



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

PLYNOVÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

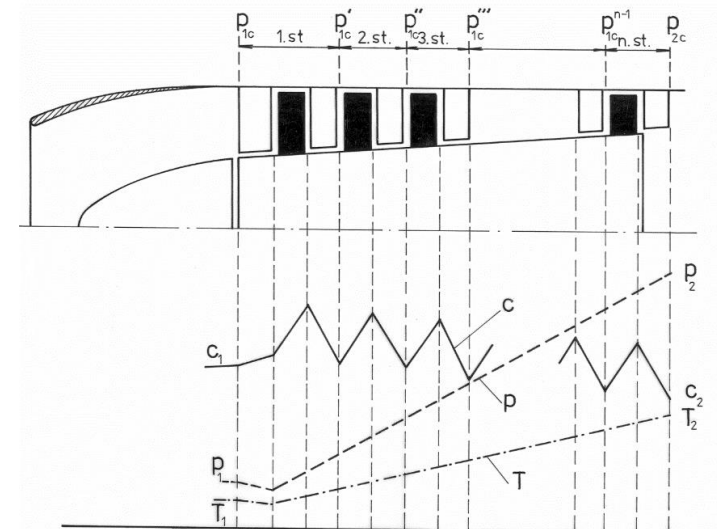
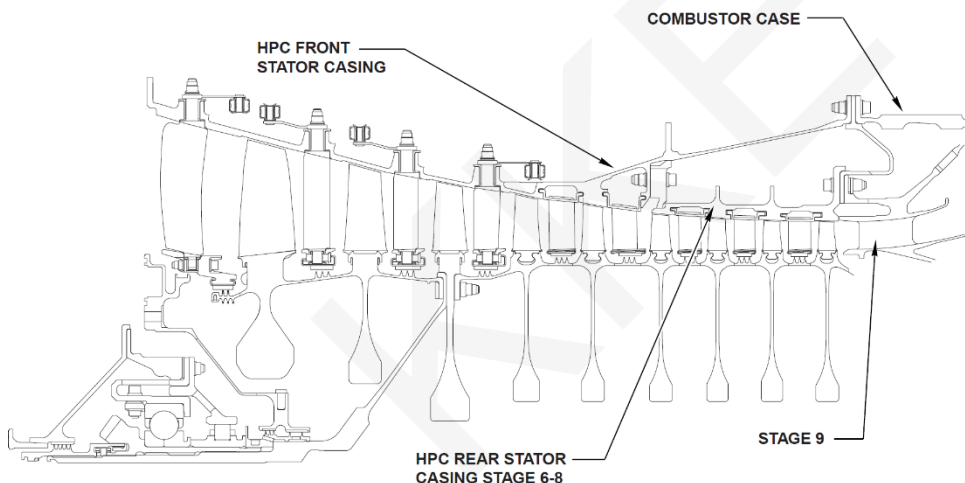
Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Datum: 04. 11. 2021

- Axiální (osové) kompresory
 - Úvod (konstrukce)
 - Termodynamika AK
 - Zjednodušená 2D analýza proudění v mřížích AK
 - Předběžný návrh stupně AK (klíčové parametry návrhu)
 - Charakteristika kompresoru
 - Řešený příklad (jednostupňový transsonický kompresor)

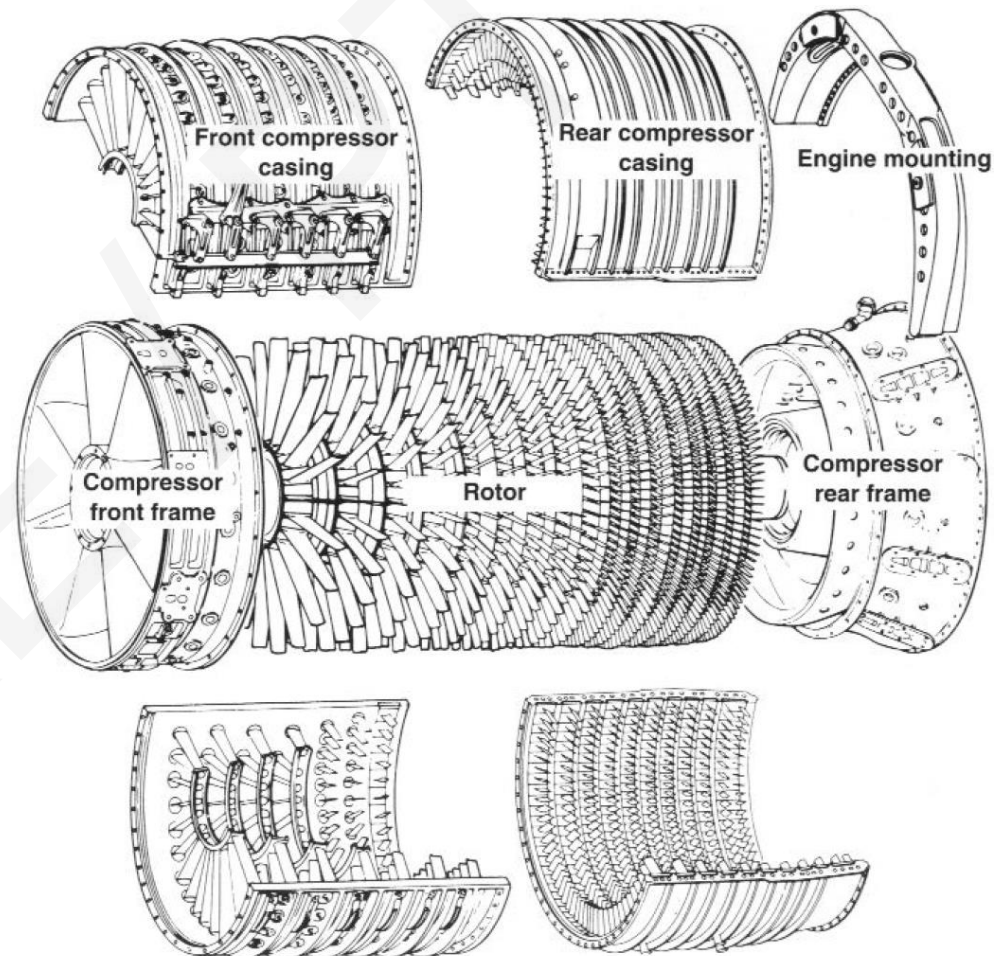
Axiální kompresory (úvod)

- Nejpoužívanější kompresory současných turbokompresorových motorů
- Maximální stupeň stlačení RK $\approx 4:1$ s účinností kolem 70 až 80%
- AK dosahují vyššího stupně stlačení při vyšší účinnosti (86 až 90%)
- Stupeň tvoří rotorová a statorová mříž
- IGV (Inlet Guide Vanes) na vstupu do AK
- Zvyšováním tlaku ve směru proudění dochází k poklesu objemu vzduchu



Axiální kompresory (konstrukce)

- Základní konstrukční komponenty AK:
 - Přední rám
 - Těleso s RL
 - Rotor s OL
 - Zadní rám



Axiální kompresory (konstrukce)

- **Přední rám:**

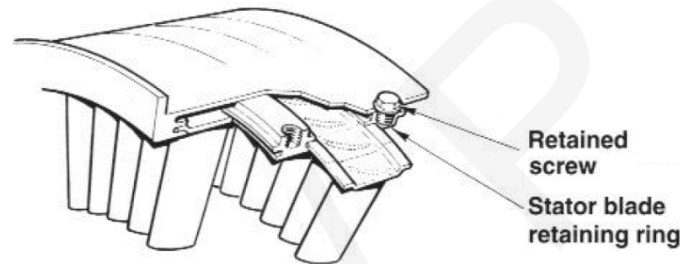
- Prstencová jednodílná konstrukce z hliníkové slitiny (nebo oceli)
- Vnější prstenec, vnitřní náboj s nosnými vzpěrami
- Uložení předního ložiska a přenos sil do vnějšího tělesa
- Nosné vzpěry jsou většinou duté
 - Vedení kabelových svazků, systém pro mazání ložisek, odvětrávání ložisek, apod.

- **Těleso statoru:**

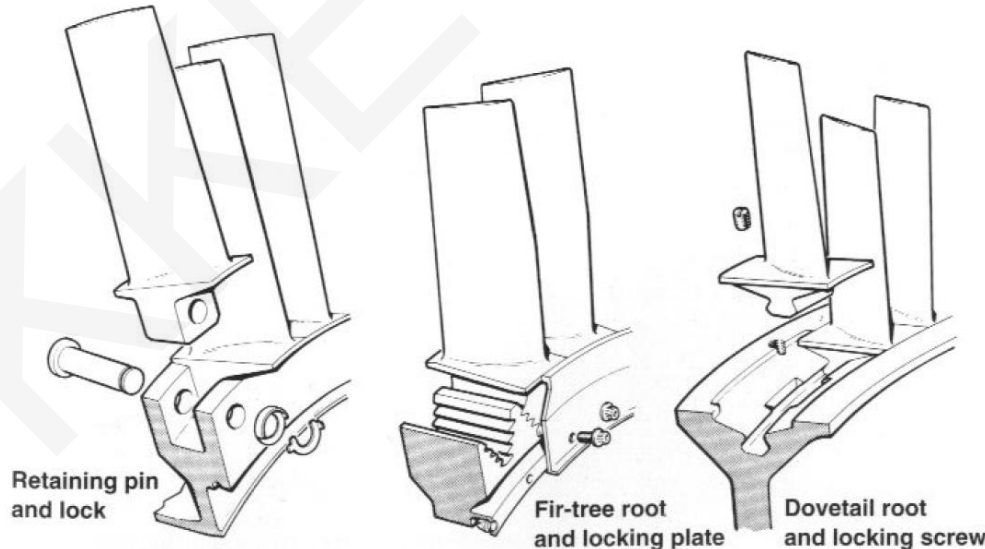
- Obvykle podélně rozdělené (snadná montáž, příp. údržba)
- Lehké titanové výkovky (v minulosti se používala nerezová ocel)
- Speciální slitiny umožňující roztažnost statoru → radiální vůle

Axiální kompresory (konstrukce)

- Ve vnitřku tělesa jsou vyfrézované drážky pro uchycení RL (delší lopatky se montují v segmentech z důvodu zamezení vzniku velkých vibrací)



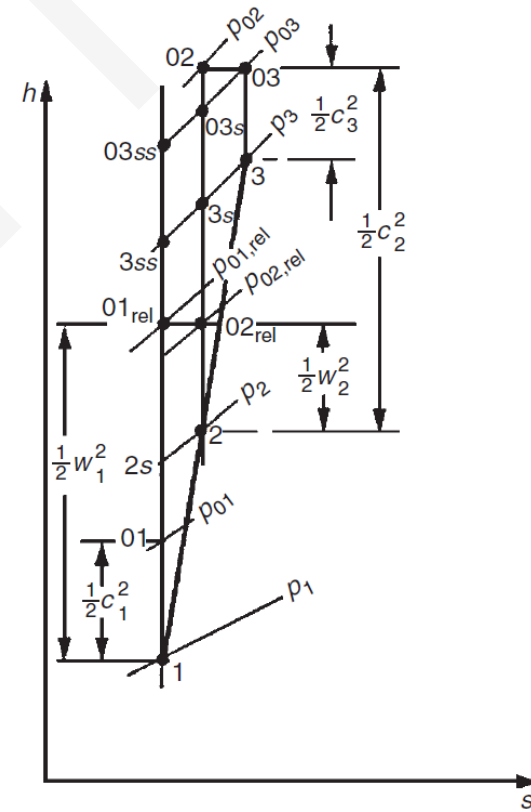
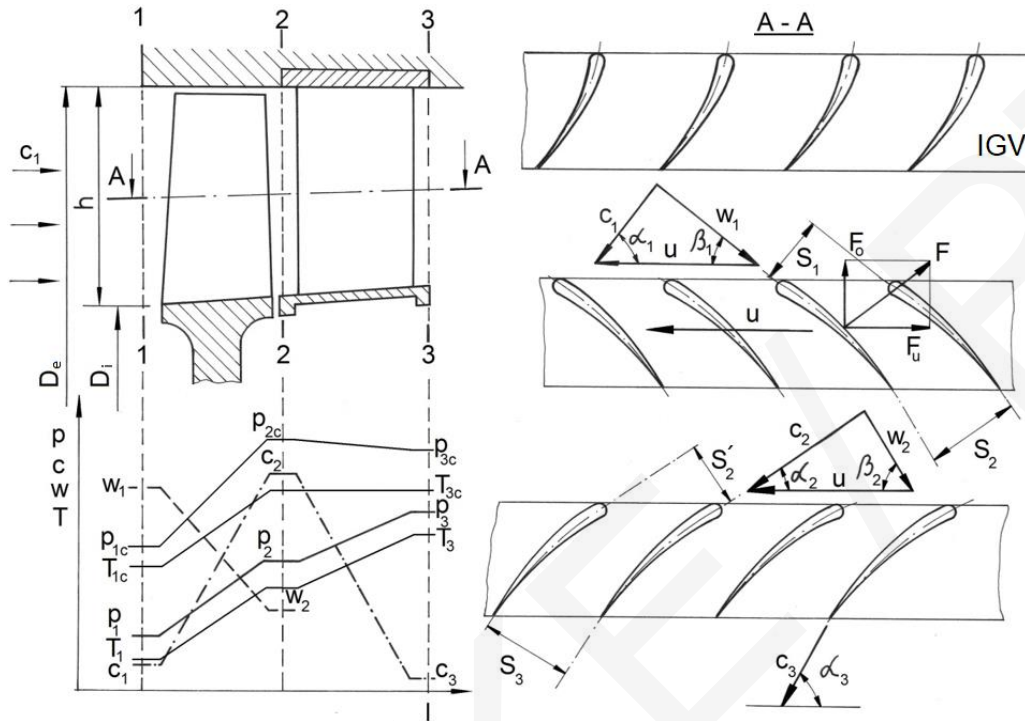
- Rotor s OL:
 - Bubnová, **disková** nebo kombinovaná konstrukce



Axiální kompresory (konstrukce)

- **Zadní rám:**
 - Slouží k vedení stlačeného vzduchu do spalovací komory
 - Konstrukce je navržena dle typu použité spalovací komory

Axiální kompresory (TD analýza stupně)



$$a^K = u_2 \cdot c_{2u} - u_1 \cdot c_{1u} ; u_2 = u_1 \rightarrow a^K = u \cdot (c_{2u} - c_{1u})$$

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2} \text{ (rotor)} ; h_2 + \frac{c_1^2}{2} = h_3 + \frac{c_2^2}{2} \text{ (stator)} \rightarrow \text{Pro čistě axiální proudění}$$

Axiální kompresory (TD analýza stupně)

$$\eta_{tt} = \frac{a_{min}^K}{a^K}$$

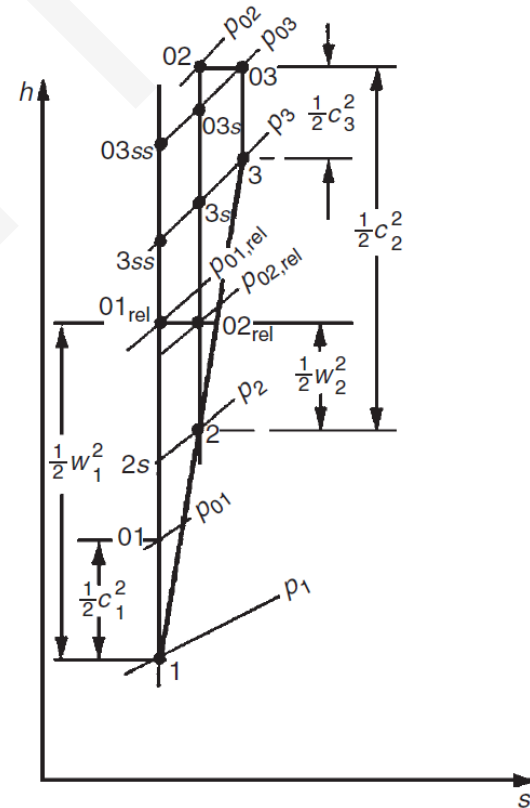
- a^K - užitečná práce $\rightarrow a^K = h_{03} - h_{01}$
- a_{min}^K - minimální práce potřebná pro dosažení stejného celkového tlaku jako při skutečné kompresi

$$a_{min}^K = h_{03ss} - h_{01} = (h_{03} - h_{01}) - (h_{03} - h_{03ss})$$

- Aplikace II. Gibbsovy rovnice („03ss - 03“)

$$T_{03}\Delta s^{St} = h_{03} - h_{03ss}$$

$$a_{min}^K = a^K - T_{03}\Delta s^{St} \rightarrow \eta_{tt} = \frac{(h_{03} - h_{01}) - T_{03}\Delta s^{St}}{(h_{03} - h_{01})} = 1 - \frac{T_{03}\Delta s^{St}}{h_{03} - h_{01}}$$



Axiální kompresory (TD analýza stupně)

$$\eta_{ts} = \frac{h_{3ss} - h_{01}}{h_{03} - h_{01}} = \frac{h_{03} - h_{01} - (h_{03} - h_{3ss})}{h_{03} - h_{01}}$$

$$\eta_{ts} = \frac{h_{03} - h_{01} - \left[(h_3 - h_{3ss}) + \frac{c_3^2}{2} \right]}{h_{03} - h_{01}} = 1 - \frac{\frac{c_3^2}{2} + T_3 \Delta s^{St}}{h_{03} - h_{01}}$$

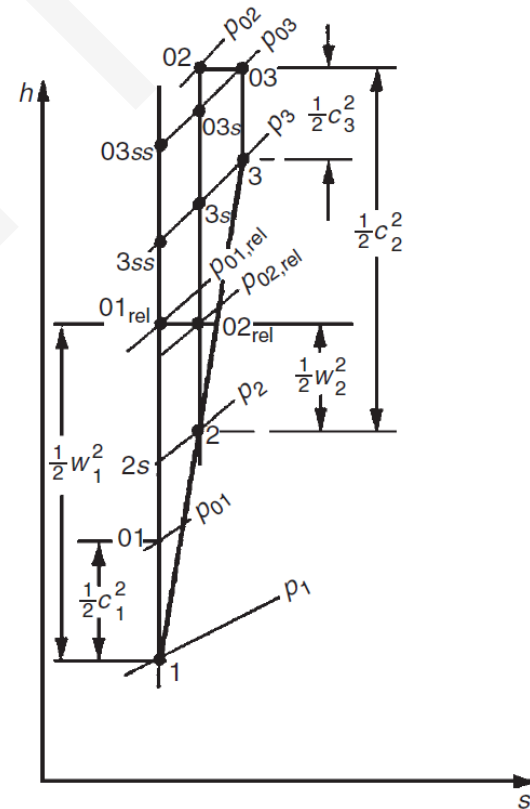
II. G.R. (3ss – 3)

- Změny entropie → ztrátové koeficienty (měření / CFD)

$$\zeta_p^S = \frac{p_{02} - p_{03}}{p_{02} - p_2} ; \zeta_p^R = \frac{p_{01,rel} - p_{02,rel}}{p_{01,rel} - p_1}$$

- II. G.R. (01rel – 02rel); konstantní relativní entalpie, ideální plyn

$$T_{01,rel} \Delta s^R = \frac{\Delta p_0^R}{\rho_{01,rel}} ; \Delta p_0^R = p_{01,rel} - p_{02,rel} \rightarrow \Delta s^R \cong \frac{R \Delta p_0^R}{p_{01,rel}} = R \zeta_p^R \left(1 - \frac{p_1}{p_{01,rel}} \right)$$



Axiální kompresory (TD analýza stupně)

- Obdobným způsobem lze odvodit i změnu entropie v rozváděcí mříži
- Změna entropie stupně AK je daná součtem dílčích nárůstů entropií v rozváděcí a oběžné mříži

$$\Delta S^{St} = \Delta S^S + \Delta S^R = R \left[\zeta_p^R \left(1 - \frac{p_1}{p_{01,rel}} \right) + \zeta_p^S \left(1 - \frac{p_2}{p_{02}} \right) \right]$$

- Celková účinnost kompresorového stupně:

$$\eta_{tt} = 1 - \frac{T_{03} \Delta S^{St}}{h_{03} - h_{01}} \rightarrow \eta_{tt} = 1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa} \frac{\zeta_p^R \left(1 - \frac{p_1}{p_{01,rel}} \right) + \zeta_p^S \left(1 - \frac{p_2}{p_{02}} \right)}{1 - \frac{T_{01}}{T_{03}}}$$

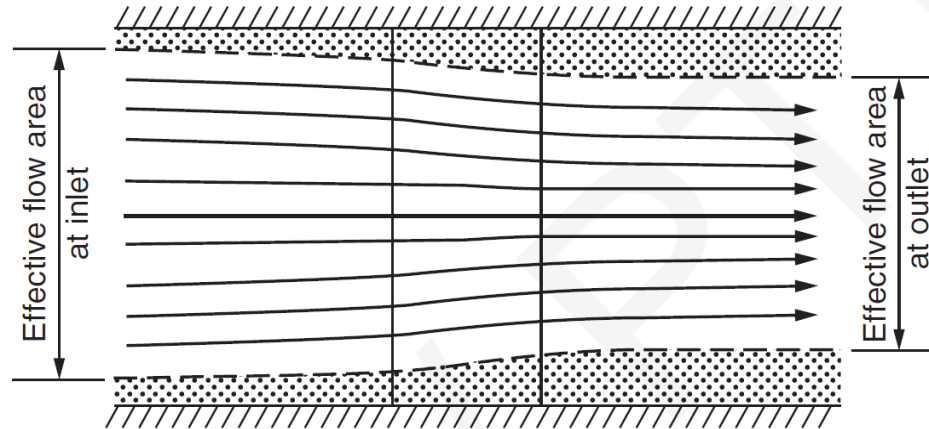
- U nízko-otáčkových strojů lze uvažovat hustotu konstantní
 - Změny teploty v celém stupni budou velmi malé

$$T \Delta S^R \cong \frac{\Delta p_0^R}{\rho} = \zeta_p^R \frac{w_1^2}{2} ; T \Delta S^S \cong \frac{\Delta p_0^S}{\rho} = \zeta_p^S \frac{c_2^2}{2} \rightarrow \eta_{tt} \cong 1 - \frac{\frac{1}{2} (\zeta_p^R w_1^2 + \zeta_p^S c_2^2)}{h_{03} - h_{01}}$$

Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

- Návrh průtočných částí AK a T je z velké míry založen na měření proudění v lopatkových mřížích a CFD numerických simulacích
- Proudění v turbosoustrojích je obecně nestacionární a trojdimenzionální
- Analýza proudových charakteristik lopatkových mříží se opírá převážně o data získaná pro 2D ustálené proudění
- Proudění přes několik roztečí lopatek
 - Velký počet lopatek → vysoká energetická náročnost aerodynamického tunelu
- Tunely menších rozměrů → interakce mezních vrstev vznikajících na stěnách tunelu s lopatkami (obzvláště u kompresorových mříží)
 - Zmenšení efektivní průtočné plochy měřicího prostoru

Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)



- *Carter, Andrews a Shaw* – Součinitel kontrakce $\sim \rho_1 c_1 \cos \alpha_1 / \rho_2 c_2 \cos \alpha_2$
- Běžný aerodynamický tunel (pro kompresorové mříže) má součinitel kontrakce kolem 0,8
- U turbínových mříží dochází k urychlování proudu \rightarrow vyšší součinitel kontrakce
- U kompresorových mříží se často používá systém odsávání mezních vrstev

Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

- V praxi se často používá parametr **AVDR** (Axial Velocity Density Ratio)

$$AVDR = \frac{\rho_2 c_{2x}}{\rho_1 c_{1x}} = \frac{H_1}{H_2}; \quad c_{1x} = c_1 \cos \alpha_1; \quad c_{2x} = c_2 \cos \alpha_2$$

- AVDR je reciproká hodnota součinitele kontrakce
- Kompresorové mříže: $AVDR > 1$
- Turbínové mříže: $AVDR < 1$

Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

- Základní vstupní aerodynamické parametry pro měření v lopatkové mříži:
 - Vstupní úhel proudu
 - Vstupní Machovo číslo
 - Reynoldsovo číslo lopatky $\rightarrow Re = \frac{\rho_1 c_1 c}{\mu}$; c – těživa lopatky
- Základní výstupní data z traverzování za lopatkovou mříží:
 - Výstupní úhel proudu (určuje velikost přenesené práce ve stupni)
 - Koeficient ztrát celkového tlaku, nebo koeficient energetických ztrát
- Měřítkem aerodynamický ztrát (kompresory)

\approx
(malé Ma)
- Poměr ztrátové kinetické energie k izentropické vstupní kinetické energii (turbíny)

$$\zeta = \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{01} - p_1}$$

$$\zeta = \frac{c_{2is}^2 - c_2^2}{c_{2is}^2} ; \frac{c_{2is}^2}{2} = h_{01} - h_{2s}$$

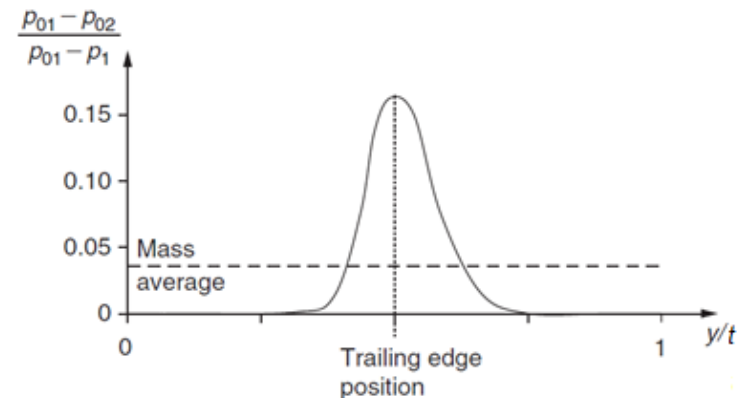
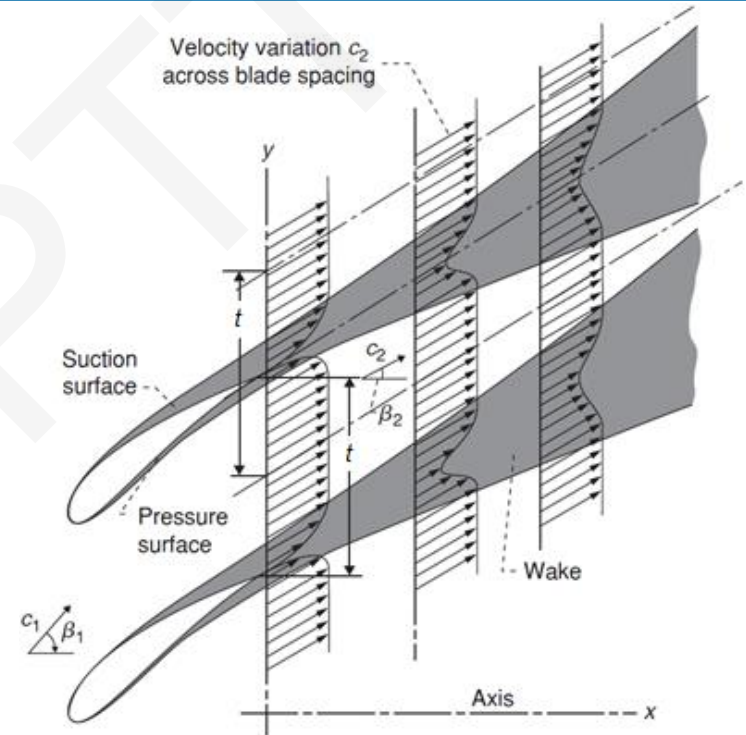
Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

- Koeficient nárůstu statického tlaku
 - Stlačitelné proudění: $C_P = \frac{p_2 - p_1}{p_{01} - p_1}$
 - Nestlačitelné proudění: $C_P = \frac{p_2 - p_1}{\frac{1}{2} \rho c_1^2}$
- Traverzování přes jednu nebo dvě rozteče
 - redukce dat (vážení hmotnostním tokem)

$$\dot{m} = \int_0^t \rho c H \cos \beta dy = \int_0^t \rho c_x H dy$$



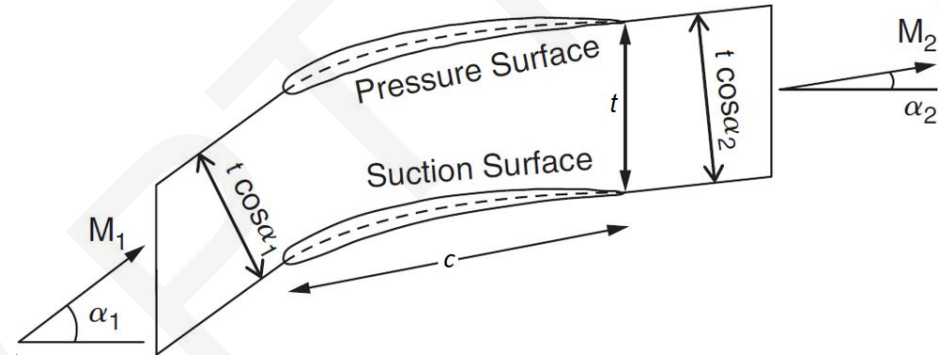
$$\tilde{\zeta}_p = \frac{\left(\int_0^t \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{01} - p_1} \right) \rho c_x dy}{\int_0^t \rho c_x dy}$$



Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

Rozváděcí mříž

- $\zeta_p^S, \alpha_1, Ma_1, Ma_2 \rightarrow \alpha_2$
- $p_{01}/p_1 = f(Ma_1)$
- $\frac{\dot{m}\sqrt{c_p T_{01}}}{sH_1 \cos \alpha_1 p_{01}} = f(Ma_1)$



- Bezrozměrný hmotnostní průtok na výstupu z lopatkové mříže:

$$\dot{m}(Ma_2) = \frac{\dot{m}\sqrt{c_p T_{02}}}{tH_2 \cos \alpha_2 p_{02}} = \frac{\dot{m}\sqrt{c_p T_{01}}}{tH_1 \cos \alpha_1 p_{01}} = \dot{m}(Ma_1)$$

- AVDR = 1 $\rightarrow H_2/H_1 = 1$; $T_{01} = T_{02}$:

$$\cos \alpha_2 = \frac{\dot{m}(Ma_1)}{\dot{m}(Ma_2)} \frac{p_{01}}{p_{02}} \cos \alpha_1$$

$$\zeta_p^S = \frac{p_{01} - p_{02}}{p_{01} - p_1} \rightarrow \frac{p_{02}}{p_{01}} = 1 - \zeta_p^S \left(1 - \frac{p_1}{p_{01}} \right)$$

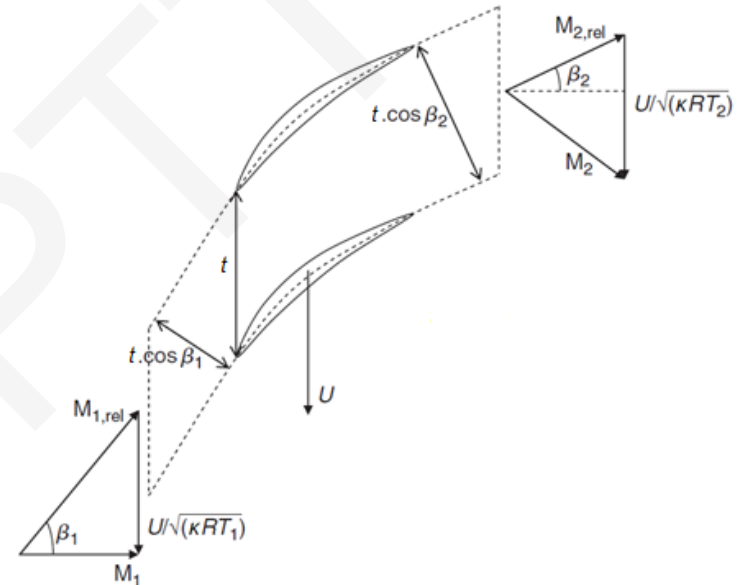
Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

Oběžná mříž

Stlačitelné proudění

$$\frac{\dot{m} \sqrt{c_p T_{01,rel}}}{Ht \cos \beta_1 p_{01,rel}} = \dot{m}(Ma_{1,rel})$$

- Bezrozměrný hmotnostní průtok na výstupu z lopatkové mříže:



$$\dot{m}(Ma_{2,rel}) = \frac{\dot{m} \sqrt{c_p T_{02,rel}}}{Ht \cos \beta_2 p_{02,rel}} = \dot{m}(Ma_{1,rel}) \frac{p_{01,rel} \cos \beta_1}{p_{02,rel} \cos \beta_2}; \quad \frac{p_{01,rel}}{p_{02,rel}} = 1 - \zeta_p^R \left(1 - \frac{p_1}{p_{01,rel}} \right)$$

Nestlačitelné proudění

$$\rho Ht \cos \beta_1 w_1 = \rho Ht \cos \beta_2 w_2 \rightarrow \frac{w_2}{w_1} = \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2}; \quad p_{01,rel} = p_{02,rel} + \frac{\rho w_1^2}{2} \zeta_p^R$$

$$p_2 = p_{02,rel} - \frac{\rho w_1^2}{2} = p_{01,rel} - \frac{1}{2} (\zeta_p^R w_1^2 + w_2^2)$$

Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

Difuzní faktor

- Efektivní výkonnost lopatek je limitována nárůstem a odtržením mezních vrstev od povrchu lopatek → nalezení hraniční meze zatížení
- Faktory ovlivňující nárůst tloušťky mezní vrstvy:
 - Rozložení rychlosti po povrchu lopatek
 - Reynoldsovo číslo
 - Vstupní Ma
 - Drsnost lopatek
- Korelace dle *Liebleina* a *Johnsona Bullocka* uvádí závislost mezi rychlostí na povrchu kompresorových lopatek a nárůstem tloušťky mezní vrstvy
- *Lieblein* uvedl funkční závislost mezi koeficientem ztrát celkového tlaku a rychlostí na podtlakové straně lopatky pro oblast minimálně zatížených mříží

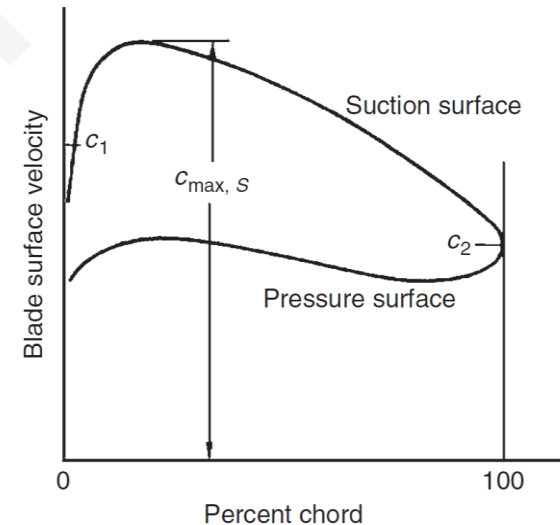
Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

- Velikost tloušťky mezní vrstvy na PoS lopatky se na velikosti úplavu podílí největší mírou → rozložení rychlosti na PoS – klíčový faktor
- Výraznější změna rychlosti na PoS
- Liebleinův* lokální difuzní faktor

$$DF_{loc} = \frac{c_{max,s} - c_2}{c_{max,s}}$$

- DF_{loc} je obtížné určit → zjednodušená definice difuzního faktoru dle autorů *Lieblein, Schwenk, Broderick*
 - Rozložení rychlostí odpovídá konkrétně naměřeným lopatkovým mřížím

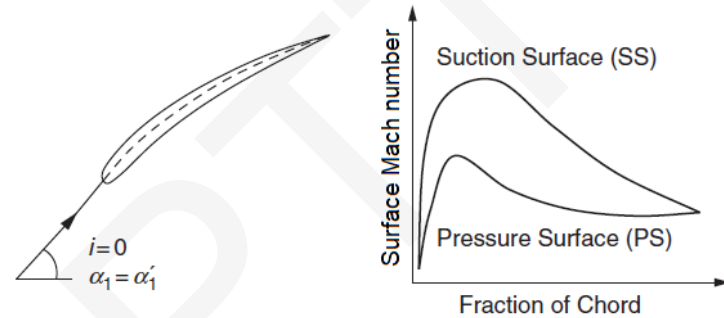
$$DF = \left[\underbrace{\left(1 - \frac{c_2}{c_1}\right)}_{\text{Zpomalení proudu}} + \underbrace{\left(\frac{c_{1u} - c_{2u}}{2c_1}\right) \frac{t}{c}}_{\text{Otočení proudu}} \right] \quad \text{Hustota lopatkové mříže}$$



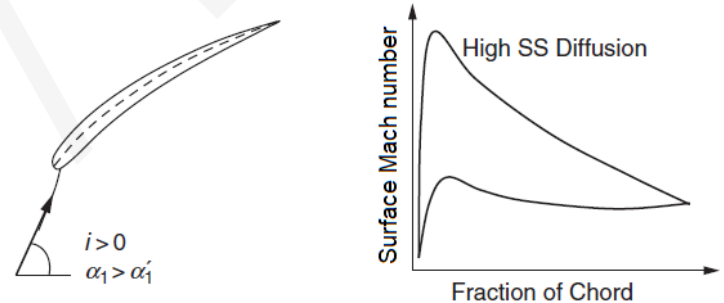
Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

Vliv incidence

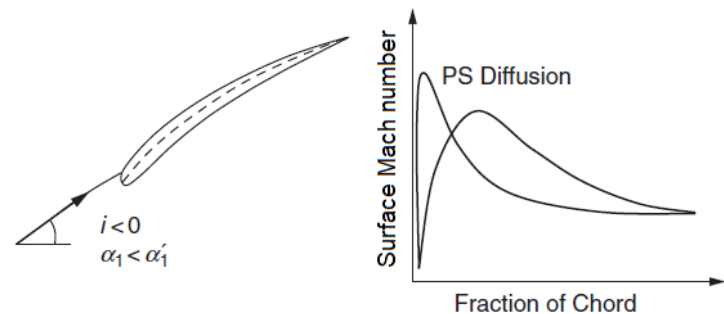
- a) Návrhový bod ($i = 0$)
- b) Kladná incidence (přetížení)
- c) Záporná incidence (odlehčení)
- Kompresorové lopatky jsou velmi citlivé na změnu zatížení (změnu i)
- Stabilní chod při $i = \pm 5^\circ$



(a) Design incidence



(b) Positive incidence

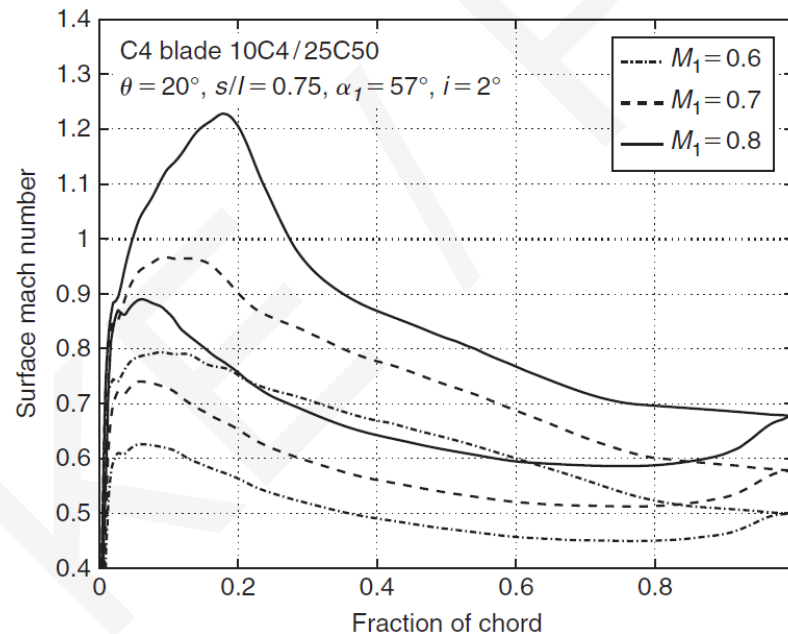


(c) Negative incidence

Axiální kompresory (2D proudění v lopatkové mříži)

Vliv Machovo čísla

- Lokální Ma na povrchu lopatek je výrazně vyšší než vstupní Ma
- Pokud vstupní $Ma > 0,7 \rightarrow$ transsonické proudění v kompresoru



- Velmi tenké profily s malým prohnutím

Axiální kompresory (Předběžný návrh stupně)

- Návrh stupně pro konkrétní návrhový režim vychází z následujících parametrů:
 - Zatížení stupně (výkonový koeficient) - ψ
 - Průtokový koeficient - φ
 - Stupeň reakce - ρ

Sestavení rychlostních trojúhelníků
- Dostatečná rezerva stability kompresoru → kompromis mezi rezervou stability a maximálním výkonem kompresoru
- Podobnost stupňů vícestupňových kompresorů (podobné rychlostní trojúhelníky)
- Konstantní střední poloměr a axiální rychlost v celém průřezu stroje

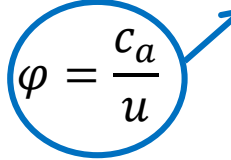
Axiální kompresory (Předběžný návrh stupně)

deHallerovo číslo, Výkonový a průtokový koeficient

- *deHallerovo číslo* → limitní zpomalení proudu v lopatkových kanálech
 - Poměr výstupní a vstupní rychlosti z lopatkové mříže ($\geq 0,72$)
- Výkonový koeficient ψ je poměr užitečné práce stupně ke kvadrátu obvodové rychlosti

$$\psi = \frac{\Delta h_0}{u^2} = \frac{\Delta c_u}{u} = \frac{c_{2u} - c_{1u}}{u} = \varphi(\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1); \quad \varphi = \frac{c_a}{u}$$

Průtokový koeficient



- $c_{1u} = u - w_{1u}$; $c_{2u} = u - w_{2u}$

$$\psi = \varphi(\tan \beta_1 - \tan \beta_2); \quad \psi = 1 - \varphi(\tan \alpha_1 + \tan \beta_2)$$

- Příliš nízká hodnota ψ vede k nadměrnému počtu stupňů
- Příliš vysoká hodnota ψ omezí provozní rozsah → navýšení počtu lopatek
 - Velmi malá hodnota t/c může vést k aerodynamickému ucpání

Axiální kompresory (Předběžný návrh stupně)

- Hustota standardní kompresorové mříže se pohybuje kolem: $t/c = 0,8 \div 1,2$
- Výkonový koeficient standardní kompresorové mříže je zhruba: $\psi = 0,4$
 - U LTKM může být tato hodnota i vyšší
- S rostoucím φ se:
 - Snižuje potřebné otočení proudu
 - Navyšuje vstupní hmotnostní průtok na jednotku plochy (menší rozměry)
 - Navyšuje Machovo číslo – potenciální vznik rázových vln
 - Snižuje schopnost kompresoru pracovat s nerovnoměrným vstupním proudem
- Standardní hodnota průtokového koeficientu se pohybuje v rozmezí $\varphi = 0,4 \div 0,8$

Axiální kompresory (Předběžný návrh stupně)

Stupeň reakce

- Poměr nárůstu statické entalpie v oběžní mříži k nárůstu statické entalpie celého kompresorového stupně

$$\rho = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} \quad c_1 \approx c_3$$

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2} \rightarrow h_2 - h_1 = \frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2}; \quad h_3 - h_1 = h_{03} - h_{01} = u(c_{2u} - c_{1u})$$

$$\rho = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2u(c_{2u} - c_{1u})} = \frac{(w_{1u} + w_{2u})(w_{1u} - w_{2u})}{2u(c_{2u} - c_{1u})}; \quad c_a = \text{konst.}$$

- $c_{2u} = u - w_{2u}; \quad c_{1u} = u - w_{1u}$

$$\rho = \frac{w_{1u} + w_{2u}}{2u} = \frac{1}{2} \varphi (\tan \beta_1 + \tan \beta_2)$$

- $w_{1u} = u - c_{1u}$

$$\rho = \frac{1}{2} + (\tan \beta_2 - \tan \alpha_1) \frac{\varphi}{2} \rightarrow \psi = 2(1 - \rho - \varphi \tan \alpha_1)$$

Axiální kompresory (Předběžný návrh stupně)

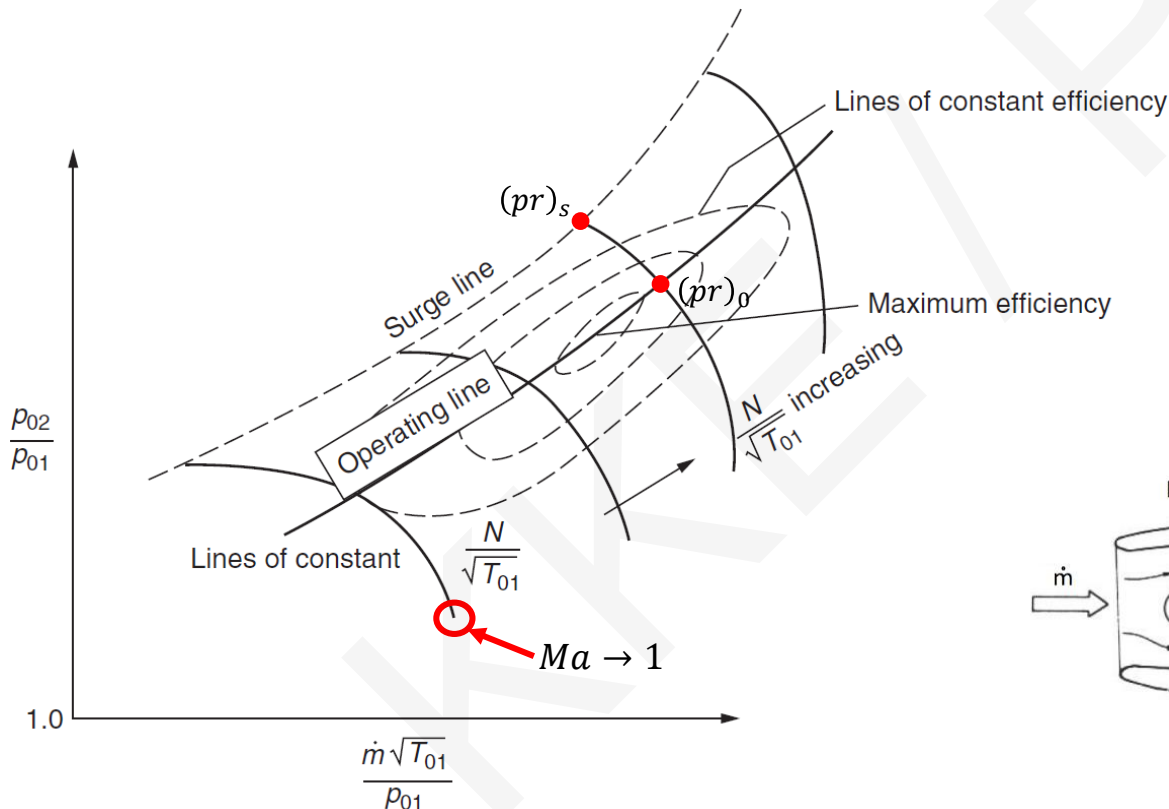
- Vyšší reakce znamená nižší zatížení stupně
- V praxi se velmi často volí 50% reakce
 - Rovnoměrné rozložení nepříznivých tlakových gradientů mezi rozváděcí a oběžnou mříž
 - Tvary RL a OL jsou podobné
- Moderní AK u LTKM se běžně navrhují s reakcí kolem $\rho = 0,5 \div 0,8$

Úhel α_1

- Volba kladného úhlu mezi rozváděcí a oběžnou mříží vede k snížení zatížení stupně
- Kladný úhel α_1 také snižuje vstupní relativní Ma do oběžné mříže
- Běžně se hodnoty α_1 pohybují v rozmezí $20 \div 30^\circ$

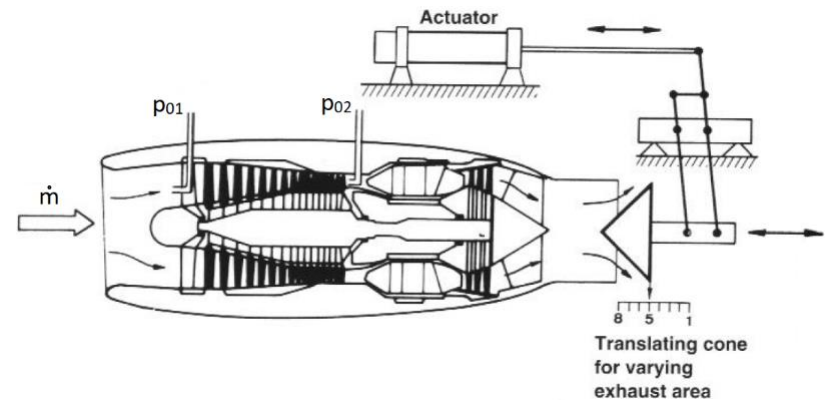
Axiální kompresory (charakteristika)

$$\eta, \frac{p_{02}}{p_{01}}, \frac{\Delta T_0}{T_{01}} = f \left(\frac{\dot{m} \sqrt{T_{01}}}{p_{01}}, \frac{N}{\sqrt{T_{01}}} \right)$$



Rezerva stability („Stall Margin“)

$$SM = \frac{(pr)_s - (pr)_o}{(pr)_o}$$



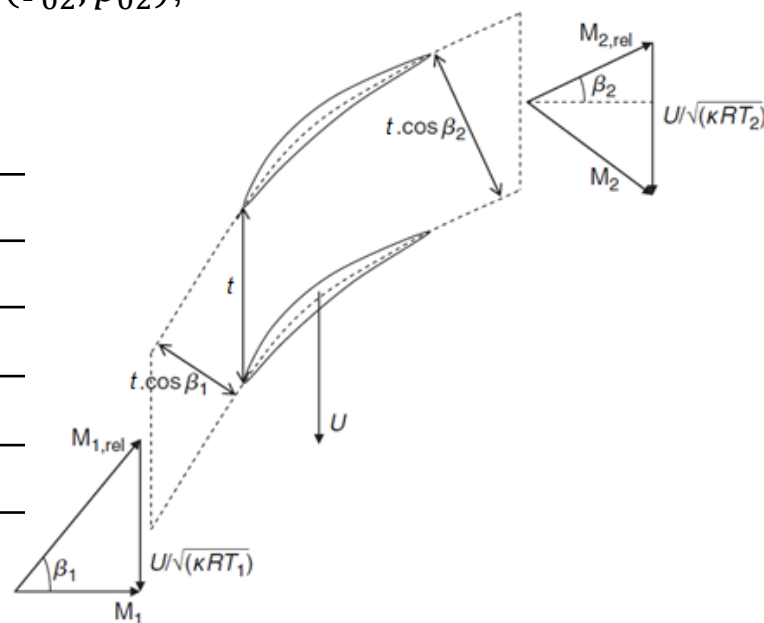
Řešený příklad - Cvičení č. 4

Do jednostupňového axiálního transsonického kompresoru vstupuje vzduch v axiálním směru. Na základě níže uvedených zadaných parametrů vypočítejte:

- obvodovou rychlost (u),
- vstupní relativní a statický tlak ($p_{01,rel}, p_1$),
- výstupní úhel relativní rychlosti proudu z rotoru (β_2),
- poměr statických tlaků v rotoru (p_2/p_1),
- celkovou teplotu a tlak na vstupu do rozváděcí mříže (T_{02}, p_{02}),
- celkovou účinnost kompresorového stupně (η_{tt}).

Pozn.: Hmotnostní průtok rotorem na jednotku průtočné plochy \dot{m}/S_x uvažujte konstantní, stejně tak i střední poloměr lopatkování ($T_{01,rel} = T_{02,rel}$).

Vstupní celková teplota	T_{01}	288 K
Vstupní celkový tlak	p_{01}	101 kPa
Vstupní úhel relativní rychlosti do OL	β_1	45°
Vstupní relativní Machovo číslo	$Ma_{1,rel}$	0,9
Výstupní relativní Machovo číslo	$Ma_{2,rel}$	0,5
Ztráta oběžné mříže	ζ^R	0,068
Ztráta rozváděcí mříže	ζ^S	0,04





FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Děkuji za pozornost