

Technické minimum
TERMOMECHANIKA 2
(termodynamika pár)

- **Termodynamika pár**
 - Základné pojmy
 - Stavové veličiny
 - Tepelné diagramy pár
 - Tepelné cykly

TERMODYNAMIKA PÁR

ZÁKLADNÉ POJMY

- v niektorých technických zariadeniach sa používajú pary ako pracovná látka,
- parou sa nazýva plynné skupenstvo látok, ktoré je pri danom tlaku a teplote blízko stavu, v ktorom sa začína skvapalňovať,
- v tepelných elektrárnach je pracovnou látkou vodná para, v chladiacich zariadeniach pary chladív ako napr. čpavok, oxid uhličitý a pod.,
- pary v zariadeniach menia svoje skupenstvo, v niektorých častiach prúdia v kvapalnom stave,
- pri tepelných výpočtoch sa používajú vzťahy, ktoré správne popisujú vlastnosti pár,
- pre pary sa nemôžu všeobecne použiť vzťahy platné pre ideálne plyny,
- vlastnosti pár a výpočet stavových veličín pre vodnú paru je možné aplikovať aj pre pary rôznych ďalších látok

TERMODYNAMIKA PÁR

ZÁKLADNÉ POJMY

- pri výrobe pary sa dopravuje voda do kotla resp. parného generátora napájacím čerpadlom, v ktorom sa stláča na tlak, pri ktorom prúdi kotlom a postupne sa v ňom v dôsledku prívodu tepla mení na paru,
- množstvo tepla potrebné pre vývin pary určitého konečného stavu (tlak, teplota ...) sa nazýva *výrobné teplo pary*.
- prívodom tepla sa kvapalina najskôr zohrieva, až dosiahne pri danom tlaku bod varu (teplota, kedy začína vriieť) T_v ,
- voda, ktorá práve dosiahla začiatok varu sa nazáva *sýta kvapalina*,
- ďalším prívodom tepla sa teplota látky nemení, prebieha skupenská zmena, var (bublíny pary sa tvoria vo vnútri celého priestoru kvapaliny),
- počas varu (vyparovania) sa síce tlak a teplota nemenia, ale objem narastá,
- stav látky na konci vyparovania (všetka kvapalina sa premenila na paru) sa nazýva *sýta para*, táto neobsahuje žiadne kvapôčky kvapaliny,

TERMODYNAMIKA PÁR

ZÁKLADNÉ POJMY

- sýta kvapalina a sýta para majú pri danom tlaku rovnakú teplotu, ktorá sa nazýva teplota sýtosti,
- až po ďalšom prívode tepla začne teplota pary pri danom tlaku stúpať a para sa stáva **prehriatou parou**, teplota prehriatia T_{pp} je vyššia ako teplota varu pri danom tlaku,
- medzi počiatkom a koncom varu sú niektoré častice látky v stave sýtej kvapaliny a niektoré v stave sýtej pary, takáto zmes dvoch zložiek sa nazýva **mokrú para**, v technických zariadeniach je mokrá para väčšinou tvorená zmesou sýtej pary a kvapôčok rozptýlenej sýtej kvapaliny,

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY

- stav kvapalnej vody a prehriatej vodnej pary (podobne je to i pri iných látkach) sa určuje najčastejšie tlakom a teplotou,
- stav sýtej vody a sýtej pary je určený len tlakom, alebo len teplotou, druhá z týchto veličín musí mať jednoznačnú hodnotu, zodpovedajúcu hodnote z krivky napätia v rovnovážnom diagrame,
- stav mokrej pary sa určujeme tlakom alebo teplotou a navyše jej suchosťou,
- suchosť mokrej pary popisuje jej kvalitu, označuje sa „ x “ a definuje sa ako pomer množstva sýtej pary v mokrej pary k celkovému množstvu pary:

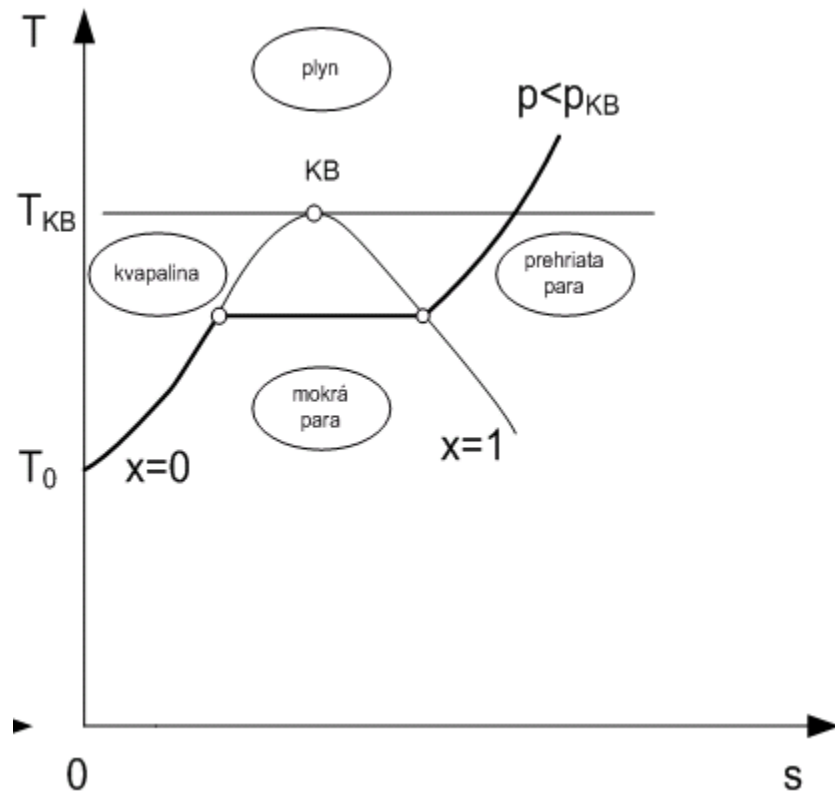
$$x = \frac{m_{sp}}{m_{mp}} \quad [\text{kg.kg}^{-1}]$$

- suchosť mokrej pary sa pohybuje medzi hodnotami $x=0$ (sýta kvapalina) a $x=1$ (sýta para).

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY - TEPELNÉ DIAGRAMY PÁR

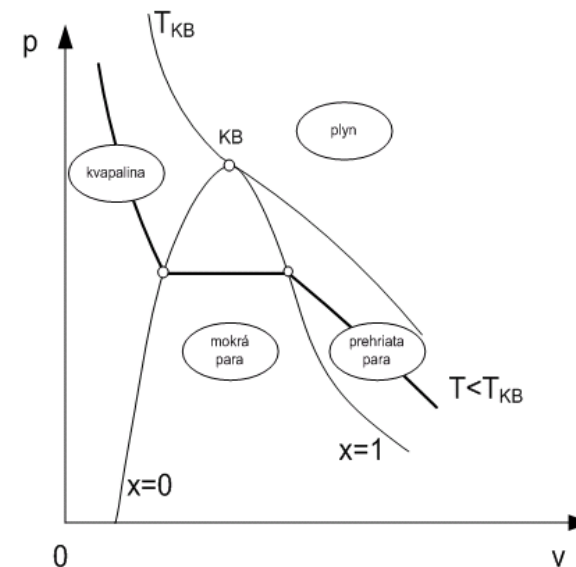
- z kritického bodu vychádzajú dve medzné krivky a prechádza ním kritická izoterma,
 - na ľavej medznej krivke sú stavy sýtej vody,
 - na pravej medznej krivke je stav sýtej pary,
 - vľavo od ľavej resp. dolnej medznej krivky ($x=0$) a pod kritickou teplotou je voda v kvapalnom stave,
 - vpravo od pravej resp. hornej medznej krivky ($x=1$) a pod kritickou teplotou sú stavy prehriatej pary,
-
- pod obidvomi medznými krivkami je oblasť mokrej pary, nad kritickou teplotou sa hovorí o stave vody ako o plyne,



TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY - TEPELNÉ DIAGRAMY PÁR

- z dôležité je, ako prebiehajú v p-v diagrame izotermy pre podkritické teploty, medzi medznými krivkami majú priamkový priebeh,
- podobne sú izobary pre podkritické tlaky priamkami medzi medznými krivkami v T-s diagrame,
- medzi medznými krivkami prebieha var vody alebo opačným smerom kondenzácia pary,
- oba procesy sú izobaricko-izotermické a preto **v oblasti mokrej pary v ktoromkoľvek diagrame izobary a izotermy splývajú,**



TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY

- ďalšie stavové veličiny (v , u , i ...) majú v danom stave vody alebo pary určité hodnoty,
- na označenie stavu sýtej kvapaliny sa používa jedna čiarka vpravo hore pri označení stavovej veličiny ($'$),
- pre sýtu paru sa používajú dve čiarky vpravo hore pri označení stavovej veličiny ($''$),
- k stavovým veličinám mokrej pary sa pripisuje index x , v_x je napr. špecifický objem mokrej pary,
- pre stavové veličiny prehriatej pary použijeme index $_{pp}$
- špecifický objem vody, ako takmer každej kvapaliny, je takmer nezávislý od tlaku, s rastom teploty sa však zväčšuje,
- objem prehriatej pary je podobne ako pri plynach závislý od tlaku i teploty a počíta sa zo stavovej rovnice plynov,
- jednoduchú stavovú rovnicu plynov možno použiť len pre vysoko prehriatu vodnú paru ($r=462 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$),

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY

- špecifický objem sýtej vody a sýtej pary závisí od príslušného tlaku alebo teploty sýtosti,
- špecifický objem mokrej pary závisí aj od suchosti pary x :

$$v_x = v' + x.(v'' - v')$$

- ak má mokrá para suchosť $x=0$, je vlastne sýtou kvapalinou a jej špecifický objem je $v_{x=0} = v'$, pri suchosti $x=1$ je sýtou parou a $v_{x=1} = v''$,
- pre výpočet hodnôt ďalších stavových veličín, t. j. u , i , s , je potrebné dohodou stanoviť, od ktorého ich stavu sa začínajú merať,
- v technických výpočtoch sa nepočíta s ich absolútnymi fyzikálnymi hodnotami,
- pre vodu je dohodnutým počiatkom pre meranie týchto veličín stav vody pri 0°C ,
- v tomto stave je určená vnútorná energia vody $u_0' = 0$ a entropia vody $s_0' = 0$
- index 0 sa týka teploty,

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY

- exaktne povedané, stavové veličiny vody nezávisia len od teploty, ale i od tlaku, závislosť vnútornej energie a entropie od tlaku je však tak nepatrná tak, že i pre vyššie tlaky môžeme pre vodu predpokladať $u_0 \approx 0$ a $s_0 \approx 0$,
- hodnotu entalpie vody pri 0°C vyjadruje pri daných predpokladoch nasledujúca rovnica:

$$i_0 \cong p \cdot v_0$$

- entalpia vody pri 0°C nie je nulová a závisí od tlaku

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY - ENTALPIA

- entalpia je pre tepelné výpočty najdôležitejšou stavovou veličinou,
- nasledujúci vzťah platí pre výpočet entalpie prehriatej pary:

$$i_{pp} = i_0 + q_k + l_v + q_p = i_0 + \underbrace{c_{ks} \cdot (T_v - T_0)}_{i'} + l_v + c_{pps} \cdot (T_{pp} - T_v)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{i''}$

- posledné tri členy na pravej strane rovnice určujú výrobné teplo pary, ktoré pozostáva z tepla q_k , potrebného pre ohrev vody z počiatočnej teploty $T_0=273\text{K}$ na teplotu varu T_v , ďalej z výparného tepla l_v a z tepla potrebného na prehriatie pary na teplotu T_{pp} ,
- všetky tri zložky výrobného tepla sú privádzané pri konštantnom tlaku a pre jeden kg vody majú jednotku $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$,
- veličiny c_{ks} a c_{pps} predstavujú strednú špecifickú tepelnú kapacitu pri konštantnom tlaku pre vodu a prehriatu paru,
- súčet prvých dvoch označených členov v rovnici udáva entalpiu sýtej vody a pripočítaním hodnoty l_v sa dostane entalpia sýtej pary,

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY - ENTALPIA

- entalpia mokrej pary sa počíta z podobnej rovnice ako špecifický objem:

$$i_x = i' + x.(i'' - i') = i' + x.l_v$$

- Poznámka:

Hodnota skutočnej špecifickej tepelnej kapacity vody závisí od teploty vody a je približne $4186,8 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Túto hodnotu možno pre technické výpočty pri nízkych teplotách považovať sa strednú hodnotu špecifickej tepelnej kapacity vody. Stredná hodnota špecifickej tepelnej kapacity prehriatej pary je uvedená v tabuľkách alebo ju možno zistiť z príslušných tepelných diagramov grafickým odčítaním.

TERMODYNAMIKA PÁR

STAVOVÉ VELIČINY - ENTROPIA

- entropia prehriatej vodnej pary sa vypočíta z rovnice:

$$s_{pp} = s_0 + c_{ks} \cdot \ln \frac{T_v}{T_0} + \frac{l_v}{T_v} + c_{pps} \cdot \ln \frac{T_{pp}}{T_v}$$

- jednotlivé členy v tejto rovnici sú analogické členom v rovnici pre výpočet entalpie,
- v technických výpočtoch sa uvažujeme pre $s_0=0$,
- entropia mokrej pary sa počíta z rovnice:

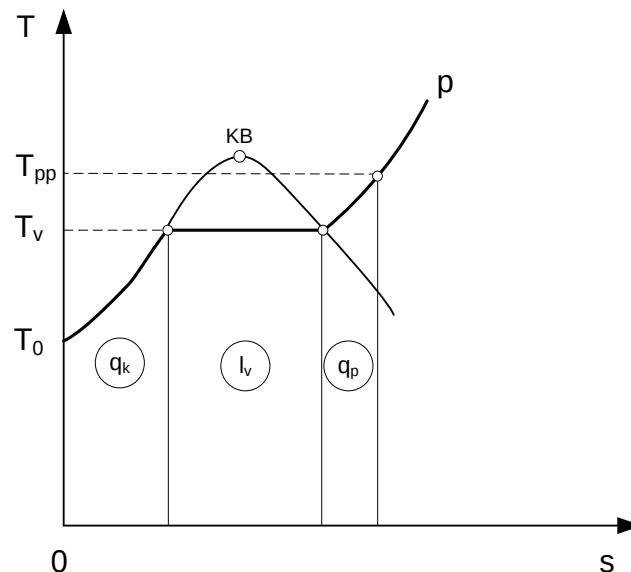
$$s_x = s' + x \cdot (s'' - s') = s' + x \cdot \frac{l_v}{T_v}$$

- stavové veličiny u , i , s , pár iných látok sa počítajú podobným spôsobom, ako pre vodu a jej paru,
- pri chladiacich médiách sa kladie začiatok merania pre u , i , s do ich kritického bodu, v kritickom bode sa im však v praxi neprisudzuje nulová hodnota, ale určitá základná nenulová veľkosť a síce z toho dôvodu, aby sme nemuselo počítať so zápornými hodnotami týchto veličín*

TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ DIAGRAMY PÁR

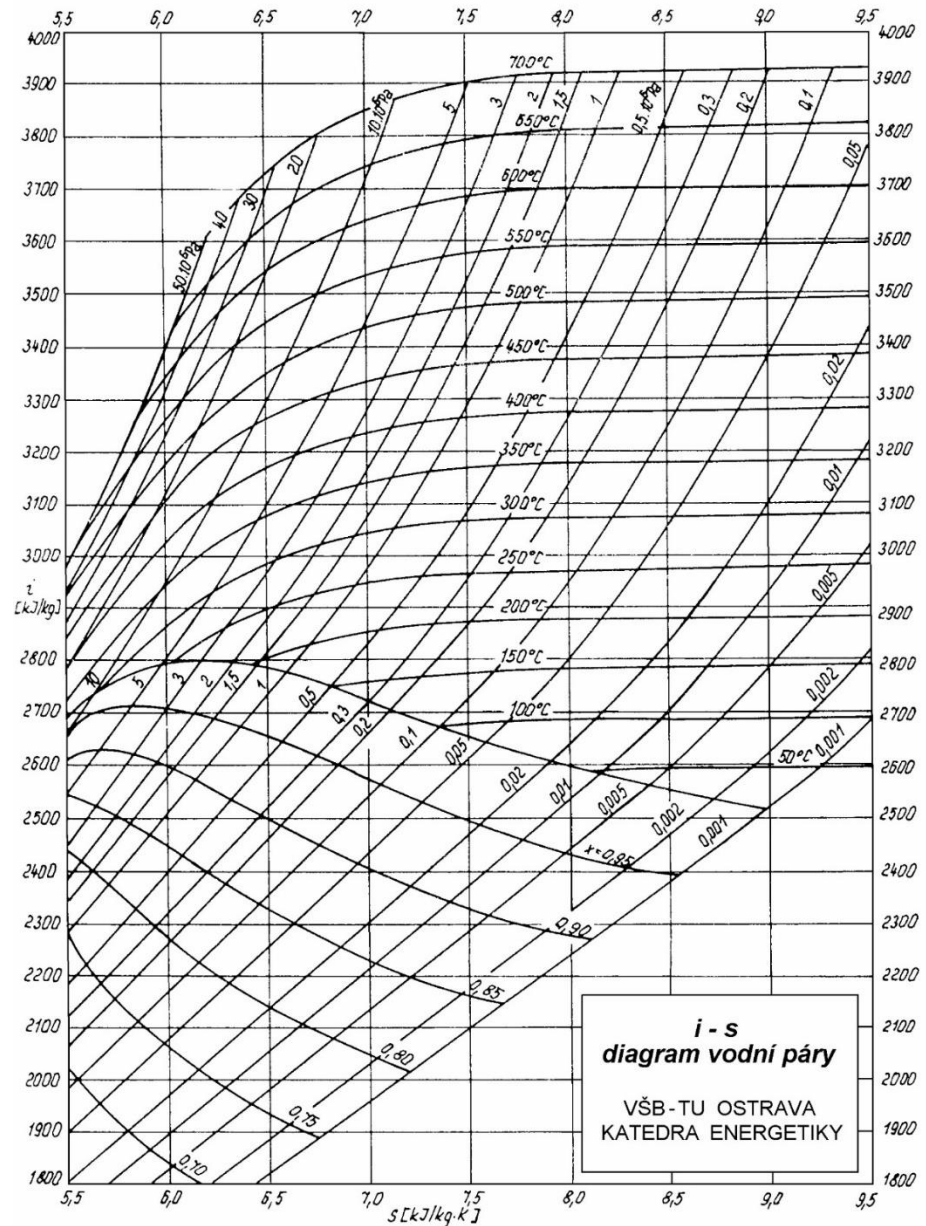
- v T-s diagrame sa plochou pod krivkou zmeny zobrazuje odovzdané teplo,
- T-s diagram vody je možné použiť na zobrazenie výrobného tepla pary,
- na obr. je znázornené rozdelenie výrobného tepla pary, ktoré pozostáva z tepla potrebného pre ohrev kvapaliny „ q_v “, výparného tepla „ l_v “ a tepla potrebného na prehriatie pary „ q_{pp} “,
- rozdelenie na jednotlivé zložky sa mení v závislosti od tlaku,
- so vzrastajúcim tlakom sa výparné teplo znižuje a zvyšné dve zložky rastú,
- pri kritickom tlaku má výparné teplo nulovú hodnotu,



TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ DIAGRAMY PÁR

- v technickej praxi sa často používa i-s diagram (Mollierov diagram),
- pre technickú prax sú najdôležitejšie nasledujúce zmeny:
 - izobarická,
 - adiabatická,
 - škrtenie,



TERMODYNAMIKA PÁR

ZMENA STAVU PÁR – IZOBARICKÁ ZMENA

- s izobarickou zmenou stavu pary sa možno stretnúť pri výrobe alebo ohreve pary ako i pri ochladzovaní a kondenzácii pary,
- v technických zariadeniach prebiehajú tieto procesy spravidla kontinuálne a približne pri konštantnom tlaku,
- podľa prvého zákona termodynamiky je technická práca pri izobarickej zmene nulová,
- pre prijaté resp. odovzdané teplo v prípade mokrej pary platí:

$$q_{12} = i_{x2} - i_{x1} = i' + x_2 \cdot (i'' - i') - i' - x_1 \cdot (i'' - i') = (x_2 - x_1) \cdot (i'' - i') = (x_2 - x_1) \cdot l_v$$

- Podobne platí pre prehriatu paru:

$$q_{12} = i_2 - i_1 = c_{pps} \cdot (T_2 - T_1)$$

- hodnoty veličín potrebné pre tepelné výpočty sa určia z tepelných diagramov resp. termodynamických tabuliek

TERMODYNAMIKA PÁR

ZMENA STAVU PÁR – ADIABATICKÁ ZMENA

- pri základných tepelných výpočtoch pre tepelné stroje sa uvažuje s adiabatickou expanziou a kompresiou pár,
- ak sa počíta zjednodušene, považuje sa proces za vratný t.j. izoentropický,
- pri adiabatických procesoch je odovzdávané teplo nulové,
- podľa prvého zákona termodynamiky platí, že technická práca je daná rozdielom entalpií:

$$a_{t12} = i_{x2} - i_{x1} = i'_1 - x_1 \cdot (i''_1 - i'_1) - i'_2 - x_2 \cdot (i''_2 - i'_2)$$

- hodnoty entalpie v tejto rovnici sa počítajú z medzných hodnôt a suchosti „x“ pre tlak „p₁“ a „p₂“ zvlášť,
- hodnoty entalpie pre prehriatu paru sa odčítajú v i-s diagrame resp. v termodynamických tabuľkách:

$$q_{12} = i_2 - i_1$$

TERMODYNAMIKA PÁR

ZMENA STAVU PÁR – ADIABATICKÁ ZMENA

- skutočná expanzia a kompresia v tepelných strojoch sú nevratné procesy, nakoľko sa entropia zvyšuje,
- skutočná technická práca pri nevratnej expanzii je menšia, ako by to bolo v prípade vratného procesu,
- pri nevratnej kompresii sa spotrebuje väčšia technická práca, ako v prípade idealizovanej vratnej kompresie,
- technická práca pri skutočných adiabatických zmenách sa vypočíta z vratnej technickej práce násobením termodynamickou účinnosťou podobne ako pri nevratných procesoch v plynch

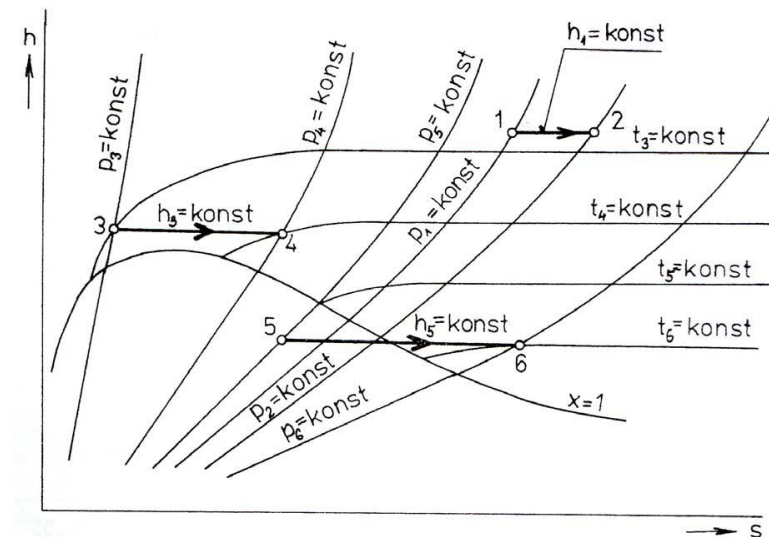


TERMODYNAMIKA PÁR

ZMENA STAVU PÁR – ŠKR TENIE

- pri škr tení pary sa znižuje jej tlak bez toho, aby sa získala užitočná, technická práca, 
- konečný stav pary po škr tení na daný protitlak sa vyhl'adá v i-s diagrame ako priesečník čiary konštantnej entalpie vedenej zo stavu „1“ s izobarou konečného tlaku p_2 ,

- pre stav „2“ sa z diagramu odčítajú hodnoty stavových veličín



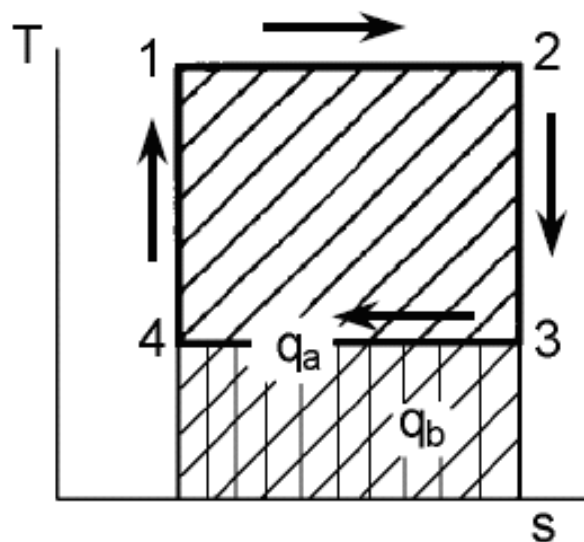
TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CARNOTOV CYKLUS

- **Carnotov cyklus, Carnotov obeh** alebo **Carnotov proces** je ideálny tepelný cyklus pozostávajúci z vratných zmien (dvoch adiabat a dvoch izoteriem), ktorý prebieha medzi dvoma stavmi rôznej teploty,
- má najvyššiu možnú termodynamickú účinnosť v danom rozsahu teplôt,

$$\eta_C = \frac{Q_{(1-2)} - Q_{(3-4)}}{Q_{(1-2)}} = 1 - \frac{Q_{(3-4)}}{Q_{(1-2)}} = 1 - \frac{T_{(3-4)}}{T_{(1-2)}}$$

- účinnosť Carnotovho cyklu závisí len od teploty ohrievača „ $T_{(1-2)}$ “ a chladiča $T_{(3-4)}$ a je vždy menšia ako 1,
- účinnosť rovná 1 by bola možná len pri teplote chladiča 0 K, čo je technicky nereálne

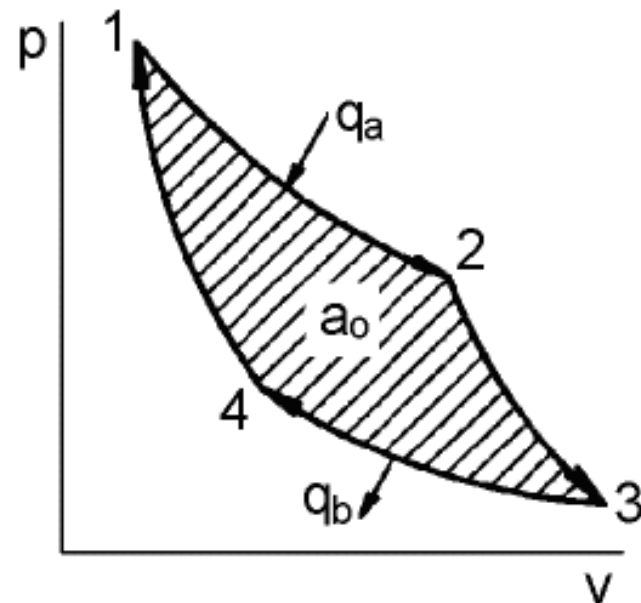


TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CARNOTOV CYKLUS

- jednotlivé fázy Carnotovho cyklu znázorňuje *p-V diagram*,
- zobrazením všetkých štyroch fáz cyklu do jedného diagramu sa ohraničí oblasť ohraničenú dvomi izotermami a dvomi adiabatami,
- táto oblasť zodpovedá práci vykonanej strojom,

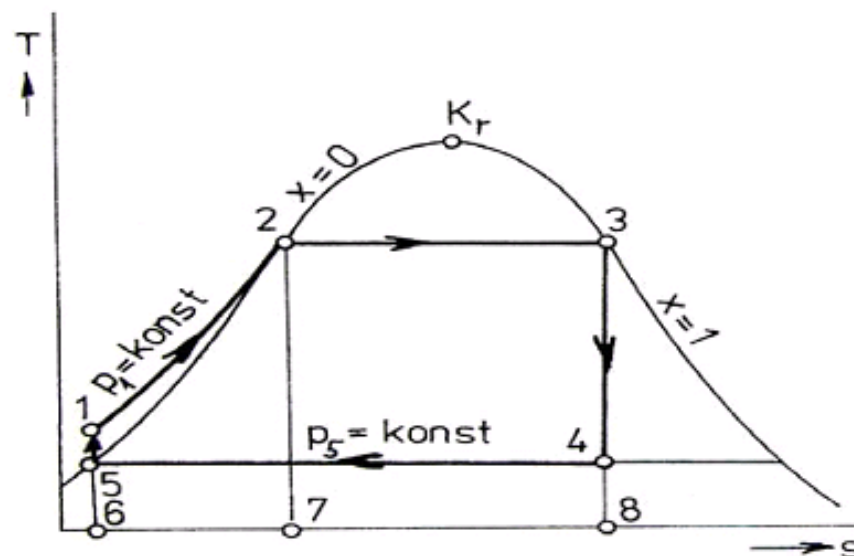
1-2	<i>izotermická expanzia</i>
2-3	<i>adiabatická expanzia</i>
3-4	<i>izotermická kompresia</i>
4-1	<i>adiabatická kompresia</i>



TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS

- **Clausius-Rankine cyklus** je klasický elektrárenský cyklus,
- pozostáva z izobary 1-2, počas ktorej sa vode privádza teplo až do jej zohriatia na bod varu a pokračuje sa po rovnakej izobare až k bodu 3 (vyparovanie vody),
- nasleduje izoentropická expanzia pary 3-4 v turbíne,
- následne para kondenzuje po izobare 4-5,
- cyklus uzatvára izoentropická kompresia kondenzátu 5-1

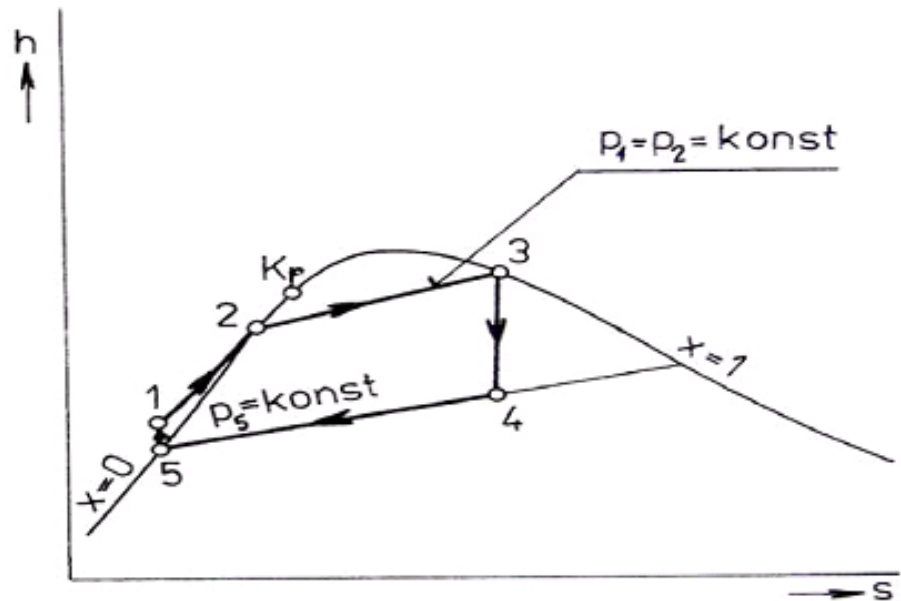


TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS

- termodynamická účinnosť Clausius-Rankine cyklu pre sýtu paru je vyjadrená rovnicou:

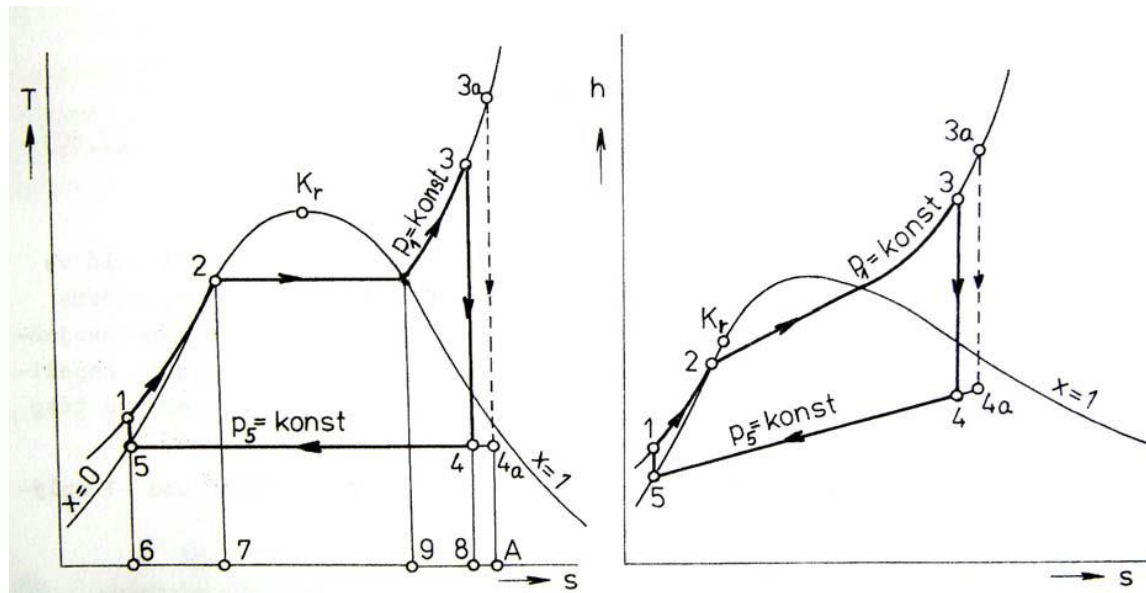
$$\eta_{CR} = \frac{a_T - a_{\check{C}}}{q_{(1-3)}} = \frac{i_3 - i_4 - (i_1 - i_5)}{i_3 - i_1}$$



TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS

- na rozdiel od C-R cyklu so sýtou parou sa v prípade prehriatej pary nie je cyklus ohraničený na hornej medznej krivke, ale pokračuje po izobare až do bodu v oblasti prehriatej pary
- účinnosť je daná podielom plochy 1-2-3-4-5-1 a plochy 1-2-3-8-6-1,
- prehrievanie pary je jedným zo spôsobov zvýšenia účinnosti C-R cyklu



TERMODYNAMIKA PÁR

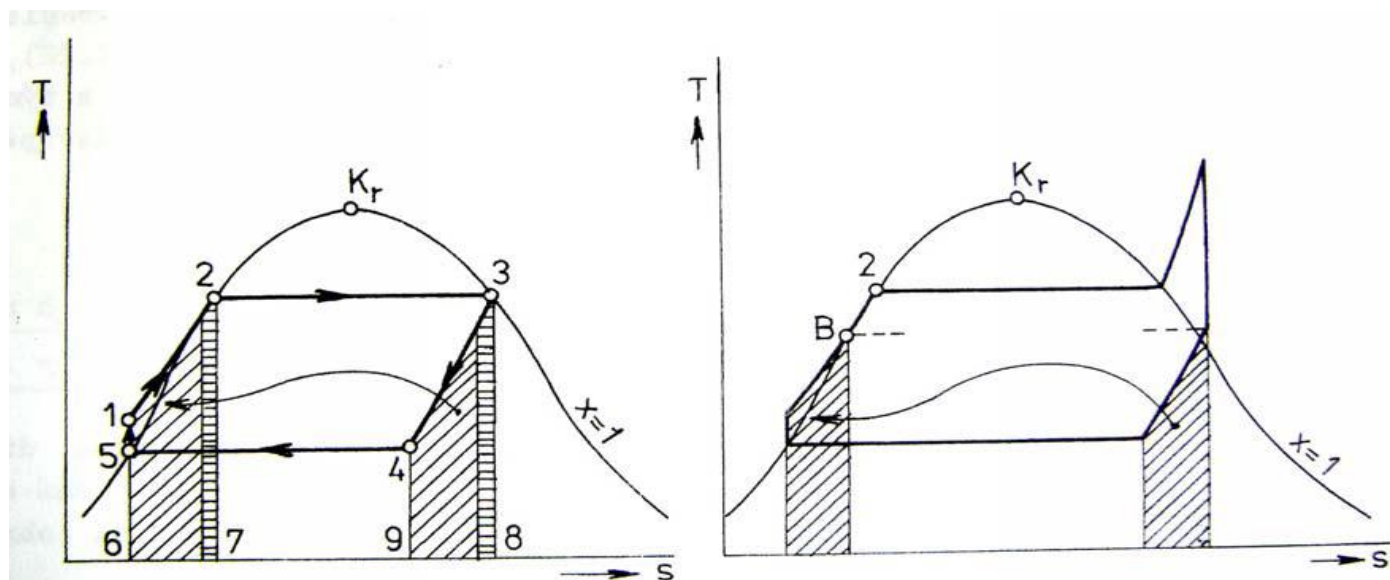
TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS

- spôsoby zvyšovania účinnosti C-R cyklu
 - zvýšenie tlaku vstupnej pary,
 - zvýšenie teploty vstupnej prehriatej pary,
 - zníženie tlaku v kondenzátore,
 - Carnotizácia cyklu regeneračným ohrevom napájacej vody parou z odberu turbíny,
 - medziprehrievanie pary,
 - kombinovaná výroba elektriny a tepla

TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS - CARNOTIZÁCIA

- podstatou je upraviť cyklus tak, aby sa jeho termická účinnosť priblížila termickej účinnosti ideálneho Carnotovho cyklu,
- Carnotizácia pozostáva v tom, že para v stave danom bodom 3 pobudne v turbíne len krátko a expanduje na nižší tlak, z takejto pary sa odoberie malá časť tepla (znázornená vodorovne vyšrafovanou zvislou plochou pod bodom 3),



TERMODYNAMIKA PÁR

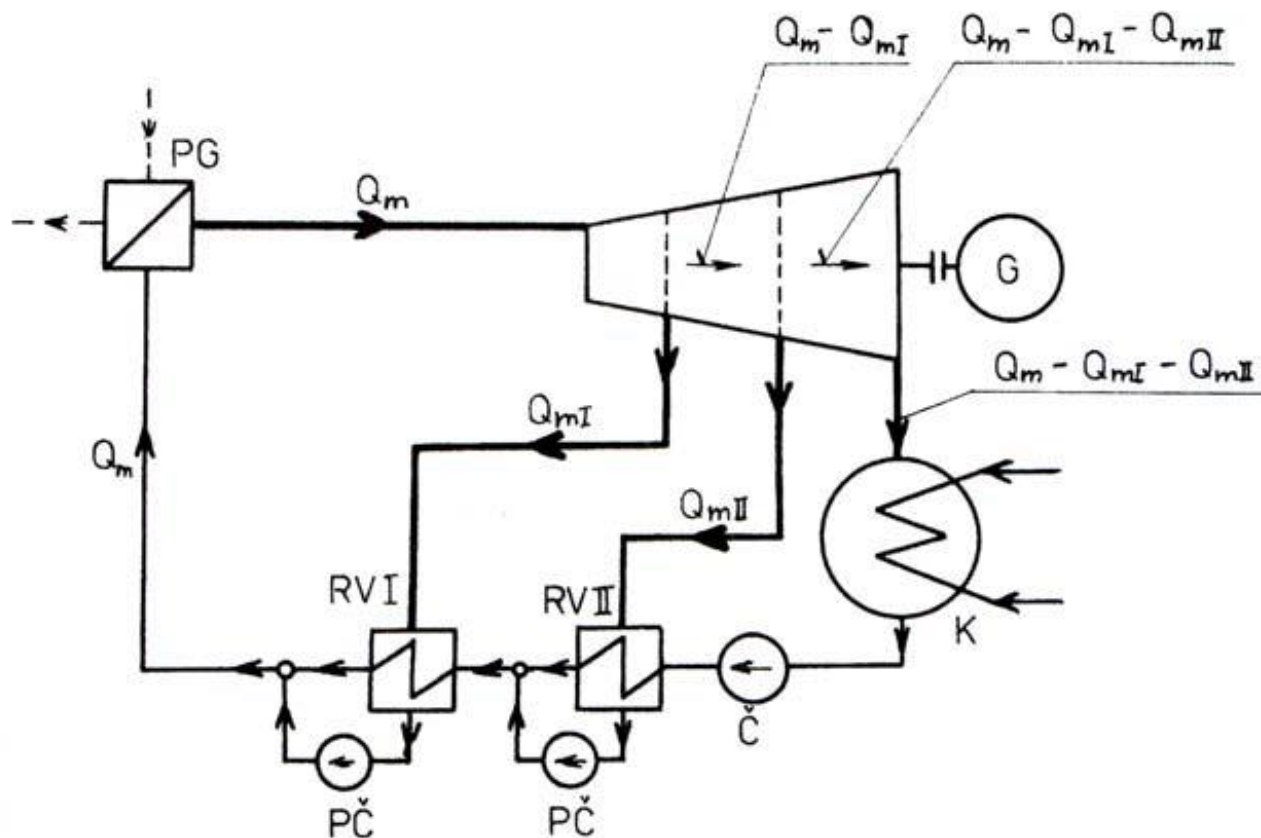
TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS - CARNOTIZÁCIA

- toto teplo sa odovzdá v regeneračnom výmenníku napájacej vode pred jej vstupom do parogenerátora (znázornené vodorovne vyšrafovanou zvislou plochou pod bodom 2),
- potom para v turbíne krátko expanduje a proces sa opakuje až až do bodu 4, pričom sa napájacej vode odovzdáva teplo znázornené šikmo vyšrafovanou plochou 1-2-7-6-1, ktorá sa prakticky rovná teplu odobranému pare, teda ploche 4-3-8-9-4,
- tým sa termická účinnosť cyklu priblížila termickej účinnosti Carnotovho cyklu,
- na druhom obrázku je neúplná je neúplná carnotizácia (voda sa ohrieva len do bodu „B“ a nie až do bodu varu)

TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS - CARNOTIZÁCIA

- schématické zapojenie zariadení Carnotizácie Clausius-Rankine cyklu

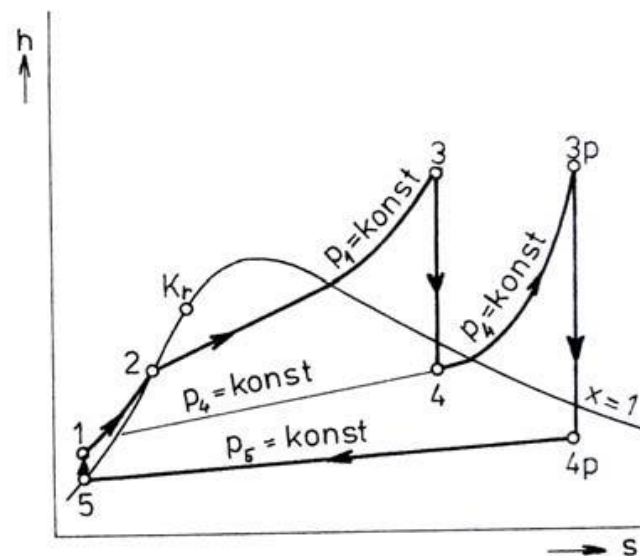
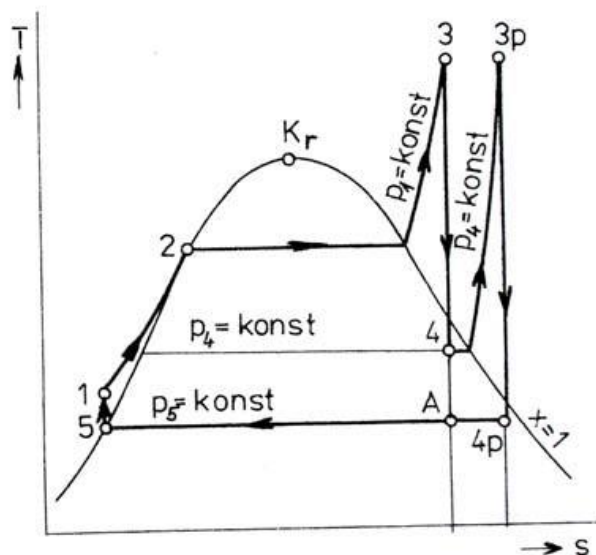


TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS

- zvyšovanie účinnosti Clausius-Rankine cyklu medziprihrievaním pary

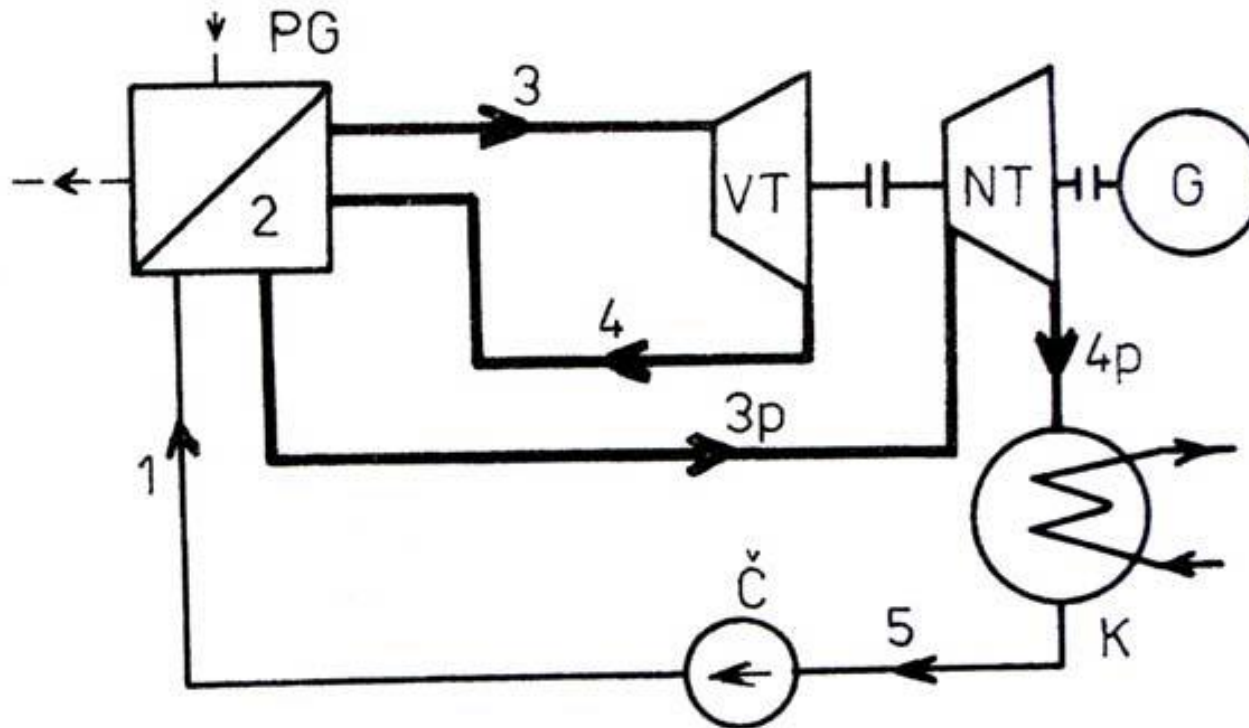
$$\eta_{CR} = \frac{i_3 - i_4 + i_{3P} - (i_1 - i_5)}{i_3 - i_1 + i_{3P} - i_4} = \frac{i_3 - i_1 + i_{3P} - i_4 - (i_{4P} - i_5)}{i_3 - i_1 + i_{3P} - i_4}$$



TERMODYNAMIKA PÁR

TEPELNÉ CYKLY - CLAUSIUS-RANKINE CYKLUS

- schématické zapojenie zariadení na medziprihrievanie pary



ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] *Kadlec Zdeněk, Ing. Ph.D., Termodynamika, Ostrava, 2001*
- [2] *Termomechanika, SEA-Energetický inštitút, 1998*
- [3] *Šoltésová Kvetoslava, Dr. Ing. Csc., Termomechanika, EINSTEIN TRAINING COURSE for thermal energy audits, Bratislava, 7.3.2011*