.mat"

[plots]
python = "python3"
dpi = 150
format = "png"
plot.all = true

```

Listing 9: Výstupní soubor z výpočtu prvního stupně kompresoru. label

TFANA report, code version 1.0.0, generated on 20231231 at 125715.113

```

Boundary conditions
Total pressure at inlet : 7500000.0000000000 Pa
Total temperature at inlet : 333.14999999999999 K
Mass flow rate at inlet : 274.00000000000000 kg/s
Rotational speed : 17500.000000000000 rpm

```

Inlet, mdot = 273.99549421038381		kg/s						
Line	r (m)	p (bar)	ptot (bar)	T (K)	Ttot (K)	rho (kg/m3)	Htot (kJ/kg)	S (J/kg/K)
1.)	0.093188	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
2.)	0.096768	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
3.)	0.100225	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
4.)	0.103568	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
5.)	0.106807	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
6.)	0.109952	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
7.)	0.113009	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
8.)	0.115985	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
9.)	0.118886	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
10.)	0.121718	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
11.)	0.124486	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
12.)	0.127194	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
13.)	0.129847	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
14.)	0.132448	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349
15.)	0.135000	69.190396	75.000000	325.558020	333.150000	74.036821	334.482600	1287.580349

Line	C (m/s)	Cm (m/s)	Ct (m/s)	W (m/s)	Wt (m/s)	alpha (deg)	alpha' (deg)	Y (-)
1.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
7.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15.)	123.469415	123.469415	0.000000	123.469415	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

R1, leading edge, mdot = 273.99999989777376		kg/s						
Line	r (m)	p (bar)	ptot (bar)	T (K)	Ttot (K)	rho (kg/m3)	Htot (kJ/kg)	S (J/kg/K)
1.)	0.093194	69.587800	75.000000	326.091555	333.150000	74.340230	334.482600	1287.580349
2.)	0.096921	69.473256	75.000000	325.937997	333.150000	74.252829	334.482600	1287.580349
3.)	0.100478	69.374665	75.000000	325.805681	333.150000	74.177568	334.482600	1287.580349
4.)	0.103884	69.289489	75.000000	325.691262	333.150000	74.112523	334.482600	1287.580349
5.)	0.107158	69.216089	75.000000	325.592580	333.150000	74.056452	334.482600	1287.580349
6.)	0.110312	69.153137	75.000000	325.507886	333.150000	74.008349	334.482600	1287.580349
7.)	0.113360	69.099568	75.000000	325.435773	333.150000	73.967406	334.482600	1287.580349
8.)	0.116313	69.054394	75.000000	325.374929	333.150000	73.932872	334.482600	1287.580349
9.)	0.119183	69.016657	75.000000	325.324080	333.150000	73.904019	334.482600	1287.580349
10.)	0.121976	68.985554	75.000000	325.282155	333.150000	73.880234	334.482600	1287.580349
11.)	0.124699	68.960422	75.000000	325.248270	333.150000	73.861014	334.482600	1287.580349
12.)	0.127359	68.940680	75.000000	325.221645	333.150000	73.845914	334.482600	1287.580349
13.)	0.129959	68.925791	75.000000	325.201561	333.150000	73.834525	334.482600	1287.580349
14.)	0.132505	68.915219	75.000000	325.187298	333.150000	73.826437	334.482600	1287.580349
15.)	0.135000	68.908206	75.000000	325.177836	333.150000	73.821072	334.482600	1287.580349

Line	C (m/s)	Cm (m/s)	Ct (m/s)	W (m/s)	Wt (m/s)	alpha (deg)	alpha' (deg)	Y (-)
1.)	119.051911	119.051911	0.000000	208.186777	170.787519	0.000000	55.120566	0.000000
2.)	120.339943	120.339943	0.000000	214.545467	177.617723	0.000000	55.881490	0.000000
3.)	121.438841	121.438841	0.000000	220.574805	184.135419	0.000000	56.594816	0.000000
4.)	122.381151	122.381151	0.000000	226.320564	190.378180	0.000000	57.265800	0.000000
5.)	123.188062	123.188062	0.000000	231.817150	196.376914	0.000000	57.899779	0.000000
6.)	123.876408	123.876408	0.000000	237.093130	202.157829	0.000000	58.501251	0.000000
7.)	124.459504	124.459504	0.000000	242.172331	207.743278	0.000000	59.074072	0.000000
8.)	124.949359	124.949359	0.000000	247.078195	213.155559	0.000000	59.621654	0.000000
9.)	125.357278	125.357278	0.000000	251.831235	218.413653	0.000000	60.146575	0.000000
10.)	125.692615	125.692615	0.000000	256.447433	223.532218	0.000000	60.650865	0.000000
11.)	125.962989	125.962989	0.000000	260.939829	228.523345	0.000000	61.136269	0.000000
12.)	126.175026	126.175026	0.000000	265.319548	233.397355	0.000000	61.604265	0.000000
13.)	126.334740	126.334740	0.000000	269.596287	238.163162	0.000000	62.056080	0.000000
14.)	126.448034	126.448034	0.000000	273.778775	242.828566	0.000000	62.492671	0.000000
15.)	126.523139	126.523139	0.000000	277.876003	247.400421	0.000000	62.914327	0.000000

R1, trailing edge, mdot = 274.00000051816818								
Line	r (m)	p (bar)	ptot (bar)	T (K)	Ttot (K)	rho (kg/m3)	Htot (kJ/kg)	S (J/kg/K)
1.)	0.098651	79.492914	96.143803	340.357889	359.377025	81.362248	360.814533	1292.369839
2.)	0.101564	80.122815	95.907876	341.120527	359.118034	81.823620	360.554506	1292.351302
3.)	0.104418	80.670926	95.657705	341.762264	358.824925	82.228673	360.260225	1292.281267
4.)	0.107216	81.152082	95.410672	342.304984	358.519040	82.587970	359.953117	1292.167309
5.)	0.109962	81.575137	95.186928	342.765890	358.227922	82.906877	359.660834	1292.025685
6.)	0.112658	81.948897	95.010261	343.164595	357.985972	83.189973	359.417916	1291.880622
7.)	0.115306	82.286899	94.903279	343.526734	357.826979	83.445035	359.258287	1291.758027
8.)	0.117906	82.590177	94.828571	343.851560	357.708244	83.673463	359.139077	1291.650882
9.)	0.120460	82.864396	94.765806	344.142672	357.604248	83.880264	359.034665	1291.549010
10.)	0.122970	83.113825	94.701445	344.403945	357.498889	84.068926	358.928885	1291.448185
11.)	0.125439	83.340833	94.621924	344.637474	357.376574	84.241421	358.806081	1291.345764
12.)	0.127871	83.548442	94.515903	344.843858	357.221784	84.400730	358.650671	1291.232627
13.)	0.130271	83.738790	94.371919	345.023118	357.019350	84.549069	358.447427	1291.101141
14.)	0.132645	83.911916	94.176894	345.173831	356.753380	84.686878	358.180393	1290.946744
15.)	0.135000	84.029005	93.881020	345.251831	356.371003	84.785889	357.796487	1290.773320

Line	C (m/s)	Cm (m/s)	Ct (m/s)	W (m/s)	Wt (m/s)	alpha (deg)	alpha' (deg)	Y (-)
1.)	195.423710	130.292747	-145.651044	134.947769	35.136767	-48.185644	15.092247	0.083854
2.)	190.102584	128.520606	-140.076573	136.521445	46.049524	-47.463541	19.712835	0.079116
3.)	185.099498	126.944093	-134.710881	139.008559	56.644300	-46.700230	24.047124	0.074194
4.)	180.437870	125.512239	-129.632182	142.205311	66.850792	-45.925103	28.040822	0.069185
5.)	176.203748	124.244546	-124.944202	145.944923	76.571623	-45.160871	31.645431	0.064302
6.)	172.514712	123.183555	-120.777223	150.050762	85.679886	-44.434876	34.820407	0.059834
7.)	169.454693	122.342242	-117.248747	154.320804	94.060014	-43.782125	37.554053	0.056059
8.)	166.805942	121.666756	-114.111449	158.742211	101.962199	-43.164635	39.964517	0.052796
9.)	164.410601	121.083337	-111.219024	163.276229	109.535166	-42.568496	42.133321	0.049533
10.)	162.156244	120.527449	-108.479407	167.888570	116.874745	-41.988448	44.118509	0.047140
11.)	159.937842	119.934876	-105.809918	172.561632	124.069104	-41.419644	45.970686	0.044596
12.)	157.654290	119.240093	-103.134259	177.291001	131.201748	-40.857471	47.734495	0.042097
13.)	155.204491	118.371073	-100.382883	182.079098	138.351318	-40.299131	49.450257	0.039547
14.)	152.485196	117.251458	-97.487592	186.940033	145.597636	-39.741502	51.155105	0.036896
15.)	149.423218	115.961116	-94.235437	192.110627	153.164984	-39.098927	52.870659	0.034186

S1, leading edge, mdot = 274.00000002309866								
Line	r (m)	p (bar)	ptot (bar)	T (K)	Ttot (K)	rho (kg/m3)	Htot (kJ/kg)	S (J/kg/K)
1.)	0.098655	79.983285	96.143803	340.956872	359.377025	81.720335	360.814533	1292.369839
2.)	0.101681	80.475502	95.907876	341.549170	359.118034	82.080653	360.554506	1292.351302
3.)	0.104615	80.910030	95.657705	342.051579	358.824925	82.402637	360.260225	1292.281267
4.)	0.107469	81.294100	95.410672	342.476152	358.519040	82.691151	359.953117	1292.167309
5.)	0.110250	81.634826	95.186928	342.837580	358.227922	82.950192	359.660834	1292.025685
6.)	0.112963	81.938859	95.010261	343.152576	357.985972	83.182696	359.417916	1291.880622
7.)	0.115614	82.217038	94.903279	343.443321	357.826979	83.394440	359.258287	1291.758027
8.)	0.118203	82.468407	94.828571	343.706533	357.708244	83.585350	359.139077	1291.650882
9.)	0.120735	82.697443	94.765806	343.944285	357.604248	83.759549	359.034665	1291.549010
10.)	0.123215	82.907252	94.701445	344.158988	357.498889	83.919667	358.928885	1291.448185
11.)	0.125645	83.099323	94.621924	344.351632	357.376574	84.067026	358.806081	1291.345764
12.)	0.128033	83.275774	94.515903	344.521705	357.221784	84.203944	358.650671	1291.232627
13.)	0.130383	83.438072	94.371919	344.668408	357.019350	84.332142	358.447427	1291.101141
14.)	0.132702	83.592257	94.176894	344.797362	356.753380	84.456380	358.180393	1290.946744
15.)	0.135000	83.712423	93.881020	344.879426	356.371003	84.557663	357.796487	1290.773320

Line	C (m/s)	Cm (m/s)	Ct (m/s)	W (m/s)	Wt (m/s)	alpha (deg)	alpha' (deg)	Y (-)
1.)	192.321784	125.598829	-145.645469	192.321784	145.645469	-49.226830	49.226830	0.000000
2.)	187.825125	125.307019	-139.915791	187.825125	139.915791	-48.152730	48.152730	0.000000
3.)	183.523514	124.909527	-134.456277	183.523514	134.456277	-47.107995	47.107995	0.000000
4.)	179.482922	124.453581	-129.326817	179.482922	129.326817	-46.100091	46.100091	0.000000
5.)	175.794786	123.992409	-124.618174	175.794786	124.618174	-45.144216	45.144216	0.000000
6.)	172.584645	123.600194	-120.451035	172.584645	120.451035	-44.260715	44.260715	0.000000
7.)	169.948187	123.321594	-116.936609	169.948187	116.936609	-43.477693	43.477693	0.000000
8.)	167.676578	123.123564	-113.824527	167.676578	113.824527	-42.752578	42.752578	0.000000

9.)	165.617651	122.946856	-110.965206	165.617651	110.965206	-42.067708	42.067708	0.000000
10.)	163.665881	122.741351	-108.263943	163.665881	108.263943	-41.413888	41.413888	0.000000
11.)	161.722243	122.454467	-105.636108	161.722243	105.636108	-40.782902	40.782902	0.000000
12.)	159.692695	122.032531	-103.003971	159.692695	103.003971	-40.166700	40.166700	0.000000
13.)	157.482356	121.413351	-100.297012	157.482356	100.297012	-39.559395	39.559395	0.000000
14.)	154.944132	120.465658	-97.445931	154.944132	97.445931	-38.969758	38.969758	0.000000
15.)	151.904857	119.141798	-94.235437	151.904857	94.235437	-38.342303	38.342303	0.000000

S1, trailing edge, mdot = 273.99999970435692								
Line	r (m)	p (bar)	ptot (bar)	T (K)	Ttot (K)	rho (kg/m3)	Htot (kJ/kg)	S (J/kg/K)
1.)	0.100246	87.468386	94.891847	351.103609	359.377025	86.785299	360.814533	1296.132373
2.)	0.102996	87.489417	94.803979	350.967646	359.118034	86.839794	360.554506	1295.674494
3.)	0.105696	87.493928	94.677827	350.819895	358.824925	86.880847	360.260225	1295.236935
4.)	0.108352	87.496063	94.534354	350.675298	358.519040	86.918792	359.953117	1294.816031
5.)	0.110969	87.495702	94.395386	350.537545	358.227922	86.952590	359.660834	1294.422744
6.)	0.113548	87.494097	94.285818	350.415293	357.985972	86.981331	359.417916	1294.077796
7.)	0.116084	87.504268	94.229484	350.331162	357.826979	87.012333	359.258287	1293.803351
8.)	0.118574	87.510900	94.196741	350.257305	357.708244	87.037276	359.139077	1293.569911
9.)	0.121019	87.515816	94.170552	350.188940	357.604248	87.059159	359.034665	1293.357800
10.)	0.123421	87.520418	94.139087	350.124481	357.498889	87.079766	358.928885	1293.157882
11.)	0.125784	87.524198	94.090115	350.061088	357.376574	87.099297	358.806081	1292.963683
12.)	0.128115	87.527700	94.013344	349.995141	357.221784	87.119194	358.650671	1292.763040
13.)	0.130420	87.531219	93.898105	349.923512	357.019350	87.140530	358.447427	1292.546005
14.)	0.132711	87.542682	93.731982	349.853000	356.753380	87.169507	358.180393	1292.306081
15.)	0.135000	87.519114	93.467235	349.733836	356.371003	87.175733	357.796487	1292.041339

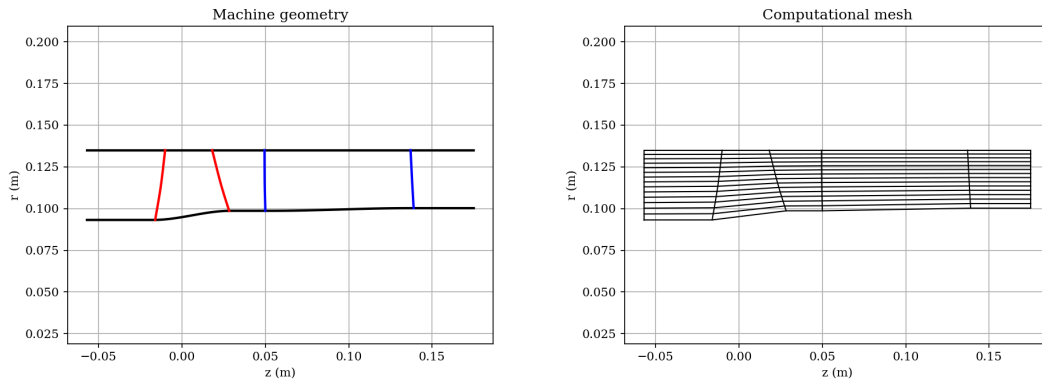
Line	C (m/s)	Cm (m/s)	Ct (m/s)	W (m/s)	Wt (m/s)	alpha (deg)	alpha' (deg)	Y (-)
1.)	128.891506	128.798120	4.905564	128.891506	-4.905564	2.181183	-2.181183	0.077470
2.)	127.929586	127.850951	4.484773	127.929586	-4.484773	2.009006	-2.009006	0.071531
3.)	126.783681	126.719037	4.048144	126.783681	-4.048144	1.829739	-1.829739	0.066443
4.)	125.499941	125.448508	3.592640	125.499941	-3.592640	1.640409	-1.640409	0.062077
5.)	124.266963	124.227260	3.141023	124.266963	-3.141023	1.448386	-1.448386	0.058407
6.)	123.296087	123.266213	2.713987	123.296087	-2.713987	1.261294	-1.261294	0.055422
7.)	122.684969	122.663199	2.311075	122.684969	-2.311075	1.079372	-1.079372	0.053112
8.)	122.317152	122.301947	1.928545	122.317152	-1.928545	0.903406	-0.903406	0.051118
9.)	122.024341	122.014474	1.551734	122.024341	-1.551734	0.728627	-0.728627	0.049324
10.)	121.687351	121.681709	1.171783	121.687351	-1.171783	0.551736	-0.551736	0.047681
11.)	121.200236	121.197708	0.782801	121.200236	-0.782801	0.370061	-0.370061	0.046154
12.)	120.462023	120.461422	0.380658	120.462023	-0.380658	0.181054	-0.181054	0.044711
13.)	119.366840	119.366834	-0.038069	119.366840	0.038069	-0.018273	0.018273	0.043335
14.)	117.711351	117.710347	-0.485996	117.711351	0.485996	-0.236558	0.236558	0.042034
15.)	115.444495	115.440674	-0.939335	115.444495	0.939335	-0.466203	0.466203	0.040692

Outlet, mdot = 273.9999999991638								
Line	r (m)	p (bar)	ptot (bar)	T (K)	Ttot (K)	rho (kg/m3)	Htot (kJ/kg)	S (J/kg/K)
1.)	0.100246	87.469742	94.891847	351.105164	359.377025	86.786260	360.814533	1296.132373
2.)	0.102997	87.490157	94.803979	350.968495	359.118034	86.840319	360.554506	1295.674494
3.)	0.105697	87.494116	94.677827	350.820109	358.824925	86.880980	360.260225	1295.236935
4.)	0.108353	87.495783	94.534354	350.674977	358.519040	86.918593	359.953117	1294.816031
5.)	0.110971	87.495033	94.395386	350.536779	358.227922	86.952116	359.660834	1294.422744
6.)	0.113550	87.493108	94.285818	350.414160	357.985972	86.980629	359.417916	1294.077796
7.)	0.116086	87.503010	94.229484	350.329722	357.826979	87.011439	359.258287	1293.803351
8.)	0.118577	87.509411	94.196741	350.255602	357.708244	87.036219	359.139077	1293.569911
9.)	0.121021	87.514126	94.170552	350.187007	357.604248	87.057958	359.034665	1293.357800
10.)	0.123423	87.518551	94.139087	350.122345	357.498889	87.078439	358.928885	1293.157882
11.)	0.125786	87.522175	94.090115	350.058774	357.376574	87.097859	358.806081	1292.963683
12.)	0.128116	87.525545	94.013344	349.992677	357.221784	87.117662	358.650671	1292.763040
13.)	0.130421	87.528961	93.898105	349.920931	357.019350	87.138925	358.447427	1292.546005
14.)	0.132711	87.540357	93.731982	349.850344	356.753380	87.167854	358.180393	1292.306081
15.)	0.135000	87.516756	93.467235	349.731142	356.371003	87.174055	357.796487	1292.041339

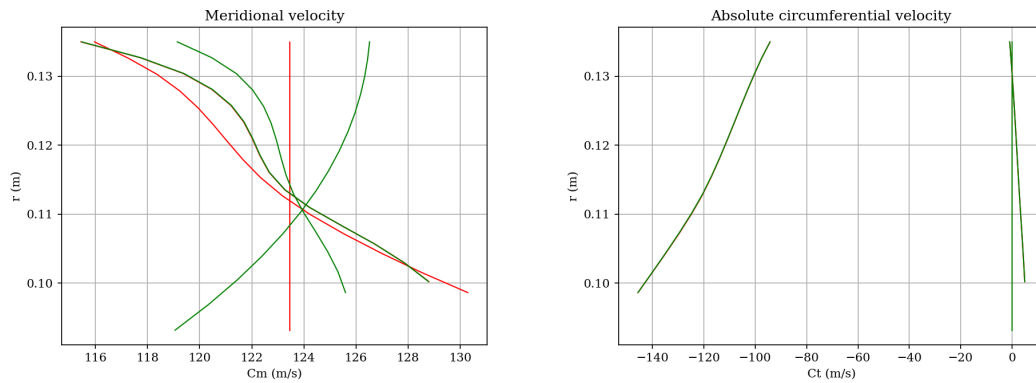
Line	C (m/s)	Cm (m/s)	Ct (m/s)	W (m/s)	Wt (m/s)	alpha (deg)	alpha' (deg)	Y (-)
1.)	128.879388	128.785993	4.905564	128.879388	4.905564	2.181389	2.181389	0.000000
2.)	127.922920	127.844282	4.484736	127.922920	4.484736	2.009094	2.009094	0.000000
3.)	126.781981	126.717338	4.048088	126.781981	4.048088	1.829738	1.829738	0.000000
4.)	125.502510	125.451080	3.592578	125.502510	3.592578	1.640347	1.640347	0.000000
5.)	124.273148	124.233448	3.140963	124.273148	3.140963	1.448286	1.448286	0.000000
6.)	123.305310	123.275440	2.713934	123.305310	2.713934	1.261175	1.261175	0.000000
7.)	122.696754	122.674988	2.311030	122.696754	2.311030	1.079247	1.079247	0.000000
8.)	122.331131	122.315929	1.928510	122.331131	1.928510	0.903286	0.903286	0.000000
9.)	122.040244	122.030379	1.551708	122.040244	1.551708	0.728520	0.728520	0.000000
10.)	121.704975	121.699334	1.171766	121.704975	1.171766	0.551648	0.551648	0.000000
11.)	121.219403	121.216876	0.782792	121.219403	0.782792	0.369998	0.369998	0.000000
12.)	120.482558	120.481957	0.380655	120.482558	0.380655	0.181022	0.181022	0.000000
13.)	119.388547	119.388541	-0.038068	119.388547	-0.038068	-0.018269	-0.018269	0.000000
14.)	117.734007	117.733004	-0.485995	117.734007	0.485995	-0.236512	0.236512	0.000000
15.)	115.467924	115.464103	-0.939335	115.467924	0.939335	-0.466108	0.466108	0.000000



Compressor performance :		
Mass flow rate	: 273.99999999991638	kg/s
Power	: -6788562.5774067957	W
Compression (static-static)	: 1.2647608724416912	
Compression (total-total)	: 1.2565422319761421	
Efficiency	: 91.088693902575883	%



Obrázek 5: Zobrazení kompresoru v meridiální rovině (vlevo, červeně jsou znázorněny obrysy rotorových a modře statorových lopatek) a výpočetní síť (vpravo).)



Obrázek 6: Zobrazení velikostí meridiální složky rychlosti (vlevo) a obvodové složky absolutní rychlosti (vpravo).

## B Obsah souboru s výsledky a jeho načtení

Program při úspěšném dokončení výpočtu uloží data do souboru `results.mat`. Soubor je v binárním formátu a je kompatibilní se softwarem Matlab a Octave Pro načtení dat do Matlabu nebo Octave je možné použít následující příkaz:

```
load( ' results . mat ' )
```

Matlab pak načte následující pole:

- `z` - axiální souřadnice
- `r` - radiální souřadnice
- `p` - statický tlak
- `pTot` - celkový tlak
- `pTotRel` - relativní celkový tlak
- `T` - statická teplota
- `Ttot` - celková teplota
- `rho` - hustota
- `h` - entalpie
- `Htot` - celková entalpie
- `HtotRel` - relativní celková entalpie
- `S` - entropie
- `Cm` - meridionální složka absolutní rychlosti
- `Ct` - obvodová složka absolutní rychlosti
- `Wt` - obvodová složka relativní rychlosti

První index v polích přitom odpovídá pořadí kvazinormály od od vstupu, druhý index pak odpovídá poloze bodu na kvazinormále v pořadí od náboje k plášti.

Datový soubor je také možné načíst do Pythonu pomocí knihovny `scipy`:

```
import scipy.io  
data = scipy.io.loadmat( ' results . mat ' )
```

Výsledkem je slovník, kde klíče odpovídají názvům proměnných v Matlabu a hodnoty jsou pole s výsledky.