



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

VYUŽITÍ PARNÍCH TURBIN

THE USE OF STEAM TURBINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK SAŇKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JAN FIEDLER, DR.

BRNO 2012

[ZADÁNÍ 1. STRANA]

[ZADÁNÍ 2. STRANA]

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím parních turbín jako součást energetické centrály. Teoretická část se zaměřuje na historii, základní informace o parních turbínách, dále na podstatu funkce a rozdělení parních turbín dle různých hledisek. Součástí teoretické části je také popis nejběžnějších konstrukčních provedení a možnosti jejich využití. V praktické části je popsána konkrétní energetická centrála a proveden základní výpočet tepelné bilance.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the use of steam turbines as a part of the power station. The theoretical part focuses on the history, basic informations about steam turbines, as well as facts of the operation and allocation of steam turbines by various criteria. The theoretical part also includes description of the most common construction design. In the practical part is described the concrete power station and is made basic calculation of heat balance.

KLÍČOVÁ SLOVA

Parní turbína, Curtisovo kolo, rozváděcí a oběžné lopatky, izoentropický tepelný spád, termodynamická účinnost

KEY WORDS

Steam turbine, Curtis stage, guide and moving blades, isoentropic thermal difference, thermodynamic efficiency

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SAŇKA, M. *Využití parních turbin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 40 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci „Využití parních turbin“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a v seznamu použité literatury uvedl veškeré literární zdroje, z kterých jsem čerpal.

V Žabčicích dne 25. dubna 2012

.....

Marek Saňka

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za odborné vedení a cenné připomínky při psaní této práce a dále mé rodině za podporu věnovanou během studia.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 HISTORICKÝ VÝVOJ PARNÍCH TURBÍN.....	12
1.1 POČÁTKY VÝVOJE PARNÍCH TURBÍN VE SVĚTĚ.....	12
1.2 HISTORIE VÝROBY PARNÍCH TURBÍN V BRNĚ.....	13
2 PARNÍ TUBÍNA	15
2.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE	15
2.2 PRINCIP FUNKCE	15
2.3 ROZDĚLENÍ PARNÍCH TURBÍN.....	18
2.4 TEPELNÝ OBĚH PARNÍCH TURBÍN.....	19
2.4.1 RANKINE-CLAUSIŮV PARNÍ OBĚH.....	19
2.4.2 KOMBINOVANÝ PAROPLYNOVÝ OBĚH.....	21
2.4.3 SROVNÁNÍ ÚČINNOSTÍ TEPELNÝCH OBĚHŮ.....	22
2.5 POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ PARNÍCH TURBÍN.....	23
3 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ PARNÍCH TURBÍN.....	26
3.1 TURBÍNY PROTITLAKOVÉ	26
3.2 TURBÍNY KONDENZAČNÍ	28
3.3 TURBÍNY ODBĚROVÉ.....	30
3.4 TURBÍNY DVOUTLAKOVÉ.....	31
4 ENERGETICKÁ CENTRÁLA	32
4.1 POPIS TURBOSETU	32
4.2 PARAMETRY TURBÍNY	33
4.3 ZAŘÍZENÍ ENERGETICKÉ CENTRÁLY [8].....	33
4.4 KONTROLA TEPELNÉ BILANCE	34
ZÁVĚR.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	38
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	39
SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A INDEXŮ.....	40

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce s názvem „Využití parních turbin“ je formou rešerše charakterizovat parní turbíny a blíže popsat využití jednotlivých konstrukčních provedení v energetických zařízeních a dále na příkladě konkrétní energetické centrály provést kontrolní výpočet tepelné bilance.

V první části je ve stručnosti popsán historický vývoj parních turbin, jehož počátek lze datovat již do středověku. Ten odstartoval dlouhodobou evoluci průmyslového odvětví, která se již dostala do zralé fáze, avšak zdaleka není ještě u konce. U parních turbin lze dosáhnout stále vyšších účinností než v minulosti a tím i hospodárnosti jejich provozu, v tomto trendu lze předpokládat i budoucí vývoj. Kromě popsání rozvoje parních turbin ve světě je zmíněna i historie zavedení a následného vývoje v České republice, se zaměřením na jeho centrum v Brně.

Další část shrnuje základní informace o parních turbínách, jakožto lopatkovému motoru přeměňující tepelnou energii obsaženou v páře na energii pohybovou, využívanou k pohonu elektrického generátoru. Detailněji je zde popsán princip funkce, především uveden rozdíl mezi rovnotlakovou (akční) a přetlakovou parní turbínou. Součástí této části je taktéž rozdělení parních turbin do skupin dle různých kritérií potvrzujících mnohostrannost jejich použití. Důležitou součástí této práce je zařazení parní turbíny do Rankine-Clausiova tepelného oběhu a uvedení způsobů zvyšování účinnosti, blíže je popsán příhřev páry a carnotizace tepelného oběhu, zmíněno je však i zařazení parní turbíny do kombinovaného paroplynového oběhu a porovnány účinnosti jednotlivých tepelných oběhů. Neopomenuto je také zobrazení umístění pomocných zařízení parních turbin v tepelném schématu s popisem jejich funkce pro provoz energetické centrály.

Následující část rozděluje parní turbíny podle konstrukčního provedení, z čímh souvisí účel jejich použití. Zmíněny jsou nejčastější a nejdůležitější provedení parních turbin pro průmyslové aplikace, mezi které patří turbíny protitlakové, kondenzační, odběrové a dvoutlakové, přičemž u každé je uvedeno možné využití daného provedení. V rámci popisu protitlakové a kondenzační turbíny je pro názornost zobrazen řez takové turbíny upřesňující provedení a uvedeny základní shrnující údaje.

Poslední, praktická část zpracovává konkrétní energetickou centrálu, na které je představeno uplatnění parní turbíny v praxi. Centrála pracuje s protitlakovou parní turbínou určenou ke kombinované výrobě elektrické energie a technologické páry. Uveden je popis parametrů turbíny a souhrn pomocných zařízení skutečné energetické centrály a proveden zjednodušený výpočet kontroly tepelné bilance.

1 HISTORICKÝ VÝVOJ PARNÍCH TURBÍN

Pouze málokterý vynález ovlivnil svět tak jako parní turbína. Lidstvo si dnes již nedovede představit život bez elektřiny a právě parní turbíně pohánějící elektrický generátor vděčí za její výrobu v klasických či jaderných tepelných elektrárnách. Vynálezu parní turbíny ovšem předchází dlouhá historie.

1.1 POČÁTKY VÝVOJE PARNÍCH TURBÍN VE SVĚTĚ [4,5]

	
jméno	Heron Alexandrijský
kdy žil	10 – 70 n.l.
povolání	starověký matematik a vynálezce
objev v oblasti využití páry	Prvopočátek parní turbíny - aeolipile

Počátek postupného vývoje, na jehož konci je parní turbína, sahá až do starověku. První stroje využívající páru pro svůj pohon byly chápány spíše jako hračky. Příkladem je vynález řeckého matematika Herona Alexandrijského (viz Tab. 1) z prvního století nazvaný Aeolipile – Heronova bāň, která pracovala na principu reakční turbíny. Toto zařízení obsahovalo rotační těleso a opačně zahnuté trysky vystupující z tělesa, na jejichž koncích vyvěrala pára, což způsobilo rotační pohyb kolem vlastní osy.

Tab. 2 Heron Alexandrijský

Poté až roku 1629 přispěl Giovanni de Branca k vývoji parních turbín objevením principu akční turbíny, když zavedl proud páry na lopatkové kolo. Na jeho myšlenku navázal švédský inženýr Gustav de Laval (viz Tab. 2). Jeho řešení, které si nechal patentovat, spočívalo v postavení dýz proti jednomu lopatkovému kolu v rovnotlakém režimu. Vymyslel tak roku 1883 akční jednostupňovou turbínu s 26 000 otáčkami za minutu a obvodovou rychlostí dosahující hodnoty 400 metrů za sekundu. Praktického využití se ale de Lavalova turbína dočkala až o několik let později.

	
Jméno	Gustav de Laval
kdy žil	9.5.1845 – 2.2.1913
Povolání	švédský inženýr a vynálezce
objev v oblasti využití páry	jednostupňová akční turbína

Tab. 1 Gustav de Laval

S poněkud rozdílnou koncepcí přišel roku 1884 britský inženýr Charles Algernon Parsons (viz Tab. 3), který sestrojil reakční dvouproudou patnáctistupňovou turbínu o výkonu 4 kW s 17 000 otáčkami za minutu.

V jeho řešení sestavil dvě skupiny patnácti za sebou řazených lopatkových stupňů kol do dvou skříní, jimiž pára prostupovala ze středu na obě strany.

Jako dalšího vynálezce lze jmenovat Američana Charlese Curtise, jenž roku 1895 patentoval rovnotlakovou turbínu se dvěma nebo třemi rychlostními stupni s vertikální osou rotace, která zpracovávala velký tepelný spád.


Roku 1896 si nechal patentovat neméně zajímavou vícestupňovou parní turbínu francouzský inženýr Auguste Rateau.

Významnou událostí ve vývoji parních turbín byla bezpochyby Světová výstava v Paříži konaná roku 1900, na které se představily parní turbíny různých konstrukcí hned několika vynálezců, mezi nimiž nechyběli výše zmínění G. de Laval, Ch. A. Parsons, Ch. Curtis a A. Rateau. Tato výstava také znamenala příležitost pro zahájení licenčního jednání a pozdější zavedení výroby parních turbín v Brně.

Mezi důležitými osobnostmi nelze opomenout prof. Aurela Stodolu (viz Tab. 4), narozeného na Slovensku v Liptovském Mikuláši. Ten během své činnosti na technice v Curychu přispěl teoretickými a experimentálními pracemi k rozvoji tepelných turbín včetně regulace v takové míře, jaké se to nepovedlo nikomu před ním. Díky jeho publikacím (nejznámější je kniha „Dampf und Gasturbinen“) a vlivu na rozvoj v průmyslovém odvětví turbín je dodnes považován za přední autoritu v oboru.

Počátkem 20. století začaly parní turbíny vytlačovat z pohonu dynam a generátorů dosud používané pístové parní stroje, jelikož měly i přes všechna konstrukční omezení oproti parním strojům vyšší výkon i účinnost. Turbíny měly navíc předpoklady zvyšovat jednotkový výkon téměř bez omezení, mohly zpracovávat páru podstatně vyšších tlaků a teplot a přitom dosahovat vyšších účinností. Výfuková pára byla čistá, beze stop oleje a proto použitelná přímo v technologii. Nové řešení mechanického pohonu na rotačním principu bylo tedy velmi perspektivní.

V posledních letech se společně s rozvojem výpočetní techniky a dostupnými technologiemi výroby dosahuje stále vyšších výkonů a tepelných účinností parních turbín a lze předpokládat pokračování tohoto trendu i v budoucnosti.

	
jméno	Charles A. Parsons
kdy žil	13.6.1854 – 1.2.1931
povolání	britský inženýr a vynálezce
objev v oblasti využití páry	vícetupňová reakční turbína

Tab. 3 Charles A. Parsons

	
jméno	Aurel Stodola
kdy žil	10.5.1859 – 25.12.1942
povolání	slovenský inženýr, fyzik a vynálezce
objev v oblasti využití páry	zakladatel moderní teorie parních a plynových turbín

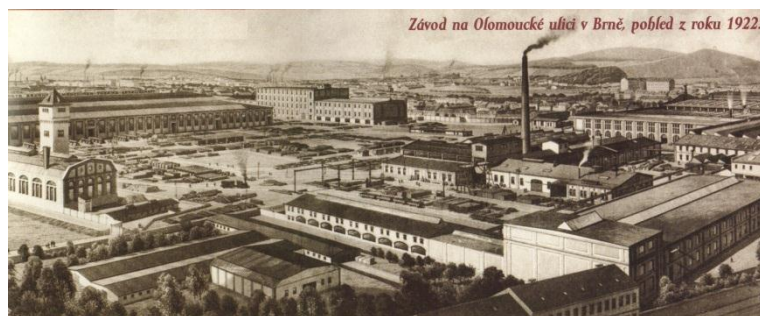
Tab. 4 Aurel Stodola

1.2 HISTORIE VÝROBY PARNÍCH TURBÍN V BRNĚ [5,7]

Historie výroby parních turbín v České republice úzce souvisí s podnikem První brněnská strojírna (PBS), která se podstatným způsobem zasloužila o zavedení výroby parních turbín a to nejen v Brně, ale i ve střední Evropě.

PBS založili Jan Reiff a Jindřich Lutz již roku 1814 ve Šlapanicích u Brna. Zpočátku se podnik zabýval opravami a výrobou textilních strojů, zanedlouho však rozšířil působnost o výrobu parních kotlů a parních strojů. Roku 1837 došlo k přestěhování do Brna a podstatnému rozšíření výrobního programu, čímž se PBS stala největším strojírenským podnikem v Brně.

Důležitým mezníkem dalšího rozvoje PBS byla účast jejich zástupců na Světové výstavě v Paříži v roce 1900, která již byla zmíněna. Při této příležitosti je zaujal exponát přetlakové parní turbíny Ch. A. Parsonse, s kterým započali jednání o licenční smlouvě. Roku 1903 tak byla v Brně vyrobena první přetlaková parní turbína systému Parsons o výkonu 100kW. PBS se brzy osamostatnila a původní licenční turbíny byly roku 1907 nahrazeny originální konstrukcí. Ta odstraňovala nedostatek příliš dlouhého rotoru, několik prvních přetlakových stupňů Parsonovy turbíny bylo totiž nahrazeno Curtisovým kolem. Toto konstrukční řešení poté převzaly i jiné zahraniční podniky.

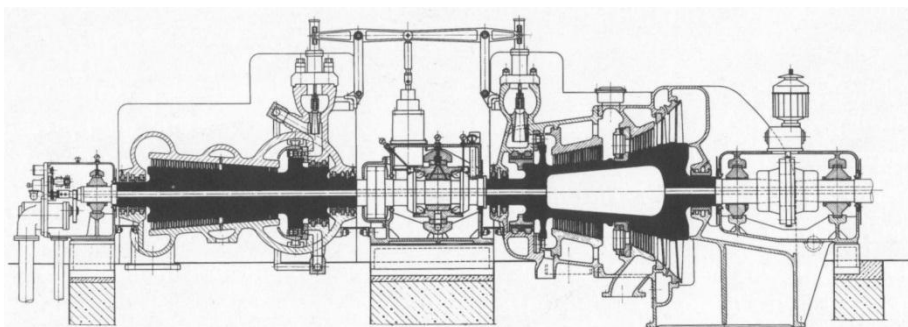


Obr. 1 Závod PBS na Olomoucké ulici

označované PBP (První brněnská Parsons), při němž bylo použito namísto Curtisova kola a několika přetlakových stupňů několik rovnotlakých stupňů s úplným ostřikem. Jelikož byla použita skupinová regulace s parciálním ostřikem, turbíny dosahovaly vysokých účinnosti i při částečných výkonech.

K dalšímu výraznému rozvoji došlo za 2. světové války, kdy byla PBS zařazena do říšskoněmeckého průmyslového systému, vlastní výroba byla orientována na vojenský průmysl. PBS byla v těchto letech objemy výroby největším výrobcem parních turbín ve střední Evropě. Na konci 2. světové války však došlo pro PBS k tragédii – nejdůležitější objekty závodu byly německými zaměstnanci a armádou vypáleny. V říjnu roku 1945 byl podnik znárodněn a ve zničeném závodě se rozvíjela výroba náhradních dílů a prováděly se opravy poškozených turbín. Počátkem 50. let došlo vlivem studené války k zvýšení požadavku na výrobu parních turbín do zemí Sovětského svazu. V této době došlo k navýšení objemu výroby na několiknásobek předválečné úrovně. K novým konstrukčním řešením patří dvoutělesové parní turbíny s dvěma regulovanými odběry (viz Obr.2), protiproudé uspořádání těles, mechanické ovládání regulačních ventilů, vývoj segmentových radiálních ložisek a různých typů závěsů lopatek.

Roku 1989 byla provedena privatizace PBS, která způsobila zánik tohoto významného výrobce parních a plynových turbín s čistě českým vlastnictvím. Na tradici PBS ve výrobě a servisu parních a spalovacích turbín navázaly podniky se zahraničním ale i českým vlastnictvím a v této tradici pokračují dodnes.



Obr. 2 Řez turbínou PT-25-90/10/1,2 o výkonu 25MW a 2 regulovanými odběry

2 PARNÍ TUBÍNA

2.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE [2]

Každá turbína je ve své podstatě rychloběžný lopatkový motor, který přeměňuje některý druh energie na mechanickou práci. Vykonaná práce se využívá k pohonu elektrického generátoru, turbokompresoru, čerpadla, lodního šroubu apod. Rozeznáváme turbíny

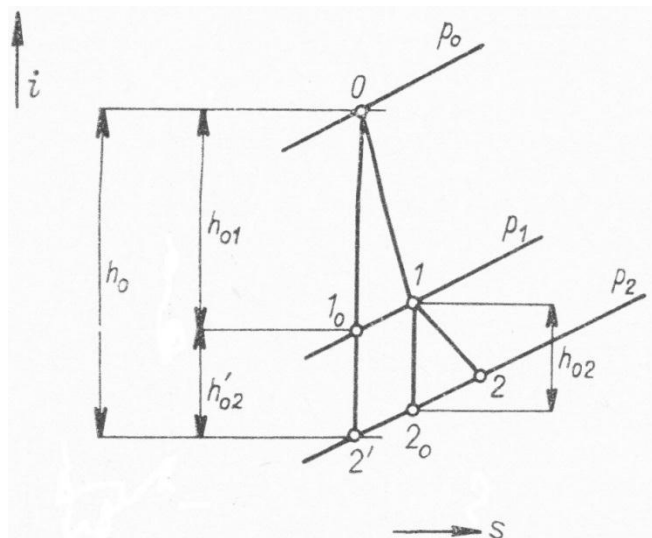
- vodní – přeměňuje se mechanická energie vody,
- parní – přeměňuje se tepelná energie obsažená ve vodní páře,
- plynové – přeměňuje se tepelná energie obsažená v plynu.

Parní a plynové turbíny se souhrnně označují jako tepelné. U obou dochází k expanzi vysokotlaké přehřáté páry nebo stlačeného horkého plynu, při níž se přeměňuje tepelná a tlaková energie vzdušiny na energii mechanickou.

Turbíny jsou charakteristické svou nízkou hmotností, rozměry a cenou v porovnání s dosahovaným vysokým výkonem, účinností a možností expanze až do vakua. Dalším charakteristickým znakem je velká přizpůsobivost požadavkům, které jsou na ně kladeny. Můžeme se tak setkat s turbínami nepatrných rozměrů o výkonu několik kW, využívané například jako náhradu za redukční ventil, až s turbínami o nejvyšším výkonu přes 1000 MW parních turbín v jaderných elektrárnách. Dále bude věnována pozornost pouze parním turbínám.

2.2 PRINCIP FUNKCE [1,2,3]

Principem parní turbíny je přeměna tepelné energie obsažené v páře na energii pohybovou, vyvozuující točivý moment. Pára vstupující do turbíny o počátečním tlaku v turbíně expanduje na konečný tlak, přičemž procházející pára vstupuje do oběžných lopatek a působí na ně silou, pohybuje jimi a tím otáčí oběžným kolem a hřídelem, se kterým je oběžné kolo pevně spojeno.



Obr. 3 Tepelný spád v i-s diagramu [1]

Parní turbíny jsou konstruovány převážně jako mnohostupňové s několika stupni řazenými za sebou. Každý stupeň je tvořen pevným rozváděcím kolem a oběžným kolem umístěným na rotoru, v němž pára vyvozuje při průtoku moment vůči hřídeli.

Na Obr. 3 je znázorněn izentropický tepelný spád v i-s diagramu probíhající na každém stupni parní turbíny, kde h_0 je izentropický spád na celý stupeň, h_{01} na rozváděcí kolo a h_{02} na oběžné kolo.

Platí, že $h'_{02} > h_{02}$, ovšem rozdíl je malý a lze tedy psát

$$h_0 = h_{01} + h_{02}.$$

Stupeň reakce je poměr entalpického spádu přeměněného v oběžných lopátkách ku celkovému entalpickému spádu stupně a je definován vztahem

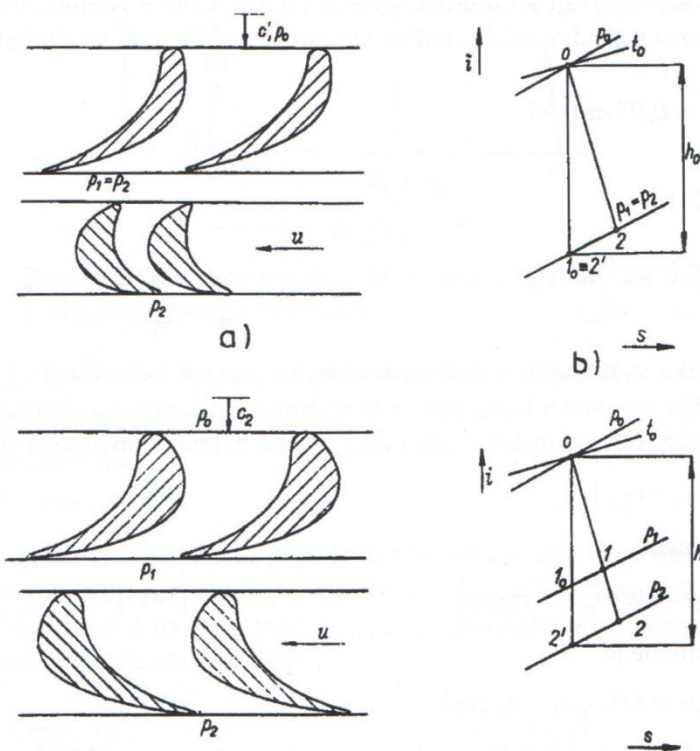
$$r = \frac{h_{02}}{h_{01} + h_{02}} = \frac{h_{02}}{h_0}.$$

Jestliže je $r = 0$, jedná se o rovnotlakovou (akční) turbínu, tlak před oběžnými lopátkami a za nimi je stejný, platí $p_2 = p_1$. Pokud je $r = 0,5$ jde o turbínu přetlakovou, při níž je tlak před oběžnými lopátkami p_1 větší než tlak za nimi p_2 . Stupeň reakce r závisí na poměru průtočných ploch na výstupu z rozváděcích a oběžných lopatek a není vázán na hodnoty 0 nebo 0,5. Turbínový stupeň s nulovým nebo malým stupněm reakce r se označuje jako rovnotlaký a stupeň s větším stupněm reakce (např. $r = 0,5$) jako přetlakový.

Na Obr. 4 je naznačen tvar lopatek a expanzní čára v i - s diagramu pro oba typy stupňů. U rovnotlakého stupně se přeměňuje v rozváděcích lopátkách na rychlost c celý entalpický spád stupně, zatímco u přetlakového stupně pouze část a zbytek spádu se přemění na rychlost v oběžném lopátkovém kole a následně v rotoru se mění kinetická energie na mechanickou práci. Tlakem páry na oběžné lopatky přetlakového stupně vzniká velká osová síla na rotor, která je vyrovnávána odlehčujícím pístem.

Pro posouzení velikosti zpracovaného izoentropického tepelného spádu h_0 pro daný turbínový stupeň se zavádí jeho závislost na obvodové rychlosti u . V úvahu lze brát vztah pro rychlost c_1 a zpracovaný izoentropický spád h_0 pro

- rovnotlaký stupeň ($r=0$) $c_1 \doteq u \doteq \sqrt{h_0} \Rightarrow h_0 \doteq u^2$
- přetlakový stupeň ($r=0,5$) $c_1 \doteq 2 \cdot u \doteq \sqrt{2 \cdot h_0} \Rightarrow h_0 \doteq 2 \cdot u^2$

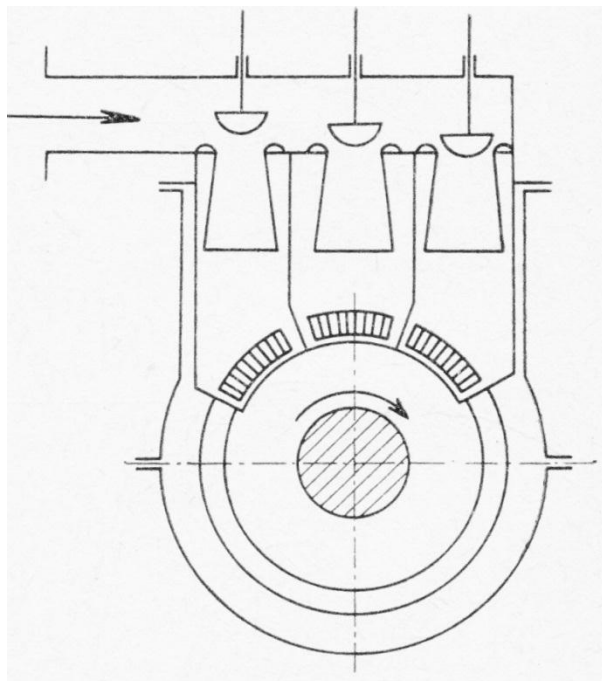


Obr. 4 Řez lopatkami a expanzní čáry v i - s diagramu [3]

Rovnotlaký stupeň tedy při stejné obvodové rychlosti zpracuje přibližně dvojnásobný izoentropický tepelný spád než přetlakový. Při návrhu turbíny na velký spád, který nelze s dobrou účinností zpracovat v jednom stupni, se volí turbína mnohostupňová, která se skládá ze stupňů řazených za sebou, přičemž na každý stupeň připadá z celého tepelného spádu jen část a každý stupeň má příznivý poměr obvodové rychlosti k rychlosti páry a tím i dobrou účinnost.

Pro zpracování velkého tepelného spádu se též používá Curtisovo kolo, např. jako regulační stupeň u mnohostupňových turbín. Oběžné kolo má dva, zřídka tři věnce oběžných lopatek. Stupeň reakce v oběžných lopátkách prvního i druhého věnce je velmi malý nebo nulový, hlavní část celkové reakce je využito ve vratných lopátkách. Účinnost Curtisova stupně je však nižší než u stupně rovnotlakého nebo přetlakového.

Podle uspořádání rozváděcích lopatek na obvodě turbíny se rozlišuje plný ostřík lopatek nebo částečný (parciální) ostřík lopatek – viz Obr. 5. V prvním případě jsou rozváděcí lopatky uspořádány po celém obvodu, v druhém případě pouze na části obvodu. Částečného ostříku lopatek se používá u Curtisových a rovnotlakých stupňů, kde by při malých průtočných objemech vyšla při plném ostříku krátká lopatka a tím malá účinnost. Částečný ostřík se zavádí u prvního (regulačního) stupně, který má několik dýzových skupin, které se ovládají příslušnými regulačními ventily.



Obr. 5 Schéma skupinové regulace při částečném ostříku [1]

2.3 ROZDĚLENÍ PARNÍCH TURBÍN [2,3]

Parní turbíny se rozdělují do skupin podle několika kritérií, což je dáno velkou rozmanitostí požadavků na turbíny a mnohostranností jejich využití.

- a) Podle tlaku výstupní páry
 - Turbíny protitlakové (protitlak > 1 atm)
 - Turbíny kondenzační (protitlak < 1 atm – pára expanduje do vakua)
- b) Podle principu funkce
 - Turbíny rovnotlaké (akční)
 - Turbíny přetlakové
 - Turbíny smíšené (část turbíny je rovnotlaká, část přetlaková)
- c) Podle počtu stupňů
 - Turbíny jednostupňové
 - Turbíny mnohostupňové (až 20 stupňů v jednom tělese)
- d) Podle počtu těles
 - Turbíny jednotělesové (pro menší výkony)
 - Turbíny vícetělesové (pro větší výkony)
- e) Podle směru proudění páry
 - Turbíny axiální (pára proudí rovnoběžně s osou hřídele – nejčastější typ)
 - Turbíny radiální (pára proudí kolmo na osu hřídele)
 - Turbíny centripetální (pára vstupuje do turbíny radiálně a vystupuje axiálně)
- f) Podle uložení turbíny
 - Turbíny stacionární
 - Turbíny mobilní (např. lodní)
- g) Podle odběru páry z turbíny
 - Turbíny s neregulovanými odběry (na několika místech turbíny pro ohřev napájecí vody kotle a zvýšení tepelné účinnosti oběhu)
 - Turbíny s regulovanými odběry (jeden až tři odběry o vhodném tlaku určené jako teplo spotřebitelům)
- h) Podle účelu použití
 - Turbíny elektrárenské
 - Turbíny průmyslové

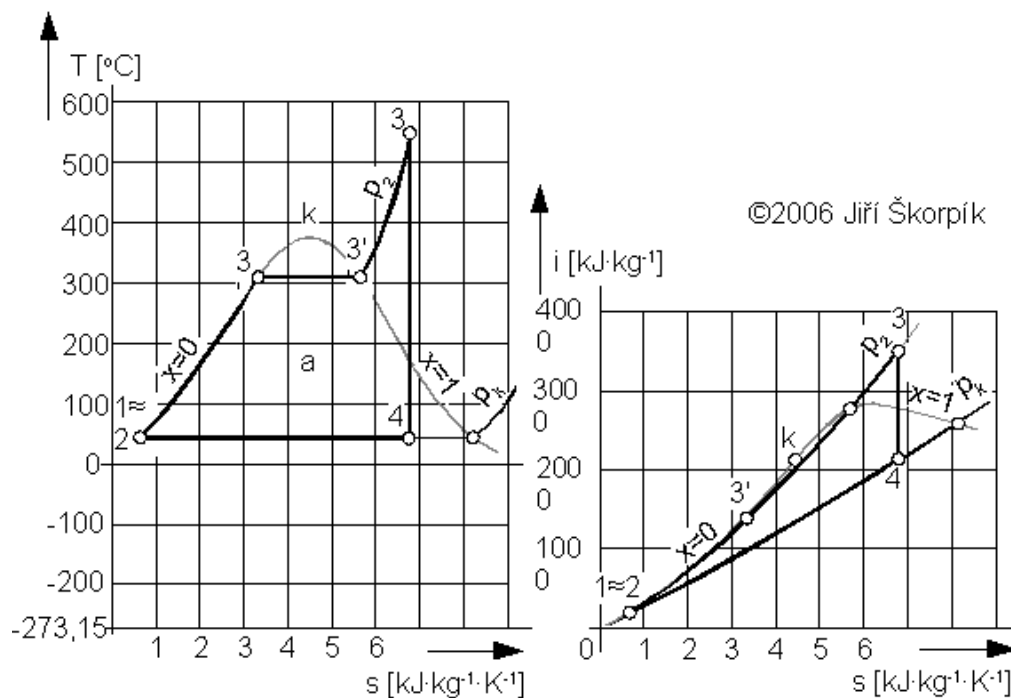
2.4 TEPELNÝ OBĚH PARNÍCH TURBÍN [1,3]

Tepelný oběh parní turbíny představuje řadu změn pracovní látky v dané soustavě, po kterých se pracovní látka v soustavě dostane do původního stavu. Změna stavových veličin se projevuje například ochlazováním, ohříváním, stlačováním a rozpínáním pracovní látky. Průběh změn soustavy lze zobrazit v p-v diagramu uzavřenou křivkou. Rozdělujeme změny vratné a nevratné. Jsou-li všechny změny vratné, celý oběh je vratný a lze jej znázornit v T-s diagramu uzavřenou křivkou. Změny nevratné vznikají změnou rychlosti proudění, změnou hmotnosti pracovní látky, nevratnými změnami skupenství apod. Skutečné tepelné oběhy parních turbín jsou vždy nevratné. Ke každému skutečnému oběhu lze však přiřadit oběh vratný, vzniklý zanedbáním všech ztrát a nazývá se porovnávací. Stanovením poměru tepelných účinností skutečného a porovnávacího oběhu se získá porovnávací součinitel oběhu v

$$v = \frac{\eta_{to}}{\eta_{tp}}$$

2.4.1 RANKINE-CLAUSIŮV PARNÍ OBĚH [3,6]

Rankine-Clausiusův parní oběh (R-C oběh) je nejrozšířenější tepelný oběh v energetice. Jedná se o oběh využívající skupenské změny mezi kapalinou a párou, ve kterém pracují parní turbíny. Využití tedy nalézá v tepelných elektrárnách na fosilní paliva i v jaderných elektrárnách. Velkou výhodou je, že parní oběh je oběh s vnějším přestupem tepla, lze tedy využít prakticky jakéhokoliv zdroje tepla (fosilní paliva, solární energie, jaderná energie apod.). Nejčastější realizace R-C oběhu je uvedena na Obr.6.



Obr. 6 R-C oběh v T-s a i-s diagramu [6]

Zkondenzovaná kapalina se ze stavu 1 a tlaku p_1 stlačuje napájecím turbočerpádem na stav 2 a provozní tlak p_2 , poté se izobaricky dodává teplo q_d . Přitom se ohřívá v parním kotli až do stavu syté kapaliny 3' a následně dochází k varu vody do stavu syté páry 3''. Poté se pára v přehříváku odpařuje a přehřívá do stavu 3. Další změnou je adiabatická expanze v parní turbíně ze stavu 3 do stavu mokré páry 4, přičemž je poháněn rotor turbíny spojený s elektrickým generátorem. Pára ze stavu 4 izotermicky kondenzuje do stavu 1, odvádí se teplo q_o a oběh je uzavřen.

Teplo dodané v parním kotli (q_d) a odvedené v kondenzátoru (q_o) lze vyjádřit takto

$$q_d = i_3 - i_2$$

$$q_o = i_4 - i_1$$

Práce konaná v turbíně (a_T) s účinností η_T a práce spotřebovaná turbočerpádem (a_{ζ}) s účinností η_{ζ} lze vyjádřit takto

$$a_T = (i_3 - i_4) \cdot \eta_T$$

$$a_{\zeta} = \int_1^2 \frac{v \cdot dp}{\eta_{\zeta}} = \frac{v_1 \cdot (p_2 - p_1)}{\eta_{\zeta}} = \frac{i_2 - i_1}{\eta_{\zeta}}$$

Celková práce R-C oběhu lze vyjádřit takto

$$a_{R-C} = a_T - a_{\zeta}$$

Termodynamická účinnost R-C oběhu je dána vztahem

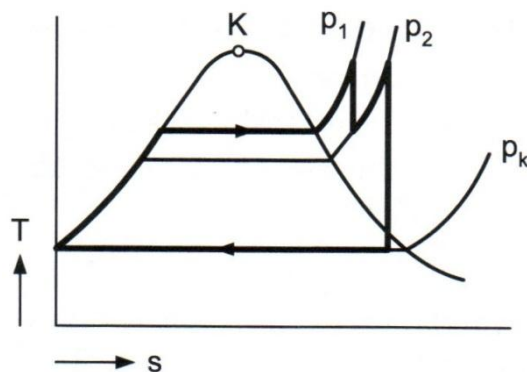
$$n_t = \frac{a_{R-C}}{q_d}$$

Mezi způsoby, jakými se zlepšuje účinnost R-C oběhu patří

- regenerační ohřev napájecí vody (neregulovaným odběrem páry z turbíny)
- přihřev páry (viz níže)
- carnotizace tepelného oběhu (viz níže)

PŘÍHŘEV PÁRY

Přihřívání páry se realizuje opakováním části oběhu s nejvyšší teplotou přivodu tepla. Pára nejprve částečně expanduje ve vysokotlaké části turbíny, poté se v přehříváku znovu ohřeje a následuje expanze na turbíně až do její nízkotlaké části. Znázornění v T-s diagramu je na Obr.7.



Obr. 7 Přihřívání páry v T-s diagramu [3]

CARNOTIZACE TEPELNÉHO OBĚHU

Smyslem carnotizace tepelného oběhu je zjistit možnosti zvýšení tepelné účinnosti daného oběhu, k čemuž je nutné stanovit střední teplotu přívodu tepla (\bar{T}_T) a střední teplotu odvodu tepla (\bar{T}_S)

$$\bar{T}_T = \frac{\int_{s_{min}}^{s_{max}} T \cdot ds}{s_{max} - s_{min}}$$

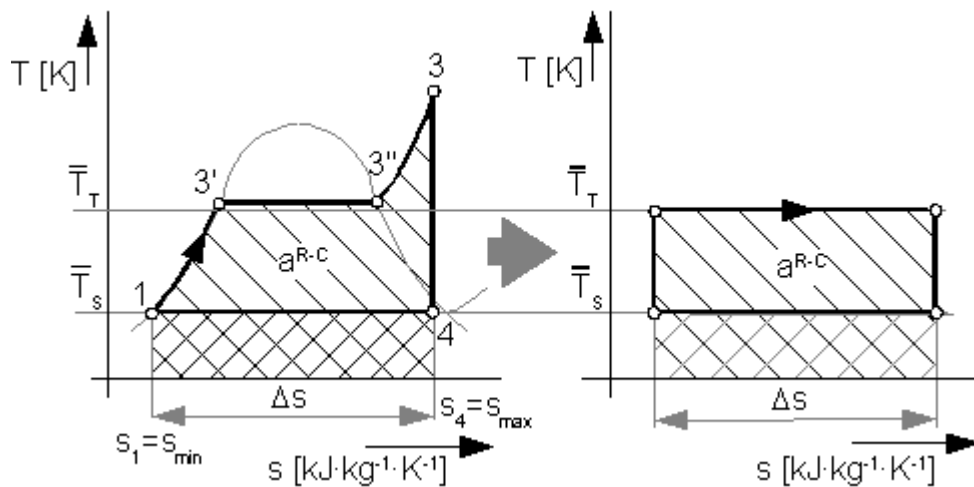
$$\bar{T}_S = \frac{\int_{s_{max}}^{s_{min}} T \cdot ds}{s_{max} - s_{min}}$$

Na základě těchto veličin lze snadno sledovat vliv parametrů pracovní látky na tepelnou účinnost oběhu, která je v tomto případě dána vztahem

$$\eta_t = 1 - \frac{\bar{T}_S}{\bar{T}_T}$$

Z uvedeného vztahu plyne, že zvýšení tepelné účinnosti oběhu se dosáhne zvýšením \bar{T}_T nebo snížením \bar{T}_S .

Na Obr.8 je uveden převod původního R-C oběhu na ekvivalentní Carnotův oběh, složený ze středních teplot a z příslušného rozdílu entropií, který koná stejnou měrnou práci a má stejnou tepelnou účinnost jako původní R-C oběh.



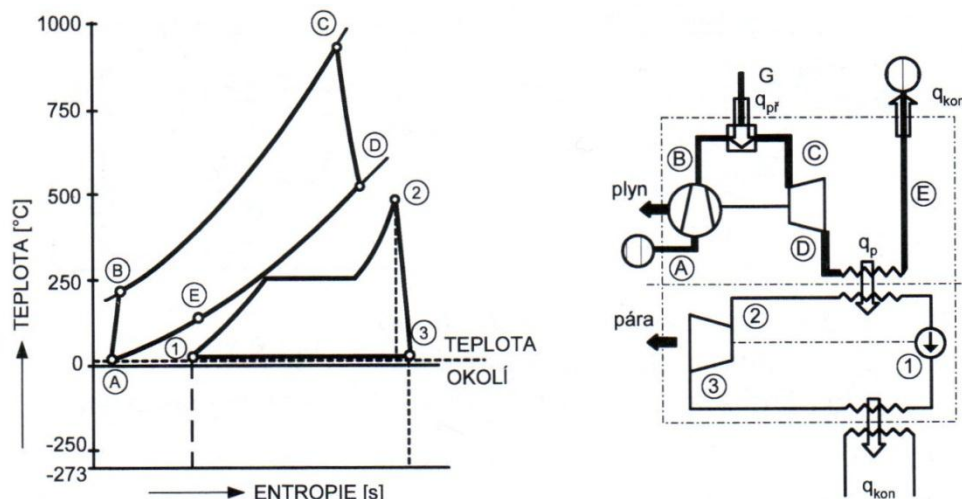
Obr. 8 Carnotizace R-C oběhu v T-s diagramu [6]

2.4.2 KOMBINOVANÝ PAROPLYNOVÝ OBĚH [3,6]

Kombinovaný paroplynový oběh vzniká spojením výhod parní a plynové turbíny. Zatímco u parních oběhů je střední teplota přívodu tepla poměrně nízká, ale i střední teplota odvodu tepla je nízká, naopak u plynových oběhů se dosahuje vysoké střední teploty přívodu tepla a také vysoké střední teploty odvodu tepla. Jelikož pro dosažení vysoké tepelné účinnosti je potřeba přivádět teplo o vysoké střední teplotě a odvádět o nízké střední teplotě, spojením parního (Rankine-Clausiova) a plynového (Braytonova) oběhu do paroplynového oběhu se využijí výhody a eliminují nevýhody samostatných oběhů a dosáhne vyšší účinnosti. Další

výhodou paroplynového oběhu je zmenšení kompresní práce plynového oběhu, která činí $2/3$ hrubého výkonu plynové turbíny. Příkon napájecího čerpadla činí jen několik procent výkonu parní turbíny díky tomu, že se několikanásobně zmenšuje objem páry při její kondenzaci.

Znázornění paroplynového oběhu v T-s diagramu se schématem zařízení pro jeho realizaci je uvedeno na Obr.9.

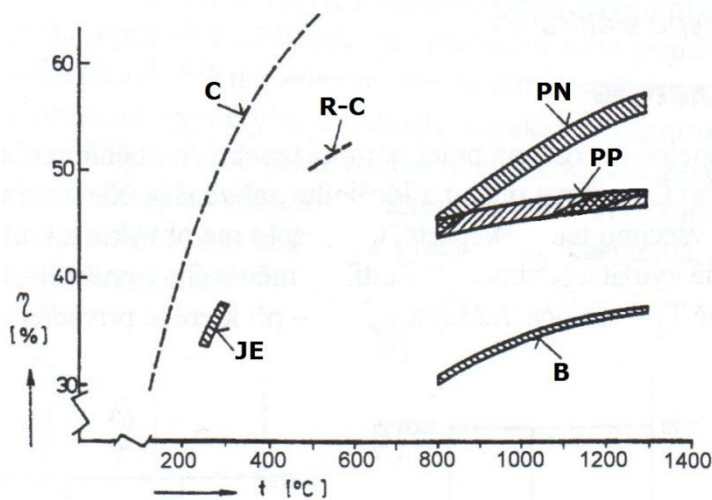


Obr. 9 Schéma paroplynového oběhu [3]

2.4.3 SROVNÁNÍ ÚČINNOSTÍ TEPELNÝCH OBĚHŮ

Účinnosti jednotlivých tepelných oběhů jsou porovnány na Obr.10. Jsou na něm zobrazeny účinnosti v závislosti na přívodu tepla do obvodu těchto oběhů

- ideální Carnotův oběh (C),
- Rankine-Clausiusův parní oběh (R-C),
- Braytonův plynový oběh (B)
- paroplynový oběh přitápěný (PP)
- paroplynový oběh nepřitápěný (PN)
- parní oběh jaderné elektrárny (JE)

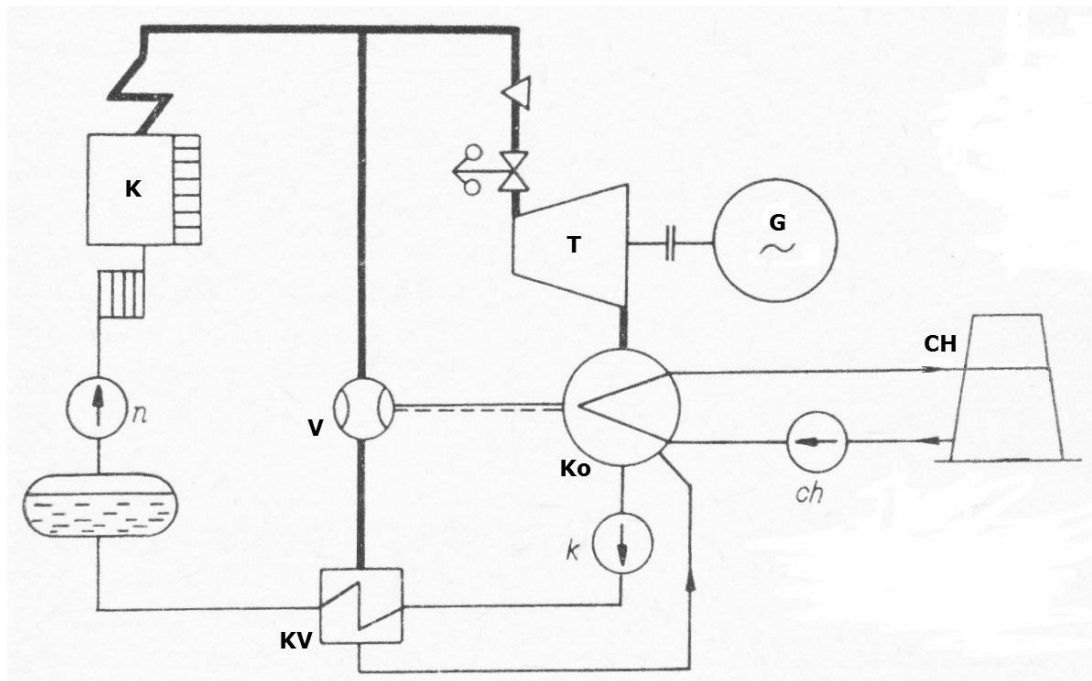


Obr. 10 Účinnosti různých typů tepelných oběhů [3]

2.5 POMOCNÁ ZAŘÍZENÍ PARNÍCH TURBÍN [1,2]

Parní turbína pochopitelně nepracuje samostatně, ale je součástí soustrojí a pomocných zařízení, zajišťujících společně provoz energetické centrály. Pro přehledné znázornění tepelných energetických zařízení se používají tepelné schémata. Příklad základního tepelného schématu parostrojního zařízení se značkami uvedenými v ČSN 38 0451 je na Obr.11. Jedná se o **zařízení s kondenzační parní turbínou**. Dále je uveden stručný popis tohoto energetického zařízení.

Pára odchází o požadovaných parametrech z kotle (**K**) přes odlučovač vody, spouštěcí ventil, regulační ventily a vstupuje do turbíny (**T**), kde expanduje na nízký protitlak a odchází do kondenzátoru (**Ko**), ve kterém se sráží v kondenzát. Odtud je hnán kondenzátním čerpadlem (**k**) přes kondenzátor paroproudové vývěvy (**KV**) do tlakové nádrže. Napájecí čerpadlo (**n**) žene kondenzát z tlakové nádrže do parního kotle, ten je v tomto případě opatřen ekonomizérem a ohřívákem vzduchu. Kondenzátor je zde dvoucestný a je využito cirkulačního chlazení – chladicí voda cirkuluje mezi kondenzátorem a chladičem, zde chladicí věží (**CH**), ve které se teplo předává do vzduchu. Pohyb vody je zajišťován oběhovým chladicím čerpadlem (**ch**). V uvedeném schématu také nalezneme generátor elektrické energie (**G**) připojený na rotor turbíny přes převodovou skříň a paroproudovou vývěvu (**V**), která slouží k odsávání vzduchu z kondenzátoru, vznikající netěsnostmi nebo příchodem s párou.



Obr. 11 Zjednodušené základní tepelné schéma [1]

Alternativou je tepelné schéma **zařízení s protitlakovou parní turbínou**. V tomto případě se výstupní pára používá k topení nebo pro jiné účely. U některých zařízení s protitlakovými turbínami se kondenzát z topné páry nevrací nebo jen v malém množství a je tedy nutné přivádět značné množství náležitě upravené přídavné vody do napájecí nádrže.

Další variantou je tepelné schéma **zařízení s parní turbínou s regulovaným odběrem**. Použití tyto turbíny nalézají v případech, kdy je potřeba pára o nižším tlaku a značné množství elektrické energie. Turbína je rozdělena na vysokotlakou a nízkotlakou část, přičemž potřebné množství páry se odebírá z turbíny po expanzi ve vysokotlaké části na určitý tlak a zbytek páry expanduje v nízkotlaké části turbíny na protitlak. Odebíraná pára se v místě odběru udržuje na tlaku o stálé hodnotě nezávisle na různém odebíraném množství i výkonu. Požadovaný tlak se udržuje pomocí dvojích regulačních ventilů a to vysokotlaké pro regulaci vstupu ostré páry a přepouštěcí regulující množství páry do nízkotlaké části turbíny. Regulovaných odběrů může být více, nejčastěji jsou však nejvýše dva z důvodu složitosti regulace.

Následující charakteristiky jsou zaměřeny na vybraná pomocná zařízení nutná k provozu parních turbín:

- **Kondenzátor** – slouží k ochlazení páry proudící z výstupního hrdla parní turbíny tak, aby pára zkondenzovala. Toho je docíleno pomocí proudění chladicí vody trubkami v kondenzátoru, kolem kterých proudí pára z turbíny a na jejichž povrchu se pára ochlazuje a kondenzuje a je odtud přečerpána pomocí kondenzátních čerpadel do tlakové nádrže a odtud zpět do kotle.
- **Čerpadla** – jsou to rotační zařízení poháněná elektromotorem nebo pomocnou turbínkou. Z důvodu zajištění provozu proti poruchám jsou u větších jednotek použita čerpadla jednak s motorickým, ale i turbínovým pohonem jako rezerva. Podle hnaného média a umístění rozlišujeme čerpadla na kondenzát, čerpadla na chladicí vodu a napájecí čerpadla.
- **Vývěvy** – jsou zařízení určená k odsávání vzduchu z kondenzátoru. Rozdělujeme je podle principu, na kterém pracují, na paroproudé, vodoproudé a vodokružné. Nejpoužívanější jsou vývěvy paroproudé. Pára v nich proudí velkou rychlostí difuzorem a strhuje sebou vzduch z potrubí, kterým je vývěva spojena s parním prostorem kondenzátoru. Směs páry a vzduchu poté vstupuje do kondenzátoru vývěvy, kde pára zkondenzuje a vzduch ze směsi se vypouští do atmosféry.
- **Ohříváky** – jsou určeny k předehřívání kondenzátu, který je používán jako napájecí voda vstupující do kotle a zvyšují tak hospodárnost oběhu. Kondenzát tak prochází několika ohříváky ve kterých se postupně ohřívá na stanovenou teplotu. Uvnitř ohříváku prochází kondenzát systémem trubek, které jsou na vnějším povrchu ohřívány párou z neregulovaných odběrů z turbíny. Pára během toho zkondenzuje a vzniklý kondenzát je odveden do kondenzátoru.
- **Potrubí** – rozdělujeme dle funkce a dle protékající látky na parní, ucpávkové, odvodňovací, na olej a vnitřní. Potrubí **parní** slouží předně k přívodu ostré páry od kotle k turbíně a je opatřeno odlučovačem vody eliminující kapky vody a nečistoty přiváděné do turbíny. Potrubí **ucpávkové** je určeno k odsávání páry z vysokotlaké ucpávky a k zahlcování nízkotlaké ucpávky. Potrubí **na olej** slouží k rozvodu regulačního oleje a k rozvodu mazacího oleje k jednotlivým ložiskům. Potrubí

odvodňovací odvádí kondenzát z prostorů turbíny a z potrubí ostré páry do kondenzátoru, kde se mísí s hlavním kondenzátem. Potrubí vnitřní je veškeré ostatní potrubí na vodu, vzduch a páru. Příkladem může být potrubí na vzduch mezi kondenzátorem a vývěvou nebo potrubí na chladící vodu mezi čerpadlem a kondenzátorem.

- Převodová skříň – používá se v případech, kdy má turbína větší počet otáček než poháněný stroj. V převodové skříni jsou v radiálních ložiscích uloženy dva hřídele s ozubenými koly, na jedné straně je hřídel spojen přes spojku s rotorem turbíny a na druhé straně s rotorem poháněného stroje.
- Generátor – zařízení vyrábějící elektrickou energii je složeno ze statoru uloženého na základové desce, rotoru, spojeného spojkou s rotorem turbíny uloženého v kluzných ložiscích a budiče.

3 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ PARNÍCH TURBÍN

V následujícím jsou uvedeny nejčastější typy konstrukčního provedení parních turbín, se kterými se lze v průmyslových aplikacích setkat.

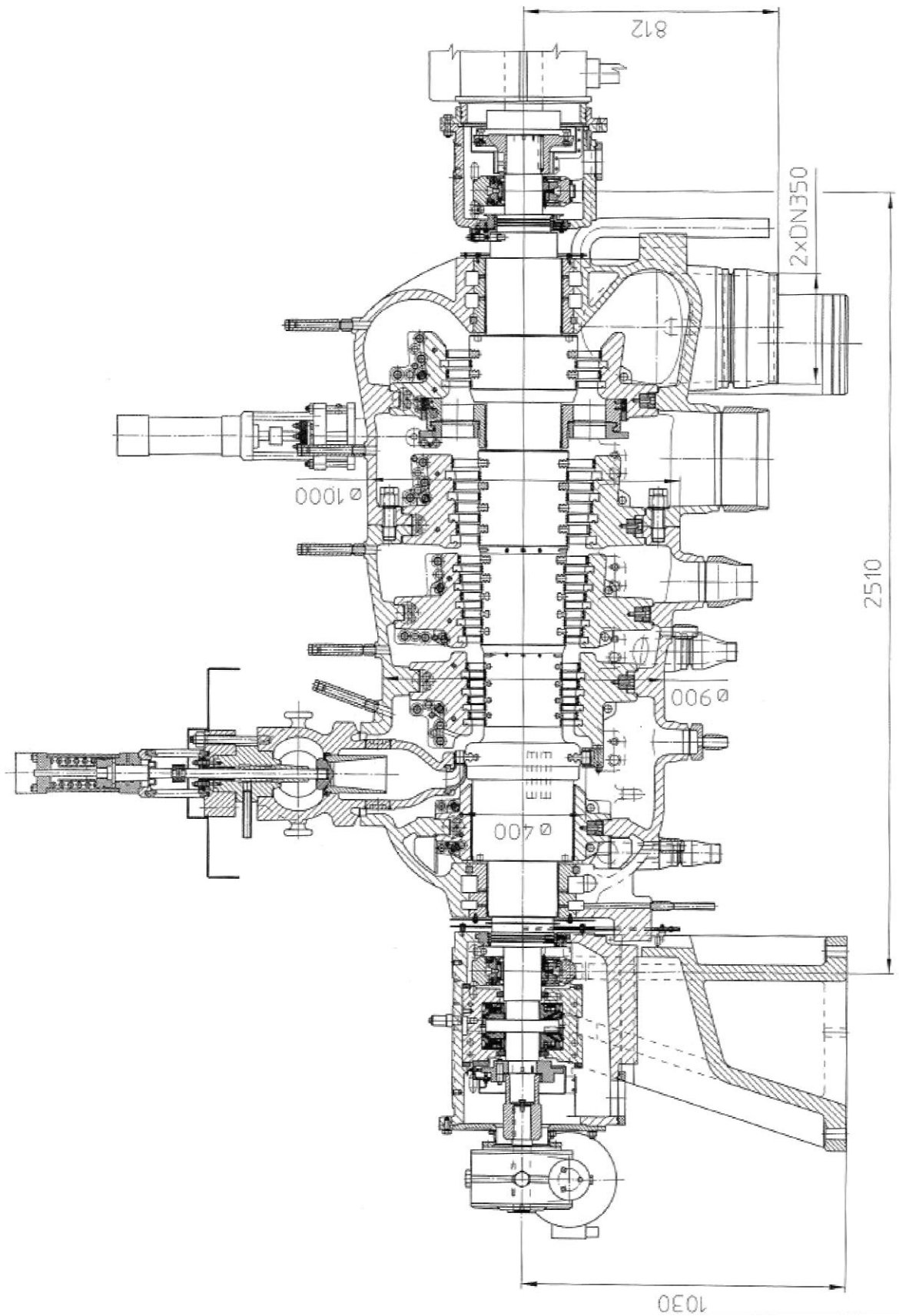
3.1 TURBÍNY PROTITLAKOVÉ [2,7]

Protitlakové turbíny nacházejí uplatnění v podnicích požadujících spojenou výrobu elektrické energie a tepla. Příkladem mohou být cukrovary, papírny, chemické továrny, rafinerie, továrny na celulózu apod. Takovéto podniky vyžadují turbínu nejen k pohonu elektrického generátoru, ale také protitlakou páru z turbíny použitelnou k výrobním účelům, tzv. průmyslovou páru. Řešením by taktéž mohlo být použití kondenzační turbíny k výrobě elektrické energie a průmyslovou páru vyrábět ve zvláštním nízkotlakém kotli dodávajícím páru k výrobním účelům o požadovaném tlaku, avšak v těchto případech je mnohem hospodárnější využít právě turbínu protitlakovou.

Pro malé výkony protitlakových turbín konstruovaných jako jednostupňové se používá Curtisovo kolo nebo jednověncové kolo (rovnotlaký stupeň). Protitlakové turbíny vysokých tepelných spádů a výkonů se konstruují jako mnohostupňové. Prvním (regulačním) stupněm je Curtisovo kolo či jednověncové kolo a za ním následuje rovnotlaká nebo přetlaková část, podle které turbínám přiřazujeme označení, rovnotlaké nebo přetlakové. Zpracování velkých tepelných spádů někdy vyžaduje použití dvoutělesové koncepce protitlakové turbíny. Lopatkování je rozděleno do dvou těles, přičemž uspořádání je často voleno protiproudé, tedy směr proudění páry v druhém tělese je opačný než v tělese prvním. Zvláštním typem protitlakových turbín jsou turbíny předřazené, využívané ve starších energetických centrálech. Hospodárnost se zvyšuje nahrazením starých kotlů novými vysokotlakými, které se opatřují předřazenou protitlakovou turbínou s elektrickým generátorem. Tato turbína zpracovává daný tepelný spád a výstupní protitlak je roven vstupnímu tlaku do stávajících starých turbín. Zvýšená hospodárnost se projeví menší spotřebou paliva k výrobě stejného množství elektrické energie.

Je zřejmé, že výstupní protitlak z protitlakových turbín je vyšší než tlak atmosférický a jeho velikost se odvíjí od požadavků průmyslu. Například teplárny, vyrábějící kromě elektrické energie také páru k vytápění městských částí nebo průmyslových objektů, mají protitlak kolem 9 atm, zatímco například cukrovary vyžadují protitlak kolem 3 atm.

Na Obr. 12 je uveden příklad konstrukčního provedení parní protitlakové mnohostupňové turbíny s typovým označením PR10 - 7,3/0,5/0,23. Výrobce uvádí výkon na svorkách generátoru 10 MW, tlak vstupní páry 73 bar, teplota vstupní páry 510°C, max. otáčky turbíny 10 000 ot/min a max. množství vstupní páry 50 t/h.



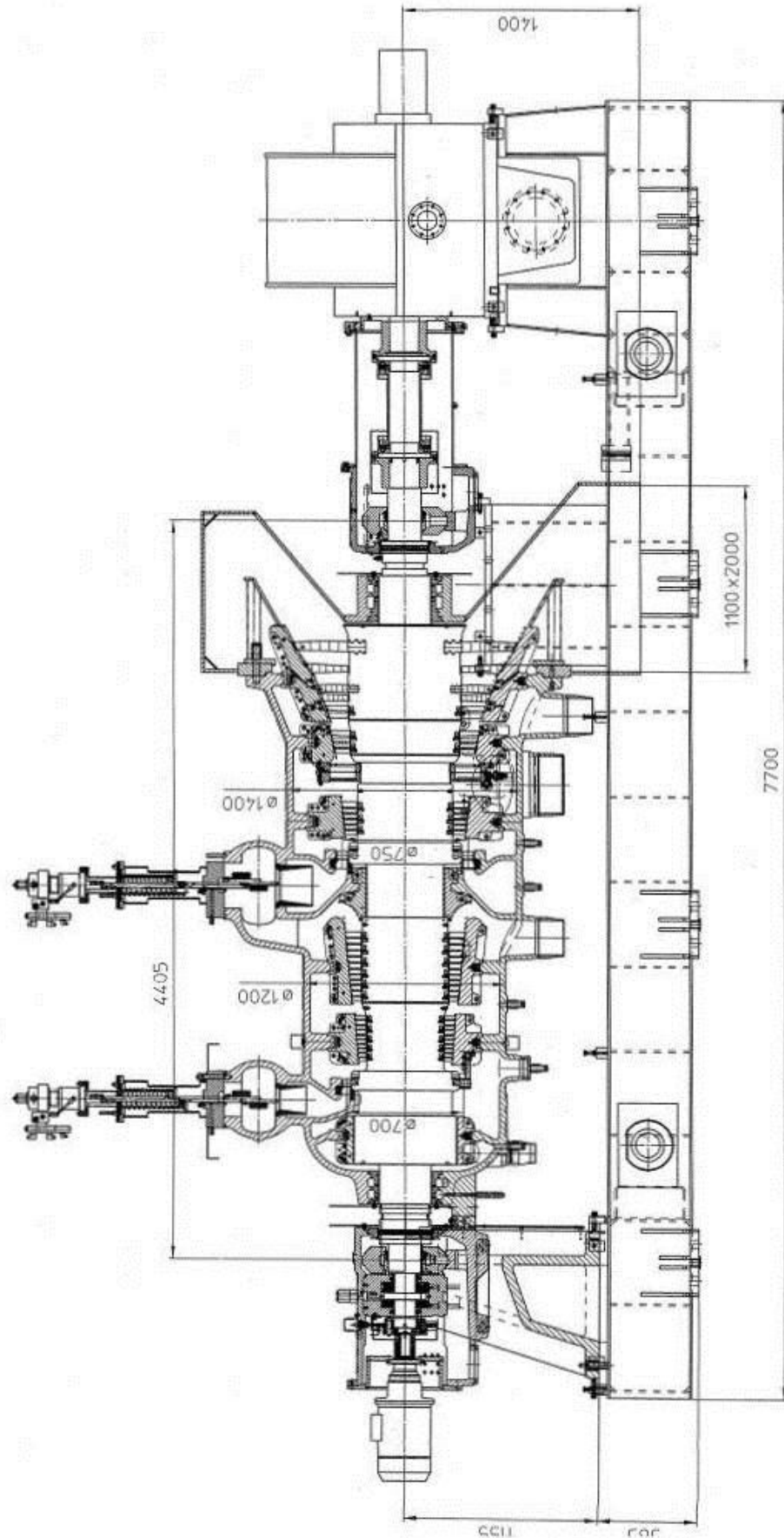
Obr. 12 Parní protitlaková turbína s průmyslovým odběrem 10 MW [7]

3.2 TURBÍNY KONDENZAČNÍ [2,7]

Kondenzační turbíny jsou vhodné tam, kde převládá využití energie páry k pohonu elektrického generátoru. Uplatňuje se totiž poznatek, že čím nižší je výstupní protitlak, tím větší je tepelný spád a tím i výkon, který z daného množství páry můžeme získat. Protitlak vystupující z kondenzační turbíny je nižší než atmosférický, mluvíme tedy o podtlaku (vakuu). Pára vystupuje do uzavřeného prostoru, kondenzátoru, ve kterém kondenzuje při nízkém tlaku a teplotě, což je docíleno nízkou teplotou chladicí vody. Nezbytnou součástí každé kondenzační turbíny je také vývěva odsávající vzduch z parního prostoru kondenzátoru, bez níž by se vzduch v kondenzátoru rychle hromadil a rychle by stoupal tlak – vakuum by se zhoršovalo. Jelikož tlak páry při průtoku turbínou postupně klesá a objem páry se trvale a zpočátku rovnoměrně a dále rychleji zvyšuje (nejrychlejší vzrůst objemu nastává v oblasti vakua), musí se stále zvětšovat průtokové kanály mezi jednotlivými lopatkami. Toho se dosahuje zvětšováním délek lopatek a průměrů stupňů ve směru toku páry. Můžeme tak díky charakteristickému průběhu obrysu snadno poznat olopatkovaný rotor kondenzační turbíny.

Kondenzační turbíny se konstruují jako mnohostupňové a mají vždy několik regulačních ventilů, pomocí kterých se otvíráním nebo zavíráním řídí množství páry protékající turbínou. Prvním (regulačním) stupněm kondenzační turbíny může být Curtisovo kolo, nebo rovnotlaký stupeň (jednověncové kolo). Po regulačním stupni následuje rovnotlaká nebo přetlaková část. Při vysokých výkonech turbíny mohou vycházet příliš velké a těžko proveditelné délky lopatek a průměry posledních stupňů, je proto vhodné rozdělit proud páry na dva proudy, místo jedním pak pára vystupuje dvěma výstupními hrdly. Takovéto turbíny označujeme jako dvouproudové. Kondenzační turbíny nižších výkonu (<50 MW) jsou realizovány jako rychloběžné a mají vyšší otáčky (v rozmezí 5000-9000 ot/min), než jsou požadované otáčky na generátoru (dříve 3000 ot/min, v současnosti obvykle 1500 ot/min). Mezi turbínu a generátor se tak umísťuje převodovka redukující otáčky turbíny na otáčky generátoru.

Na Obr. 13 je uveden příklad konstrukčního provedení parní kondenzační mnohostupňové turbíny s typovým označením PT20 - 3,7/0,6/0,15. Výrobce uvádí výkon na svorkách generátoru 20 MW, tlak vstupní páry 37 bar, teplota vstupní páry 435°C, max. otáčky turbíny 6 000 ot/min a max. množství vstupní páry 102 t/h.

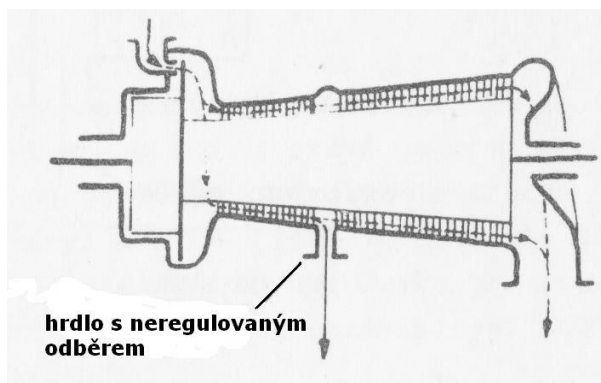


Obr. 13 Parní kondenzační turbína se dvěma regulovanými odběry 20 MW [7]

3.3 TURBÍNY ODBĚROVÉ [2,3]

Do zvláštní kategorie můžeme zařadit parní turbíny opatřené odběry páry. Podle druhu odběru je můžeme dělit na turbíny s neregulovaným a regulovaným odběrem.

Turbíny s neregulovaným odběrem (schéma viz Obr.14) jsou opatřeny hrdlem v turbínové skříní mezi některými dvěma sousedními stupni, z kterého se odebírá část páry protékající turbínou. Takovýto odběr se nazývá neregulovaný a velikost odběrového tlaku se mění v závislosti na aktuálním průtoku páry turbínou v místě odběru a tím tedy na aktuálním výkonu turbíny. Jednoduše tedy lze udělat z protitlakové či kondenzační turbíny turbínu s neregulovaným odběrem. Současné kondenzační turbíny jsou navrhovány s několika neregulovanými odběry, které vedou do ohříváků, ve kterých se ohřívá kondenzát (tzv. regenerace), čímž se dosahuje zvýšené hospodárnosti provozu šetřením paliva.

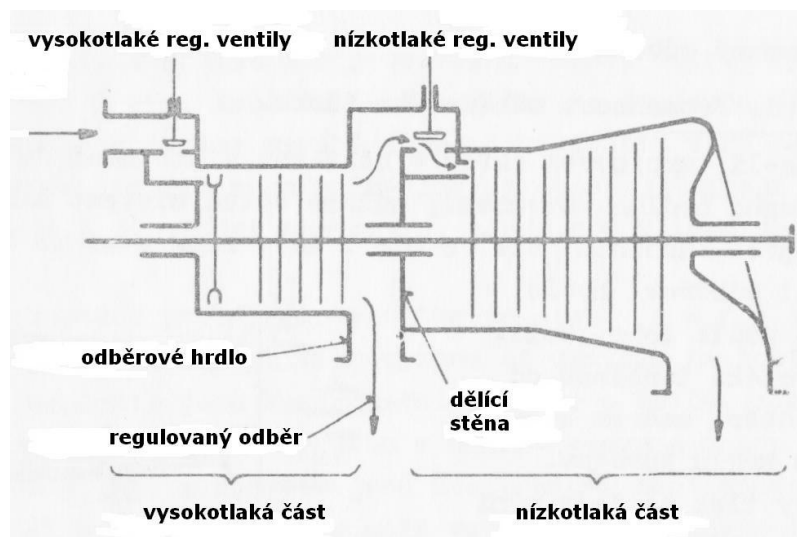


Obr. 14 Schéma turbíny s neregulovaným odběrem [2]

Turbíny s regulovaným odběrem (schéma viz Obr.15) mají zabudované zařízení, které udržuje tlak odebírané páry na konstantní výši. Vstupní pára protékající vysokotlakou částí turbíny se rozděluje na dva díly. První z nich odchází odběrovým hrdlem z turbíny a vede potrubím na místo spotřeby a druhý díl pokračuje přes nízkotlaké regulační ventily do nízkotlaké části turbíny. Tlak odebírané páry se udržuje na stálé výši pomocí tlakového regulátoru působícího na nízkotlaké regulační ventily. Dělicí stěna odděluje část vysokotlakou, která představuje protitlakovou turbínu s protitlakem rovným tlaku odebírané páry a část nízkotlakou, která je kondenzační turbínou se vstupním tlakem rovným tlaku odběrovému. Požadavkem průmyslu však může někdy být odběrová pára o dvou různých tlacích. Pro tento případ někdy vyhovuje protitlaková turbína s jedním regulovaným odběrem, jindy je třeba použít kondenzační turbínu se dvěma regulovanými odběry.

Turbína pak má dvě odběrová hrdla a místa odběrů dělí turbínu na část vysokotlakou, středotlakou a nízkotlakou.

Velmi rozšířeným typem průmyslových parních turbín



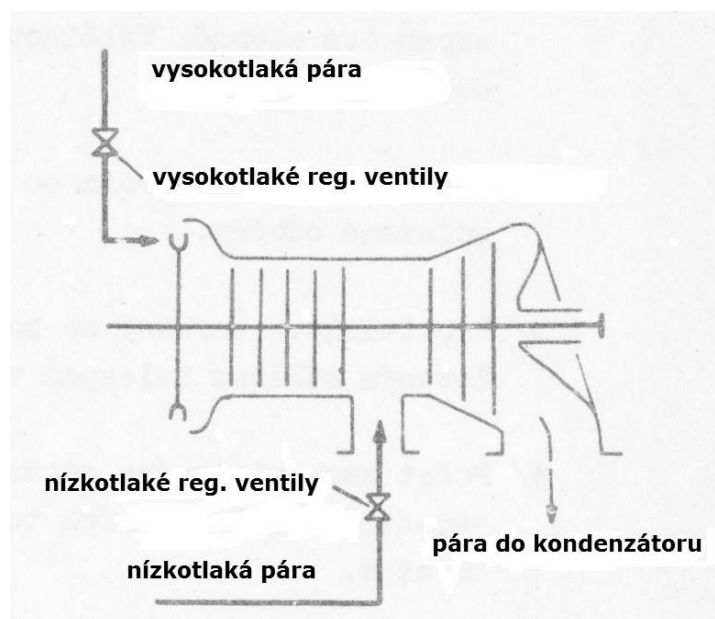
Obr. 15 Schéma turbíny s regulovaným odběrem [2]

jsou kondenzační turbíny s regulovaným odběrem pro velkou přizpůsobivost nejrůznějším podmínkám. Výhodou je spojená výroba elektrické energie a průmyslové páry a dále možnost nezávisle na sobě měnit výkon a odebírané množství páry dle aktuálních požadavků provozu.

3.4 TURBÍNY DVOU TLAKOVÉ [2]

Dvoutlakové turbíny, jinak řečeno turbíny na dvojí páru, nacházejí uplatnění v provozech, kde lze s výhodou použít odpadní páru k pohonu kondenzační turbíny. Používají se zejména u paroplynových cyklů s dvou nebo tří-tlakovým kotlem. Dříve se ve větší míře také využívala odpadní pára tvořená v parních pohonech, jako jsou parní buchary či těžicí stroje v dolech, která by byla jinak volně vyfukována do atmosféry. Využívá se tedy značného množství tepelné energie obsažené v páře namísto její ztráty výfukem do atmosféry. Důvod, proč nepohánět touto párou samostatnou kondenzační turbínu, která by byla schopna využít tento nízký vstupní tlak, je především nekontinuální přísun páry, jelikož parní pohony pracují po přítrzích a dále nedostatečný výkon, který by bylo možno získat.

Zjednodušené schéma dvoutlakové parní turbíny je na Obr.16. Do kondenzační turbíny vstupuje vysokotlaká pára, která expanduje až do vakua. V místě tlaku 1 atm je do turbíny přes nízkotlaké regulační ventily přiváděna nízkotlaká odpadní pára a mísí se s párou vysokotlakou. Do kondenzátoru pak proudí obě páry společně. Přívod vysokotlaké páry je regulován vysokotlakými regulačními ventily. Jestliže je k dispozici nízkotlaká odpadní pára, vysokotlaké regulační ventily jsou otevřeny jen částečně, protože je zapotřebí méně vysokotlaké páry. Pokud nízkotlaká pára k dispozici není, nízkotlaké ventily jsou uzavřeny a turbína pracuje v režimu jako obyčejná kondenzační turbína. Regulační ventily, nízkotlaké i vysokotlaké, jsou řízeny automaticky. K ovládání nízkotlakých regulačních ventilů je zapotřebí jako u turbín s regulovaným odběrem tlakový regulátor.



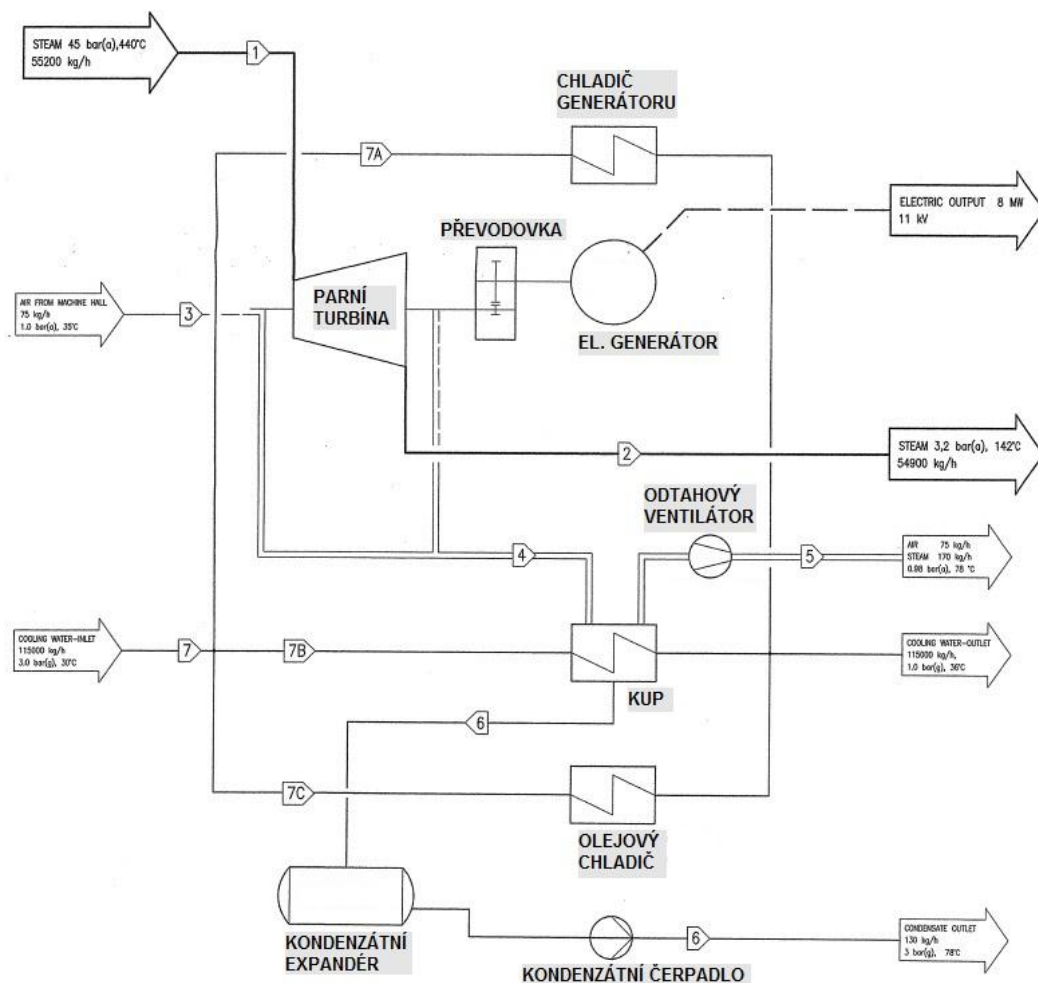
Obr. 16 Schéma dvoutlakové parní turbíny [2]

4 ENERGETICKÁ CENTRÁLA

V této praktické části mé bakalářské práce je představena konkrétní energetická centrála, popis a kontrolní výpočet tepelné bilance turbíny určené pro výrobu elektrické energie a dále k produkci technologické páry využití při procesu výroby cukru v provozu egyptského cukrovaru.

4.1 POPIS TURBOSETU

Energetickou centrálu tvoří turboset obsahující parní protitlakovou turbínu s typovým označením R8-4,5/0,3E o max. výkonu 8MW, instalovanou ve strojovně cukrovaru a dodávající páru o tlaku 3,2 bar a teplotě 142°C a generátor produkující elektrickou energii a dále ostatní pomocná zařízení. Turbína je poháněna párou z kotelny o tlaku 45 bar a teplotě 440°C, která v ní expanduje na tlak 3,2 bar. Část tepelné energie vstupní páry se přeměňuje na mechanickou, která pohání generátor produkující elektrickou energii a zbytek páry je využit pro technologické účely. Elektrický výkon turbosetu závisí na průtoku páry, maximální dodávaný průtok páry je 55,2 t/h, přiněmž dosáhne generátor maximálního výkonu uvedených 8MW. Zařazení turbosetu a ostatních zařízení v energetické centrále je znázorněn na výřezu z tzv. „Process Flow Diagramu“ na Obr.17.



Obr. 17 Schéma zařazení turbosetu v energetické centrále [7]

4.2 PARAMETRY TURBÍNY

Parametry turbíny shrnuje tabulka proudících médií v návaznosti na schéma na Obr.17, která je platná pro režim turbíny produkující elektrickou energii o výkonu na svorkách generátoru 8MW, viz Tab.5

PROCESS FLOW BALANCE				
TOK	PRACOVNÍ KAPALINA	HMOTNOSTNÍ PRŮTOK	TLAK	TEPLOTA
		kg/h	bar(a)	°C
1	Vstupní pára 45 bar(a)	55200	45	440
2	Výstupní pára 3,2 bar(a)	54900	3,2	142
3	Okolní vzduch	75	1,0	35
4	Parovzdušná směs	375	0,98	290
5	Parovzdušná výfuková směs	245	0,98	78
6	Kondenzát	130	4	78
7	Chladicí voda	115000	4	30
7A	Chladicí voda generátoru	45000	4	30
7B	Chladicí voda KUP	40000	4	30
7C	Chladicí voda olejového chlazení	30000	4	30

Tab. 5 Bilance proudících médií protitlakovou turbínou R8-4,5/0,3E

4.3 ZAŘÍZENÍ ENERGETICKÉ CENTRÁLY^[8]

Doplněním schématu na Obr.17 je tabulka (Tab.6) identifikující jednotlivá zařízení výše popsaného turbosoustrojí pomocí tzv. KKS kódů, které představují systém jednotného značení energetických zařízení orientovaný na funkci zařízení pocházející z německého slovního spojení Kraftwerk Kenzichen System (systém pro značení zařízení elektráren).

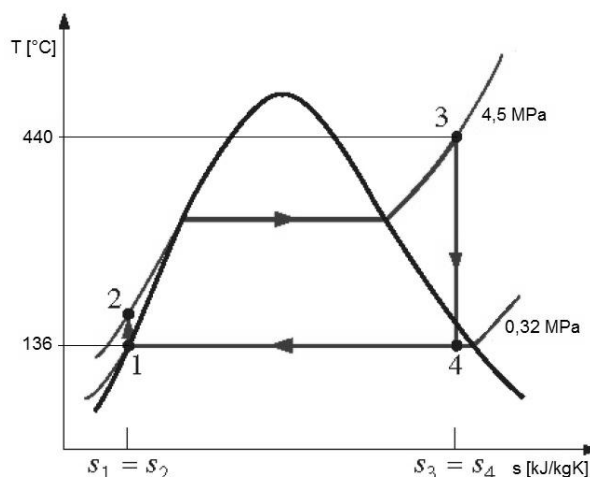
EQUIPMENT IDENTIFICATION	
IDENTIFIKAČNÍ KÓD KKS	NÁZEV ZAŘÍZENÍ
2MAA10 AG010	PARNÍ TURBÍNA
2MAK10 AU010	PŘEVODOVKA
2MKA10 AG010	EL. GENERÁTOR
2MKF10 AC010,020	CHLADIČ GENERÁTORU
2MAW10 AC010	KONDENZÁTOR UCPÁVKOVÉ PÁRY
2MAW10 AN010	ODTAHOVÝ VENTILÁTOR
2MAV20 AC010,020	OLEJOVÝ CHLADIČ
2LCM10 BB010	KONDENZÁTNÍ EXPANDÉR
2LCM10 AP010	KONDENZÁTNÍ ČERPADLO

Tab. 6 Seznam zařízení turbosoustrojí s protitlakovou turbínou R8-4,5/0,3E

4.4 KONTROLA TEPELNÉ BILANCE

Následující kontrola tepelné bilance výše popsané tepelné energetické centrály pracující podle Rankine-Clausiova cyklu byla provedena pro zjednodušený idealizovaný tvar cyklu bez uvažování ztrát v potrubí a zařízení v oběhu. Znázornění uvažovaného tepelného oběhu v T-s diagramu je na Obr.18. Určení stavů vodní páry bylo provedeno s využitím programů XSteam_Excel_v2.6 a PÁRA v1.1. Vstupní údaje pro výpočet jsou:

Tlak vstupní páry: 4,5 MPa
 Teplota vstupní páry: 440°C
 Tlak výstupní páry: 0,32 MPa
 Hmotnostní tok oběhu: 55,2 t/h



Obr. 18 Idealizovaný tepelný oběh v T-s diagramu

Stav v bodě 1 (před čerpadlem):

$$\begin{aligned}
 p_1 &= 0,32 \text{ MPa} \\
 T_1 &= 135,74^\circ\text{C} \\
 x_1 &= 0 \\
 i_1 &= 570,9 \text{ kJ/kg} \\
 s_1 &= 1,69 \text{ kJ/kgK} \\
 v_1 &= 0,001075 \text{ kJ/kgK}
 \end{aligned}$$

Stav v bodě 2 (za čerpadlem):

$$\begin{aligned}
 p_2 &= 4,5 \text{ MPa} \\
 s_2 &= s_1 = 1,69 \text{ kJ/kgK}
 \end{aligned}$$

Práce čerpadla

$$\begin{aligned}
 a_p &= v_1 \cdot (p_1 - p_2) = -4,4935 \text{ kJ/kg} \\
 a_p &= i_2 - i_1 \Rightarrow i_2 = |a_p| + i_1 = 575,4 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

Stav v bodě 3 (před turbínou):

$$\begin{aligned}
 p_3 &= p_2 = 4,5 \text{ MPa} \\
 T_3 &= 440^\circ\text{C} \\
 i_3 &= 3300,6 \text{ kJ/kg} \\
 s_3 &= 6,84 \text{ kJ/kgK}
 \end{aligned}$$

Stav v bodě 4 (za turbínou):

$$p_4 = p_1 = 0,32 \text{ MPa}$$

$$T_4 = T_1 = 135,74^\circ\text{C}$$

$$x_1 = 0,976$$

$$i_4 = 2726,5 \text{ kJ/kg}$$

$$s_4 = 6,84 \text{ kJ/kgK}$$

Práce turbíny

$$a_T = i_3 - i_4 = \mathbf{574,1 \text{ kJ/kg}}$$

Tepelná bilance:

Teplo dodané

$$q_H = i_3 - i_2 = \mathbf{2725,2 \text{ kJ/kg}}$$

Teplo odevzdané

$$q_C = i_4 - i_1 = \mathbf{2155,6 \text{ kJ/kg}}$$

Celková práce parního oběhu

$$a_O = a_P + a_T = \mathbf{569,6 \text{ kJ/kg}}$$

Tepelná účinnost uvažovaného idealizovaného oběhu

$$\eta_t = 1 - \frac{q_C}{q_H} = \frac{a_O}{q_H} = 0,209$$

Hmotnostní tok

$$\dot{m} = 55,2 \frac{\text{t}}{\text{h}} = 55200 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = \mathbf{15,2 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

Výkon dodávaný turbínou idealizovaného oběhu

$$P = \dot{m} \cdot a_O = 8733,87 \text{ kW} = \mathbf{8,7 \text{ MW}}$$

ZÁVĚR

Téma bakalářské práce mi umožnilo nahlédnout do oblasti tepelných energetických zařízení a hlouběji porozumět principu činnosti, konstrukčnímu provedení a dozvědět se možnosti využití parních turbín.

Parní turbínu lze definovat jako lopatkový rotační motor přeměňující tepelnou energii získanou expanzí páry v několika stupních tvořených rozváděcími a oběžnými lopatkovými koly na energii pohybovou, využívanou nejčastěji k pohonu elektrického generátoru, připojeném na společné hřídeli s turbínou a dohromady tvořící turbogenerátor. Jelikož se generátor spojený s parní turbínou musí točit konstantní rychlostí podle frekvence elektrické sítě k níž je připojen, rychlost turbogenerátoru je 3000 ot/min. pro frekvenci 50 Hz a 3600 ot/min. pro frekvenci 60 Hz. Z hlediska využití parní turbína netvoří samostatně funkční celek, ale ke svému provozu potřebuje rozlehlou technologickou základnu.

Širokou oblast využití parních turbín umožňuje její pracovní látka, kterou je vodní pára o teplotě na vstupu do turbíny až 650°C. Pára se vyrábí v parních kotlích spalujících fosilní paliva, odpady, biomasu, apod. v klasických tepelných elektrárnách nebo v parogenerátorech v jaderných elektrárnách. Dalším zdrojem páry jsou parogenerátory solárních elektráren, či přímo pára pocházející z geotermálního vrtu.

Ně největší oblastí uplatnění parních turbín je nepochybně energetika, ve které jsou parní turbíny pohánějící elektrické generátory použity k výrobě přibližně 80% světové produkce elektřiny. Nejvyšších výkonů dosahují parní turbíny umístěny v jaderných elektrárnách. V těchto aplikacích, kde převládá využití energie páry k pohonu elektrického generátoru, jsou vhodné kondenzační turbíny pracující s velkým tepelným spádem, zatímco tam kde je požadována turbína nejen k pohonu elektrického generátoru, ale také protitlaká pára z turbíny pro technologické účely či ohřev topné a užitkové vody, je vhodná protitlaková turbína. Příkladem mohou být cukrovary, papírny, chemické továrny, teplárny apod.

Využití našly parní turbíny také v lodích, jelikož mají oproti pístovým motorům menší velikost, nižší váhu, menší vibrace a požadavky na údržbu. Parní turbíny ovšem pracují neúčinněji při tisících ot/min. a lodní vrtule jsou navrhovány pro méně než 100 ot/min., což znamená zařazení přesné a drahé převodovky. Alternativou je využití rychloběžné parní turbíny k pohonu elektrického generátoru, pohánějící pomaloběžné elektrické motory připojené na hnací hřídele lodních vrtulí.

Parní turbíny byly použity také jako motor parní lokomotivy. Hlavní výhodou byla lepší rotační rovnováha a nižší „úder kladiva“ na trať. Nevýhodou, která zabránila širšímu použití parních turbín jako pohon lokomotiv, byla malá flexibilita výstupního výkonu turbíny, uplatnění tedy nachází pouze na dlouhých tratích při konstantním výkonu turbíny.

Porovnáme-li parní turbínu s jejím předchůdcem, pístovým parním motorem, tak jasně vyplývá, že použití pístového parního motoru je výhodnější pouze pro malé výkony pod 100kW, u kterých dosahuje vyšší účinnosti než jednostupňová parní turbína. V případě

větších výkonů byl pístový parní motor počátkem 20. století vytlačován a postupně nahrazován parní turbínou díky vyšší tepelné účinnosti a lepšímu poměru výkon/hmotnost.

Výhodou parní turbíny v porovnání například s parním pístovým strojem nebo spalovacím pístovým motorem je v přeměně tepelné energie přímo na mechanickou práci rotačního pohybu hřídele, čímž se eliminují veškeré mechanismy přeměňující translační pohyb pístu na rotační pohyb hřídele. Rozdíl je také v klidném a plynulém přenášení energie na hřídel u parní turbíny oproti periodickému přenosu u pístových strojů. Parní turbíny tudíž nepotřebují setrvačnick.

Závěrem lze konstatovat, že parní turbíny nacházejí široké uplatnění především díky schopnosti splnit rozmanité požadavky, které jsou na ně kladeny. Značnou přizpůsobivost a mnohostrannost využití zaručují následující vlastnosti: provedení turbíny od nepatrných rozměrů až po rozsáhlé rozměry turbín o vysokých výkonech jakých nedosahuje jiný druh motoru a dále možnost práce při konstantních otáčkách (pohon elektrického generátoru) nebo při proměnných otáčkách v širokém rozsahu (pohon turbokompresoru, lodí a lokomotiv).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEČVÁŘ, J. a kol.: *Tepelné turbíny*. Praha: SNTL, 1968, 544 s.
- [2] MICHELE, F. a kol.: *PARNÍ TURBINY*. Brno, 1952, 247 s.
- [3] IBLER, Z. a kol.: *Technický průvodce energetika*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 615 s. ISBN 80-730-0026-1.
- [4] Steam turbine. [online]. [cit. 2012-03-02]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Steam_turbine
- [5] *100 let: historie a současnost vývoje a výroby parních turbín v Brně*. Praha: Pro společnost ALSTOM Power Brno vydalo studio Trilabit ve spolupráci s Asociací PCC, 2002, 85 s. ISBN 80-902-6812-9.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. *Tepelné oběhy a jejich realizace*, Transformační technologie, 2006. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>.
- [7] EKOL Brno, spol. s.r.o. *Firemní podklady*. Dostupné z: <http://www.ekolbrno.cz/>
- [8] Značení KKS. [online]. Dostupné z: <http://www.energoserwis.cz/znaceni-kks/>

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1	Závod PBS na Olomoucké ulici	14
Obr. 2	Řez turbínou PT-25-90/10/1,2 o výkonu 25MW a 2 regulovanými odběry	14
Obr. 3	Tepelný spád v i-s diagramu.....	15
Obr. 4	Řez lopatkami a expanzní čáry v i-s diagramu.....	16
Obr. 5	Schéma skupinové regulace při částečném ostříku	17
Obr. 6	R-C oběh v T-s a i-s diagramu.....	19
Obr. 7	Přihřívání páry v T-s diagramu.....	20
Obr. 8	Carnotizace R-C oběhu v T-s diagramu	21
Obr. 9	Schéma paroplynového oběhu.....	22
Obr. 10	Účinnosti různých typů tepelných oběhů	22
Obr. 11	Zjednodušené základní tepelné schéma.....	23
Obr. 12	Parní protitlaková turbína s průmyslovým odběrem 10 MW	27
Obr. 13	Parní kondenzační turbína se dvěma regulovanými odběry 20 MW.....	29
Obr. 14	Schéma turbíny s neregulovaným odběrem.....	30
Obr. 15	Schéma turbíny s regulovaným odběrem	30
Obr. 16	Schéma dvoutlakové parní turbíny	31
Obr. 17	Schéma zařazení turbosetu v energetické centrále	32
Obr. 18	Idealizovaný tepelný oběh v T-s diagramu.....	34
Tab. 1	Heron Alexandrijský.....	12
Tab. 2	Gustav de Laval	12
Tab. 3	Charles A. Parsons.....	13
Tab. 4	Aurel Stodola.....	13
Tab. 5	Bilance proudících médií protitlakovou turbínou R8-4,5/0,3E.....	33
Tab. 6	Seznam zařízení turbosoustrojí s protitlakovou turbínou R8-4,5/0,3E	33

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ A INDEXŮ

a_p	kJ/kg	práce čerpadla
a_T	kJ/kg	práce turbíny
a_0	kJ/kg	práce oběhu
h	kJ/kg	entalpie
\dot{m}	kg/s	hmotnostní tok
η_t	-	termická účinnost
p	MPa	tlak
P	kW	výkon
q_h	kJ/kg	teplo dodané
q_c	kJ/kg	teplo odevzdané
s	kJ/kgK	entropie
T	°C	teplota
v	m ³ /kg	měrný objem
x	-	suchost mokré páry