FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

KATEDRA ENERGETICKÝCH
STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

PLYNOVÉ TURBÍNY A TURBOKOMPRESORY

Ing. Marek Klimko, Ph.D.

Datum: 14. 10. 2021

KKE / PTT

Obsah

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

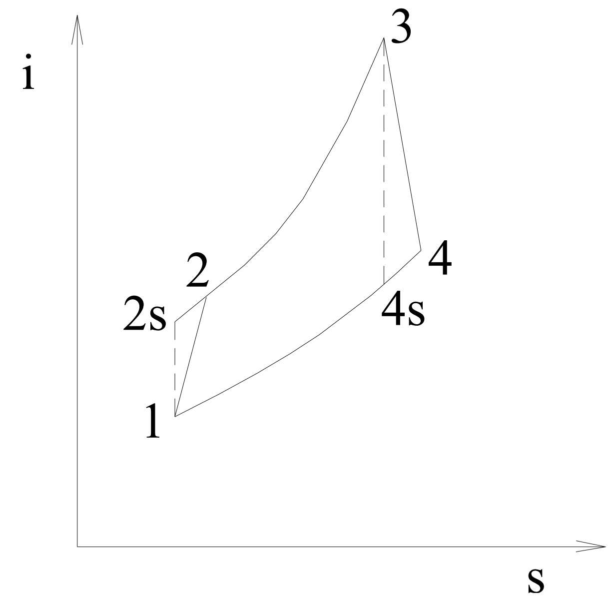
KKE / PTT

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
Izentropická účinnost kompresoru	η_s^K	0,86
Izentropická účinnost turbíny	η_s^T	0,88
Stupeň stlačení kompresoru	π	$\frac{p_2}{p_1}$
Teplotní poměr	τ	$\frac{T_3}{T_1}$

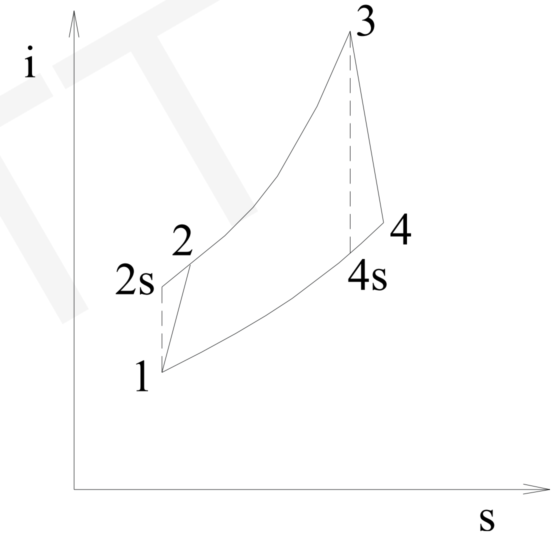


KKE/PT

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 $\rightarrow \dfrac{\partial a}{\partial \pi} = 0$
- Přivedené teplo $\rightarrow q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$
- Účinnost cyklu $\rightarrow \eta_t = \dfrac{a}{q_{23}}$
- Stupeň stlačení pro maximální tepelnou účinnost $\rightarrow \dfrac{\partial \eta_t}{\partial \pi} = 0$
- 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 $\rightarrow \dot{m} = \dfrac{P}{a_{max}}$



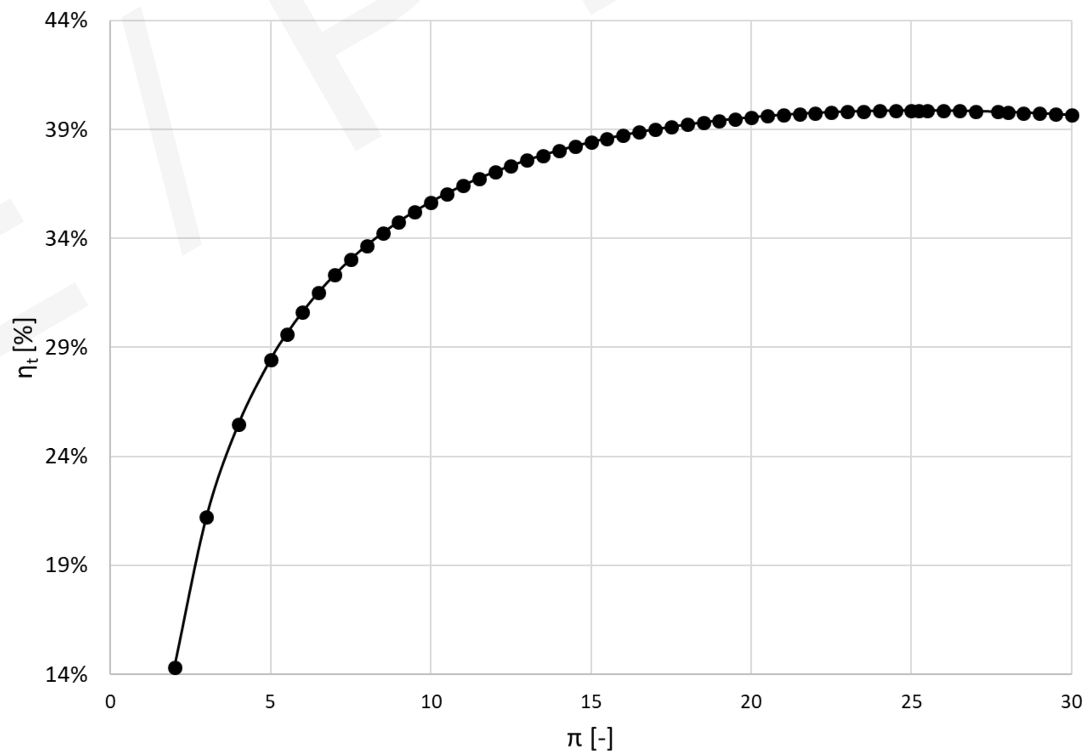
Řešený příklad – Cvičení č. 1

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

KKE / PTT

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



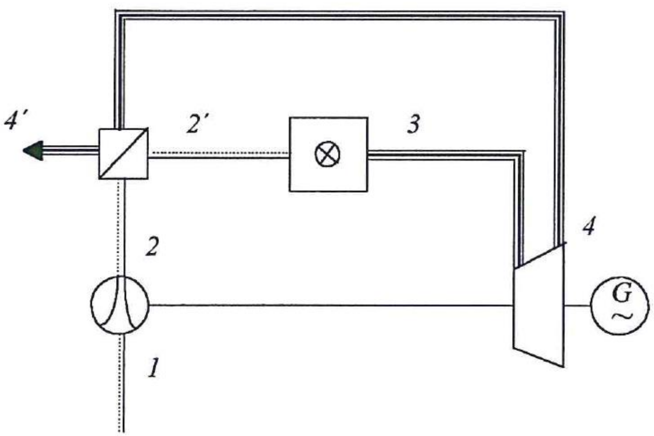
KKE / PTT

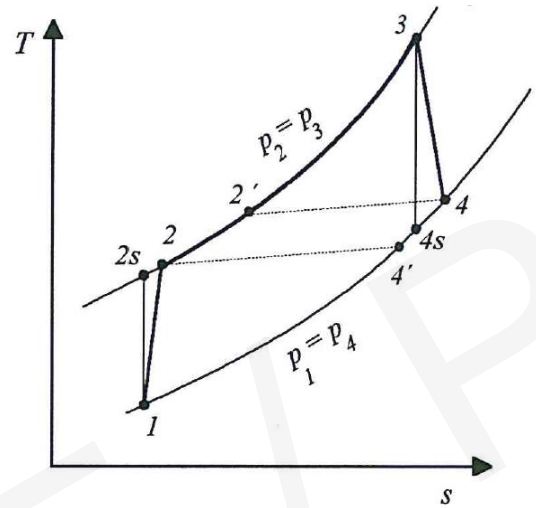
Řešený příklad – Cvičení č. 1

- **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:** $P = \dot{m} \cdot a_{max} \quad \rightarrow \quad \dot{m} = \frac{P}{a_{max}} = \mathbf{335,21 kgs^{-1}}$

KKE/PTT

Otevřený cyklus TKM s regenerací





<u>Protiproudý výměník</u>:

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

$$\Downarrow$$

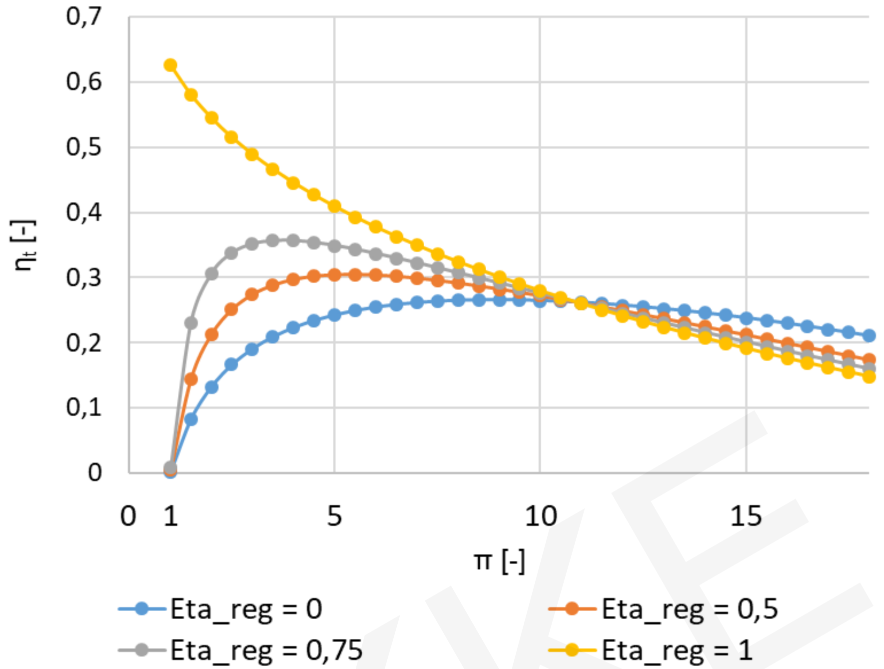
$$\eta_r = 1 - \frac{T_{4'} - T_2}{T_4 - T_2}$$

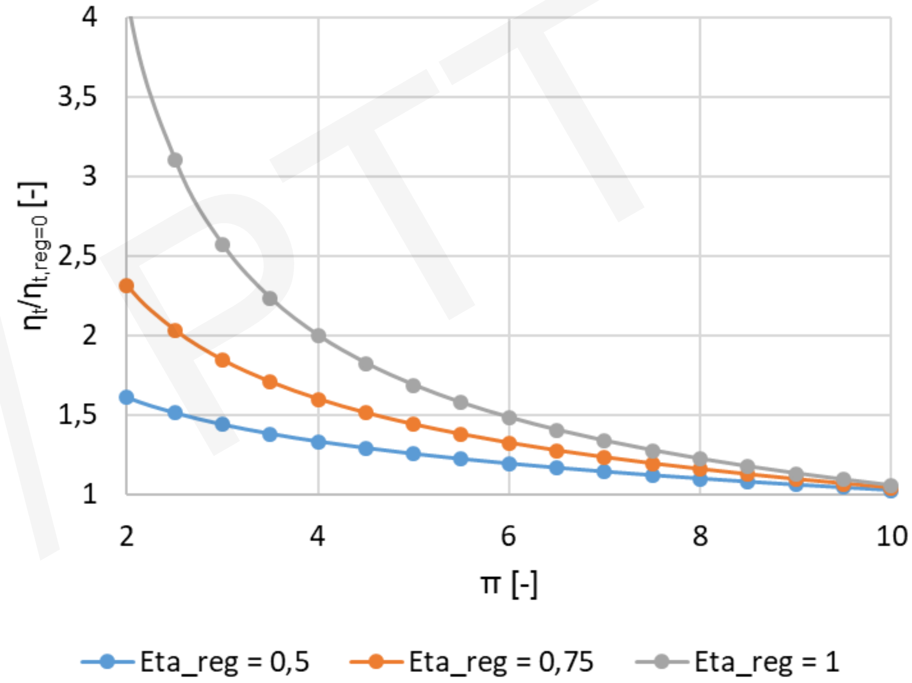
$$\eta_r = \frac{T_{2'} - T_2}{T_4 - T_2} = \frac{\boldsymbol{T_4} - T_2 - (\boldsymbol{T_4} - T_{2'})}{T_4 - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_{2'}}{T_4 - T_2}$$

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

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

Otevřený cyklus TKM s regenerací





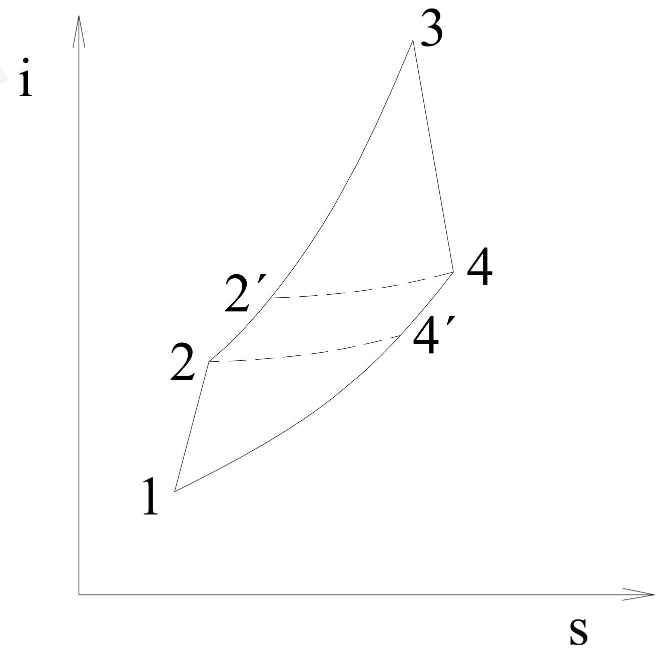
- Vyšší účinnost regenerace → vyšší tepelná účinnost
- Regenerace se stává neúčinnou při vyšších stlačeních (zvláště v případě nízké účinnosti regenerace)

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 $\eta_r = 80\%$.

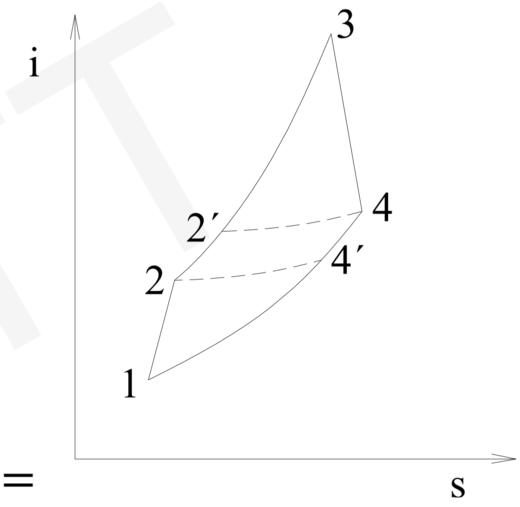
Vstupní teplota	t_1	20°C
Teplota před turbínou	t_3	1200°C
Izentropická účinnost kompresoru	η_s^K	0,86
Izentropická účinnost turbíny	η_s^T	0,88
Účinnost regenerace	$\boldsymbol{\eta_r}$	**0,8**
Stupeň stlačení kompresoru	π	$\frac{p_2}{p_1}$
Teplotní poměr	τ	$\frac{T_3}{T_1}$



Řešený příklad

Postup výpočtu:

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



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

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

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

$$(\boldsymbol{T_3} - T_4) - \boxed{(\boldsymbol{T_3} - T_2)}$$

$$(T_3 - \boldsymbol{T_1}) - (T_2 - \boldsymbol{T_1})$$

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

Řešený příklad

$$\eta_t = \frac{T_3(1-\pi^{-m})\eta_s^T - T_1(\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}}{\frac{T_1}{T_1}(T_3 - T_1)(\mathbf{1} - \boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{r}}) - \frac{T_1}{T_1}(T_{2s} - T_1)\dfrac{1}{\eta_s^K}(\mathbf{1} - \boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{r}}) + \frac{T_3}{T_3}\boldsymbol{\eta}_{\boldsymbol{r}}(T_3 - T_{4s})\eta_s^T} =$$

$$= \frac{T_3(1-\pi^{-m})\eta_s^T - T_1(\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}}{T_1(\tau - 1)(1 - \eta_r) - T_1(\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}(1 - \eta_r) + \eta_r T_3(1 - \pi^{-m})\eta_s^T} =$$

$$= \frac{\cancel{T_1}\left[\dfrac{\boldsymbol{T_3}}{\boldsymbol{T_1}}(1-\pi^{-m})\eta_s^T - (\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}\right]}{\cancel{T_1}\left[(\tau - 1)\underline{(1 - \eta_r)} - (\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}(1 - \eta_r) + \eta_r \dfrac{\boldsymbol{T_3}}{\boldsymbol{T_1}}(1 - \pi^{-m})\eta_s^T\right]} =$$

$$= \frac{\tau(1-\pi^{-m})\eta_s^T - (\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}}{\tau\underline{(1 - \eta_r)} - \underline{(1 - \eta_r)} - (\pi^m - 1)\dfrac{1}{\eta_s^K}\underline{(1 - \eta_r)} + \tau\eta_r(1 - \pi^{-m})\eta_s^T}$$

KKE/PTT

Řešený příklad

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

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

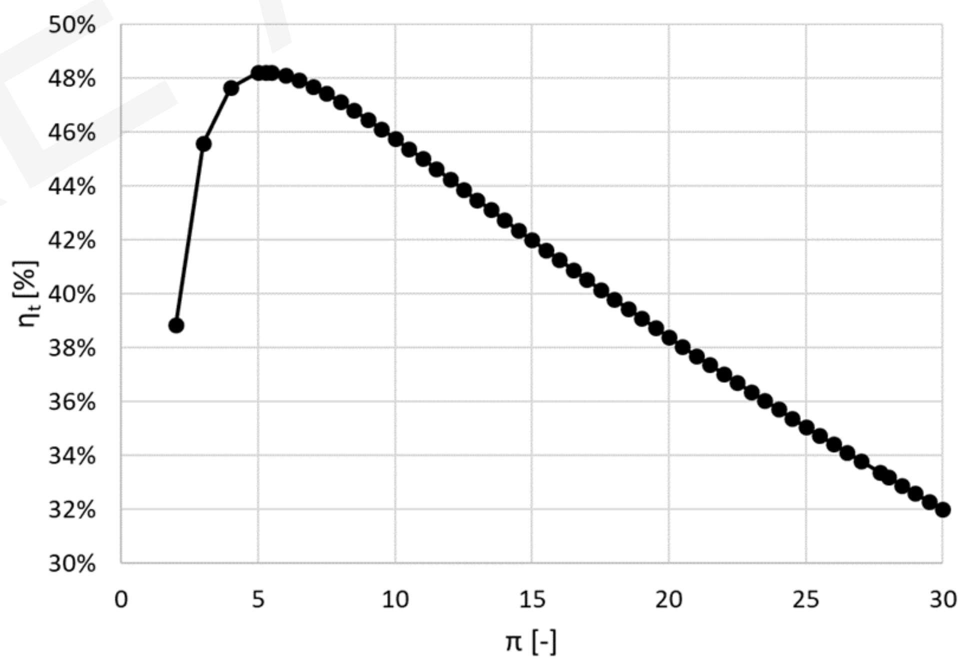
$$\boxed{\eta_t = \frac{\tau(1-\pi^{-m})\eta_s^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}}{\tau - (1-\eta_r)\left[1 + (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}\right] - \tau\eta_r[1 - (1-\pi^{-m})\eta_s^T]}}$$

- Stlačení pro maximální tepelnou účinnost $\rightarrow \pi_{\eta_{t,max}} = \ldots$

KKE/PTT

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



KKE/PTT

FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

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

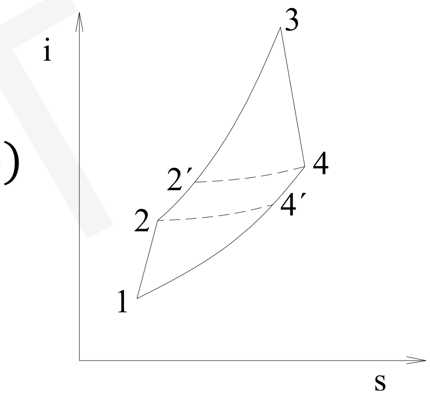
- **Maximální práce cyklu:** $a_{max} = c_p T_1 \left[\tau(1-\pi^{-m})\eta_s^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K} \right] =$
$$= \mathbf{302\ 905\ Jkg^{-1}}$$

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

KKE/PTT

Řešený příklad

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



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

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

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

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

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

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

KKE/PTT

Řešený příklad

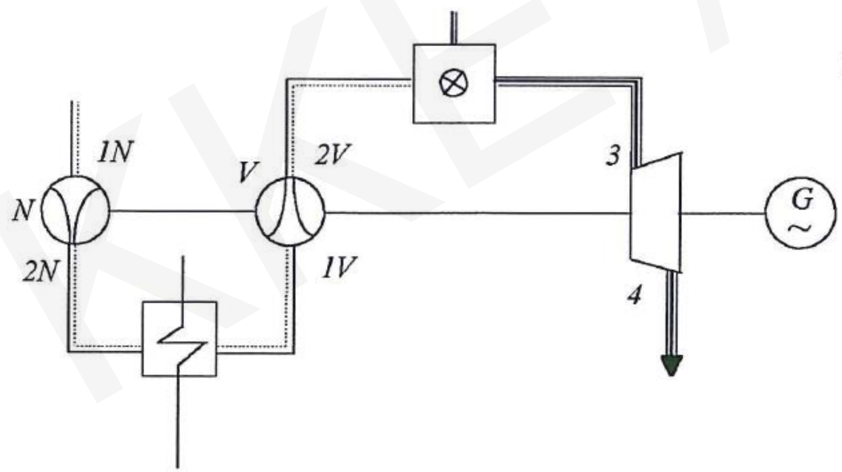
$$\boxed{\frac{q_{22'}}{q_{23}} = \eta_r \left[1 - \frac{\tau(1-\pi^{-m})\eta_s^T}{(\tau-1)-(\pi^m-1)\dfrac{1}{\eta_s^K}}\right]}$$

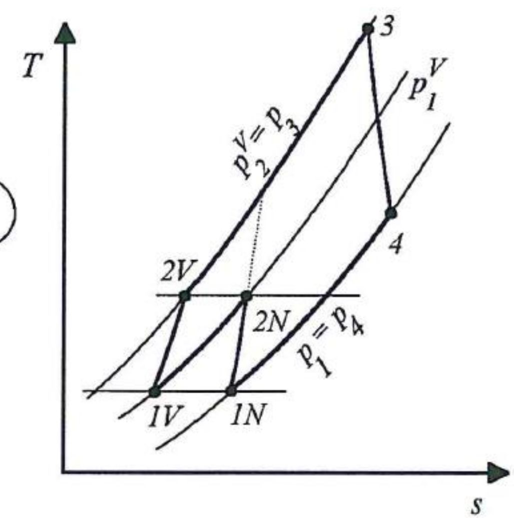
$$\frac{q_{22'}}{q_{23}} = \mathbf{30{,}78\ \%}$$

KKE/PT

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

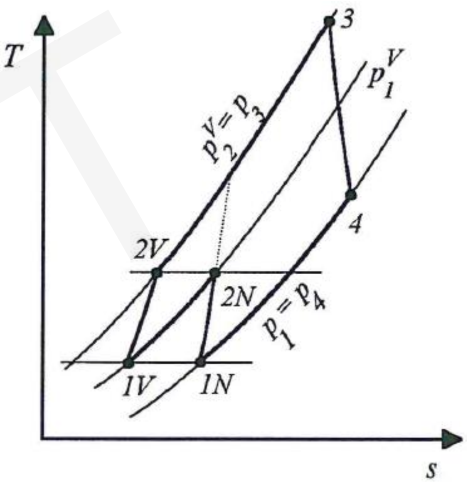




KKE/PTT

Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Dělící tlak mezi NT a VT částí kompresoru



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

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

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

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

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

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

KKE/PTT

Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Dílčí stlačení se dosadí zpátky do vztahu pro kompresní práci

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

- Práce cyklu s dělenou kompresí

$$a = a^T - a^K = c_p T_3 \eta_s^T \cdot (1 - \pi^{-m}) - 2 c_p T_1 \frac{1}{\eta_s^K} \cdot \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1\right) =$$

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

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

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

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

KKE/PTT

Cyklus TKM s dělenou kompresí

- Optimální stlačení pro měrný výkon TKM s dělenou kompresí

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

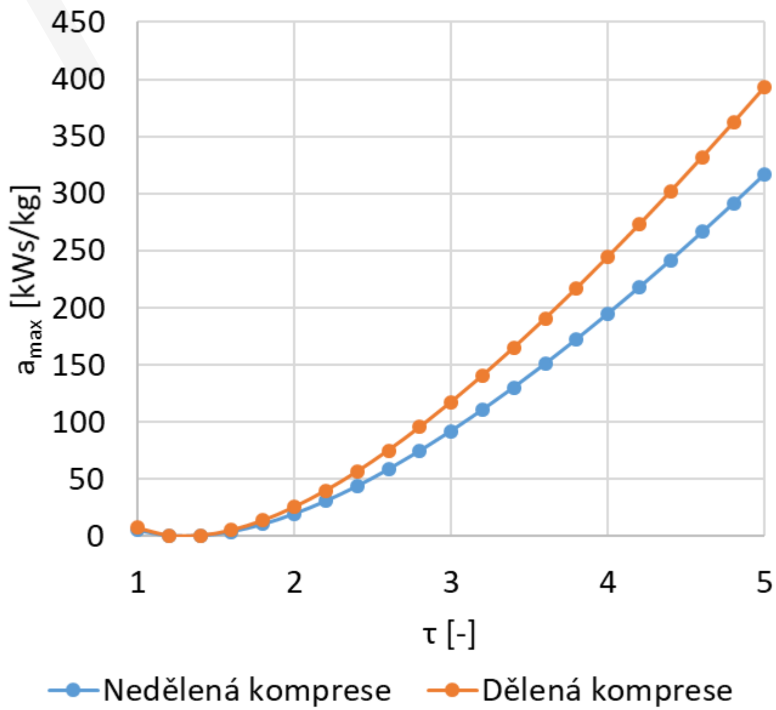
- Při stejném teplotním poměru získáme vyšší měrný výkon použitím dělené komprese

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

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

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

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



KKE / PTT

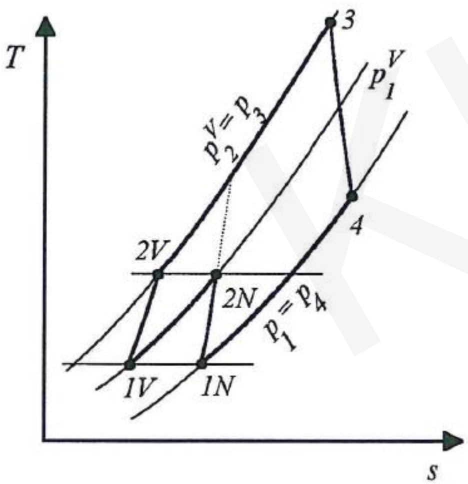
Cyklus TKM s dělenou kompresí

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

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

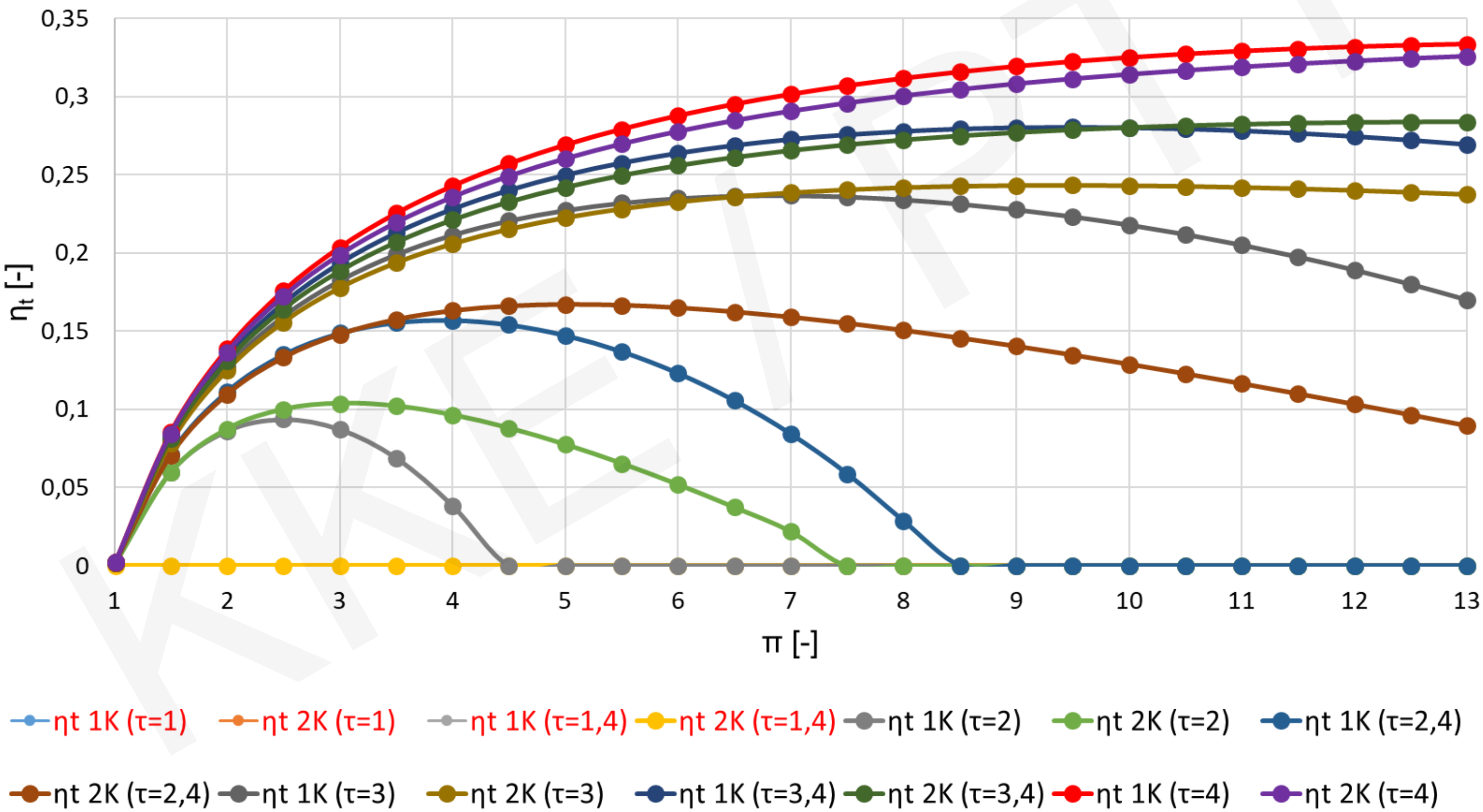
$$\color{green}{q_{2V,3}} = c_p\left(T_3 - T_2^V\right) = c_p\left[\left(T_3 - \boldsymbol{T_1}\right) - \left(T_2^V - \boldsymbol{T_1}\right)\right] = c_p T_1\left[\tau - 1 - \left(\pi^{\frac{m}{2}} - 1\right)\frac{1}{\eta_s^K}\right]$$

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

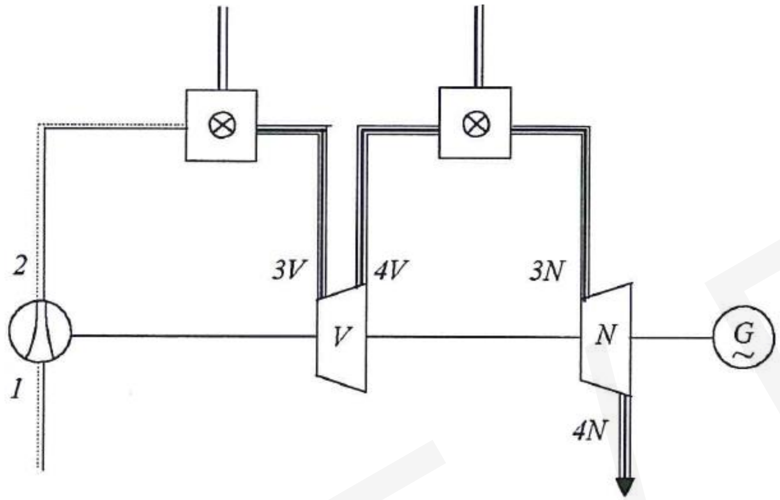


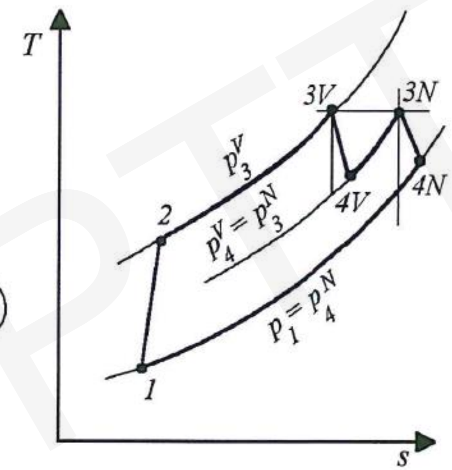
Cyklus TKM s dělenou kompresí

- **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

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

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

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

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

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

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

Cyklus TKM s dělenou expanzí

- Optimální stlačení pro měrný výkon TKM s dělenou expanzí

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

(stejně jako dělená komprese)

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

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

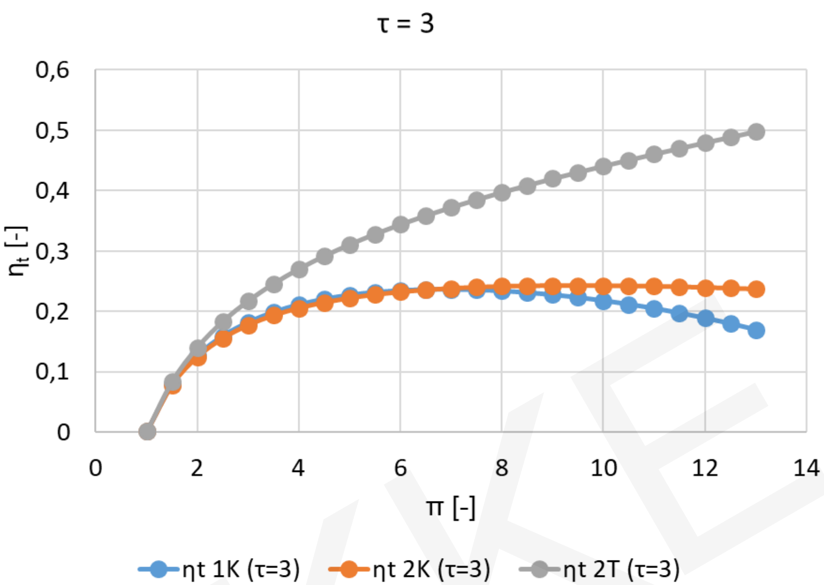
$$q_{2,3V} = c_p(T_3^V - T_2) = c_p[(T_3^V - \boldsymbol{T_1}) - (T_2 - \boldsymbol{T_1})] = c_p T_1 \left[\tau - 1 - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K} \right]$$

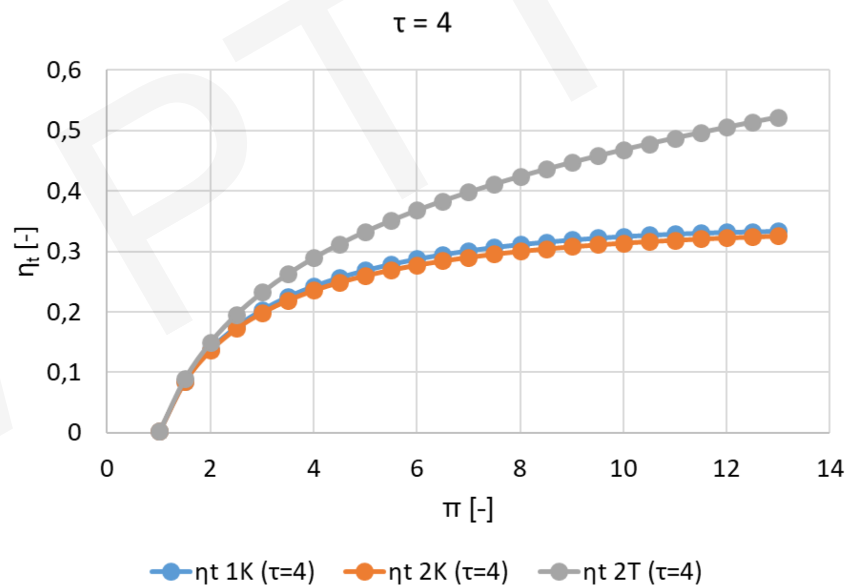
$$\boxed{\eta_t = \frac{2\tau \cdot \left(1 - \pi^{-\frac{m}{2}}\right)\eta_s^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}}{\tau - 1 - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}}}$$

KKE/PTT

Cyklus TKM s dělenou expanzí

- **Jednoduchý cyklus TKM vs. dělená komprese/expanze**





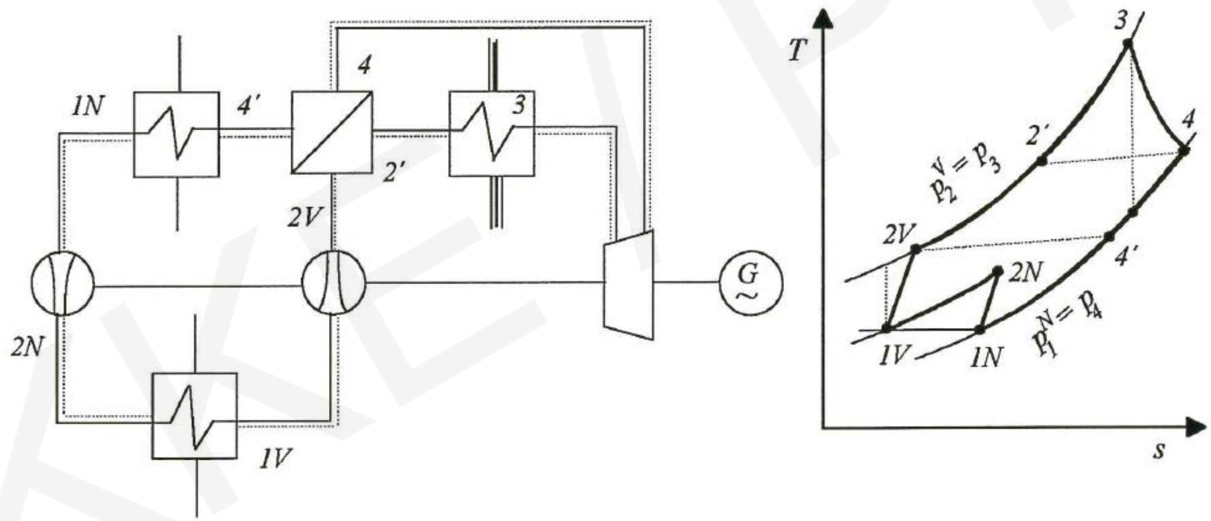
$$\boxed{\eta_t < \eta_t^{2T} > \eta_t^{2K}}$$

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

KKE / PTT

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.

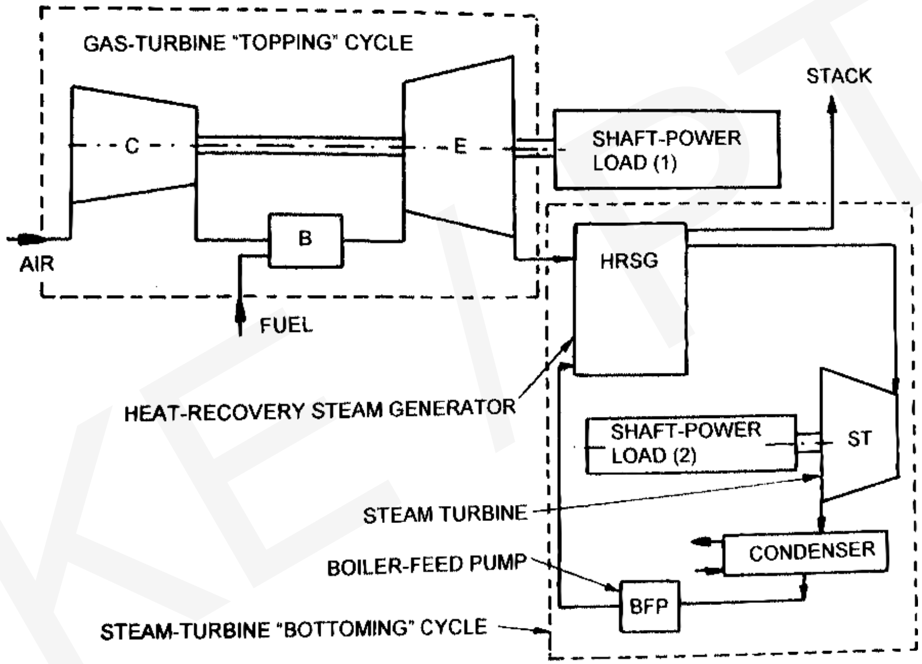


- Uzavřený cyklus lze použít k přímému chlazení jaderného reaktoru plynem, jakým je např. He, N_2, CO_2

KEI PTT

Kombinované cykly

- Kombinovaný paroplynový cyklus



KKE/PTT

Děkuji za pozornost

KKE / PTT