

Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja u termoelektranama s parnim turbinama

Rankineov kružni proces, stupnjevi djelovanja realnih procesa, postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja termoelektrana s parnim turbinama

Energijske tehnologije
FER 2008.



1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
- 4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama**
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Energija Sunca
8. Energija vjetra
9. Geotermalna energija
10. Biomasa
11. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
12. Potrošnja električne energije
13. Prijenos i distribucija električne energije
14. Skladištenje energije
15. Energija, okoliš i održivi razvoj

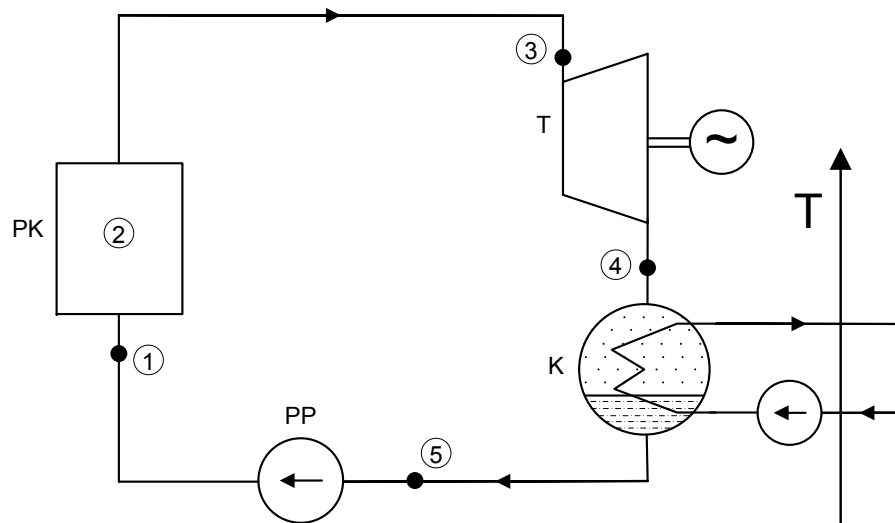
Sadržaj

Neprovedivost Carnotovog kružnog procesa

Postupci povećanja termičkog stupnja djelovanja

- proces sa suhom parom
- proces s pregrijanom parom
- proces s međupregrijanjem pare
- proces sa zagrijavanjem kondenzata
- utjecaj tlaka i temperature svježe pare
- kombinirana proizvodnja pare i električne energije

Neprovedivost Carnotovog kružnog procesa

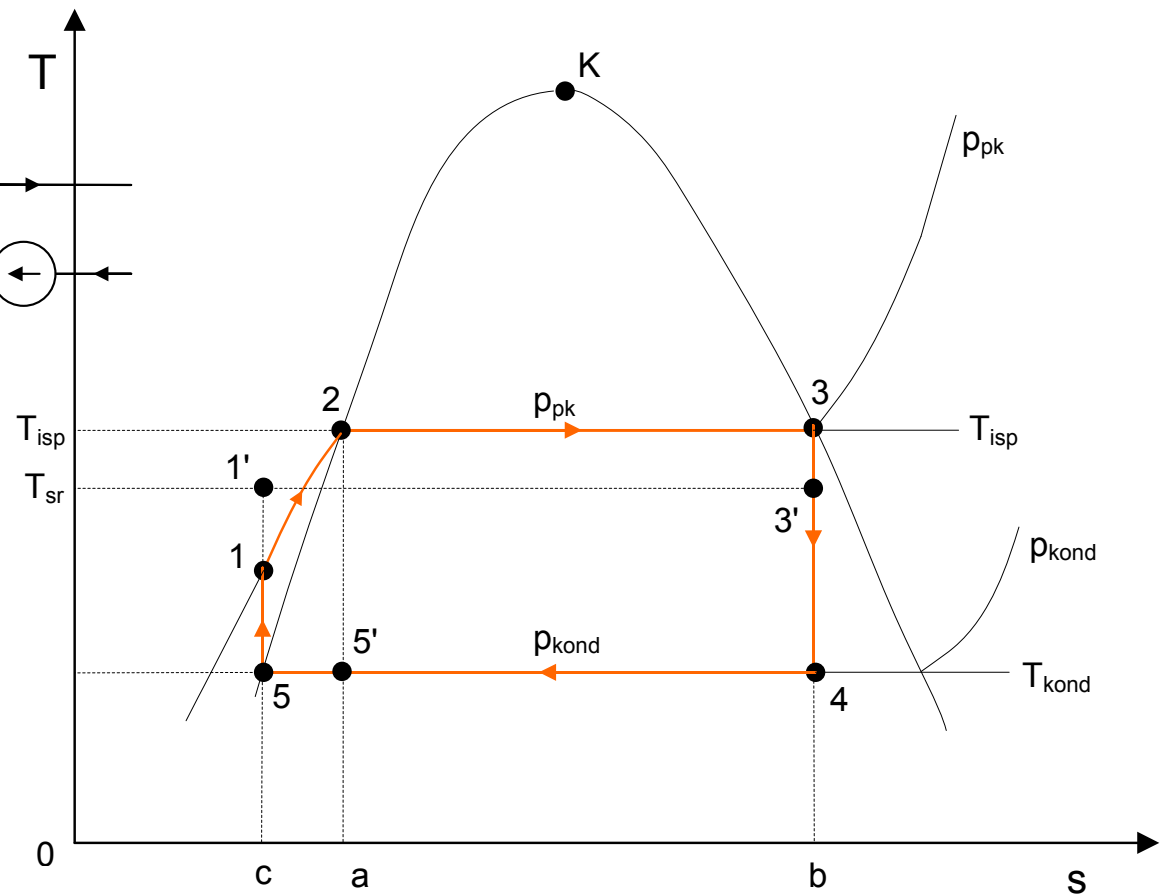


$$\eta_{terCKP} = 1 - \frac{T_{kond}}{T_{isp}}$$

$$\eta_{ter} = 1 - \frac{|q_{odv}|}{q_{dov}}$$

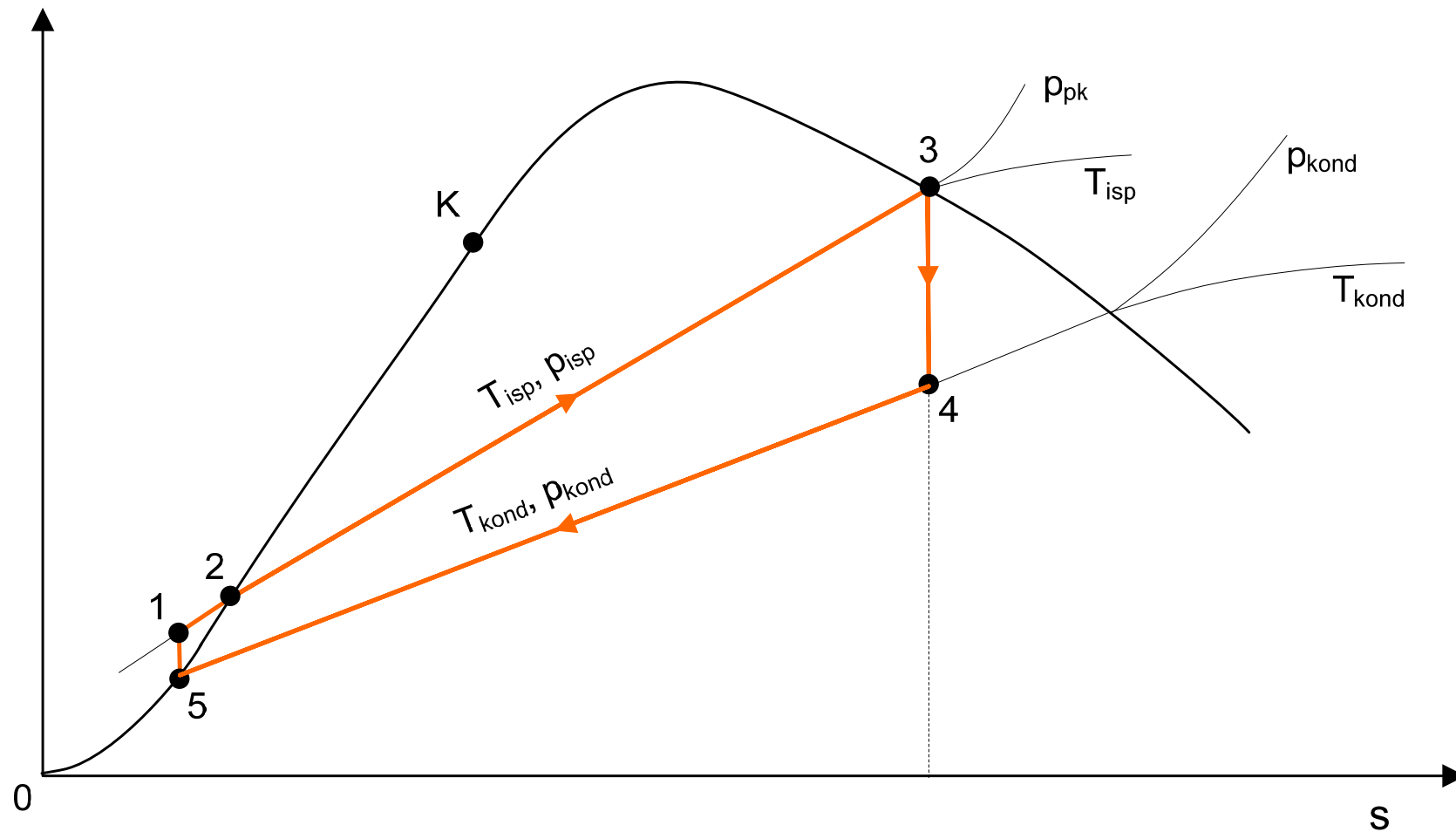
$$\eta_{ter} = 1 - \frac{T_{kond}}{T_{sr}}$$

$$T_{sr} < T_{isp}$$



Desnokretni Carnotov kružni proces s mokrom (suhom) parom

h,s – dijagram Rankineovog kružnog procesa



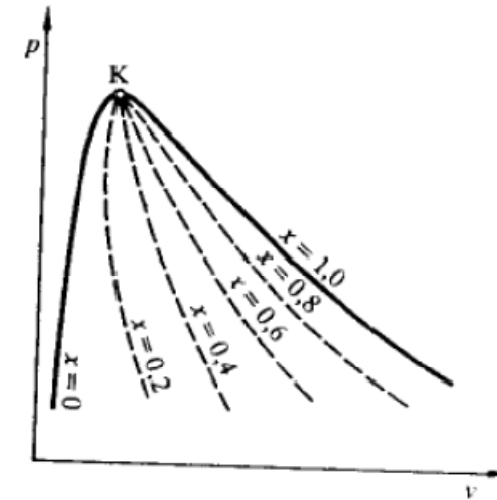
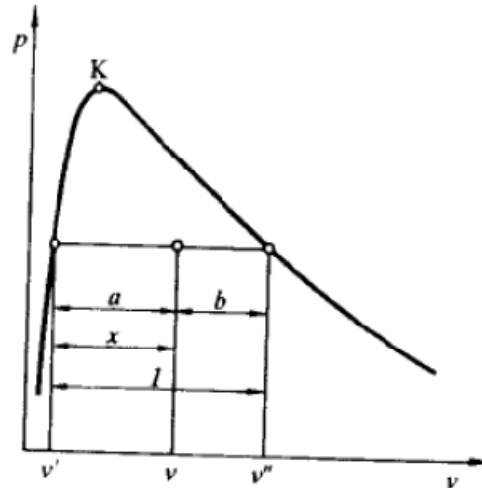
$$\eta_{ter} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_1 - h_5)}{h_3 - h_1} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_5}$$

Sadržaj pare x (sadržaj vlage 1-x)

$$x = \frac{m''}{m' + m''}$$

$$V = m'v' + m''v''$$

$$m = m' + m''$$



$$v = \frac{V}{m} = \frac{m'}{m' + m''} v' + \frac{m''}{m' + m''} v''$$

$$\frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{x}{1} = \frac{a}{a + b}$$

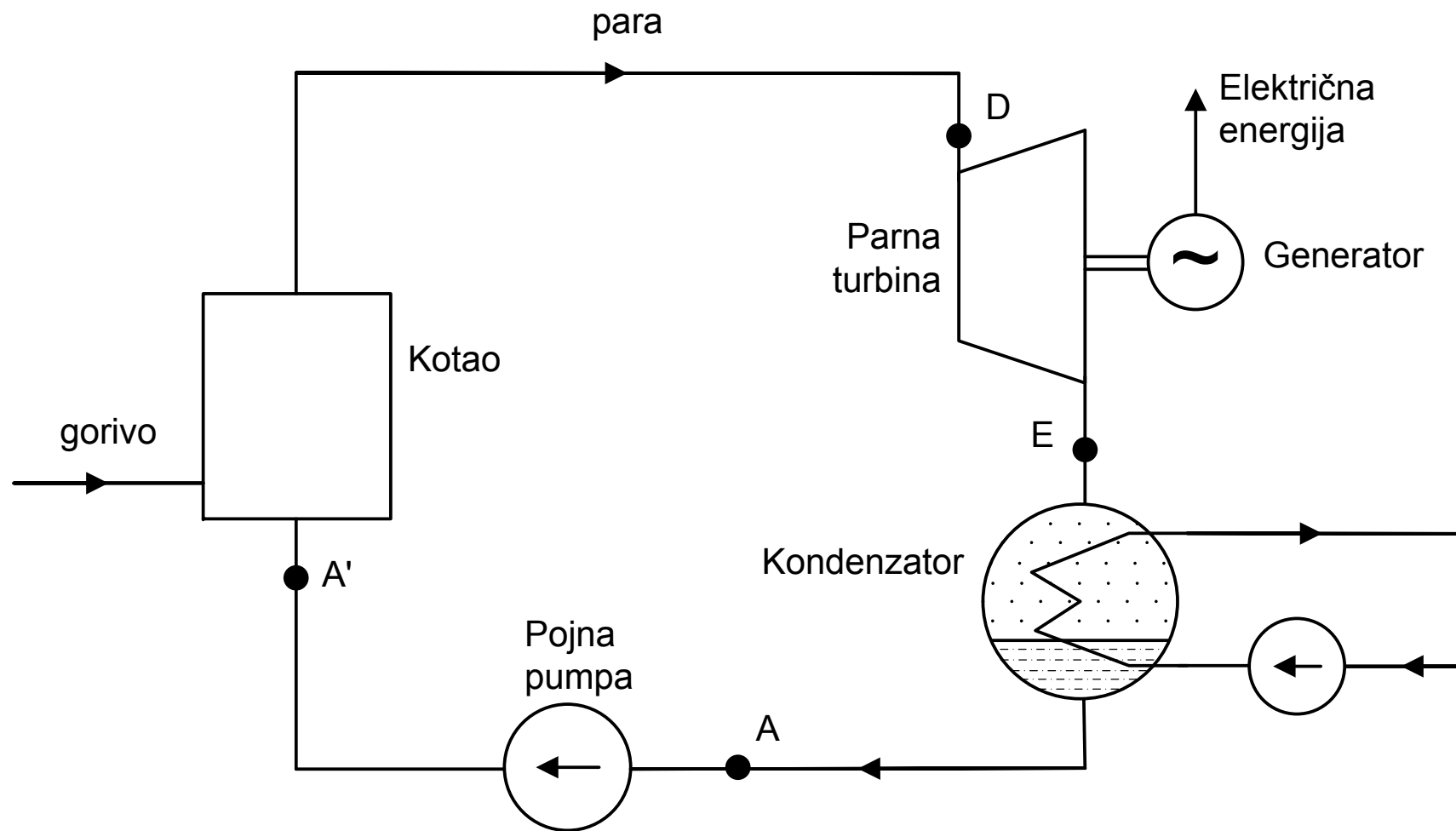
$$v = (1 - x)v' + xv'' = v' + x(v'' - v')$$

$$u = u' + x(u'' - u')$$

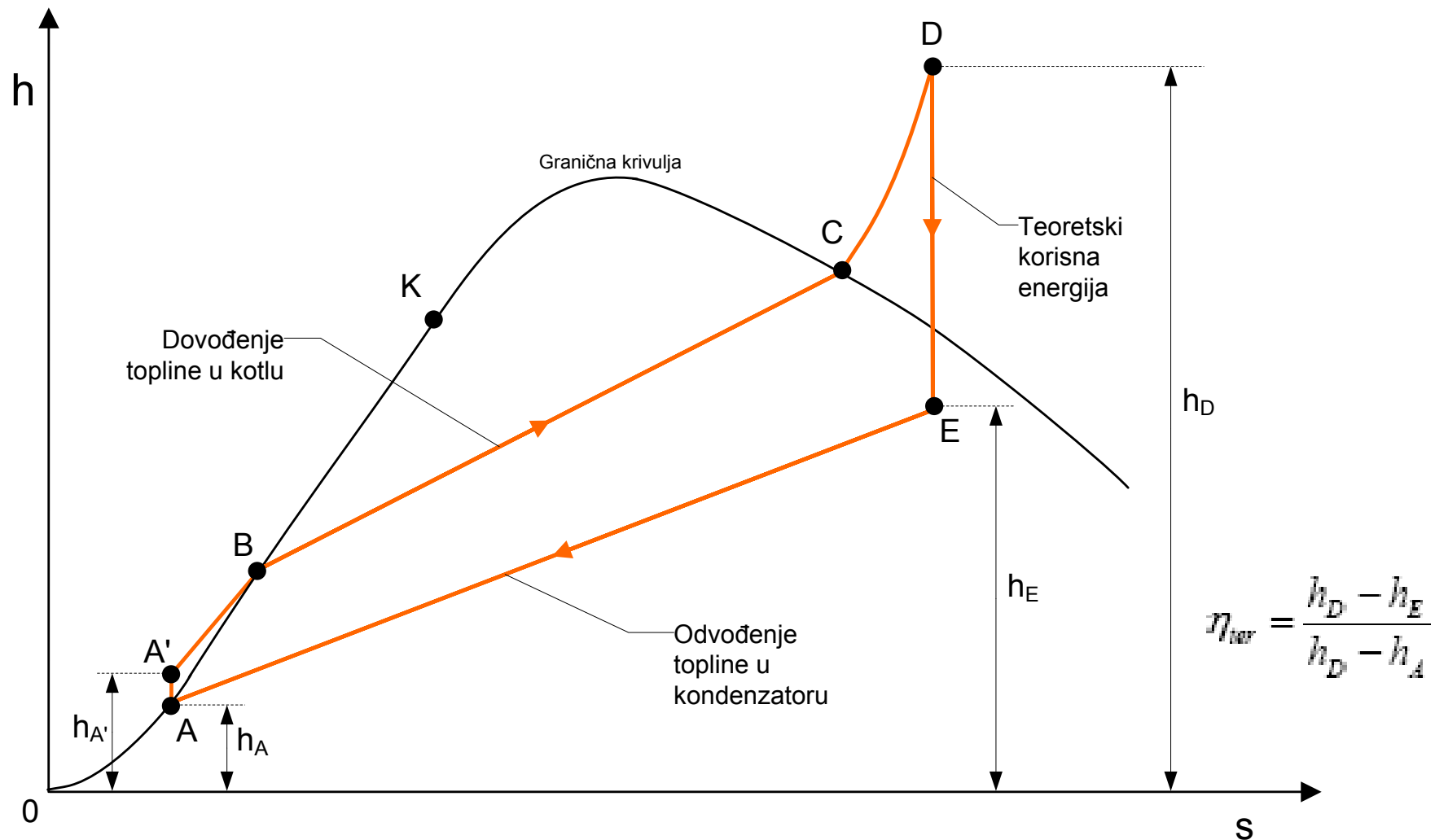
$$h = h' + x(h'' - h')$$

$$s = s' + x(s'' - s')$$

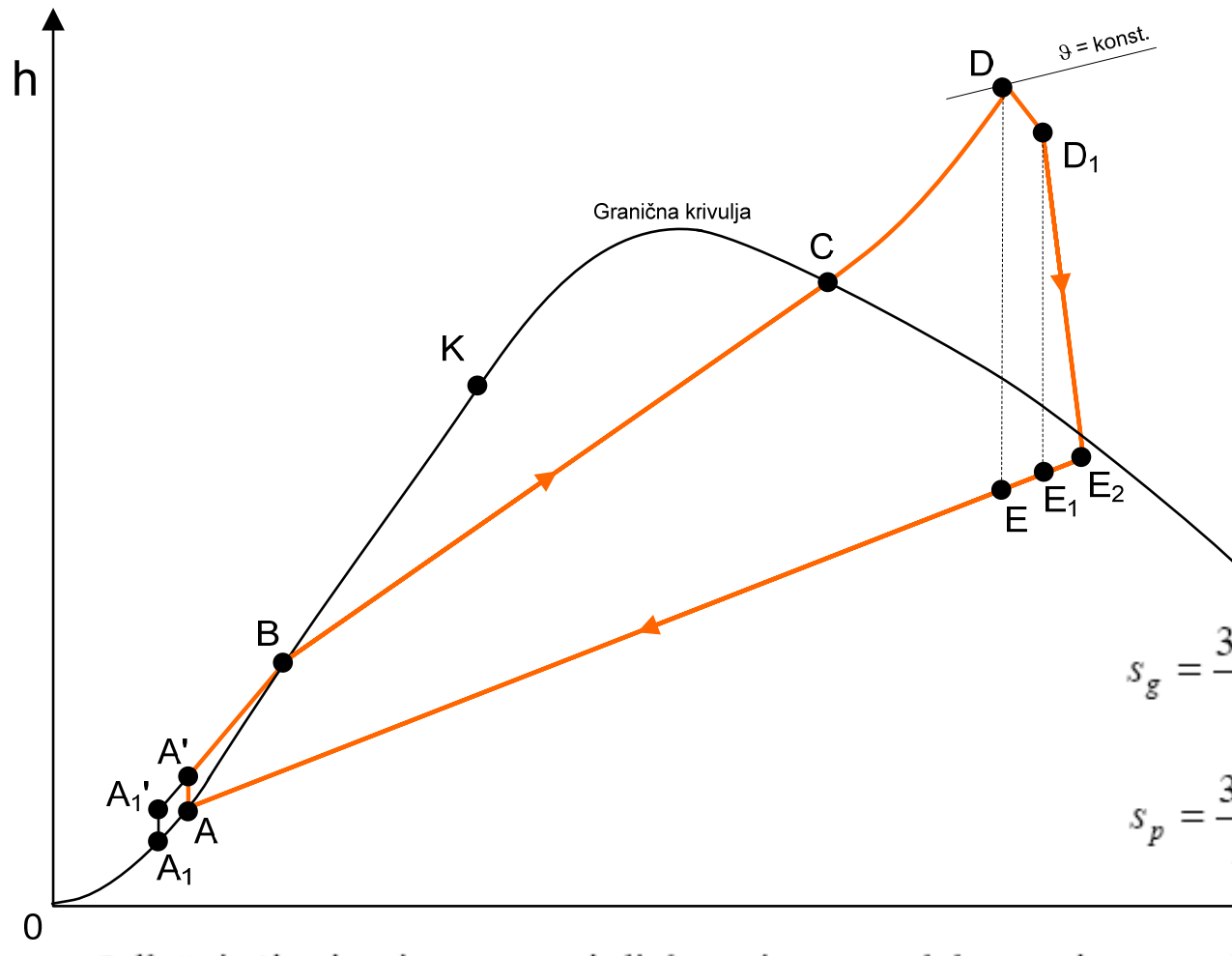
Shematski prikaz kružnog procesa u kondenzacijskoj termoelektrani



Povratljivi kružni proces u kondenzacijskoj termoelektrani



Realni kružni proces u kondenzacijskoj termoelektrani



$$\eta_i = \frac{h_{D1} - h_{E2}}{h_{D1} - h_{E1}}$$

$$\eta_e = \eta_{ter} \cdot \eta_m \cdot \eta_i \cdot \eta_p \cdot \eta_k$$

$$\eta_{el} = \eta_e \eta_g$$

$$\nu = \frac{P_{vl}}{P_{el}}$$

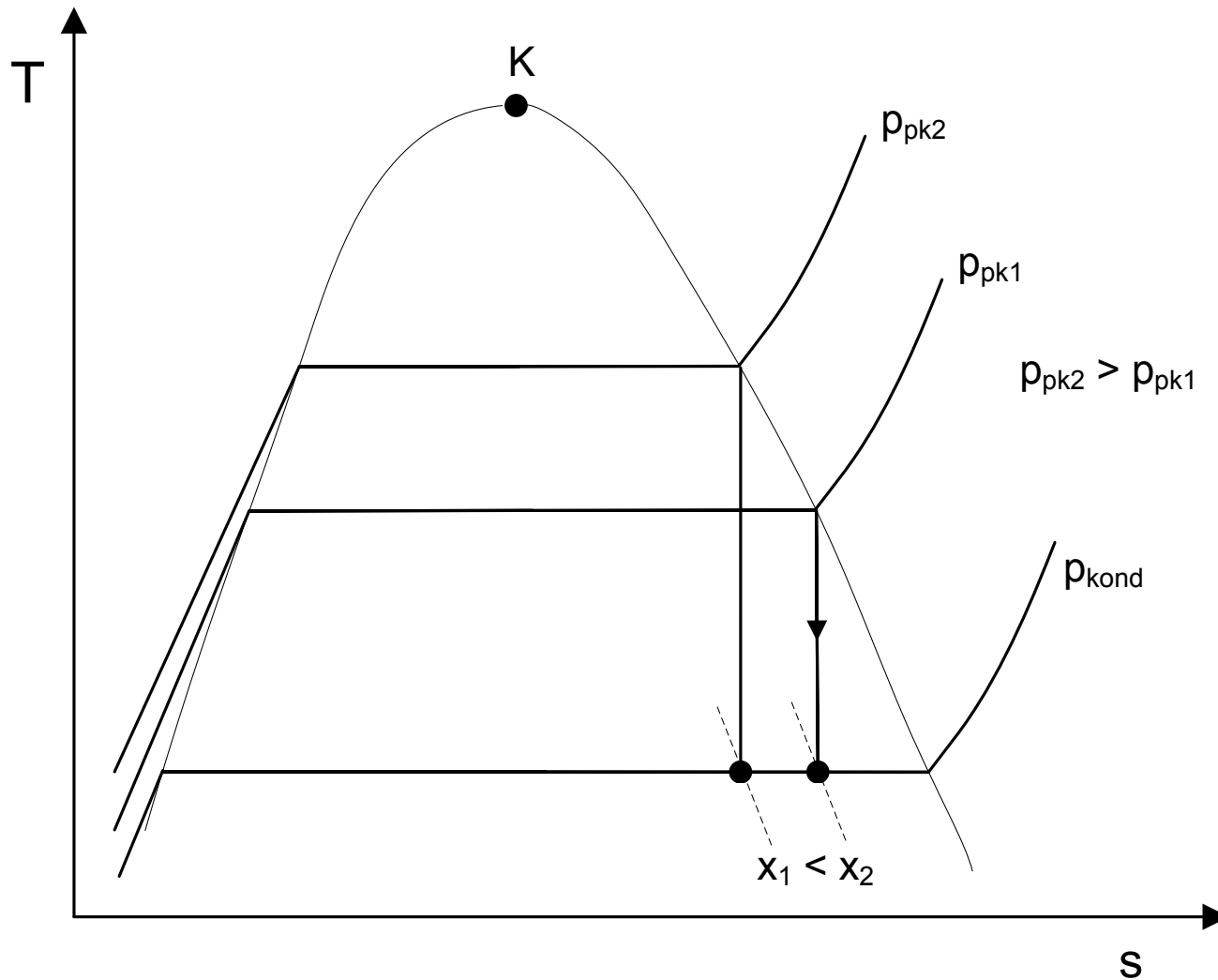
$$\eta_{el,prag} = \eta_{el} \cdot (1 - \nu)$$

$$s_g = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{el}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{ter} \eta_k \eta_p \eta_i \eta_m \eta_g} \text{ [J/kWh]}$$

$$s_p = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{el,prag}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_{el} (1 - \nu)} \text{ [J/kWh]}$$

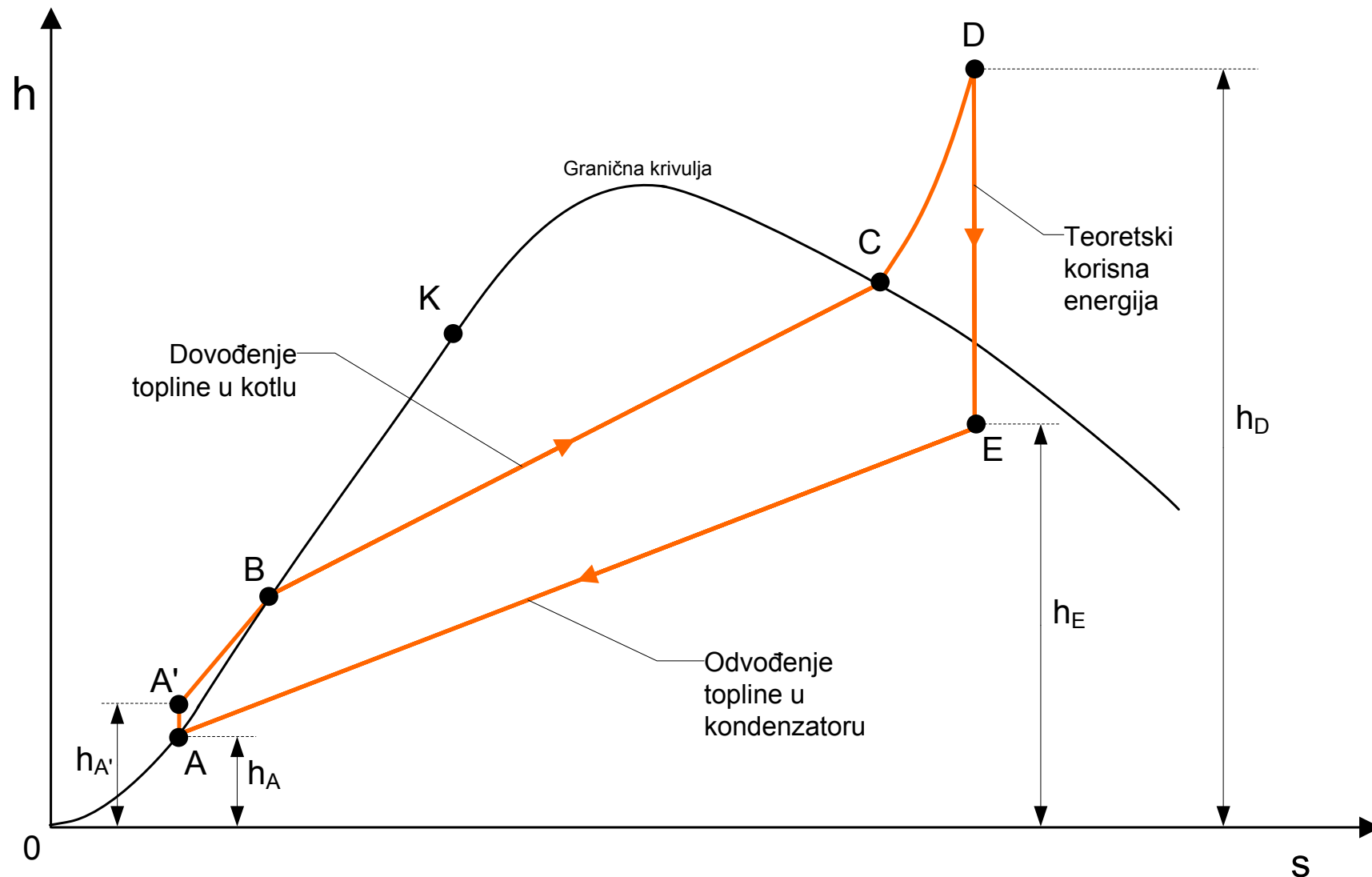
Odlučujući utjecaj na stupanj djelovanja termoelektrane ima termički stupanj djelovanja, koji je normalno i najmanji, pa je razumljivo nastojanje da se termički stupanj djelovanja poboljša (poveća).

Proces sa suhom parom

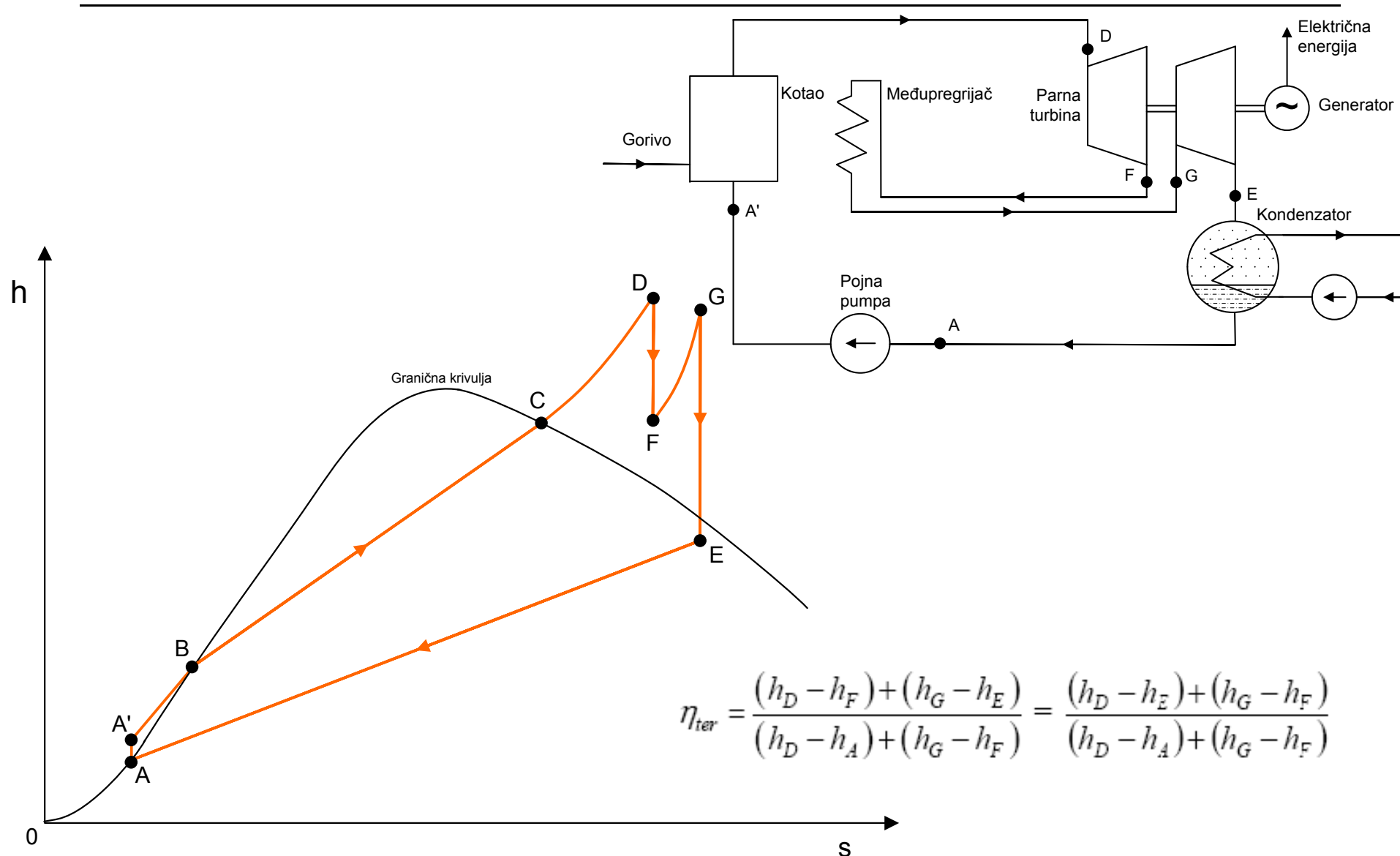


Povećanje sadržaja vlage na kraju ekspanzije uzrokovano povišenjem tlaka suhe pare

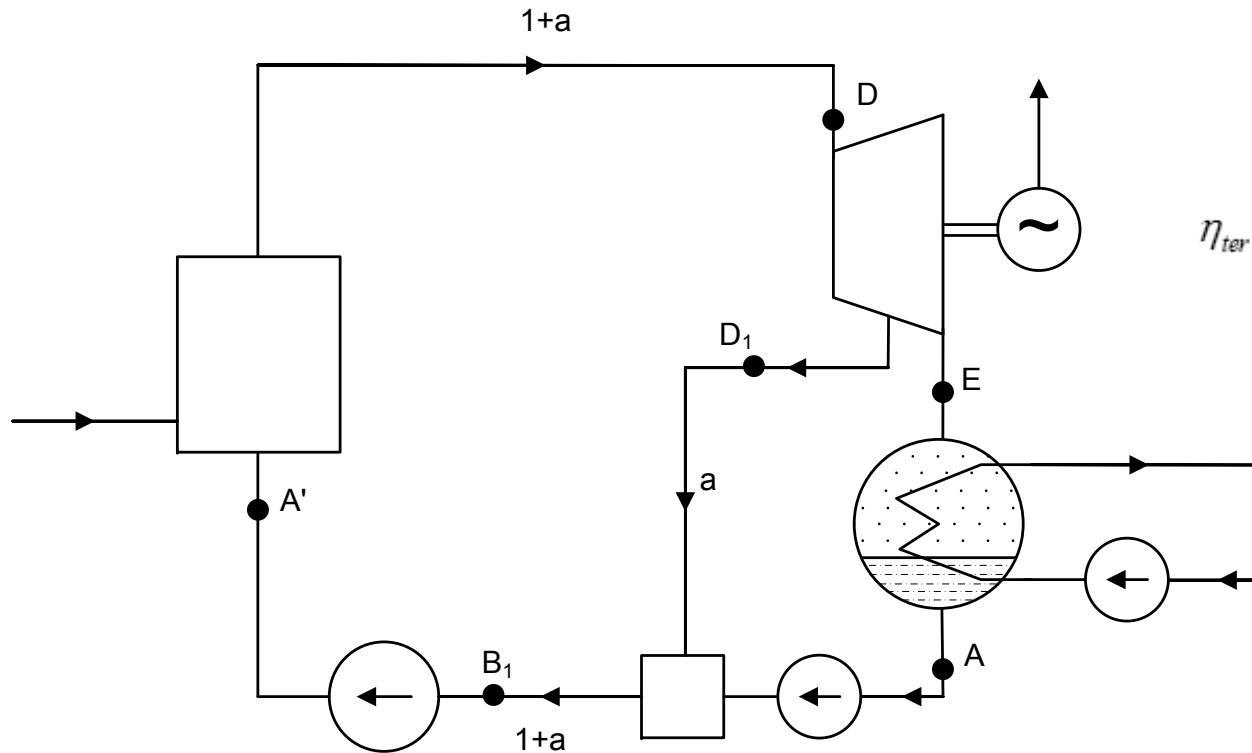
Proces s pregrijanom parom



Proces s međupregrijanjem pare



Proces sa zagrijavanjem kondenzata



$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + \sum_1^n a_n (h_{Dn} - h_{Bn})}{h_D - h_A + \sum_1^n a_n (h_{Dn} - h_{Bn})}$$

$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + a(h_D - h_{D1})}{(1+a)(h_D - h_{B1})}$$

$$a \cdot (h_{D1} - h_{B1}) = 1 \cdot (h_{B1} - h_A) \quad 1 \cdot (h_D - h_E) + a \cdot (h_D - h_{D1})$$

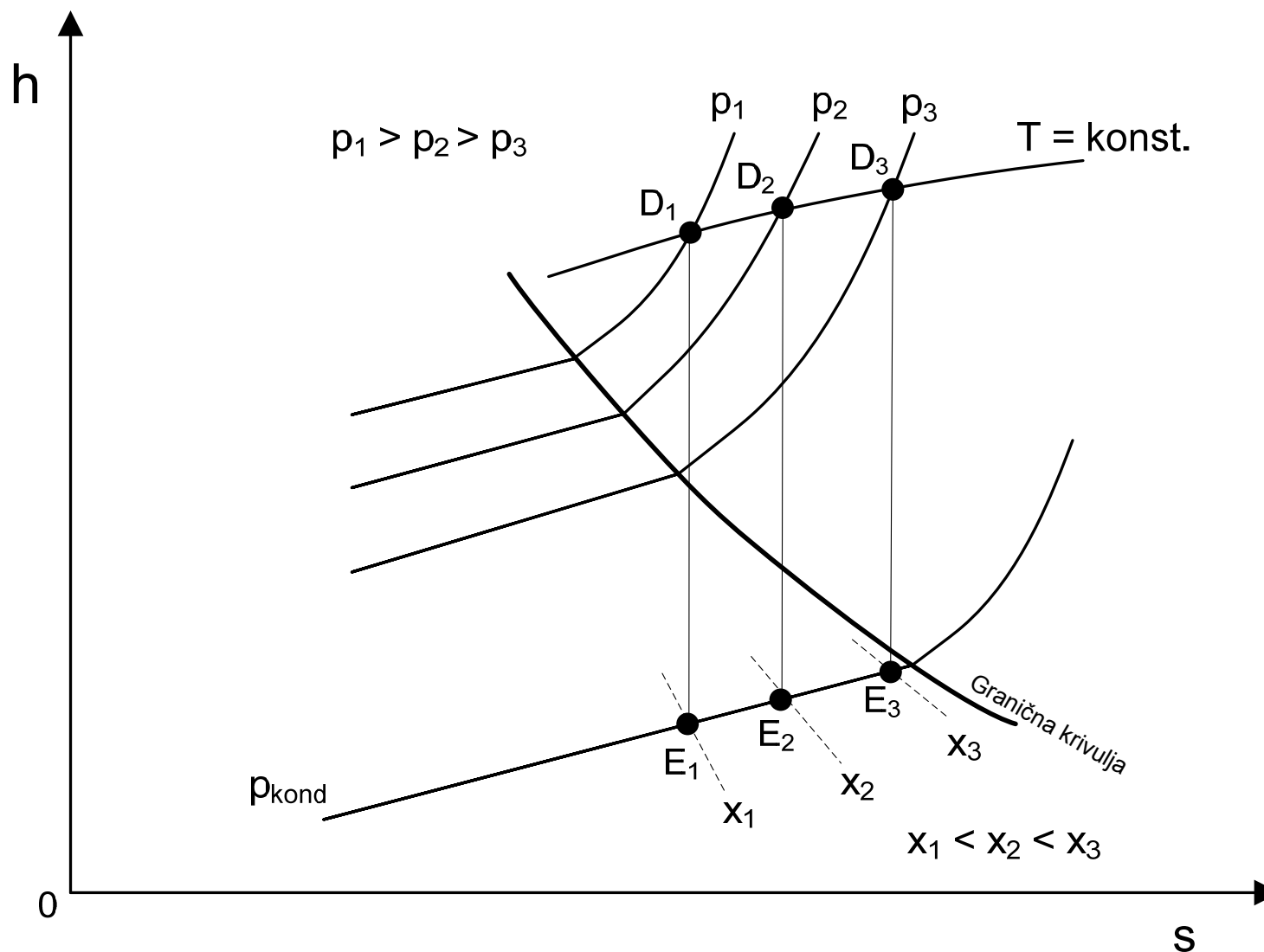
Nazivnik možemo proširiti s h_A i a h_{D1} , pa dobivamo

$$h_D - h_A - (h_{B1} - h_A) + a[(h_D - h_{D1}) + (h_{D1} - h_{B1})]$$

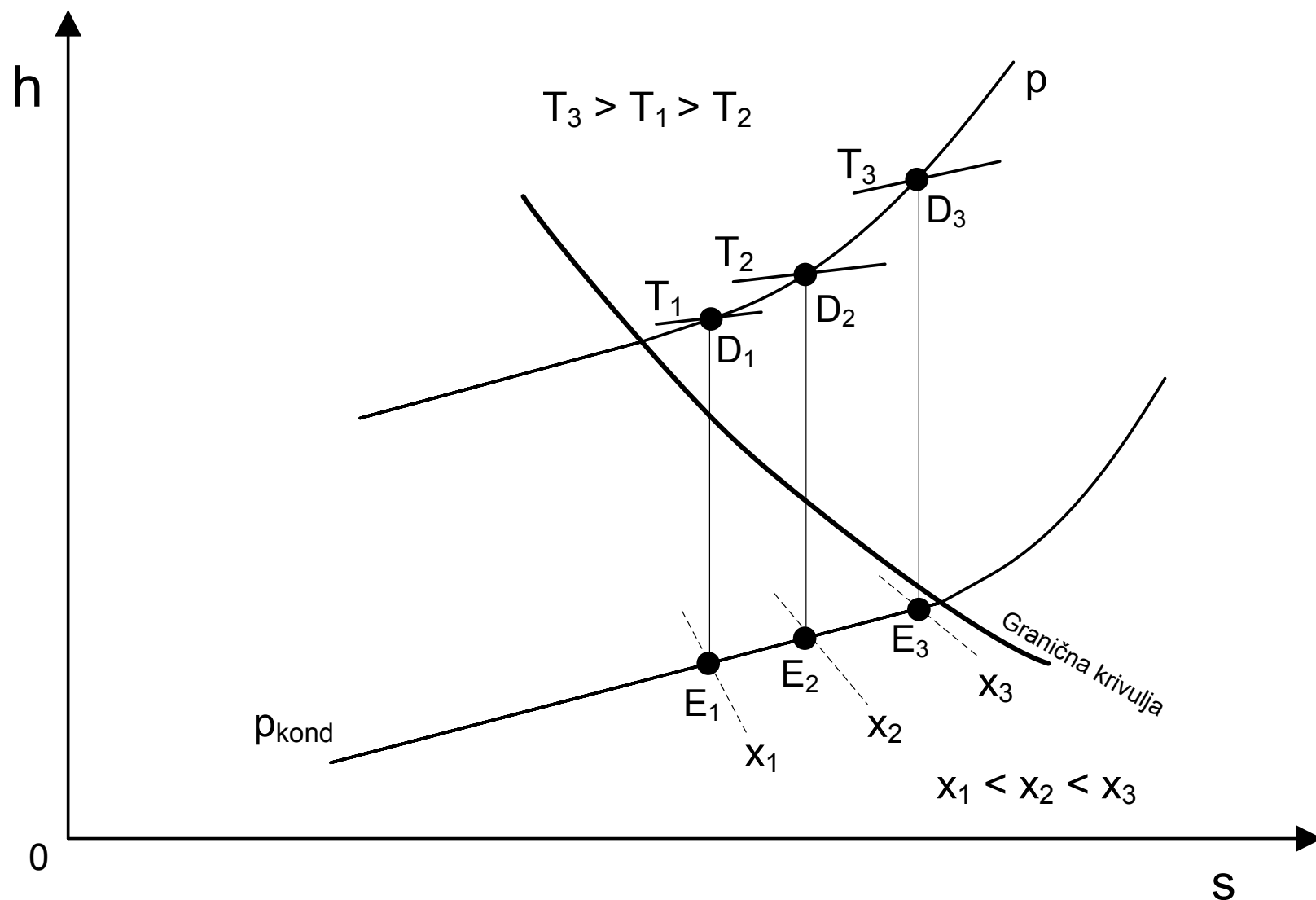
$$\eta_{ter} = \frac{h_D - h_E + a(h_D - h_{D1})}{h_D - h_A + a(h_D - h_{D1})}$$

Uvaživši relaciju $a \cdot (h_{D1} - h_{B1}) = 1 \cdot (h_{B1} - h_A)$

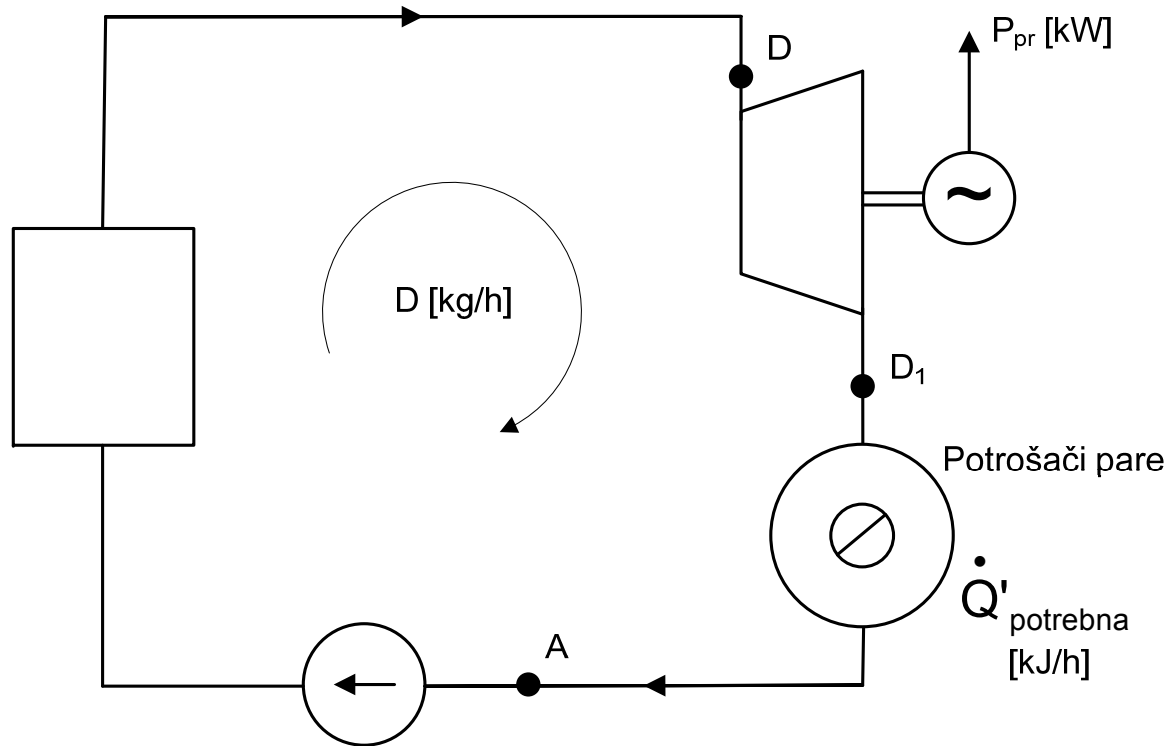
Utjecaj tlaka i temperature svježe pare



Utjecaj tlaka i temperature svježe pare



Kombinirana proizvodnja pare i električne energije



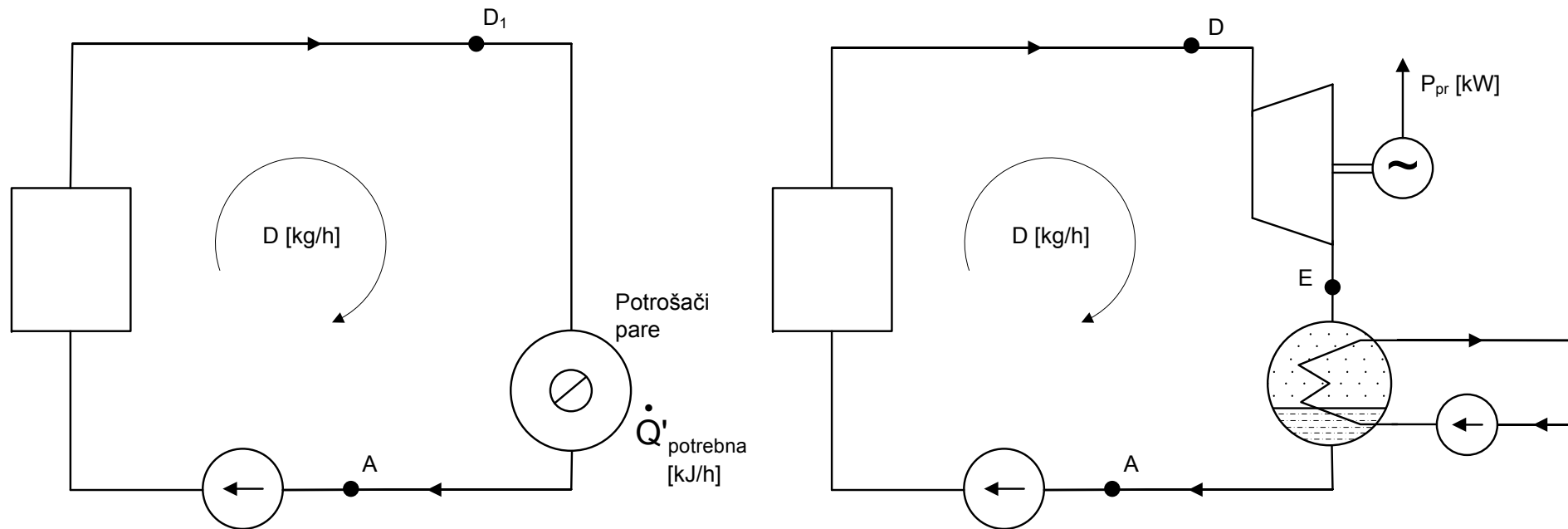
$$D = \frac{\dot{Q}'_p}{h_{D1} - h_A} [\text{kg/h}]$$

$$P_{pr} = D(h_D - h_{D1}) [\text{kW}]$$

$$\dot{Q}'_{tr} = \dot{Q}'_p + P_{pr} \quad \dot{Q}'_{dov} = D(h_D - h_A) [\text{kJ/h}]$$

$$\eta_1 = \frac{\dot{Q}'_p + P_{tr}}{\dot{Q}'_{dov}} = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{h_D - h_A}$$

Odvojena proizvodnja pare i električne energije



$$D_p = \frac{\dot{Q}_p''}{h_{D1} - h_A} [kg/h] \quad D_e = \frac{P_{pr}}{h_D - h_E} [kg/h] \quad \dot{Q}_{dov}'' = D_p (h_{D1} - h_A) + D_e (h_D - h_A)$$

$$\eta_2 = \frac{D_p (h_{D1} - h_A) + D_e (h_D - h_E)}{D_p (h_{D1} - h_A) + D_e (h_D - h_A)}$$

Usporedba stupnjeva djelovanja

$$P_{pr} = P_{tr} \text{ i } \dot{Q}'_p = \dot{Q}''_p \quad D_e(h_D - h_E) = P_{tr} = P_{pr} = D(h_D - h_{D1})$$

$$D_p = D \quad \eta_2 = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{(h_{D1} - h_A) + \frac{D_e}{D}(h_D - h_A)} \quad D_e(h_D - h_E) = D(h_D - h_{D1})$$

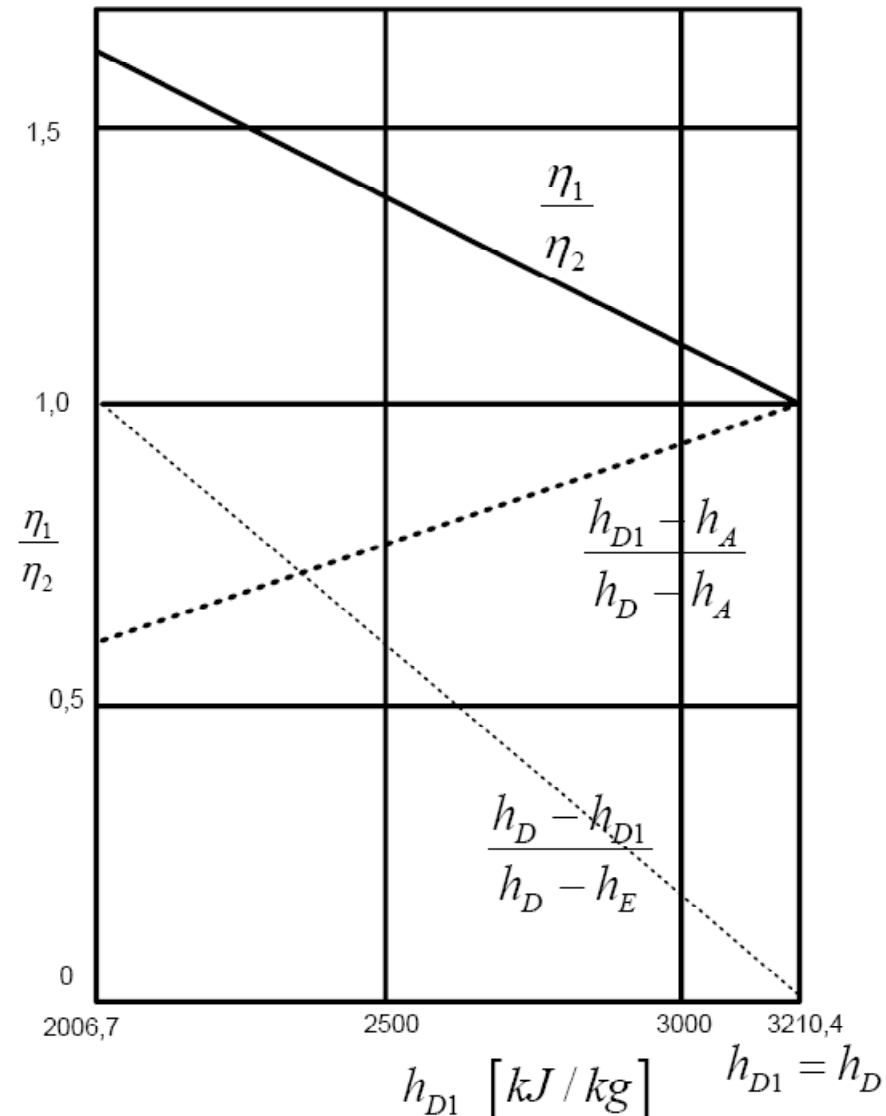
$$P_{tr} = D_e(h_D - h_E) \quad D_e = \frac{P_{tr}}{h_D - h_E} \quad P_{tr} = P_{pr} \quad D = \frac{P_{pr}}{h_D - h_{D1}}$$

$$\eta_2 = \frac{(h_{D1} - h_A) + (h_D - h_{D1})}{(h_{D1} - h_A) + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}(h_D - h_A)} \quad \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{h_{D1} - h_A}{h_D - h_A} + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}$$

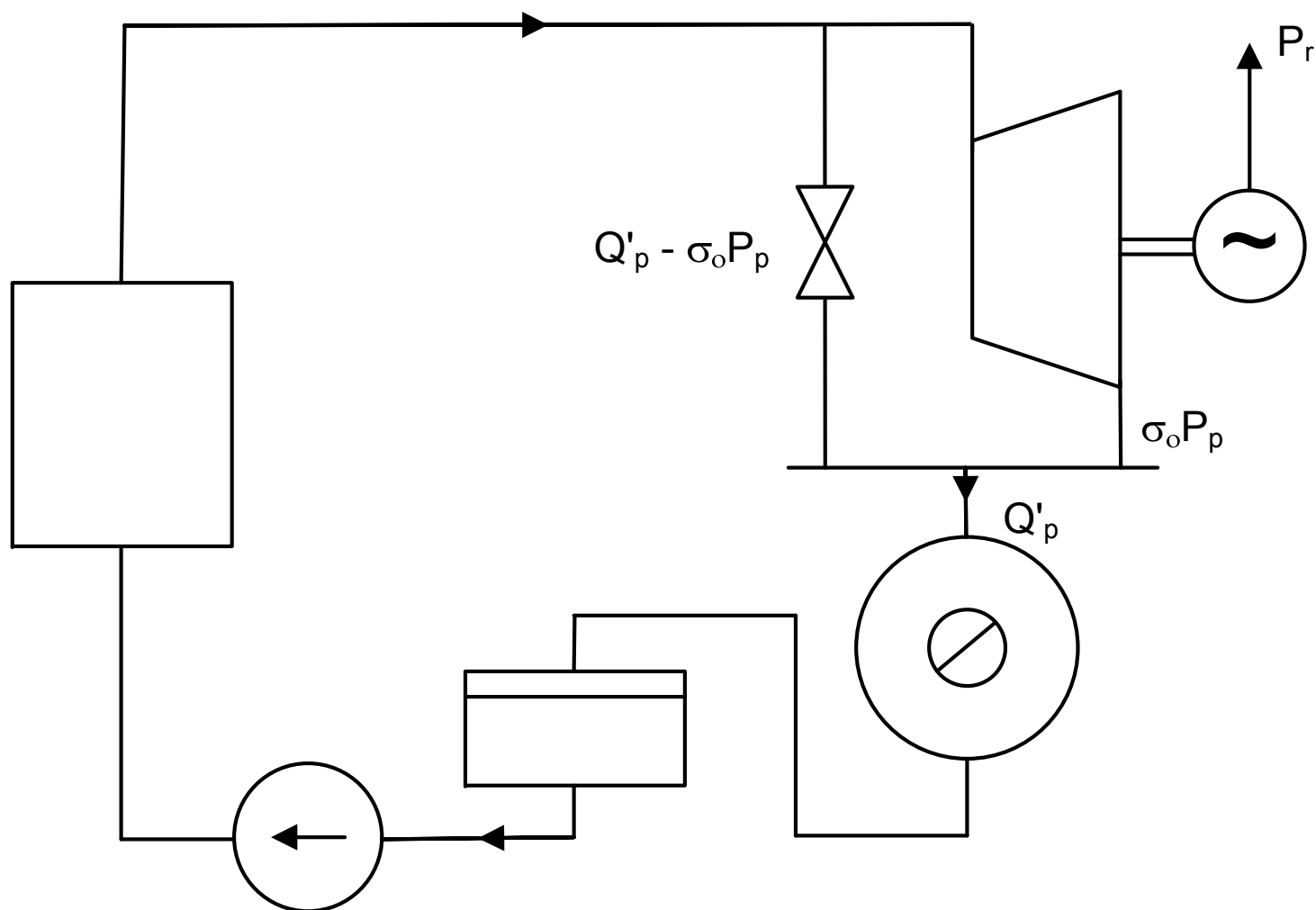
Usporedba stupnjeva djelovanja

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{h_{D1} - h_A}{h_D - h_A} + \frac{h_D - h_{D1}}{h_D - h_E}$$

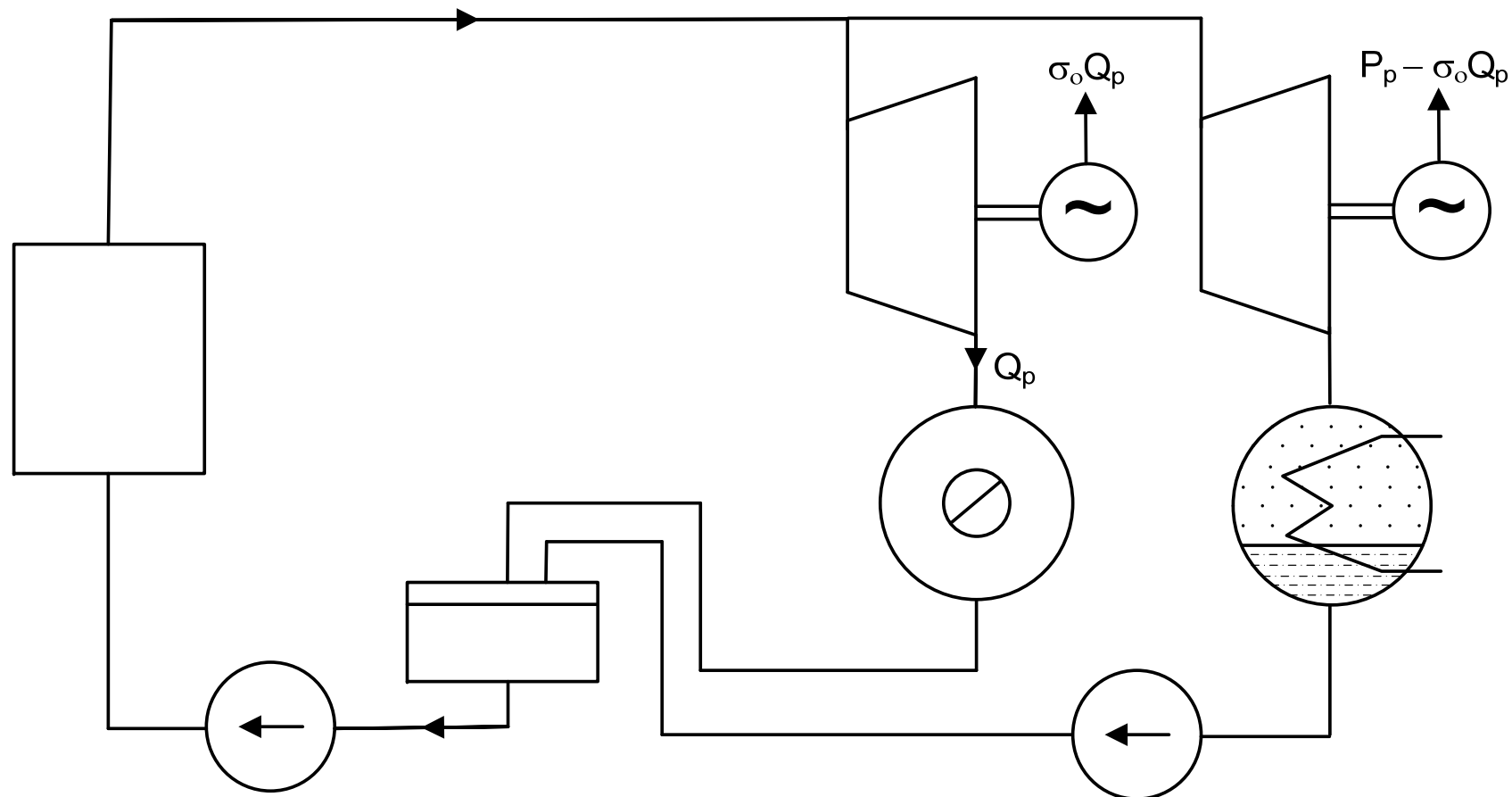
- h_{D1} ovisi o potrebama parnih potrošača
- vrijednosti su h_D , h_E i h_A određene izvedbom termoelektrane
- h_{D1} se kreće u granicama h_D i h_E
- za sve $h_{D1} < h_D$ stupanj je djelovanja η_1 veći od η_2 jer je $\eta_1/\eta_2 > 1$



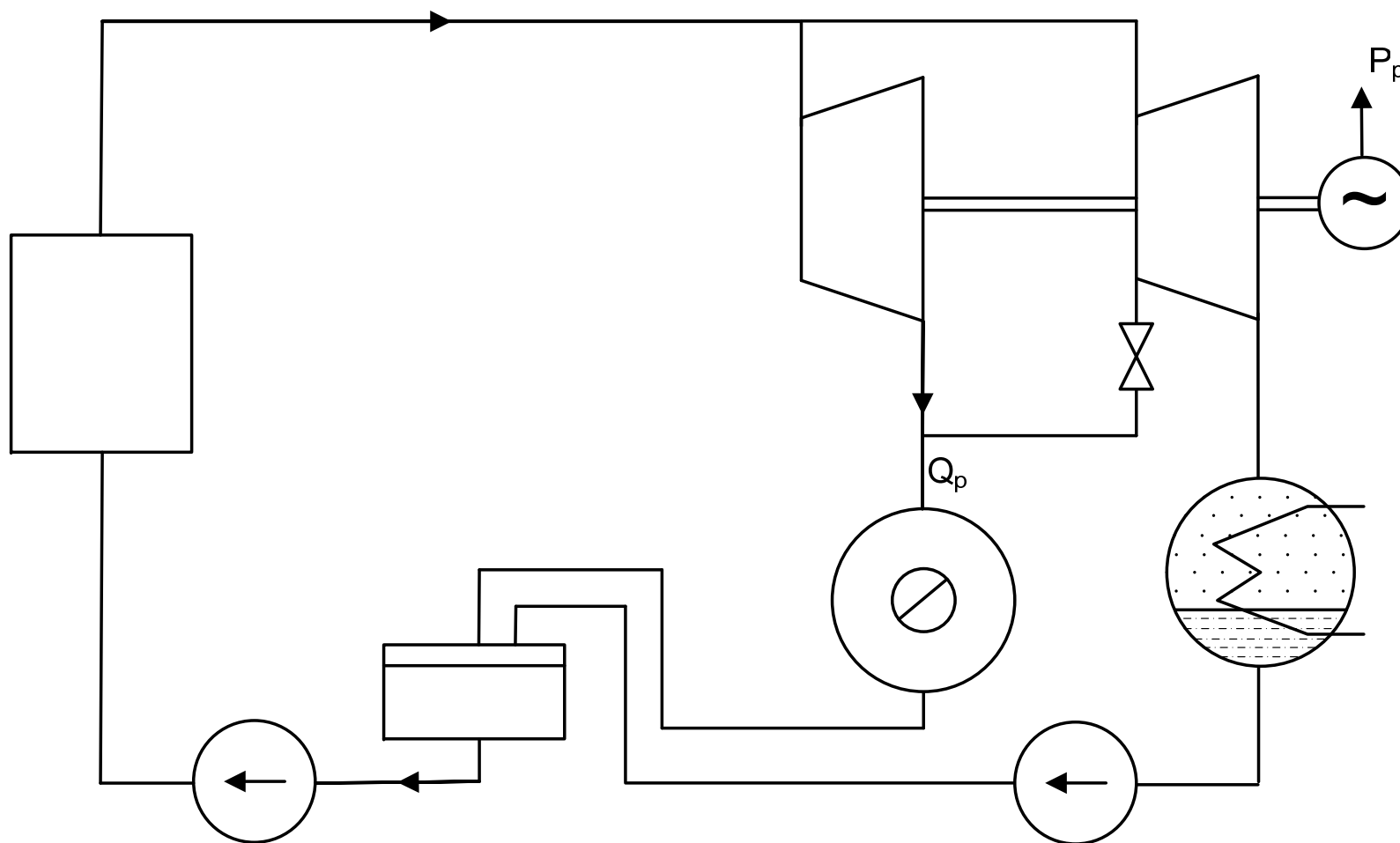
Različite sheme spoja



Različite sheme spoja



Različite sheme spoja



Zadaci

- Odredite maksimalni mehanički rad koji možemo dobiti iz 1 m³ vakuuma. Tlak je okolice 100 kPa, a temperatura 300 K.

Rj.

Budući da vakuum ne sadrži masu, $m = 0$, to je $U = mu = 0$, $S = ms = 0$, dobivamo:

$$\begin{aligned} E_{kS_{\text{vakuum}}} &= W_{\text{maxvakuum}} = U - U_{\text{ok}} - T_{\text{ok}}(S - S_{\text{ok}})_s + p_{\text{ok}}(V - V_{\text{ok}}) = \\ &= [0 - 300 \cdot 0 + 100 \cdot (1 - 0)] \text{ kJ} = 100 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$V_{\text{ok}} = 0$: u stanju je okolice volumen vakuuma jednak nuli

Objašnjenje: da bi se ostvario vakuum, pumpa za vakuum troši eksergiju (mehanički rad). Vakuum je dakle produkt obavljanja rada. Energija je neuništiva, taj mehanički rad (eksergija) ostaje pohranjen u vakuumu; vakuum posjeduje eksergiju ili „radnu sposobnost“.

Zadaci

- 1 kg vode, početne temperature 25°C, zagrijava se adijabatski, izložen utjecaju konstantnog tlaka okolice, električnom grijalicom na 90°C. Odredite energetske i eksergetski stupanj djelovanja procesa.

Rj.

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12} \text{ [J/kg]}; q_{12} = 0 \text{ (adijabatski sustav), } u_2 - u_1 = -w_{12}$$

$$w_{12} = w_{el.en} + p_{ok}(v_2 - v_1) \text{ (} p_{ok}(v_2 - v_1) = w_{po} \text{ rad je potiskivanja okolice zbog promjene volumena vode koja se zagrijava)}$$

$$w_{12} = -(w_{el.en} + w_{po}) = u_2 - u_1 \text{ (} m = 1 \text{ kg)}$$

$$w_{el.en} = u_2 - u_1 + w_{po} = u_2 - u_1 + p_{ok}(v_2 - v_1) = u_2 + p_{ok}v_2 - (u_1 + p_{ok}v_1) = \\ = u_2 + p_2v_2 - (u_1 + p_1v_1) = h_2 - h_1 \text{ (} p_{ok} = p_1 = p_2)$$

Iz tablica dobivamo:

$$u_1 = 105 \text{ kJ/kg, } h_1 = 105 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = 377 \text{ kJ/kg, } h_2 = 377 \text{ kJ/kg}$$

(očito, promjena je volumena vode toliko mala zbog zagrijavanja od 25 do 90°C da je mehanički rad potiskivanja okolice zanemarive veličine)

Dobivamo:

$$-w_{el.en} = 272 \text{ kJ/kg; } -W_{el.en} = 272 \text{ kJ (} m = 1 \text{ kg)}$$

Zadaci

Energetski je stupanj djelovanja dakle:

$$\eta_t = \frac{\text{željeni} \cdot \text{oblik} \cdot \text{energije} \cdot (\text{izlaz})}{\text{potrebiti} \cdot \text{oblik} \cdot \text{energije} \cdot (\text{ulaz})} = \frac{h_2 - h_1}{-w_{el.en}} \cdot 100\% = \frac{272}{272} \cdot 100\% = 100\%$$

Dakle je energetski stupanj djelovanja, stupanj djelovanja definiran na osnovi 1. glavnog stavka termodinamike jednak 1, 100%.

Eksergetski (eksergijski) stupanj djelovanja definiran je kao omjer eksergije dobiveni iz procesa i eksergije dovedene u proces:

$$\zeta = \frac{\text{izlazna} \cdot \text{eksegija}}{\text{ulazna} \cdot \text{eksergija}}$$

$$\text{eksergija}_{\text{zagrijane vode}} = h_2 - h_1 - T_{\text{ok}}(s_2 - s_1) \text{ [J/kg]}$$

Iz tablica dobivamo ($p_1 = p_2 = p_{\text{ok}}$): $s_1 = 0,367 \text{ kJ/kgK}$; $s_2 = 1,193 \text{ kJ/kgK}$,

pa je eksergija zagrijane vode:

Zadaci

$$\text{eksergija}_{\text{zagrijane vode}} = 377 - 105 - 300(1,193 - 0,367) = 24,2 \text{ kJ/kg}$$

Eksergetski je stupanj djelovanja dakle jednak

$$\zeta = \frac{24,2}{272} 100\% = 8,9\%$$

(272 → električna je energija eksergija)

Dakle se, u ovom slučaju, preko 90% dovedene eksergije pretvara u anergiju u procesu pretvorbe u unutrašnju kaloričku energiju. Očito, zagrijavanje električnom energijom (eksergijom) energetski je (eksergetski) nepovoljan proces.

Ukratko

Govorili smo o Rankineovom kružnom procesu, procesu koji se, zbog nemogućnosti provođenja Carnotovog kružnog procesa, odvija u termoelektranama s parnim turbinama.

Opisali smo realne procese u termoelektrani i definirali pokazatelje takvih procesa: stupnjeve djelovanja.

Budući da je među njima najvažniji, i ujedno najlošiji (najmanji), termički stupanj djelovanja, predstavili smo procese njegovog povećanja.