

30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

Jednotlivý příspěvek ze sborníku



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Porovnání účinnosti cyklů tepelné elektrárny

Pavel ŽITEK¹, Kamil SEDLÁK²

¹ Ing. Pavel Žitek, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, zitek@kke.zcu.cz

² Ing. Kamil Sedlák, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, sedlakk@kke.zcu.cz

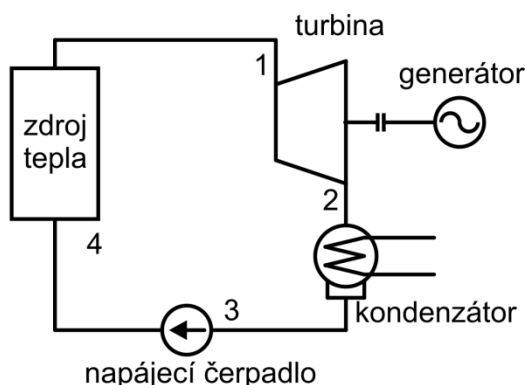
Abstrakt: Jedním z cílů projektantů a výrobců zařízení pro elektrárny je zvyšování účinnosti jednotlivých částí i elektrárny jako celku. Způsobů zvyšování účinnosti parní elektrárny je několik. Patří mezi ně také zvyšování vstupních parametrů páry. V současnosti se hledají materiály, které by byly použity pro teplotu admisní páry 700 °C. Vyvíjejí se také vysokoteplotní reaktory s výstupní teplotou chladiva pohybující se nad 700 °C, které mohou být chlazeny také plynem. Článek se zabývá porovnáním různých modifikací cyklů parní elektrárny a spalovací turbíny pro případ provozu při těchto teplotách.

1. Úvod

Článek porovnává výkon turbíny a účinnost cyklu tepelné elektrárny. Vstupními hodnotami jsou tepelný výkon zdroje tepla 500 MW_{tep} a maximální teplota média 700 °C. Počítány jsou Rankin – Clausiův (RC) cyklus, Ericsson – Braytonův cyklus a paroplynový cyklus.

2. Základní RC cyklus

Jedná se o nejjednodušší cyklus (viz. obrázek 1) složený pouze ze zdroje tepla, ve kterém se přivádí teplo do vody (páry) při konstantním tlaku. Přehřátá pára je vedena do turbíny, kde adiabaticky expanduje. Zanedbáme-li ztráty v průtočné části turbíny, jedná se zároveň o děj izoentropický.



Obrázek 1: Schéma RC cyklu

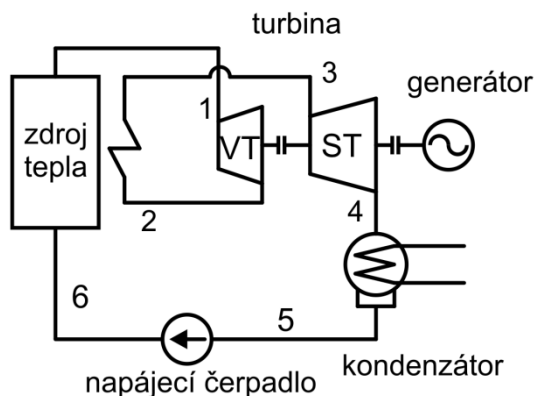
V kondenzátoru umístěném za turbínou se při konstantním tlaku odvádí teplo a mokrá pára se přeměňuje na sytou kapalinu. Napájecí čerpadlo zvyšuje adiabaticky tlak na hodnotu

odpovídající tlaku admisní páry (zanedbáváme-li tlakové ztráty ve zdroji tepla). V případě, že se jedná o jadernou elektrárnu, je zdrojem tepla buď parogenerátor (tlakovodní reaktory) nebo přímo reaktor (varný reaktor). Do turbíny pak vstupuje sytá pára.

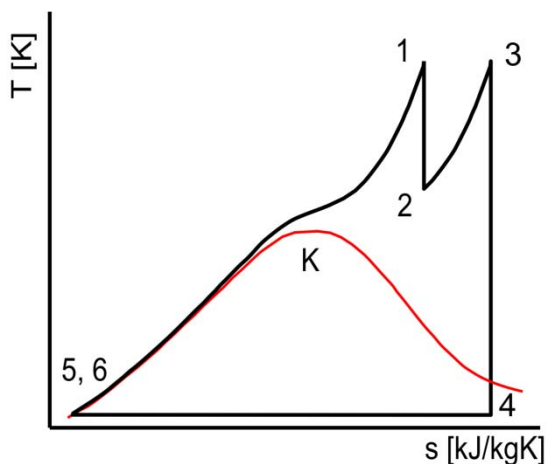
3. RC cyklus s přehříváním

Přehřívání páry se v současnosti provádí u všech větších bloků tepelných elektráren spalujících fosilní paliva. Zavedeno bylo původně z důvodu ochrany koncových stupňů turbin. S vývojem materiálů a vylepšováním konstrukce jednotlivých komponent elektrárny dovolujících používání vyšších parametrů admisní páry docházelo k tomu, že se snižovala suchost páry na výstupu z turbíny. Z tohoto důvodu došlo k erozi většího počtu stupňů a k většímu poškození lopatek. Proto došlo k rozdělení turbíny na dvě části. Pára vystupující z vysokotlaké části turbíny byla vedena zpět do kotle, kde jí bylo v přehříváku přivedeno další teplo. Tím se zvýšila entropie páry na vstupu do středotlaké části a zvýšila se suchost páry na výstupu z turbíny. Doprovodným efektem bylo zvýšení účinnosti. V současnosti je zvyšování účinnosti cyklu hlavním důvodem používání přehřívání. Využívá se faktu, že nejvyšší účinnost při předávání tepla je právě v oblasti přehřáté páry. Tlak páry, při níž se pára přehřívá, se určuje právě s ohledem na co nejvyšší účinnost. Vzhledem k neustálému zvyšování vstupních parametrů páry se začíná používat

dvojí přehřívání páry. Obdobou přehřívání v jaderných elektrárnách je vstřikování ostré páry za vysokotlakým dílem turbíny.



Obrázek 2: RC cyklus s jedním přehříváním

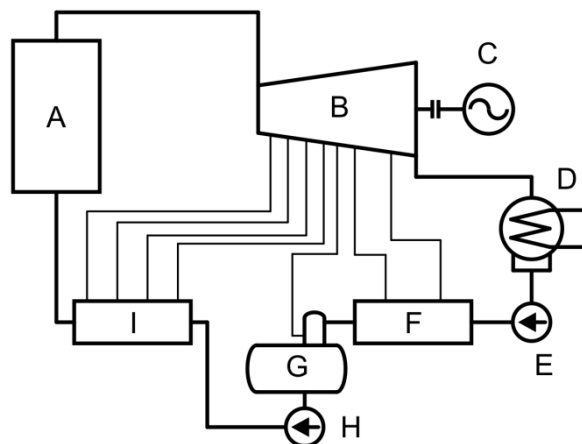


Obrázek 3: RC cyklus s jedním přehříváním v T-s diagramu

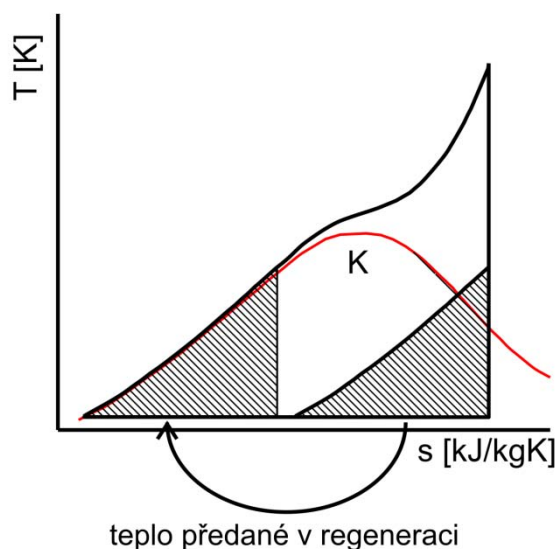
4. RC cyklus s regenerací

Zatímco přehřívání využívá opakování přivádění tepla v oblasti s nejvyšší účinností, regenerace se naopak snaží omezit přivádění tepla v kotli v oblasti s nejhorší účinností, což je přívod tepla do vody. Regenerace má tedy za úkol zvýšit teplotu napájecí vody mimo kotel a tím zmenšit množství tepla potřebného pro dosažení potřebných parametrů admissní páry. Celý systém regenerace se dělí na vysokotlakou a nízkotlakou část. Nízkotlaká část regenerace začíná kondenzátním čerpadlem umístěným za kondenzátorem. To má za úkol zvýšit tlak kondzátu nad tlak okolí, aby v případných netěsnostech potrubí

nedocházelo k přísávání vzduchu do kondenzátu. Následují nízkotlaké ohříváky a nízkotlaká část je zakončena odplynovákem, kde dochází k odloučení vzduchu z kondenzátu. Za odplynovákem je umístěno napájecí čerpadlo, které regeneraci rozděljuje na nízkotlakou a vysokotlakou část. Za čerpadlem jsou umístěny vysokotlaké ohříváky.



Obrázek 4: RC cyklus s regenerací
legenda: A) zdroj tepla, B) odběrová turbína, C) generátor, D) kondenzátor, E) kondenzátní čerpadlo, F) systém nízkotlakých ohříváků, G) odplynovák, H) napájecí čerpadlo, I) systém vysokotlakých ohříváků



teplo předané v regeneraci

Obrázek 5: RC cyklus s regenerací v T-s diagramu

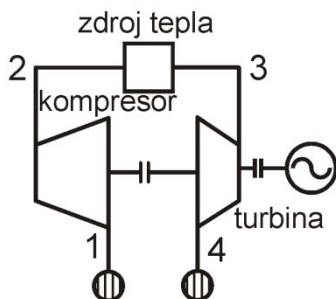
Zatímco odplynovák je směšovací výměník, ohříváky jsou výměníky povrchové. Pára, která se v regeneraci používá pro ohřev napájecí vody, je odebírána z turbíny.

5. Spalovací turbíny

S rozvojem energetiky je možné se čím dál častěji setkat s kombinací různých zdrojů, především se využívá výhod jednotlivých řešení. Mezi často používané varianty patří také plynové turbíny, jejichž výhodou je poměrně rychlý nájezd do provozního stavu, ale také poměrně čistý provoz oproti klasickým tepelným blokům.

6. E-B cyklus bez regenerace

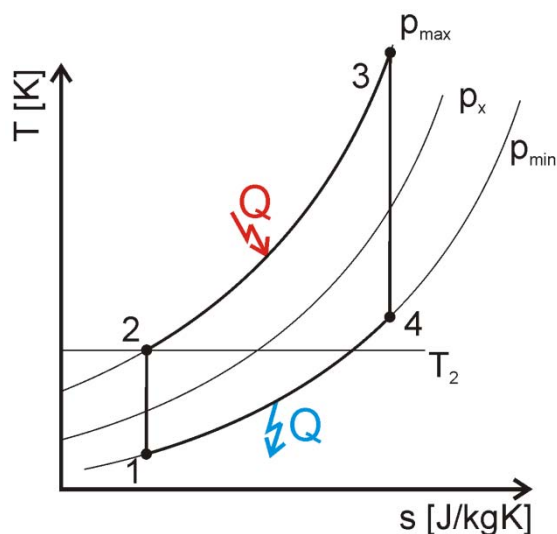
Běžně uváděným zástupcem této skupiny je Ericsson – Braytonův cyklus (viz následující obrázek 6). Klasický porovnávací cyklus se skládá z izentropické komprese pracovního média (změna mezi bodem 1-2), izobarického přívodu tepla ve spalovací komoře (změna mezi bodem 2-3), izentropické expanze v turbině (změna mezi bodem 3-4) a izobarického odvodu tepla ve výměníku (4-1). Pro účely této studie byl zvolen kompresní poměr $\pi = 5$, zdroj tepla o výkonu 500 MW, maximální teplota před turbinou 700 °C.



Obrázek 6: Schéma porovnávacího E-B cyklu

Z uvedeného T-s diagramu (viz obrázek 7) vyplývá významná nevýhoda tohoto řešení, tedy poměrně vysoká teplota na výstupu z turbíny a tím také relativně nízká účinnost. Což vede k velkým provozním nákladům, proto se často přistupuje k modifikaci uvedeného základního schématu, tak aby se zmiňovaná nevýhoda potlačila. Jedním z opatření je rozdělení komprese na více stupňů se současným vložením mezichladiče, popř. rozdělení expanze v turbíně a dalším přívodem tepla. Tento cyklus je označován jako Keenan-Kellerův. Nejefektivnějším řešením tohoto problému je kombinace popsanych způsobů se současným zavedením regenerace pracovního

media. Což znamená, že část tepla, která by v základním oběhu bez užitku odcházela do okolí, se využije na ohřev pracovního media mezi kompresorem a spalovací komorou.

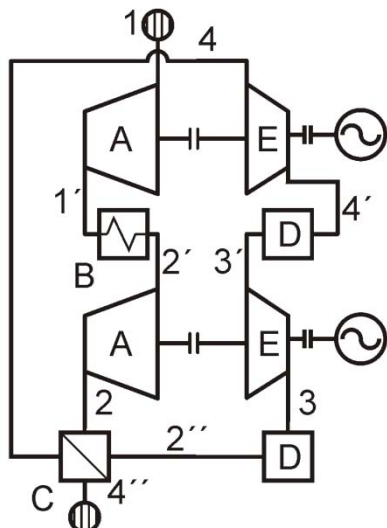


Obrázek 7: E-B cyklus v tepelném diagramu

7. Modifikace E-B cyklu s regenerací

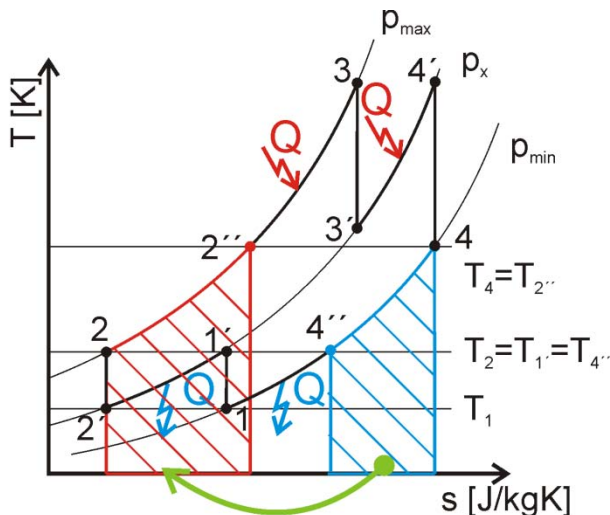
Z výše popsaného je zřejmé, že velice nadějným krokem z pohledu zvyšování účinnosti je zavedení regenerace, rozdělení komprese do více stupňů a také rozdělení expanze v turbině s dalším přívodem tepla. Ve skutečnosti jde o rozšíření základního cyklu o několik výměníků tepla. Jejich hlavním úkolem je zajistit maximální výměnu tepla mezi komprimovaným médiem a okolím, popř. spaliny a zkomprimovaným vzduchem za posledním stupněm kompresoru. Takovéto řešení je často označováno jako Keenan-Kellerův cyklus s regenerací, celé řešení je schematicky uvedeno (viz obrázek 8). Logicky nutnou podmínkou je zajištění kladného teplotního spádu mezi spaliny vycházejícími z turbíny a zkomprimovaným médiem za posledním stupněm kompresoru.

Výhodné je zakreslit celý oběh do tepelného (tedy T-s) diagramu (viz obrázek 9). Z diagramu je zřejmé nejen to, zda je možné regeneraci vůbec zařadit do cyklu, ale také je přímo patrné množství tepla, které se sdílením přenáší ze spalín do zkomprimovaného vzduchu, zobrazené jako vyšrafované plochy pod danými změnami.



A) kompresor, B) chladič, C) výměník tepla
D) zdroj tepla, E) turbína

Obrázek 8: Schéma Keenan-Kellerova cyklu s regenerací



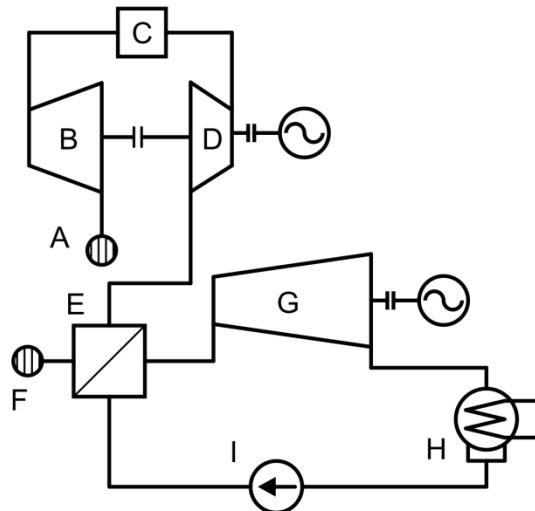
Obrázek 9: Keenan-Kellerův cyklus s regenerací v tepelném diagramu

8. Paroplynový cyklus

Paroplynový cyklus kombinuje výhody základního cyklu spalovací turbíny a oběhu parní turbíny a odstraňuje některé jejich nevýhody.

První částí paroplynového oběhu je spalovací turbína. Výhodou základního Ericsson – Bryatonova cyklu je jeho jednoduchost, spolehlivost a rychlost njetí. Nevýhodou jsou vysoké výstupní teploty spalin, které jsou bez užitku vypouštěny do atmosféry. Teplo spalin lze využít buď pro regeneraci, jak bylo uvedeno výše, nebo k ohřevu jiné teplotnosné

látky. V tomto případě se jedná o vodu v RC cyklu. Spaliny předávají teplo vodě ve spalínovém kotli. Konstrukce spalínového kotle umožňuje zvýšit účinnost parního oběhu pomocí přehřívání páry za vysokotlakým dílem.



Obrázek 10: Schema paroplynového cyklu
legenda: A) sání kompresoru, B) kompresor,
C) zdroj tepla, D) plynová turbína, E) spalínový
kotel, F) odvod spalin do atmosféry, G) parní
turbína, H) kondenzátor, I) napájecí čerpadlo

Ve výsledku získáme cyklus, který díky rychlému njetí na výkon (během pár minut) můžeme použít jako pološpičkový nebo špičkový zdroj a po prohřátí parní turbíny a jejím přifázování dokážeme využít vysokou výstupní teplotu spalin a dosáhnout vysoké účinnosti celého cyklu.

9. Poděkování

Výsledky vznikly v rámci projektu SGS-2010-040.

10. Literatura

- [1] BEČVÁŘ J. a kol.: Tepelné turbíny, Praha, SNTL, 1968.
- [2] HOCKO M.: Plynové turbíny a turbokompresory, Plzeň 2009.
- [3] ŠČEGLAJEV A.V.: Parní turbíny, Praha, SNTL, 1976
- [4] KADRNOŽKA J.: Tepelné turbíny a turbokompresory, Brno, akademické nakladatelství CERM, 2004.
- [5] KALČÍK J., SÝKORA K.: Technická termomechanika, Emia Praha, 1973.
- [6] MAREŠ R.: Kapitoly z termomechaniky, Plzeň, Západočeská univerzita, 2008.