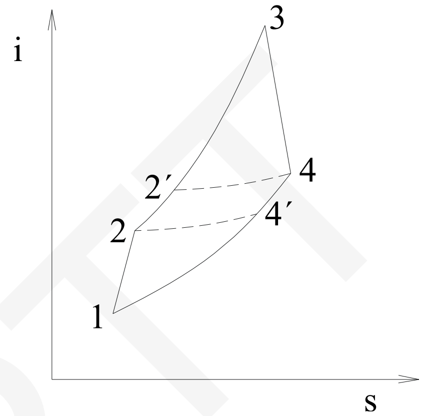
Příklad č. 2: Výpočet úspory tepla použitím cyklu TKM s regenerací

Na základě vstupních parametrů z předcházející úlohy (*Příklad č. 1*) proveďte jednoduchý výpočet tepelné účinnosti cyklu TKM s regenerací a vypočítejte, kolik procent tepla se použitím regenerace ušetří. 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	η_r	0,8
Stupeň stlačení kompresoru	π	$\frac{p_2}{p_1}$
Teplotní poměr	τ	$\frac{T_3}{T_1}$



Pro protiproudý tepelný výměník platí rovnost rozdílů teplot na vstupu a výstupu z výměníku $(T_4 - T_{2'} = T_{4'} - T_2)$.

$$\eta_r = \frac{T_{2'} - T_2}{T_4 - T_2} = \frac{T_4 - T_{4'}}{T_4 - T_2} \tag{2.1}$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{out}}{q_{in}} = \frac{c_p(T_{4'} - T_1)}{c_p(T_3 - T_{2'})} \rightarrow \tag{2.2}$$

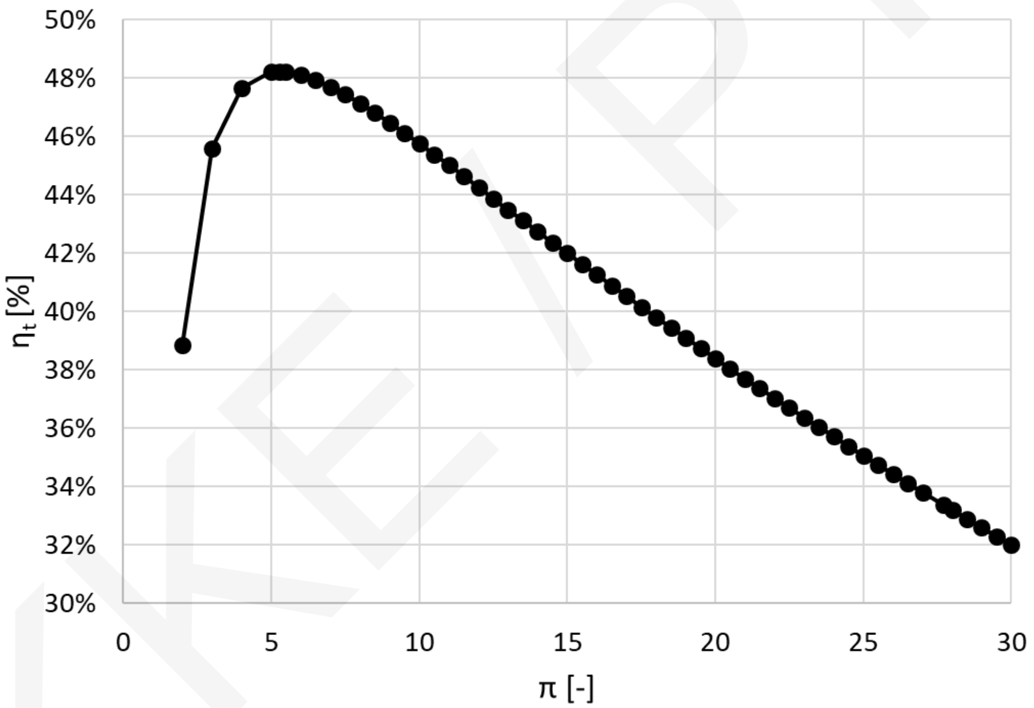
$$\rightarrow \eta_t = 1 - \frac{(T_{4'} - T_1) + (T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2) + (T_2 - T_{2'})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \eta_t = \frac{\tau(1 - \pi^{-m})\eta_s^T - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}}{\tau - (1 - \eta_r)\left[1 + (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}\right] - \eta_r\tau[1 - (1 - \pi^{-m})\eta_s^T]} \text{ [1]} \tag{2.3}$$

Obdobně jako v prvním příkladu, ani v tomto případě není možné přímo vypočítat konkrétní hodnotu maximální tepelnou účinnost. Opět lze použít metodu postupného dosazování vhodně zvolených hodnot stlačení do rovnice 2.3, než se dosáhne maxima tepelné účinnosti.

[1] *Odvození vztahu pro tepelnou účinnost cyklu TKM s regenerací je součástí přílohy.*

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



Obr. 1 Závislost tepelné účinnosti TKM s regenerací na stupni stlačení kompresoru

Výpočet optimálního stlačení, maximální práce cyklu a výkonu se provede stejným způsobem jako v prvním příkladu. Práce turbíny a kompresoru není regenerací tepla ovlivněna, proto bude maximální hodnota stupně stlačení pro měrnou práci stejná jako v prvním příkladu ($\pi_{p,max} = 10{,}36$).

$$\pi_{opt} = \sqrt{\pi_{p,max}\pi_{\eta_t,max}} = \sqrt{10.36 * 5{,}27} = 7{,}39$$

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

$$a_{max} = \frac{1{,}4 * 287}{1{,}4 - 1} * 293{,}15 \left[5{,}02524 * (1 - 7{,}39^{-0{,}2587})0{,}88 - (7{,}39^{0{,}2587} - 1)\frac{1}{0{,}86}\right]$$

$$a_{max} = 302\,905\,Jkg^{-1}$$

$$P = \dot{m} \cdot a_{max} \;\; \rightarrow \;\; \dot{m} = \frac{P}{a_{max}} = \frac{100 * 10^6}{302\,905} = 330{,}14\,kgs^{-1}$$

Úsporu tepla je možné určit jako poměr tepla, které bylo dodáno během regenerace ($q_{22'}$) k celkovému přivedenému teplu (q_{23}). Vztah pro přivedené teplo popisuje rovnice 1.7 (viz *Příklad č. 1*).

$$q_{22'} = c_p(T_{2'} - T_2) = c_p(T_4 - T_2)\eta_r \;\; \rightarrow \tag{2.4}$$

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

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

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

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

$$\frac{q_{22'}}{q_{23}} = \frac{c_p\eta_r T_1\left[(\tau - 1) - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K} - \tau(1 - \pi^{-m})\eta_s^T\right]}{c_P T_1\left[\tau - 1 - (\pi^m - 1)\frac{1}{\eta_s^K}\right]} \tag{2.5}$$

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

$$\frac{q_{22'}}{q_{23}} = 0{,}8\left[1 - \frac{5{,}02524 * (1 - 7{,}39^{-0{,}2857})0{,}88}{(5{,}02524 - 1) - (7{,}39^{0{,}2857} - 1)\frac{1}{0{,}86}}\right] = \mathbf{30{,}78\%}$$