



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

PLYNOVÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

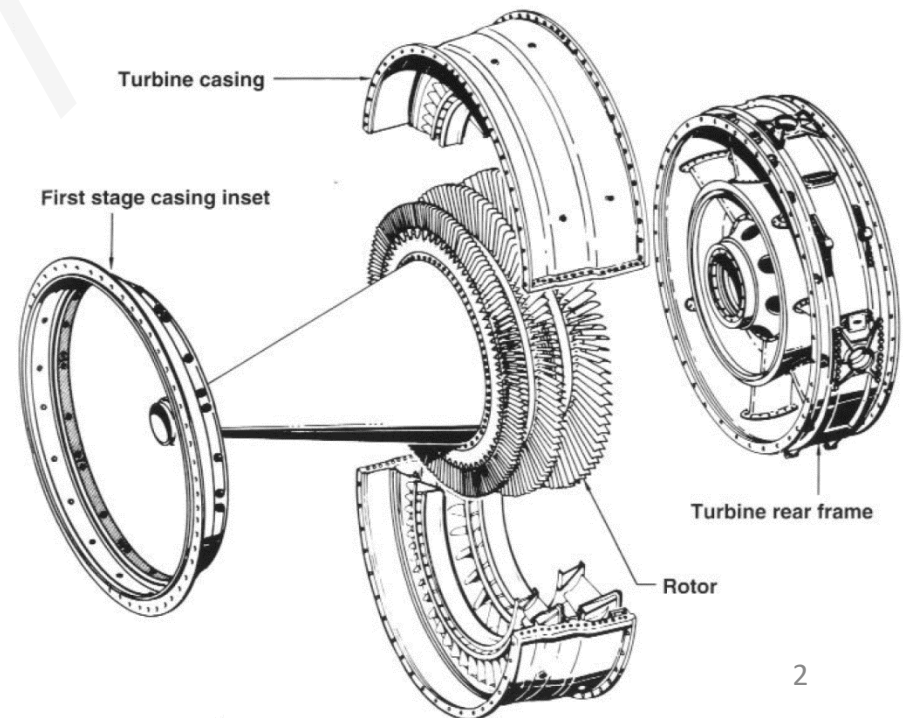
Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Datum: 25. 11. 2021

- Axiální (osové) plynové turbíny
 - Úvod
 - Termodynamika PT
 - Předběžný návrh PT
 - Zjednodušená 2D analýza proudění v mřížích PT
 - Přehled ztrátových modelů

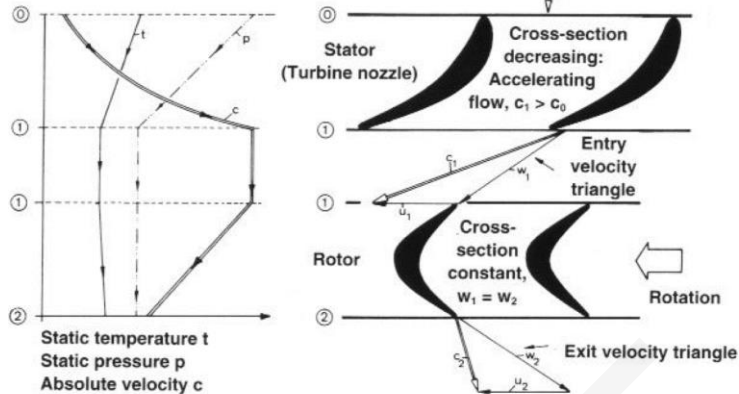
Plynové turbíny (úvod)

- Transformace tepelné a tlakové energie plynu na mechanickou práci
- Hlavním úkolem PT je pohánět kompresor
- PT může pohánět i další příslušenství TKM
 - Pohon vrtule (TVM), pohon nosného a vyrovnávacího rotoru vrtulníku
- Stupeň PT tvoří rozváděcí a oběžná mříž
 - Rovnotlaký / přetlakový stupeň

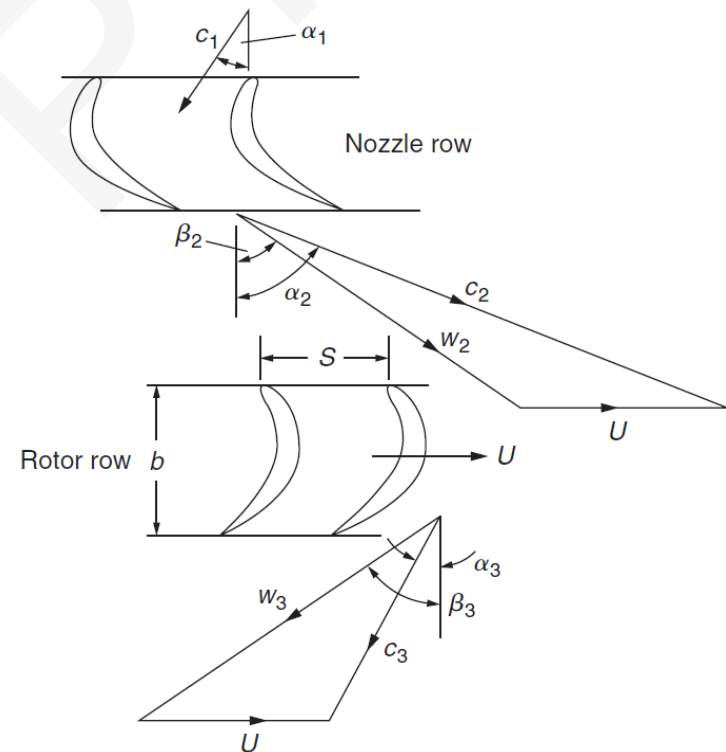
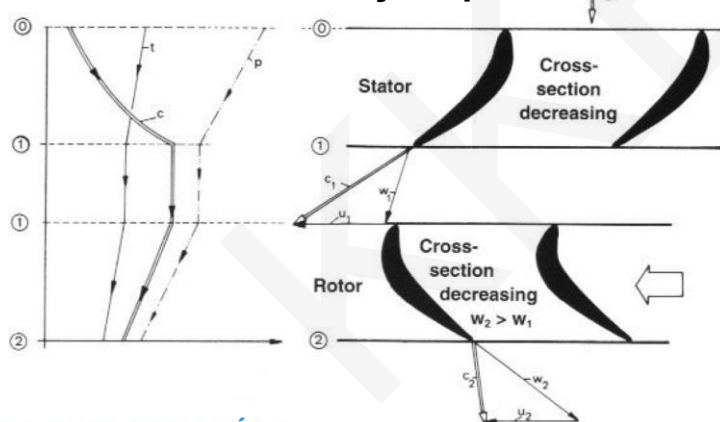


- Měřítkem přerozdělení zpracované energie ve stupni PT je reakce

Rovnotlaký stupeň



Přetlakový stupeň



Plynové turbíny (TD stupně)

- Za předpokladu adiabatického proudění ve stupni PT je užitečná práce turbíny rovna celkovému entalpickému spádu

$$\Delta a^T = h_{01} - h_{03} = u[c_{2u} - (-c_{3u})] = \underline{u(c_{2u} + c_{3u})}$$

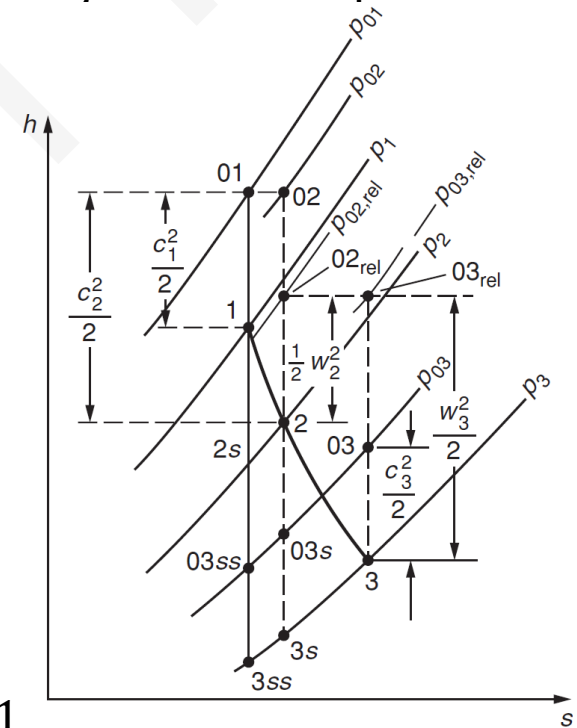
$$h_0 = h + \frac{1}{2}c_a^2 + \frac{1}{2}c_u^2 + \cancel{\frac{1}{2}c_r^2}$$

$$\begin{aligned} h_{02} - h_{03} &= (h_2 - h_3) + \frac{1}{2}(c_{2a}^2 - c_{3a}^2) + \frac{1}{2}(c_{2u}^2 - c_{3u}^2) = \\ &= \underline{u(c_{2u} + c_{3u})} \end{aligned}$$

$$(h_2 - h_3) + \frac{1}{2}(c_{2u} + c_{3u}) \cdot \left[\overbrace{(c_{2u} - u)}^{w_{2u}} - \overbrace{(c_{3u} + u)}^{w_{3u}} \right] + \frac{1}{2}(c_{2a}^2 - c_{3a}^2) = 0$$

$$c_{2u} + c_{3u} = w_{2u} + w_{3u} \rightarrow (h_2 - h_3) + \frac{1}{2}(w_{2u}^2 + w_{3u}^2) + \frac{1}{2}(c_{2a}^2 - c_{3a}^2) = 0$$

$$h_2 + \frac{w_2^2}{2} = h_3 + \frac{w_3^2}{2} ; h_{02,rel} = h_{03,rel} \rightarrow \text{Axiální PT}$$



Plynové turbíny (TD stupně)

- Celková účinnost stupně:

$$\eta_{tt} = \frac{h_{01} - h_{03}}{h_{01} - h_{03ss}}$$

- Předpoklad: $c_1 = c_3$; $\alpha_1 = \alpha_3$; $c_{3ss} = c_3$

$$\eta_{tt} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_{3ss}} = \frac{h_1 - h_3}{(h_1 - h_3) + (h_3 - h_{3s}) + (h_{3s} - h_{3ss})}$$

- II. G.R. (2s-2) a (3ss-3s):

$$h_2 - h_{2s} \cong T_2(s_2 - s_{2s})$$

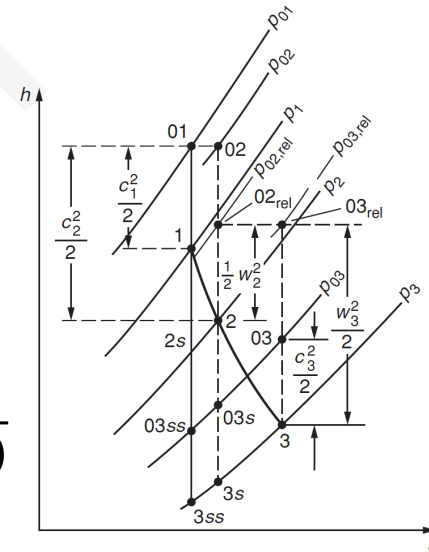
$$h_{3s} - h_{3ss} \cong T_3(s_{3s} - s_{3ss})$$

$$s_{3s} - s_{3ss} = s_2 - s_{2s} \Rightarrow h_{3s} - h_{3ss} =$$

$$\frac{T_3}{T_2} \underbrace{(h_2 - h_{2s})}_{\frac{1}{2}c_2^2\zeta_S}$$

$$\eta_{tt} = \left[1 + \frac{\zeta_R w_3^2 + \zeta_S c_2^2 \frac{T_3}{T_2}}{2(h_1 - h_3)} \right]^{-1}$$

$$\eta_{ts} = \frac{h_{01} - h_{03}}{h_{01} - h_{3ss}} = \left[1 + \frac{\zeta_R w_3^2 + \zeta_S c_2^2 \frac{T_3}{T_2} + c_1^2}{2(h_1 - h_3)} \right]^{-1}$$



Plynové turbíny (TD stupně)

- Určení ztrátových koeficientů ζ_S a ζ_R

$$s - s_{ref} = c_p \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)$$

$$s - s_{ref} = c_v \cdot \ln \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) - R \cdot \ln \left(\frac{\rho}{\rho_{ref}} \right)$$

$$\text{Stator: } s_2 - s_1 = -R \cdot \ln \left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right)$$

$$\text{Rotor: } s_2 - s_1 = -R \cdot \ln \left(\frac{p_{03,rel}}{p_{02,rel}} \right)$$

$$\zeta_S \cong \frac{T_2 \cdot \left[-R \cdot \ln \left(\frac{p_{02}}{p_{01}} \right) \right]}{\frac{c_2^2}{2}}$$

$$\zeta_R \cong \frac{T_3 \cdot \left[-R \cdot \ln \left(\frac{p_{03,rel}}{p_{02,rel}} \right) \right]}{\frac{w_3^2}{2}}$$

Plynové turbíny (Předběžný návrh)

- Cílem předběžného návrhu PT je stanovit tvary rychlostních trojúhelníků
- Výkonový koeficient ψ , průtokový koeficient φ a reakce stupně ρ
- Výkonový koeficient

$$\psi = \Delta h_0 / u^2 ; \Delta h_0 = u \Delta c_u \rightarrow \psi = \frac{\Delta c_u}{u}$$

- Čím vyšší hodnota ψ , tím nižší je počet potřebných stupňů PT
- Vysoká hodnota $\psi \rightarrow$ velké otočení proudu
- Průtokový koeficient
$$\varphi = c_a / u$$
 - Nízká hodnota $\varphi \rightarrow$ velké úhly nastavení
 - S rostoucí hodnotou φ se zvyšuje hmotnostní průtok stupněm (pro pevně danou geometrii a obvodovou rychlost)

Plynové turbíny (Předběžný návrh)

- Stupeň reakce

- Poměr statického entalpického spádu v oběžné mříži a statického entalpického spádu v celém turbínovém stupni

$$\rho = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3} ; \rho \approx \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p_3} \rightarrow \text{Izentropické, nestlačitelné proudění}$$

- Asymetrie rychlostních trojúhelníků \rightarrow geometrie lopatek

- **Návrh počtu stupňů**

- Vstupní parametry návrhu: hmotnostní průtok a požadovaný výkon
- Počet stupňů je také funkcí zatížení stupně a otáček

$$n_{st} \geq \frac{P}{\dot{m}\psi u^2}$$

Plynové turbíny (Předběžný návrh)

- **Určení výšky lopatky a středního poloměru**

- Nestlačitelné proudění:

$$\rho_1 S_{1a} = \rho_2 S_{2a} = \rho_3 S_{3a} = \text{const.}; \quad c_{1a} = c_{2a} = c_{3a}; \quad \varphi = \frac{c_a}{u}$$

$$S_a = \frac{\dot{m}}{\rho \varphi u} \approx 2\pi r_m H; \quad r_m^2 = \frac{r_h^2 + r_t^2}{2} \rightarrow S_a = \pi r_t^2 \left[1 - \left(\frac{r_h}{r_t} \right)^2 \right]$$

- r_h/r_t daný parametr $\rightarrow S_a$

- Elektrická síť: 50 Hz \sim 3000 ot/min $\rightarrow r_m = u/\omega \rightarrow H = r_t - r_h \approx \frac{\dot{m}}{\rho \varphi u 2\pi r_m}$

- Stlačitelné proudění:

$$\frac{\dot{m} \sqrt{c_p T_{01}}}{S_a \cos \alpha_1} = f(Ma_1) \rightarrow S_a$$

Plynové turbíny (Předběžný návrh)

• Podobnost stupňů vícestupňových PT

- Volba stejných (velmi podobných) rychlostních trojúhelníků na středním poloměru → dodržení stejných axiálních rychlostí a středních poloměrů v celé průtočné části
- Expanze → snižování hustoty média → delší lopatky
- Hlavní požadavky na dodržení podobnosti stupňů:

$$c_a = \text{const.}; r = \text{const.}; \alpha_1 = \alpha_3$$

- Pro stupně splňující tyto podmínky lze odvodit užitečné funkční závislosti

$$\rho = \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_3}; h_1 - h_3 = h_{01} - h_{03} \rightarrow \rho = 1 - \frac{h_1 - h_2}{h_{01} - h_{03}}$$

$$h_1 - h_2 = h_{01} - h_{02} + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) = \frac{1}{2}c_a^2(\tan^2\alpha_2 - \tan^2\alpha_1)$$

Plynové turbíny (Předběžný návrh)

- Výkonový koeficient $\rightarrow \psi = \frac{\Delta h_0}{u^2} \rightarrow h_{01} - h_{03} = \psi u^2$

$$\rho = 1 - \frac{h_1 - h_2}{h_{01} - h_{03}} = 1 - \frac{c_a^2 (\tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_1)}{2\psi u^2} = 1 - \frac{\varphi^2}{2\psi} (\tan^2 \alpha_2 - \tan^2 \alpha_1)$$

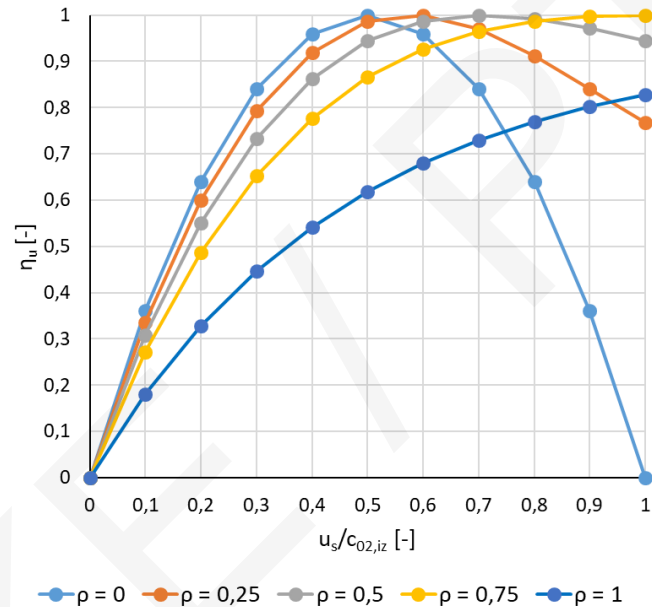
- Výkonový koeficient $\rightarrow \psi = \frac{\Delta h_0}{u^2}; \Delta h_0 = u \Delta c_u \rightarrow$
 $\rightarrow \psi = \frac{\Delta c_u}{u} = \frac{c_a (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_3)}{u} = \varphi (\tan \alpha_2 + \tan \alpha_1)$

$$\rho = 1 - \frac{\varphi}{2} (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1) \rightarrow \boxed{\psi = 2(1 - \rho + \varphi \tan \alpha_1)}$$

- Vztah mezi absolutními a relativními proudovými úhly:

$$\tan \beta_2 = \tan \alpha_2 - \frac{1}{\varphi}; \tan \beta_3 = \tan \alpha_3 + \frac{1}{\varphi} \rightarrow \boxed{\rho = \frac{\varphi}{2} (\tan \beta_3 - \tan \beta_2)}$$

- Vliv reakce na účinnost stupně PT



- Nízká reakce \rightarrow strmá charakteristika
- Vyšší reakce \rightarrow vliv axiální síly (bubnová koncepce rotoru)

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- Mezi prouděním v turbínových a kompresorových mřížích je několik zásadních rozdílů
- Turbínová mříž → expanze → pokles tlaku a nárůst rychlosti
 - Stabiltější mezní vrstvy
 - Větší odolnost lopatek vůči větším zatížením
 - Větší otočení proudu (více než 120°)
 - Difuzní faktor na podtlakové straně je kolem 0,15



Širší provozní režim → vyšší zatížení → méně stupňů

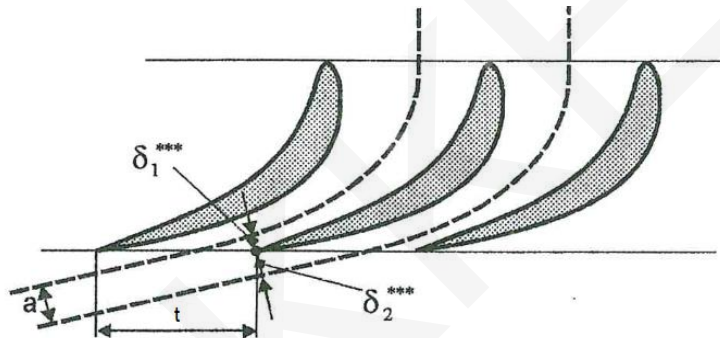
Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

• Ztrátové modely turbínových mříží

- Identifikace procesů, které se podílí na tvorbě ztrát
- Vznik ztrát lze rozdělit do několika skupin:

a) Odpor obtékaných ploch

- Třecí ztráty způsobené vazkostí pracovní látky při obtékání lopatek, omezujících stěn,...



$$\zeta = \frac{\delta_1^{***} + \delta_2^{***}}{a}$$

$$\delta^{***} = \int_0^\delta \frac{\rho \cdot w_x}{\rho_f \cdot w_f} \cdot \left(1 - \frac{w_x^2}{w_f^2}\right) dy$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

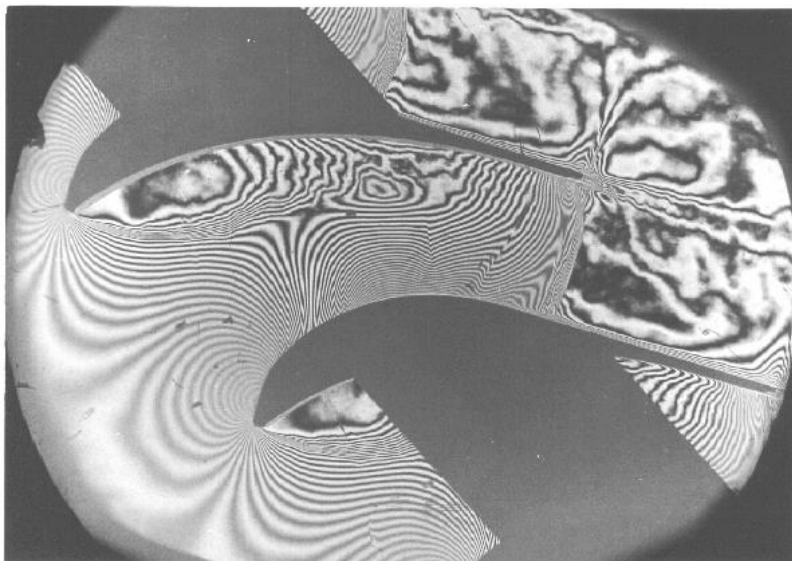
b) Směšování proudů

- Míšení dvou nebo několika proudů s různým tlakem, teplotou a rychlostí
- Interakce ucpávkového proudu s hlavním proudem (rozdílné rychlosti)
- Interakce chladicího vzduchu s hlavním proudem (rozdílné teploty)
- Ztráty konečnou tloušťkou odtokových hran

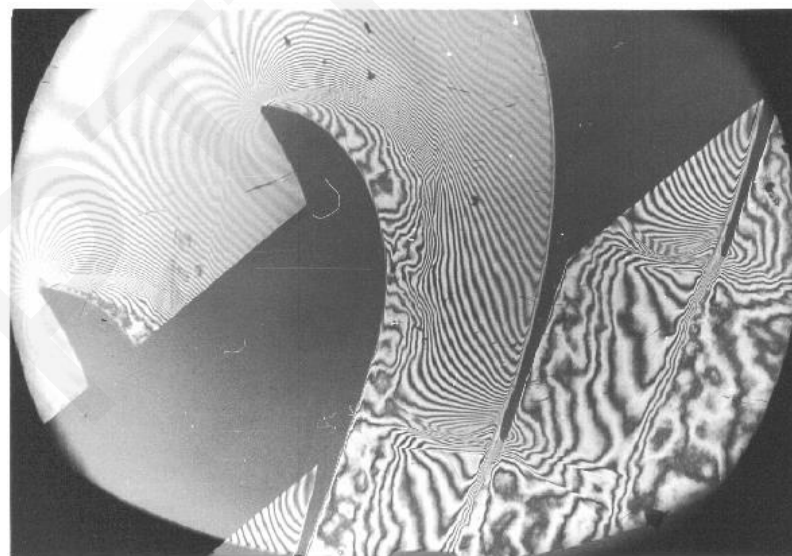
c) Rázové vlny

- Překročení místní rychlosti zvuku
- Skokové změny teplot, tlaků i hustot → skoková změna Ma

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)



Odlehčení ($i = -67^\circ$; $Ma_{2,iz} = 0,9$; $M_1 = 0,545$)^{*}



Přetížení ($i = 30^\circ$; $Ma_{2,iz} = 1,012$; $M_1 = 0,66$)^{*}

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

• Přehled ztrátových modelů

Rok	Autoři	Ztráty	D/OD
1949	Soderberg	$TT = PR + SE + TL$	D
1951	Ainley & Mathieson	$TT = PR + SE + TL + TE$	D + OD
1960	Steward et al	PR, SE	D
1965	Smith	TT	OD
1968	Balje & Binsley	$TT = PR + SE + TL$	D
1969	Mukhatarov & Krichakin	$TT = PR + SE + TL$	D + OD
1970	Craig & Cox	$TT = PR + SE$	D + OD
1970	Dunham & Came	$TT = PR + SE + TL + TR$	D + OD
1971	Kroon & Tobiasz	TT	D + OD
1977	Traupel	$TT = PR + SE + FA + TL + TE$	D
1980	Zehner	PR	OD
1981	Machi & Perdichizzi	TT	D + OD
1982	Kacker & Okapuu	$TT = PR + SE + TL + TE$	D + OD
1987	Sharma & Butler	SE	D
1990	Moustapha et al	PR, SE	OD
1992	Okan & Gregory-Smith	SE	D
1992	Schobeiri & Abouelkheir	PR	OD
1993	Denton	$TT = PR + SE + TL + TE$	D
<p>Legenda: TT – Celkové ztráty, PR – Profilové ztráty, SE – Sekundární ztráty, FA – Ventilační ztráty, TL – Ztráty únikem nadbandážovou ucpávkou, TE – Ztráty na odtokové hraně D – Design (návrhový režim), OD – Off-design (nenávrhový režim)</p>			

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- **D. G. Ainley a G. C. R. Mathieson**

- Jeden z nejznámějších ztrátových modelů
- Celková ztráta je definována jako součet profilových, sekundárních ztrát a ztrát způsobených radiální vůlí (D+OD)

$$\zeta_C^{AM} = (\zeta_p^{AM} + \zeta_s^{AM} + \zeta_{cl}^{AM}) \cdot \chi_{TE}$$

Součinitel ztrát odtokové hrany (1 až 1,8)

a) Profilové ztráty

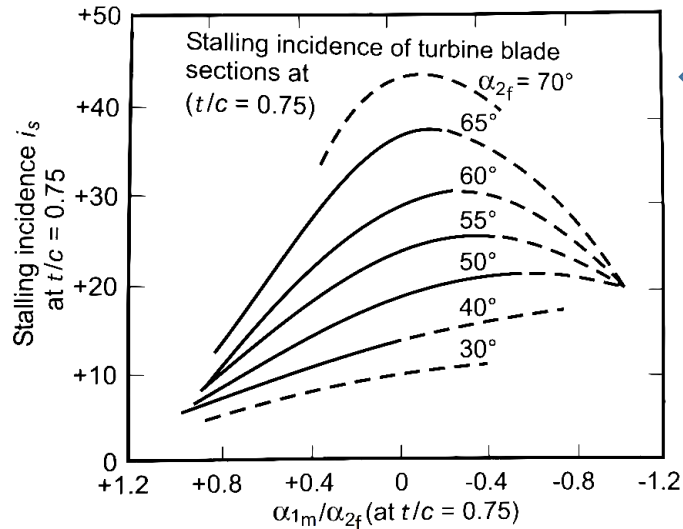
- Korelace jsou založeny na sérii závislostí celkových ztrát na t/c

$$\zeta_{p(i=0)}^{AM} = \left\{ \zeta_{p(\alpha_{1m}=0)} + \left(\frac{\alpha_{1m}}{\alpha_{2f}} \right)^2 \cdot \left[\zeta_{p(\alpha_{1m}=\alpha_{2f})} - \zeta_{p(\alpha_{1m}=0)} \right] \right\} \cdot \left(\frac{b_{max}/c}{0.2} \right)^{\frac{\alpha_{1m}}{\alpha_{2f}}}$$

- $i = 0$; $b_{max}/c = 0,2$; $Ma < 0,6$; $Re = 2 \cdot 10^5$

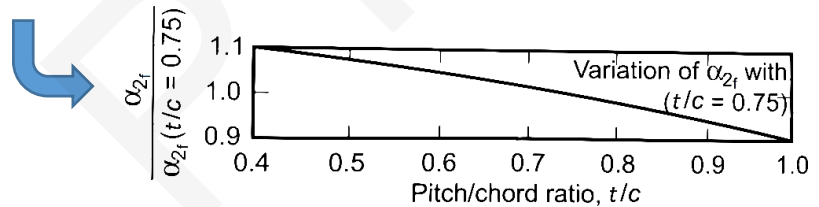
- Pro OD $\rightarrow i_{stall}$ (incidence odtržení proudu); $i_{stall} = f\left(\frac{t}{c}, \frac{\alpha_{1m}}{\alpha_{2f}}\right)$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

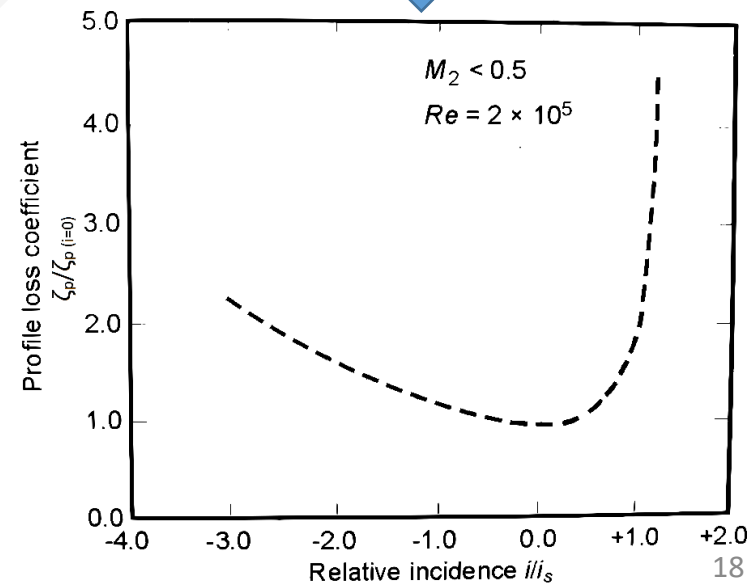
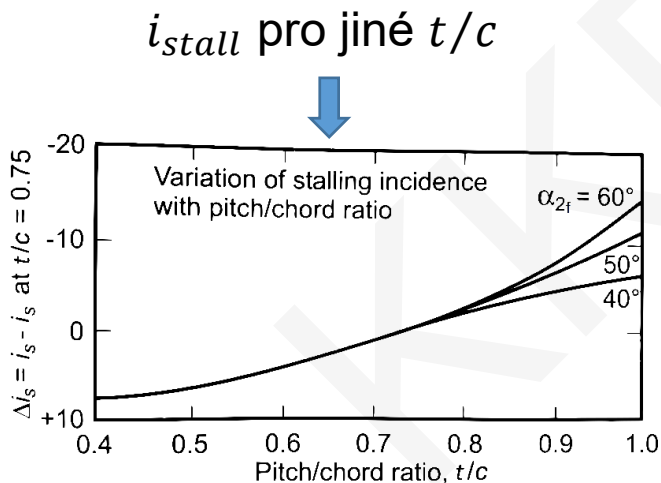


← i_{stall} pro $t/c = 0,75$

Korekce výstupního úhlu proudu



Výslední koeficient incidenčních ztrát



Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

b) Sekundární ztráty

- Izentropický součinitel vztlaku $c_{L,iz}$ a parametr geometrie mříže λ

$$\zeta_s^{AM} = \lambda \cdot \left(\frac{c_{L,iz}}{\frac{t}{c}} \right)^2 \cdot \frac{\cos^2 \alpha_{2f}}{\cos^3 \alpha_\infty} \quad \lambda = f \left[\frac{\left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2}{1 + \frac{r_r}{r_t}} \right]$$

$$c_{L,iz} = 2 \cdot \frac{t}{c} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{1f} - \operatorname{tg} \alpha_{2f}) \cdot \cos \alpha_\infty \rightarrow \text{Žukovského věta}$$

$$\alpha_\infty = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{1}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{1f} + \operatorname{tg} \alpha_{2f} \right)$$

c) Ztráty únikem nadbandážovou ucpávkou

$$\zeta_{cl}^{AM} = 4B \cdot \frac{\delta_r}{h} \cdot \frac{\cos^2 \alpha_{2f}}{\cos \alpha_\infty} \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{1f} - \operatorname{tg} \alpha_{2f})^2; B = 0,5 \text{ (bez bandáže)}, B = 0,25 \text{ (s bandáží)}$$

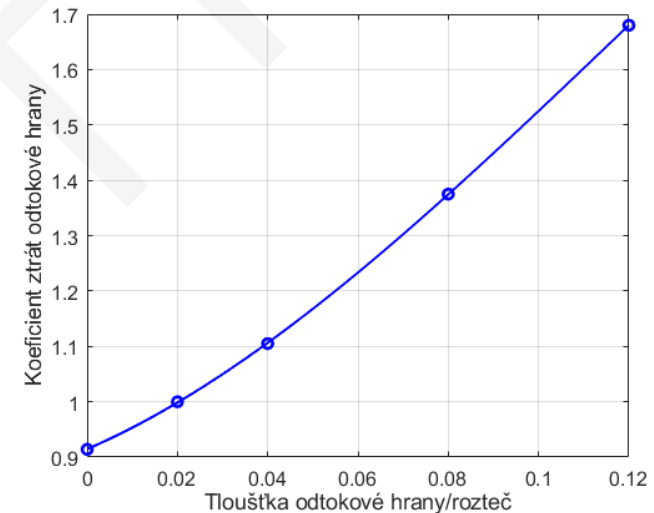
δ_r - radiální vůle, h - výška lopatky

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- **J. Dunham a P. M. Came**

- Zpřesnění modelu A&M
- Doplnění korelací pro turbíny menších výkonů
- Korekce pro Re a Ma_2

$$\zeta_c^{DC} = \left[(\zeta_p^{DC} + \zeta_s^{DC}) \cdot \left(\frac{Re}{2 \cdot 10^5} \right)^{-0.2} + \zeta_{cl}^{DC} \right] \cdot \chi_{TE}$$



a) Profilové ztráty

$$\zeta_p^{DC} = \zeta_p^{AM} \cdot [1 + 60 \cdot (Ma_2 - 1)^2] ; Ma_2 > 1; i = 0$$

b) Sekundární ztráty

$$\zeta_s^{DC} = 0,0334 \cdot \frac{c}{t} \cdot \left[4 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{1f} - \operatorname{tg} \alpha_{2f})^2 \right] \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha_{2f}}{\cos \alpha_\infty} \right) \cdot \left(\frac{\cos \alpha_{2f}}{\cos \alpha_{1f}} \right)$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

c) Ztráty únikem nadbandážovou ucpávkou

- Zavedení mocninové funkce $(\delta_r/c)^{0,78}$

$$\zeta_{cl}^{DC} = B \cdot \frac{c}{h} \cdot \left(\frac{\delta_r}{c}\right)^{0,78} \cdot 4 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{1f} - \operatorname{tg} \alpha_{2f})^2 \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha_{2f}}{\cos \alpha_{\infty}}\right)$$

$$B = 0,47 \text{ (bez bandáže); } B = 0,37 \text{ (s bandáží)}$$

$$\delta_e = \frac{\delta_r}{z^{0,42}} ; z - \text{počet břitů ucpávky}$$

• S. C. Kacker a U. Okapuu

- Predikce ztrát založena na korelacích dle A&M a částečné modifikaci D&M
- Doplnění o ztráty způsobené rázovými vlnami

$$\zeta_c^{KO} = \zeta_p^{KO} \cdot \chi_{Re} + \zeta_s^{KO} + \zeta_{cl}^{KO} + \zeta_{te}^{KO} \quad \chi_{Re} = \begin{cases} \left(\frac{Re}{2 \cdot 10^5}\right)^{-0.4} & Re \leq 2 \cdot 10^5 \\ 1 & 2 \cdot 10^5 > Re < 10^6 \\ \left(\frac{Re}{10^6}\right)^{-0.2} & Re > 10^6 \end{cases}$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

a) Profilové ztráty

$$\zeta_p^{KO} = 0,914 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot K_p \cdot \chi_i \cdot \zeta_{p(i=0)}^{AM} + \zeta_{sh} \right)$$

$$K_p = 1 - 1,25 \cdot (Ma_2 - 0,2) \cdot \left(\frac{Ma_1}{Ma_2} \right)^2 ; \quad Ma_2 > 0,2$$

b) Sekundární ztráty

- Modifikace modelu D&M

$$\zeta_s^{KO} = 0,04 \cdot \frac{c}{h} \cdot \chi_{AR} \left[4 \cdot (\operatorname{tg} \alpha_{1f} - \operatorname{tg} \alpha_{2f})^2 \right] \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha_{2f}}{\cos \alpha_\infty} \right) \cdot \left(\frac{\cos \alpha_{2f}}{\cos \alpha_{1m}} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{c_{ax}}{h} \right)^2 \cdot (1 - K_p) \right]$$

$$\chi_{AR} = \begin{cases} 1 - 0,25 \cdot \sqrt{1 - \frac{h}{c}} & \frac{h}{c} \leq 2 \\ 1 & \frac{h}{c} > 2 \end{cases}$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

c) Ztráty únikem nadbandážovou ucpávkou

- Lopatkování s bandáží → stejný vztah jako D&C
- Lopatkování bez bandáže → závislost změny $\Delta\eta_{T-T}$ na $\Delta\delta_r$

$$\Delta\eta_{T-T} = 0,93 \cdot \frac{r_t}{r_m} \cdot \left(\frac{1}{h \cdot \cos \alpha_{2f}} \right) \cdot \eta_{T-T,(\delta_r=0)} \cdot \Delta\delta_r$$

• H. R. M. Craig a H. J. A. Cox

1. Skupina	2. Skupina
Profilové ztráty statoru	Ztráty hřídelové ucpávky
Profilové ztráty rotoru	Ztráty vyrovnávacích otvorů
Sekundární ztráty statoru	Ztráty nadbandážové ucpávky
Sekundární ztráty rotoru	Ztráty vázacích drátů
Ztráty omezujících stěn statoru	Ztráty vlhkostí
Ztráty omezujících stěn rotoru	Ventilační ztráty
	Ztráty parciálním ostřikem

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

Profilové ztráty

$$\zeta_p^{CC} = X_{p,b} X_{p,Re} X_{p,te} X_{p,i} + (\Delta\zeta_p)_{te} + (\Delta\zeta_p)_{t/e} + (\Delta\zeta_p)_{Ma}$$

$X_{p,b}$ základní profilová ztráta.

$X_{p,Re}$ korekce na Reynoldsovo číslo.

$X_{p,te}$ korekce na vliv tloušťky odtokové hrany.

$X_{p,i}$ korekce na vliv incidence.

$(\Delta\zeta_p)_{te}$ přírůstek ztrát v důsledku tloušťky odtokové hrany.

$(\Delta\zeta_p)_{s/e}$ přírůstek ztrát v důsledku zakřivení odtokové hrany.

$(\Delta\zeta_p)_{Ma}$ přírůstek ztrát v případě supersonické výstupní rychlosti (jen pro $Ma_{out} > 1$).

- Zavedení kontrakčního poměru t/BBL („*Backbone length*“ – délka střední čáry profilu)
- Nová korelace koeficientu incidenčních ztrát

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- **J. D. Denton**

- Měřítkem ztrát v lopatkovém stroji je nárůst entropie

$$\zeta_c^D = \zeta_{Bb} + \zeta_{te} + \zeta_{cl} + \zeta_{Eb} + \zeta_{sh}$$

ζ_{Bb} ztráta způsobena mezní vrstvou na povrchu lopatky,

ζ_{te} ztráta na odtokové hraně,

ζ_{cl} ztráta únikem nadbandážovou ucpávkou,

ζ_{Eb} ztráta způsobena mezní vrstvou na omezujících stěnách,

ζ_{sh} ztráta v důsledku rázových vln.

- Uvedený popis celkových ztrát je pro praktické účely dobře použitelný
 - Předpoklad úplné znalosti rozložení rychlostí na přetlakové a podtlakové straně lopatky

$$\zeta_c^D = \zeta_p + \zeta_s + \zeta_{te} + \zeta_{cl}$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

a) Profilové ztráty

- Odhad optimální hodnoty $t/c \rightarrow \zeta_{p,min}$ (odhad pouze pro nominální režim)

b) Sekundární ztráty

- Odhad založen na metodice D&C

$$\zeta_s^D = 0,375 \cdot 0,1336 \frac{c}{h} \frac{\cos^3 \alpha_{2f}}{\sqrt{\cos \alpha_{1f}}} \frac{(\tan \alpha_{1f} - \tan \alpha_{2f})^2}{\cos \alpha_\infty}$$

c) Ztráty odtokové hrany

- Model založen na rovnicích zachování hmoty, energie a hybnosti v kontrolních objemech mezi hrdlem a bodem obnovení rovnoměrného proudového pole

$$\zeta_{te}^D = -\frac{C_{p,b} \cdot t_{te}}{o} + \left(\frac{\delta^* + t_{te}}{o} \right)^2 ; \quad C_{p,b} = \frac{p_{base} - p_{s,ref}}{\frac{1}{2} \rho w_{ref}^2} ; \quad C_{p,b} = -0,1 \div -0,2$$

Tlak „na dno“ („base pressure“)

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

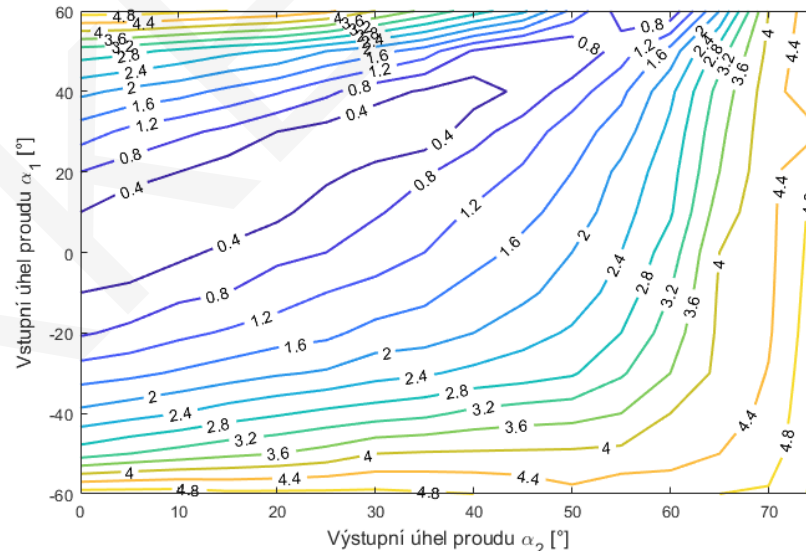
d) Ztráty radiální vůle

- Korelace pro kola s bandáží:

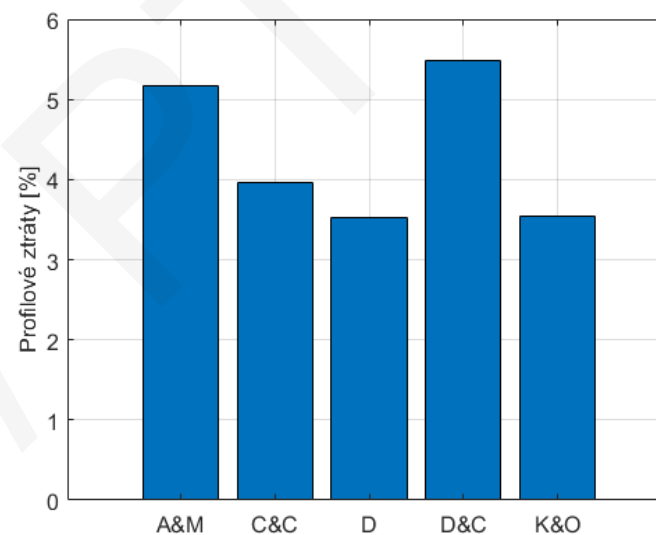
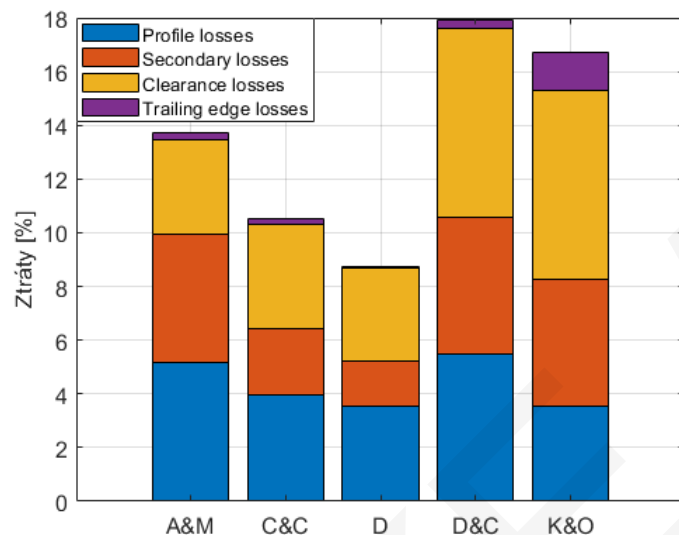
$$\zeta_{cl}^D = 2 \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_m} \left(1 - \frac{\tan \alpha_{1f}}{\tan \alpha_{2f}} \right) \sin^2 \alpha_{2f}$$

Ucpávkové průtočné množství
Průtočné množství na vstupu do stupně

- Korelace pro kola bez bandáže:



- Příklad srovnání analyzovaných ztrátových modelů



- Odhad ztrát v nenávrhových režimech: C&C, D&C, K&O
A&M
- Incidenční ztrátové modely: *Stepanov* (1962), *Moustapha a kol.* (1990), *Benner a kol.* (1997), *Zehner* (1980),...

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- G. Yu. Stepanov**

- Ztráty při nenávrhovém úhlu náběhu jsou úměrné kvadrátu vektorového rozdílu mezi referenční (návrhovou) a nereferenční (nenávrhovou) vstupní rychlostí proudu

$$\zeta_i = 0,058 \cdot \left[\left(\frac{\sin \alpha_{2f}}{\sin \alpha_{1f}} \right)^2 - \left(\frac{\sin \alpha_{2f}}{\sin \alpha_{1m}} \right)^2 \right] + 0,265 \cdot \left[\frac{\sin i \cdot \sin \alpha_{2f}}{\sin \alpha_{1m} \cdot \sin \alpha_{1f}} \right]^2$$

- S. H. Moustapha a kol.**

- Zavedení nového korelačního parametru – průměr náběžné hrany d_{LE}

$$\Delta\phi^2 = 0,778 \cdot 10^{-5} x' + 0,56 \cdot 10^{-7} x'^2 + 0,4 \cdot 10^{-10} x'^3 + 2,054 \cdot 10^{-19} x'^6$$

pro: $800 > x' > 0$

$$\Delta\phi^2 = -5,1734 \cdot 10^{-6} x' + 7,6902 \cdot 10^{-9} x'^2$$

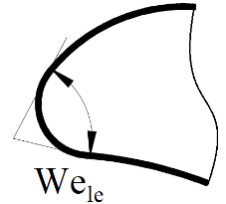
pro: $0 > x' > -800$

$$x' = \left(\frac{d_{LE}}{t} \right)^{-1,6} \left(\frac{\cos \alpha_{1m}}{\cos \alpha_{2m}} \right)^{-2} i$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- M. W. Benner a kol.**

- Vliv změn křivostí geometrie profilu – úhel klínu náběžné hrany →



$$\Delta\phi^2 = 3,711 \cdot 10^{-7} x'^8 - 5,318 \cdot 10^{-6} x'^7 + 1,106 \cdot 10^{-5} x'^6 + 9,017 \cdot 10^{-5} x'^5 - 1,542 \cdot 10^{-4} x'^4 - 2,506 \cdot 10^{-4} x'^3 + 1,327 \cdot 10^{-3} x'^2 - 6,149 \cdot 10^{-5} x'$$

pro: $x' \geq 0$

$$\Delta\phi^2 = 1,358 \cdot 10^{-4} x'^2 - 8,72 \cdot 10^{-4} x'$$

pro: $x' < 0$

$$x' = \left(\frac{d_{LE}}{t} \right)^{-0.05} We_{le}^{-0.2} \left(\frac{\cos \alpha_{1m}}{\cos \alpha_{2m}} \right)^{-1.4} i$$

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

- **P. Zehner**

- Ztrátový koeficient je funkcí geometrie mříže, proudových parametrů, Reynoldsovo a Machovo čísla

$$\zeta_p = 1 - (1 - \zeta_{p,(i=0)})e^{-a(\Delta i^*)^b} \quad \Delta i^* = \frac{i}{180 - \alpha_{1m}}$$

$$a = \begin{cases} 2,587 - 0,426g - 1,216g^2; i > 0 \\ 0,446 + 3,82g - 2,899g^2; i < 0 \end{cases} \quad b = \begin{cases} 4,175 + 10,802g - 13,881g^2; i > 0 \\ 2,413 + 10,38g - 10,116g^2; i < 0 \end{cases}$$

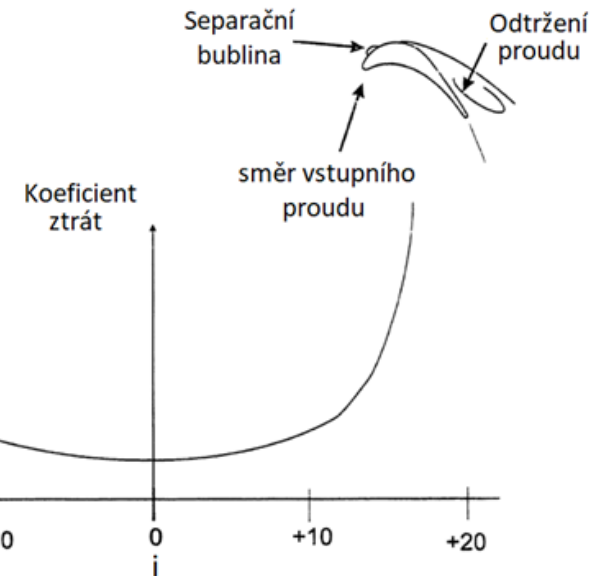
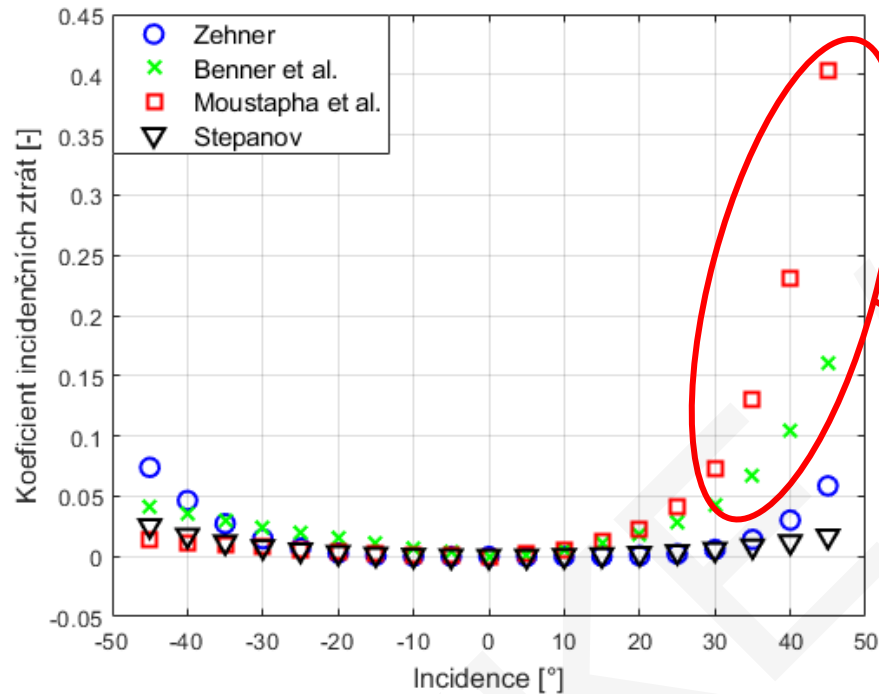
Vzdálenost nejvyššího bodu střední čáry
profilu od přímky položení profilu

$$g = \frac{f}{t} \sqrt{\gamma(\alpha_{1m} + \alpha_{2m})} \quad \Rightarrow \quad \text{Stupeň prohnutí profilu}$$

Úhel nastavení

Plynové turbíny (2D proudění v mřížích PT)

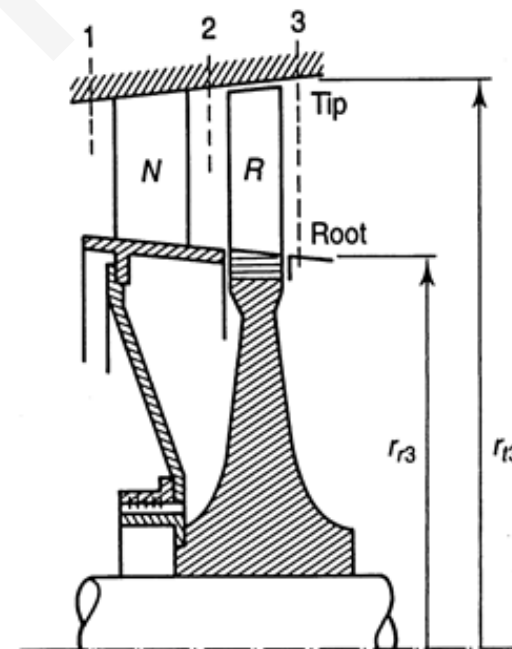
• Příklad srovnání incidenčních modelů



Řešený příklad - Cvičení č. 5

Na základě níže uvedených zadaných parametrů navrhnete axiální jednostupňovou plynovou turbínu.

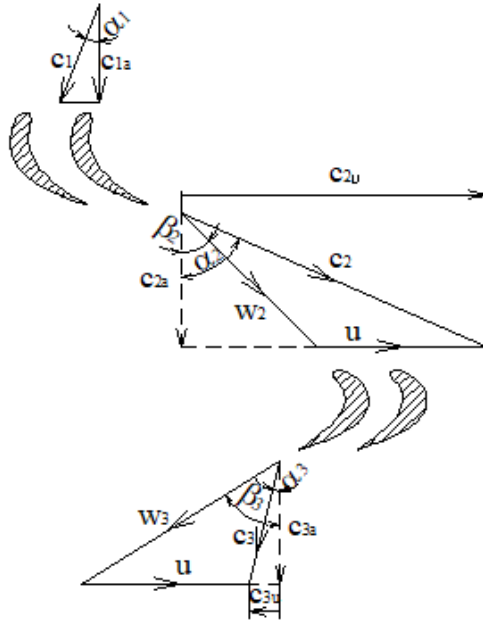
Vstupní celková teplota	T_{01}	1100 K
Vstupní celkový tlak	p_{01}	0,4 MPa
Hmotnostní průtok	\dot{m}	20 kg/s
Teplotní spád ve stupni	$\Delta T_{0,st} = T_{01} - T_{03}$	145 K
Otáčky	n	250 ot/s
Obvodová rychlost na středním poloměru	u_m	340 m/s
Izentropická účinnost PT	η_T	0,9
Ztráta rozváděcí mříže	ζ^S	0,05
Stupeň expanze	$\pi = \frac{p_{01}}{p_{03}}$	1,873



$$c_p = 1148 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}; r = 287 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}; m = \frac{\kappa}{\kappa - 1} = 4$$

$$c_{1a} = c_{2a} = c_{3a} = c_a; c_1 = c_3; \alpha_1 = \alpha_3 = 0 \text{ (axiální vstup a výstup)}$$

Řešený příklad - Cvičení č. 5



$$P = M \cdot \omega = Fr\omega = Fu = \dot{m}(c_{2u} + c_{3u})u$$

$$a = \frac{P}{\dot{m}} = (c_{2u} + c_{3u})u \rightarrow a = uc_a(\operatorname{tg}\alpha_2 + \operatorname{tg}\alpha_3)$$

$$u = c_a(\operatorname{tg}\alpha_2 - \operatorname{tg}\beta_2) = c_a(\operatorname{tg}\beta_3 - \operatorname{tg}\alpha_3)$$

$$\frac{u}{c_a} = \frac{1}{\varphi} = \operatorname{tg}\alpha_2 - \operatorname{tg}\beta_2 = \operatorname{tg}\beta_3 - \operatorname{tg}\alpha_3$$

$$\operatorname{tg}\alpha_2 + \operatorname{tg}\alpha_3 = \operatorname{tg}\beta_2 + \operatorname{tg}\beta_3$$

$$\rho = \frac{\varphi}{2}(\operatorname{tg}\beta_3 - \operatorname{tg}\beta_2)$$

$$\psi = \frac{\Delta h_0}{u^2} = \frac{a}{u^2} = \frac{c_a}{u}(\operatorname{tg}\alpha_2 + \operatorname{tg}\alpha_3) = \varphi(\operatorname{tg}\alpha_2 + \operatorname{tg}\alpha_3) = \varphi(\operatorname{tg}\beta_2 + \operatorname{tg}\beta_3)$$

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg}\beta_2 + \operatorname{tg}\beta_3 &= \frac{\psi}{\varphi} \\ \operatorname{tg}\beta_3 - \operatorname{tg}\beta_2 &= \frac{2\rho}{\varphi} \end{aligned} \right\} \rightarrow \operatorname{tg}\beta_2 = \frac{1}{\varphi} \left(\frac{\psi}{2} - \rho \right) \rightarrow \operatorname{tg}\alpha_2 = \operatorname{tg}\beta_2 + \frac{1}{\varphi}$$

$$\rightarrow \operatorname{tg}\beta_3 = \frac{\psi}{\varphi} \left(\frac{1}{2} + \frac{\rho}{\psi} \right) \rightarrow \operatorname{tg}\alpha_3 = \operatorname{tg}\beta_3 - \frac{1}{\varphi}$$

Řešený příklad - Cvičení č. 5

- Výkonový koeficient

$$\psi = \frac{\Delta h_0}{u^2} = \frac{c_p \Delta T_{0,st}}{u^2}$$

- Volba průtokového koeficientu $\varphi = 0,8$

- $tg\beta_3 \rightarrow \rho \rightarrow \beta_3$

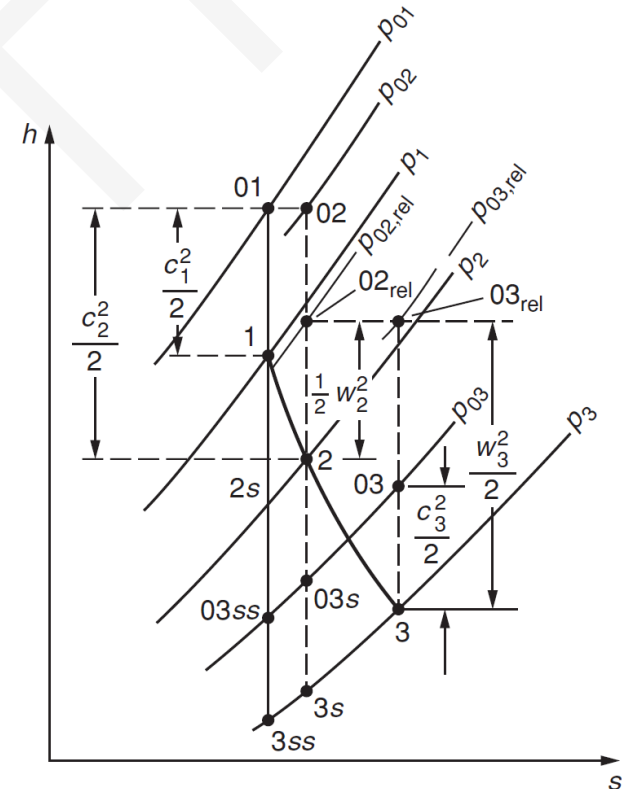
- β_2, α_2

- $c_a \rightarrow c_2, c_3$

- Řez 1:** $T_1 \rightarrow p_1 \rightarrow \rho_1 \rightarrow S_1$

- Řez 2:**

- Teplotní spád ve statoru: $\Delta T_{0,s} = \frac{c_2^2}{2c_p} \rightarrow T_2$
- Ztráta entalpie ve statoru: $T_{\zeta s} = \zeta^s \frac{c_2^2}{2c_p} \rightarrow T_{2s}$



Řešený příklad - Cvičení č. 5

- Výpočet tlaku p_2 pomocí izentropické vazby:

$$\frac{p_2}{p_{01}} = \left(\frac{T_{2s}}{T_{01}} \right)^m \rightarrow p_2$$

- Kontrola kritického proudění v statorové mříži:

$$\beta^* = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^m = \left(\frac{2}{1,333 + 1} \right)^4$$

- Dopočet ρ_2, S_2
- **Řez 3:** $T_{03} \rightarrow T_3, p_{03} \rightarrow p_3, \rho_3 \rightarrow S_3$
- **Rozměry průtočné části v jednotlivých řezech ($S, h, r_h/r_t$)**

$$u_m = \omega r_m = 2\pi \cdot n \cdot r_m \rightarrow r_m \quad S_1 = 2\pi r_m h_1 = \frac{u_m}{n} h_1 \rightarrow h_1$$

$$\left(\frac{r_r}{r_t} \right)_1 = \frac{r_m + \frac{h_1}{2}}{r_m - \frac{h_1}{2}}$$



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Děkuji za pozornost