

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## VÝPOČET PARAMETRŮ SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU JADERNÉ ELEKTRÁRNY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

LUKÁŠ VANĚČEK

BRNO 2011

SEM  
VLOŽTE  
ZADÁNÍ

Bibliografická citace práce:

VANĚČEK, L. *Výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Raček, CSc..

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky**

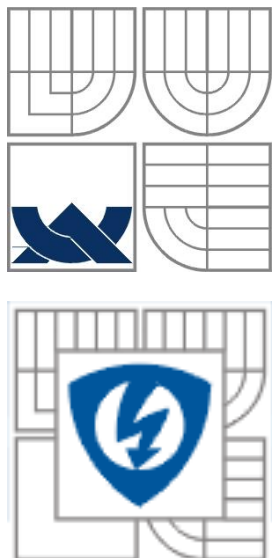
**Bakalářská práce**

# **Výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny**

**Lukáš Vaněček**

**vedoucí: doc. Ing. Jiří Raček, CSc.  
Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2011**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication**  
**Department of Electrical Power Engineering**

**Bachelor's Thesis**

# **Calculation of parameters of secondary circuit of nuclear power plant**

**by**

**Lukáš Vaněček**

**Supervisor: doc. Ing. Jiří Raček, CSc.**  
**Brno University of Technology, 2011**

**Brno**

## **ABSTRAKT**

Obsahem práce je návrh výpočtu a následný výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny pro zadané tepelné schéma a zadané parametry jaderné elektrárny. Současně jsou v práci uvedeny oběhy některých typů jaderných elektráren.

V první části práce jsou stručně popsány možnosti provedení oběhů jaderných elektráren, typy jaderných energetických reaktorů, parních generátorů a turbín používaných v jaderných elektrárnách.

Další část práce obsahuje návrh výpočtu pro konkrétní tepelné schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny. V návrhu výpočtu je věnována pozornost expanzi páry v turbíně, stanovení parametrů pracovní látky v oběhu, výpočtu potřebného množství páry, stanovení účinností a výkonů jaderné elektrárny.

V závěrečné části je uveden vlastní výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny pro zadané hodnoty a zhodnocení vypočtených hodnot.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** jaderná elektrárna; energetický reaktor; parní generátor; parní turbína; sekundární okruh.

**ABSTRACT**

The contents of this thesis is a suggestion of calculation and follow-up calculation of parameters of secondary circuit of assigned thermal diagram and parameters of a nuclear power plant. The thesis also includes possibilities of making nuclear circulations.

Part one of the thesis briefly describes possibilities of making nuclear circulations, types of nuclear energy reactors, types of steam generators and types of turbines used in nuclear power plants.

The second part of the thesis includes a suggestion of calculation for the real thermal diagram of secondary circuit of nuclear power plant. The attention in this calculation is given to expansion of steam in a turbine, determining parameters of mass in a circuit, calculation of steam demanded and determining power and efficiency of nuclear power plant.

The final part of the thesis is a calculation of parameters of secondary circuit of nuclear power plant for given values and evaluation of results of calculation.

**KEY WORDS:** nuclear power plant; power reactor; steam generator; steam turbine; secondary circuit.

**OBSAH**

Seznam obrázků .....	10
Seznam tabulek .....	11
Seznam značek použitých veličin.....	12
1 Úvod.....	15
2 Oběhy jaderných elektráren .....	16
3 Typy jaderných energetických reaktorů .....	18
3.1 Jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory .....	19
3.1.1 Tlakovodní reaktory západního typu.....	20
3.1.2 Tlakovodní reaktory typu VVER .....	20
3.2 Jaderné elektrárny s varnými reaktory .....	21
3.3 Jaderné elektrárny s vodou chlazenými grafitovými reaktory .....	21
3.4 Jaderné elektrárny s reaktory chlazenými plynem .....	22
3.4.1 Jaderné elektrárny s magnoxovými reaktory.....	22
3.4.2 Jaderné elektrárny se zdokonalenými plynem chlazenými reaktory.....	23
3.4.3 Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory .....	23
3.4.4 Těžkovodní reaktory chlazené plynem.....	24
3.5 Jaderné elektrárny s reaktory chlazenými těžkou vodou .....	24
3.6 Reaktory chlazené tekutými kovy .....	25
4 Typy parních generátorů jaderných elektráren .....	27
4.1 Parní generátory jaderných elektráren s reaktory chlazenými tlakovou vodou .....	28
4.1.1 Vertikální provedení parních generátorů.....	28
4.1.2 Horizontální parní generátory elektráren typu VVER.....	28
4.2 Parní generátory jaderných elektráren s plynem chlazenými reaktory .....	29
4.2.1 Parní generátory elektráren s reaktory magnoxového typu.....	29
4.2.2 Parní generátory elektráren se zdokonalými plynem chlazenými reaktory.....	30
4.2.3 Parní generátory elektráren s vysokoteplotními reaktory.....	30
4.3 Parní generátory jaderných elektráren s reaktory chlazenými tekutým kovem (sodíkem).....	30
5 Turbíny pro jaderné elektrárny.....	32
5.1 Parní turbíny jaderných elektráren .....	32
5.2 Parní turbíny na vstupní sytou páru.....	32
5.2.1 Parní turbíny použité v Jaderné elektrárně Dukovany .....	33
5.2.2 Parní turbíny použité v Jaderné elektrárně Temelín.....	34



5.3	Parní turbíny pro elektrárny s varnými reaktory .....	34
6	Návrh výpočtu parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny .....	36
6.1	Výpočet expanze páry v turbíně.....	38
6.1.1	Výpočet vysokotlakové části parní turbíny .....	38
6.1.2	Výpočet nízkotlakové části parní turbíny.....	40
6.2	Stanovení parametrů pracovní látky v oběhu .....	42
6.2.1	Určení umístění odběrů a výpočet indiferentního bodu .....	42
6.2.2	Ohřátí napájecí vody v napájecím čerpadle .....	43
6.2.3	Určení ohřívání pracovní látky v oběhu .....	43
6.3	Výpočet celkové spotřeby páry, stanovení účinností a výkonů .....	45
7	Výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny .....	47
7.1	Návrh tlaku v uzlových bodech oběhu .....	48
7.2	Ohřátí pracovní látky v napájecím čerpadle.....	50
7.3	Entalpie pracovní látky v oběhu.....	51
7.4	Stanovení poměrných odběrových množství .....	53
7.5	Výpočet celkové spotřeby páry, stanovení účinností a výkonů .....	56
8	Závěr.....	59
	Použitá literatura.....	60

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 2.1 Jednookruhové schéma jaderné elektrárny s parním oběhem.....	16
Obr. 2.2 Dvouokruhové schéma jaderné elektrárny s parním oběhem .....	17
Obr. 2.3 Tříokruhové schéma jaderné elektrárny s parním oběhem .....	17
Obr. 2.4 Schéma oběhu jaderné elektrárny s plynovou turbínou .....	17
Obr. 6.1 Schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny .....	37
Obr. 6.2 Průběh expanze páry v diagramu i-s .....	41

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 3-1 Srovnání bloků VVER 440 (Dukovany) a VVER 1000 (Temelín) .....	21
Tab. 4-1 Vybrané parametry parních generátorů s bloky VVER 440 a VVER 1000 .....	29
Tab. 7-1 Parametry pracovní látky v jednotlivých ohřívácích .....	56
Tab. 7-2 Hmotnostní toky páry odběrovým potrubím .....	57
Tab. 7-3 Hmotnostní toky odloučené páry a vlhkosti .....	57

## SEZNAM ZNAČEK POUŽITÝCH VELIČIN

Značka	Veličina	Jednotka
$D_{NT}$	střední průměr oběžného kola NT části turbíny	m
$D_{VT}$	střední průměr Curtisova kola VT části turbíny	m
$P_R$	tepelný výkon jaderného reaktoru	W
$P_i$	vnitřní výkon parní turbíny	W
$P_{pr}$	čistý výkon jaderné elektrárny	W
$P_{sv}$	svorkový výkon elektrického generátoru	W
$Q_{mOj}$	množství odběrové páry v místě odběru	kg·s <sup>-1</sup>
$Q_{mp}$	celkové množství páry	kg·s <sup>-1</sup>
$Q_{my_1}$	množství páry proudící přehřívákem	kg·s <sup>-1</sup>
$Q_{my_2}$	množství odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti	kg·s <sup>-1</sup>
$Q_{my_3}$	množství odloučené vlhkosti v NT části turbíny	kg·s <sup>-1</sup>
$c_{1sNT}$	teoretická výtoková rychlost páry ve stupni NT části turbíny	m·s <sup>-1</sup>
$c_{1sVT}$	teoretická výtoková rychlost páry ve stupni VT části turbíny	m·s <sup>-1</sup>
$c_{INT}$	skutečná výtoková rychlost páry ve stupni NT části turbíny	m·s <sup>-1</sup>
$c_{IVT}$	skutečná výtoková rychlost páry ve stupni VT části turbíny	m·s <sup>-1</sup>
$h_{sNT}$	izoentropický tepelný spád NT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$h_{sVT}$	izoentropický tepelný spád VT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$h_{s,CNT}$	izoentropický tepelný spád jednoho stupně NT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$h_{s,CVT}$	izoentropický tepelný spád jednoho stupně VT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{Oj}$	entalpie páry v místě odběru	J·kg <sup>-1</sup>
$i_a$	entalpie admisní páry	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{at}$	entalpie admisní páry před vstupem do parní turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$i_d$	entalpie páry na vstupu do NT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{dt}$	entalpie páry za přehřívákem páry	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{e1}$	entalpie páry za posledním stupněm VT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{e2}$	entalpie páry za posledním stupněm NT části turbíny	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{e1s}$	entalpie páry za posledním stupněm VT části turbíny pro izoentropický děj	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{e2s}$	entalpie páry za posledním stupněm NT části turbíny pro izoentropický děj	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{e,CVT}$	entalpie páry za Curtisovým kolem	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{es,CVT}$	entalpie páry za Curtisovým kolem pro izoentropický děj	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{ind}$	entalpie páry v indiferentním bodě	J·kg <sup>-1</sup>
$i_j$	entalpie páry vstupující do regeneračního ohříváku	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{k2j}$	entalpie kondenzátu za ohřívákem	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{k12}$	entalpie kondenzátu za napájecím čerpadlem	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{ns}$	entalpie kondenzátu za napáječkou	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{nv}$	entalpie napájecí vody	J·kg <sup>-1</sup>
$i_{pg}$	entalpie páry na výstupu parního generátoru	J·kg <sup>-1</sup>
$i'_a$	entalpie syté kapaliny pro tlak $p_a$	J·kg <sup>-1</sup>

$i'_c$	entalpie vody za chladičem kondenzátu	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i'_d$	entalpie syté kapaliny pro tlak $p_d$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i''_d$	entalpie páry za odlučovačem vlhkosti	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i'_j$	entalpie za ohřívákem pro tlak $p_j$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i'_k$	entalpie kondenzátu pro tlak $p_k$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i'_s$	entalpie syté kapaliny pro tlak $p_s$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i'_{y2}$	entalpie odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$i'_{y3}$	entalpie odloučené vlhkosti v NT části parní turbíny	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$j$	pořadové číslo ohříváku	-
$k_v$	poměr mezi výtláčným tlakem a tlakem v parním generátoru	-
$k_{y2}$	koeficient odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti	-
$k_{y3}$	koeficient odloučené vlhkosti v NT části turbíny	-
$m$	počet ohříváků	-
$n$	otáčky	$\text{s}^{-1}$
$p_{CVT}$	tlak za Curtisovým kolem	Pa
$p_{Oj}$	tlak v místě odběru	Pa
$p_a$	tlak admisní páry	Pa
$p_{e1}$	tlak za posledním stupněm VT části turbíny	Pa
$p_{e2}$	tlak za posledním stupněm NT části turbíny	Pa
$p_j$	tlak v ohříváku	Pa
$p_k$	tlak v kondenzátoru	Pa
$p_n$	výtlačný tlak napájecího čerpadla	Pa
$p_{pg}$	tlak páry v parním generátoru	Pa
$p_s$	tlak v sacím hrdle napájecího čerpadla	Pa
$s'_s$	entropie syté kapaliny pro tlak $p_s$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$t_a$	teplota admisní páry	$^{\circ}\text{C}$
$t''_a$	teplota varu kapaliny při tlaku $p_a$	$^{\circ}\text{C}$
$t_k$	teplota sytosti kondenzující páry	$^{\circ}\text{C}$
$t_{k2j}$	teplota kondenzátu za ohřívákem	$^{\circ}\text{C}$
$t_{nv}$	teplota napájecí vody	$^{\circ}\text{C}$
$t_{pp}$	teplota přehřáté páry	$^{\circ}\text{C}$
$t_{v1}$	teplota chladicí vody vstupující do kondenzátoru	$^{\circ}\text{C}$
$t''_{Oj}$	teplota sytosti topné páry	$^{\circ}\text{C}$
$t''_s$	teplota varu kapaliny pro tlak $p_s$	$^{\circ}\text{C}$
$u/c_{1s}$	poměr obvodové a výtokové rychlosti	1
$u_{thNT}$	teoretická obvodová rychlost NT části turbíny	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$u_{thVT}$	teoretická obvodová rychlost VT části turbíny	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$u_{NT}$	skutečná obvodová rychlost NT části turbíny	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$u_{VT}$	skutečná obvodová rychlost VT části turbíny	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

$x_j$	poměrné množství odběrové páry	1
$y_1$	poměrné množství odběrové páry pro přehříváč páry	1
$y_2$	poměrné množství odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti	1
$y_3$	poměrné množství odloučené vlhkosti v NT části turbíny	1
$w_i$	práce 1 kg páry proudící turbínou	1
$z_{NT}$	počet stupňů NT části turbíny	1
$z_{VT}$	počet stupňů VT části turbíny	1
$\Delta H$	vzrůst entalpie v ohříváku	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\Delta i_n$	vzrůst entalpie v napáječce	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\Delta i_{ns}$	teoretický vzrůst entalpie v napáječce	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\Delta p_k$	tlakové ztráty ve výstupním hrdle turbíny	Pa
$\Delta p_{Oj}$	tlaková ztráta v odběrovém potrubí	Pa
$\Delta t_2$	nedohřátí chladicí vody	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_{2j}$	koncový rozdíl teplot v regeneračním ohříváku	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_k$	ohřátí pracovní látky v ohříváku	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta t_v$	ohřátí chladicí vody	$^{\circ}\text{C}$
$\eta_{O3}$	účinnost odplyňovače	1
$\eta_c$	účinnost chladiče kondenzátu	1
$\eta_g$	účinnost elektrického generátoru	1
$\eta_m$	mechanická účinnost turbíny	1
$\eta_{ni}$	vnitřní účinnost napáječky	1
$\eta_{ov}$	účinnost nízkotlakového regeneračního ohříváku	1
$\eta_{ov}$	účinnost vysokotlakového regeneračního ohříváku	1
$\eta_p$	účinnost potrubí	1
$\eta_{pg}$	účinnost parního generátoru	1
$\eta_{tc}$	celková účinnost jaderné elektrárny	1
$\eta_{tdiC}$	vnitřní termodynamická účinnost Curtisova stupně	1
$\eta_{tdi}$	vnitřní účinnost turbíny	1
$\eta_{tdiNT}$	vnitřní termodynamická účinnost NT části turbíny	1
$\eta_{tdiVT}$	vnitřní termodynamická účinnost VT části turbíny	1
$\eta_{tsv}$	tepelná účinnost oběhu vztažená na svorky elektrického generátoru	1
$\eta_{vs}$	součinitel vlastní spotřeby	1

## 1 ÚVOD

Při současné zvyšující se spotřebě energií ve světě zastává jaderná energetika významné postavení v pokrytí poptávky po elektrické energii. Hlavní část této práce se zabývá návrhem výpočtu a vlastním výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny se zaměřením na expanzi páry v turbíně, stanovení parametrů pracovní látky v oběhu, výpočet celkové spotřeby páry, stanovení účinností a výkonů.

V této práci je dále uveden základní přehled možných provedení jaderných elektráren z hlediska provedení oběhu, jaderných energetických reaktorů, parních generátorů a turbín používaných v jaderných elektrárnách.

## 2 OBĚHY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Jaderná elektrárna je zařízení, v němž se energie uvolněná štěpením jaderného materiálu odvádí pomocí chladiva přes soustavu zařízení na parní nebo plynovou turbínu, kde dojde k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Mechanická energie se přemění na energii elektrickou v elektrickém generátoru. Z hlediska použité turbíny se tedy oběhy dělí na oběhy s parní turbínou a oběhy s plynovou turbínou.

U jaderných elektráren s parní turbínou je provedení oběhu děleno na dvě skupiny:

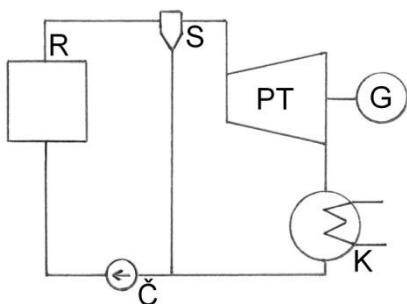
- výroba páry je provedena ve speciálním zařízení (parním generátoru), v primární části proudí chladivo ve formě kapaliny nebo plynu.
- pára potřebná pro turbínu je vyráběna přímo v jaderném reaktoru (tyto reaktory jsou označovány jako varné)

Z hlediska uspořádání se oběhy jaderných elektráren člení podle počtu okruhů.

Jednookruhové uspořádání jaderné elektrárny s parním oběhem je uvedeno na obr. 2.1. Oběh tvoří jaderný reaktor (R), odlučovač vlhkosti (S), parní turbína (PT), elektrický generátor (G), kondenzátor (K) a oběhové čerpadlo (Č). Nevýhoda tohoto oběhu spočívá v průtoku aktivní páry všemi částmi elektrárny, tudíž revize těchto částí je velmi obtížná.

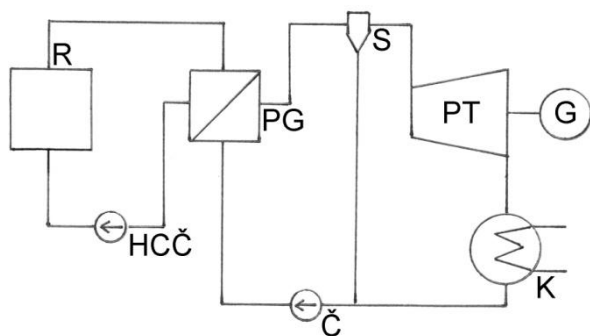
Elektrárny se dvěma okruhy jsou v současné době nejrozšířenější, uspořádání takového okruhu je zobrazeno na obr. 2.2. Součástí oběhu je jaderný reaktor (R), parní generátor (PG), odlučovač vlhkosti (S), parní turbína (PT), elektrický generátor (G), kondenzátor (K), napájecí čerpadlo (Č) a hlavní cirkulační čerpadlo (HCČ). Parní generátor je prvek, v němž probíhá předání tepla mezi aktivním chladivem primárního okruhu a neaktivní vodou sekundárního okruhu. Parní generátor tedy od sebe odděluje aktivní část (primární) od neaktivní části (sekundární).

Tříookruhový oběh jaderné elektrárny je zobrazen na obr. 2.3. Oproti dvouokruhovému uspořádání je zde vložen jeden bezpečnostní okruh, který tvoří mezivýměník tepla (V) a oběhové čerpadlo (OČ). Toto uspořádání je vhodné zejména u jaderných elektráren chlazenými tekutými kovy (nejčastěji sodík Na). Byl-li by tento okruh tvořen pouze dvěma okruhy, tak by v případě netěsnosti parního generátoru došlo ke styku aktivního sodíku a neaktivní vody. Tato reakce je velmi bouřlivá a uvolňuje se značné množství tepla, navíc by se produkty této reakce dostaly do jaderného reaktoru, čemuž se chce zabránit.

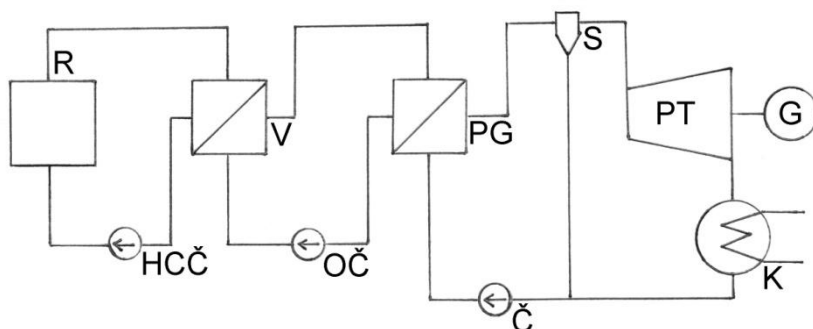


Obr. 2.1 Jednookruhové schéma jaderné elektrárny s parním oběhem



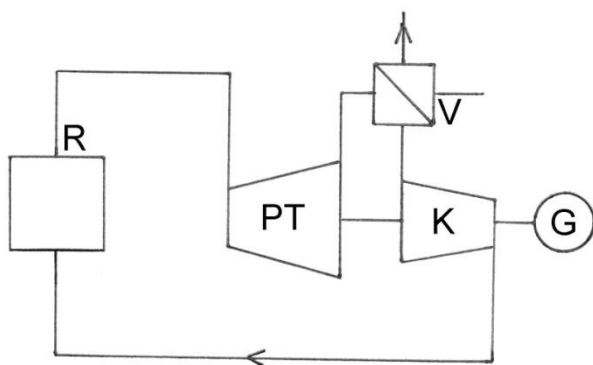


Obr. 2.2 Dvouokruhové schéma jaderné elektrárny s parním oběhem



Obr. 2.3 Tříokruhové schéma jaderné elektrárny s parním oběhem

Jaderná elektrárna s plynovým oběhem je oproti oběhu parnímu jednodušší. U plynového oběhu není parovodní hospodářství a odpadají technologické zařízení typu parní generátor. Vhodným chladivem pro plynové oběhy je helium, které se průchodem přes aktivní zónu neaktivuje. Oběh jaderné elektrárny s plynovou turbínou je znázorněn na obr. 2.4 a tvoří jej reaktor (R), plynová turbína (PT), kompresor (K), výměník tepla a chladicí okruh (V), elektrický generátor (G).



Obr. 2.4 Schéma oběhu jaderné elektrárny s plynovou turbínou

### 3 TYPY JADERNÝCH ENERGETICKÝCH REAKTORŮ

Klasifikovat typy jaderných reaktorů lze z několika hledisek.

Třídění jaderných reaktorů:

- podle průměrné energie neutronů při štěpení,
- podle konzistence a koncentrace jaderného paliva,
- podle geometrického uspořádání paliva a moderátoru,
- podle druhu moderátoru,
- podle druhu chladiva v aktivní zóně reaktoru.

Jaderné reaktory lze rozdělit podle energie neutronů potřebných ke štěpení jaderného paliva na dva druhy:

- *tepelné reaktory*: průměrná energie tepelných neutronů potřebných k rozštěpení těžkých jader činí 0,025 eV, okamžité neutrony vzniklé štěpením mají střední energii asi (1 až 2) MeV, zpožděné neutrony mají střední energii 0,5 MeV. Neutrony je nutné zpomalit, zpomalování rychlých neutronů na neutrony tepelné probíhá v moderátoru;
- *rychlé reaktory*: štěpení v reaktoru je způsobeno rychlými neutrony, tento reaktor tedy nemá moderátor.

Dle formy paliva v jaderném reaktoru a jeho koncentrace lze nahlížet na reaktory obsahující:

- *pevné palivo*: palivo je ve formě tyčí, desek, trubek;
- *palivo v kapalné formě*: suspenze, roztok.

Poměr uranu  $^{235}\text{U}$  a uranu  $^{238}\text{U}$  udává obohacení paliva. Je-li v palivu přibližně 0,7 %  $^{235}\text{U}$ , jedná se o palivo přírodní. Nízko obohacený uran obsahuje do 5 %  $^{235}\text{U}$ , středně obohacený uran do 25 %  $^{235}\text{U}$  a v silně obohaceném uranu je obsaženo až 95 %  $^{235}\text{U}$ .

Geometrickým uspořádáním paliva a moderátoru se člení reaktory na:

- *homogenní*: palivo je smíšeno s moderátorem;
- *heterogenní*: palivo a moderátor jsou od sebe navzájem odděleny.

Použitý moderátor v aktivní zóně reaktoru může být ve formě kapaliny nebo pevné látky.

Materiály použité k moderování rychlých neutronů jsou:

- *pevné*: grafit;
- *kapalné*:  $\text{H}_2\text{O}$  (lehkovodní reaktory),  $\text{D}_2\text{O}$  (těžkovodní reaktory).

Chladivem aktivní zóny jaderného reaktoru může být:

- *plyn*:  $\text{CO}_2$  - výhoda tohoto chladiva je nízká cena, dostupnost, působí však korozivně a je náchylný k tepelnému rozkladu;  
He - inertní plyn, nezpůsobuje korozi, velké požadavky na těsnost oběhu;
- *kapalina*:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , organické látky (polyfenyly)
- *tekuté kovy*: jako chladivo je použit tekutý sodík nebo slitiny olova s bismutem (Pb-Bi) a sodíku s draslíkem (Na-K).

U vodou chlazeného reaktoru se rozlišují dva případy:

- *varné reaktory*: chladivo mění v aktivní zóně skupenství, dochází k varu vody;
- *tlakovodní reaktory*: voda v reaktoru nemění své skupenství. [6]

### 3.1 JADERNÉ ELEKTRÁRNY S TLAKOVODNÍMI REAKTORY

Jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory se staví jako dvouokruhové. Takto uspořádané jaderné elektrárny mají svým provedením velmi blízko ke klasickým tepelným elektrárnám. Zařízení je poměrně jednoduché a spolehlivé. Zařízením, které od sebe odděluje aktivní primární část a neaktivní sekundární část je parní generátor. V primární části proudí tlaková voda, její tlak je (12 až 16) MPa. V sekundární části je oběhovou látkou voda a vodní pára, tlak je (4 až 7) MPa. Požadavkem bezpečnosti je stínit aktivní primární část od okolního prostředí, elektrárny stavěné v současné době mají kontejnment, který tento požadavek splňuje.

Palivem pro jaderné elektrárny s tlakovodními reaktory je nízko obohacený uran, může být použit i tzv. MOX, což je směs oxidu uraničitého  $UO_2$  a oxidu plutoničitého  $PuO_2$ . Jaderné palivo je vkládáno v podobě válcových tablet do hermeticky těsných proutků, nazývaných pokrytí nebo povlak, následně v souboru do palivového článku a do reaktoru. Materiál pokrytí tvoří slitiny zirkonniob (ZrNb) nebo zircaloy (ZrAl). Aktivní zóna jaderného reaktoru má velmi hustou palivovou mříž, tlaková nádoba reaktoru je kompaktní, tj. výkon jednotky objemu je oproti jiným typům reaktorů velký. Teplo uvolněné jadernými reakcemi z paliva je odvedeno chladivem, které proudí několika cirkulačními smyčkami (2 až 6). Tento typ reaktoru má záporný teplotní součinitel reaktivity, s narůstajícím výkonem klesá reaktivita reaktoru. Regulace reaktoru se provádí regulačními tyčemi a koncentrací kyseliny borité v chladivu reaktoru (se zvyšující se koncentrací klesá výkon reaktoru a naopak).

Parní generátory v elektrárnách s tlakovodními reaktory vyrábějí ve většině případů sytou páru, která je přivedena na parní turbínu. Z hlediska provozních podmínek se z důvodů zvýšení termodynamické účinnosti a možné eroze posledních stupňů lopatek parní turbíny vlivem nízké relativní suchosti páry provádějí turbíny jako vícetělesové s mezipřihříváním. Pára částečně expanduje ve vysokotlakovém dílu a je přivedena do přehříváku s následným odloučením vlhkosti. Osvědčilo se použití kombinace přehřívák-odlučovák. Přehřívání je prováděno ve většině případů ostrou nebo odběrovou parou. Odloučení vlhkosti může být provedeno ve třech typech odlučováků. Jako první byly konstruovány cyklónové odlučováky, žaluziových odlučováků je použito u obou jaderných elektráren postavených v ČR. Další možnost odloučení vlhkosti je v síťovém odlučováku.

V současné době již neuplatňovaná koncepce jaderných elektráren s tlakovodními reaktory je oběh s přehříváním páry v přehříváku vytápěným fosilním palivem. Takto lze dosáhnout vyšší tepelné účinnosti sekundárního okruhu. Nevýhodou je požadavek na další technologické zařízení a trvalý přísun fosilního paliva.

Účinnost jaderných elektráren s tlakovodními reaktory bývá (30 až 35) % vlivem relativně nízkých parametrů syté páry v sekundárním okruhu. Tento typ je nejrozšířenější s celkovým podílem asi 63 % mezi energetickými reaktory.

### 3.1.1 Tlakovodní reaktory západního typu

Primární okruh tohoto reaktoru tvoří maximálně 4 cirkulační smyčky, které neobsahují uzavírací armatury. Hrdla pro vstup a výstup tlakové vody jsou umístěna v jedné rovině tlakové nádoby reaktoru, tzn. max. 8 hrdel po obvodu tlakové nádoby. Ve dně nádoby jsou otvory pro vyvedení měření. Každá smyčka má jeden parní generátor a jedno nebo dvě cirkulační čerpadla. K jedné cirkulační smyčce je připojen kompenzátor objemu, který udržuje tlak v primárním okruhu ve stanovených mezích. Při požadavku na vzrůst tlaku se zapne elektrické ohřívání, tím dojde ke vzrůstu výparu chladiva a tím i vzrůstu tlaku. Pro pokles tlaku se parní polštář v kompenzátoru objemu sprchuje vodou z chladnější části primárního okruhu a tím se dosáhne jeho kondenzace. Palivové články jsou v příčném řezu čtvercového tvaru a nemají vnější obálku.

Celý primární okruh reaktorů západní koncepce je umístěn v ochranné obálce, která má zamezit úniku plyných i tekutých látek do okolí při jakékoliv havárii. Veškeré zařízení umístěné v primárním okruhu musí být dostatečně odolné všem vlivům působícím v této části elektrárny.

Parní generátory jsou vertikálního provedení, na výšku mají asi 20 m. Ve spodní části je přivedena tlaková voda primárního okruhu, která proudí trubkami ve tvaru U. Oblouk trubek je svislý, navařený k vodorovné trubkovnici. Toto uspořádání je výhodné z hlediska malé potřebné půdorysné plochy, nevýhodou je však netěsnost mezi primární a sekundární částí v místech přivaření trubek k trubkovnici z důvodu usazování kalu a následné korozi.

### 3.1.2 Tlakovodní reaktory typu VVER

Reaktorová nádoba je svařena z více kovaných prstenců, vnitřní stěna je opatřena antikoročním návarem. Počet cirkulačních smyček primárního okruhu je 4 až 6, vstup chladiva je umístěn v jedné rovině tlakové nádoby, výstup chladiva v rovině nad rovinou pro vstup. Každá smyčka obsahuje parní generátor, reaktor typu VVER 440 má uzavírací armatury v každé smyčce. K jedné smyčce je přiřazen v horké větvi kompenzátor objemu. Palivové články mají v příčném řezu tvar pravidelného šestiúhelníku, tvoří je hermeticky uzavřené palivové proutky obsahující palivové tablety. Prostor mezi tabletami a pokrytím je vyplněn inertním plynem - heliem.

Primární okruh má buď kontejnment (třetí generace reaktorů typu VVER) nebo je uzavřen v hermetických boxech, oddělujících primární okruh od ostatních prostor (druhá generace).

Parní generátory jsou horizontálního provedení. Tlaková voda primárního okruhu proudí trubkami ve tvaru U s vodorovně položenými oblouky. Oblouky jsou přivařeny ke stěnám vstupního a výstupního kolektoru chladiva. Takovéto uspořádání parního generátoru má velkou výparnou hladinu, což je jeho výhoda. U těchto parních generátorů se neobjevují problémy s usazováním kalů v oblasti přivaření trubek ke kolektoru (svary mají svislou polohu). Vzniklá pára je odvedena po odloučení vlhkosti sběrnými kolektory k vysokotlakové části parní turbíny.

Jaderná elektrárna Dukovany má čtyři bloky s reaktory druhé generace VVER 440. V jaderné elektrárně Temelín jsou dva bloky reaktorů třetí generace VVER 1000.

Tab. 3-1 Srovnání bloků VVER 440 (Dukovany) a VVER 1000 (Temelín)

Typ reaktoru	VVER 440	VVER 1000
Tepelný výkon jednoho bloku	1 375 MW	3 000 MW
Elektrický výkon jednoho bloku	440 MW	1 000 MW
Počet parních generátorů na jeden blok	6	4
Tepelný výkon parního generátoru	229 MW	750 MW
Tlak napájecí vody v primárním okruhu	12,25 MPa	15,7 MPa
Teplota chladicí vody na vstupu do reaktoru	267 °C	289 °C
Teplota chladicí vody na výstupu z reaktoru	297 °C	320 °C
Výroba páry v jednom parním generátoru	452 t·h <sup>-1</sup>	1 470 t·h <sup>-1</sup>
Teplota napájecí vody na vstupu do parního generátoru	223 °C	220 °C
Teplota napájecí vody na výstupu z parního generátoru	260 °C	278,5 °C
Tlak syté páry na výstupu z parního generátoru	4,71 MPa	6,3 MPa

### 3.2 JADERNÉ ELEKTRÁRNY S VARNÝMI REAKTORY

Jaderné elektrárny s varnými reaktory jsou konstruovány ve většině případů jako jednookruhové s kontejnmentem, chladičem i moderátorem je lehká voda. Tento typ jaderné elektrárny nemá parní generátor, jelikož k tvorbě syté páry potřebné pro turbínu dochází přímo v aktivní zóně reaktoru. Konstrukcí jsou podobné tlakovodním jaderným elektrárnám, jsou však jednodušší. Tlak v primárním okruhu je však nižší. Aktivní zóna je uzavřena v tlakové nádobě s víkem, ve spodní části je umístěna aktivní zóna, regulační tyče jsou zasouvány zespodu, prochází tedy dnem nádoby, v horní části dochází k oddělení mokré a syté páry v odlučovacích vlhkosti. Proudění oběhové látky je povzbuzeno čerpadly. Výjimečně je rozšířen i oběh s přehříváním páry. Provedení spočívá v průchodu syté páry přes přehřívákové kanály aktivní zónou.

Palivo je ve formě tablet  $\text{UO}_2$ , uzavřených v pokrytí ze zirkoniové slitiny. Palivové proutky jsou skládány do palivových článků, které tvoří velmi hustou palivovou mříž. Tento typ reaktorů má velký záporný teplotní součinitel reaktivity, má dobrou pasivní bezpečnost proti nárůstu reaktivity.

Výhoda těchto reaktorů s jednookruhovým uspořádáním spočívá v eliminaci ztrát v parním generátoru a nižším počtu potřebných zařízení. Nevýhodou těchto jaderných elektráren je zavedení radioaktivity až do turbíny, revize a opravy jsou z tohoto důvodu obtížnější. Regulace reaktivity kyselinou boritou se u těchto elektráren nedá použít kvůli společnému vodnímu hospodářství pro turbínu i reaktor.

Podíl těchto elektráren mezi energetickými reaktory je přibližně 22 %. Je-li tato elektrárna koncipována jako dvouokruhová s parním generátorem, je tomu z důvodu vyšší jaderné bezpečnosti.

### 3.3 JADERNÉ ELEKTRÁRNY S VODOU CHLAZENÝMI GRAFITOVÝMI REAKTORY

Jaderné elektrárny jsou grafitem moderované s tlakovými kanály chlazené vroucí lehkou vodou. Reaktory nemají tlakovou nádobu, místo ní nezávislé tlakové kanály. Umístění reaktoru je spolu se stíněním v betonové šachtě vytvářející hermeticky uzavřenou válcovou nádobu.

Uspořádání elektrárny je jednookruhové a rozdělené na dvě smyčky propojenými vyrovnávacím potrubím, celý systém tvoří velmi rozlehlé a členité uspořádání. Aktivní zóna je tvořená tlakovými kanály s velmi řídkou palivovou mříží. Palivem je mírně obohacený  $\text{UO}_2$  ve formě tablet v palivových proutcích ze zirkoniové slitiny. Výměna paliva je možná za provozu, kdy se na reaktorovém sále otevře víko nad příslušným uzavřeným kanálem. V tlakových kanálech se vyrábí sytá pára pro turbínu, kterou je možno zároveň přehřívat, odpadá tedy použití parních generátorů. Možnosti přehřívání páry se však příliš nevyužívá. Pára na výstupu z tlakového kanálu obsahuje vlhkost, která se odloučí v bubnovém odlučováku vlhkosti. Regulace průtoku chladiva jednotlivými kanály podle jejich výkonu je provedena jejich uzavíráním. V případě úniku radioaktivní páry mimo stanovené prostory je pára odvedena do hermeticky uzavřených barbotážních nádrží, umístěných pod reaktorem, kde kondenzuje. Velkou nevýhodou jaderných elektráren s grafitovými reaktory je kladný teplotní součinitel reaktivity. Jmenovitý výkon elektrárny bylo možné zvyšovat přidáváním tlakových kanálů.

První komerční jaderný reaktor uvedený do provozu roku 1954 v Obninsku byl tohoto typu, všechny jaderné elektrárny byly stavěny a provozovány pouze v zemích bývalého SSSR. Po havárii 4. bloku Černobylské jaderné elektrárny roku 1986 byl vývoj a výstavba dalších bloků zastaven. V současné době reaktory RBMK tvoří 5 % všech provozovaných energetických reaktorů.

### **3.4 JADERNÉ ELEKTRÁRNY S REAKTORY CHLAZENÝMI PLYNEM**

Jaderné elektrárny s reaktory chlazenými plynem se stavějí jako dvouokruhové s parním oběhem, mají tedy parní generátor. V parním generátoru se ohřívá napájecí voda s nižší vstupní teplotou než u tlakovodních reaktorů z důvodu co největšího ochlazení plynu v primárním okruhu. Regenerace napájecí vody z tohoto důvodu neprobíhá ve vysokotlakových ohřívácích, někdy ani v nízkotlakových. Výhodné je použití přehřátí páry po expanzi ve vysokotlakovém dílu znovu v parním generátoru. Jednookruhového uspořádání s plynovou turbínou se zatím nerozšířilo vzhledem k požadavku vysokoteplotního reaktoru. Podíl elektráren tohoto typu mezi jadernými reaktory činí přibližně 4%.

#### **3.4.1 Jaderné elektrárny s magnoxovými reaktory**

Jelikož teplota plynu v primárním okruhu nepřesahuje  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , tak tlak sekundární páry na výstupu z parního generátoru bývá u reaktorů magnoxového typu do 5 MPa. Pára potřebná pro turbínu se vyrábí v parních generátorech s dvoutlakovým uspořádáním. Při takovémto uspořádání se zvýší tepelná účinnost oběhu. Parní generátor je koncipován jako protiproudý a skládá se z ekonomizéru (ohříváku), výparníku a přehříváku. Třítlakové uspořádání nemá oproti dvoutlakovému vzhledem k náročnosti a nepříliš výraznému zvýšení účinnosti opodstatnění.

Uspořádání aktivní zóny tvoří pravidelná čtvercová mříž, která je velmi řídká. Aktivní zónu obklopuje tlaková nádoba reaktoru kulového nebo válcového tvaru. Palivo použité pro tyto reaktory je přírodní uran. Povlak palivových článků vyroben z hořčíkové slitiny (MAGNOX - Magnesium Non Oxidising). Výměna paliva probíhá za provozu reaktoru. Chladivem je oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , moderátorem grafit.

Reaktory tohoto typu nejsou schopny z ekonomického hlediska výroby elektrické energie konkurovat ostatním typům a nejsou již proto vyvíjeny.

### 3.4.2 Jaderné elektrárny se zdokonalenými plynem chlazenými reaktory

Primární okruh takovéto elektrárny má integrální uspořádání, jedná se o reaktorovou nádobu z předpjatého betonu s ocelovými konstrukčními prvky, kde je umístěn i parní generátor. Integrální uspořádání zvyšuje bezpečnost. Oběhové dmychadlo nasává ve spodní části chladivo, to proudí přes prstencovou rozdělovací komoru do palivových kanálů. Průtok chladiva jednotlivými kanály se dá regulovat pomocí šoupátek nad každým kanálem. Po ohřátí v aktivní zóně putuje plyn o teplotě až 675 °C do parního generátoru. V parním generátoru se vyrábí pára o vysokých parametrech, tlak 16,2 MPa a teplota 565 °C.

Palivem je nízko obohacený uran v keramické formě, jednotlivé tablety jsou v obalech z nerezavějící oceli. Chladivem je oxid uhličitý CO<sub>2</sub> a moderátorem grafit. Tento typ elektrárny má vysokou účinnost (až 42 %), z ekonomických důvodů však není rozšířen.

### 3.4.3 Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory

Vysokoteplotních reaktorů může být použito jako zdroje vysokopotenciálního tepla nebo jako zdroje páry o vysokých parametrech. Plynné chladivo, kterým je helium He, vystupující z aktivní zóny může mít teplotu i přes 950 °C. Helium má výborné tepelné vlastnosti, je inertní, nevýhoda helia spočívá v jeho ceně a vysokých požadavcích na těsnost celého okruhu. [5]

Oběh elektrárny s vysokoteplotním reaktorem může být proveden jak s plynovou, tak i s parní turbínou nebo jejich kombinací. V případě parního oběhu dochází k výměně tepla mezi heliem a vodou v parním generátoru. Velikost parních generátoru nedosahuje takových rozměrů jako u jiných typů plynem chlazených reaktorů z důvodu lepších tepelně fyzikálních vlastností a vyšší teplotě chladiva reaktoru. Konstrukčním materiálem může být i levnější ocel jelikož helium je inertní. Ukázalo se však, že použití oběhu s parní turbínou je sice spolehlivé, ale oproti oběhu s plynovou turbínou musí mít řadu dodatečných bezpečnostních systémů, což z ekonomického hlediska není konkurenceschopné a eliminuje přirozenou bezpečnost vysokoteplotních reaktorů.

Pro vysokoteplotní reaktory je charakteristické použití palivových článků s obalovanými částicemi paliva. Obalované kulové částičky mají rozměr (300 až 800) μm, takto malé částičky jsou odolné proti vysokým teplotám (až 1 300 °C) a vysokým hodnotám ozáření. Částice paliva mají kolem sebe několik vrstev obalového materiálu, který tvoří pyrolytický grafit a karbid křemíku. Grafit je zároveň moderátorem. Obalový materiál chrání palivo před mechanickým poškozením a zároveň brání průniku štěpných produktů do chladiva reaktoru. Vyhoření paliva je velmi vysoké, a to až 14 %. Jaderná elektrárna Fort St. Vrain má palivo uzavřené v palivových blocích, výměna paliva probíhá v kampaních. Jaderná elektrárna s reaktorem THTR 300 má palivo ve formě grafitových koulí o průměru 60 mm, koule jsou volně vsypány do reaktoru a jejich výměna je prováděna kontinuálně. V horní části reaktoru

jsou vsypávány plnicím strojem nové nebo ne zcela vyhořelé koule odebrané otvorem ve dně reaktoru. Vyhořelé nebo poškozené koule jsou plnicím strojem odstraněny.

Primární okruh je možno uspořádat integrálně. Reaktorová nádoba je z předpjatého betonu s vnitřní ocelovou výstelkou, která má chránit beton před horkým plynem a také tvořit nepropustnou bariéru pro samotné chladivo. Z vnitřní strany ocelové výstelky bývá keramická nebo kovová tepelná izolace.

Objem potřebného paliva je menší oproti jiným typům reaktorů, lze použít i kombinovaného cyklu uran - thorium. Bezpečnost celého systému je na vysoké úrovni, konstrukce je jednodušší. Účinnost dosahuje hodnoty až 48 %.

#### 3.4.4 Těžkovodní reaktory chlazené plynem

Těžkovodní reaktory jsou moderované těžkou vodou, která umožňuje použití přírodního uranu jako paliva. Těžká voda je výborným moderátorem a díky této vlastnosti lze jako chladivo použít více látek. Uspořádání elektrárny je dvouokruhové.

První československá Jaderná elektrárna A1 v Jaslovských Bohunicích byla tohoto typu, chladivo této elektrárny byl oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ . Primární okruh tvořilo šest smyček s vlastním parním generátorem. V sekundárním okruhu připadaly na jednu smyčku dva parní generátory. Ohřev obyčejné vody sekundárního okruhu byl uvnitř trubek písmene U, vně proudil oxid uhličitý. Elektrárna A1 byla velmi náročná z ekonomického i provozního hlediska. Roku 1977 došlo k nehodě na palivovém článku (jeho protavení) a následnému uzavření elektrárny.

V současnosti tato koncepce není provozována, další vývoj byl výrobcí ukončen.

### 3.5 JADERNÉ ELEKTRÁRNY S REAKTORY CHLAZENÝMI TĚŽKOU VODOU

Jediný komerčně používaný typ těžkovodního reaktoru je kanadský reaktor CANDU. Reaktor nemá tlakovou nádobu, místo ní tlakové kanály. Umístění reaktoru je v betonové šachtě s vyložení z ocelového plechu a zalité obyčejnou vodou zajišťující biologické stínění. Chladivem i moderátorem je těžká voda  $\text{D}_2\text{O}$ , chladivo i moderátor jsou od sebe navzájem odděleny. Tepelné schéma jaderné elektrárny je dvouokruhové - primární okruh s těžkou vodou, sekundární okruh s vodou a vodní párou. Moderátor přijímá teplo z tlakového kanálu přes plynovou vrstvu. Moderátor následně předá teplo chladivu. Výroba páry probíhá v parním generátoru. Parametry chladiva jsou podobné jako u tlakovodních reaktorů.

Aktivní zónu tvoří vodorovně situované tlakové kanály, umístěné v horizontální válcové nádobě, která se nazývá kalandrie. V tlakových kanálech je umístěno palivo, které lze měnit kontinuálně za provozu a z obou stran kalandrie pomocí plnicích strojů. Tímto způsobem lze velmi efektivně dosáhnout potřebného vyhoření paliva. Jako palivo těžkovodních reaktorů je použito přírodního uranu ve formě  $\text{UO}_2$ . Palivové články jsou tvořeny svazkem palivových tyčí, v nichž je palivo ve formě bloků. Regulace probíhá pomocí vertikálně umístěných regulačních (havarijních) tyčí, pohyblivých absorpčních tyčí a obyčejnou vodou, která v případě potřeby zalije trubky k tomu určené.



Výhodou této koncepce jaderného reaktoru je použití přírodního uranu jako paliva, adaptace celého systému na palivový cyklus v různém stadiu vyhoření, použití tlakových kanálů místo tlakové reaktorové nádoby, hospodárnost a spolehlivost systému (nízká spotřeba štěpného materiálu). Hlavní nevýhodou jsou ekonomické náklady na těžkou vodu a nižší účinnost termodynamického oběhu. Zastoupení elektráren s těžkovodními reaktory činí 5 %.

### 3.6 REAKTORY CHLAZENÉ TEKUTÝMI KOVY

Jediná koncepce, která se doposud prosadila na trhu mezi energetickými reaktory je rychlý množivý reaktor chlazený tekutým sodíkem. Z bezpečnostních důvodů se staví jaderné elektrárny s reaktory chlazenými sodíkem jako tříokruhové, v primárním okruhu proudí aktivní sodík, v sekundárním okruhu neaktivní sodík a v terciárním okruhu voda a vodní pára. Chladivo musí mít dobré tepelné vlastnosti a zároveň být špatným moderátorem. Sodík je jednou z mála látek, která splňuje fyzikální požadavky, jeho tepelná vodivost je více než stokrát větší než u obyčejné vody. Teplota varu sodíku je vysoká, tlak v primárním okruhu relativně nízký. Rychlost proudění v aktivní zóně nemusí být z tohoto hlediska tak vysoká. Velká nevýhoda v použití sodíku jako chladiva spočívá v jeho chemické afinitě vůči kyslíku. Požadavky na těsnost jsou tedy značné, nad sodíkem je v reaktoru z bezpečnostních důvodů vrstva inertního plynu - argonu.

Konstrukce reaktorové nádoby reaktoru Super Phenix (francouzský prototyp reaktoru o velkém výkonu) je zdvojená, zavěšení je na ocelové desce, ochranná betonová obálka sleduje tvar reaktorové nádoby a je chlazená. Prostor mezi jednotlivými nádobami slouží k případnému zachycení úniku sodíku v případě porušení vnitřního pláště, vnější část izoluje vrstva kovu. Víko reaktoru tvoří betonová deska v ocelovém pouzdře a plní mimo jiné funkci stínění reaktorového sálu před zářením. V primárním okruhu proudí tekutý sodík, který je hnán čtyřmi primárními čerpadly do prostoru pod aktivní zónou. V aktivní zóně dojde k ohřátí sodíku na teplotu 620 °C a následnému vstupu do mezivýměníku tepla. Sekundární okruhy jsou celkem čtyři a obsahují mezivýměník tepla mezi primárním a sekundárním okruhem, sekundární čerpadlo a parní generátor.

Palivo pro reaktory chlazené tekutými kovy je středně až vysoce obohacené, hmotnost štěpného materiálu přesahuje mnohonásobně kritickou hmotnost kvůli nízkým účinným průřezům. Jako paliva lze použít uran  $^{235}\text{U}$  nebo plutonium  $^{239}\text{Pu}$ , palivové články jsou podobné tlakovodním a jsou pokryté nerezovou ocelí. Aktivní zóna je velmi kompaktní a má hustou palivovou mříž, tvořenou palivovými proutky uspořádanými do pravidelného trojúhelníka. Aktivní zóna má tvar válce. V rychlých jaderných reaktorech lze palivo množit. Uprostřed jsou palivové soubory aktivní zóny s různým stupněm obohacení, vnější plášť s množivým materiálem (radiační záchyt na jádrech  $^{238}\text{U}$  nebo  $^{232}\text{Th}$ ). Množivý materiál prodlužuje dobu kampaně jaderného reaktoru. Rychlé reaktory musí pracovat v otevřeném palivovém cyklu (přepřepování paliva). Regulace reaktoru se dělí na dva stupně a to na články trvale umístěné v aktivní zóně (kompenzační články a automaticky regulační články) a na články s polohou mimo reaktor (teplotní kompenzace a články havarijní ochrany). Výkon jednotky objemu je velmi vysoký, v porovnání s tlakovodními reaktory až stonásobně, závisí přímo úměrně na objemu množivého materiálu v aktivní zóně.

Výhody rychlého reaktoru spočívají ve velké tepelné kapacitě sodíku, nízkého tlaku v primární části, vhodné uspořádání aktivní zóny prakticky vylučuje obnažení aktivní zóny reaktoru a schopnosti dochlazování reaktoru na základě přirozené cirkulace sodíku. Nevýhodné vlastnosti rychlého reaktoru zejména z bezpečnostního hlediska jsou vyšší množství plutonia v aktivní zóně, několikanásobně vyšší hmotnost než je kritická hmotnost soustavy, možnosti kladného teplotního součinitele reaktivity v některých místech aktivní zóny, krátké střední doby života neutronů což má za následek velmi rychlé odezvy reaktoru na změnu reaktivity a vysoký měrný výkon soustavy.

Jaderné elektrárny s rychlými reaktory chlazenými tekutým sodíkem lze rozdělit na demonstrační, mezi které se řadí britský PFR-250, francouzský Phenix a ruský BN-350 a na prototypy velkých průmyslových jednotek - francouzský Super Phenix a ruský BN-600, který je zároveň provozován jako jediný průmyslový rychlý reaktor ve světě.

## 4 TYPY PARNÍCH GENERÁTORŮ JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Parní generátor jaderné elektrárny je tepelný výměník sloužící k výrobě páry z teplotnosné látky ochlazující jaderný reaktor, nebo obíhající ve vloženém teplosměnném okruhu (mezivýměník).

Parní generátory se dělí do skupin podle teplotnosné (topné) látky chladiva reaktoru, nebo vloženého meziokruhu:

- vytápěné tlakovou vodou,
- vytápěné plynem,
- vytápěné organickou látkou,
- vytápěné tekutým kovem.

Parní generátor tvoří několik technologických dílů - ekonomizér (ohřev napájecí vody teoreticky až na teplotu varu), výparník a přehřívák páry, který je pouze u některých typů. Do horní části parního generátoru je možné umístit odlučovák vlhkosti. Sníží se ztráty v potrubí, které by se projevíly v provedení s parním generátorem a odlučovákem zvlášť a zároveň se ze sekundárního okruhu odstraní jedno zařízení, které by mohlo zvýšit pravděpodobnost poruchy elektrárny.

Oběh chladiva primárního okruhu je vždy nucený, v případě poruchy musí být reaktor neustále dochlazován a to buď přirozenou cirkulací chladiva danou uspořádáním parního generátoru a reaktoru nebo cirkulací nucenou pomocí havarijních systémů. Podle oběhu vody a vodní páry jsou parní generátory:

- s přirozenou cirkulací,
- s nucenou cirkulací,
- průtlačné (průtočné). [2]

Konstrukční požadavky na parní generátory jsou velké. V jaderné elektrárně se dvěma okruhy odděluje parní generátor od sebe primární okruh s aktivní topnou látkou a sekundární okruh s neaktivní vodou a vodní párou. Proto musí být zajištěna dokonalá těsnost celého zařízení z bezpečnostních důvodů a dlouhodobá životnost použitých materiálů.

Parní generátor charakterizují hlavní parametry:

množství vyráběné páry  $Q_{mp}$  ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ), tlak páry  $p_p$  (MPa), teplota páry  $t_p$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), vlhkost páry nebo její suchost  $x$ , teplota páry  $t_{nv}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), účinnost parního generátoru ( $\eta_{pg}$ ) vyjadřující ztráty tepla do okolí, u syté páry se uvádí tlak  $p''$  (MPa) a teplota  $t''$  ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Při konstrukci parního generátoru musí být zadány druh a parametry topné látky, parametry páry a napájecí vody, způsob protékání látek parním generátorem a mnohé další vstupní informace (např. průtok pracovní látky výparníkem, způsob odlučování páry,...).

## 4.1 PARNÍ GENERÁTORY JADERNÝCH ELEKTRÁREN S REAKTORY CHLAZENÝMI TLAKOVOU VODOU

Parní generátory vytápěné tlakovou vodou tvoří soustava teplosměnných trubek umístěných v plášti parního generátoru. Teplo se přivádí tlakovou vodou o vysokém tlaku z primárního okruhu, která proudí uvnitř trubek. Průměr trubek je (11 až 21) mm, tloušťka trubky je (1,0 až 1,5) mm. Tyto rozměry se ukázaly být vhodné z hlediska malého tepelného odporu stěny trubky, velké teplosměnné plochy a úspory materiálu (materiálem trubek je nerezavějící austenitická ocel). Vně trubek proudí voda a vodní pára sekundárního okruhu. Tato koncepce má výhodu v lepším oddělení vodní a parní fáze a dosažení většího součinitele přestupu tepla. Parní generátory vyrábějí sytou páru, odloučení přebytečné vlhkosti probíhá v odlučovacích vlhkosti na výstupu z parního generátoru.

### 4.1.1 Vertikální provedení parních generátorů

Parní generátory vertikálního provedení se používají v jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory západní koncepce. Jsou tvořeny ze dvou dílů. Spodní díl představuje teplosměnnou plochu sestavenou z vertikálně umístěných ocelových U trubek přivařených k trubkovnici plátované nerezavějící ocelí na straně primární vody. Legování trubek niklem slouží jako protikorozní ochrana. Horní díl obsahuje odlučovány vlhkosti, první odloučení vlhkosti je provedeno v odstředivém odlučovači, druhé pak v odlučovači žaluziovém. Výška parního generátoru je až 20 m, průměr 5 m.

Cirkulace pracovní látky v parním generátoru je přirozená, do parního generátoru je pracovní látka přivedena v jeho horní části, stéká mezi vnějším a vnitřním pláštěm parního generátoru k trubkovnici a následně je přivedena do prostoru U trubek vytápěných tlakovou vodou kde se ohřívá a probíhá vypařování. Parní generátor vyrábí (500 až 2 500) t·h<sup>-1</sup> syté páry o tlaku 5 MPa. Primární tlaková voda má tlak (14,5 až 15,5) MPa, teplota na vstupu do parního generátoru (308 až 315) °C, na výstupu z parního generátoru (285 až 288) °C. Teplosměnná plocha je (2 500 až 3 000) m<sup>2</sup>.

Nevýhodou těchto parních generátorů je usazování kalů v oblasti spojení trubkovnice s trubkami a následnou korozi. Výhodou je malá potřebná půdorysná plocha.

### 4.1.2 Horizontální parní generátory elektráren typu VVER

Parní generátory elektráren s reaktory typu VVER 440 jsou 11,8 m dlouhé válcové nádoby o průměru 3,21 m. Výkon jednoho parního generátoru činí 229 MW, na jeden výrobní blok připadá celkem šest parních generátorů. Teplosměnnou plochu tvoří vodorovně situované svazky U trubek zaválcované do dvou vertikálních kolektorů primární tlakové vody. Oběh primární tlakové vody je nucený a zajišťují jej hlavní cirkulační čerpadla. Svazky teplosměnných trubek jsou neustále zalaty sekundární vodou s přirozenou cirkulací. Sekundární voda se do parního generátoru přivádí nátrubkem s následným rozvodem k teplejší polovině trubek s primární tlakovou vodou. Tento způsob přívodu napájecí vody je volen z důvodu rovnoměrného zatížení vodní hladiny. Z vodní hladiny se uvolňuje pára, která je odváděna přes

žaluziové odlučovány vlhkosti do pěti výstupních kolektorů syté páry. Objem sekundární vody v parním generátoru při provozu činí  $48,4 \text{ m}^3$ .

Parní generátory elektráren s reaktory typu VVER 1000 pracují na stejném principu jako parní generátory bloků VVER 440, mají však výrazně zvýšené parametry. Na jeden blok VVER 1000 připadají čtyři parní generátory. Tepelný výkon jednoho parního generátoru je 750 MW. Parovodní směs uvolněná z vodní hladiny prochází přes dva odlučovány vlhkosti, první gravitační odlučovák a druhý žaluziový odlučovák. Vlhkost páry z parního generátoru je 0,2 %.

Výhoda horizontálních parních generátorů je v možnosti použít oceli jako materiál trubek, jelikož nedochází k usazování korozi způsobujících kalů v této oblasti. Výroba je v porovnání s vertikálními parními generátory snadnější. Nevýhodou těchto parních generátorů je velká půdorysná plocha.

Tab. 4-1 Vybrané parametry parních generátorů s bloky VVER 440 a VVER 1000

Typ parního generátoru	VVER 440	VVER 1000
Tepelný výkon	229 MW	750 MW
Výroba páry	$452 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$1\,470 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$
Průtok primární vody	$4\,842 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$	$14\,800 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$
Tlak páry	4,71 MPa	6,3 MPa
Teplota páry	260 °C	278,5 °C
Teplota napájecí vody	223 °C	220 °C
Teplota primární vody na vstupu	297 °C	320 °C
Teplota primární vody na výstupu	267 °C	289 °C
Teplosměnná plocha	$2\,510 \text{ m}^2$	$6\,115 \text{ m}^2$

## 4.2 PARNÍ GENERÁTORY JADERNÝCH ELEKTRÁREN S PLYNEM CHLAZENÝMI REAKTORY

Chladivem primárního okruhu je nejčastěji oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ , popřípadě helium He. Sekundárním okruhem obíhá voda a vodní pára. Technické provedení parních generátorů vytápěných plynem má dvě koncepce:

- plášťový parní generátor: systém teplosměnných trubek vložených do pláště parního generátoru, uvnitř trubek proudí voda nebo vodní pára, vně trubek plynné chladivo primárního okruhu;
- dvojtrubkový parní generátor (trubka v trubce): uvnitř jedné trubky s plynným chladivem je uspořádáno více trubek s proudící vodou nebo vodní párou.

### 4.2.1 Parní generátory elektráren s reaktory magnoxového typu

Tento typ parního generátoru má na sekundární straně vyšší tlak než na straně primární. Výkon prvních parních generátorů s reaktory magnoxového typu činil 50 MW, byly použity v jaderné elektrárně Calder Hall ve Velké Británii, jeden blok měl čtyři parní generátory. Vstupní teplota oxidu uhličitého do parního generátoru nepřesahuje 360 °C, vstup plynu je umístěn v horní části parního generátoru. Teplota oxidu uhličitého na výstupu z parního generátoru 136 °C. Parní generátor je dvoutlakový, tlak páry na výstupu z vyššího stupně 1,4 MPa a teplota 326 °C, nižší

tlakový stupeň má na výstupu parametry páry 0,44 MPa a 171 °C. Těleso parního generátoru má rozměry 24,5 m na výšku a průměr 5,33 m. Elektrárny s vyššími výkony mají řešen primární okruh integrálně, průtočný parní generátor je umístěn pod reaktorem ve společné nádobě.

#### 4.2.2 Parní generátory elektráren se zdokonalými plynem chlazenými reaktory

V primárním okruhu se oxid uhličitý ohřívá až na teplotu 675 °C, parametry pracovní látky sekundárního okruhu jsou oproti jaderným elektrárnám s magnoxovými reaktory vyšší. Vzhledem k vysokému tlaku primárního chladiva (až 4,26 MPa) je primární okruh integrálního typu. Parní generátory jsou jednotlakové, průtočného typu a s mezipřehříváním páry až na původní teplotu vstupu páry. Parní generátory jsou protiproudé, napájecí voda proudí šroubovicovitě vinutými trubkami od spodní k horní části parního generátoru, plyn proudí shora dolů kolem trubek. Parní generátor tvoří ekonomizér, na něj přímo navazuje výparník a následuje přehřívák páry. V parních generátorech se vyrábí pára o tlaku až 17,1 MPa a teplotě 543 °C, přehřátá pára má tlak 3,93 MPa a teplotu 539 °C. Primární chladivo má teplotu na vstupu do reaktoru asi 287 °C a na výstupu 651 °C, tyto parametry charakterizují jadernou elektrárnu v Heyshamu.

#### 4.2.3 Parní generátory elektráren s vysokoteplotními reaktory

U vysokoteplotních reaktorů je chladivem helium, které obíhá na primární straně parního generátoru. Parní generátory jsou koncipovány jako průtočné. Proudění helia parním generátorem je možno provést shora dolů i zdola nahoru. Výstupní teplota helia z reaktoru je až 1 000 °C. Pára na výstupu z parního generátoru má vysoké parametry.

Jaderná elektrárna THTR 300 (SRN) má 6 parních generátorů s výkonem 128 MW každého parního generátoru. Helium proudí zdola nahoru kolem šroubovicovitě vinutých trubek s napájecí vodou a vodní párou. Teplota helia na vstupu do reaktoru je 250 °C, na výstupu z reaktoru 750 °C. Tlak páry na výstupu z parního generátoru je 18,7 MPa, její teplota 550 °C. Množství vyrobené páry je 42,2 kg·s<sup>-1</sup>.

### 4.3 PARNÍ GENERÁTORY JADERNÝCH ELEKTRÁREN S REAKTORY CHLAZENÝMI TEKUTÝM KOVEM (SODÍKEM)

Parní generátory u reaktorů chlazených tekutým sodíkem musí svou konstrukcí zamezit jakémukoliv kontaktu sodíku a vody. Seběmenší kontakt těchto dvou vzájemně velmi chemicky aktivních látek může způsobit značné komplikace celého provozu jaderného zařízení způsobené okamžitou korozí a erozí teplosměnných ploch parního generátoru. Konstrukčních řešení parního generátoru vytápěného sodíkem je celá řada. Jako vhodné se při experimentálních pokusech ukázalo být proudění sodíku uvnitř trubky s vodou vně trubky. Při případné netěsnosti některé z trubek by voda o vyšším tlaku proudila do trubky se sodíkem o tlaku nižším, v těsném prostoru uvnitř trubky by pak došlo k utlumení chemické reakce a ucpání trubky.

Jaderná elektrárna Super Phenix (FRA) má čtyři jednotělesové průtočné vertikální parní generátory, se šroubovicovitě vinutými svazky trubek. Výkon jednoho parního generátoru činí

750 MW. Teplota sodíku na vstupu do parního generátoru je 525 °C, na výstupu 345 °C. Napájecí voda má vstupní teplotu 237 °C, výstupní pára má teplotu 490 °C a tlak 18,4 MPa. Parní generátor vyrábí 338,5 kg·s<sup>-1</sup> přehřáté páry.

## 5 TURBÍNY PRO JADERNÉ ELEKTRÁRNY

V jaderných elektrárnách se používají výhradně parní turbíny. Turbíny jsou tepelné motory, v nichž se energie pracovní látky mění v energii mechanickou.

### 5.1 PARNÍ TURBÍNY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Většina jaderných elektráren je vybavena oběhem s parní turbínou zařazenou v sekundárním okruhu elektráren s tlakovodními nebo plynem chlazenými reaktory. Zařazení parních turbín v primárním okruhu je u elektráren s varnými reaktory, v okruhu terciárním u elektráren s rychlými reaktory.

Otáčky parních turbín v zemích s kmitočtem 50 Hz v elektrické síti jsou  $3\,000\text{ min}^{-1}$  nebo  $1\,500\text{ min}^{-1}$ , v zemích s kmitočtem sítě 60 Hz jsou použité otáčky  $3\,600\text{ min}^{-1}$  nebo  $1\,800\text{ min}^{-1}$ . Otáčky parní turbíny se po přifázování elektrického generátoru k síti udržují konstantní. Volba otáček parní turbíny má významný vliv na její konstrukci. Při otáčkách  $3\,000\text{ min}^{-1}$  je turbína vystavena značným odstředivým silám a dochází k namáhání lopatek oběžného kola, u otáček  $1\,500\text{ min}^{-1}$  jsou odstředivé síly menší. Nejvíce jsou namáhány poslední stupně parní turbíny jelikož proudící pára má v těchto místech nejnižší tlak a největší měrný objem, poslední stupeň je tedy zatížen největším objemovým průtokem. Turbíny velkých výkonů se z těchto důvodů navrhuje na otáčky  $1\,500\text{ min}^{-1}$ , tyto otáčky dovolují konstruovat poslední stupeň s delšími oběžnými lopatkami oproti turbínám s otáčkami  $3\,000\text{ min}^{-1}$ , zároveň ubývá počet nízkotlakových těles. Na délku oběžných lopatek má vliv i tlak v kondenzátoru, resp. teplota chladicí vody. Parní turbíny s výkonem nad 600 MW obvykle používají otáčky  $1\,500\text{ min}^{-1}$ . Turbíny Škoda 1 000 MW použité v Jaderné elektrárně Temelín mají otáčky  $3\,000\text{ min}^{-1}$  a to zejména z důvodu zkušenosti s konstrukcí parních turbín s těmito otáčkami.

Parní turbíny v jaderných elektrárnách pracují ve většině případů se vstupní sytou párou (tlakovodní reaktory), použití přehřáté páry umožňují jaderné elektrárny s plynem chlazenými reaktory nebo s rychlými reaktory. Turbíny pracující se vstupní přehřátou párou mají vyšší termodynamickou účinnost vzhledem k tepelnému spádu, který zpracovávají.

Turbíny pracující v jaderné elektrárně musí splňovat požadavky na vysokou spolehlivost. Při případné havárii parní turbíny dochází ke komplikacím spojeným s pomalou odstávkou reaktoru, někdy i nutností přepouštět páru mimo turbínu. Spolehlivost je zvýšena použitím kvalitnějších materiálů s ohledem na vyšší míru bezpečnosti v pevnosti. Razantní vliv na provozní spolehlivost mají použité otáčky.

### 5.2 PARNÍ TURBÍNY NA VSTUPNÍ SYTOU PÁRU

Parní turbína je vzhledem k parametrům vstupní syté páry tvořena vysokotlakovým a nízkotlakovým dílem, středotlakový díl se nepoužívá. Výkon nízkotlakové části tvoří až 60 % výkonu celého soustrojí.

Stupně parních turbín pracující v oblasti mokré páry jsou vystaveny erozi oběžných lopatek, pro snížení eroze se používá vnější odloučení vlhkosti, a to i z důvodu zlepšení účinnosti soustrojí.



Vliv na účinnost mají i ztráty výstupní rychlostí, ztráty škrcením ve vstupních orgánech, v převáděcím potrubí a ve vnějším odlučovák a přihříváku.

Parní turbína zařazená v primárním okruhu jaderné elektrárny pracuje s radioaktivní párou, to vyvolává další konstrukční a bezpečnostní požadavky. Turbína musí být biologicky stíněna od prostoru s pohybem obsluhy. Úniku páry z okruhu je zabráněno použitím těsných přírubových spojů s případným svarem v místech příruby, ucpávky a ventily se zahlcují neradioaktivní párou s vyšším tlakem ze zvláštního parního generátoru.

Regulace a ochrana turbíny je prováděna dvěma základními systémy:

- konvenční hydraulická regulace: rychlostní (výkonnostní) regulátor (impeler) reguluje otáčky parní turbíny, je umístěn na konci vysokotlakového dílu.
- elektronický: elektronický systém slouží k regulaci výkonu (s ochranou proti náhlému vzrůstu nebo poklesu tlaku páry před turbínou) a regulaci tlaku před turbínou pomocí regulačních ventilů. [4]

Turbíny jsou chráněny před zvýšením otáček nad otáčky jmenovité o (9 až 11) % rychlouzávěrnými ventily, které plní i funkci při stoupení tlaku páry na výstupu z turbíny nad dovolenou mez, při posunutí rotoru v axiálním směru anebo při náhlém odlehčení rotoru způsobeným odpojením elektrického generátoru od sítě. Turbíny jsou dimenzovány na zvýšení otáček až o 30 % oproti normálnímu stavu, jelikož i při uzavěru ventilů při 1,1 násobku jmenovitých otáček může dojít ke zvýšení otáček způsobeným průtokem páry nízkotlakovým dílem (pára v převáděcím potrubí, vypařený vodní film z ploch obtékaných mokrou parou). Turbíny s otáčkami  $3\,000\text{ min}^{-1}$  jsou navíc opatřeny rychlouzávěrnými klapkami, které přivírají průtok páry a zabraňují expanzi páry z vysokotlakového dílu, přihříváku - odlučováku a potrubí v nízkotlakovém dílu parní turbíny.

Oproti parním turbínám pracujících se vstupní přehřátou párou mají parní turbíny na vstupní sytosti páry nižší účinnost a větší objemový průtok páry (až šestkrát na vstupu a dvakrát na výstupu) při stejném výkonu.

### 5.2.1 Parní turbíny použité v Jaderné elektrárně Dukovany

Jaderná elektrárna Dukovany má celkem osm parních turbín typu Škoda K220-44, tj. dvě turbíny na jeden výrobní blok. Výkon jedné parní turbíny je 220 MW, otáčky jsou  $3\,000\text{ min}^{-1}$ . Parní turbína pracuje se vstupní sytostí párou, má celkem tři tělesa (jeden vysokotlakový a dva nízkotlakové díly), osm neregulovaných odběrů páry, je kondenzační a všechny díly jsou dvouproudové. Vysokotlakový díl má šest stupňů, na jeden nízkotlakový díl připadá pět stupňů. Pára vstupující do turbíny má tlak 4,32 MPa a teplotu 256 °C, expanduje ve vysokotlakovém dílu na tlak 0,48 MPa, prochází přes přihřívák-odlučovák a vystupuje z něj o tlaku 0,46 MPa a teplotě 216,5 °C. Přihřátí páry je provedeno dvoustupňově odběrovou párou z vysokotlakového dílu. Pára po přihřátí vstupuje do dvou paralelně řazených nízkotlakových dílů, expanduje a následně vystupuje čtyřmi výstupy do dvou kondenzátorů řazených na straně chladicí vody za sebou. Každý nízkotlakový díl má svůj vlastní kondenzátor. Tlak v kondenzátoru na parní straně je 6,84 kPa a 5,35 kPa, tlaky jsou udány ve směru proudění

kondenzátu (proti směru chladicí vody). Napájecí voda parního generátoru má teplotu 220 °C, její ohřev před vstupem do parního generátoru je proveden ve dvou vysokotlakových a pěti nízkotlakových regeneračních ohřívácích.

Regulace turbíny je provedena škrcením páry. Ložiska turbíny jsou mazána olejem o tlaku (0,246 až 0,294) MPa. Turbína je vybavena otáčecím zařízením, které otáčí tělesem turbíny při jeho chladnutí a zabraňuje tak nežádoucí deformaci turbíny.

V současné době dochází na Jaderné elektrárně Dukovany k modernizaci s cílem využít projektových rezerv. Parní turbíny Škoda K 220-44 jsou rekonstruovány ve třech etapách. První etapa spočívá ve výměně kondenzátorů. U stávajících kondenzátorů byla provedena rekonstrukce trubkových svazků, což vedlo ke snížení tlakových ztrát při průtoku páry. Druhá etapa se zaměřila na rekonstrukci nízkotlakových dílů turbín s kompletní výměnou průtočných částí s ohledem na vyšší spolehlivost a zvýšený výkon. Vysokotlakové díly jsou rekonstruovány ve třetí etapě. V rámci modernizace se tepelný výkon reaktoru zvýšil o 5 % na 1 444 MW z původních 1 375 MW. Elektrický výkon na svorkách generátoru jednoho bloku se zvýší až na 250 MW, pára na vstupu do vysokotlakového dílu turbíny má tlak 4,7 MPa a teplotu 260 °C. Tlak v kondenzátoru se snížil na 6,1 kPa a 4,6 kPa ve směru proudění kondenzátu. [9] [11]

### 5.2.2 Parní turbíny použité v Jaderné elektrárně Temelín

Jednomu reaktoru v Jaderné elektrárně Temelín přísluší jedna parní turbína, v elektrárně jsou tedy dvě parní turbíny. Turbíny pracují se vstupní sytou párou, jsou kondenzační a dvouproudové. Parní turbína je čtyřtělesová, jeden vysokotlakový díl má pět stupňů, nízkotlakové díly jsou tři se čtyřmi stupni v každém dílu, jsou stejné. Výkon jedné parní turbíny je 1 000 MW, otáčky jsou 3 000 min<sup>-1</sup>. Tlak páry na vstupu do vysokotlakového dílu je 5,8 MPa, její teplota 273,3 °C. V pěti stupních pára expanduje na tlak 0,79 MPa a je odvedena do dvou odlučováků-přihříváků, přihřívá se ostrou párou na teplotu 251 °C. Pára po expanzi v nízkotlakovém dílu proudí do třech kondenzátorů, umístěných pod nízkotlakovými díly, zapojení kondenzátorů je paralelní na straně parní i na straně chladicí vody. Napájecí voda má na vstupu do parního generátoru teplotu 220,9 °C, regenerace je provedena v jednom vysokotlakovém a ve čtyřech nízkotlakových ohřívácích. Regulace výkonu parní turbíny se provádí škrcením páry.

### 5.3 PARNÍ TURBNÍNY PRO ELEKTRÁRNY S VARNÝMI REAKTORY

Parní turbíny jsou zařazeny do primárního okruhu jaderné elektrárny a pracují se vstupní sytou párou. Pára vstupující do turbíny se průchodem přes reaktor stává radioaktivní. Zabránění úniku páry z turbíny podléhá i její konstrukční provedení. Labyrintové ucpávky hřídelů turbíny a ucpávky včetně ventilů představují nejvyšší míru pravděpodobnosti úniku radioaktivní páry, tyto části parní turbíny se zahlcují nekontaminovanou párou o vyšším tlaku. Nekontaminovanou páru je možno vyrobit například v povrchovém rekuperačním výměníku tepla, ohříváním odběrovou párou z turbíny. K utěsnění jednotlivých přírubových spojů se používá měkkého kovu s následným napojením na čidla, která kontrolují únik páry.

Údržba a revize parních turbín je oproti turbínám pracujícím s neradioaktivní párou komplikovanější. Před otevřením skříně parní turbíny je nutné zajistit její odvodnění od radioaktivního kondenzátu.

Kondenzátory turbín mají větší obsah sběračů kondenzátu. Je totiž nutné zajistit záchyt kondenzátu na dobu, aby došlo k přeměně izotopů dusíku  $^{16}\text{N}$  (poločas přeměny izotopu  $^{16}\text{N}$  je 7,4 s) a kyslíku  $^{19}\text{O}$  (poločas přeměny 29 s) a nedocházelo ke kontaminaci regeneračních ohříváků. Doba potřebná na snížení aktivity na 1 % původní aktivity činí asi 7 poločasů přeměny. Na těsnost kondenzátorů turbín jsou zvýšené nároky, z bezpečnostního hlediska obsahují kondenzátory například dvojité trubkovnice s demineralizovanou vodou o vyšším tlaku v meziprostoru.

## 6 NÁVRH VÝPOČTU PARAMETRŮ SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Návrh výpočtu parametrů sekundárního okruhu pro zadané tepelné schéma obsahuje:

- výpočet expanze páry v turbíně,
- výpočet ohřívání napájecí vody (regenerace),
- určení výkonu na svorkách elektrického generátoru, čistého výkonu jaderné elektrárny, tepelné účinnosti oběhu vztažené na svorky elektrického generátoru, čisté účinnosti jaderné elektrárny.

Pro návrh výpočtu tepelného oběhu je třeba znát základní požadavky na dané zařízení; mezi ně patří:

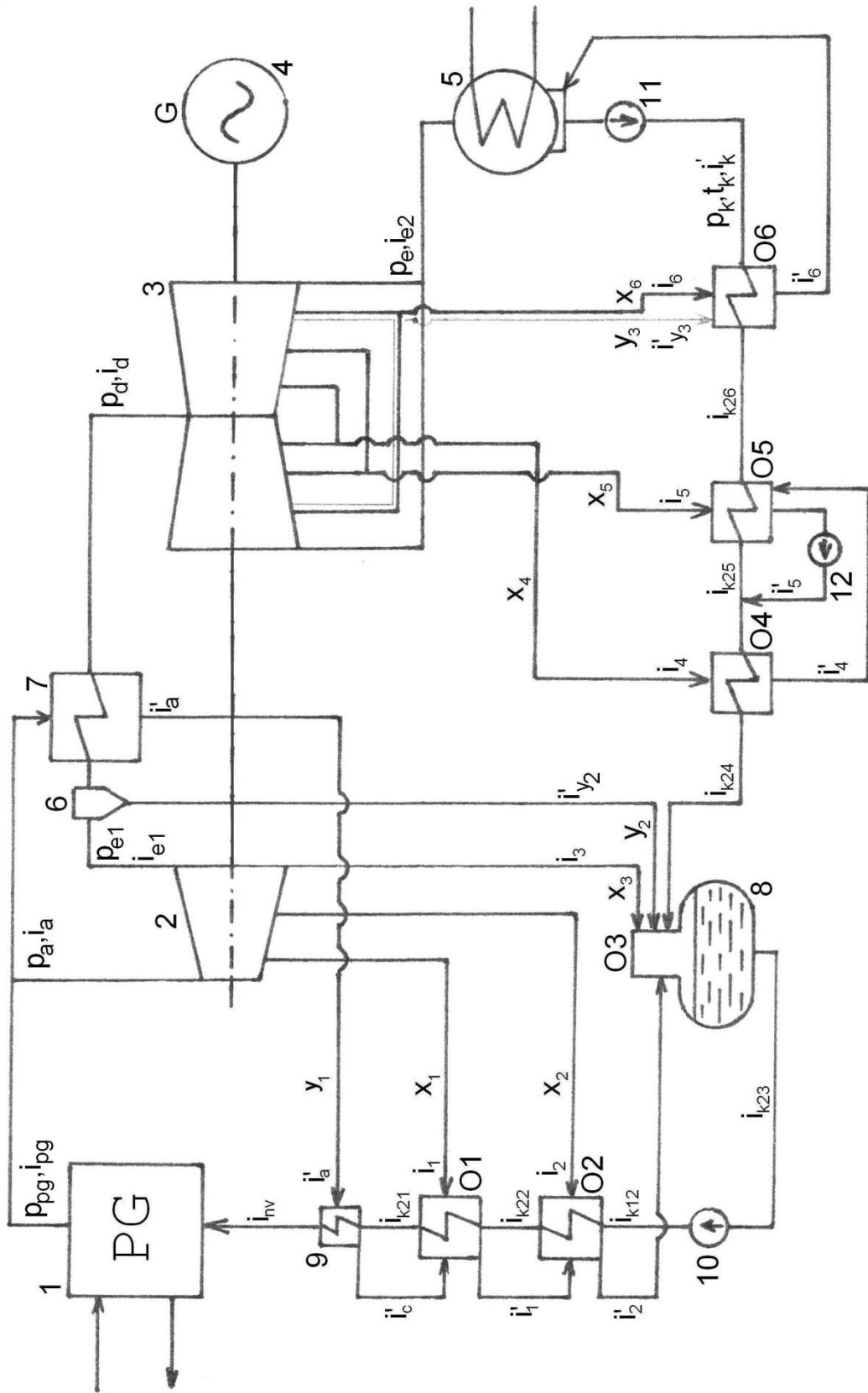
- parametry páry na výstupu z parního generátoru,
- protitlak nebo teplota chladicí vody,
- teplota napájecí vody,
- elektrický výkon na svorkách elektrického generátoru,
- tepelné schéma. [8]

Dále se při výpočtech předpokládají hodnoty spojené s výpočtem tepelného oběhu, které byly získány na základě předchozích zkušeností s již provozovanými zařízeními.

Jaderná elektrárna má jeden reaktor, v němž se předává teplo tlakové vodě primárního okruhu. V sekundárním okruhu je jedna kondenzační turbína na sytou páru. Aby se snížila vlhkost páry, vystupující z turbíny, je mezi její vysokotlakovou a nízkotlakovou částí provedeno odloučení vlhkosti v kombinaci s následujícím přihřátím admisní párou. Ohřev napájecí vody odběrovou párou probíhá v šesti ohřívácích.

Tepelné schéma je znázorněno na obr. 6.1:

- 1 - parní generátor, 2 - vysokotlaková část parní turíny, 3 - nízkotlaková část parní turbíny,
- 4 - elektrický generátor, 5 - kondenzátor, 6 - odlučovač vlhkosti (separátor), 7 - přihřívák,
- 8 - odplyňovač, 9 - chladič kondenzátu, 10 - napájecí čerpadlo, 11 - kondenzátní čerpadlo,
- 12 - přečerpávací čerpadlo, O1, O2, O3, O4, O5, O6 - ohříváky napájecí vody.



Obr. 6.1 Schéma sekundárního okruhu jaderné elektrárny

## 6.1 VÝPOČET EXPANZE PÁRY V TURBÍNĚ

V dvouokruhovém schématu pracují parní turbíny v jaderných elektrárnách s tlakovodními reaktory se vstupní (admisní) parou o tlaku  $p_a$  a teplotě  $t_a$ , jejíž hodnota je o 8 až 11 MPa nižší, než je hodnota tlaku vody vystupující z reaktoru. Tlak admisní páry na vstupu turbíny se volí v rozmezí

$$p_a = (4,2 \text{ až } 7,2) \text{ MPa. [10]}$$

Proběhla-li by expanze páry pouze v jednotělovém turbosoustrojí, byla by suchost páry po expanzi velmi nízká (hodnoty  $x = 0,20$  až  $x = 0,25$ ), za těchto okolností by byly poslední stupně turbíny vystaveny účinkům eroze a její termodynamická účinnost nízká. Z tohoto důvodu se parní turbíny staví vícetělesové s mezipřihříváním. Přihřátí pracovní páry vystupující z vysokotlakové části je možné provést více způsoby:

- přehřátí ostrou parou v regeneračním ohříváku,
- přehřátí odběrovou parou z vysokotlakové části v regeneračním ohříváku,
- přehřátí cizím zdrojem (klasickým palivem),
- přehřátí chladičem reaktoru.

Z těchto čtyř způsobů přehřívání se využívá zejména přehřátí ostrou nebo odběrovou parou.

Turbíny, které zpracovávají velké tepelné spády, se provádějí jako vícestupňové. První stupeň u takovýchto turbín je konstruován jako rychlostní Curtisův, který zpracuje čtyřnásobný tepelný spád oproti stupni rovnotlakovému. Tepelný spád se rozdělí vhodným způsobem mezi jednotlivé stupně turbíny. Zároveň lze využít odběrů páry pro regenerační ohřev napájecí vody, díky kterému dojde ke zvýšení tepelné účinnosti cyklu. Obě tělesa parní turbíny jsou konstruovány jako rovnotlakové.

### 6.1.1 Výpočet vysokotlakové části parní turbíny

Pro návrh počtu stupňů rovnotlakové parní turbíny je nutné nejprve stanovit poměr dělicího tlaku  $p_{el}$  a tlaku admisní páry  $p_a$

$$\left( \frac{p_{el}}{p_a} \right)_{opt} = 0,10 \div 0,20. \quad (6.1)$$

Z takto získaných parametrů  $p_a$ ,  $t_a$ ,  $p_{el}$  se určí entalpie páry na vstupu do vysokotlakové části parní turbíny a za posledním stupněm turbíny  $i_a$  a  $i_{els}$ .

Stanovíme izoentropický tepelný spád vysokotlakové části  $h_{sVT}$

$$h_{sVT} = i_a - i_{els}. \quad (6.2)$$

Pomocí izoentropického tepelného spádu vyjádříme teoretickou výtokovou rychlost páry  $c_{1s}$

$$c_{1sVT} = \sqrt{2 \cdot h_{sVT}}, \quad (6.3)$$

tomu příslušná teoretická obvodová rychlost

$$u_{thVT} = (u / c_{1s}) \cdot c_{1sVT}. \quad (6.4)$$

Poměr  $u/c_{1s}$  se volí s ohledem na zmenšení rychlostního poměru.

Je-li teoretická obvodová rychlost větší než  $250 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , pak z hlediska pevnosti oběžného kola musí být turbína provedena vícestupňově.

Skutečná obvodová rychlost

$$u_{VT} = \pi \cdot D_{VT} \cdot n, \quad (6.5)$$

kde  $D_{VT}$  značí střední průměr Curtisova kola vysokotlakové části turbíny a  $n$  počet otáček.

Pak bude skutečná výtoková rychlost páry

$$c_{1VT} = \frac{u_{VT}}{u / c_{1s}}. \quad (6.6)$$

Pro vypočtenou výtokovou rychlost páry se stanoví izoentropický tepelný spád jednoho stupně pro vysokotlakovou část parní turbíny

$$h_{s,CVT} = 0,5 \cdot c_{1VT}. \quad (6.7)$$

Entalpie za Curtisovým kolem pro izoentropický děj

$$i_{es,CVT} = i_a - h_{s,CVT}, \quad (6.8)$$

pro tuto hodnotu se stanoví pomocí diagramu  $i$ - $s$  odpovídající tlak za Curtisovým kolem  $p_{CVT}$ .

Skutečná entalpie za Curtisovým kolem pak bude

$$i_{e,CVT} = i_a - h_{s,CVT} \cdot \eta_{tdiC}, \quad (6.9)$$

$\eta_{tdiC}$  je vnitřní termodynamická účinnost Curtisova stupně.

Entalpie za posledním stupněm vysokotlakové parní turbíny bude

$$i_{e1} = i_a - (i_a - i_{e1s}) \cdot \eta_{tdiVT}, \quad (6.10)$$

$\eta_{tdiVT}$  vnitřní termodynamická účinnost vysokotlakové části parní turbíny.

Vysokotlaková část parní turbíny bude sestavena z rychlostního (Curtisova) kola a ze ( $z - 4$ ) stupňů rovnotlakových. Curtisova stupně se využívá v oběžích, kde je vysoký vstupní tlak a teplota. Tento stupeň zpracuje sice páru o daných parametrech s nižší účinností, výrazně však sníží tlak i teplotu páry, která proudí na další stupně turbíny. Curtisův stupeň je označován též jako regulační. Volba regulačního stupně se odvíjí podle tepelného spádu, který má být zpracován. Jednověncového rychlostního stupně se užívá pro tepelný spád do 80 až 120  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , dvouvěncového pro větší tepelné spády.

Počet rovnotlakových stupňů se určí ze vztahu

$$z_{VT} = \frac{i_a - i_{e1s}}{h_{s,CVT}} = \frac{h_{sVT}}{h_{s,CVT}}. \quad (6.11)$$

### 6.1.2 Výpočet nízkotlakové části parní turbíny

Výpočet nízkotlakové části parní turbíny bude obdobný jako u vysokotlakové části. Provedení nízkotlakové části bude vícestupňové.

Pro výpočet je nutné stanovit teplotu sytosti kondenzující páry

$$t_k = t_{v1} + \Delta t_v + \Delta t_2, \quad (6.12)$$

$t_{v1}$  značí teplotu chladicí vody vstupující do kondenzátoru,  $\Delta t_v$  ohřátí chladicí vody a  $\Delta t_2$  nedohřátí chladicí vody. Pomocí teploty sytosti kondenzující páry se určí odpovídající tlak v kondenzátoru  $p_k$ .

Protitlak nízkotlakové části parní turbíny  $p_{e2}$  se stanoví přičtením ztráty ve výstupním hrdle turbíny  $\Delta p_k$ .

$$p_{e2} = p_k + \Delta p_k. \quad (6.13)$$

Pro výpočet izoentropického tepelného spádu nízkotlakové části parní turbíny je nutné stanovit entalpie na vstupu do turbíny  $i_d$  a za posledním stupněm  $i_{e2s}$  pomocí tlaků  $p_d$  a  $p_{e2}$  a teploty přehřáté páry  $t_{pp}$ .

Izoentropický tepelný spád nízkotlakové části parní turbíny bude  $h_{sNT}$

$$h_{sNT} = i_d - i_{e2s}. \quad (6.14)$$

Teoretická výtoková rychlost páry pro nízkotlakovou část se stanoví obdobně, jako je tomu uvedeno ve vztahu (6.3) a poté se vypočte obvodová rychlost dle (6.4).

$$c_{1sNT} = \sqrt{2 \cdot h_{sNT}} \quad (6.15)$$

$$u_{thNT} = (u / c_{1s}) \cdot c_{1sNT}$$

Skutečná obvodová rychlost  $u_{NT}$  páry v nízkotlakové části

$$u_{NT} = \pi \cdot D_{NT} \cdot n, \quad (6.16)$$

$D_{NT}$  je průměr nízkotlakové části parní turbíny.

Skutečná výtoková rychlost páry

$$c_{1NT} = \frac{u_{NT}}{(u / c_{1s})}. \quad (6.17)$$

Izoentropický stupňový spád  $h_{s,CNT}$

$$h_{s,CNT} = 0,5 \cdot c_{1NT}^2. \quad (6.18)$$

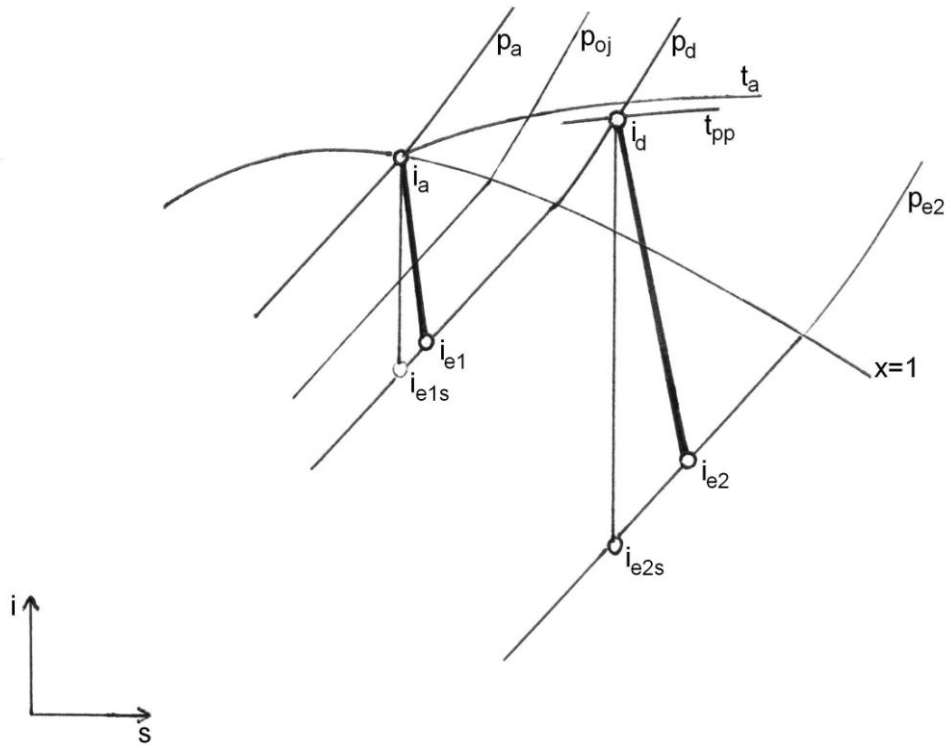
Aby bylo možné sestavit expanzní křivku, je nutné stanovit entalpii za posledním stupněm nízkotlakové části parní turbíny  $i_e$ .

$$i_{e2} = i_d - (i_d - i_{e2s}) \cdot \eta_{tdiNT}. \quad (6.19)$$



Počet stupňů nízkotlakové části bude

$$z_{NT} = \frac{i_d - i_{e2s}}{h_{s,CNT}} = \frac{h_{sNT}}{h_{s,CNT}} \quad (6.20)$$



Obr. 6.2 Průběh expanze páry v diagramu  $i-s$

## 6.2 STANOVENÍ PARAMETRŮ PRACOVNÍ LÁTKY V OBĚHU

### 6.2.1 Určení umístění odběrů a výpočet indiferentního bodu

Bude-li uvažováno stejné ohřátí pracovní látky ve všech ohřívácích, tak pro nárůst teploty v jednom ohříváku dostaneme vztah

$$\Delta t_k = \frac{t_{nv} - t_k}{m}, \quad (6.21)$$

$t_{nv}$  ve vztahu označuje teplotu napájecí vody,  $t_k$  teplotu sytosti kondenzující páry (6.12) a  $m$  počet ohříváků.

Teplota kondenzátu za každým ohřívákem bude, při uvažovaném ohřátí  $\Delta t_k$

$$t_{k2j} = t_{nv} - \Delta t_k \cdot (j-1), \quad (6.22)$$

$j$  značí pořadové číslo ohříváku, ve směru od parního generátoru.

Teplota sytosti topné páry při uvažovaném průběhu teploty páry a vody v povrchovém ohříváku

$$t_{oj}'' = t_{k2j} + \Delta t_{2j}, \quad (6.23)$$

kde  $\Delta t_{2j}$  označuje koncový rozdíl teplot v regeneračním ohříváku.

Z takto stanovených teplot sytosti páry se určí přibližně tlaky  $p_j$  v ohřívácích a tlaky  $p_{oj}$  v místě odběru pomocí přičtení tlakové ztráty v odběrovém potrubí  $\Delta p_{oj}$ . Následně se přibližně určí entalpie odběrové páry  $i_j$  z diagramu  $i$ - $s$  jako průsečík expanzní křivky a odběrového tlaku.

$$p_{oj} = p_j + \Delta p_{oj}. \quad (6.24)$$

Porovnáním orientačně určených odběrových tlaků a entalpií se skutečným průběhem expanze páry, při uvažování parametrů páry za jednotlivými stupni turbíny, se stanoví skutečné hodnoty tlaků v místě odběru  $p_{oj}$  a entalpií  $i_j$ .

Následně se provede kontrola umístění odběrů výpočtem indiferentního bodu, tj. bodu, ve kterém se nezlepšuje ani nezhoršuje tepelná účinnost oběhu při regeneraci tepla odběrovou parou v tomto bodě. [7]

$$i_{ind} = i_d - (i_d - i_{e1}) \cdot \frac{(i_a - i_{e1})}{(i_a - i_d')}, \quad (6.25)$$

$i_d'$  je entalpie syté kapaliny pro tlak  $p_d$ .

Je-li poloha indiferentního bodu nevhodná, musí se stanovit nové hodnoty ohřátí v ohřívácích.

### 6.2.2 Ohřátí napájecí vody v napájecím čerpadle

Při vzrůstu tlaku napájecí vody v napájecím čerpadle dojde k ohřátí pracovní látky. Tlak v sacím hrdle napájecího čerpadla je

$$p_s = p_{O3} - \Delta p_{O3}, \quad (6.26)$$

kde  $\Delta p_{O3}$  vystupuje ve vztahu jako tlaková ztráta v odběrovém potrubí k přihříváku.

Pro tlak  $p_s$  se určí z tabulek hodnota teploty varu kapaliny  $t_s''$ , entalpie syté kapaliny  $i_s'$  a entropie  $s_s'$ .

Výtlačný tlak vyvozený napájecím čerpadlem se určí

$$p_n = p_{pg} \cdot k_v, \quad (6.27)$$

$p_{pg}$  značí tlak v parním generátoru,  $k_v$  je koeficient udávající poměr mezi výtlačným tlakem a tlakem v parním generátoru, potřebný k překonání průtočných ztrát.

Pro tlak  $p_n$  se stanoví z tabulek pro vodu a vodní páru hodnota entalpie  $i_{ns}$  odpovídající izoentropické kompresi na tlak  $p_n$ . Z takto stanovených parametrů pracovní látky je možné stanovit teoretický vzrůst entalpie v napáječe

$$\Delta i_{ns} = i_{ns} - i_s'. \quad (6.28)$$

Praktická hodnota nárůstu entalpie v napáječe je

$$\Delta i_n = \frac{\Delta i_{ns}}{\eta_{ni}}, \quad (6.29)$$

$\eta_{ni}$  je vnitřní účinnost napáječky.

Pro entalpii za napájecím čerpadlem (též před ohřívákem O2) platí

$$i_{k12} = i_s' + \Delta i_n. \quad (6.30)$$

### 6.2.3 Určení ohřívání pracovní látky v oběhu

Pro teplotu napájecí vody  $t_{nv}$  je stanoveno teplotní optimum, které je doporučeno jako

$$t_{nv} = (0,65 \div 0,75) \cdot t_a'', \quad (6.31)$$

$t_a''$  značí teplotu varu kapaliny pro tlak  $p_a$ .

Poměrné množství odběrové páry jednotlivých regeneračních prvků se stanoví z rovnic tepelné bilance těchto členů parního oběhu. Takto stanovené množství odběrové páry se obecně určí z rovnice hmotnostních toků proudících danou částí oběhu

$$x_j = \frac{Q_{mOj}}{Q_{mp}}, \quad (6.32)$$

$x_j$  značí poměrný odběr páry v jednotlivých částech,  $Q_{mp}$  celkové množství páry proudící oběhem a  $Q_{mOj}$  množství páry potřebné v místě odběru  $j$ . Množství páry se udává v  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Poměrné množství odběrové páry  $y_1$  pro přehřívák páry mezi vysokotlakovým a nízkotlakovým stupněm se určí z rovnice tepelné bilance

$$y_1 \cdot (i_a - i'_a) = (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) \cdot (i_{e1} - i_{dt}). \quad (6.33)$$

Takto stanovit poměrné odběrové množství  $y_1$  je velmi obtížné, obvykle je zadáno.

Entalpie vody za chladičem kondenzátu  $i'_c$  se stanoví z rovnice

$$[y_1 \cdot (i'_a - i'_c)] \cdot \eta_c = (i_{mv} - i_{k21}), \quad (6.34)$$

entalpie  $i'_a$  se odečte z parních tabulek,  $\eta_c$  značí účinnost chladiče kondenzátu.

Poměrné množství odběrové páry  $x_1$  vysokotlakového regeneračního ohříváku O1

$$[x_1 \cdot (i_1 - i'_1) + y_1 \cdot (i'_c - i'_1)] \cdot \eta_{Ov} = (i_{k21} - i_{k22}), \quad (6.35)$$

entalpie  $i'_1$  se odečte z parních tabulek,  $\eta_{Ov}$  značí účinnost vysokotlakového regeneračního ohříváku.

Poměrné množství odběrové páry  $x_2$  vysokotlakového regeneračního ohříváku O2

$$[x_2 \cdot (i_2 - i'_2) + (x_1 + y_1) \cdot (i'_1 - i'_2)] \cdot \eta_{Ov} = (i_{k22} - i_{k12}), \quad (6.36)$$

entalpie  $i'_2$  se odečte z parních tabulek.

Poměrné množství odběrové páry  $x_3$  odplyňovače O3

$$\begin{aligned} [x_3 \cdot (i_3 - i_{k23}) + (x_1 + x_2 + y_1) \cdot (i'_2 - i_{k23}) + y_2 \cdot (i'_{y2} - i_{k23})] \cdot \eta_{O3} = \\ = (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) \cdot (i_{k23} - i_{k24}), \end{aligned} \quad (6.37)$$

$\eta_{O3}$  značí účinnost odplyňovače O3,  $i'_{y2}$  je entalpie odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti, množství odloučené vlhkosti  $y_2$  se stanoví z rovnice

$$y_2 = k_{y2} \cdot (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1), \quad (6.38)$$

kde  $k_{y2}$  je koeficient odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti.

Poměrné množství odběrové páry  $x_4$  nízkotlakového regeneračního ohříváku O4

$$[x_4 \cdot (i_4 - i'_4)] \cdot \eta_{On} = (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) \cdot (i_{k24} - i_{k25}), \quad (6.39)$$

entalpie  $i'_4$  se odečte z parních tabulek,  $\eta_{On}$  značí účinnost nízkotlakového regeneračního ohříváku.

Poměrné množství odběrové páry  $x_5$  nízkotlakového regeneračního ohříváku O5

$$[x_5 \cdot (i_5 - i'_5) + x_4 \cdot (i'_4 - i'_5)] \cdot \eta_{On} = (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - y_1 - y_2) \cdot (i_{k25} - i_{k26}), \quad (6.40)$$

entalpie  $i'_5$  se odečte z parních tabulek.

Poměrné množství odběrové páry  $x_6$  nízkotlakového regeneračního ohříváku O6

$$[x_6 \cdot (i'_6 - i'_6) + y_3 \cdot (i'_{y_3} - i'_6)] \cdot \eta_{On} = (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - y_1 - y_2) \cdot (i'_{k26} - i'_k), \quad (6.41)$$

entalpie  $i'_6$ ,  $i'_k$  a  $i'_{y_3}$  se odečte z parních tabulek,  $y_3$  značí množství odloučené vlhkosti z nízkotlakového dílu turbíny, které se stanoví

$$y_3 = k_{y_3} \cdot (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - y_1 - y_2), \quad (6.42)$$

kde  $k_{y_3}$  je koeficient odloučené vlhkosti v nízkotlakové části parní turbíny.

### 6.3 VÝPOČET CELKOVÉ SPOTŘEBY PÁRY, STANOVENÍ ÚČINNOSTÍ A VÝKONŮ

Práce 1 kg páry proudící turbínou

$$\begin{aligned} w_i = & (1 - y_1) \cdot (i_a - i_{O1}) + \\ & + (1 - x_1 - y_1) \cdot (i_{O1} - i_{O2}) + \\ & + (1 - x_1 - x_2 - y_1) \cdot (i_{O2} - i_{O3}) + \\ & + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1) \cdot (i_{O3} - i_{e1}) + \\ & + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) \cdot (i_a - i_{O4}) + \\ & + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - y_1 - y_2) \cdot (i_{O4} - i_{O5}) + \\ & + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - y_1 - y_2) \cdot (i_{O5} - i_{O6}) + \\ & + (1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - x_6 - y_1 - y_2 - y_3) \cdot (i_{O6} - i_{e2}). \end{aligned} \quad (6.43)$$

Stanovení celkového množství páry  $Q_{mp}$  potřebného k provozu parní turbíny

$$Q_{mp} = \frac{P_R}{i_{pg} - i_{nv}}, \quad (6.44)$$

kde  $P_R$  je tepelný výkon jaderného reaktoru jaderné elektrárny.

Po vypočtení celkového potřebného množství páry lze stanovit jednotlivá množství odběrové páry  $Q_{mOj}$  dle vztahu (6.32).

Množství páry proudící chladičem kondenzátu

$$Q_{my_1} = y_1 \cdot Q_{mp}. \quad (6.45)$$

Množství odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti

$$Q_{my_2} = y_2 \cdot Q_{mp}. \quad (6.46)$$

Množství odloučené vlhkosti v nízkotlakové části parní turbíny

$$Q_{my_3} = y_3 \cdot Q_{mp}. \quad (6.47)$$

Vnitřní výkon parní turbíny

$$P_i = Q_{mp} \cdot w_i \cdot \quad (6.48)$$

Výkon na svorkách elektrického generátoru

$$P_{sv} = P_i \cdot \eta_m \cdot \eta_g, \quad (6.49)$$

kde  $\eta_m$  je mechanická účinnost parní turbíny a  $\eta_g$  účinnost elektrického generátoru.

Tepelná účinnost oběhu vztažená na svorky elektrického generátoru

$$\eta_{tsv} = \frac{P_{sv}}{Q_{mp} \cdot (i_{pg} - i_{nv})}, \quad (6.50)$$

$i_{pg}$  je entalpie páry na výstupu parního generátoru.

Celková účinnost jaderné elektrárny

$$\eta_{tc} = \eta_{tsv} \cdot \eta_{pg} \cdot \eta_p, \quad (6.51)$$

kde  $\eta_{pg}$  značí účinnost parního generátoru,  $\eta_p$  účinnost potrubí.

Čistý výkon jaderné elektrárny

$$P_{pr} = P_{sv} \cdot \eta_{vs}, \quad (6.52)$$

$\eta_{vs}$  je součinitel vlastní spotřeby.

## 7 VÝPOČET PARAMETRŮ SEKUNDÁRNÍHO OKRUHU JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny se vztahuje k jaderné elektrárně o tepelném výkonu 3010 MW. Parní generátor vyrábí sytou páru o tlaku 5,890 MPa. Teplota napájecí vody je 228 °C. Odplyňování probíhá při teplotě 165 °C. Tlak v kondenzátoru turbíny je 3,920 kPa.

Při výpočtu se vychází ze zkušeností získaných s již provozovanými zařízeními a některých dalších zjednodušujících předpokladů:

Tepelné ztráty jsou zanedbány.

Odluh z parního generátoru je 1 %.

Tlaková ztráta mezi parním generátorem a turbínou je 2,5 % z  $p_{pg}$ .

Ztráta na regulačních ventilech turbíny je 12,5 kJ·kg<sup>-1</sup>.

Vnitřní termodynamická účinnost vysokotlakové části parní turbíny je 0,797, nízkotlakové části před odloučením vlhkosti 0,853 a po odloučení vlhkosti 0,813.

V odlučovači vlhkosti se vlhkost odloučí až na horní mezní křivku s odloučením 12,5 % vlhkosti.

K přehřívání páry za vysokotlakovým dílem je použito 6 % admisní páry.

Tlaková ztráta v odlučovači vlhkosti, přehříváči páry a ve spojovacím potrubí je 15 % z  $p_{el}$ .

Tlaková ztráta mezi turbínou a regeneračními ohříváky je 10 % z  $p_{oj}$ .

Během expanze se v nízkotlakovém dílu předpokládá jedno odloučení 3 % vlhkosti.

Ztráta výstupní rychlostí páry z turbíny je 30 kJ·kg<sup>-1</sup>.

Součin mechanické a elektrické účinnosti turbogenerátoru je 0,983.

Koncový rozdíl teplot v nízkotlakových regeneračních ohřívácích je 2 °C, ve vysokotlakových je 3 °C.

Ucpávkové ztráty jsou zanedbány.

Příkon oběhových čerpadel je zanedbán.

Použitá parní turbína má ve vysokotlakové části 3 stupně, v nízkotlakové části 4 stupně.

Při výpočtu je použit ke stanovení tlaků, entalpií, entropií a teplot výpočetní program Esteam Calculator, v4.02 vyvinutý firmou Encotech. [12]

## 7.1 NÁVRH TLAKU V UZLOVÝCH BODECH OBĚHU

Tlak admisní páry  $p_a$  na vstupu do vysokotlakového dílu je po přičtení tlakové ztráty 2,5 % z tlaku páry vyráběné v parním generátoru  $p_{pg}$ , který činí 5,890 MPa:

$$p_a = 5,890 \text{ MPa} \cdot (1 - 0,025) = 5,890 \text{ MPa} \cdot 0,975 = 5,74 \text{ MPa}.$$

Tlak za posledním stupněm vysokotlakové části parní turbíny  $p_{e1}$  se stanoví v návaznosti na teplotu sytosti páry v odplyňovači  $t_{O3}''$ , která je 165 °C a odpovídajícímu tlaku v odplyňovači  $p_3$ .

$$t_{O3}'' = 165 \text{ °C},$$

$$p_3 = p_3(x = 0; t_{O3}'') = 0,700 \text{ MPa},$$

Tlak za posledním stupněm vysokotlakové části turbíny bude po přičtení tlakové ztráty 10 % mezi turbínou a regeneračním ohřívákem:

$$p_{e1} = p_{O3} = \frac{0,700 \text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{0,700 \text{ MPa}}{0,9} = 0,778 \text{ MPa}.$$

Tlak na vstupu nízkotlakového dílu  $p_d$  parní turbíny je po přičtení tlakové ztráty 15 % v odlučovači vlhkosti, přihříváči páry a ve spojovacím potrubí:

$$p_d = 0,778 \text{ MPa} \cdot (1 - 0,15) = 0,778 \text{ MPa} \cdot 0,85 = 0,660 \text{ MPa}.$$

Tlak za posledním stupněm nízkotlakového dílu  $p_{e2}$  parní turbíny se stanoví z tlaku v kondenzátoru  $p_k$  turbíny (3,920 kPa) a tlakové ztráty 10 % mezi turbínou a kondenzátorem:

$$p_{e2} = \frac{3,920 \text{ kPa}}{1 - 0,1} = \frac{3,920 \text{ kPa}}{0,9} = 4,356 \text{ kPa}.$$

Jednotlivé odběrové tlaky  $p_{Oj}$  se určí z teplot sytosti kondenzující páry  $t_{Oj}''$  v regeneračních ohřívácích.

Při výpočtu se uvažuje průběh teplot kondenzátu  $t_{k2j}$  za regeneračním ohřívákem:

$$t_{k21} = 225 \text{ °C};$$

$$t_{k22} = 195 \text{ °C};$$

$$t_{k23} = 165 \text{ °C};$$

$$t_{k24} = 130 \text{ °C};$$

$$t_{k25} = 100 \text{ °C};$$

$$t_{k26} = 70 \text{ °C}.$$

Dle vztahu (6.23) se určí teploty sytosti kondenzující páry  $t_{Oj}''$ , koncový teplotní rozdíl u vysokotlakových regeneračních ohříváků je  $\Delta t_{2jVT} = 3 \text{ °C}$ , u nízkotlakových  $\Delta t_{2jNT} = 2 \text{ °C}$ .



$$t''_{o1} = 225\text{ °C} + 3\text{ °C} = 228\text{ °C};$$

$$t''_{o2} = 195\text{ °C} + 3\text{ °C} = 198\text{ °C};$$

$$t''_{o3} = 165\text{ °C};$$

$$t''_{o4} = 130\text{ °C} + 2\text{ °C} = 132\text{ °C};$$

$$t''_{o5} = 100\text{ °C} + 2\text{ °C} = 102\text{ °C};$$

$$t''_{o6} = 70\text{ °C} + 2\text{ °C} = 72\text{ °C}.$$

Tlaky v místech odběru na straně při regeneračním ohříváku jsou:

$$p_1 = p_1(t''_{o1}) = 2,696\text{ MPa};$$

$$p_2 = p_2(t''_{o2}) = 1,491\text{ MPa};$$

$$p_3 = p_3(t''_{o3}) = 0,700\text{ MPa};$$

$$p_4 = p_4(t''_{o4}) = 0,287\text{ MPa};$$

$$p_5 = p_5(t''_{o5}) = 0,109\text{ MPa};$$

$$p_6 = p_6(t''_{o6}) = 0,034\text{ MPa}.$$

Přičtením tlakové ztráty 10 % v potrubí mezi regeneračními ohříváky a místem odběru získáme skutečné tlaky v místě odběru  $p_{oj}$  (6.24):

$$p_{o1} = \frac{2,696\text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{2,696\text{ MPa}}{0,9} = 2,996\text{ MPa};$$

$$p_{o2} = \frac{1,491\text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{1,491\text{ MPa}}{0,9} = 1,657\text{ MPa};$$

$$p_{o3} = \frac{0,700\text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{0,700\text{ MPa}}{0,9} = 0,778\text{ MPa};$$

$$p_{o4} = \frac{0,287\text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{0,287\text{ MPa}}{0,9} = 0,319\text{ MPa};$$

$$p_{o5} = \frac{0,109\text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{0,109\text{ MPa}}{0,9} = 0,121\text{ MPa};$$

$$p_{o6} = \frac{0,034\text{ MPa}}{1 - 0,1} = \frac{0,034\text{ MPa}}{0,9} = 0,038\text{ MPa}.$$

## 7.2 OHŘÁTÍ PRACOVNÍ LÁTKY V NAPÁJECÍM ČERPADLE

Z tepelného schématu sekundárního okruhu jaderné elektrárny (Obr. 6.1) je zřejmé, že sací tlak  $p_s$  napájecího čerpadla je roven tlaku  $p_3$  v odplyňovači a teplota kondenzátu je  $t_{O3}''$ .

$$p_s = p_3 = 0,700 \text{ MPa};$$

$$t_s' = t_{O3}'' = 165 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Entalpie a entropie syté kapaliny v sacím potrubí čerpadla je:

$$i_s' = i_s'(p_s, x = 0) = 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$s_s' = s_s'(p_s, x = 0) = 1,992 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Tlak vyvozený napáječkou  $p_n$  dle vztahu (6.27) bude při uvažování 40 % ztráty tlaku v parním generátoru, tj. při koeficientu  $k_v = 1,4$ :

$$p_n = 5,890 \text{ MPa} \cdot 1,4 = 8,246 \text{ MPa}.$$

Entalpie kondenzátu  $i_{ns}$  za napáječkou bude při tlaku  $p_n$  a izoentropickém ději v napáječce:

$$i_{ns} = i_{ns}(p_n, s_s') = 705,40 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Teoretický vzrůst entalpie v napáječce (6.28):

$$\Delta i_{ns} = 705,40 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 8,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Skutečný vzrůst entalpie v napáječce dle (6.29) je při uvažování vnitřní účinnosti napáječky  $\eta_{ni} = 0,84$ :

$$\Delta i_n = \frac{8,34 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,84} = 9,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie za napájecím čerpadlem (6.30):

$$i_{k12} = 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + 9,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 706,99 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$$

a tomu odpovídá teplota  $t_{k12} = 166,2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 7.3 ENTALPIE PRACOVNÍ LÁTKY V OBĚHU

Entalpie na výstupu z parního generátoru:

$$i_{pg} = i_{pg}(p_{pg}, x = 1) = 2786,14 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie admisní páry před vysokotlakovým dílem turbíny a před přehřívákem páry:

$$i_{at} = i_{at}(p_{pg}, p_a, i_{pg}) = 2781,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie páry na vstupu vysokotlakového dílu turbíny po odečtení ztráty  $12,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  na regulačních ventilech:

$$i_a = 2781,12 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 12,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 2768,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie páry v místech odběru vysokotlakového dílu turbíny při uvažované účinnosti  $\eta_{tdiVT} = 0,797$ :

$$i_{o1} = i_{o1}(p_a, p_{o1}, i_a) = 2671,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{o2} = i_{o2}(p_a, p_{o2}, i_a) = 2587,26 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{e1} = i_{o3} = i_{o3}(p_a, p_{o3}, i_a) = 2487,33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie páry a syté kapaliny před nízkotlakovým dílem parní turbíny:

$$i_{dt} = i_{dt}(p_d, x = 1) = 2759,58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_d = i'_d(p_d, x = 0) = 686,78 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie páry na vstupu nízkotlakového dílu turbíny po odečtení ztráty  $12,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  na regulačních ventilech:

$$i_d = 2759,58 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 12,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 2747,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie páry v místech odběru nízkotlakového dílu parní turbíny při účinnosti  $\eta_{tdiNT1} = 0,853$  před odloučením vlhkosti:

$$i_{o4} = i_{o4}(p_d, p_{o4}, i_d) = 2634,60 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{o5} = i_{o5}(p_d, p_{o5}, i_d) = 2499,61 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{o6} = i_{o6}(p_d, p_{o6}, i_d) = 2356,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie páry za posledním stupněm nízkotlakového dílu turbíny při účinnosti  $\eta_{tdiNT2} = 0,813$  po odloučení vlhkosti:

$$i_{e2t} = i_{e2t}(p_{o6}, p_{e2}, i_{o6}) = 2135,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Skutečná entalpie páry za posledním stupněm nízkotlakového dílu po odečtení ztráty výstupní rychlostí  $30 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ :

$$i_{e2} = 2135,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 30,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} = 2105,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie topné páry za přehřívákem páry:

$$i'_a = i'_a(p_a, x = 0) = 1198,90 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie odloučené vlhkosti v odlučovači vlhkosti:

$$i'_{y2} = i'_{y2}(p_{e1}, x = 0) = 715,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie odloučené vlhkosti v nízkotlakovém dílu turbíny:

$$i'_{y3} = i'_{y3}(p_{o6}, x = 0) = 312,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie topné látky na vstupu regeneračních ohříváků odpovídající tlakové ztrátě v přiváděcím potrubí mezi turbínou a regeneračním ohřívákem:

$$i_1 = i_1(p_{o1}, p_1, i_{o1}) = 2651,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_2 = i_2(p_{o2}, p_2, i_{o2}) = 2568,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_3 = i_3(p_{o3}, p_3, i_{o3}) = 2470,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_4 = i_4(p_{o4}, p_4, i_{o4}) = 2616,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_5 = i_5(p_{o5}, p_5, i_{o5}) = 2483,49 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_6 = i_6(p_{o6}, p_6, i_{o6}) = 2341,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie topné látky na výstupu z regeneračního ohříváku:

$$i'_1 = i'_1(p_1, x = 0) = 980,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_2 = i'_2(p_2, x = 0) = 843,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_3 = i'_3(p_3, x = 0) = 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_4 = i'_4(p_4, x = 0) = 555,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_5 = i'_5(p_5, x = 0) = 427,75 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_6 = i'_6(p_6, x = 0) = 301,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Entalpie kondenzátu v oběhu:

$$i_{nv} = i_{nv}(p_n, t_{nv}) = 982,15 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k21} = i_{k21}(p_n, t_{k21}) = 968,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k12} = 706,99 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k22} = i_{k22}(p_n, t_{k22}) = 832,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k23} = i_{k23}(p_3, t_{k23}) = 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k24} = i_{k24}(t_{k24}, x = 0) = 546,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k25} = i_{k25}(t_{k25}, x = 0) = 419,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i_{k26} = i_{k26}(t_{k26}, x = 0) = 292,97 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1};$$

$$i'_k = i'_k(p_k, x = 0) = 119,95 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Dle rovnice (6.25) je nutné stanovit indiferentní bod:

$$i_{ind} = 2747,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - (2747,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2487,33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot \frac{(2768,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2487,33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{(2768,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 686,78 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

$$i_{ind} = 2709,80 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

#### 7.4 STANOVENÍ POMĚRNÝCH ODBĚROVÝCH MNOŽSTVÍ

Úpravou rovnice tepelné bilance (6.34) chladiče kondenzátu se určí entalpie vody za chladičem kondenzátu  $i'_c$  (při výpočtu uvažována účinnost chladiče kondenzátu  $\eta_c = 0,97$ ):

$$i'_c = i'_a - \frac{i_{nv} - i_{k21}}{y_1 \cdot \eta_c}$$

$$i'_c = 1198,90 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - \frac{982,15 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 968,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,06 \cdot 0,97} = 961,10 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Poměrné odběrové množství páry  $x_1$  potřebné pro provoz regeneračního ohříváku O1 se stanoví úpravou rovnice tepelné bilance (6.35), uvažována účinnost regeneračního ohříváku  $\eta_{ov} = 0,97$ :

$$x_1 = \frac{i_{k21} - i_{k22}}{(i_1 - i'_1) \cdot \eta_{ov}} - \frac{y_1 \cdot (i'_c - i'_1)}{(i_1 - i'_1)}$$

$$x_1 = \frac{968,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 832,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{(2651,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 980,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 0,97} - \frac{0,06 \cdot (961,10 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 832,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{(2651,65 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 980,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

$$x_1 = 0,08424.$$

Poměrné odběrové množství páry  $x_2$  potřebné pro provoz regeneračního ohříváku O2 se stanoví úpravou rovnice tepelné bilance (6.36), uvažována účinnost regeneračního ohříváku  $\eta_{ov} = 0,97$ :

$$x_2 = \frac{i_{k22} - i_{k12}}{(i_2 - i'_2) \cdot \eta_{ov}} - \frac{(x_1 + y_1) \cdot (i'_1 - i'_2)}{(i_2 - i'_2)}$$

$$x_2 = \frac{832,93 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 706,99 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{(2568,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 843,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 0,97} - \frac{(0,08424 + 0,06) \cdot (980,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 843,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{(2568,66 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 843,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

$$x_2 = 0,06376.$$

Poměrné množství odběrové páry  $x_3$  potřebné pro provoz odplyňovače O3 se stanoví úpravou rovnice tepelné bilance (6.37), poměrné množství odloučené vody  $y_2$  v odlučovači vlhkosti se stanoví z rovnice (6.38). Při výpočtu uvažována účinnost odplyňovače  $\eta_{O3} = 0,98$ , rovnice jsou řešeny iterační metodou:

$$x_3 = \frac{(1 - x_1 - x_2 - y_1 - y_2) \cdot \frac{i_{k23} - i_{k24}}{\eta_{O3}}}{i_3 - i_{k23} + \frac{i_{k23} - i_{k24}}{\eta_{O3}}} - \frac{(x_1 + x_2 + y_1) \cdot (i_2' - i_{k23}) + y_2 \cdot (i_{y2}' - i_{k23})}{i_3 - i_{k23} + \frac{i_{k23} - i_{k24}}{\eta_{O3}}}$$

$$x_3 = \frac{(1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,06 - 0,09412) \cdot \frac{697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 546,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,98}}{2470,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 546,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,98}} -$$

$$- \frac{(0,08424 + 0,06376 + 0,06) \cdot (843,38 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{2470,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 546,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,98}} -$$

$$- \frac{0,09412 \cdot (715,42 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{2470,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{697,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 546,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,98}}$$

$$x_3 = 0,03902$$

Kontrolou je stanoveno odběrové množství  $y_2$  (6.38), při odloučení 12,5 % vlhkosti:

$$y_2 = 0,125 \cdot (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,06)$$

$$y_2 = 0,09412$$

Poměrné odběrové množství páry  $x_4$  potřebné pro provoz regeneračního ohříváku O4 se stanoví úpravou rovnice tepelné bilance (6.39), uvažována účinnost regeneračního ohříváku  $\eta_{On} = 0,98$ :

$$x_4 = \frac{(1 - x_1 - x_2 - x_3 - y_1 - y_2) \cdot (i_{k24} - i_{k25})}{(i_4 - i_4') \cdot \eta_{On}}$$

$$x_4 = \frac{(1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,06 - 0,09412) \cdot (546,31 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 419,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{(2616,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 555,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 0,98}$$

$$x_4 = 0,04150$$

Poměrné odběrové množství páry  $x_5$  potřebné pro provoz regeneračního ohříváku O5 se stanoví úpravou rovnice tepelné bilance (6.40), uvažována účinnost regeneračního ohříváku  $\eta_{On} = 0,98$ :

$$x_5 = \frac{(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - y_1 - y_2) \cdot \frac{(i_{k25} - i_{k26})}{\eta_{On}} - \frac{x_4 \cdot (i_4' - i_5')}{i_5 - i_5' + \frac{i_{k25} - i_{k26}}{\eta_{On}}}}{\frac{(419,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 292,97 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{0,98} - \frac{2483,49 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 427,75 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{419,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 292,97 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,98}}{0,98} - \frac{0,04150 \cdot (555,00 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 427,75 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{2483,49 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 427,75 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} + \frac{419,06 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 292,97 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}{0,98}}}$$

$$x_5 = 0,03395.$$

Odloučená vlhkost v nízkotlakovém dílu bude dle rovnice (6.42), při odloučení 3 % vlhkosti:

$$y_3 = 0,03 \cdot (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,04150 - 0,03395 - 0,06 - 0,09412)$$

$$y_3 = 0,01750.$$

Poměrné odběrové množství páry  $x_6$  potřebné pro provoz regeneračního ohříváku O6 se stanoví úpravou rovnice tepelné bilance (6.41), uvažována účinnost regeneračního ohříváku  $\eta_{On} = 0,98$ :

$$x_6 = \frac{(1 - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 - y_1 - y_2) \cdot \frac{(i_{k26} - i_k')}{\eta_{On}} - \frac{y_3 \cdot (i_{y3}' - i_6')}{i_6 - i_6'}}{\frac{(2341,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 301,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \cdot 0,98}{0,98} - \frac{0,01750 \cdot (312,50 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 301,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1})}{2341,53 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 301,48 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

$$x_6 = 0,05039.$$

Tab. 7-1 Parametry pracovní látky v jednotlivých ohřívácích

Veličina	Označení	Jednotka	Ohřívák					
			O1	O2	O3	O4	O5	O6
Teplota za ohřívákem	$t_{k2j}$	°C	225	195	165	130	100	70
Teplota sytosti odběrové páry	$t_{oj}''$	°C	228	198	165	132	102	72
Odpovídající tlak	$p_j$	MPa	2,696	1,491	0,700	0,287	0,109	0,034
Tlak v místě odběru	$p_{oj}$	MPa	2,996	1,657	0,778	0,319	0,121	0,038
Entalpie kondenzátu za ohřívákem	$i_{k2j}$	kJ·kg <sup>-1</sup>	968,31	832,93	697,06	546,31	419,06	292,97
Entalpie v místě odběru	$i_{oj}$	kJ·kg <sup>-1</sup>	2671,13	2587,26	2487,33	2634,60	2499,61	2356,82
Entalpie na vstupu ohříváku	$i_j$	kJ·kg <sup>-1</sup>	2651,65	2568,66	2470,00	2616,51	2483,49	2341,53
Entalpie na výstupu ohříváku	$i_j'$	kJ·kg <sup>-1</sup>	980,85	843,38	697,06	555,00	427,75	301,48

## 7.5 VÝPOČET CELKOVÉ SPOTŘEBY PÁRY, STANOVENÍ ÚČINNOSTÍ A VÝKONŮ

Práce vykonaná 1 kg páry proudící turbínou je dle (6.43):

$$\begin{aligned}
 w_i = & (1 - 0,06) \cdot (2768,62 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2671,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\
 & + (1 - 0,08424 - 0,06) \cdot (2671,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2587,26 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\
 & + (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,06) \cdot (2587,26 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2487,33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\
 & + (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,06 - 0,09412) \cdot (2747,08 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2634,60 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\
 & + (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,04150 - 0,06 - 0,09412) \cdot \\
 & \cdot (2634,60 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2499,61 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\
 & + (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,04150 - 0,03395 - 0,06 - 0,09412) \cdot \\
 & \cdot (2499,61 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2356,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) + \\
 & + (1 - 0,08424 - 0,06376 - 0,03902 - 0,04150 - 0,03395 - 0,05039 - 0,06 - 0,09412 - 0,01750) \cdot \\
 & \cdot (2356,82 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} - 2105,85 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \\
 w_i = & 612,69 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.
 \end{aligned}$$

Celkové množství páry pro provoz parní turbíny se stanoví z rovnice (6.44), součin mechanické a elektrické účinnosti generátoru je 0,983, tepelný výkon jaderného reaktoru činí 3010 MW.

$$Q_{mp} = \frac{3010 \cdot 10^6 \text{ W}}{2786,14 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} - 982,15 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$Q_{mp} = 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}.$$



Celkové množství páry proudící jednotlivými větvemi tepelného schématu bude dle (6.32) regeneračním ohřívákem O1:

$$Q_{mO1} = 0,08424 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 140,56 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

regeneračním ohřívákem O2:

$$Q_{mO2} = 0,06376 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 106,39 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

regeneračním ohřívákem O3:

$$Q_{mO3} = 0,03902 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 65,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

regeneračním ohřívákem O4:

$$Q_{mO4} = 0,04150 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 69,24 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

regeneračním ohřívákem O5:

$$Q_{mO5} = 0,03395 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 56,65 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

regeneračním ohřívákem O6:

$$Q_{mO6} = 0,05039 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 84,08 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

chladičem kondenzátu (6.45):

$$Q_{my_1} = 0,06 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 100,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

separované vody v odlučovači vlhkosti (6.46):

$$Q_{my_2} = 0,09412 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 157,04 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

odloučené vody v nízkotlakové části parní turbíny (6.47):

$$Q_{my_3} = 0,01750 \cdot 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 29,20 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Tab. 7-2 Hmotnostní toky páry odběrovým potrubím

Veličina	Označení	Jednotka	Odběr					
			x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>
Množství odběrové páry	$Q_{mOj}$	kg·s <sup>-1</sup>	140,56	106,39	65,11	69,24	56,65	84,08

Tab. 7-3 Hmotnostní toky odloučené páry a vlhkosti

Veličina	Označení	Jednotka	Odběr		
			y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>
Množství odloučené páry a vlhkosti	$Q_{my_j}$	kg·s <sup>-1</sup>	100,11	157,04	29,20

Vnitřní výkon parní turbíny dle vztahu (6.48):

$$P_i = 1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 612,69 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 1022,28 \text{ MW}.$$

Svorkový výkon parní turbíny dle (6.49):

$$P_{sv} = 1022,28 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 0,983 = 1004,90 \text{ MW}.$$

Tepelná účinnost vztažená na svorky elektrického generátoru se stanoví dle vztahu (6.50):

$$\eta_{tsv} = \frac{1004,90 \cdot 10^6 \text{ W}}{1668,52 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (2786,14 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} - 982,15 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

$$\eta_{tsv} = 0,3339.$$

Celková účinnost jaderné elektrárny (6.51) při účinnosti parního generátoru  $\eta_{pg} = 0,95$  a účinnosti potrubí  $\eta_p = 0,99$ :

$$\eta_{tc} = 0,3339 \cdot 0,95 \cdot 0,99$$

$$\eta_{tc} = 0,3140.$$

Čistý výkon jaderné elektrárny (6.52), při vlastní spotřebě jaderné elektrárny 5 % je součinitel vlastní spotřeby  $\eta_{vs} = 0,95$ :

$$P_{pr} = 1004,90 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot (1 - 0,05) = 1004,90 \cdot 10^6 \text{ W} \cdot 0,95$$

$$P_{pr} = 954,66 \text{ MW}.$$

## 8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést návrh výpočtu a následný výpočet parametrů sekundárního okruhu jaderné elektrárny na základě zadaných parametrů a zadaného tepelného schématu.

Pro jadernou elektrárnu o tepelném výkonu 3010 MW s parní turbínou, která má ve vysokotlakové části 3 stupně a v nízkotlakové části 4 stupně, byly stanoveny pomocí teplot sytosti kondenzující páry tlaky v regeneračních ohřívácích, odběrové tlaky pro vysokotlakové regenerační ohříváky 2,996 MPa; 1,657 MPa, odběrový tlak pro odplyňovač 0,778 MPa a nízkotlakové regenerační ohříváky 0,319 MPa; 0,121 MPa a 0,038 MPa. Uvedené tlaky jsou brány od parního generátoru proti toku napájecí vody a kondenzátu. Parametry pracovní látky v jednotlivých ohřívácích jsou uvedeny v tab. 7-1 (str. 56).

Stanovením poměrných odběrových množství páry pro jednotlivé odběry a práce 1 kg proudící páry bylo vypočteno celkové množství páry potřebné pro provoz parní turbíny  $1668,52 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Hmotnostní toky v jednotlivých odběrových potrubích jsou uvedeny v tab. 7-2 a tab. 7-3 (str. 57).

Parní turbína má při tomto průtoku vnitřní výkon 1022,28 MW, výkon na svorkách elektrického generátoru 1004,90 MW. Při uvažované 5 % vlastní spotřebě je čistý výkon jaderné elektrárny 954,66 MW. Tepelná účinnost vztažená na svorky elektrického generátoru činí 33,39 % a celková účinnost jaderné elektrárny 31,40 %.

Vzhledem ke stále vzrůstající poptávce po elektrické energii lze jadernou energetiku považovat za jeden ze zdrojů elektrické energie, bez kterého se lidstvo po určitou dobu neobejde. Po rozboru jednotlivých typů jaderných energetických reaktorů lze konstatovat, že perspektivní jsou jaderné elektrárny s lehkovodními reaktory a v budoucnosti jaderné elektrárny s rychlými množivými reaktory a jaderné elektrárny s vysokoteplotními reaktory. Vysokoteplotní reaktory s oběhy se zařazenou parní turbínou se jeví jako spolehlivé a bezpečné, jak ovšem bylo dříve uvedeno, mají oproti oběhu s plynovou turbínou řadu dodatečných bezpečnostních systémů, z ekonomického hlediska v současné době nejsou konkurenceschopné a eliminují přirozenou bezpečnost vysokoteplotních reaktorů. Perspektiva rychlých množivých reaktorů spočívá ve výrobě paliva v množivé zóně jaderného reaktoru a adaptaci na thoriový palivový cyklus.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] Ambrož, J. a kol.: Parní turbíny I. Theorie a výpočet. Praha: SNTL, 1955.
- [2] Dubšek, F.: Jaderná energetika. Brno: Nakladatelství PC-DIR, 1994.
- [3] Krbek, J., Polesný, B.: Závěrečný projekt. Výpočet tepelných turbín a jejich příslušenství. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1986.
- [4] Raček, J.: Energetická zařízení. Stroje a zařízení jaderných elektráren. Brno: Nakladatelství Novotný, 2004.
- [5] Raček, J.: Jaderné elektrárny. Brno: Nakladatelství Novotný, 2005.
- [6] Raček, J.: Jaderná zařízení. Brno: Nakladatelství NOVAPRESS, 2009.
- [7] Raček, J.: Strojní zařízení elektráren. Brno: Nakladatelství Novotný, 2007.
- [8] Raček, J.: Strojní zařízení elektráren. Podklady pro cvičení. Brno: Nakladatelství Novotný, 2007.
- [9] Sequens, L., Šindler, P.: Využití projektových rezerv bloků Jaderné elektrárny Dukovany. All For Power, březen 2010, roč. 4, č. 1, s. 12-19.
- [10] Ščegljajev, A.V.: Parní turbíny 1. Praha: SNTL, 1983.
- [11] Šnejdar, S.: Modernizace turbín a kondenzátorů ŠKODA pro Jadernou elektrárnu Dukovany. All For Power, březen 2010, roč. 4, č. 1, s. 20-22.
- [12] Steam Properties Calculator, Encotech [on-line]. Vydáno 2004 [citováno 2011-05-08].  
Dostupné z:  
<http://encotech.com/esteam.php>.