

**Термодинамика Б**

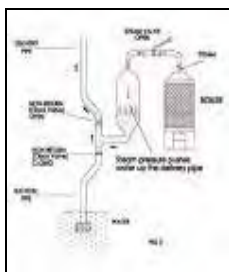
**“Handout” 6 - предавања**

**пролећни семестар шк. 2014/2015. године**

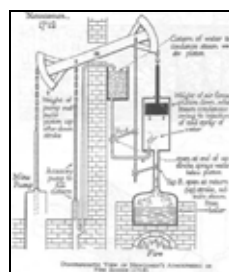




Папен



Сејври

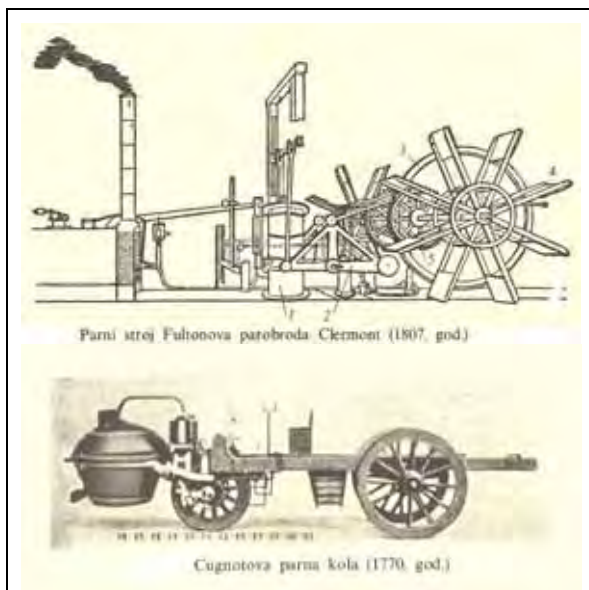


Њукомен

Тек крајем 17.века (1690.г.) француз Дени Папен је саградио прву тзв. атмосферску парну машину донекле сличну парној клипној машини. Сличне машине су направили и енглези Томас Сејври и Томас Њукомен (1711.год.). А 1788.г. енглез Џејмс Ват је изумео одн. конструисао прву класичну парну машину са цилиндром и клипом.



... прва класична парна машина – Џејмс Ват ...



И све до проналаска мотора СУС, читав један век (крај 18.– крај 19.) парна машина је била једина машина која је покретала све постојеће уређаје. Људски ум је изумео парни аутомобил (француз Кињо), парну локомотиву (енглез Стивенсон), пароброд (американац Фултон), разбој за ткање на парни погон и многе друге уређаје ...

У Манчестеру и Лиону, у близини богатих налазишта и рудника угља, саграђене су и прве текстилне фабрике. То је значило крај феудализма и нагли развој капитализма и јачање две нове колонијалне империје Енглеске и Француске које су загосподариле светом и потиснуле Шпанију и Португалију у други план. Убрзано се развијале САД.

Парна машина је нашла своје место и у музици тог доба. Чује се као основни ритам у чувеној композицији Мориса Равела „Болеро“ где композитор дочарава натпевавање радника текстилне фабрике у паузи за доручак док у позадини добује рад текстилних машина односно разбоја које погони парна машина. (Там татата там татата там там).

Крајем 19.века конструисана је прва парна турбина (де Лавал, Кертис) а исто тако и први мотори СУС (Ото, Дизел, Дајмлер). Почетком 20.века долази до развоја првих термоелектрана у којима се користе парне турбине које потискују парну машину из употребе јер су мањих габарита а могу се развијати много веће снаге. Резултат тог развоја је појава блокова који су слични данашњим парнотурбинским постројењима. Дакле парнотурбинска постројења су парни мотори са спољашњим сагоревањем [1] које се врши у гасном тракту а топлота пламена (врелих гасова) преноси на пару у парном тракту. Пара покреће турбину и преко заједничког вратила електрогенератор.

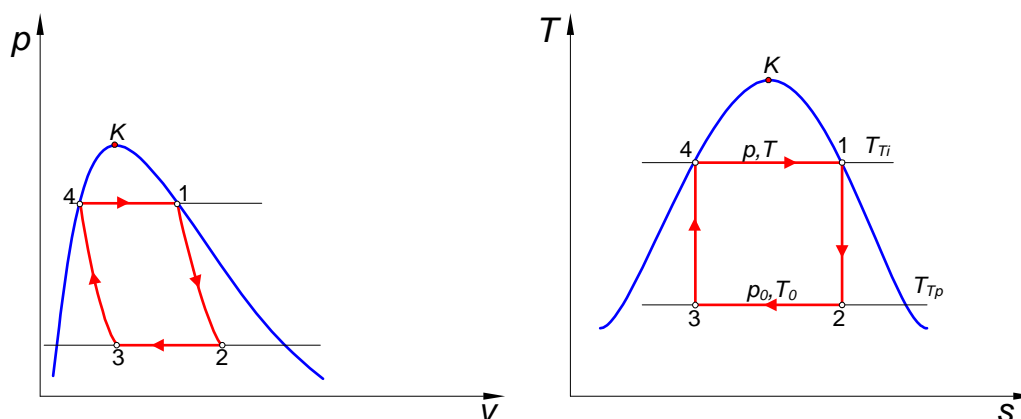
Проучићемо деснокретне циклусе који су аналитичка основа за рад парнотурбинских постројења (идеални – Карноов и реални – Ранкин Клаузијусов). У тим постројењима се добија технички рад на вратилу турбине за генер. електричне енергије из топлоте сагоревања (у термоелектранама) или топлоте нуклеарне фисије (у нуклеарним електранама). Радни флуид је вода (тј водена пара) због њеног изобиља у природи.

**На реду је термодинамичка анализа деснокретних кружних процеса (циклуса) са воденом паром да бисмо постигли циљ – безбедно и поуздано постројење (разумне цене) са што већим термодинамичким степеном корисности. При томе се полази од идеала коме увек тежимо – повратног Карноовог кружног процеса.**

### КАРНО-ОВ КРУЖНИ ПРОЦЕС са ВОДЕНОМ ПАРОМ

Уочили смо да је код идеалног гаса доста једноставно остварити услови за одвијање изохорског, изобарског и адијабатског процеса док је - практично немогуће остварити услове за изотермни процес - а самим тим и Карноов циклус који садржи 2 изотерме.

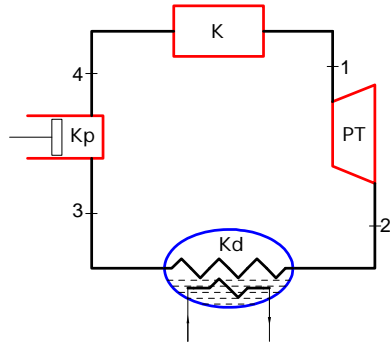
Овај проблем код водене паре лако решавамо - истина искључиво у области влажне паре, где се изотерма поклапа са изобаром. Испаравање и кондензација су изобаро-изотермски процеси. Логично - сместићемо Карноов циклус у област влажне паре.



Идеални циклус у области влажне паре. Сви процеси повратни  $\Rightarrow$  Карноов процес.

1→2 експанзија сувозасићене паре до стања влажне паре у парној турбини,

2→3 изотермско одвођење топлоте у кондензатору (у области двофазне мешавине кључале воде и суве паре) одвија се при константном притиску уз делимичну кондензацију паре као и смањење степена сувоће,  
 3→4 компресија влажне паре у компресору - до стања кључале воде,  
 4→1 изотермско довођење топлоте у котлу (од стања кључале воде до суве паре) одвија се при сталном притиску уз потпуно испаравање и повећање  $x$  од 0 до 1.



Степен корисности

$$\eta_t^c = 1 - \frac{|q_0|}{q_d} = 1 - \frac{T_0 \cdot (s_2 - s_3)}{T \cdot (s_1 - s_4)}$$

$$q_d = q_{41} = h_1 - h_4 = r = T(s_1 - s_4)$$

доведена количина топлоте

$$-q_0 = -q_{23} = h_2 - h_3 = r_0(x_2 - x_3) = T_0(s_2 - s_3)$$

одведена количина топлоте

$$|w_{kor}| = q_d - |q_0| = (T - T_0) \cdot (s_2 - s_3)$$

користан (технички) рад

$$-w_{dob} = -w_{t12} = h_1 - h_2$$

одведени = добијени (технички) рад

$$w_{utr} = w_{t34} = h_4 - h_3$$

доведени = утрошени (технички) рад

$$|w_{kor}| = |w_{dob}| - w_{utr} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$$

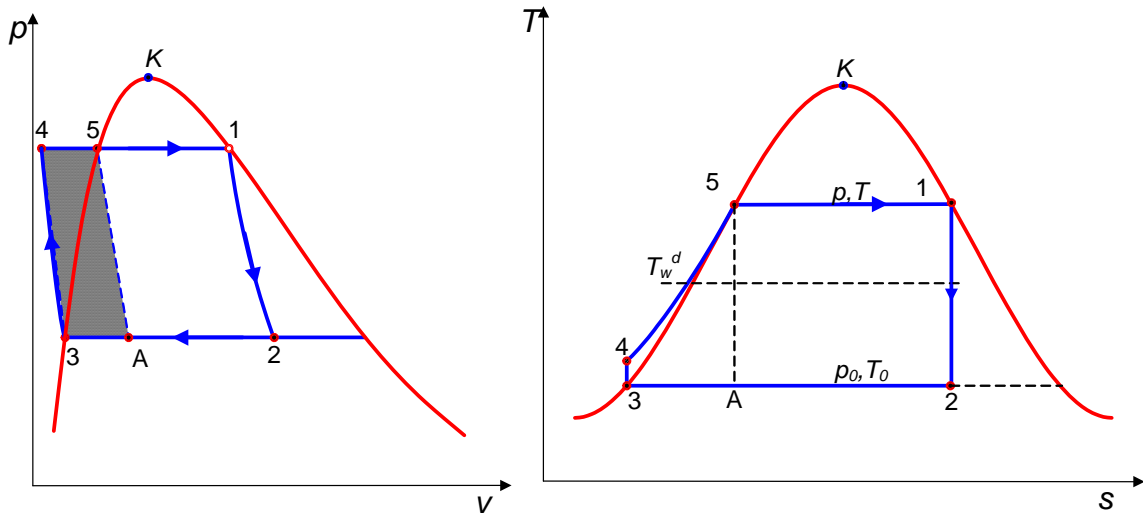
користан (технички) рад

Техничко остварење процеса заснованог на Carnot циклусу у области влажне паре није прихватљиво због експанзије и компресије влажне паре. Разлози су следећи.

- Капи воде у 2-фазном току при великим брзинама оштећују материјал лопатица турбине и компресора.
- При компресији влажне паре може доћи до хидрауличног удара (одн. наглог повећања притиска при потпуној кондензацији паре).
- За сабијање влажне паре би био потребан компресор превеликих димензија.

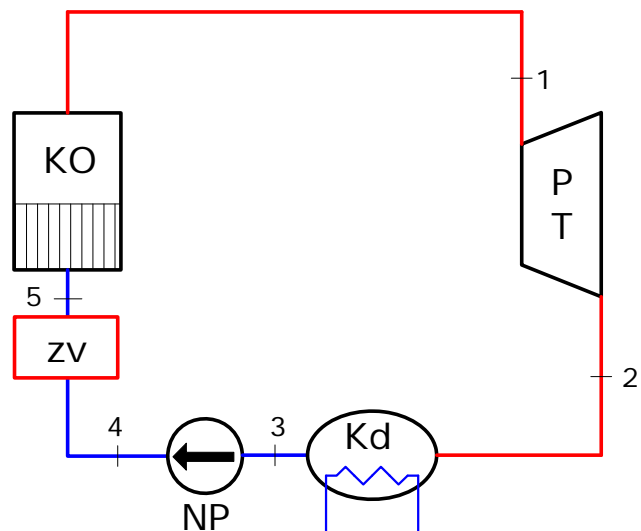
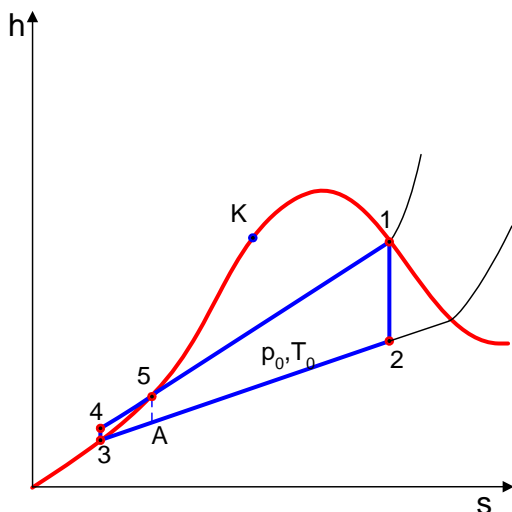
Проблеме решавамо потпуном кондензацијом и коришћењем пумпе знатно мањих габарита. Вршимо модификацију Карно циклуса по предлогу Ранкина и Клаузиуса.

## RANKINE – CLAUSIUS-ОВ КРУЖНИ ПРОЦЕС



$P_{A345A}$  = уштеда у техничком раду  $w_t$  у односу на претходни циклус

$$-w_{t,34} = \int_{p_3}^{p_4} v(p) dp$$



- 1→2 експанзија сувозасићене (суве) паре до стања влажне паре у парној турбини,  
 2→3 изотермско одвођење топлоте у кондензатору до потпуне кондензације паре,  
 3→4 компресија воде у пумпи (технички рад по јединици масе је мањи при компресији воде у пумпи него при компресији влажне паре у компресору),  
 4→1 изобарско довођење топлоте у котлу (4→5 изобарско загревање, 5→1 изобарско (изотермско) испаравање).

$q_d = q_{41} = h_1 - h_4$	доведена количина топлоте
$-q_o = -q_{23} = h_2 - h_3 = r_o(x_2 - 0) = T_o(s_2 - s_3)$	одведена количина топлоте
$ w_{kor}  = q_d -  q_o $	користан (технички) рад
$-w_{dob} = -w_{t12} = h_1 - h_2$	одведени = добијени (технички) рад
$w_{utr} = w_{t34} = h_4 - h_3$	доведени = утروшени (технички) рад
$ w_{kor}  =  w_{dob}  - w_{utr} = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$	користан (технички) рад

Степен корисности Rankine-Clausius-овог циклуса је мањи од  $\eta_T$  Carnot-овог циклуса

$$\eta_t^{RC} = 1 - \frac{T_o}{T_m^d} < \eta_t^c \quad T_m^d < T$$

$$\eta_t^{RC} = \frac{|w_t|}{q_{dov}} = \frac{q_{dov} - q_{odv}}{q_{dov}} = \frac{(h_1 - h_4) - (h_2 - h_3)}{(h_1 - h_4)} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)} = \frac{|w_{turb}| - w_{pumpe}}{q_{dov}}$$

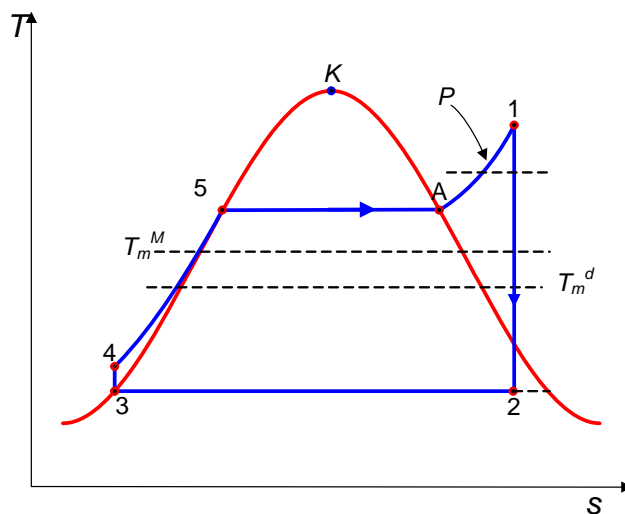
Снага турбине

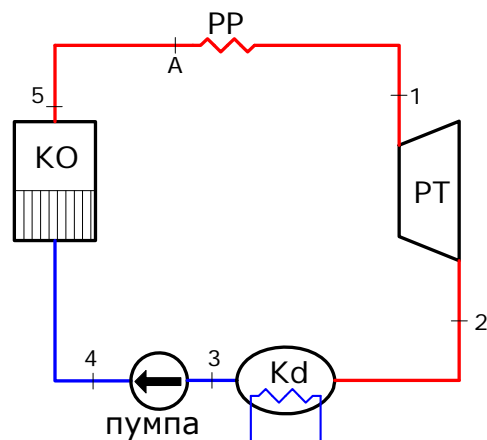
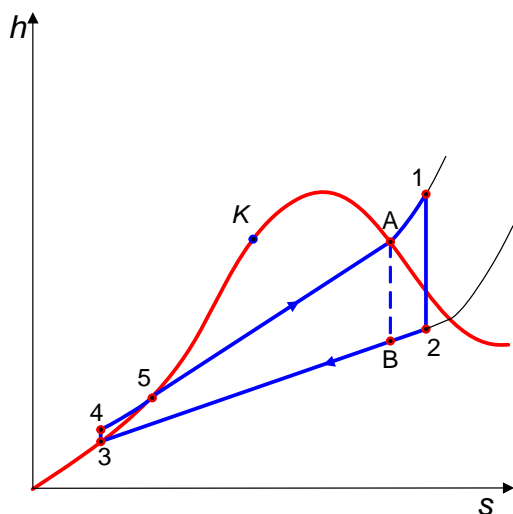
$P = \dot{m}(h_1 - h_2)$ , где је  $\dot{m}$  (kg/s) проток паре кроз турбину.

### ПОБОЉШАЊА РС ЦИКЛУСА (КАРНОТИЗАЦИЈА)

ПРИ ТРАЖЕЊУ ОПТИМАЛНОГ ЦИКЛУСА ПОШТУЈЕМО СЛЕДЕЋИ РЕДОСЛЕД:  
**ПРВО** – ОСИГУРАВАМО БЕЗБЕДНОСТ И ПРАКТИЧНОСТ РАДА (**већ постигнуто**)  
**ДРУГО** – ПОВЕЋАВАМО ТЕРМОДИНАМИЧКИ СТЕПЕН КОРИСНОСТИ (**то следи**)

Уводи се **прегревање паре**, мања је влажност паре при експанзији у турбини и већи рад на вратилу турбине. Прегревање се врши изобарски од стања А до 1 (на слици).



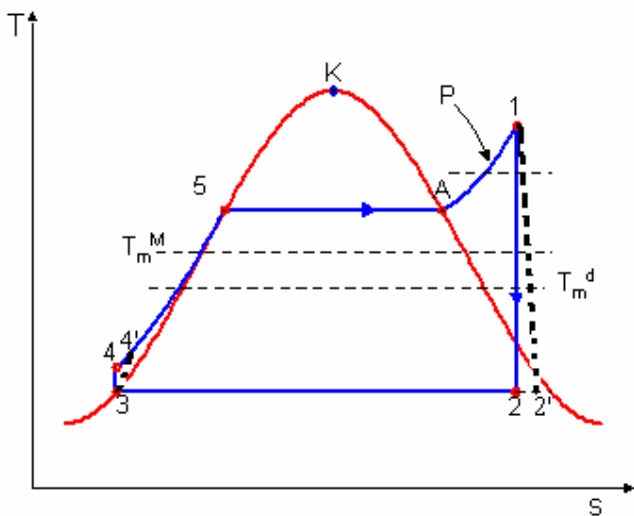


Са повећањем температуре прегрејане паре на улазу у парну турбину повећава се и термодинамички степен корисности Ранкин-Клаузијусовог кружног процеса.

$$T_m^M > T_m^d$$

$$\eta_t^{RC}(T_m^M) > \eta_t^{RC}(T_m^d)$$

Ограничење повећању температуре паре на улазу у турбину је материјал. Треба да се остваре задовољавајуће механичке карактеристике материјала на високој температури, у току дугог периода рада. Челик за високе радне температуре је прескуп.



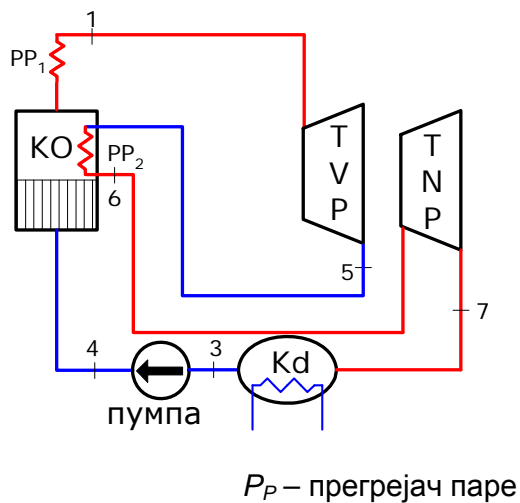
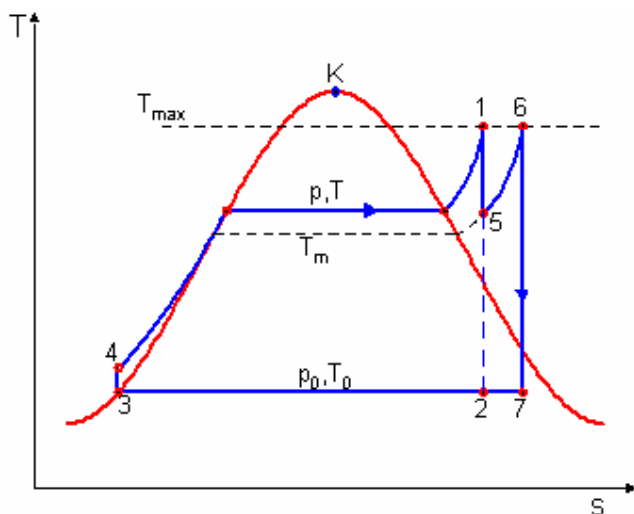
$$\eta_d^t = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$$

$$\eta_d^p = \frac{h_4 - h_3}{h_4 - h_{3'}}$$



## 1. Побољшање – међупрегревањем (догревањем) паре

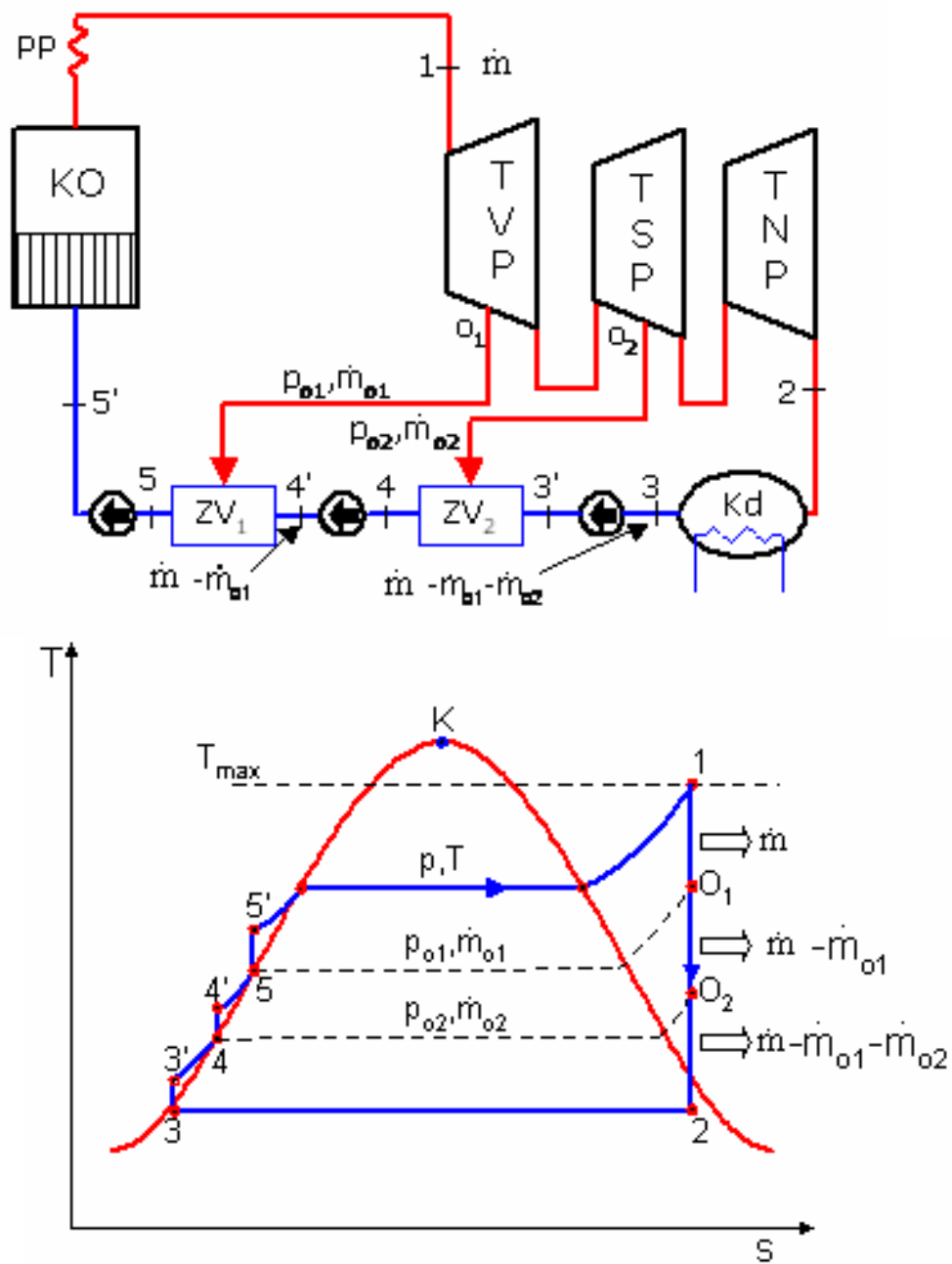
Смањује се влажност паре у последњим ступњевима турбине и повећава се степен корисности повећањем средње термодинамичке температуре.



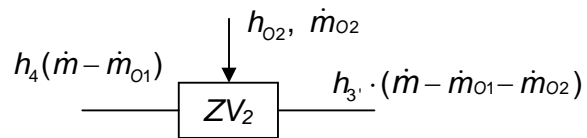
- са више међупрегревања приближавамо се изотерми.
- у пракси се обично иде са 2 до 3 међупрегревања

## 2. Побољшање – Регенеративним загревањем напојне воде (а)

### (а) Регенерација са мешним загрејачем напојне воде



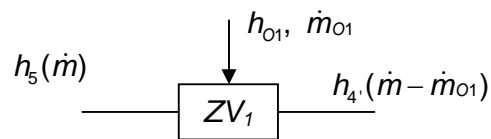
ZV2: масени и енергетски биланс



$$(\dot{m} - \dot{m}_{o1} - \dot{m}_{o2}) + (\dot{m}_{o2}) = (\dot{m} - \dot{m}_{o1})$$

$$h_{3'} \cdot (\dot{m} - \dot{m}_{o1} - \dot{m}_{o2}) + h_{o2} \cdot (\dot{m}_{o2}) = h_4 \cdot (\dot{m} - \dot{m}_{o1})$$

ZV1: масени и енергетски биланс

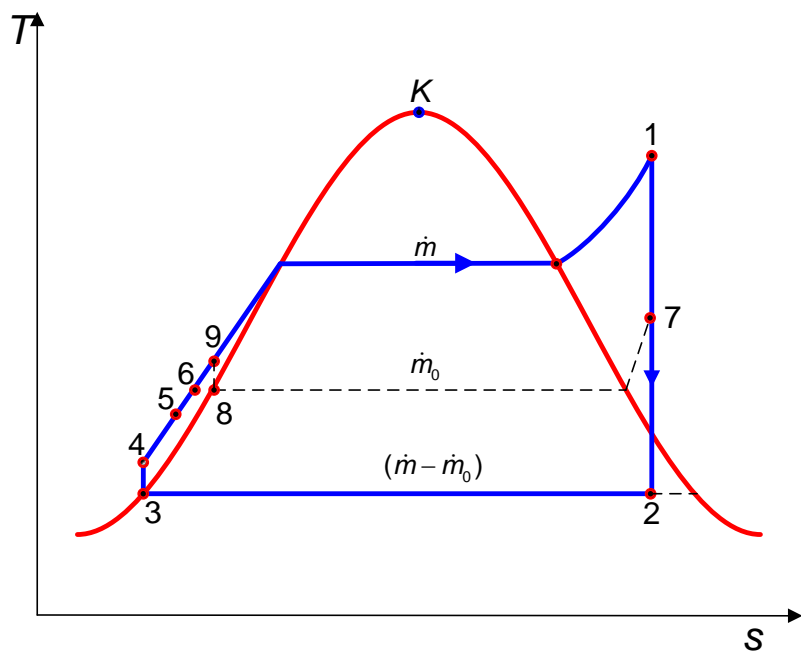
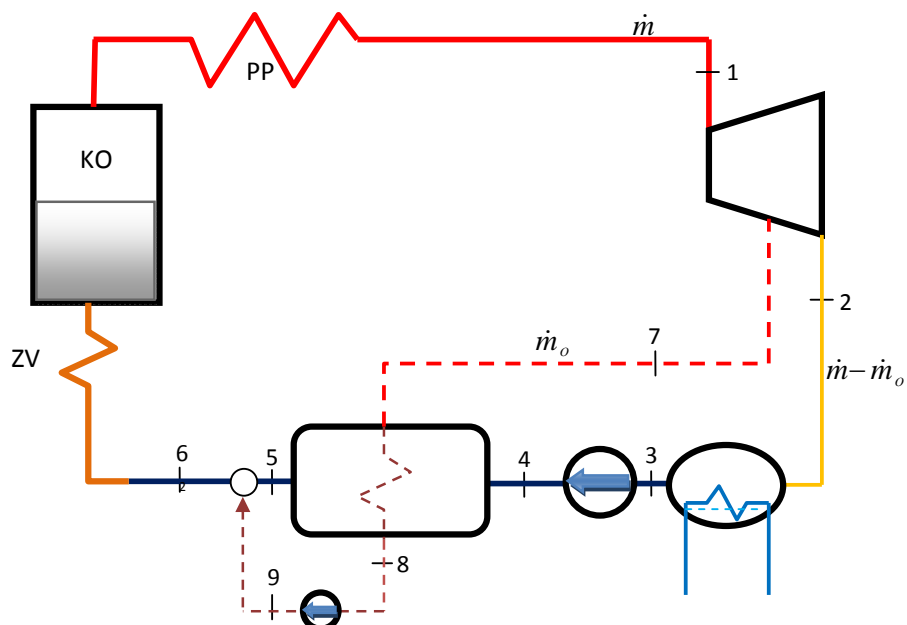


$$(\dot{m} - \dot{m}_{o1}) + (\dot{m}_{o1}) = (\dot{m})$$

$$h_{4'} \cdot (\dot{m} - \dot{m}_{o1}) + h_{o1} \cdot (\dot{m}_{o1}) = h_5 \cdot (\dot{m})$$

## 2. Побољшање – Регенеративним загревањем напојне воде (б)

### (б) Регенерација са површинским загрејачем напојне воде



$$(\dot{m} - \dot{m}_o) + \dot{m}_o = \dot{m}$$

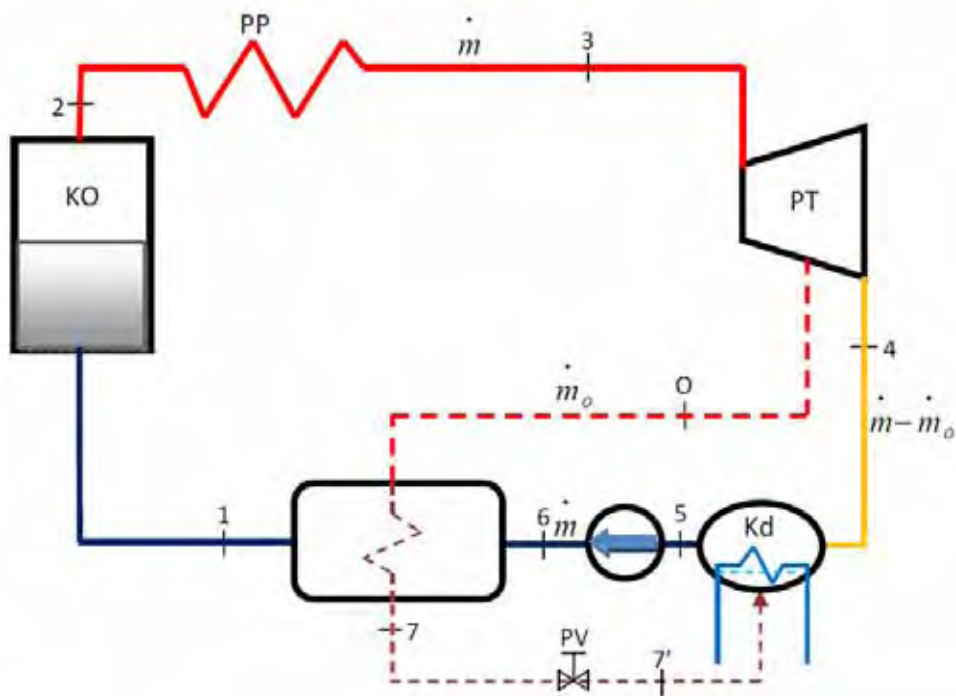
$$(\dot{m} - \dot{m}_o) \cdot h_4 + \dot{m}_o \cdot (h_7) = \dot{m} \cdot (h_6)$$

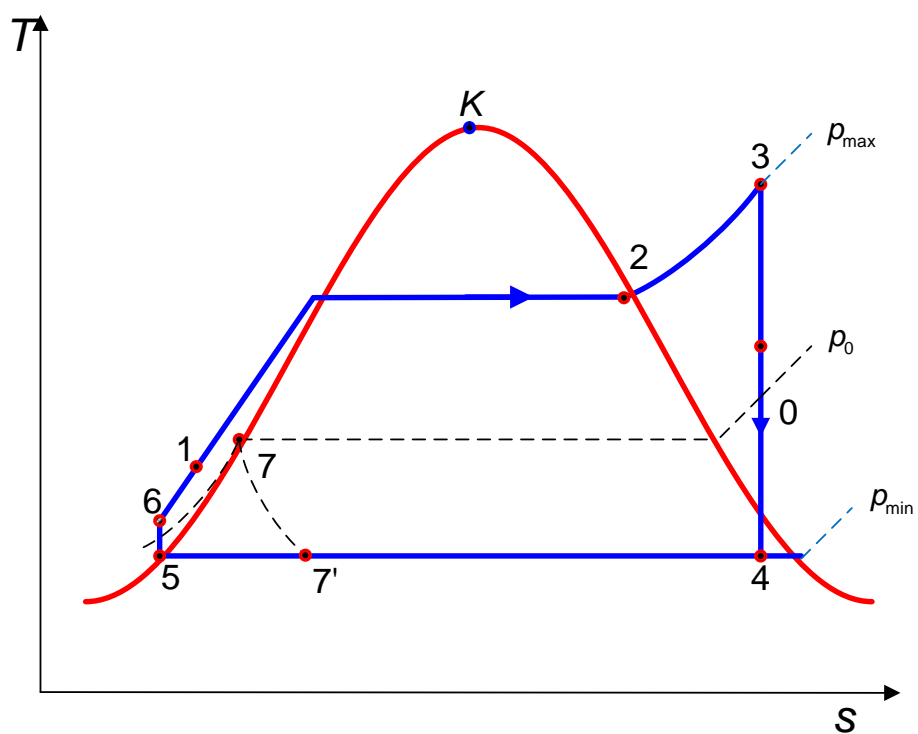
$$(\dot{m} - \dot{m}_o) \cdot h_4 + \dot{m}_o \cdot (h_7) = (\dot{m} - \dot{m}_o) \cdot h_5 + \dot{m}_o \cdot (h_8) \dots \dots \dots itd.$$

Стања струја водене паре и воде које се мешају су далеко ближа него у претходном примеру. Стања 5, 6 и 9 се мало разликују. Тако се избегава опасност од оштећења мешне коморе до ког може доћи када се мешају директно ВРЕЛА прегрејана пара и ХЛАДНА напојна вода. У РЕАЛНИМ постројењима се користи само ОВАЈ ПРИСТУП.

Изрази за масени биланс, енергетски биланс и термодинамички степен корисности важе.

Реалан случај:





Енергетски биланс површинског размењивача:

$$\dot{m}_o \cdot h_o + \dot{m} \cdot h_6 = \dot{m} \cdot h_1 + \dot{m}_o \cdot h_7$$

Енергетски биланс кондензатора:

$$(\dot{m} - \dot{m}_o) \cdot h_4 + \dot{m}_o \cdot h_7 = \dot{m} \cdot h_5 + \dot{Q}_{kd}$$