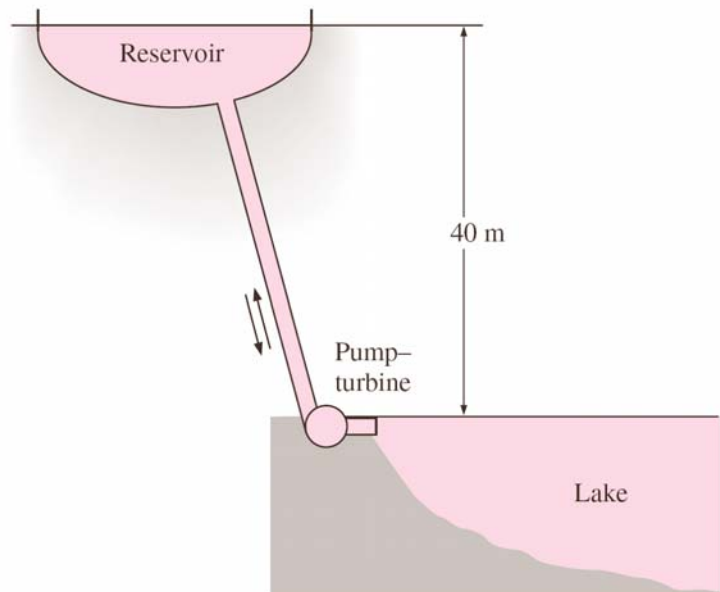


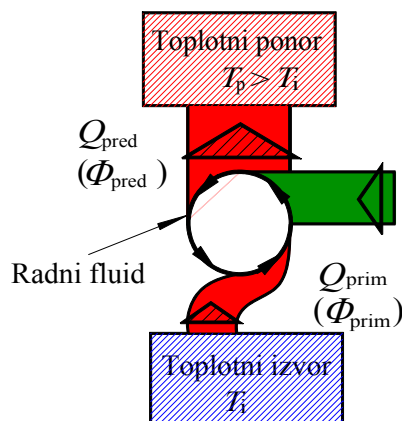
14. Levokretni kružni procesi

14.1 Uvod

- Pr. (mehanički)- Reverzibilna hidrocentrala Bajna Bašta – spontano, zbog razlike u potencijalnim energijama, javlja protok vode – analogija sa desnokratnim kružnim procesima
- U slučajevima kada ima „viška“ struje u sistemu radi kao pumpa (troši struju) i stvara akumulaciju vode – analogija sa levokratnim kružnim procesima



Opšta šema energetskih tokova levokretnih kružnih procesa



Dopunska energija potrebna za ostvarivanje levokretnog kruznog procesa

- Svrha postojanja levokretnih kružnih procesa je:
 - **Hlađenje** nesavršeno (toplotno) izolovanih prostora – hladnjače, frižideri, razne prostorije u letnjem periodu – i namensko hlađenje (postupci zamrzavanja proizvoda, pravljenje leda,...) različitih materija na temperature niže od temperature okolnog prostora
 - **Grejanje** – obično samo za zagrevanje prostora – nadoknađivanje toplotnih „gubitaka“

- Podela
 - Prema vrsti principu rada:
 - absorpcione – dopunska energija – toplota
 - ejektorske – dopunska energija – kinetička energija
 - kompresione – dopunska energija – mehanički rad
 - Prema vrsti radnog fluida kompresiona prostorija se deli:
 - gasna – idealan gas – vazduh
 - parna – realan gas – CO_2 , NH_3 , R11, R12, R22, ...

14.2 Kompresiona postrojenja levokretnih kružnih procesa

- Dopunska energija – mehanički rad (mehanička snaga)
- Ukoliko služe za **hlađenje**, mera (energetskog) kvaliteta levokretnog kružnog procesa opisuje se **stepenom (ili koeficijentom) hlađenja**

$$\boxed{\varepsilon_h = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{P_{\text{kp}}} = \frac{Q_{\text{prim}}}{W_{\text{kp}}}} \quad \left(= \frac{\text{željeno energetsko dejstvo TDS na okolinu}}{\text{neophodno energetsko dejstvo okoline na TDS}} \right)$$

$\varepsilon_h = \text{COP}_R$ - *Coefficient Of Performance of Refrigerator*

Φ_{prim} – rashladna snaga ili rashladni učinak postrojenja

P_{kp} – mehanička snaga potrebna za ostvarivanje kružnog procesa

- EER - *Energy Efficiency Ratio*
- SEER - *Seasonal Energy Efficiency Ratio*
- Ukoliko služe za **grejanje**, mera (energetskog) kvaliteta levokretnog kružnog procesa opisuje se **stepenom (ili koeficijentom) grejanja**

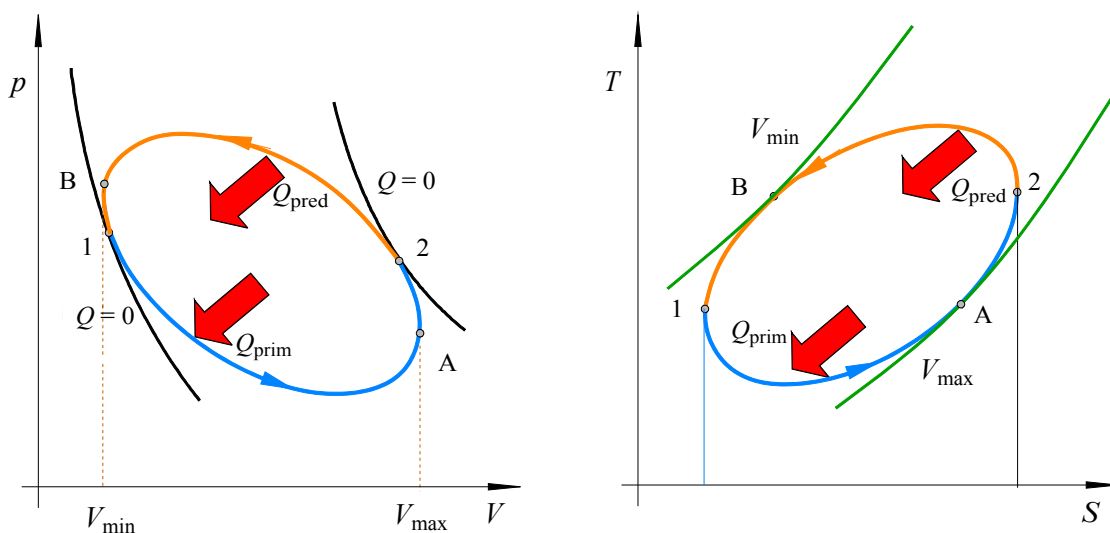
$$\boxed{\varepsilon_g = \frac{|\Phi_{\text{pred}}|}{P_{\text{kp}}} = \frac{|Q_{\text{pred}}|}{W_{\text{kp}}}} \quad \left(= \frac{\text{željeno energetsko dejstvo TDS na okolinu}}{\text{neophodno energetsko dejstvo okoline na TDS}} \right)$$

$\varepsilon_g = \text{COP}_{\text{HP}}$ - *Coefficient Of Performance of Heat Pump*

Φ_{prim} – grejna (toplotna) snaga ili grejni (toplotni) učinak postrojenja

P_{kp} – mehanička snaga potrebna za ostvarivanje kružnog procesa

Prikaz u $p-v$ i $T-s$ koordinatnom sistemu



- Matematički pozitivan smer
- Slike su slične za sve vrste gasova (idealne, poluidealne, realne)

Analiza levokretnih procesa Prvim principom termodinamike (zatvoren TDS)

- Posmatra se „prost“ zatvoren termodinamički sistem (npr. cilindar sa klipom i gasom u njemu)

$$\delta Q + \delta W_V = dU$$

integraljenjem po zatvorenoj konturi, od polaznog stanja(1) do krajnjeg stanja (1):

$$Q_{1-A-2-B-1} + W_{V,1-A-2-B-1} = \underbrace{U_1 - U_1 = 0}_{\text{važi i za sve ostale veličine stanja}}$$

$$Q_{1-A-2} + Q_{2-B-1} + W_{kp} = 0$$

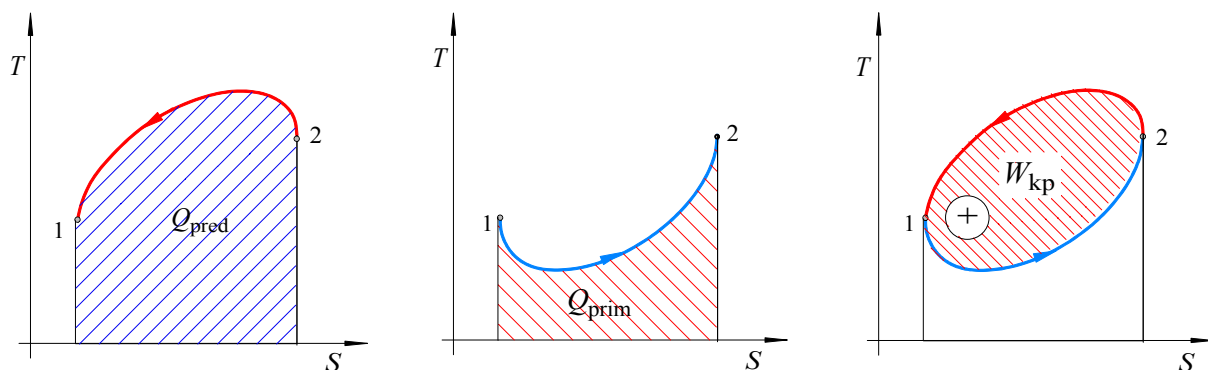
$$Q_{prim} - |Q_{pred}| + W_{kp} = 0$$

$$W_{kp} = |Q_{pred}| - Q_{prim}$$

Na osnovu ovoga sledi:

$$\boxed{\varepsilon_h = \frac{Q_{prim}}{W_{kp}} = \frac{Q_{prim}}{|Q_{pred}| - Q_{prim}}}$$

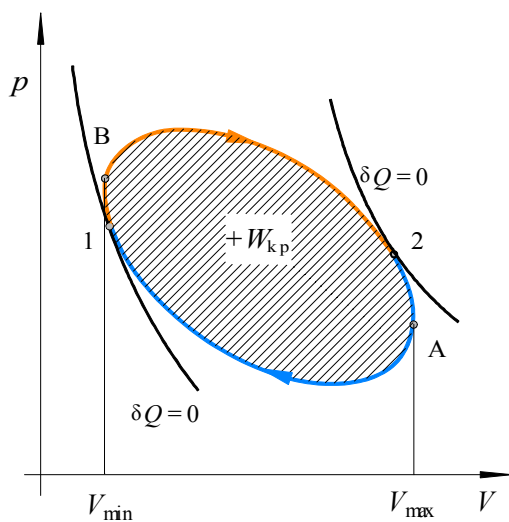
$$\varepsilon_g = \frac{|Q_{\text{pred}}|}{W_{\text{kp}}} = \frac{|Q_{\text{pred}}|}{|Q_{\text{pred}}| - Q_{\text{prim}}}$$



$$W_{\text{kp}} = -\oint T dS$$

Tokom levokretnog kružnog procesa, veću količinu toplote radni fluid preda okolini, nego što okolina preda radnom fluidu

$$W_{\text{kp}} = |Q_{\text{pred}}| - Q_{\text{prim}}$$



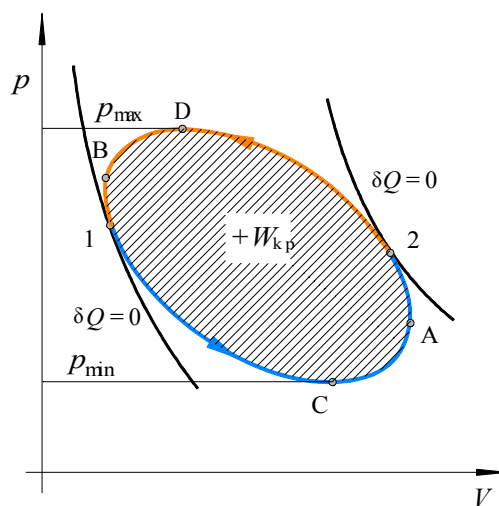
$$W_{\text{kp}} = -\oint p dV$$

$$W_{\text{kp}} = W_{V,A-2-B} + W_{V,B-1-A}$$

$$W_{\text{kp}} = W_{V,\text{uložen}} + W_{V,\text{izvršen}}$$

ili

$$W_{\text{kp}} = W_{V,\text{uložen}} - |W_{V,\text{izvršen}}|$$



$$W_{\text{kp}} = \oint V dp$$

$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},C-2-D} + W_{V,D-1-C}$$

$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},\text{uložen}} + W_{\text{teh},\text{izvršen}}$$

ili

$$W_{\text{kp}} = W_{\text{teh},\text{uložen}} - |W_{\text{teh},\text{izvršen}}|$$

- Tokom levokretnog kružnog procesa, više rada se uloži, nego što radni fluid rada izvrši nad okolinom. To znači da ukupan "rad levokretnog kružnog procesa", razlika uloženog (+) i apsolutne vredosti izvršenog rada (-), (bilo zapreminskog, bilo tehničkog) ima pozitivnu vrednost.

14.3 Parna kompresiona rashladna postrojenja

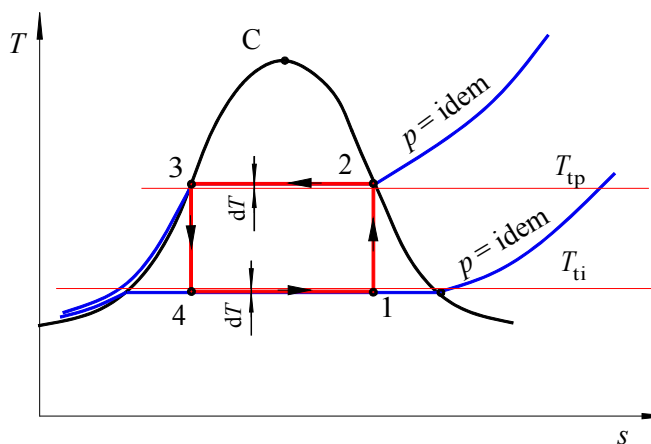
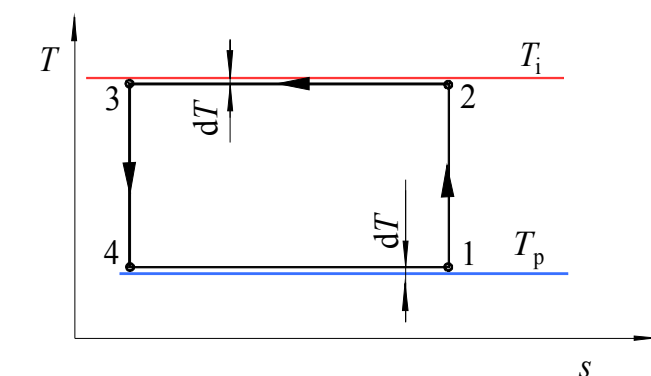
14.3.1 Karnoov (Carnot) levokretni kružni proces

- Kao i kod desnokretnih, Karnoov levokretni kružni proces je termodinamički „najbolji“ levokretni kružni proces – povratni kružni proces
- Levokretni Karnoov kružni proces, kao i desnokretni, sastoji se od 4 povratne promene stanja:

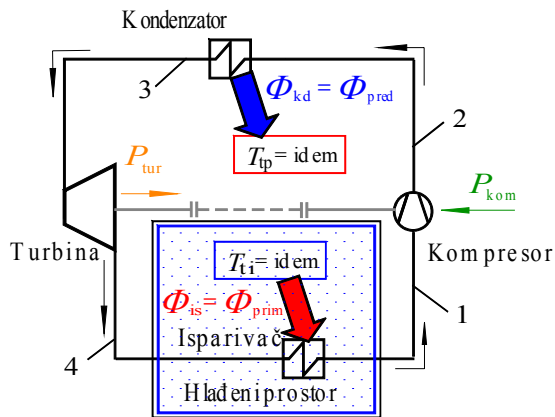
1-2	izentropske kompresije	$s = \text{idem}$	
2-3	izoternskog „hlađenja“	$T = \text{idem}$	$T_2 = T_3 = T_p = \text{idem}$
3-4	izentropske ekspanzije	$s = \text{idem}$	
4-1	izoternskog „zagrevanja“	$T = \text{idem}$	$T_4 = T_1 = T_i = \text{idem}$

- I Karnoov levokretni kružni proces je povratni kružni proces

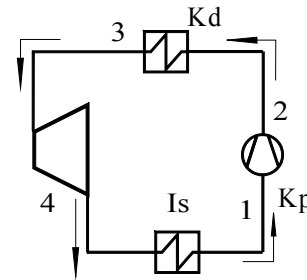
$$\Delta S_{is} = \Delta S_{ti} + \Delta S_{tp} + \Delta S_{rs} = 0$$



Detaljna šema postrojenja



Šema postrojenja

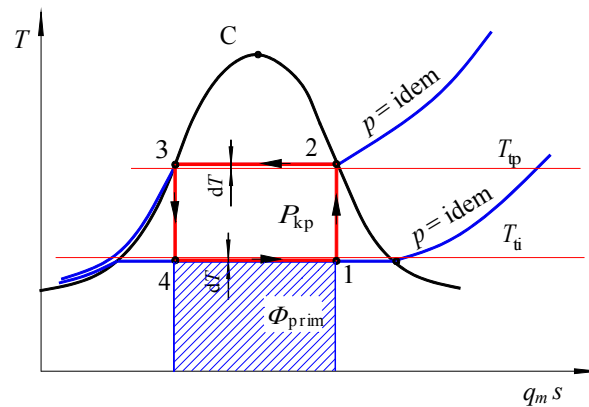


- **RASHLADNA SNAGA** – toplotni protok sa toplotnog izvora na rashladni fluid (primljeni toplotni protok)

$$\Phi_{hl} = \Phi_{prim} = \Phi_{ls} = q_m(h_1 - h_4) = q_m T_{Ti}(s_1 - s_4) \quad (p = \text{idem})$$

ili **RASHLADNI UČINAK** – količina toplote koju rashladni fluid u isparivaču primi od toplotnog izvora

$$Q_{hl} = Q_{prim} = Q_{ls} = Q_{4-1} = m(h_1 - h_4) = m T_{Ti}(s_1 - s_4) \quad (p = \text{idem})$$

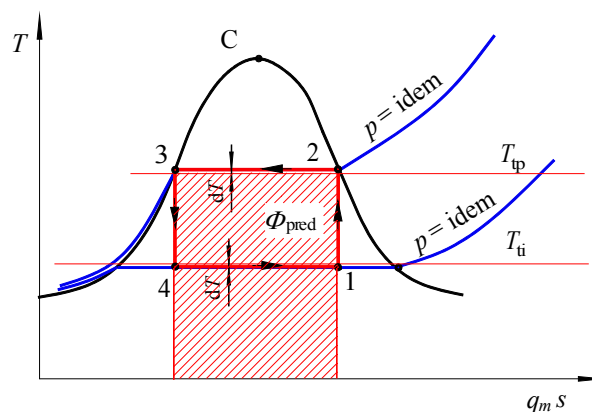


- Predati toplotni protok – toplotni protok sa rashladnog fluida na toplotni ponor

$$|\Phi_{pred}| = \Phi_{Kd} = q_m(h_2 - h_3) = q_m T_{Tp}(s_2 - s_3) \quad (p = \text{idem})$$

ili količina toplote koju rashladni fluid u kondenzatoru preda toplotnom ponoru

$$|Q_{pred}| = Q_{Kd} = m(h_2 - h_3) = m T_{Tp}(s_2 - s_3) \quad (p = \text{idem})$$



- Mehanička snaga uložena za pogon kompresora

$$P_{\text{kom}} = q_m (h_2 - h_1) \quad (s = \text{idem})$$

ili rad uložen za pogon kompresora

$$W_{\text{kom}} = m(h_2 - h_1) \quad (s = \text{idem})$$

- Mehanička snaga koju pri izentropskom i ravnotežnom širenju u turbini para preda vratilu

$$|P_{\text{tur}}| = q_m (h_3 - h_4) \quad (s = \text{idem})$$

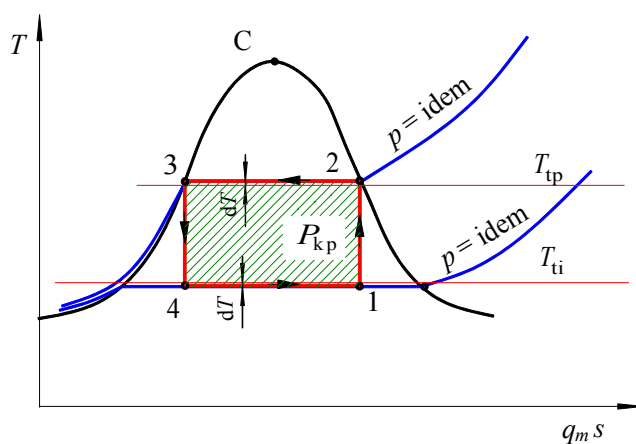
ili rad koju pri izentropskom i ravnotežnom širenju u turbini para preda vratilu („dobijeni“ rad)

$$|W_{\text{tur}}| = m(h_3 - h_4) \quad (s = \text{idem})$$

- Mehanička snaga potrebna za ostvarivanje levokretnog kružnog procesa

$$P_{\text{kp}} = P_{\text{kom}} - |P_{\text{tur}}| = q_m [(h_2 - h_1) - (h_3 - h_4)]$$

$$P_{\text{kp}} = |\Phi_{\text{pred}}| - \Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{kd}} - \Phi_{\text{ls}} = q_m [(h_2 - h_3) - (h_1 - h_2)] = q_m (s_2 - s_3)(T_{\text{Ti}} - T_{\text{Tp}})$$



- Koeficijent hlađenja

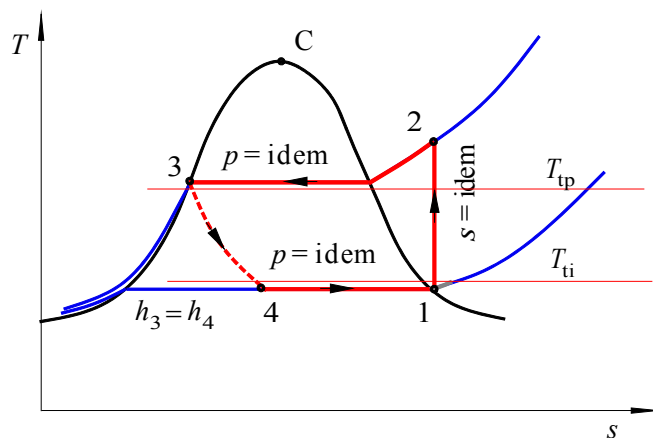
$$\varepsilon_{\text{h,Carnot}} = \varepsilon_{\text{h,C}} = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{P_{\text{kp}}} = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{|\Phi_{\text{pred}}| - \Phi_{\text{prim}}} =$$

$$\varepsilon_{\text{h,c}} = \frac{T_i (S_1 - S_4)}{T_p (S_2 - S_3) - T_i (S_1 - S_4)} = \frac{T_i}{T_p - T_i}$$

- Zbog činjenice da je proces isparavanja, odnosno kondenzacije realnog fluida izobarsko-izotermni proces, izotermni procesi 2-3 i 4-1 se relativno lako ostvaruju
- Tehnički problemi se javljaju pri ostvarivanju procesa izentropskog sabijanja vlažne pare 1-2, odnosno, njenog izentropskog širenja 3-4.
 - Proces 1-2 - Kompresor usisava vlažnu paru – isti problemi i kod Rankin-Klauzijusovog procesa, → stanje 1, pomera se u desno do stanja suve ili čak predrežane pare. To se obezbeđuje ili automatskim upravljanjem (regulacijom) procesa ili ugradnjom dopunskog uređaja – odvajača tečnosti (pare).
 - Proces 3-4 - Rad koji radni fluid izvrši u turbini $W_{izvrš}$ je veoma mali, a turbina (ili ekspanzioni cilindar je veoma skup uređaj),
⇒ turbina se zamenjuje sa (mnogo jeftinijim) prigušnim ventilom

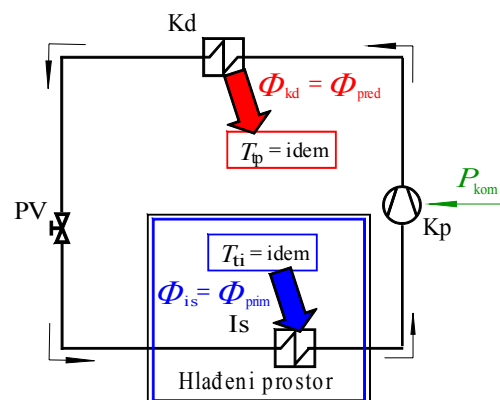
14.3.2 Parno kompresiono rashladno postrojenje sa prigušnim ventilom i sa usavanjem (suvo)zasićene pare u kompresor – idelan ciklus

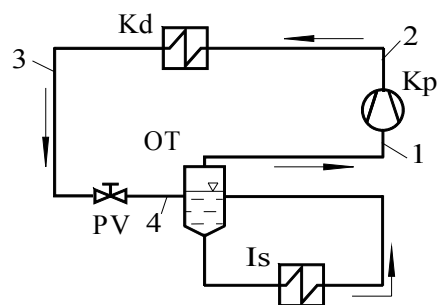
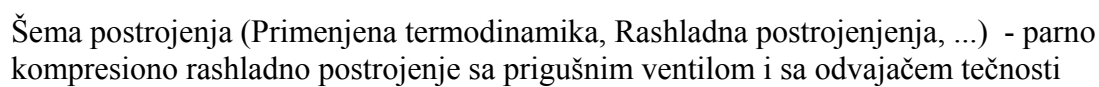
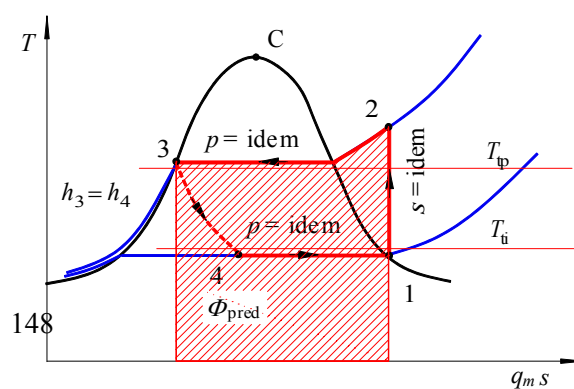
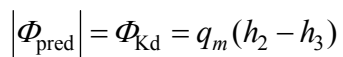
Prikaz procesa u $T-s$ koordinatnom sistemu



Prikaz procesa u $h-s$ koordinatnom sistemu

Šema postrojenja (Termodinamika)




$$Q_{\text{hl}} = Q_{\text{prim}} = Q_{\text{ls}} = Q_{4-1} = m(h_1 - h_4)$$


ili količina toplote koju rashladni fluid u kondenzatoru preda toplotnom ponoru

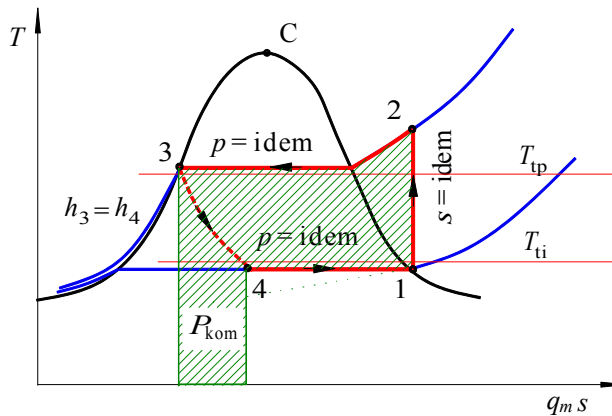
$$|Q_{\text{pred}}| = Q_{\text{Kd}} = m(h_2 - h_3)$$

- Mehanička snaga uložena za pogon kompresora

$$P_{\text{kom}} = |\Phi_{\text{pred}}| - \Phi_{\text{prim}} = \Phi_{\text{Kd}} - \Phi_{\text{Is}} = q_m(h_2 - h_1)$$

ili rad uloženi za pogon kompresora

$$W_{\text{kom}} = W_{\text{teh,1-2}} = |Q_{\text{pred}}| - Q_{\text{prim}} = Q_{\text{Kd}} - Q_{\text{Is}} = m(h_2 - h_1)$$



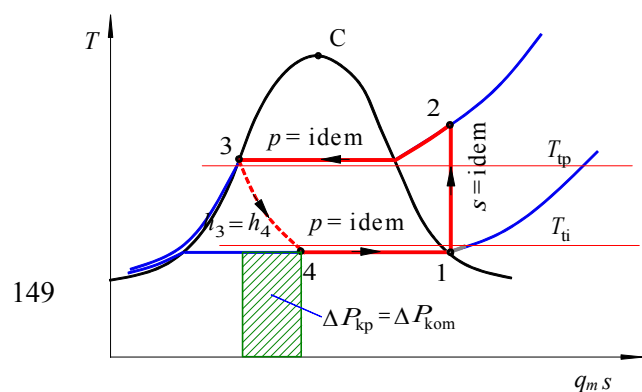
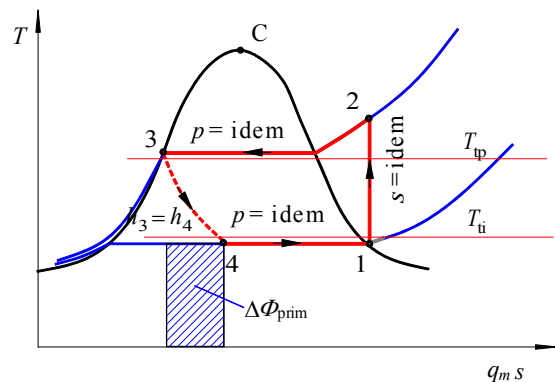
- Koeficijent hlađenja

$$\varepsilon_h = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{P_{\text{kp}}} = \frac{\Phi_{\text{Is}}}{P_{\text{kom}}} = \frac{q_m(h_1 - h_4)}{q_m(h_2 - h_1)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

- Termodinamička analiza

Zamenom turbine sa prigušnim ventilom, istovremeno se smanjuje rashladna snaga postrojenja za

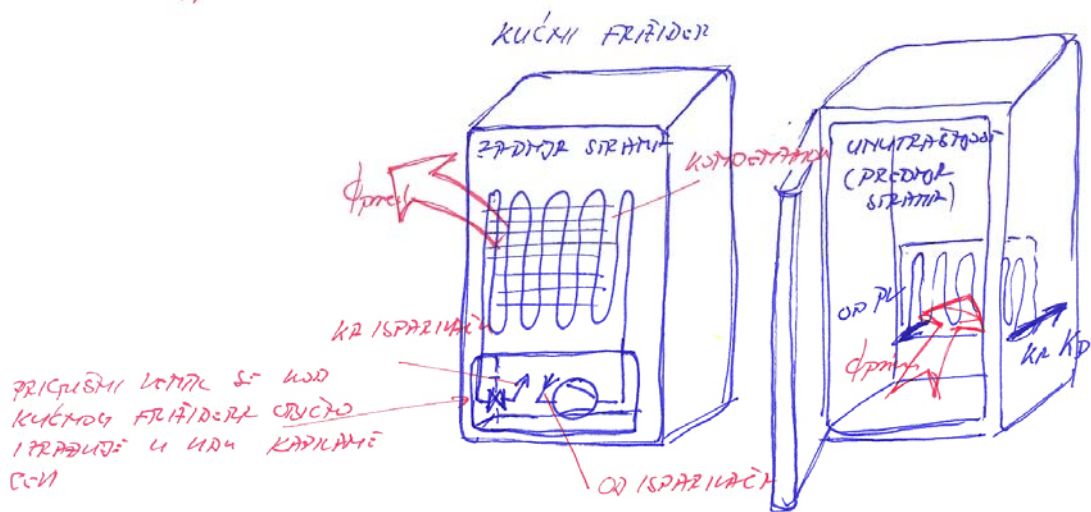
$$\Delta \Phi_{\text{prim}} = \Delta \Phi_{\text{Is}} = q_m T_{\text{Ti}}(s_4 - s_3)$$



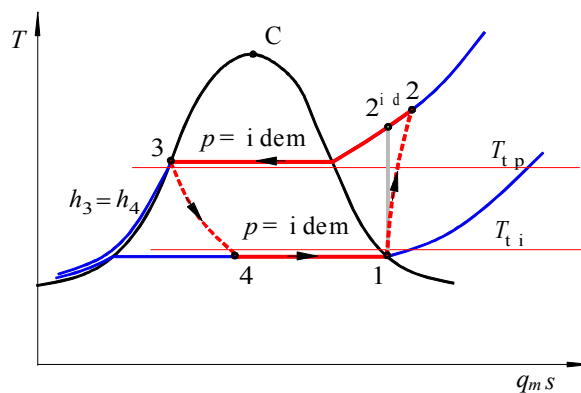
pa se koeficijent hlađenja tako smanjuje po dva osnova

pa se koeficijent hlađenja tako smanjuje po dva osnova

Primer postrojenja – tzv. “kućni“ frižider



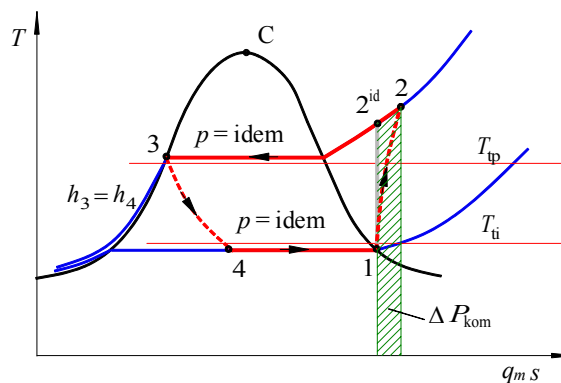
14.3.3 Odstupanja realnog od idealnog ciklusa kompresiono rashladnih postrojenja



Iako su i pri procesima predaje toplote (kondenzator, isparivač), neizostavno prisutni disipativni efekti, pa ovi procesi realno nisu izobarski, ova odstupanja su beznačajna, pa se obično ne uzimaju u obzir.

Najveće odstupanje realnog od „idealnog“ procesa dešava se u procesu adijatermskog sabijanja pare u kompresoru. Mehanička neravnoteža pri kojoj se ostvaruje ovaj proces glavni je uzročnik njegove nepovratnosti i posledično povećanja entropije.

To dalje ima za posledicu povećanu potrebnu mehaničke snage za pogon kompresora ΔP_{kom} .

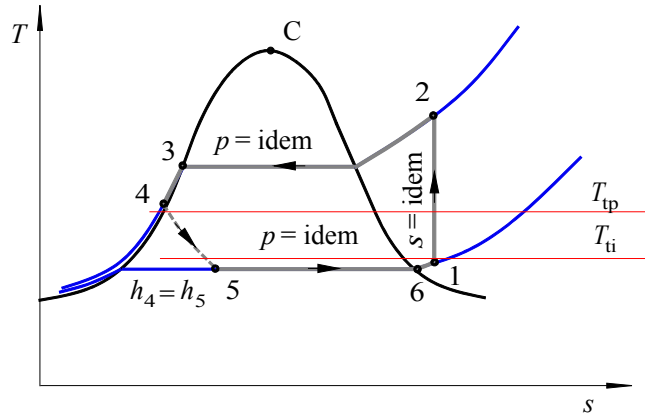


Stepen odstupanja realnih od idealnih procesa u kompresoru opisuje se preko stepena dobrote adijatermne kompresije (unutrašnjeg stepana korisnosti kompresora).

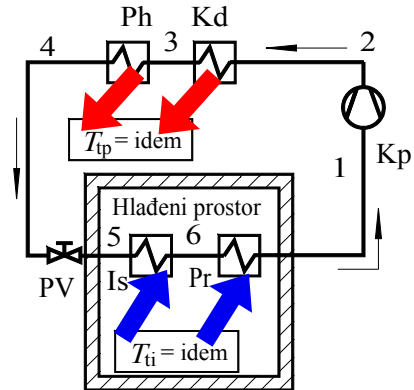
$$\eta_d^{\text{kom}} = \eta_i^{\text{kom}} = \frac{W_{\text{kom}}^{\text{idealno}}}{W_{\text{kom}}^{\text{realno}}} = \frac{P_{\text{tur}}^{\text{idealno}}}{P_{\text{tur}}^{\text{realno}}} = \frac{h_{2\text{id}} - h_1}{h_2 - h_1}$$

14.3.4 Parno kompresiono rashladno postrojenje sa pothlađivanjem kondenzata, prigušnim ventilom i usavanjem pregrejane pare u kompresor

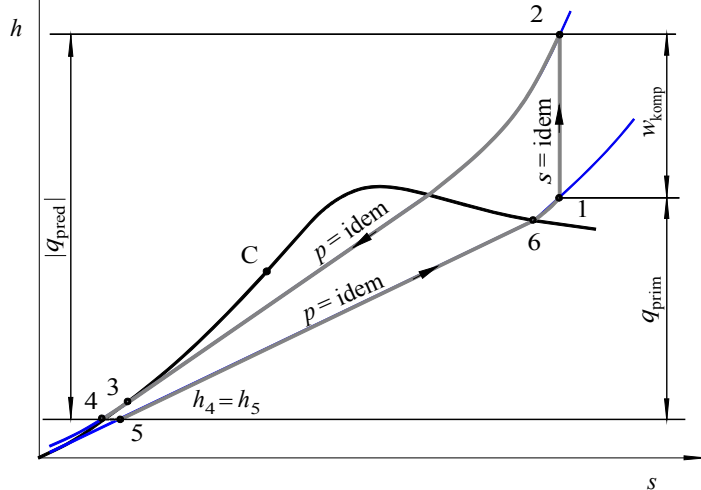
Prikaz procesa u $T-s$ koordinatnom sistemu



Šema postrojenja



Prikaz procesa u $h-s$ koordinatnom sistemu



- Količina toplote koju rashladni fluid primi (primljeni toplotni protok) – **RASHLADNI UČINAK**

$$Q_{\text{prim}} = Q_{\text{is}} + Q_{\text{pr}} = Q_{4-6} + Q_{6-1} = m(h_1 - h_5) \quad \Phi_{\text{prim}} = q_m(h_1 - h_5) \quad (p = \text{idem})$$

- Količina toplote koju rashladni fluid preda (predati toplotni protok)

$$|Q_{\text{pred}}| = Q_{\text{kd}} + Q_{\text{ph}} = |Q_{2-3}| + |Q_{3-4}| = m(h_4 - h_2) \quad |\Phi_{\text{pred}}| = q_m(h_4 - h_2) \quad (p = \text{idem})$$

- Rad uložen za pogon kompresora (mehanička snaga uložena za pogon kompresora)

$$W_{\text{komp}} = W_{\text{teh},1-2} = m(h_2 - h_1) \quad P_{\text{komp}} = q_m(h_2 - h_1) \quad (s = \text{idem})$$

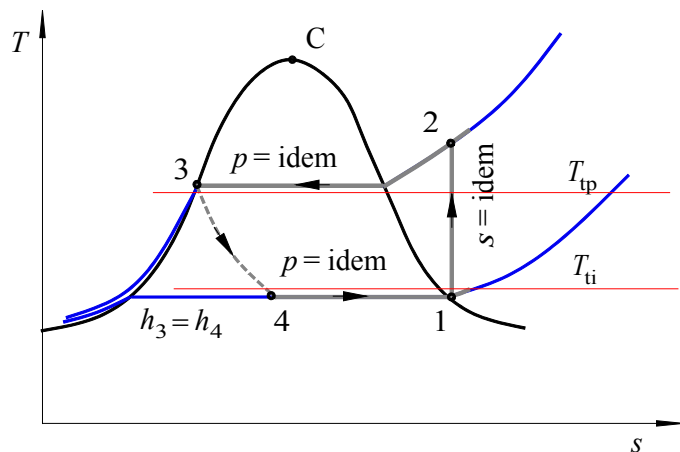
- Koeficijent hlađenja

$$\varepsilon_h = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{P_{\text{komp}}} = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1}$$

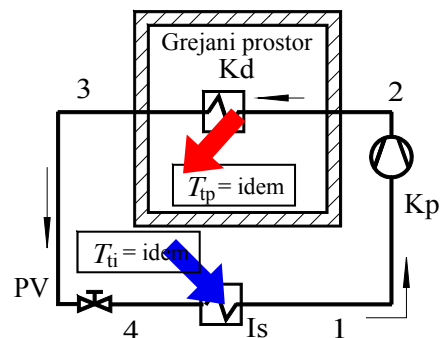
14.3.5 Grejne (toplotne) pumpe

- Parno kompresiono rashladno postrojenje sa ili bez pothlađivanja kondenzata, prigušnim ventilom i usavanjem suve ili pregrejane pare u kompresor
- Svrha postrojenja – zagrevanje nekog medijuma – najčešće vadauha, vode (bazeni), ...

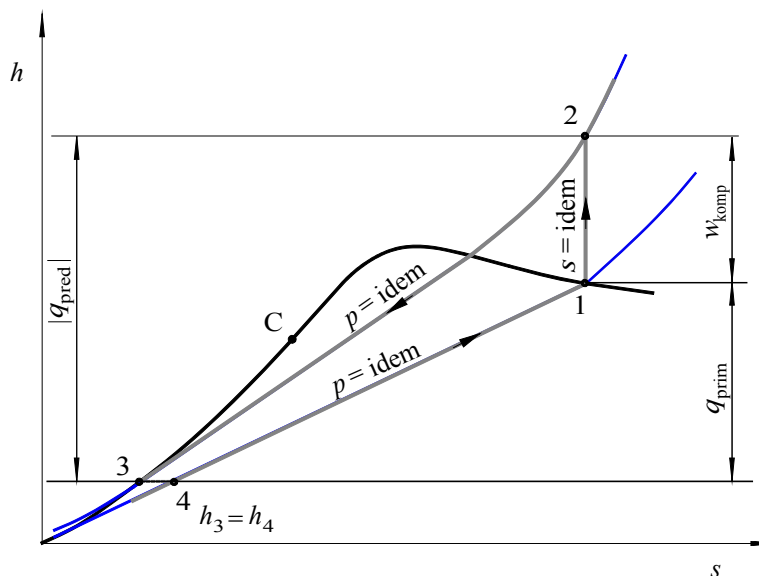
Prikaz procesa u $T-s$ koordinatnom sistemu



Šema postrojenja



Prikaz procesa u $h-s$ koordinatnom sistemu



- Količina toplote koju rashladni fluid preda (predati toplotni protok) – **GREJNI (TOPLITNI) UČINAK**

$$|Q_{\text{pred}}| = |Q_{2-3}| = m(h_2 - h_3) \quad |\Phi_{\text{pred}}| = q_m(h_2 - h_3) \quad (p = \text{idem})$$

- Količina toplote koju rashladni fluid primi (primljeni toplotni protok)

$$Q_{\text{prim}} = Q_{4-1} = m(h_1 - h_4) \quad \Phi_{\text{prim}} = q_m(h_1 - h_4) \quad (p = \text{idem})$$

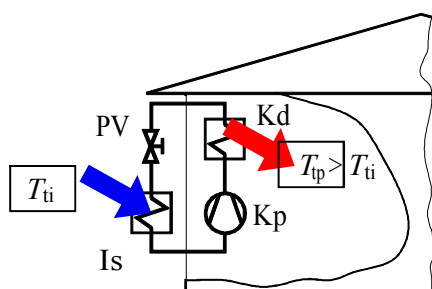
- Rad uložen za pogon kompresora (mehanička snaga uložena za pogon kompresora)

$$W_{\text{komp}} = W_{\text{teh},1-2} = m(h_2 - h_1) \quad P_{\text{komp}} = q_m(h_2 - h_1) \quad (s = \text{idem})$$

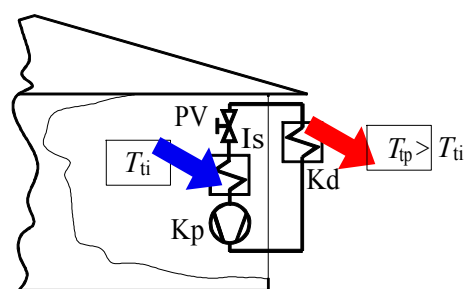
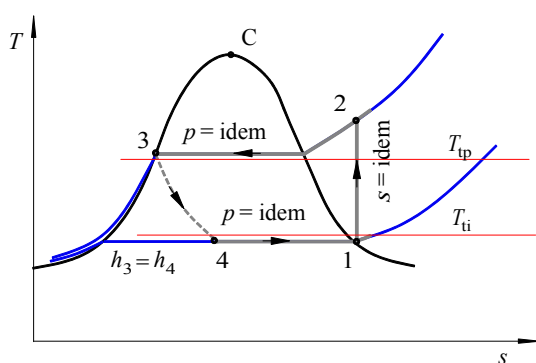
- Koeficijent grejanja

$$\varepsilon_g = \frac{|\Phi_{\text{pred}}|}{P_{\text{komp}}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

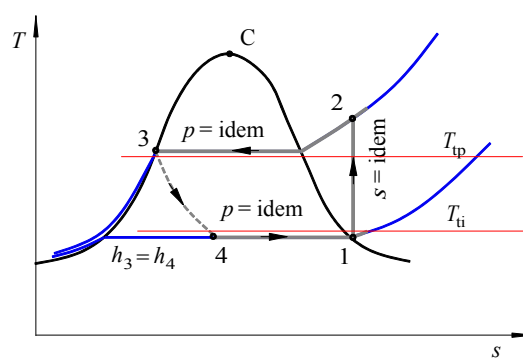
14.3.6 Princip rada kućnih klima uređaja



Grejanje vazduha u prostorijama (zimski period) – toplotna pumpa



Hlađenje vazduha u prostorijama (letnji period) – rashladni uređaj



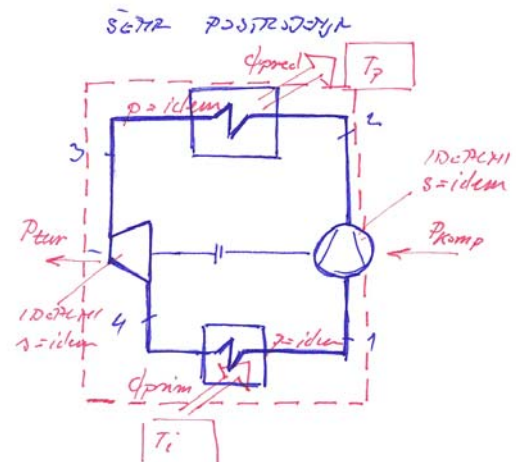
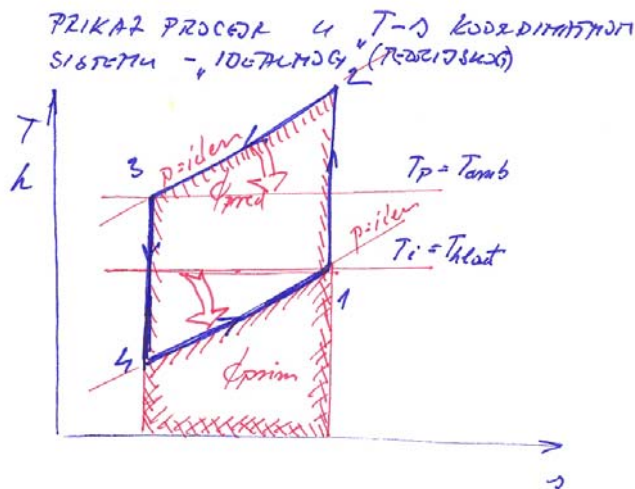
14.4 Gasna kompresiona rashladna postrojenja

- Gasna – koriste gas (vazduh – idelan gas) kao radni (rashladni) fluid

14.4.1 Postrojenja koja rade po Džulovom levokretnom kružnom procesu

Prikaz procesa u $T-s$ koordinatnom sistemu

Šema postrojenja



- Koeficijent hlađenja

$$\varepsilon_h = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{P_{\text{kp}}} = \frac{\Phi_{\text{prim}}}{|\Phi_{\text{pred}}| - \Phi_{\text{prim}}} = \frac{q_m c_p (T_1 - T_4)}{q_m c_p (T_2 - T_3) - q_m c_p (T_1 - T_4)}$$

$$\varepsilon_h = \frac{1}{\frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_4} - 1} = \frac{1}{\frac{T_3 \left(\frac{T_2}{T_3} - 1 \right)}{T_4 \left(\frac{T_1}{T_4} - 1 \right)} - 1} = \frac{1}{\frac{T_3}{T_4} - 1}$$

Uvođenjem odnosa pritisaka

$$\pi = \frac{p_{\text{max}}}{p_{\text{min}}} = \frac{p_3}{p_4}$$

i uz pomoć odnosa koji važi za politropske promene stanja

$$p_3 T_3^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} = p_4 T_4^{\frac{\kappa}{1-\kappa}} \Rightarrow \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \frac{T_4}{T_3} \Rightarrow$$

$$\boxed{\varepsilon_h = \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}}$$

- Prikaz levokretnog Džulovog kružnog procesa u $p-v$ koordinatnom sistemu

