



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

PLYNOVÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Datum:

Obsah

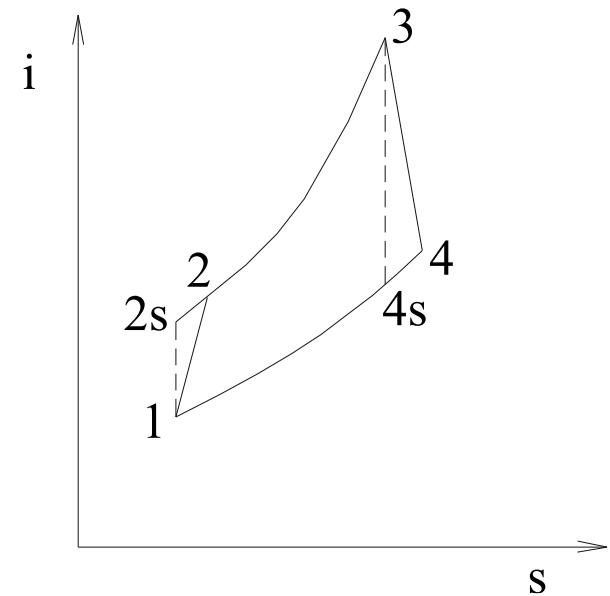
- Příklad z předcházejícího cvičení - dokončení
- Otevřený cyklus s regenerací
- Řešený příklad
- Dělená komprese
- Dělená expanze
- Uzavřený cyklus TKM
- Kombinovaný paroplynový cyklus

Řešený příklad – Cvičení č. 1

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.

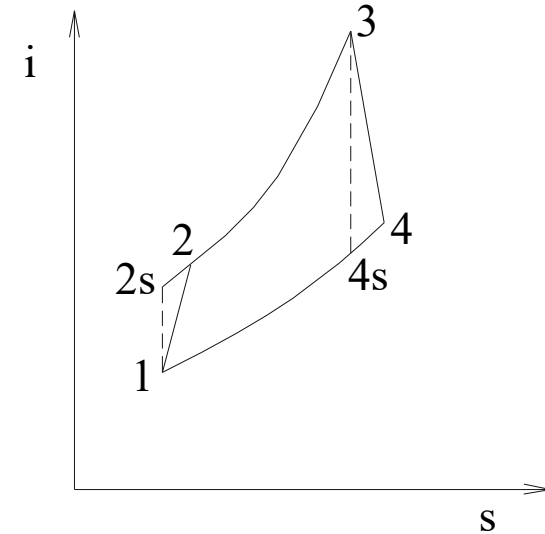
Vstupní teplota	t_1	20°C
Teplota před turbínou	t_3	1200°C
Izotropická účinnost kompresoru	η_s^K	0,86
Izotropická účinnost turbíny	η_s^T	0,88
Stupeň stlačení kompresoru	π	$\frac{p_2}{p_1}$
Teplotní poměr	τ	$\frac{T_3}{T_1}$



Řešený příklad – Cvičení č. 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** $\rightarrow \dot{m} = \frac{P}{a_{max}}$

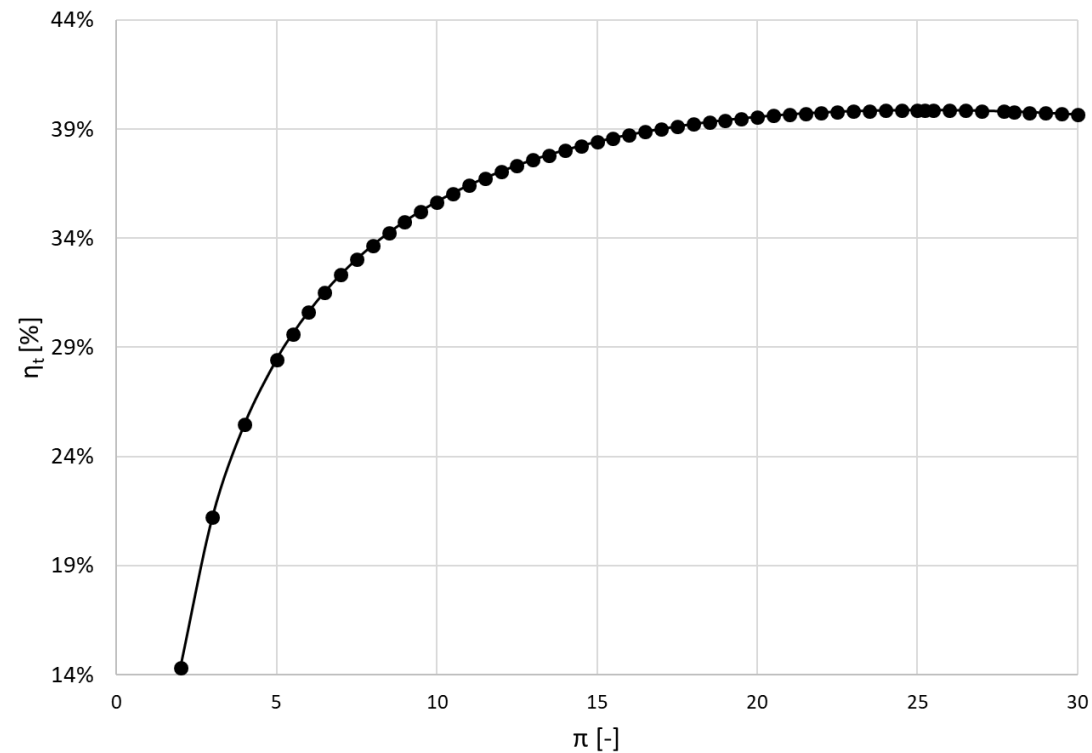


Řešený příklad – Cvičení č. 1

- **Práce kompresoru:** $a^K = c_p T_1 (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K}$
- **Práce turbíny:** $a^T = c_p T_3 (1 - \pi^{-m}) \eta_S^T$
- **Práce cyklu:** $a = c_p T_1 \left[\tau (1 - \pi^{-m}) \eta_S^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K} \right]$
- **Stupeň stlačení pro maximální práci cyklu:** $\pi_{p,max} = (\tau \eta_S^T \eta_S^K)^{\frac{1}{2m}} = \mathbf{10,36}$
- **Přivedené teplo:** $q_{23} = c_p T_1 \left[(\tau - 1) - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K} \right]$
- **Tepelná účinnost cyklu:** $\eta_t = \frac{\tau (1 - \pi^{-m}) \eta_S^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K}}{(\tau - 1) - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K}}$
- **Stupeň stlačení pro maximální tepelnou účinnost:** $\rightarrow \pi_{\eta_t,max} = \dots$

Řešený příklad – Cvičení č. 1

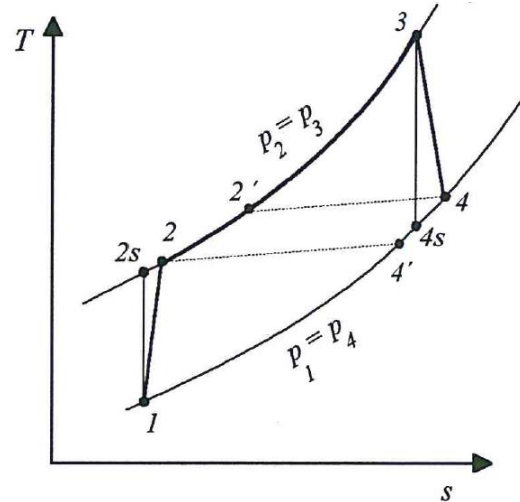
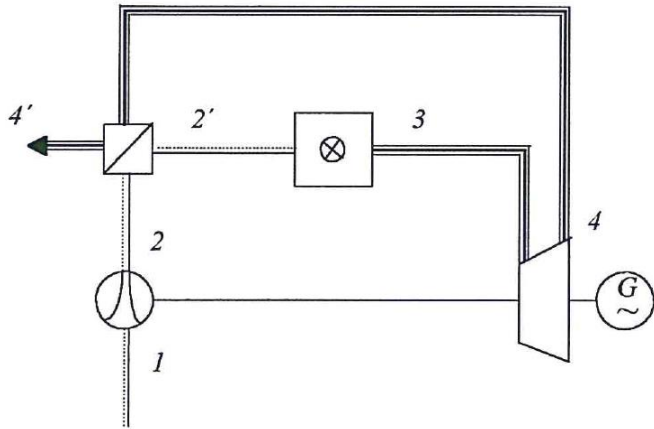
π	η_t	π	η_t	π	η_t	π	η_t
10	0,356616	14,5	0,382222	19	0,393968	23,5	0,398281
10,5	0,360542	15	0,384039	19,5	0,394747	24	0,398436
11	0,364133	15,5	0,385706	20	0,395441	24,5	0,398536
11,5	0,367422	16	0,387234	20,5	0,396056	25	0,398584
12	0,37044	16,5	0,388634	21	0,396596	25,22	0,398588
12,5	0,37321	17	0,389913	21,5	0,397063	25,5	0,39858
13	0,375755	17,5	0,39108	22	0,397463	26	0,398528
13,5	0,378095	18	0,39214	22,5	0,397797	26,5	0,398429
14	0,380246	18,5	0,393101	23	0,398069	27	0,398285



Řešený příklad – Cvičení č. 1

- **Optimální stlačení:** $\pi_{opt} = \sqrt{\pi_{p,max} \pi_{\eta_{t,max}}} = \sqrt{10,36 \cdot 25,22} = \mathbf{16,16}$
- **Maximální práce cyklu:** $a_{max} = c_p T_1 \left[\tau (1 - \pi^{-m}) \eta_s^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K} \right] =$
 $= \mathbf{298\,322\,Jkg^{-1}}$
- **Hmotnostní průtok:** $P = \dot{m} \cdot a_{max} \rightarrow \dot{m} = \frac{P}{a_{max}} = \mathbf{335,21kgs^{-1}}$

Otevřený cyklus TKM s regenerací



Protiproudý výměník:

$$T_4 - T_{2'} = T_{4'} - T_2$$



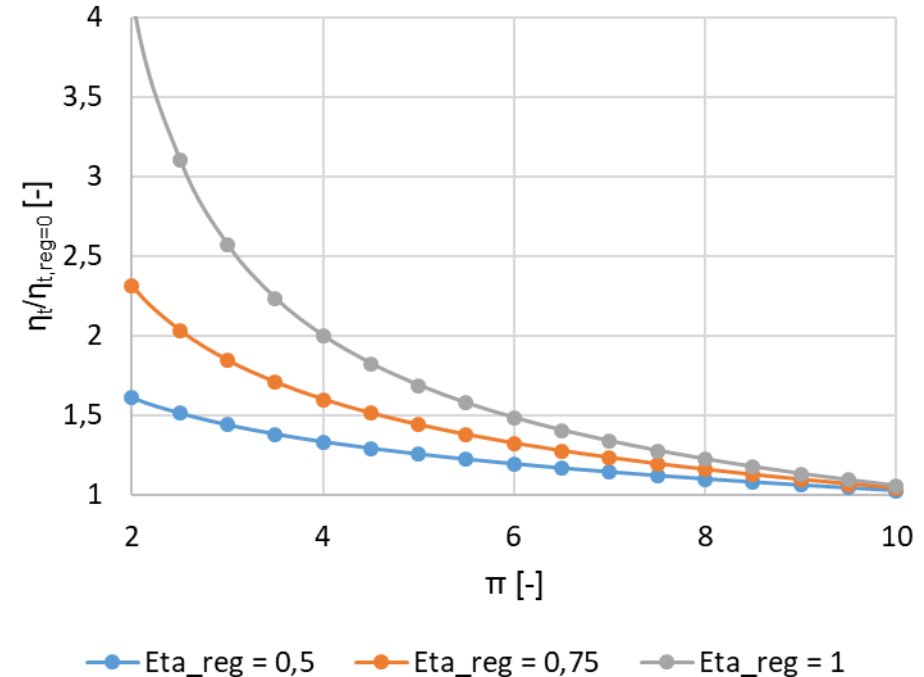
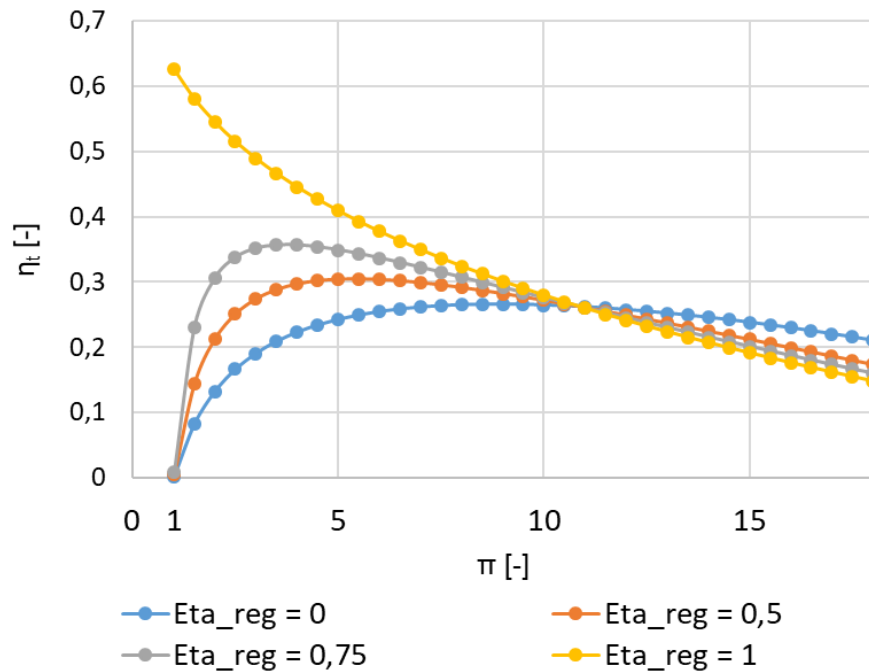
$$\eta_r = 1 - \frac{T_{4'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

$$\eta_r = \frac{T_{2'} - T_2}{T_4 - T_2} = \frac{T_4 - T_2 - (T_4 - T_{2'})}{T_4 - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_{2'}}{T_4 - T_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_{4'} - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_2')} = 1 - \frac{(T_4 - T_1) - \eta_r(T_4 - T_2)}{(T_3 - T_2) - \eta_r(T_4 - T_2)}$$

$$\eta_t = \frac{\tau \cdot \eta_s^T \cdot (1 - \pi^{-m}) - (\pi^m - 1) \cdot \frac{1}{\eta_s^K}}{\tau - (1 - \eta_r) \cdot [1 + (\pi^m - 1)] - \eta_r \cdot \tau \cdot [1 - (1 - \pi^{-m}) \cdot \eta_s^T]}$$

Otevřený cyklus TKM s regenerací



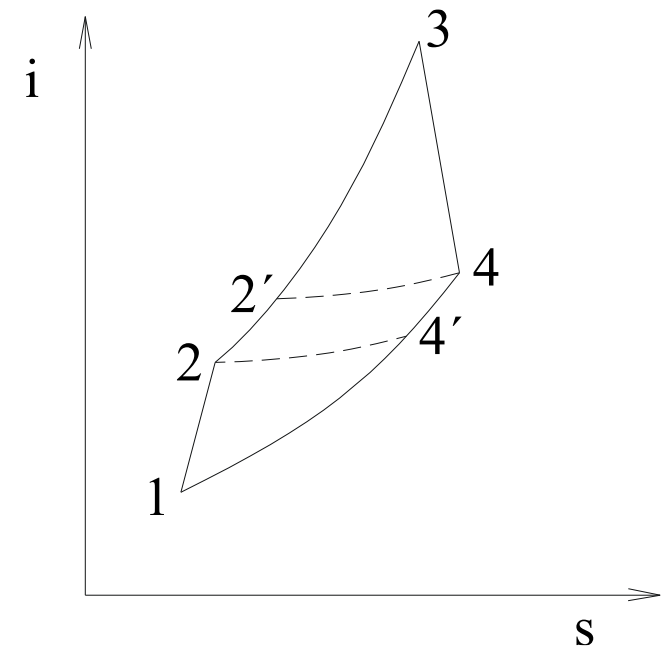
- Vyšší účinnost regenerace → vyšší tepelná účinnost
- Regenerace se stává neúčinnou při vyšších stlačeních (zvláště v případě nízké účinnosti regenerace)

Řešený příklad – Cvičení č. 2

Výpočet úspory tepla použitím cyklu TKM s regenerací:

Na základě vstupních parametrů z *Příkladu č. 1* proveďte jednoduchý výpočet tepelné účinnosti cyklu TKM s regenerací. Funkci regenerace bude plnit protiproudý tepelný výměník s účinností $\eta_r = 80\%$.

Vstupní teplota	t_1	20°C
Teplota před turbínou	t_3	1200°C
Izotropická účinnost kompresoru	η_s^K	0,86
Izotropická účinnost turbíny	η_s^T	0,88
Účinnost regenerace	η_r	0,8
Stupeň stlačení kompresoru	π	$\frac{p_2}{p_1}$
Teplotní poměr	τ	$\frac{T_3}{T_1}$



Řešený příklad

Postup výpočtu:

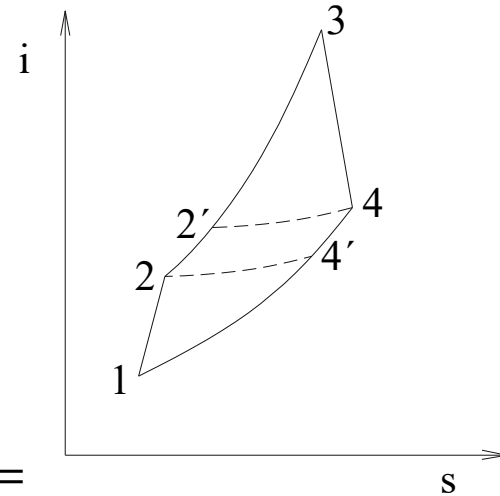
- Protiproudý výměník: $\rightarrow T_4 - T_{2'} = T_{4'} - T_2$

$$\eta_r = 1 - \frac{T_4 - T_{2'}}{T_4 - T_2} = 1 - \frac{T_{4'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = 1 - \frac{c_p \cdot (T_{4'} - T_1)}{c_p \cdot (T_3 - T_{2'})} = 1 - \frac{(T_4 - T_1) - \eta_r(T_4 - T_2)}{(T_3 - T_2) - \eta_r(T_4 - T_2)} =$$

$$= \frac{(T_3 - T_2) - \cancel{\eta_r(T_4 - T_2)} - (T_4 - T_1) + \cancel{\eta_r(T_4 - T_2)}}{(T_3 - T_2) - \eta_r(T_4 - T_2)} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_3 - T_2)}{(T_3 - T_1) - (T_2 - T_1)}$$

$$= \frac{\overbrace{(T_3 - T_4)}^{a^T} - \overbrace{(T_2 - T_1)}^{a^K}}{\underbrace{(T_3 - T_1)}_{a^K} - \underbrace{(T_2 - T_1)}_{a^K}} + \eta_r \left[\overbrace{(T_3 - T_4)}^{a^T} - \underbrace{(T_3 - T_1)}_{a^K} + \underbrace{(T_2 - T_1)}_{a^K} \right]$$



Řešený příklad

$$\begin{aligned}
 \eta_t &= \frac{T_3(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - T_1(\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}}{\frac{T_1}{T_1}(T_3 - T_1)(1 - \eta_r) - \frac{T_1}{T_1}(T_{2s} - T_1)\frac{1}{\eta_S^K}(1 - \eta_r) + \frac{T_3}{T_3}\eta_r(T_3 - T_{4s})\eta_S^T} = \\
 &= \frac{T_3(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - T_1(\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}}{T_1(\tau - 1)(1 - \eta_r) - T_1(\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}(1 - \eta_r) + \eta_r T_3(1 - \pi^{-m})\eta_S^T} = \\
 &= \frac{\cancel{T_1} \left[\frac{T_3}{T_1}(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K} \right]}{\cancel{T_1} \left[(\tau - 1)(1 - \eta_r) - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}(1 - \eta_r) + \eta_r \frac{T_3}{T_1}(1 - \pi^{-m})\eta_S^T \right]} = \\
 &= \frac{\tau(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}}{\tau(1 - \eta_r) - (1 - \eta_r) - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}(1 - \eta_r) + \tau\eta_r(1 - \pi^{-m})\eta_S^T}
 \end{aligned}$$

Řešený příklad

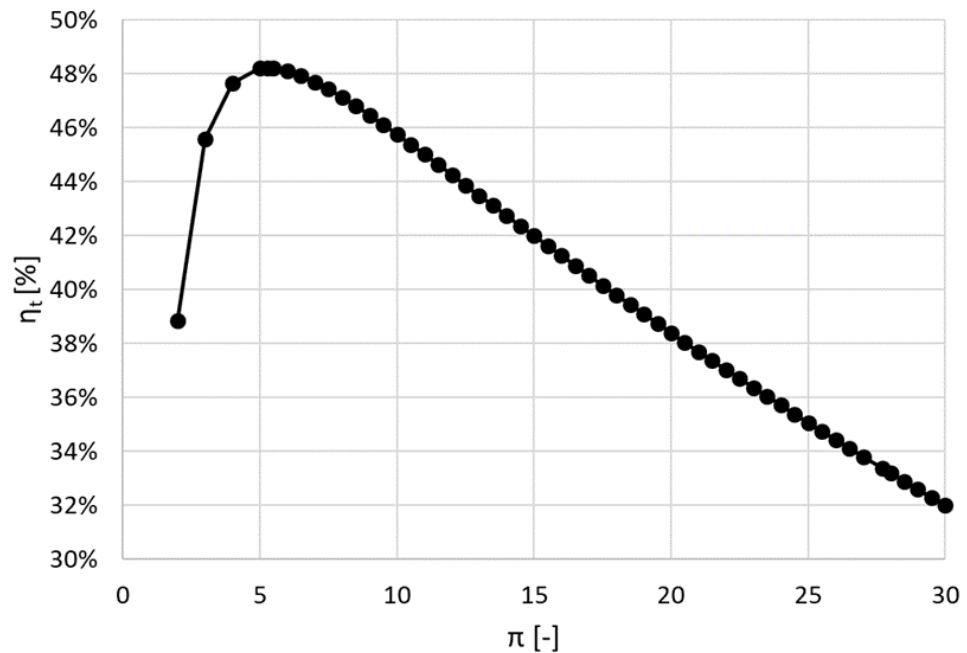
$$\begin{aligned}
 \eta_t &= \frac{\tau(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}}{\tau(1 - \eta_r) - (1 - \eta_r) - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}(1 - \eta_r) + \tau\eta_r(1 - \pi^{-m})\eta_S^T} = \\
 &= \frac{\tau(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}}{\tau - \tau\eta_r - (1 - \eta_r)\left[1 + (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}\right] + \tau\eta_r(1 - \pi^{-m})\eta_S^T}
 \end{aligned}$$

$$\eta_t = \frac{\tau(1 - \pi^{-m})\eta_S^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}}{\tau - (1 - \eta_r)\left[1 + (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_S^K}\right] - \tau\eta_r[1 - (1 - \pi^{-m})\eta_S^T]}$$

- Stlačení pro maximální tepelnou účinnost $\rightarrow \pi_{\eta_t, \max} = \dots$

Řešený příklad

π	η_t	π	η_t	π	η_t	π	η_t	π	η_t	π	η_t
2	0,388456	7,5	0,474331	12	0,442551	16,5	0,408858	21	0,377052	25,5	0,347463
3	0,455987	8	0,471314	12,5	0,438764	17	0,405215	21,5	0,373657	26	0,344305
4	0,476554	8,5	0,468073	13	0,434977	17,5	0,401598	22	0,370290	26,5	0,341171
5	0,482040	9	0,464666	13,5	0,431196	18	0,398008	22,5	0,366950	27	0,338061
5,27	0,482234	9,5	0,461134	14	0,427426	18,5	0,394446	23	0,363636	27,7	0,333747
5,5	0,482111	10	0,457512	14,5	0,423671	19	0,390911	23,5	0,360350	28	0,331912
6	0,481114	10,5	0,453825	15	0,419935	19,5	0,387404	24	0,357089	28,5	0,328872
6,5	0,479356	11	0,450093	15,5	0,41622	20	0,383926	24,5	0,353855	29	0,325855
7	0,477046	11,5	0,446331	16	0,412527	20,5	0,380475	25	0,350646	30	0,319888



Řešený příklad

- **Stupeň stlačení pro maximální práci cyklu**

- Vztahy pro práci kompresoru a turbíny se nemění

$$\pi_{p,max} = (\tau \eta_S^T \eta_S^K)^{\frac{1}{2m}} = \mathbf{10,36}$$

- **Optimální stlačení:** $\pi_{opt} = \sqrt{\pi_{p,max} \pi_{\eta_{t,max}}} = \sqrt{10,36 \cdot 5,27} = \mathbf{7,39}$

- **Maximální práce cyklu:** $a_{max} = c_p T_1 \left[\tau (1 - \pi^{-m}) \eta_S^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K} \right] =$
 $= \mathbf{302\,905\,Jkg^{-1}}$

- **Hmotnostní průtok:** $P = \dot{m} \cdot a_{max} \rightarrow \dot{m} = \frac{P}{a_{max}} = \mathbf{330,14\,kgs^{-1}}$

- **Výpočet úspory tepla**

- Poměr tepla, které bylo dodáno během regenerace ($q_{22'}$) k celkovému přivedenému teplu (q_{23})

$$q_{22'} = c_p(T_{2'} - T_2) = c_p(T_4 - T_2)\eta_r$$

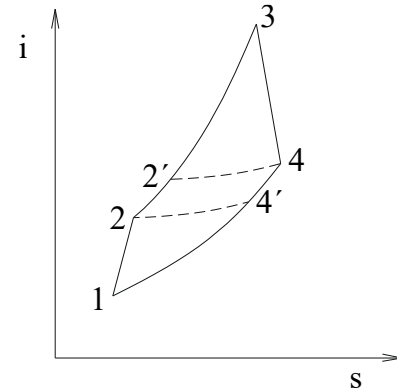
$$q_{22'} = c_p\eta_r[-(-T_4 + T_3) + (T_3 - T_2)] = c_p\eta_r[(T_3 - T_2) - (T_3 - T_{4s})\eta_s^T]$$

$$q_{22'} = c_p\eta_r[(T_3 - T_1) - (T_2 - T_1) - (T_3 - T_{4s})\eta_s^T]$$

$$q_{22'} = c_p\eta_r \left[(T_3 - T_1) - (T_{2s} - T_1) \frac{1}{\eta_s^K} - (T_3 - T_{4s})\eta_s^T \right]$$

$$q_{22'} = c_p\eta_r T_1 \left[(\tau - 1) - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K} - \tau(1 - \pi^{-m})\eta_s^T \right]$$

$$\frac{q_{22'}}{q_{23}} = \frac{\cancel{c_p T_1} \eta_r \left[(\tau - 1) - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K} - \tau(1 - \pi^{-m})\eta_s^T \right]}{\cancel{c_p T_1} \left[(\tau - 1) - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K} \right]}$$



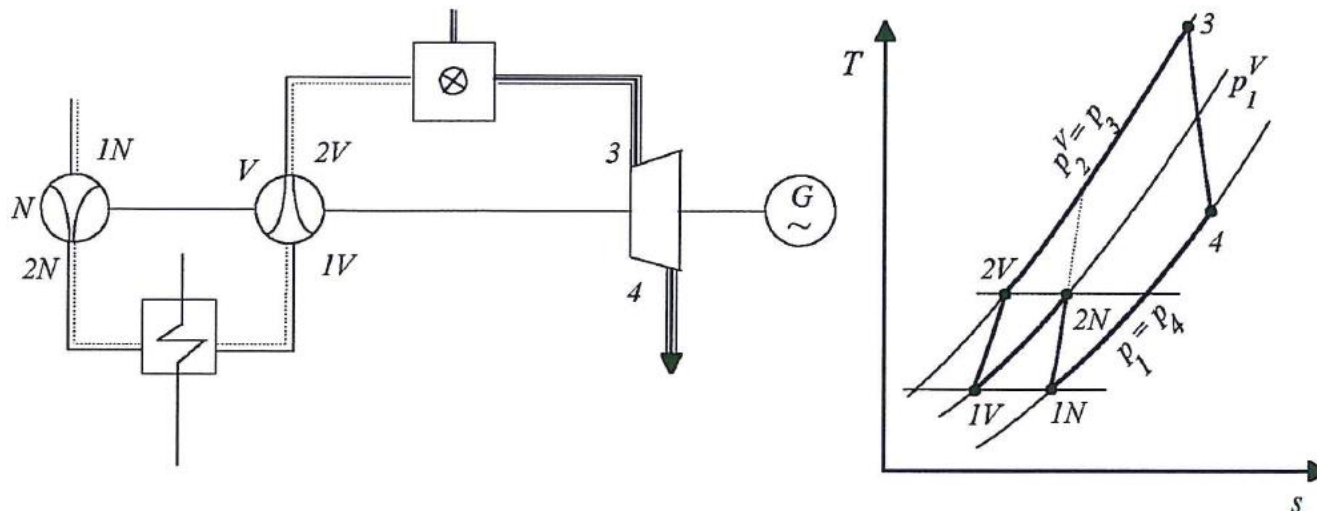
Řešený příklad

$$\frac{q_{22'}}{q_{23}} = \eta_r \left[1 - \frac{\tau(1 - \pi^{-m})\eta_s^T}{(\tau - 1) - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}} \right]$$

$$\frac{q_{22'}}{q_{23}} = \mathbf{30,78\%}$$

Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Kompresní práce je přímo úměrná absolutní teplotě vzduchu před kompresorem
- Velké stlačení kompresoru způsobuje relativně výrazné zvýšení teploty
- Ideální případ: **izotermický** proces stlačování v kompresoru
 - Rozdělení komprese a zařazení mezichladiče mezi NT a VT část kompresoru
 - Nízká tepelná účinnost

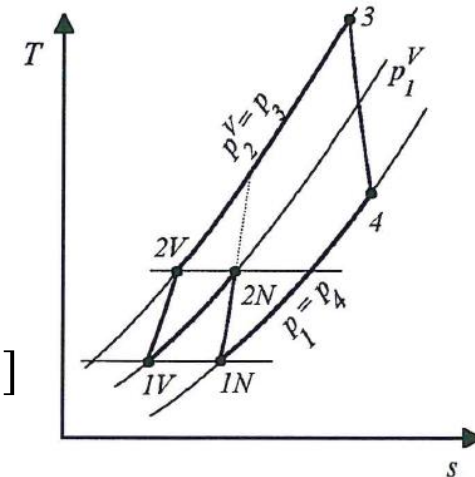


Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Dělicí tlak mezi NT a VT částí kompresoru

$$\pi = \frac{p_2^V}{p_1^N} = \left(\frac{p_2^V}{p_1^V} \right) \cdot \left(\frac{p_2^N}{p_1^N} \right) = \pi^V \cdot \pi^N$$

$$a^K = a^{K,V} + a^{K,N} = c_p T_1^V \frac{1}{\eta_s^{K,V}} \left[\left(\frac{\pi}{\pi^N} \right)^m - 1 \right] + c_p T_1^N \frac{1}{\eta_s^{K,N}} \left[(\pi^N)^m - 1 \right]$$



- Z celkové práce kompresoru se určí stlačení příslušného stupně pro maximální práci

$$\frac{\partial a^K}{\partial \pi^{K,N}} = \cancel{c_p} T_1^N \frac{\cancel{m}}{\eta_s^{K,N}} \cdot (\pi^{K,N})^{m-1} - \cancel{c_p} T_1^V \frac{\pi^m \cdot \cancel{m}}{\eta_s^{K,V}} \cdot (\pi^N)^{-m-1} = 0$$

$$\pi^N = \left[\left(\frac{T_1^V}{T_1^N} \right) \cdot \left(\frac{\eta_s^{K,N}}{\eta_s^{K,V}} \right) \right]^{\frac{1}{2m}} \cdot \sqrt{\pi}$$

$$T_1^V = T_1^N = T_1 ; \eta_s^{K,V} = \eta_s^{K,N} = \eta_s^K \rightarrow \pi^N = \sqrt{\pi} = \pi^V$$

Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Díličí stlačení se dosadí zpátky do vztahu pro kompresní práci

$$a^K = c_p T_1 \frac{1}{\eta_s^K} \cdot \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) + c_p T_1 \frac{1}{\eta_s^K} \cdot \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) = 2c_p T_1 \frac{1}{\eta_s^K} \cdot \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right)$$

- Práce cyklu s dělenou kompresí

$$\begin{aligned} a &= a^T - a^K = c_p T_3 \eta_s^T \cdot (1 - \pi^{-m}) - 2c_p T_1 \frac{1}{\eta_s^K} \cdot \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) = \\ &= c_p T_1 \cdot \left[\tau \cdot (1 - \pi^{-m}) \cdot \eta_s^T - 2 \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_s^K} \right] \end{aligned}$$

- Určení minimální hodnoty τ , při níž cyklus začne generovat užitečnou práci

$$(\tau_{min}^{2K} \rightarrow a = 0)$$

$$a = 0 = \tau(1 - \pi^{-m})\eta_s^T - 2\left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1\right)\frac{1}{\eta_s^K} \rightarrow \tau_{min}^{2K} = \frac{2\pi^m}{\left(\pi^{\frac{m}{2}} + 1\right)\eta_s^T \eta_s^K}$$

$$\tau_{min}^{2K} < \tau_{min}^{1K} = \frac{\pi^{2m}}{\eta_s^T \eta_s^K}$$

Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Optimální stlačení pro měrný výkon TKM s dělenou kompresí

$$\frac{\partial a}{\partial \pi} = 0 = c_p T_1 \left[\tau m \pi^{-m-1} \eta_S^T - m \pi^{\frac{m}{2}-1} \frac{1}{\eta_S^K} \right] \rightarrow \pi_{p,max}^{2K} = (\tau \eta_S^K \eta_S^T)^{\frac{2}{3m}}$$

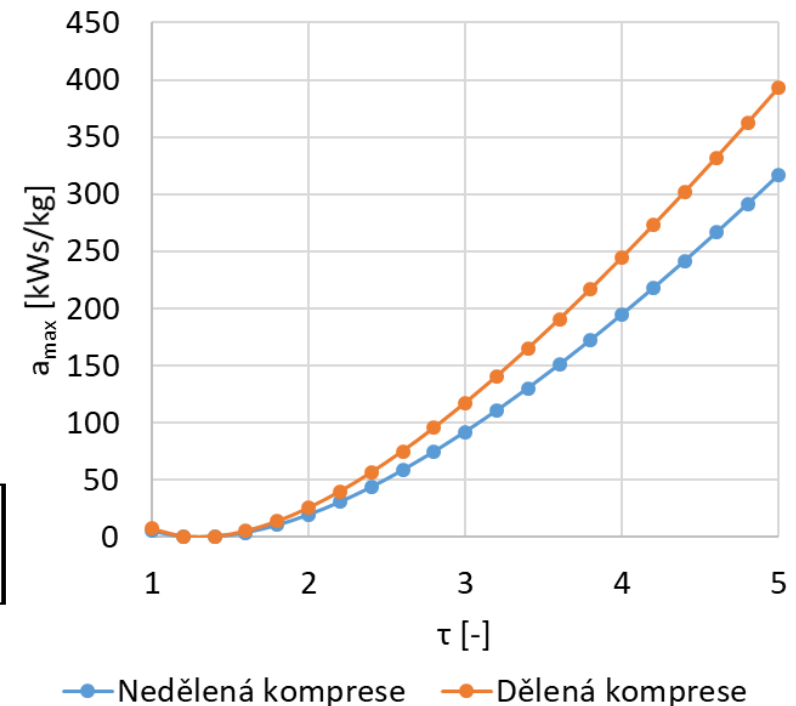
- Při stejném teplotním poměru získáme vyšší měrný výkon použitím dělené komprese

$$\pi_{p,max}^{1K} = (\tau \eta_S^K \eta_S^T)^{\frac{1}{2m}}$$

$$a_{max}^{1K} = c_p T_1 \left[\tau (1 - \pi^{-m}) \eta_S^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_S^K} \right]$$

$$\pi_{p,max}^{2K} = (\tau \eta_S^K \eta_S^T)^{\frac{2}{3m}}$$

$$a_{max}^{2K} = c_p T_1 \cdot \left[\tau \cdot (1 - \pi^{-m}) \cdot \eta_S^T - 2 \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_S^K} \right]$$



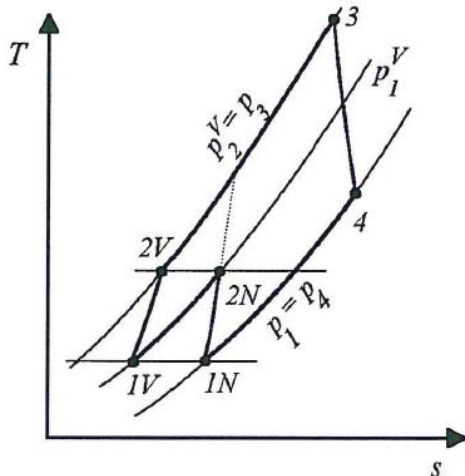
Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Tepelná účinnost cyklu TKM s dělenou kompresí (**bez regenerace**)

$$\eta_t = \frac{a}{q_{2V,3}}$$

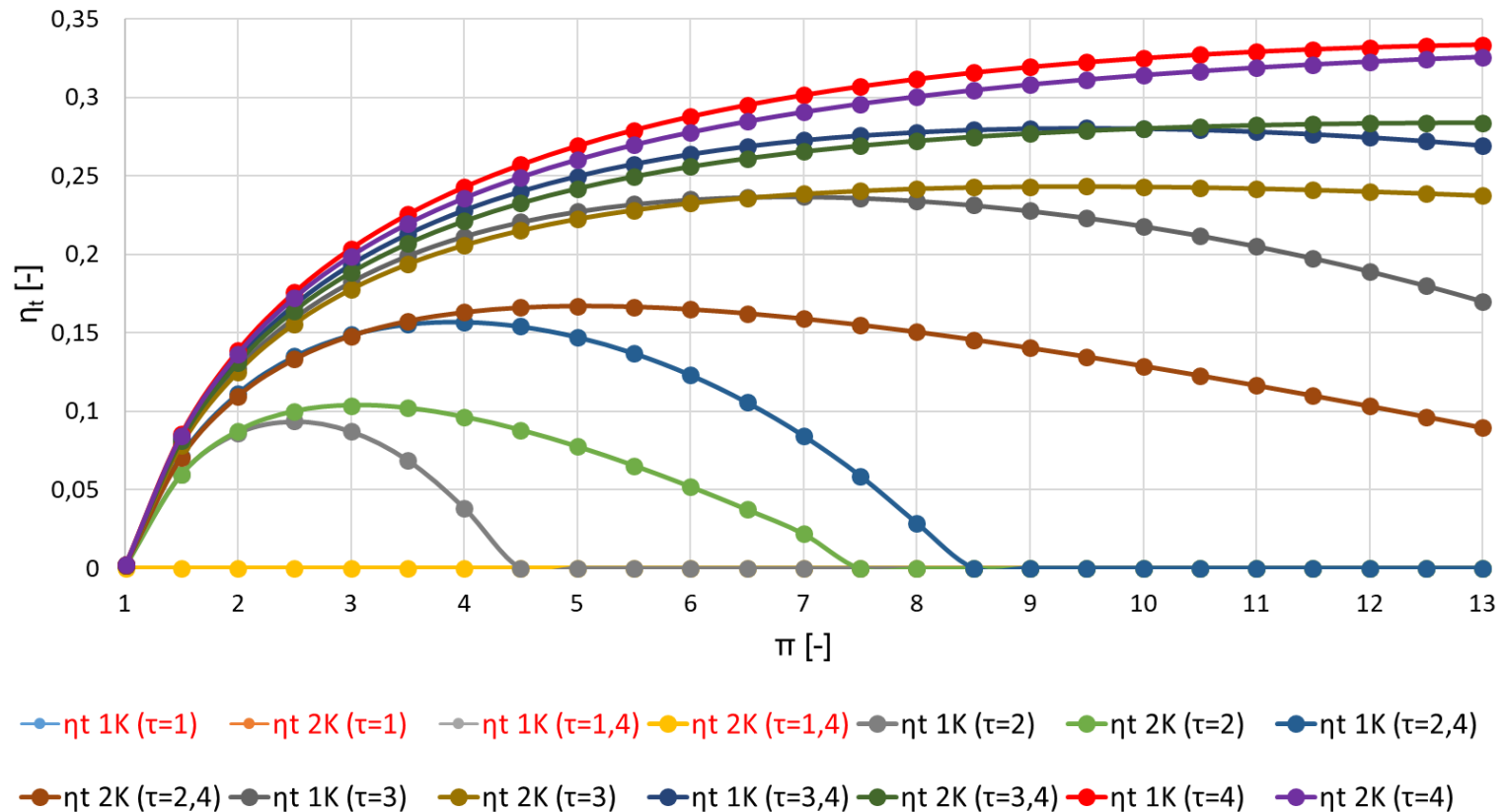
$$q_{2V,3} = c_p(T_3 - T_2^V) = c_p[(T_3 - T_1) - (T_2^V - T_1)] = c_p T_1 \left[\tau - 1 - \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_S^K} \right]$$

$$\eta_t = \frac{\tau \cdot (1 - \pi^{-m}) \cdot \eta_S^T - 2 \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\eta_S^K}}{\tau - 1 - \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1 \right) \frac{1}{\eta_S^K}}$$

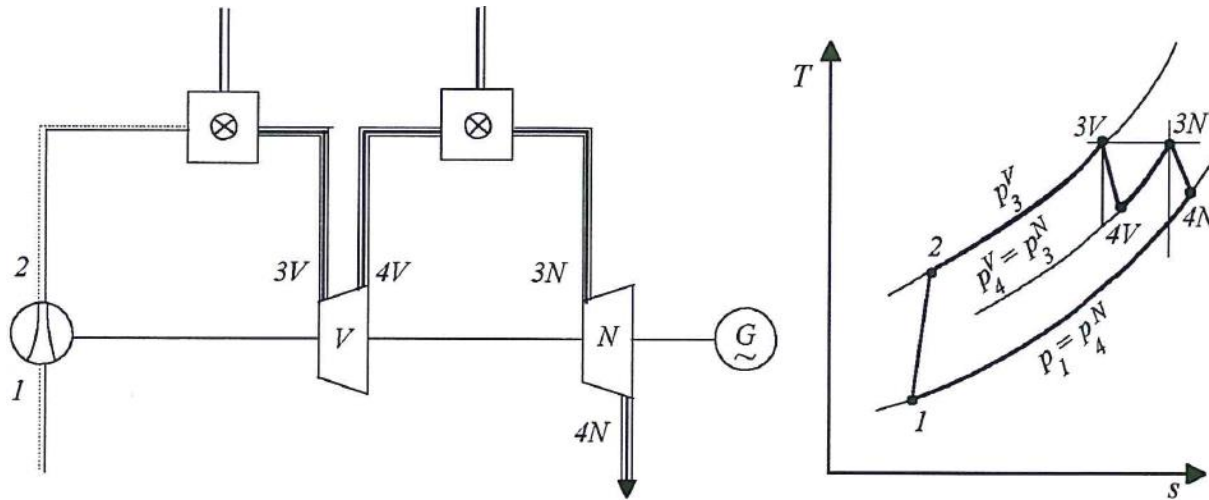


Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Dělená vs. nedělená komprese (limity použití)



Cyklus TKM s dělenou expanzí



$$\pi = \frac{p_3^V}{p_4^N} = \left(\frac{p_3^V}{p_4^V} \right) \cdot \left(\frac{p_3^N}{p_4^N} \right) = \pi^{T,V} \cdot \pi^{T,N}$$

$$a^T = c_p T_3^V \cdot [1 - (\pi^{T,V})^{-m}] \cdot \eta_s^{T,V} + c_p T_3^N \cdot \left[1 - \left(\frac{\pi^{T,V}}{\pi^T} \right)^m \right] \cdot \eta_s^{T,N}$$

$$\frac{\partial a^T}{\partial \pi^{T,V}} = c_p T_3^V m \cdot (\pi^{T,V})^{-m-1} \cdot \eta_s^{T,V} - c_p T_3^N \frac{m}{\pi^m} \cdot (\pi^{T,V})^{m-1} \cdot \eta_s^{T,N} = 0$$

Cyklus TKM s dělenou expanzí


$$\pi^{T,V} = \left[\left(\frac{T_3^V}{T_3^N} \right) \cdot \left(\frac{\eta_s^{T,V}}{\eta_s^{T,N}} \right) \right]^{\frac{1}{2m}} \cdot \sqrt{\pi}$$

$$T_3^V = T_3^N = T_3 ; \eta_s^{T,V} = \eta_s^{T,N} = \eta_s^T \rightarrow \pi^{T,V} = \sqrt{\pi} = \pi^{T,N}$$

$$a = c_p T_1 \left[2\tau \cdot \left(1 - \pi^{-\frac{m}{2}} \right) \eta_s^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K} \right]$$

- Určení minimální hodnoty τ , při níž cyklus začne generovat užitečnou práci
($\tau_{min}^{2T} \rightarrow a = 0$)

$$a = 0 = 2\tau \cdot \left(1 - \pi^{-\frac{m}{2}} \right) \eta_s^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K} \rightarrow \tau_{min}^{2T} = \frac{\pi^{\frac{m}{2}} \left(\pi^{\frac{m}{2}} + 1 \right)}{2\eta_s^T \eta_s^K}$$

$$\tau_{min}^{2T} < \tau_{min}^{1T} = \frac{\pi^{2m}}{\eta_s^T \eta_s^K}$$


Cyklus TKM s dělenou expanzí

- Optimální stlačení pro měrný výkon TKM s dělenou expanzí

$$\frac{\partial a}{\partial \pi} = 0 = c_p T_1 \left(\tau m \pi^{-\frac{m}{2}-1} \cdot \eta_s^T - m \pi^{m-1} \cdot \frac{1}{\eta_s^K} \right) \rightarrow \pi_{P,max} = (\tau \eta_s^T \eta_s^K)^{\frac{2}{3m}}$$



(stejně jako dělená komprese)

- Tepelná účinnost cyklu TKM s dělenou expanzí (**bez regenerace**)

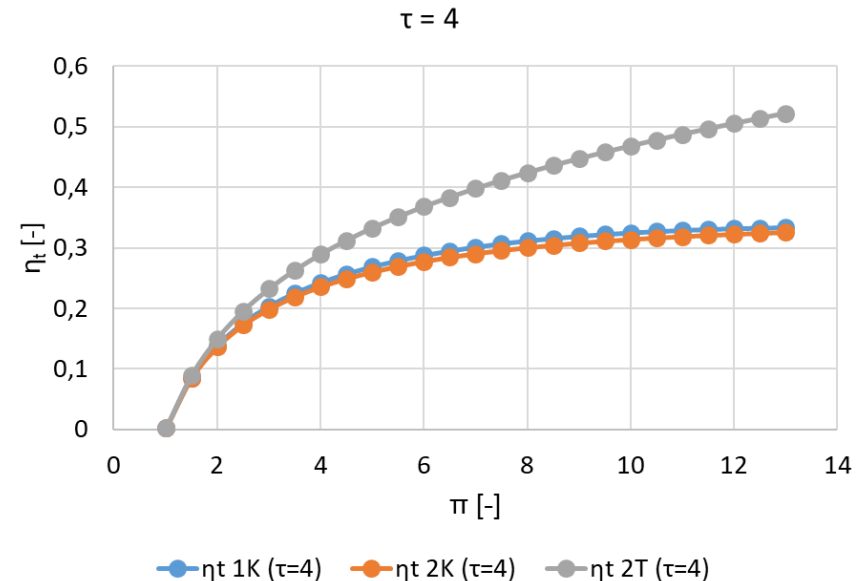
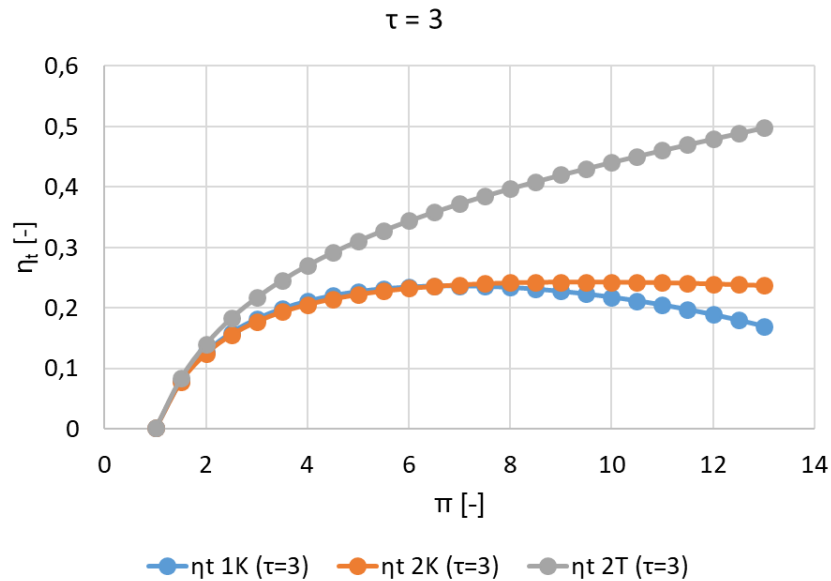
$$\eta_t = \frac{a}{q_{2,3V}}$$

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

$$\eta_t = \frac{2\tau \cdot \left(1 - \pi^{-\frac{m}{2}}\right) \eta_s^T - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K}}{\tau - 1 - (\pi^m - 1) \frac{1}{\eta_s^K}}$$

Cyklus TKM s dělenou expanzí

- Jednoduchý cyklus TKM vs. dělená komprese/expanze

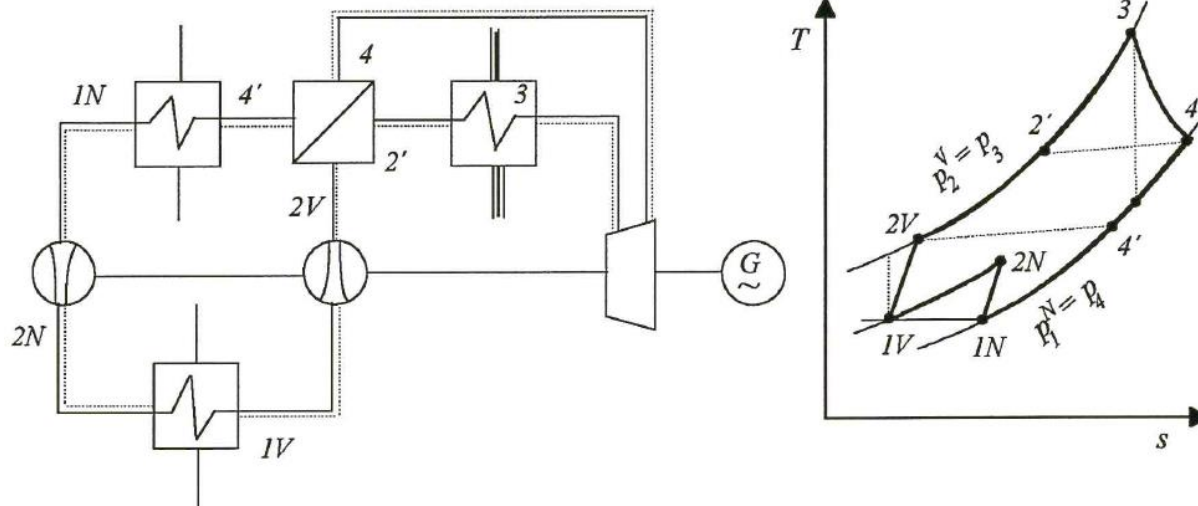


$$\eta_t < \eta_t^{2T} > \eta_t^{2K}$$

- Dělená expanze je z pohledu tepelné účinnosti výhodnější než dělená komprese

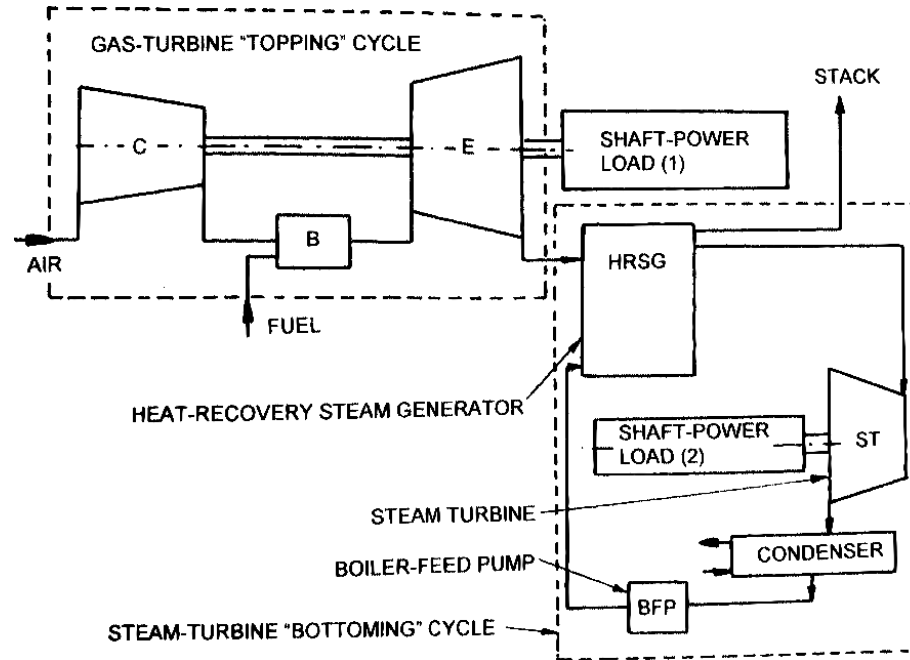
Uzavřený cyklus TKM

- Uzavřený cyklus TKM s regenerací a dělenou kompresí
 - Část tepla se využije k předehřátí před ohřívákem a zbylá část se odvede ve vstupním chladiči.



- Uzavřený cyklus lze použít k přímému chlazení jaderného reaktoru plynem, jakým je např. He, N₂, CO₂

- Kombinovaný paroplynový cyklus





**FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI**

**KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ**

Děkuji za pozornost