



# PLYNOVÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

## Úvodní přednáška

Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Datum: 07. 10. 2021

# Základní informace

- [home.zcu.cz/~klimko/PTT.html](http://home.zcu.cz/~klimko/PTT.html) (stránky budu průběžně aktualizovat)

## Literatura

1. Meherwan P., Boyce P. E.: Gas Turbine Engineering Handbook, Elsevier, 2006.
2. Schobeiri M. T.: Gas Turbine Design, Components and System Design Integration. Springer, 2018.
3. Hünecke K.: Jet engines – Fundamentals of Theory, Design and Operation. Airlife Publishing Ltd., 1997.
4. Zou Z., Wang S., Liu H., Zhang W.: Axial Turbine Aerodynamics for Aero-engines – Flow Analysis and Aerodynamics Design. Springer, 2017.
5. Dixon S. L., Hall C. A.: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery – Sixth edition. Elsevier, 2010.

# Zápočet/zkouška

- **ZÁPOČET (SEMESTRÁLNÍ PRÁCE)**

- vypracování práce na předem určené téma (odevzdání v tištěné i elektronické podobě)
- přednesení problematiky formou prezentace (cca 30 min.) s následnou volnou diskusí a finálním hodnocením
- hodnotí se kvalita odevzdané práce i ústní projev
- celkem lze ze zápočtu získat **30 bodů**

- **ZKOUŠKA**

- písemní část se skládá ze 3 teoretických otázek (každá za 10 bodů, tedy celkem **30 bodů**) – **1h na vypracování**
- **podmínkou je zisk min. 15 bodů**
- ústní část (rozbor vypracovaných otázek, ověření znalostí)
- finální hodnocení (součet bodů ze zápočtu a zkoušky)
- v případě nerozhodné známky je možné na podnět studenta přistoupit k „dozkoušení“
- na zkoušku máte k dispozici maximálně **3 pokusy**

# Výsledné hodnocení

- Dohromady je možné ze zápočtu a zkoušky získat 60 bodů

Známka	Počet bodů
1 - výborně	51 - 60
2 - velmi dobře	41 - 50
3 - dobře	31 - 40
<b>4 - neuspěl</b>	<b>30 a méně</b>

# Témata semestrálních prací

## Axiální kompresor

1. Analytická termodynamika, energetická bilance, detailní popis stupně včetně zjednodušeného návrhu.
2. Aerodynamika průtočné části, změna parametrů podél lopatky (radiální rovnováha).
3. Nestabilní práce (detailní fyzikální princip) – moderní řešení (natáčení statorových lopatek).
4. Ztráty vznikající v kompresoru (moderní způsoby řešení).
5. Detailní popis konstrukčního řešení moderního axiálního kompresoru.

## Spalovací komora

6. Analytická termodynamika, energetická bilance, rozdělení a princip činnosti.
7. Proces hoření, stabilita plamene, účinnost spalování, emise (metody snižování emisí).
8. Chlazení – moderní principy, používané materiály a výrobní technologie.

## Axiální plynová turbína

9. Analytická termodynamika, energetická bilance, detailní popis stupně včetně zjednodušeného návrhu.
10. Aerodynamika průtočné části, vliv změny různých parametrů na turbínovou charakteristiku (změna  $dp$ ,  $RPM$ ,  $\dot{m}$ ).
11. Chlazení – moderní principy, používané materiály a výrobní technologie.
12. Detailní popis konstrukčního řešení moderní axiální turbíny.

# Bloková výuka

## Axiální a radiální kompresory (Ing. Marián Hocko, Ph.D. – LF TUKE) 15. 11. – 19. 11. 2021

### Předpokládaný časový plán přednášek:

*Pondělí:* 7:30 – 11:55

*Středa:* 7:30 – 9:10

*Čtvrtek:* 7:30 – 15:35

*Pátek:* 7:30 – 11:55

### Témata přednášek:

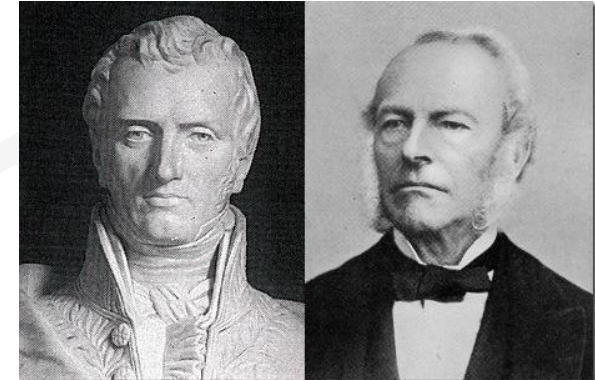
- Radiální kompresory (rozdělení, princip činnosti, konstrukce a používané materiály)
- Axiální kompresory (rozdělení, parametry, princip činnosti, popis stupně, konstrukce, používané materiály)
- Nestabilní jevy v kompresorech a možnosti jejich odstranění

# Základní rovnice proudění

- Navier – Stokesova rovnice
- Bernoulliho rovnice
- Měření rychlosti, tlaku a průtoku
- Rovnice kontinuity
- Zákon zachování energie
- Rychlost zvuku pro ideální plyn
- Hugoniotův teorém
- Bezrozměrný hmotnostní průtok (kapacita)
- Eulerova turbínová věta

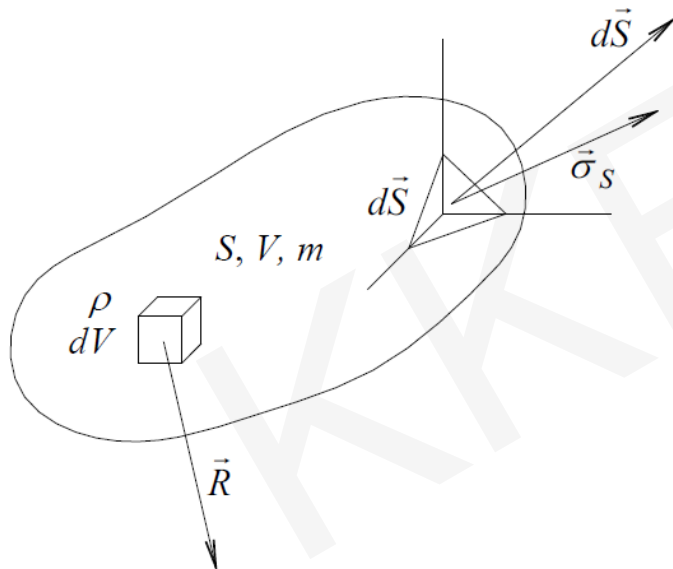
# Navier – Stokesova rovnice

- Pohybová rovnice pro 3D proudění
- Nejdůležitější z PDR proudění
- Vychází z **II. Newtonova pohybového zákona**:



Claude - Louis Navier  
(1785 – 1836)

George Gabriel Stokes  
(1819 – 1903)



$$m \frac{d\vec{w}}{dt} = \sum_i^N \vec{F}_i$$

$$\int_V \rho dV \frac{d\vec{w}}{dt} = \int_V \rho dV \vec{R} + \int_S \vec{\sigma}_s dS + \left[ \int_V (\vec{j} \times \vec{B}) dV \right]$$

$\vec{j}$  - proudová hustota

$\vec{B}$  - elektromagnetická indukce

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_k \frac{\partial w_i}{\partial k} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial w_k}{\partial k} \right)$$



# Navier – Stokesova rovnice

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_k \frac{\partial w_i}{\partial k} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial w_k}{\partial k} \right)$$

1.  $\frac{\partial w_i}{\partial t}$  - Lokální zrychlení
2.  $w_k \frac{\partial w_i}{\partial k}$  - Vnitřní setrvačná zrychlení
3.  $R_i$  - Vnější setrvačná zrychlení
4.  $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i}$  - Zrychlení od tlakových sil vlivem rozložení tlaku
5.  $\nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2}$  - Zrychlení od třecích sil (bez stlačitelnosti)
6.  $\frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial w_k}{\partial k} \right)$  - Zrychlení od třecích sil (se stlačitelností)

# Bernoulliho rovnice

- Vychází z N-S rovnice zavedením zjednodušujících předpokladů

$$\frac{dw_i}{dt} = R_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \cdot \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \cdot \nu \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial w_k}{\partial k} \right)$$

$$\nu = 0 \quad \frac{dw_i}{dt} = R_i - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial i} \quad | \cdot di$$

$$w_i dw_i = R_i di - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial i} di$$

Eulerova pohybová rovnice

$$\sum: \quad w_k dw_k = R_k dk - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial k} dk$$

$$w dw = R_k dk - \frac{1}{\rho} \cdot \left( dp - \frac{\partial p}{\partial t} dt \right)$$

Obecná Bernoulliho rovnice



Daniel Bernoulli  
(1700 – 1782)

# Bernoulliho rovnice

$$w dw = R_k dk - \frac{1}{\rho} \cdot \left( dp - \cancel{\frac{\partial p}{\partial t} dt} \right)$$

Stacionární proudění:

$$w dw = R_k dk - \frac{dp}{\rho}$$

Tekutina v gravitačním poli:

$$w dw = -g dy - \frac{dp}{\rho}$$

Integrace:

$$\frac{w^2}{2} = -gy - \int \frac{dp}{\rho} + C$$

**BR ve formě energií**

Nestlačitelnost:

$$\frac{w^2}{2} + gy + \frac{p}{\rho} = C \quad \left| \cdot \frac{1}{g} \right.$$

**BR ve formě výšek:**

$$\frac{w^2}{2g} + y + \frac{p}{\rho g} = y_c \quad | \cdot \rho g$$

**BR ve formě tlaků:**

$$\frac{\rho w^2}{2} + \rho g y + p = p_c$$

**Uvedené formy BR platí pouze pro proudění bez tření a beze ztrát !!!**

# Rozšířená Bernoulliho rovnice

Energetický ztrátový člen:  $\zeta \frac{w^2}{2}$

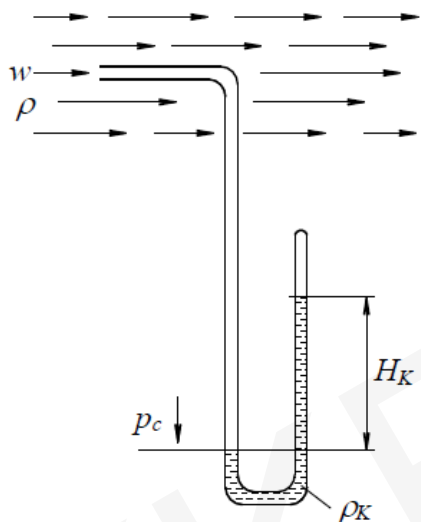
Výškový ztrátový člen:  $\zeta \frac{w^2}{2g}$

Tlakový ztrátový člen:  $\zeta \frac{\rho w^2}{2}$

$$\frac{w^2}{2g} + \zeta \frac{w^2}{2g} + y + \frac{p}{\rho g} = y_c \rightarrow (1 + \zeta) \cdot \frac{w^2}{2g} + y + \frac{p}{\rho g} = y_c$$

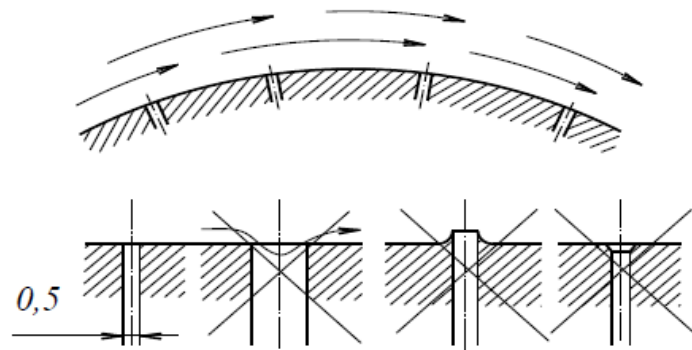
**Rozšířená BR ve formě  
výšek**

## Celkový tlak (Pitotova sonda)

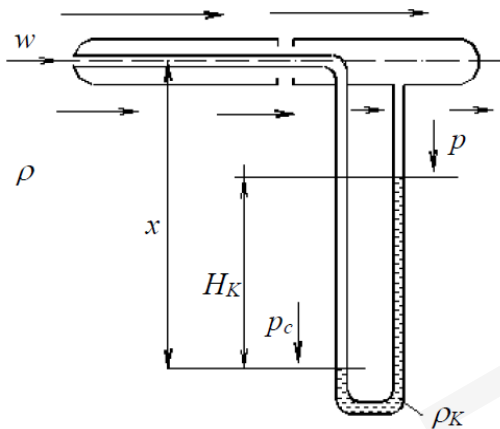


$$p_c = \rho \frac{w^2}{2} + p = \rho_K \cdot g \cdot H_K$$

## Statický tlak (Odběry statických tlaků)



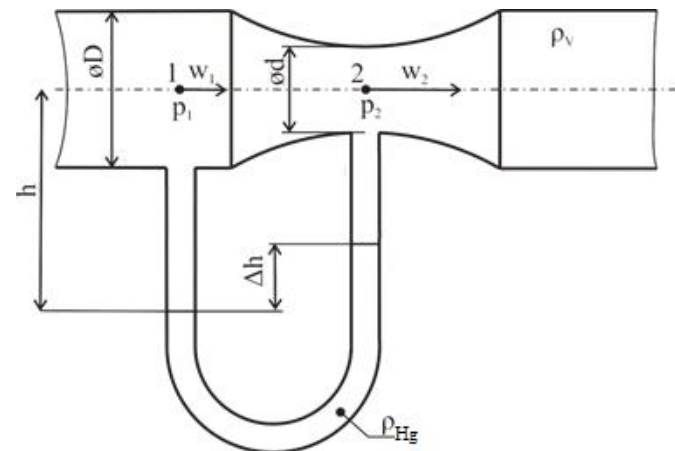
## Dynamický tlak (Prandtlova sonda)



$$w = \sqrt{\frac{2p_D}{\rho}} = \sqrt{\frac{2gH_K(\rho_K - \rho)}{\rho}}$$

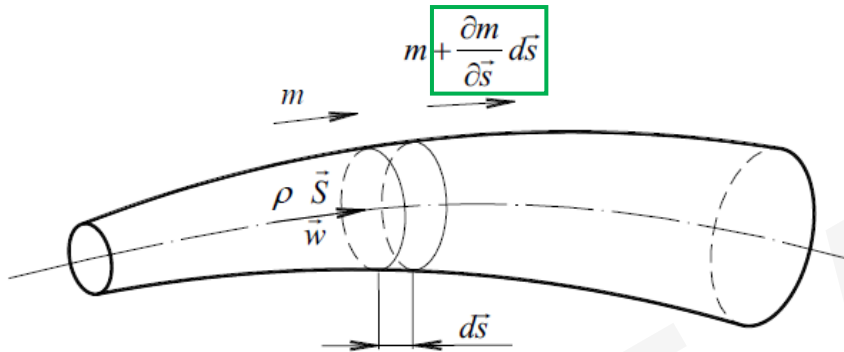
## Průtok (Venturiho dýza)

$$\dot{m} = \rho_V \frac{\pi d^2}{4} w_2$$



# Rovnice kontinuity

- Zákon zachování hmotnosti



$$\vec{S} = \vec{S}(\vec{s}): \quad \vec{S} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \vec{S} \vec{w})}{\partial \vec{s}} = 0$$

$$\vec{S} = \vec{S}(\vec{s}); \rho = \rho(\vec{s}): \quad \rho \vec{S} \vec{w} = \text{konst.}$$

$$\vec{S} = \text{konst.}: \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \vec{w})}{\partial \vec{s}} = 0 \quad ; \quad \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{V}(\rho \vec{w}) = 0 \right)$$

$$\frac{\partial m}{\partial \vec{s}} d\vec{s} = - \frac{\partial(\rho dV)}{\partial t} dt$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{S} \vec{w} dt)}{\partial \vec{s}} d\vec{s} = - \frac{\partial(\rho \cdot \vec{S} d\vec{s})}{\partial t} dt$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{S} \vec{w})}{\partial \vec{s}} d\vec{s} dt = - \frac{\partial(\rho \vec{S})}{\partial t} d\vec{s} dt$$

$$\frac{\partial(\rho \cdot \vec{S})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \vec{S} \vec{w})}{\partial \vec{s}} = 0$$

**RK pro proudovou  
trubicí**

**Tenzorový zápis RK**

# Zákon zachování energie

- Energetická rovnice

$$\underbrace{\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}}_1 = \underbrace{\frac{\tau_{kl}}{\rho} \cdot \frac{\partial w_k}{\partial l}}_2 - \underbrace{\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial k}}_3 + \underbrace{\frac{q_v}{\rho}}_4 \left[ \frac{J}{kg \cdot s} \right]$$

1.  $\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt}$  - Změna energie 1kg proudící látky za 1s
2.  $\frac{\tau_{kl}}{\rho} \cdot \frac{\partial w_k}{\partial l}$  - Disipace kinetické energie na teplo
3.  $\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial k}$  - Difuze tepla povrchem do okolí
4.  $\frac{q_v}{\rho}$  - Produkce tepla



$$\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt} = \frac{\tau_{kl}}{\rho} \cdot \frac{\partial w_k}{\partial l} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial q_k}{\partial k} + \frac{q_v}{\rho}$$

$q$

$$\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt} = q \rightarrow q dt = dq = dh - \frac{dp}{\rho} \rightarrow 1. \text{ ZTD}$$

•  $(\tau_{kl} = q_k = q_v = 0)$ :  $\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dt} = 0 \quad / \cdot dt$

$$d\left(h_c - \frac{w^2}{2}\right) - \frac{dp}{\rho} = 0 \rightarrow dh_c - \underbrace{wdw - \frac{dp}{\rho}}_0 = 0 \rightarrow dh_c = 0 \rightarrow h_c = \text{konst.}$$

- Celková entalpie musí být při proudění za uvažovaných podmínek konstantní

# Rychlost zvuku pro ideální plyn

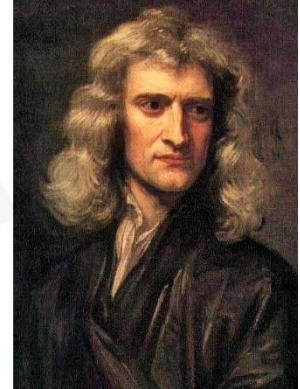
- Šíření malých tlakových poruch
- Závisí na druhu látky v níž se šíří a na rychlosti proudění látky
- Vztah pro rychlost zvuku našel **Isaac Newton**:

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}$$

- Adiabatický děj:  $\frac{p}{\rho^\kappa} = konst. ; \left( \kappa = \frac{c_p}{c_v} \right)$

$$\frac{dp}{p} - \kappa \cdot \frac{d\rho}{\rho} = 0 \rightarrow \frac{dp}{d\rho} = \kappa \cdot \frac{p}{\rho}$$

$$a^2 = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T} \doteq 20,05 \cdot \sqrt{T}$$



Isaac Newton  
(1643 – 1727)

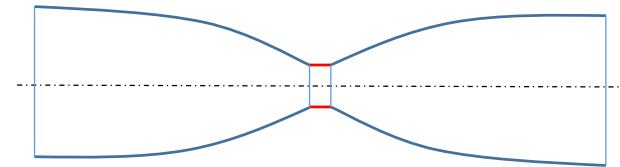
# Hugoniotův teorém

- Funkční závislost mezi změnou průřezu a změnou rychlosti proudění
- Logaritmováním a diferencováním rovnice kontinuity dostaneme:

$$\frac{d\rho}{\rho} + \frac{dS}{S} + \frac{dw}{w} = 0$$

$$\frac{d\rho}{\rho} \cdot \underbrace{\frac{dp}{dp}}_1 = \frac{d\rho}{dp} \cdot \frac{dp}{\rho} \rightarrow \frac{1}{a^2} \cdot (-w dw) \cdot \underbrace{\frac{w}{w}}_1 = -\frac{w^2}{a^2} \cdot \frac{dw}{w} = -Ma^2 \cdot \frac{dw}{w}$$

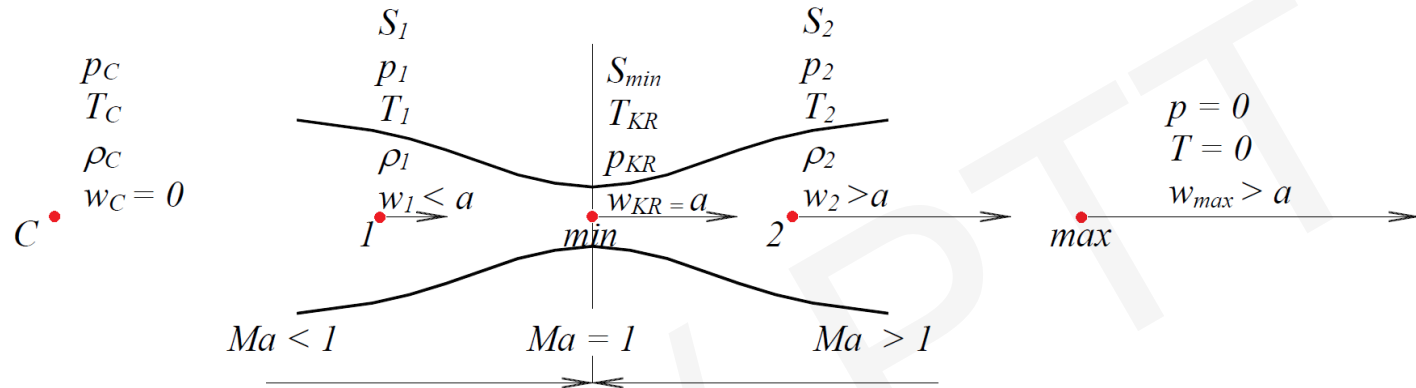
$$\frac{dS}{S} + (1 - Ma^2) \cdot \frac{dw}{w} = 0$$



- Subsonické proudění:  $Ma < 1 \rightarrow w^\uparrow; S^\downarrow$
- Supersonické proudění:  $Ma > 1 \rightarrow w^\uparrow; S^\uparrow$
- Transsonické proudění:  $Ma = 1 \rightarrow \frac{dS}{S} = 0$

Ma	w	S
< 1	↑	↓
= 1	a	$S_{\min}$
> 1	↑	↑

# Kritická a maximální rychlost



$$\underbrace{h_C}_{\underbrace{1,2,\dots}} = h + \frac{w^2}{2} = \underbrace{h_{kr}}_{\min} + \frac{w_{kr}^2}{2} = \underbrace{0 + \frac{w_{max}^2}{2}}_{\max} ; h = c_p \cdot T$$

$$c_p \cdot T_C = c_p \cdot T + \frac{w^2}{2} = c_p \cdot T_{kr} + \frac{w_{kr}^2}{2} = \frac{w_{max}^2}{2}$$

$$\frac{\overbrace{\kappa \cdot r \cdot T_C}^{a_C^2}}{\kappa - 1} = \frac{\overbrace{\kappa \cdot r \cdot T}^{a^2}}{\kappa - 1} + \frac{w^2}{2} = \frac{\overbrace{\kappa \cdot r \cdot T_{kr}}^{a_{kr}^2 = w_{kr}^2}}{\kappa - 1} + \frac{w_{kr}^2}{2} = \frac{w_{max}^2}{2}$$

$$\frac{\kappa + 1}{2 \cdot (\kappa - 1)} w_{kr}^2$$

# Kritická a maximální rychlost

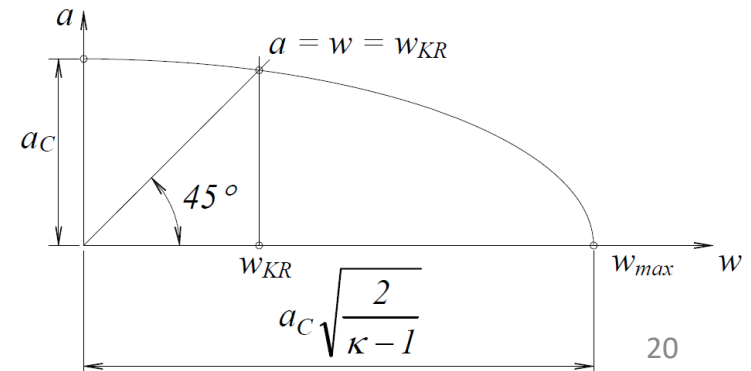
$$\underbrace{\frac{a_c^2}{\kappa - 1}}_1 = \underbrace{\frac{a^2}{\kappa - 1} + \frac{w^2}{2}}_2 = \underbrace{\frac{\kappa + 1}{2 \cdot (\kappa - 1)} \cdot w_{kr}^2}_3 = \underbrace{\frac{w_{max}^2}{2}}_4$$

• 1 = 3:  $w_{kr}^2 = \frac{2}{\kappa + 1} \cdot a_c^2 \rightarrow w_{kr} = a_c \cdot \sqrt{\frac{2}{\kappa + 1}}$

• 1 = 4:  $w_{max}^2 = \frac{2}{\kappa - 1} \cdot a_c^2 \rightarrow w_{max} = a_c \cdot \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1}}$

• 1 = 2:  $\frac{a_c^2}{\kappa - 1} = \frac{a^2}{\kappa - 1} + \frac{w^2}{2} \rightarrow \frac{a^2}{a_c^2} + \frac{w^2}{w_{max}^2} = 1$

Rovnice elipsy



# Rovnice izentropického proudění

$$La^2 = \frac{w^2}{w_{kr}^2} = \frac{w^2}{\frac{2}{\kappa+1} \cdot \underbrace{a_c^2}_{a^2 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot w^2}} = \frac{\kappa+1}{2} \cdot \frac{w^2}{a^2 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot w^2} = \frac{\kappa+1}{2} \cdot \left( Ma^{-2} + \frac{\kappa-1}{2} \right)^{-1}$$

$$Ma^2 = \frac{2}{\kappa+1} \cdot \left( La^{-2} - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \right)^{-1}$$

- Poměry statických a celkových stavů stavových veličin:

$$T_c = T + \frac{w^2}{2c_p} = T \cdot \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot \frac{w^2}{\kappa r T} \right) = T \cdot \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot \frac{w^2}{a^2} \right) = T \cdot \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot Ma^2 \right)$$

$$\frac{T}{T_c} = \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot Ma^2 \right)^{-1} = 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \cdot La^2$$



$$\frac{T}{T_c} = \left( \frac{p}{p_c} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = \left( \frac{\rho}{\rho_c} \right)^{\kappa-1}$$

$$\frac{p}{p_c} = \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot Ma^2 \right)^{-\frac{\kappa}{\kappa-1}} = \left( 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \cdot La^2 \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}$$

$$\frac{\rho}{\rho_c} = \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} \cdot Ma^2 \right)^{-\frac{1}{\kappa-1}} = \left( 1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \cdot La^2 \right)^{\frac{1}{\kappa-1}}$$

Izoentropická  
vazba

# Kritické parametry

- Kritické parametry ( $Ma = La = 1$ ) *pro*  $\kappa = 1,4$ :

$$\frac{T_{kr}}{T_c} = \frac{2}{\kappa + 1} = 0,833$$

$$\frac{p_{kr}}{p_c} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 0,528$$

$$\frac{\rho_{kr}}{\rho_c} = \left( \frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} = 0,633$$

# Bezrozměrný hmotnostní průtok (kapacita)

- Důležitý vztah pro stlačitelné proudění v turbosoustrojích

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho w S = \frac{\rho}{\rho_c} \rho_c \frac{w}{a} a S = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{\kappa-1}} Ma \frac{p_c}{r T_c} \sqrt{\kappa r \frac{T}{T_c}} S = \\ &= \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{\kappa-1}} \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot Ma \cdot p_c \sqrt{\frac{\kappa}{r T_c}} \cdot S \\ \frac{\dot{m} \sqrt{r T_c}}{p_c S} &= \sqrt{\kappa} Ma \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa+1}{\kappa-1}\right)}\end{aligned}$$

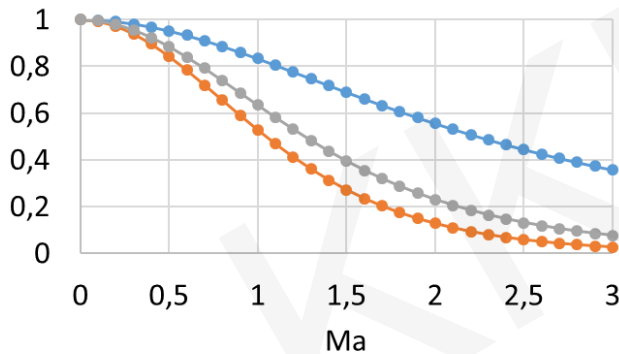
$$\frac{\dot{m} \sqrt{c_p T_c}}{p_c S} = \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa - 1}} Ma \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa+1}{\kappa-1}\right)} \rightarrow \frac{\dot{m} \sqrt{c_p T_c}}{p_c S} = f(Ma)$$



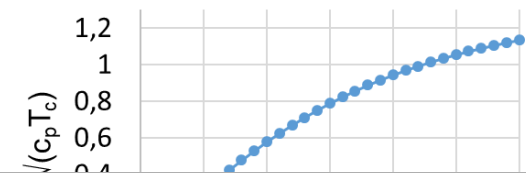
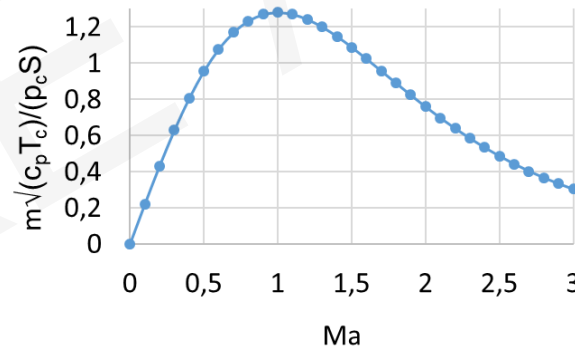
# Vlastnosti izentropického proudění

$$\frac{T}{T_c} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-1} \quad \frac{\rho}{\rho_c} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{\kappa - 1}} \quad \frac{p}{p_c} = \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$$

$$\frac{\dot{m} \sqrt{c_p T_c}}{p_c S} = \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa - 1}} Ma \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}\right)} \quad \frac{w}{\sqrt{c_p T_c}} = Ma \sqrt{\kappa - 1} \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{-\frac{1}{2}}$$



—•— T/Tc —•— p/pc —•— rho/rhoc



Compressible Flow Calculator v.1

### Compressible Flow Calculator

Heat capacity ratio  T/T<sub>c</sub>

Mach number  p/p<sub>c</sub>

p/p<sub>c</sub>

w/√(c<sub>p</sub>T<sub>c</sub>)

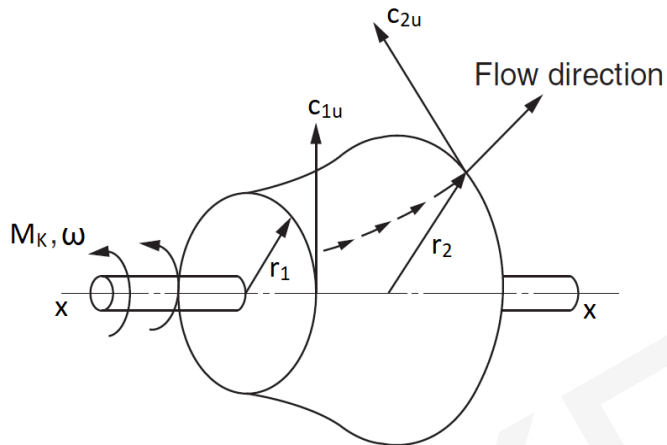
m√(c<sub>p</sub>T<sub>c</sub>)/Ap<sub>0</sub>

© Ing. Marek Klimko, Ph.D.

- <https://github.com/xMKx1/CompressibleFlowCalc.git>

# Eulerova turbínová věta

- Základ pro analýzu práce v lopatkovém stroji



*Krouticí moment se rovná změně hybnosti tekutiny protékající libovolným mezilopatkovým kanálem.*



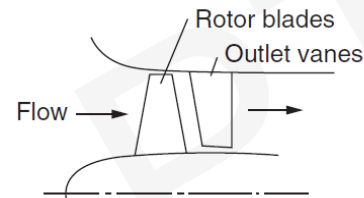
Leonhard Euler  
(1707 – 1783)

$$M_{K,x} = m \frac{d}{dt}(rc_u) \quad M_{K,x} = \dot{m}(r_2 c_{2u} - r_1 c_{1u}) \quad \overbrace{\dot{M}_{K,x} \omega}^P = \dot{m}(u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}) ; \quad u = \omega r$$

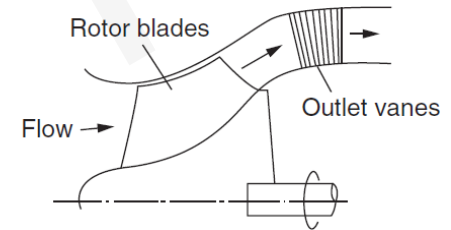
$$\Delta W_K = \frac{\dot{W}_K}{\dot{m}} = \frac{M_{K,x} \omega}{\dot{m}} = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u} > 0 \quad \Delta W_T = \frac{\dot{W}_T}{\dot{m}} = \frac{M_{K,x} \omega}{\dot{m}} = u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u} > 0$$

- Obsecný tvar:  $\Delta W_x = \Delta h_c = \Delta(u c_u)$

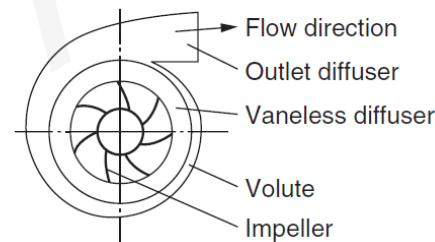
- *Turbo* – z latinského „to, co se točí“
- **Kompresor** (čerpadlo) předává energii tekutině
- **Turbína** z tekutiny energii odebírá
- Využití:
  - Letectví, lodní a pozemní doprava
  - Průmyslová zařízení
  - ...
- Klasifikace (tvar průtočné části):
  - Axiální
  - Radiální
  - Smíšené



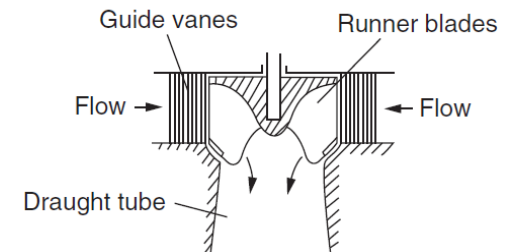
(a) Single stage axial flow compressor or pump



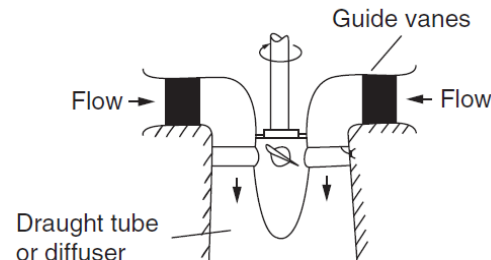
(b) Mixed flow pump



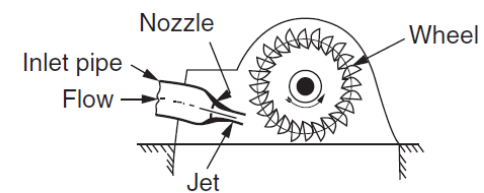
(c) Centrifugal compressor or pump



(d) Francis turbine (mixed flow type)

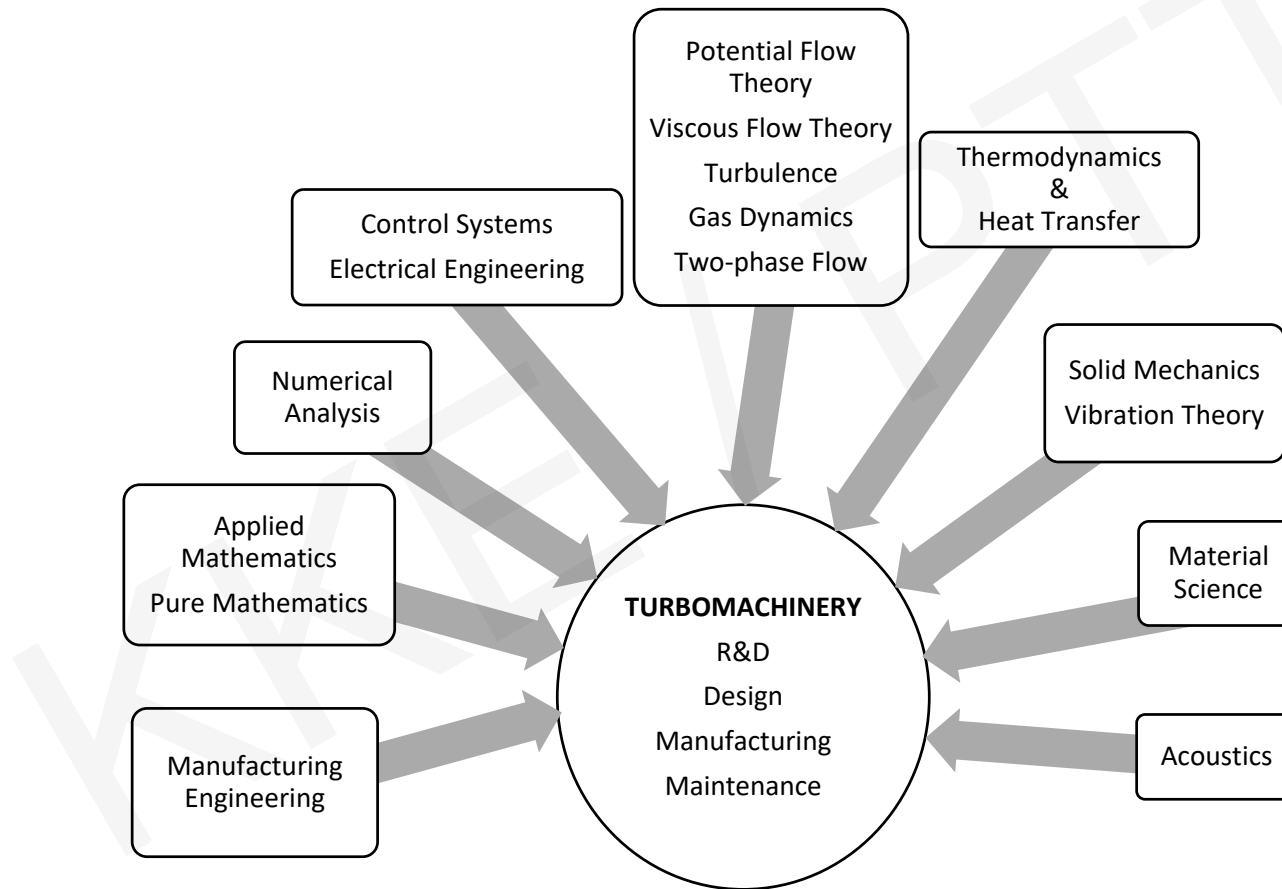


(e) Kaplan turbine



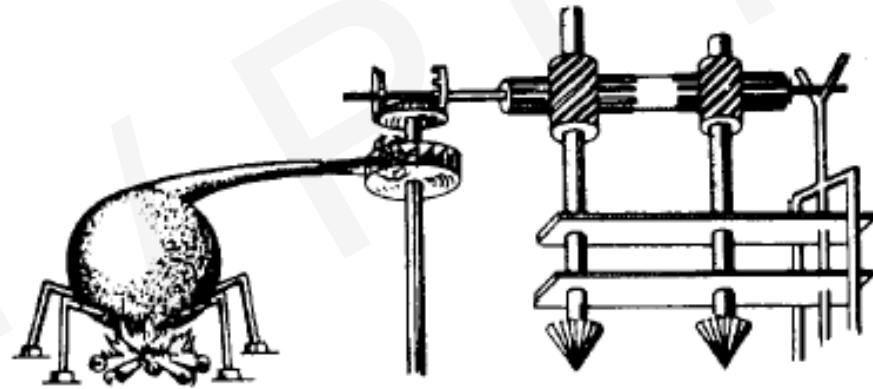
(f) Pelton wheel

- Klasifikace (druh pracovního média):
  - Plyny nebo páry (vzduch, argon, neon, helium, freon,...)
  - Kapaliny (voda, kryogenní kapaliny, krev,...)
- Klasifikace (typ konstrukce):
  - Otevřené (letecké nebo lodní vrtule)
  - Uzavřené (kompresory a turbíny proudových motorů)
- Klasifikace (reakce):
  - Rovnotlaké (impulsní) - ke změně tlaku v rotoru nedochází
  - Přetlakové (reakční) - ke změně tlaku v rotoru dochází



# Stručná historie tepelných strojů

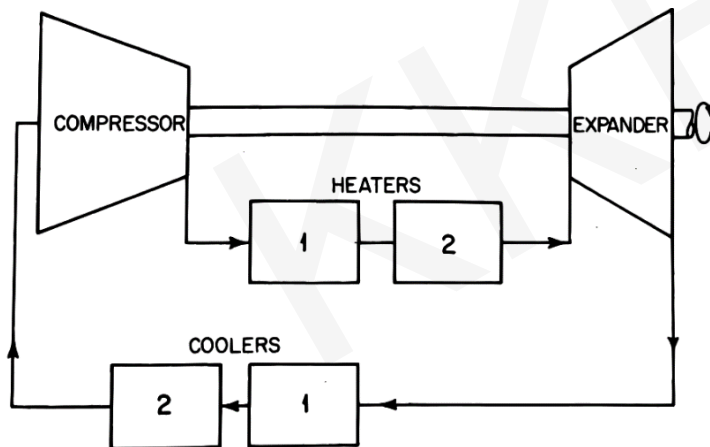
- Využití reaktivního účinku vystupujících plynů je známý již z období př.n.l.
  - Egyptský matematik a filozof *Hérón Alexandrijský* → *Aeolipile*



- V roce 1629 italský inženýr *Giovanni Branca* vynalezl první parní turbínu
- V roce 1791 *John Barber* prvně popsal a patentoval „plynovou turbínu“
  - Zařízení se nepovedlo reálně sestavit

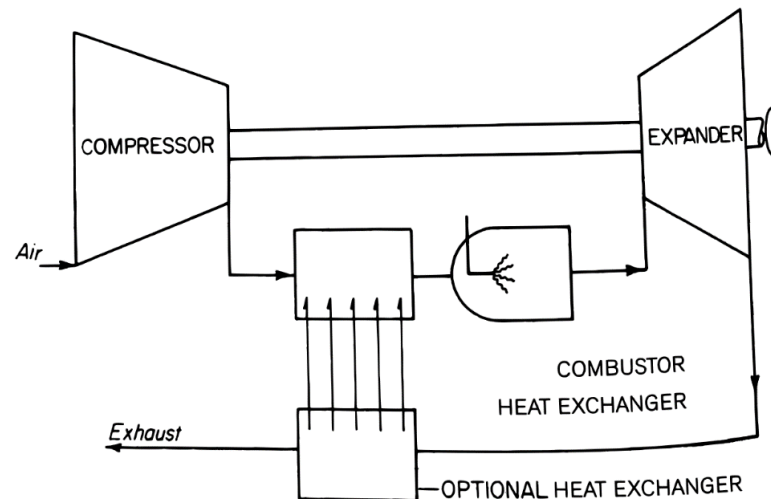
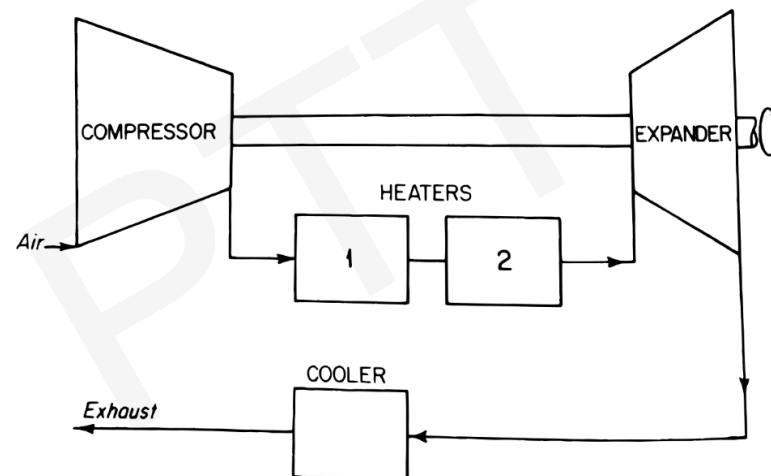
# Turbokompresorové motory

- TKM se v praxi často nesprávně nahrazuje pojmem „plynová turbína“
- TKM je tepelný stroj, kterého plynová turbína proměňuje kinetickou a tepelnou energii plynů na mechanickou práci
  - Vyprodukované teplo je vedené dýzou do atmosféry, nebo je dále využité
- Základní schéma uzavřeného TKM:**



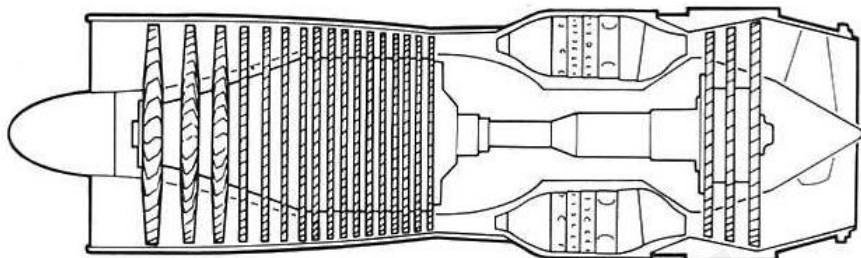
- Kontinuální stlačování plynu v kompresoru
- Ohřev stlačeného plynu
- Kontinuální expanze horkých plynů v turbíně
- Snižování teploty výstupních plynů v chladičích

- **Základní schéma otevřeného TKM:**
- **Schéma TKM s vnitřním spalováním:**

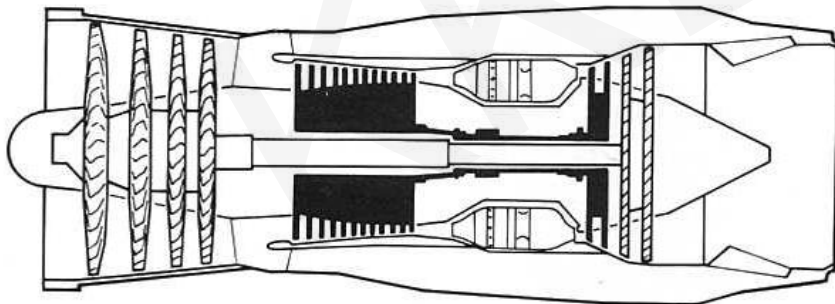




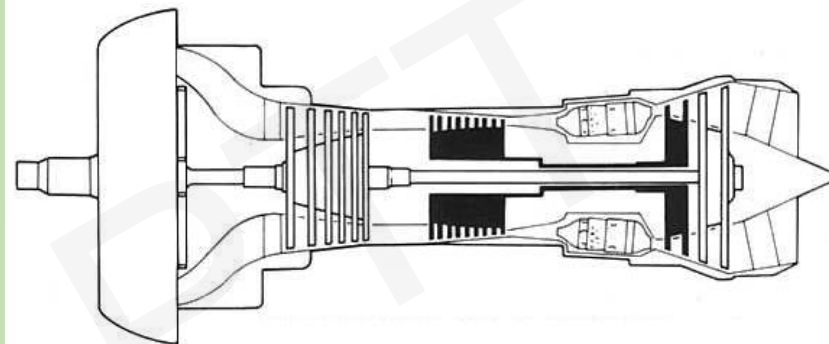
- Více-hřídelová koncepce



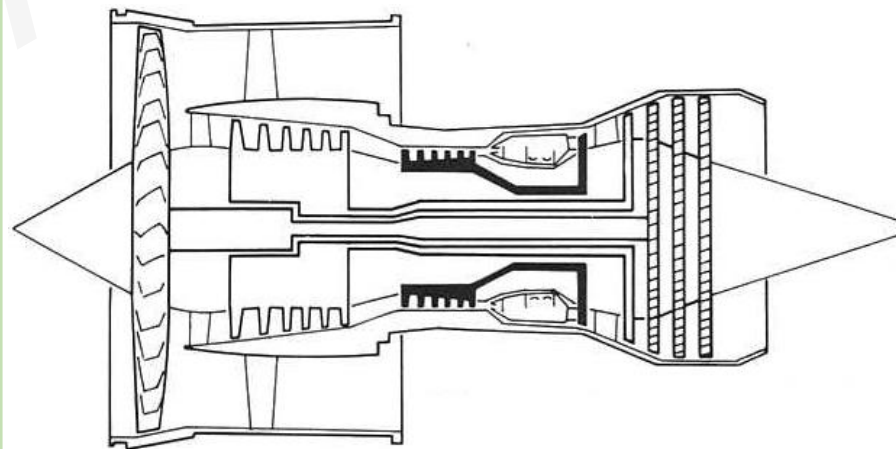
Jednohřídelová koncepce – jedнопroudový LM



Dvouhřídelová koncepce – dvouproudový LM



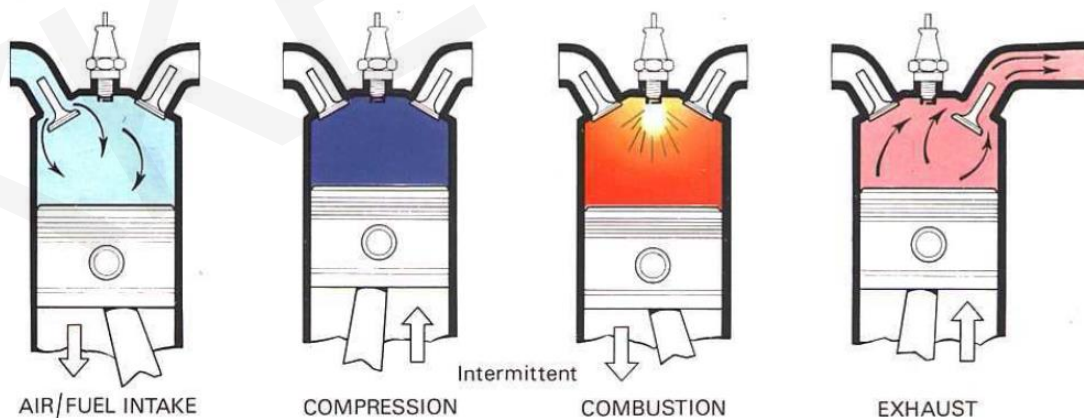
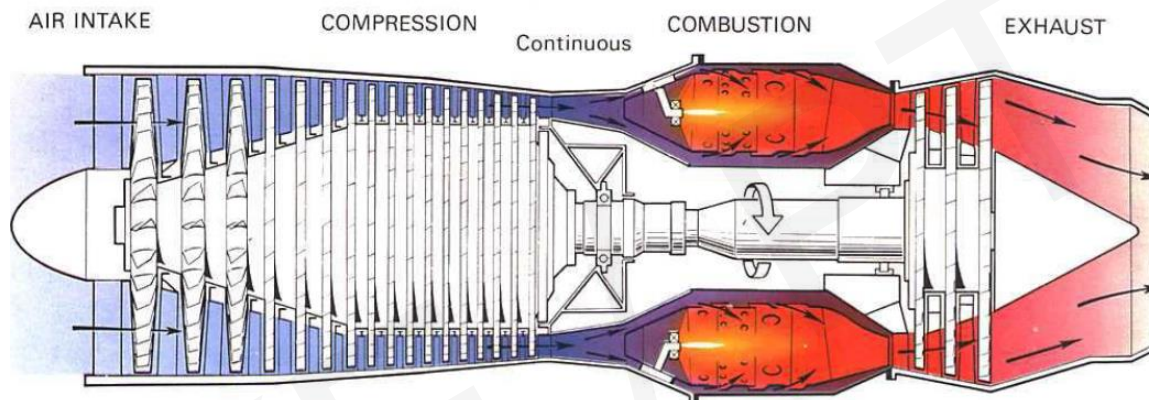
Dvouhřídelová koncepce – TVM s „volnou“ T



Tříhřídelová koncepce – dvouproudový LM

# Cyklus s vnitřním spalováním vs. jiné TD cykly

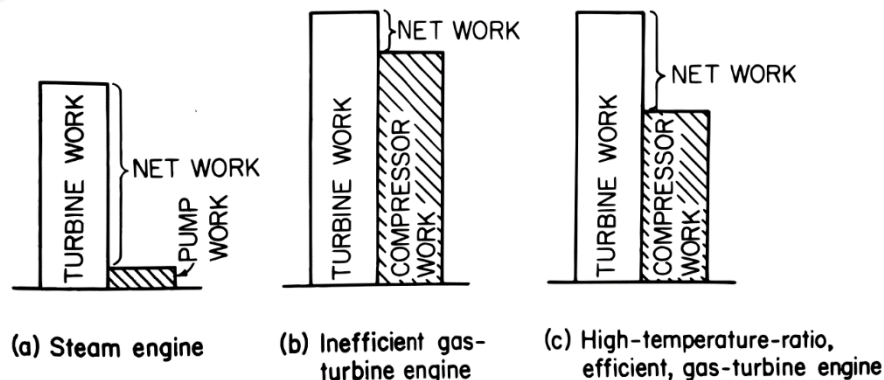
- Podobnost TKM cyklu se spalovacím motorem (Otto, Diesel)



# Cyklus s vnitřním spalováním vs. jiné TD cykly

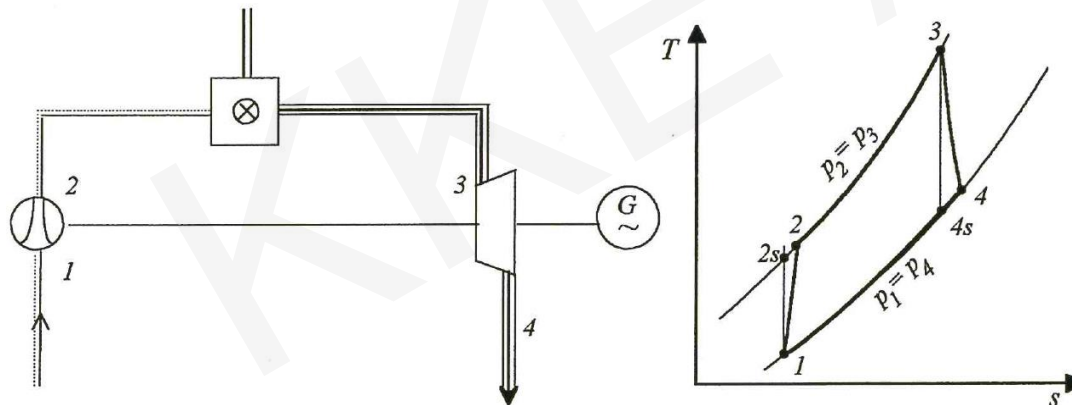
- **Podobnost TKM cyklu s parním cyklem**

- Turbína TKM  $\approx$  Parní turbína
- Kompresor TKM  $\approx$  Napájecí čerpadlo
- Ohřívač plynu TKM  $\approx$  Parogenerátor/Kotel
- Hlavní rozdíly:
  - TKM pracuje pouze s plynem; u parního cyklu dochází ke změně fáze
  - Rozdíl ve velikosti odebírané energie pro práci NČ/kompresoru TKM
  - Proces spalování



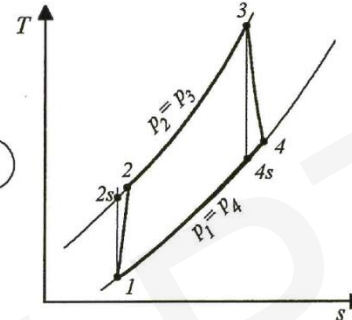
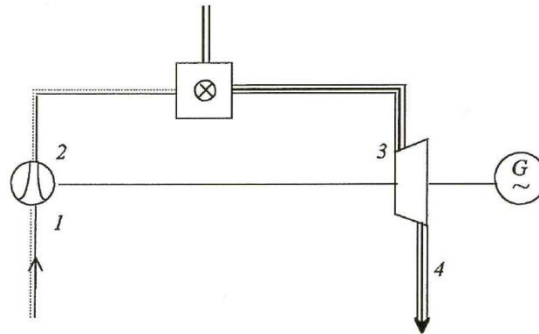
# TD základního cyklu TKM

- Spalování může probíhat při stálém tlaku nebo při *stálém objemu* (Humpreyův cyklus)
- Nejběžnější způsobem spalování je **spalování při stálém tlaku** (Ericssonův-Braytonův cyklus)
- **Otevřený cyklus bez regenerace:**



- Dokonalý plyn
- $c_p; \kappa = konst.$
- $\zeta_{pz} = 0$
- $\zeta_{mech} = 0$
- $\dot{m}_{pal}; \dot{m}_{ucp} = 0$

# Otevřený cyklus TKM bez regenerace



$$\pi = \frac{p_2}{p_1}$$

$$\tau = \frac{T_3}{T_1}$$

$$a^K = c_p \cdot (T_2 - T_1) = c_p \cdot T_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_s^K} = c_p \cdot T_1 \cdot \frac{1}{\eta_s^K} \cdot (\pi^m - 1)$$

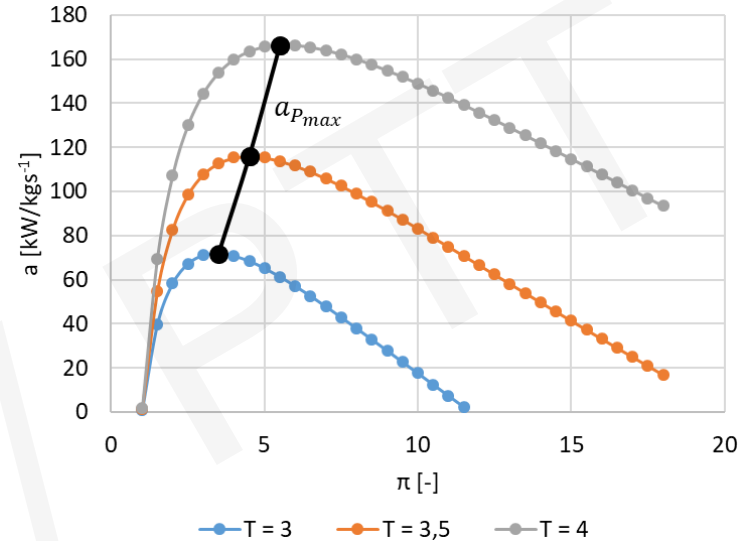
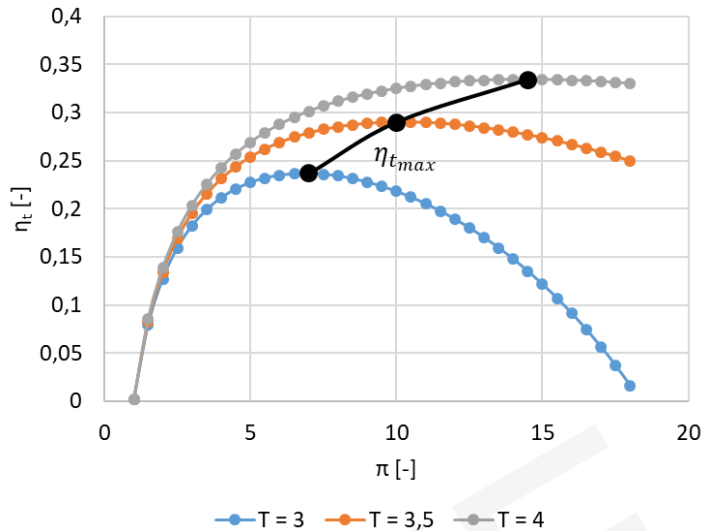
$$a^T = c_p \cdot (T_3 - T_4) = c_p \cdot \eta_s^T \cdot (T_3 - T_{4s}) = c_p \cdot T_3 \cdot \eta_s^T \cdot (1 - \pi^{-m})$$

$$q_{2,3} = c_p(T_3 - T_2) = c_p[(T_3 - T_1) - (T_2 - T_1)] = c_p T_1 \left[ \tau - \frac{1}{\eta_s^K} (\pi^m - 1) - 1 \right]$$

$$a = a^T - a^K = c_p \cdot T_1 \cdot \left[ \eta_s^T \cdot \tau \cdot (1 - \pi^{-m}) \cdot \eta_s^T - \frac{1}{\eta_s^K} \cdot (\pi^m - 1) \right]$$

$$\eta_t = \frac{a}{q_{2,3}} = \frac{\eta_s^T \cdot \tau \cdot (1 - \pi^{-m}) \cdot \eta_s^T - \frac{1}{\eta_s^K} \cdot (\pi^m - 1)}{\tau - \frac{1}{\eta_s^K} (\pi^m - 1) - 1} = \frac{\tau \cdot \eta_s^T \cdot \eta_s^K - \pi^m}{\pi^m \cdot \left[ \frac{\tau - 1}{\pi^m - 1} \cdot \eta_s^K - 1 \right]}$$

# Otevřený cyklus TKM bez regenerace



$$\frac{\partial a}{\partial \pi} = 0 \rightarrow \pi_{P,max} = (\eta_s^K \cdot \eta_s^T \cdot \tau)^{\frac{1}{2m}}$$

$$\sigma = \frac{a}{a^T} = 1 - \frac{a^K}{a^T} = 1 - \frac{\pi^m}{\eta_s^K \cdot \eta_s^T \cdot \tau}$$

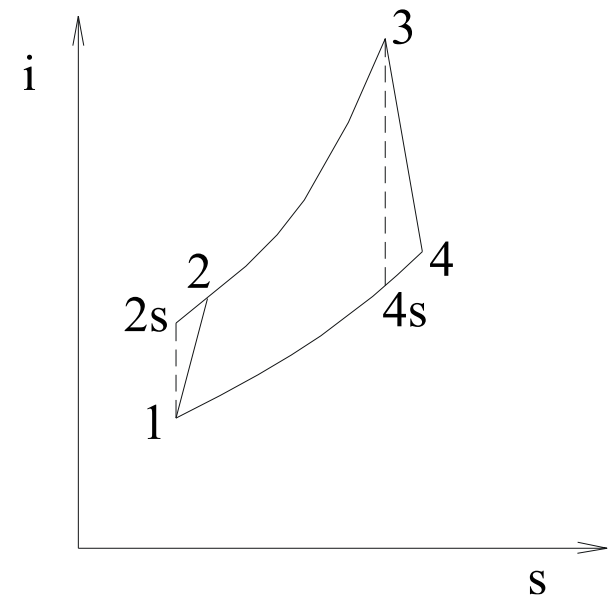
$$\pi_{opt} = \sqrt{\pi_{P,max} \cdot \pi_{\eta_{t,max}}}$$

- Zařízení pro pokrytí energetických špiček – volba nižšího  $\pi$
- Zařízení pro dlouhodobý provoz s vysokou tepelnou účinností – volba vyššího  $\pi$

## Optimální stupeň stlačení kompresoru:

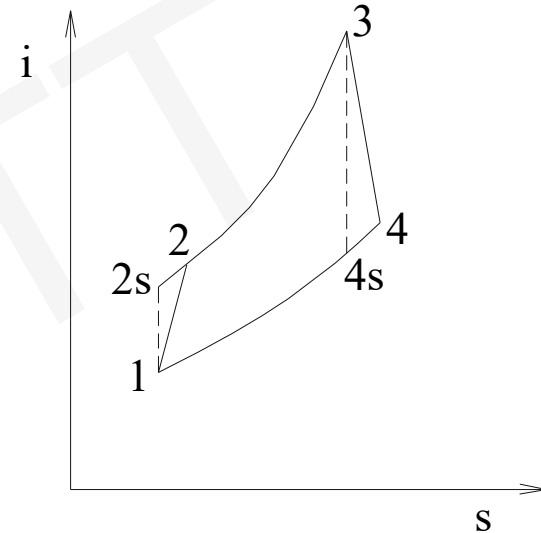
Vypočítejte optimální stupeň stlačení kompresoru pro zadané vstupní parametry TKM bez regenerace a zjistěte potřebné množství vzduchu pro výkon TKM 100 MW.

Vstupní teplota	$t_1$	20°C
Teplota před turbínou	$t_3$	1200°C
Izentropická účinnost kompresoru	$\eta_s^K$	0,86
Izentropická účinnost turbíny	$\eta_s^T$	0,88
Stupeň stlačení kompresoru	$\pi$	$\frac{p_2}{p_1}$
Teplotní poměr	$\tau$	$\frac{T_3}{T_1}$



## Postup výpočtu:

- Práce kompresoru  $\rightarrow a^K = i_2 - i_1 = c_p(T_2 - T_1)$
- Práce turbíny  $\rightarrow a^T = i_3 - i_4 = c_p(T_3 - T_4)$
- Práce cyklu  $\rightarrow a = a^T - a^K$
- Stupeň stlačení pro maximální práci cyklu  $\rightarrow \frac{\partial a}{\partial \pi} = 0$
- Přivedené teplo  $\rightarrow q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$
- Účinnost cyklu  $\rightarrow \eta_t = \frac{a}{q_{23}}$
- Stupeň stlačení pro maximální tepelnou účinnost  $\rightarrow \frac{\partial \eta_t}{\partial \pi} = 0$
- **Optimální stupeň stlačení**  $\rightarrow \pi_{opt} = \sqrt{\pi_{p,max} \pi_{\eta_t,max}}$
- Maximální práce cyklu při optimálním stlačení  $\rightarrow a_{max} = a(\pi_{opt})$
- **Hmotnostní průtok pro zadaný výkon**  $\rightarrow \dot{m} = \frac{P}{a_{max}}$







FAKULTA STROJNÍ  
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY  
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH  
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

**Děkuji za pozornost**