



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH TERCIÁLNÍHO OKRUHU PRO JADERNOU  
ELEKTRÁRNU**

DESIGN OF THE TERTIARY CIRCUIT FOR A NUCLEAR POWER PLANT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Alexandra Flajsarová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Pavel Milčák**

**BRNO 2021**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Alexandra Flajsarová**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí  
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Návrh terciálního okruhu pro jadernou elektrárnu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderná energetika má v rámci trvalé udržitelnosti nezpochybnitelné místo. V současnosti je ve světě ve fázi výstavby přibližně padesát reaktorů. Chlazení jaderných elektráren se řeší dle možností dané lokality a v současné době při zvýšených průměrných ročních teplotách nabývá na důležitosti.

### Cíle bakalářské práce:

- stručný úvod do jaderné energetiky,
- popis způsobů chlazení jaderné elektrárny,
- popis terciálního okruhu a bilance pro zadané parametry,
- stanovení množství doplňkové vody do terciálního okruhu v průběhu roku.

### Seznam doporučené literatury:

BEČVÁŘ, Josef. Jaderné elektrárny. 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1981, 634 s.

DUBŠEK, František. Jaderná energetika. Brno: PC DIR, 1994, 209 s. ISBN 80-214-0538-4.

MURRAY, Raymond LeRoy a Keith E HOLBERT. Nuclear energy: an introduction to the concepts, systems, and applications of nuclear processes. 7th ed. Amsterdam: Elsevier, 2015, xvii, 550 s. : il. ISBN 978-0-12-416654-7.

ŠAPOŠNIKOV, Vsevolod, Ivo POSSELT a František POMAJZL. Atmosférické chladiče a chladičí věže. Praha: SNTL, 1977, 183 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **ABSTRAKT**

V úvodu bakalářské práce je představena základní charakteristika jaderných elektráren. Největší pozornost je věnována jaderným elektrárnám s tlakovodním reaktorem chlazeným lehkou vodou. Jde o jaderný reaktor, který se nachází v obou českých jaderných elektrárnách a zároveň patří mezi nejrozšířenější ve světě. Práce se zabývá zejména terciálním okruhem jaderné elektrárny. Z toho důvodu se část práce věnuje popisu způsobu chlazení, chladicím věžím a kondenzátorům. Hlavním cílem práce je vypočítat množství doplňkové vody v terciálním okruhu jaderné elektrárny o nominálním výkonu 1200 MWe a rozhodnout, zda by jaderná elektrárna o zadaných parametrech byla schopná provozu v klimatických podmínkách pro lokalitu Dukovany s odběrem doplňkové vody z řeky Jihlavy.

### **Klíčová slova**

jaderná elektrárna; terciální okruh; chladicí věž; kondenzátor; doplňková voda

## **ABSTRACT**

At the beginning of the bachelor's thesis, a basic description of nuclear power plants is presented. The main attention is paid to nuclear power plants with light-water pressurized reactors. This type of nuclear reactor is the most common one in the world, and it is also used in both Czech nuclear power plants. A significant part of the thesis deals with the tertiary circuit of a nuclear power plant. Therefore, cooling methods, cooling towers, and condensers are described in the thesis. The main goal of the thesis was to calculate the amount of make-up water in the tertiary circuit of a nuclear power plant with a reactor with nominal output of 1200 MWe and to determine whether a nuclear power plant with these parameters would be capable of operation in the conditions specific for the Dukovany Nuclear Power Plant with the use of make-up water from the Jihlava River.

### **Key words**

nuclear power plant; tertiary circuit; cooling tower; condenser; make-up water

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

FLAJ SAROVÁ, Alexandra. *Návrh terciálního okruhu pro jadernou elektrárnu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132730>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem výpočetní práci na téma **Návrh terciálního okruhu pro jadernou elektrárnu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

.....  
*Jméno a příjmení*



## OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Úvod do jaderné energetiky.....	11
2 Dělení jaderných elektráren.....	14
2.1 Dělení podle jaderného reaktoru.....	14
2.2 Dělení jaderných elektráren podle okruhů.....	15
3 Tepelný oběh jaderných elektráren.....	17
4 Jaderná elektrárna s reaktorem VVER/PWR.....	19
4.1 Primární okruh.....	19
4.2 Sekundární okruh.....	20
4.3 Terciální (chladicí) okruh.....	21
5 Způsob chlazení jaderné elektrárny.....	22
6 Chladicí věž.....	24
6.1 Mokrý chladicí věž s nuceným tahem.....	24
6.2 Mokrý chladicí věž s přirozeným tahem.....	25
7 Kondenzátor.....	27
7.1 Kondenzátor chlazený vzduchem.....	27
7.2 Kondenzátor chlazený vodou.....	28
7.3 Čištění trubek kondenzátoru.....	29
8 Teoretický popis výpočtu.....	30
8.1 Ztráty v chladicím okruhu.....	30
8.2 Vodní bilance.....	31
8.3 Teploty v chladicím okruhu jaderné elektrárny.....	31
8.4 Entalpie vody a vodní páry.....	33
9 Stanovení množství doplňkové vody.....	34
9.1 Množství doplňkové vody v průběhu roku.....	39
ZÁVĚR.....	41
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	42
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	45
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	47
SEZNAM TABULEK.....	48

## ÚVOD

Elektrickou energii začalo lidstvo využívat poměrně nedávno, v tzv. průmyslové revoluci, a od té doby je nedílnou součástí našich životů. Hlavní část vyrobené elektrické energie pochází už od samého počátku výroby z fosilních paliv (uhlí, ropa, zemní plyn). V průběhu dvacátého století (a zejména počátkem století jednadvacátého) lidstvo zjistilo, že využívání fosilních paliv jako zdroje energie není dlouhodobě udržitelné. Problémem je konečné množství fosilních paliv na Zemi a zejména emise škodlivých a skleníkových plynů vznikajících při jejich spalování. Z tohoto důvodu se jako možnou kombinací variant pro výrobu elektrické energie jeví jaderné elektrárny a obnovitelné zdroje energie.

Obnovitelné zdroje jsou šetrné k přírodě, při jejich provozu nevznikají skleníkové plyny ani jiné látky, které by znečišťovaly životní prostředí. Na druhou stranu velkou nevýhodou obnovitelných zdrojů elektrické energie je malá plošná hustota využitelné energie (je potřeba velká plocha pro fotovoltaické, větrné nebo i vodní akumulární elektrárny), využití pouze za příznivých přírodních podmínek, problémy s recyklací (případně velkého množství spotřebované energie při výrobě) lopatek větrných elektráren a fotovoltaických panelů. Dalším problémem obnovitelných zdrojů v České republice může být ovlivnění životního prostředí (zaplavení údolí při vzniku vodní elektrárny, narušení migračních tras ptáku při stavbě větrné elektrárny anebo zábor volné zemědělské půdy u fotovoltaických elektráren). Elektrárny využívající obnovitelné zdroje energie se budou stavět i nadále. Nicméně nemělo by se zapomínat, že velké množství bezemisní elektrické energie, lze vyrobit i z jiného zdroje, a to pomocí jaderných elektráren.

V České republice jsou v provozu dvě jaderné elektrárny. Jaderná elektrárna Dukovany (JE) a Jaderná elektrárna Temelín. V současné době se také uvažuje o výstavbě nového bloku jaderné elektrárny v Dukovanech. Hlavní výhodou jaderné elektrárny je možnost výroby elektrické energie prakticky bez závislosti na okolních přírodních podmínkách.

Jediné, co ke své činnosti jaderné (a také ostatní tepelné) elektrárny potřebují, je dostatečné množství chladiva o odpovídající teplotě, které umožní kondenzaci páry procházející turbinou a umožní efektivní, hospodárný a zejména bezpečný provoz jaderné elektrárny. Během provozu dochází k trvalým ztrátám vody vlivem chlazení na chladicích věžích, a proto je potřeba chladicí vodu do elektrárny neustále doplňovat. Surová voda použita pro chlazení je v případě JE Dukovany čerpána z řeky Jihlavy. Průtok vody v této řece (zejména v letních měsících) není příliš velký a je otázkou, jak velké množství doplňkové vody je možné z řeky odebrat. Právě množství vody využitelné pro chlazení je jedním z faktorů možné výstavby nového jaderného zdroje v Dukovanech.

Cílem této bakalářské práce proto bude nejprve objasnění základů jaderné energetiky a principu funkce jaderných elektráren v ČR. Následně bude věnována pozornost technologickým okruhům jaderných elektráren a možnostem chlazení jaderné elektrárny. Hlavním výstupem návrhu terciálního okruhu poté bude určení množství potřebné doplňkové vody nutné pro provoz jaderné elektrárny v průběhu celého kalendářního roku a zhodnocení stavby nového jaderného zdroje v Dukovanech právě na základě potřebného množství doplňkové vody z řeky Jihlavy.

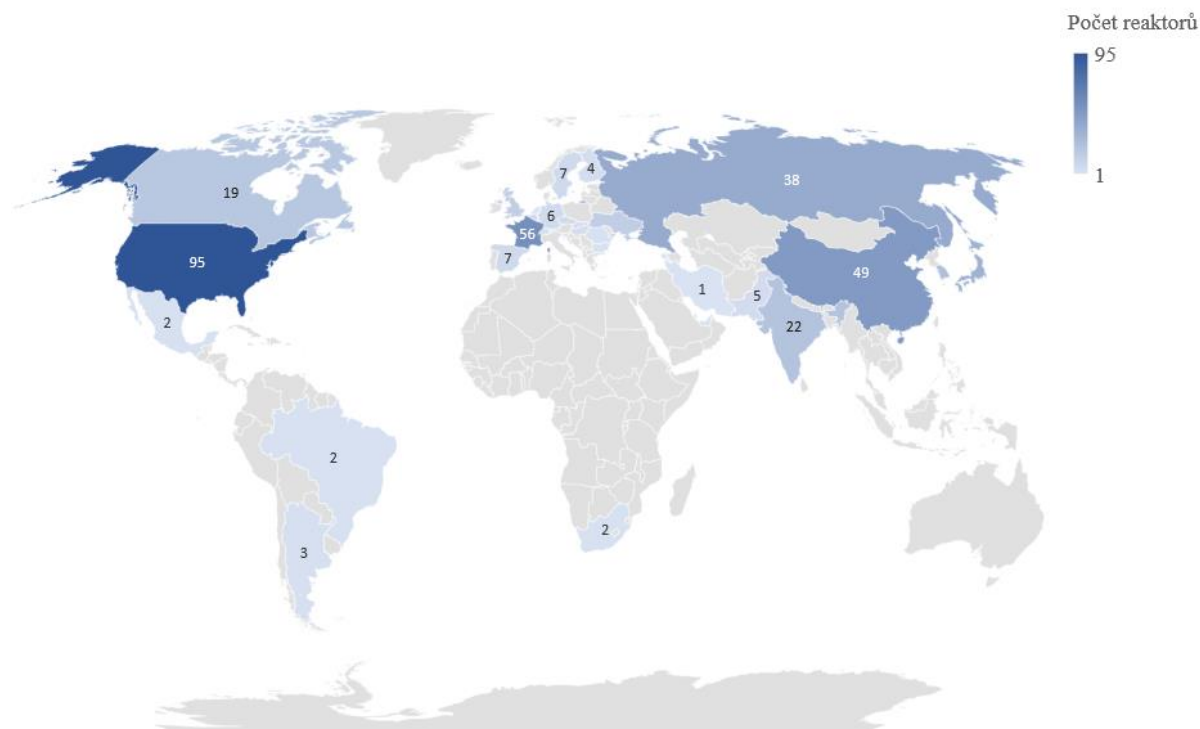
## 1 Úvod do jaderné energetiky

Poprvé byla jaderná energie řízeně přeměněna na energii tepelnou pomocí štěpné řetězové jaderné reakce uranu  $^{235}\text{U}$ . Stalo se tak 2. prosince 1942. V tento den byl zásluhou Enrica Fermiho a jeho spolupracovníků spuštěn první experimentální reaktor Chicago Pile-1 na Chicagské univerzitě. Datum 2. 12. 1942 je tedy považováno za počátek „atomového věku“.

První jaderná elektrárna na světě byla uvedena do provozu o dvanáct let později. Jednalo se o elektrárnu ve městě Obninsk v Sovětském svazu. Tato jaderná elektrárna s instalovaným elektrickým výkonem 5 MW byla provozována dlouhých 48 let [22].

Od té doby bylo ve světě postaveno velké množství jaderných elektráren. V současnosti zůstává v provozu 442 jaderných energetických reaktorů, které stabilně vyrábějí velké množství bezemisní elektrické energie.

Na obr. 1.1 je uveden celkový počet jaderných energetických reaktorů v provozu v jednotlivých zemích světa. Lze vidět, že z celkového počtu 442 jaderných energetických reaktorů, je jich nejvíce v provozu v USA (95 reaktorů), Francii (56 reaktorů) a Číně (49 reaktorů) [21].

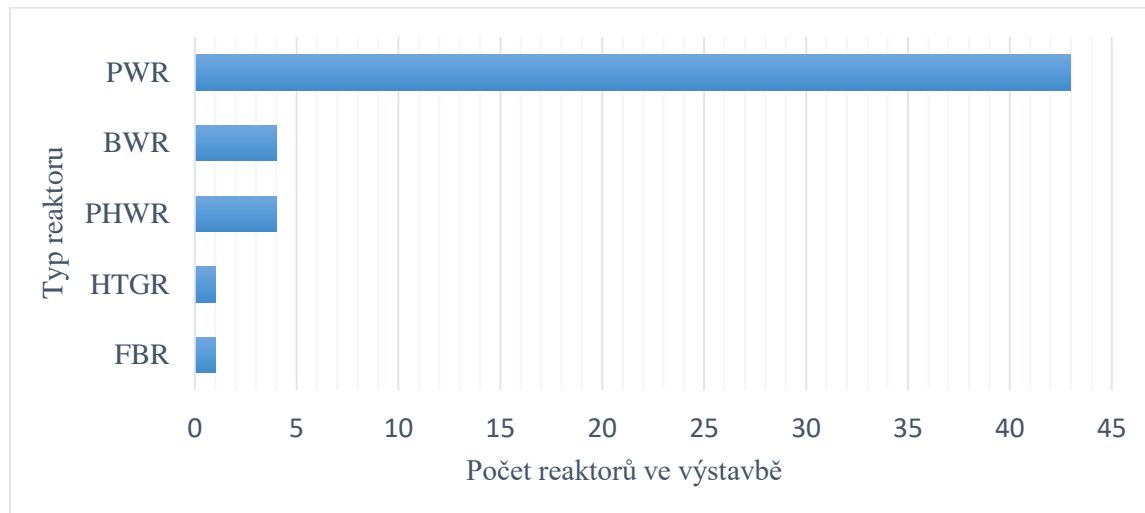


Obr. 1.1: Světové zastoupení reaktorů podle států

Tak jako i v ostatních průmyslových a energetických zařízeních se i v jaderné energetice vyskytla řada menších či větších nehod a havárií. To ale rozhodně neznamená, že celý svět nad jadernou energií zanevřel. Jak lze vidět na obr. 1.2 ve výstavbě je v současné době 53 jaderných reaktorů.

Nejvíce stavěným typem jaderného reaktoru je reaktor PWR (Pressurized Water Reactor), tedy lehkovodní tlakový reaktor. Pro nás velmi dobře známý pod ruským názvem VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor).

Největší počet reaktorů ve výstavbě se nachází v Číně, ale ke stavbám nových jaderných reaktorů dochází všude po světě [21].



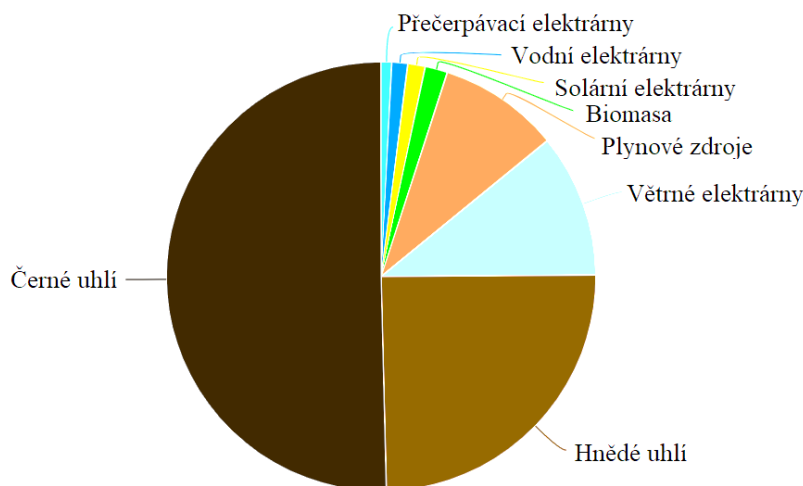
Obr. 1.2: Počet jaderných energetických reaktorů ve výstavbě [21]

Energetická politika a názory na jadernou energetiku se v každém státě světa liší. Ve světě existují státy, které od jaderné energetiky upustily a v budoucnu se chtějí spoléhat pouze na fosilní paliva a obnovitelné zdroje. Můžeme dát za příklad třeba sousední Německo, které z důvodu havárií ve světě jako bylo Three Mile Island, Černobyl, Fukušima, ale také havárie elektrárny Jaslovské Bohunice A1 v bývalém Československu, rozhodlo o odstavení veškerých jaderných bloků na svém území. V současné době je již odstaveno 23 reaktorů, přičemž do roku 2022 mají v plánu odstavit zbylých 6 fungujících reaktorů. Vyřazování všech jaderných elektráren je pro ně velmi finančně a časově náročné, jelikož většina jaderných elektráren mohla ještě několik let dle bezpečnostních předpisů sloužit [17].

Nicméně bez jaderné energie se lidstvo pravděpodobně minimálně v určité etapě života neobejde, je totiž zřejmé, že ekologická rizika klasické energetiky (škodlivé exhalace a skleníkový efekt) nelze donekonečna přehlížet a je třeba Zemi proti těmto nepříznivým vlivům chránit [7]. Právě pro ochranu životního prostředí vznikla v prosinci 2015 tzv. Pařížská dohoda. Ta vytváří dlouhodobý cíl k ochraně klimatu a snižování emisí skleníkových plynů. Na základě této úmluvy bylo rozhodnuto o stanovení závazku snížení vypouštění globálních emisí do ovzduší o 50 % v porovnání s úrovněmi z roku 1990. Zároveň je stanoven cíl, aby do konce tohoto století bylo dosaženo uhlíkové neutrality [30].

Aby k takovým výsledkům mohlo dojít, je třeba maximálně zamezit lidským činnostem, které skleníkové plyny vytvářejí. Jelikož největším znečišťovatelem jsou zejména uhelné elektrárny, je zapotřebí jejich výrobu elektrické energie snížit na minimum. Novější uhelné elektrárny je možno přestavět na elektrárny vyrábějící elektrickou energii z biomasy. Emise skleníkových plynů jsou při spalování biomasy nižší, ale stále vysoké. Nejlepším krokem pro snížení emisí je úplné odstavení uhelných elektráren a výstavba elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie nebo elektráren jaderných.

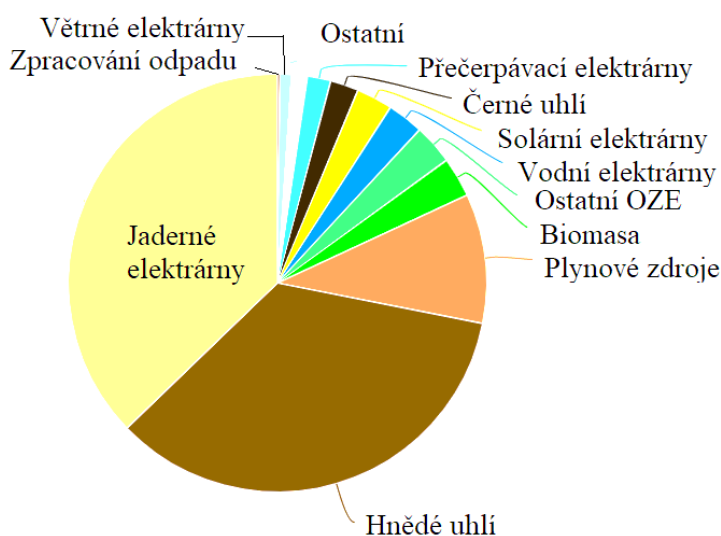
Například Polsko provozuje obrovské množství uhelných elektráren. Tento fakt je uveden na obr. 1.3, kde lze vidět podíl vyrobené elektřiny v Polsku za rok 2020. Procentuálně byl podíl vyrobené elektřiny z hnědého uhlí 24,7 % a černého uhlí 50,4 %. V součtu bylo v Polsku vyrobeno z uhlí 75,1 % elektrické energie [7]. Právě na základě výše uvedené Pařížské dohody je pro Polsko výroba elektrické energie velmi důležitým a aktuálním tématem. Zabývají se stavbou větrných a slunečních elektráren, ale tyto obnovitelné zdroje nejsou schopny pokrýt výrobu elektrické energie pro celé území Polska. V této době je jejich největší úsilí vkládáno do možné výstavby jaderných elektráren. Při spolupráci s USA chce Polsko vystavět 6 nových jaderných bloků [20]. Díky tomu bude možné odstavit velkou část uhelných elektráren a snížit produkci skleníkových plynů.



Obr. 1.3: Podíl zdrojů na výrobě elektřiny v Polsku, rok 2020 [7]

V této bakalářské práci je Polsko uvedeno jako stát s velkým množstvím výroby energie z uhlí, nicméně Česká republika je z velké části taktéž závislá na uhlí. V roce 2020 činil podíl uhelných elektráren na výrobě elektrické energie v České republice 36,9 %, což je druhým nejvíce obsaženým zdrojem hned po jaderných elektrárnách s podílem 37,2 % (obr. 1.4) [7].

Avšak ještě v roce 2019 byly uhelné elektrárny v podílu vyrobené elektřiny na prvním místě (41,3 %) před elektrárnami jadernými (36,1 %). Tento podíl se za rok 2020 snížil právě díky odstavení uhelných elektráren (Prunéřov 1, Mělník 3 a jeden blok elektrárny Mělník 2).



Obr. 1.4: Podíl zdrojů na výrobě elektřiny v České republice, rok 2020 [7]

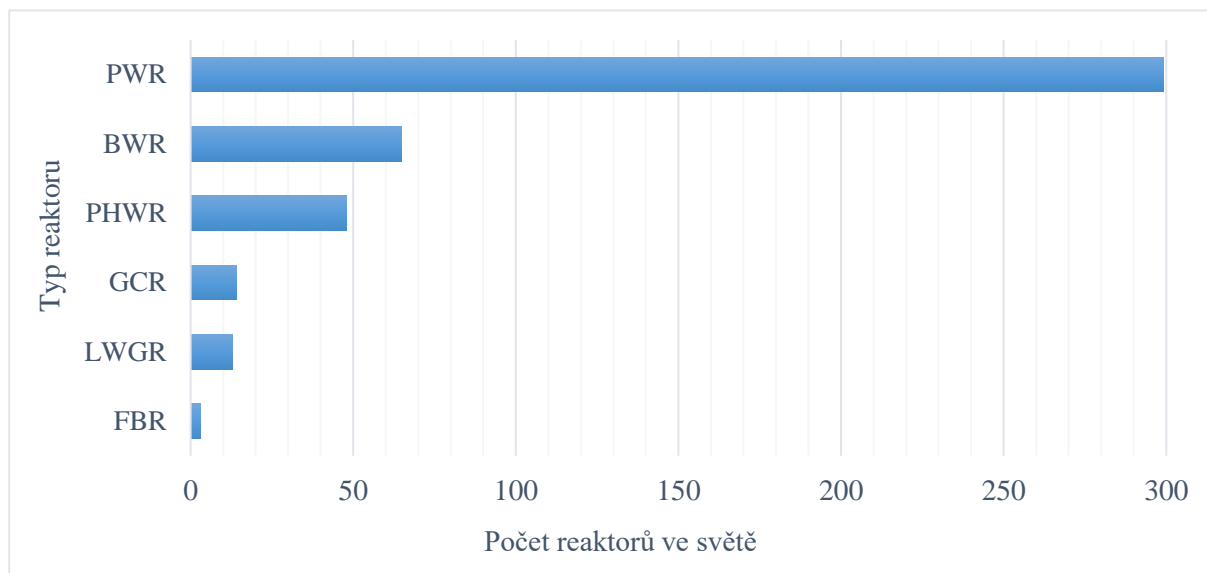
Z důvodu odstavení uhelných elektráren je potřeba elektrickou energii získávat z jiných zdrojů. Jednou z cest, jak získávat elektrickou energii na našem území, je výstavba nových jaderných zdrojů. Proto je v této době jedním z hlavních témat v české energetice výstavba nového jaderného zdroje v Dukovanech. Jaderné elektrárny jsou bezemisní a pro jejich provoz není zapotřebí například velkého množství vodního zdroje tak jako u elektráren vodních nebo dostatečného větru jako u elektráren větrných. Zároveň oproti obnovitelným zdrojům jsou jaderné elektrárny schopny na poměrně malém území vyrobit vysoké množství elektrické energie.

## 2 Dělení jaderných elektráren

Základním principem jaderných elektráren je vytvoření tepelné energie pomocí štěpení jaderného materiálu v reaktoru. Další kroky k vyrobení elektrické energie se v určitých typech jaderných elektráren mohou lišit. Jaderné elektrárny můžeme rozdělit na několik typů podle určitých kritérií. Nejčastěji se jedná o dělení podle typu jaderného reaktoru, následně pak lze dělit jaderné elektrárny podle počtu technologických okruhů [1].

### 2.1 Dělení podle jaderného reaktoru

V dnešní době je ve světě provozováno 6 typů jaderných reaktorů [21]. Tyto jaderné reaktory se od sebe rozlišují dle základních vlastností, kterými jsou palivo ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ), množivý materiál ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ), moderátor (grafit,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ) a chladivo ( $\text{CO}_2$ , He,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , Na). Teoreticky by se dala vytvořit celá řada různých kombinací z těchto materiálů. Ve skutečnosti to z hlediska fyzikálních principů není možné a osvědčilo se pouze pár typů vykreslených na obr. 3.1 [23].



Obr. 2.1: Počet jaderných energetických reaktorů v provozu [21]

Jaderné reaktory lze dělit několika způsoby. Může se vycházet z fyzikálních vlastností, což je zejména dělení na tepelné a rychlé reaktory podle energie neutronů, které způsobují štěpnou reakci. Dále lze reaktory dělit podle použitého moderátoru, který slouží ke zpomalování neutronů, aby mohly s větší pravděpodobností štěpit jádra uranu. Druhy moderátoru jsou lehká voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ), těžká voda ( $\text{D}_2\text{O}$ ) nebo grafit. Kromě rozdělení jaderných reaktorů podle energie neutronů a podle moderátoru je velmi důležitým aspektem i chlazení reaktoru. Chlazení reaktoru může být buď plynem ( $\text{CO}_2$ , He), vodou ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ), organickými látkami nebo tekutým kovem (Na). Vodou chlazené reaktory se dále dělí na reaktory varné (v aktivní zóně dochází k varu chladiva) a tlakovodní (k varu chladiva nedochází) [4].

V dalším důležitém rozdělení jde o uspořádání paliva a moderátoru v reaktoru. Pokud se zde nachází palivo rozptýlené či rozpuštěné, bavíme se o homogenním (stejnorodém) uspořádání. V případě, že je palivo ve formě palivových článků, jedná se o uspořádání heterogenní (různorodé). Palivové články u heterogenního uspořádání zabraňují úniku aktivních látek z paliva do chladiva či moderátoru. V dnešní době se provozuje většina jaderných elektráren s heterogenním uspořádáním [4].

Konstrukční uspořádání zde taktéž hraje značnou roli. Pokud je reaktorem tlaková nádoba, vyskytuje se zde společně uzavřený moderátor, chladivo i palivo. V druhém případě jde o tlakové kanály, kde každý palivový článek je v samostatné trubce. Toto kanálové uspořádání zapříčiňuje, že vysoká náročnost tlakových nádob odpadá. Konstrukční uspořádání dále úzce souvisí s celkovou koncepcí primárního okruhu. Tento okruh může být smyčkový nebo integrální. Smyčkovým je na mysli případ, kdy ke vstupním a výstupním hrdlům nádoby reaktoru navazují potrubí k parnímu generátoru a od něj vedou přes hlavní cirkulační čerpadlo zpět do reaktoru. V případě integrálním je celý primární okruh umístěn v tlakové nádobě z předpjatého betonu.

Obecně by se jaderné reaktory daly dále dělit na výzkumné, experimentální, produkční, školní, průmyslové a energetické. V této práci je dále zmiňován pouze energetický jaderný reaktor [4].

Tab. 1: Rozdělení jaderných energetických reaktorů [23]

Energie neutronů	Moderátor	Chladivo	Označení
Tepelné neutrony	Lehká voda (LWR)	H <sub>2</sub> O	PWR (VVER) tlakovodní reaktor
			BWR varný reaktor
	Grafit	CO <sub>2</sub>	GCR magnoxový reaktor
		H <sub>2</sub> O	LWGR grafitový reaktor chlazený obyčejnou vodou
	Těžká voda	D <sub>2</sub> O	PHWR tlakový těžkovodní reaktor (CANDU)
Rychlé neutrony	Bez moderátoru	Na	FBR rychlý množivý reaktor

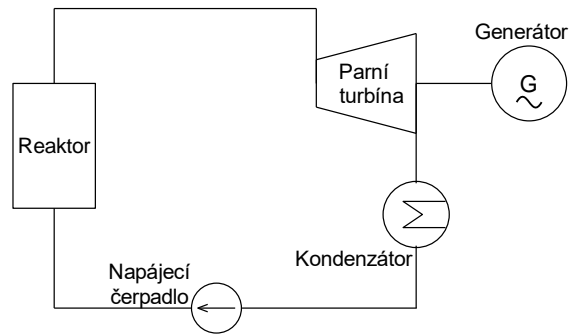
## 2.2 Dělení jaderných elektráren podle okruhů

Jaderné elektrárny se z hlediska základního uspořádání dělí podle počtu okruhů na jednookruhové, dvouokruhové a tříokruhové. Jedná se o dělení podle počtu okruhů, které slouží k výrobě elektrické energie. To znamená, že chladicí okruh v tomto rozdělení není zahrnut.

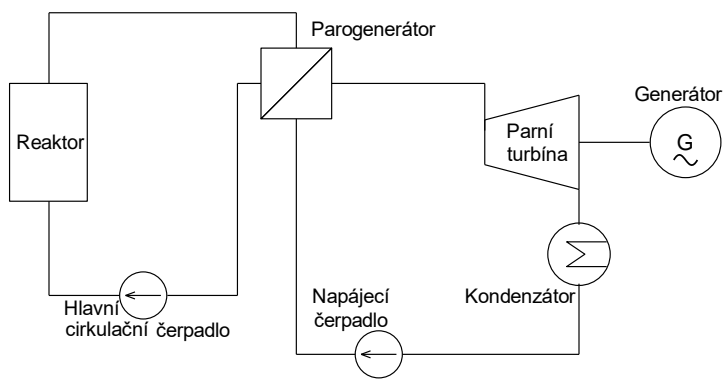
Jednookruhový oběh jaderné elektrárny vyobrazen na obr. 2.2 je z hlediska principu jednoduchý. Pára se vytváří přímo v reaktoru za pomoci varu vody. Prochází přes turbínu do kondenzátoru, kde se jí odebere skupenské teplo a vrací se jako voda zpět do reaktoru. V dnešní době se jaderné elektrárny s jednookruhovým oběhem vyrábí pouze výjimečně. Příčinou je zejména průtok aktivní páry a vody všemi částmi elektrárny, což velmi namáhá velké množství strojních zařízení. Dochází ke korozím a následné opravy nebo revize zařízení by mohly být z důvodu výskytu radioaktivity velmi náročné [1].

Na obr. 2.3 lze vidět dvouokruhový oběh jaderné elektrárny. Jde o nejrozšířenější typ, který nalezneme i v českých jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Rozděluje se na jadernou a nejadernou část elektrárny, kde přechod tepla mezi okruhy zastává parogenerátor. Dvouokruhovému oběhu se blíže věnuji v další části bakalářské práce.

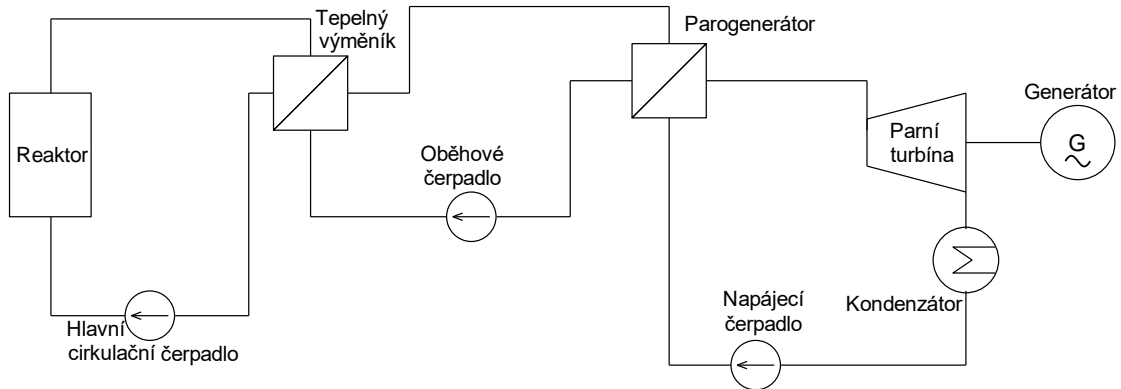
Jaderná elektrárna se třemi okruhy (obr. 2.4) má oproti dvouokruhové elektrárně přidaný okruh bezpečnostní. Tento typ uspořádání se využívá při chlazení tekutými kovy (sodík). Bezpečnostní okruh je zapotřebí zejména pro případ jakékoli netěsnosti parogenerátoru. V momentě netěsnosti by se dostala do styku neaktivní voda s aktivním sodíkem. Tento styk by mohl být velmi nebezpečný pro další chod jaderné elektrárny [22].



Obr. 2.2: Jednookruhový oběh jaderné elektrárny



Obr. 2.3: Dvouokruhový oběh jaderné elektrárny



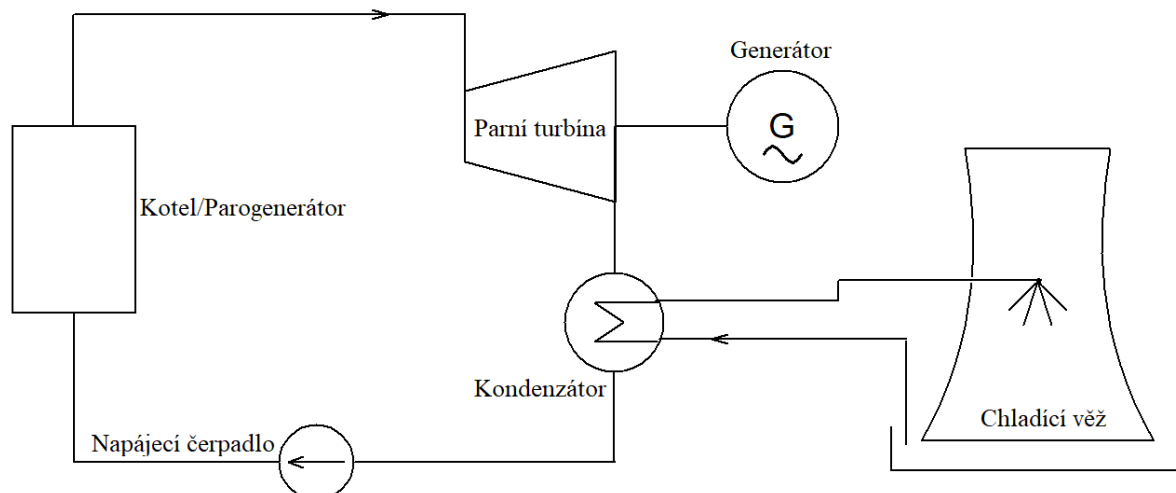
Obr. 2.4: Tříokruhový oběh jaderné elektrárny



### 3 Tepelný oběh jaderných elektráren

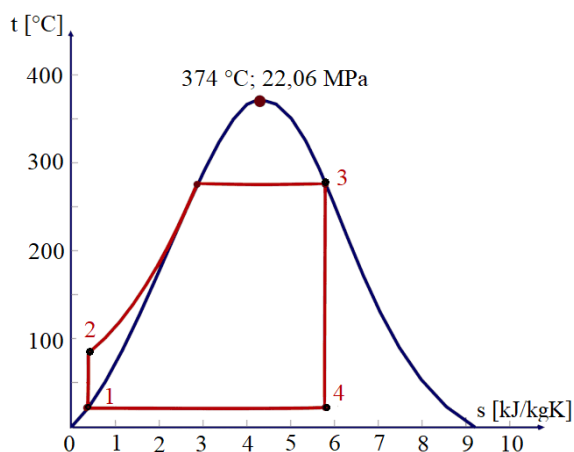
Většina světové produkce elektrické energie (přibližně 85 %) je v současné době vyráběna v tepelných elektrárnách díky principu Rankin-Clausiova (RC) cyklu. RC cyklus je uzavřený opakující se kruhový děj, jehož teplotním médiem je voda a vodní pára. Využití tohoto cyklu existuje jak v uhelných, tak jaderných elektrárnách. Tedy všeobecně tam, kde je teplotní pracovní látka (voda) vypařována a poté kondenzována. Voda je využita díky své dostupnosti a tepelně-technickým vlastnostem [26].

Na obr. 3.1 je zobrazeno zjednodušené obecné schéma ideálního Rankin-Clausiova cyklu. Můžeme si představit, že tento cyklus začíná v momentě, kdy napájecí čerpadlo vytlačí vodu do kotle (u jaderných elektráren do parního generátoru). V kotli nebo parogenerátoru se voda ohřívá, vypařuje se a vzniklá pára je dále vedena parovodem do turbíny. Zde předá svou tepelnou energii turbíně, která ji přemění na energii mechanickou (a dále v generátoru na energii elektrickou). Jakmile pára projde přes lopatky parní turbíny, postupuje do kondenzátoru. V kondenzátoru dochází k odběru tepla díky chladicí vodě, pára zkondenzuje a vzniklý kondenzát je poté čerpán z kondenzátoru pomocí kondenzátních čerpadel do napájecí nádrže. Z napájecí nádrže je následně veden do sání napájecích čerpadel a celý cyklus se periodicky opakuje [26].



Obr. 3.1: Schéma Rankin-Clausiova cyklu

V průběhu cyklu dochází k periodickým změnám termodynamických parametrů vody a vodní páry. Podobu těchto změn lze pozorovat nejlépe v T-s diagramu vody a vodní páry (obr. 3.2). T-s diagram ideálního Rankin-Clausiova oběhu na obrázku začíná adiabatickou kompresí (1-2) (zvýšení tlaku a entalpie vody), kdy je kondenzát dopravován napájecím čerpadlem směrem ke kotli/PG. Následně se voda v kotli ohřívá na mez sytosti, vypařuje se a stává se z ní sytá pára (2-3). Tato pára vstupuje do turbíny, kde dochází v ideálním RC oběhu k adiabatické expanzi (3-4). Poté co pára opustí turbínu, vstupuje do kondenzátoru, kde předá teplo chladicí vodě a dochází ke kondenzaci páry (4-1) [24].



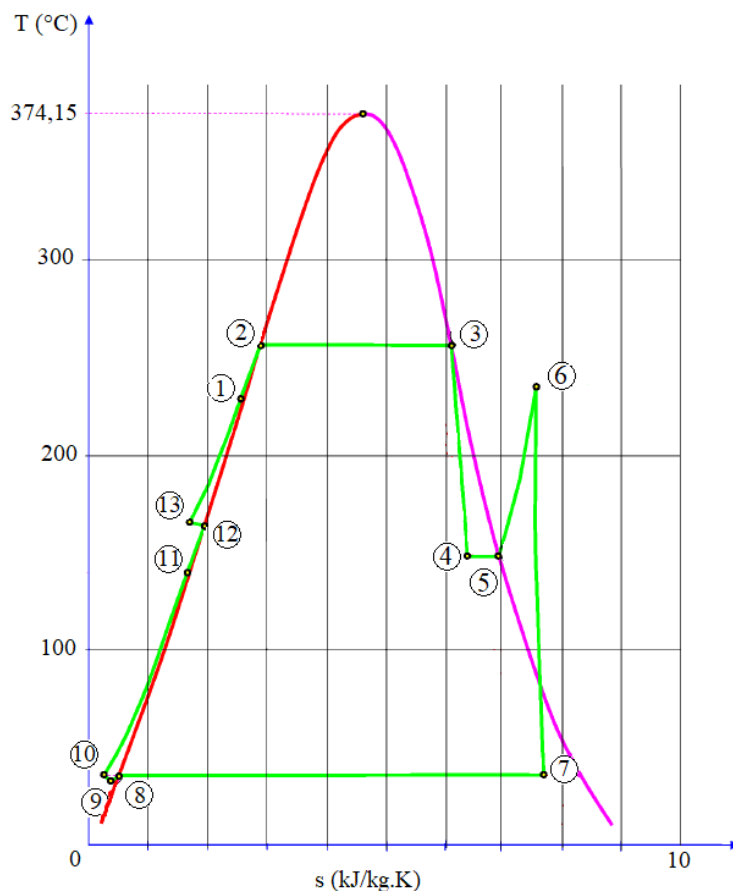
Obr. 3.2: T-s diagram ideálního RC cyklu [24]

Výše uvedený diagram vody a vodní páry (obr. 3.2) je vykreslen pouze pro ideální RC cyklus. Skutečný oběh má oproti ideálnímu RC cyklu řadu odchylek. Nejdůležitější z nich je, že expanze v turbíně neprobíhá adiabaticky (beze ztrát). V důsledku tření a dalších ztrát se část kinetické energie mění v teplo, a proto v průběhu expanze vzrůstá entropie. Práce získaná skutečnou expanzí je tedy menší, než jaká by se získala při adiabatické expanzi [27].

V případě jaderných elektráren s lehkovodním tlakovým reaktorem vypadá reálné tepelné schéma sekundárního okruhu jako na obr. 3.3. Okruhy jaderné elektrárny jsou probírány v další kapitole bakalářské práce, z tohoto důvodu jsou jednotlivé body na obrázku popsány v tab. 2 pouze odkazově.

Tab. 2: Popis bodů v  $T$ - $s$  diagramu sekundárního okruhu [27]

1-2	Ohřev napájecí vody v parogenerátoru
2-3	Skupenská změna vody na páru v parogenerátoru
3-4	Expanze páry ve vysokotlakém dílu parní turbíny
4-5	Odloučení vody z páry v separátorech
5-6	Přehřátí páry v přehříváči
6-7	Expanze páry v nízkotlakém dílu parní turbíny
7-8	Kondenzace páry v kondenzátoru
8-9	Podchlazení kondenzátu v kondenzátoru
9-1	Postupné ohřívání kondenzátu v NT regeneraci, napájecí nádrži, zvyšování tlaku v napájecím čerpadle a ohřívání ve VT regeneraci

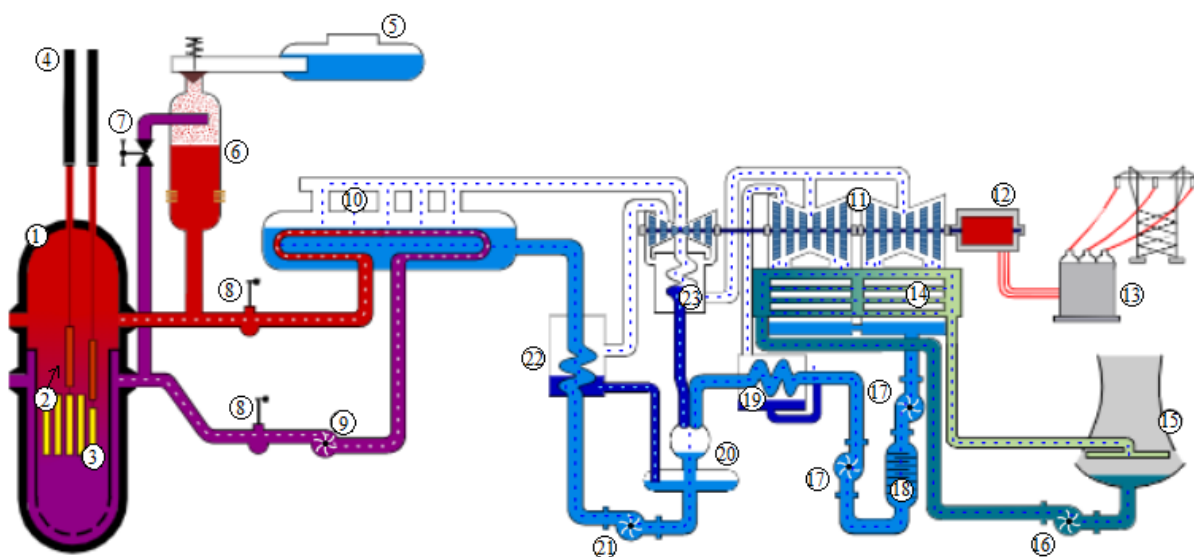


Obr. 3.3: Reálný RC cyklus v  $T$ - $s$  diagramu vody a vodní páry [27]

## 4 Jaderná elektrárna s reaktorem VVER/PWR

Jaderný reaktor typu VVER/PWR je tlakovodní lehkou vodou chlazený a lehkou vodou moderovaný reaktor. V obou českých jaderných elektrárnách se nachází právě typ reaktoru VVER, kterému je věnována další část práce.

Konkrétně se jedná o 4 reaktory VVER 440 v jaderné elektrárně Dukovany a 2 reaktory VVER 1000 v jaderné elektrárně Temelín. Jaderné elektrárny s reaktorem typu VVER jsou vždy dvouokruhové. To znamená, že se jaderná elektrárna dělí na primární (reaktorovou) část, sekundární (strojní) část a její chlazení v terciální (chladicí) části. Schéma jaderné elektrárny s reaktorem VVER je na obr. 4.1.



Obr. 4.1: Schéma jaderné elektrárny [13]

Zařízení jaderné elektrárny z obr. 4.1:

1 – reaktor, 2 – regulační kazety, 3 – jaderné palivo, 4 – systém řízení regulačních kazet, 5 – barbotážní nádrž, 6 – kompenzátor objemu, 7 – sprchový ventil, 8 – hlavní uzavírací ventil, 9 – hlavní cirkulační čerpadlo, 10 – parogenerátor, 11 – parní turbína, 12 – generátor, 13 – transformátor, 14 – kondenzátor, 15 – chladicí věž, 16 – čerpadlo chladicího okruhu, 17 – kondenzační čerpadlo, 18 – úprava kondenzátu, 19 – nízkotlaková regenerace, 20 – napájecí nádrž, 21 – napájecí čerpadlo, 22 – vysokotlaká regenerace, 23 – odlučovač vlhkosti a přehřívák páry [13]

### 4.1 Primární okruh

V primárním okruhu jaderné elektrárny dochází ke štěpení uranu  $^{235}\text{U}$  v aktivní zóně jaderného reaktoru. Uran je v reaktoru obsažen ve formě peletky  $\text{UO}_2$  (oxidu uraničitého). Tyto peletky jsou poskládány do palivových proutků [26]. Z palivových proutků jsou poté tvořeny palivové soubory (v Temelíně) nebo palivové kazety (v Dukovanech). Tyto palivové kazety jsou poté podle přesně určených a vypočítaných parametrů zavezeny na určité místo v aktivní zóně.

Při běžném provozu jaderné elektrárny dochází ke štěpné řetězové reakci, při níž je v aktivní zóně uvolňováno velké množství tepla. Toto teplo je poté odváděno chladivem proudícím přes aktivní zónu pryč z reaktoru a přes tzv. horkou větev cirkulační smyčky je vedeno do parogenerátoru. V parogenerátoru proudí chladivo tisíci trubkami a předává teplo napájecí vodě

sekundárního okruhu, která se zde ohřívá a vypařuje. Poté proudí chladivo přes tzv. studenou větev na sání hlavního cirkulačního čerpadla (HCC) a cyklus se opakuje [9].

Abychom byli schopni ovlivňovat výkon reaktoru v průběhu vyhořívání paliva, plánovaných změn výkonu nebo plánovaného najíždění a odstavení reaktoru, je třeba mít k dispozici regulační orgány, které dokážou ovlivnit reaktivitu reaktoru a následně i jeho výkon [1]. U reaktoru typu VVER je použito dvou způsobů regulace, a to pomocí změny koncentrace kyseliny borité v chladivu a pomocí regulačních kazet (Dukovany) nebo klastrů (Temelín).

Kyselina boritá  $H_3BO_3$  se používá pro kompenzaci vyhořívání paliva v průběhu palivové kampaně a pro zabezpečení dostatečné podkritičnosti reaktoru v případě plánované odstávky bloku [23]. Regulační kazety se naproti tomu používají zejména pro provedení rychlých změn reaktivity, tedy pro rychlé a velké výkonové změny nebo pro havarijní odstavení reaktoru. Oba regulační orgány jsou založeny na přítomnosti izotopu boru  $^{10}B$ . U  $H_3BO_3$ , jak napovídá název, je bor obsažen v kyselině borité obsažené v chladivu primárního okruhu. U regulačních kazet je obsažen v horní části kazet ve slitině z borové oceli. Tento izotop boru má tu vlastnost, že má velmi vysoký účinný průřez pro absorpci neutronů, a tedy v okamžiku, kdy se ocitne v aktivní zóně, tak pohltí neutron, který by jinak mohl způsobit štěpnou reakci. To znamená, že když do aktivní zóny dostaneme dostatečné množství boru  $^{10}B$ , dojde k úplnému přerušení štěpné řetězové reakce a jaderný reaktor bude bezpečně odstaven [9].

Dalším velmi důležitým zařízením primárního okruhu je kompenzátor objemu. Kompenzátor objemu slouží pro kompenzaci objemových a tlakových změn chladiva primárního okruhu, a také díky vysokému tlaku poskytuje jadernému reaktoru dostatečnou rezervu do varu [1].

Kromě základního zařízení se v primárním okruhu nachází nespočet pomocných systémů, jako například systém doplňování a odpouštění primárního okruhu, systém spalování vodíku, systém čistého kondenzátu, systém zabezpečující výrobu a dopravu dostatečného množství kyseliny borité a další.

Z hlediska jaderné bezpečnosti jsou pak nejdůležitějšími zařízeními primárního okruhu bezpečnostní systémy pro havarijní chlazení aktivní zóny a bezpečnostní systémy zajišťující snížení přetlaku v hermetickém boxu (nebo kontejnmentu). Jako bezpečnostní zařízení jsou použity systémy aktivní, které pro svou činnost potřebují elektrické napájení a pasivní, které se uvedou v činnost samovolně v případě překročení stanovených mezí na základě změn daných fyzikálních parametrů [23].

## 4.2 Sekundární okruh

Sekundární okruh jaderné elektrárny slouží zejména k odvodu tepla vznikajícího v primárním okruhu, a to jak v případě normálních provozních stavů, tak i stavů abnormálních a havarijních [9]. Teplo je z primárního okruhu odváděno prostřednictvím parogenerátoru. V parogenerátoru dochází k ohřevu přiváděné napájecí vody na mez sytosti, k jejímu vypařování a odvodu do parovodů a dále k turbínám.

Parogenerátor je velmi důležité zařízení sekundárního okruhu i z hlediska jaderné bezpečnosti, protože teplosměnné trubky parogenerátoru tvoří rozhraní mezi primárním a sekundárním okruhem a tím tvoří bariéru proti úniku radioaktivních látek z primárního okruhu do sekundárního a zejména do životního prostředí. Z tohoto důvodu je také pára vznikající v parogenerátorech monitorována a měřena na případnou aktivitu [1].

Z parogenerátorů vstupuje pára do vysokotlakého dílu turbíny. Zde vykoná práci a dojde ke změně tepelné energie páry na energii mechanickou rotující turbíny. Část páry je z vysokotlakého (VT) dílu vedena odběrovým potrubím do vysokotlakých regenerativních ohříváků, část je vedena odběry do přehříváče. Pára, co vystupuje z VT dílu turbíny, je poté v odlučovači

zbavena vlhkosti a díky odběrové páře z VT dílu přehřátá. Tato přehřátá pára vstupuje do nízkotlakého (NT) dílu turbíny. Odtud většina páry vystupuje do kondenzátoru a část je z meziodběrů vedena do nízkotlakých ohříváků [9].

Na turbínu je napojen elektrický generátor a celé soustrojí tvoří tzv. turbogenerátor. Výroba elektrické energie vzniká právě díky otáčejícímu se rotoru generátoru, který vytváří točivé magnetické pole a v cívkách vinutí statoru je indukován elektrický proud. Vyrobena elektrická energie je poté vyvedena z elektrárny přes transformátor do elektrizační soustavy.

Pára, která vystupuje z NT dílu turbíny, vstupuje do kondenzátoru. Trubkami kondenzátoru proudí chladicí voda, která způsobí kondenzaci vstupující páry. Vzniklý kondenzát je poté veden pomocí tzv. kondenzátních čerpadel přes sérii nízkotlakých ohříváků (kde dochází k jeho postupnému ohřívání díky odběrové páře) do napájecí nádrže [1].

Napájecí nádrž plní v sekundárním okruhu několik důležitých funkcí. Slouží k dalšímu ohřátí kondenzátu, jeho případnému odplynění a zejména slouží jako zásobárna napájecí vody pro parogenerátory. Z napájecí nádrže je pomocí napájecích čerpadel napájecí voda vedena přes sérii vysokotlakých regeneračních ohříváků do parogenerátoru a zde se opět ohřívá na mez sytosti a pak se vypařuje [1].

### 4.3 Terciální (chladicí) okruh

Pára vycházející z turbíny předává v kondenzátoru teplo do chladicí vody terciálního okruhu. Z kondenzátoru potom chladicí voda vystupuje ohřátá a proudí potrubím do chladicích věží. Zde se voda rozstříkuje a ochlazuje proudícím vzduchem. Část vody odchází do atmosféry, část kondenzuje a spadá do chladicích bazénů pod věží.

Voda odpařovaná do atmosféry je pouze čistá voda bez jakýchkoli chemických příměsí. Veškeré příměsi v chladicí vodě se dostávají do bazénů pod věží. Tím se zhoršuje kvalita chladicí vody a není možné ji posílat zpět do oběhu. Velké množství minerálů ve vodě by vytvářelo koroze, nánosy a usazeniny na zařízení. Proto část vody z chladicích bazénů organizovaně odvádíme zpět do vodního zdroje a zároveň odtud bereme vodu novou, tak aby se vyrovnaly ztráty vypařené a odvedené vody [23].

Vodu, kterou doplňujeme do chladicího okruhu z vodního zdroje, nazýváme tzv. vodou doplňkovou. Pro Jadernou elektrárnu Dukovany získáváme vodu z řeky Jihlavy. Jaderná elektrárna Temelín využívá vodu z řeky Vltavy. Voda čerpána z vodního zdroje je upravena tak, aby její chemická skladba nezavinila poruchu systémů a pomocí čerpadel je čerpána do budovy čerpací stanice chladicí vody, odkud je následně vháněna do terciálního okruhu dle potřeby.

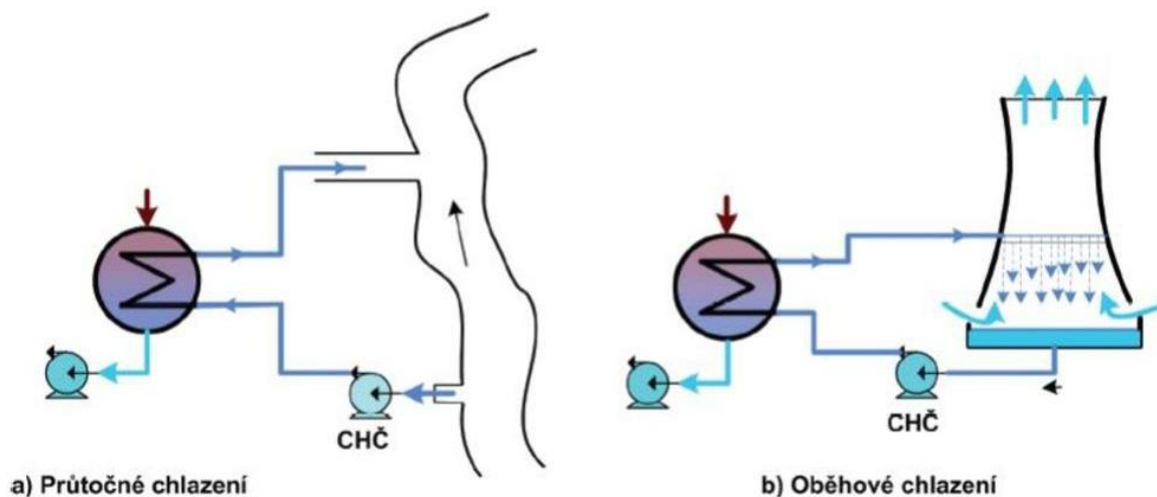
Terciální okruh jaderné elektrárny má kromě kondenzace páry ještě jeden zásadní úkol. A to vytvářet co největší podtlak v kondenzátoru tak, aby účinnost parní turbíny byla co nejvyšší. Vysokého podtlaku v kondenzátoru dosahujeme nízkou teplotou chladicí vody v terciálním okruhu. Z tohoto důvodu jsou nejlepší účinnosti elektráren v zimních měsících, kdy se voda v chladicí věži maximálně ochladí. Na druhou stranu je ale potřeba dbát na to, aby na chladicích věžích nedocházelo k zamrznutí chladicí vody. Toho docílíme použitím tzv. zimních ochranných a zimních zkratů na chladicích věžích.

Mezi další zařízení terciálního okruhu patří oběhová čerpadla, vodovodní potrubí a kanály chladicí vody [12].

## 5 Způsob chlazení jaderné elektrárny

Obecně jsou tepelné elektrárny chlazeny třemi způsoby. Na principu mokrého chlazení jsou založeny dva způsoby chlazení – cirkulační (oběhové) a průtočné chlazení (obr. 5.1). Třetím způsobem chlazení je chlazení suché, tedy bez přísunu vody. Takové chlazení by teoreticky mohlo být vhodnější než chlazení mokré. Omezilo by se narušování fauny v okolí vodních zdrojů a v případě letních suchých měsíců by prázdná koryta řek nepředstavovala problém pro chod elektráren. Na druhou stranu suché chlazení by velké výkony elektráren uchlادilo jen velmi obtížně, a to za předpokladu velkých finančních nákladů při provozu těchto systémů. Proto je v jaderných elektrárnách prozatím využito pouze chlazení pomocí mokrých systémů [19].

V České republice se s ohledem na jaderné elektrárny ale i na většinu elektráren a tepláren používá pouze cirkulační chlazení, tedy chlazení pomocí chladicích věží, kterými se zabýváme v následující kapitole.

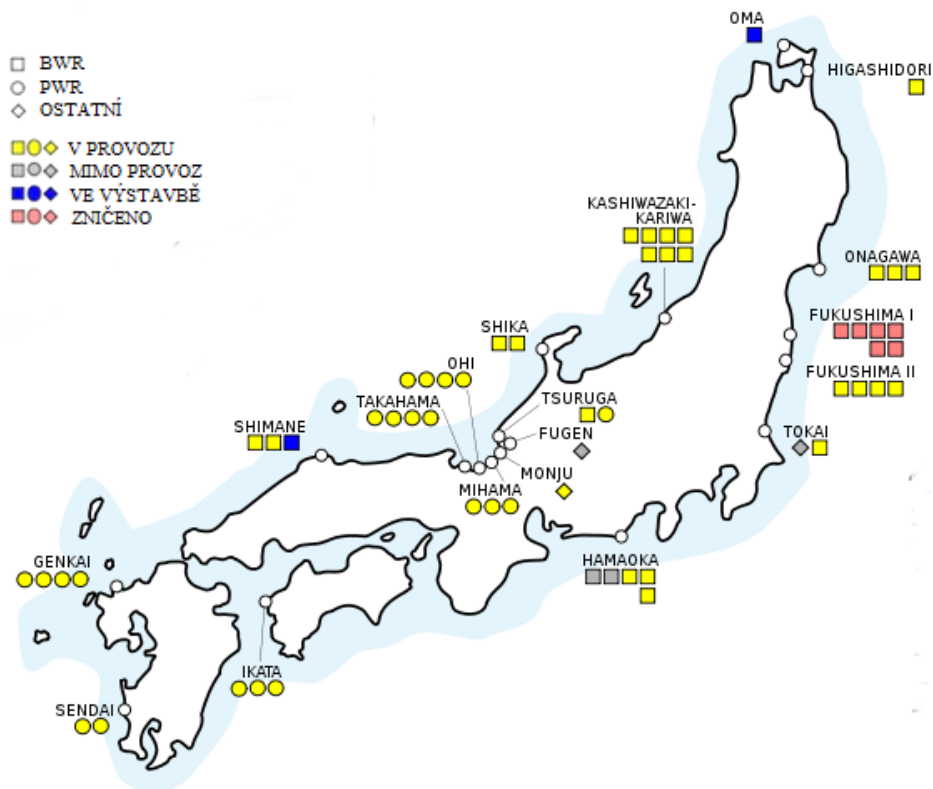


Obr. 5.1: Způsoby chlazení jaderných elektráren [4]

Při průtočném chlazení přivádíme chladicí vodu kontinuálně ke kondenzátoru přímo z vodního zdroje a ohřátou ji vypouštíme zpět.

Průtočné chlazení je použito pouze ve dvou českých tepelných elektrárnách (Mělník I a elektrárna Hodonín). Elektrárna Mělník I je chlazená z řeky Labe. Elektrárna Hodonín je průtočně chlazená z řeky Moravy. Tato řeka nemá dostatečný průtok pro chlazení elektrárny a v letních měsících se elektrárna potýká s problémem nedostatku chladicí vody. Následkem letních suchých měsíců je tedy nutné snižovat výkon elektrárny, přičemž vzniká velká ekonomická ztráta. Z tohoto důvodu se v elektrárně začala plánovat dostavba chladicí věže na principu oběhového chlazení. Díky tomu by voda cirkulovala v chladicím okruhu a chod elektrárny by nevyžadoval tak velké množství vody přímo ze zdroje [19].

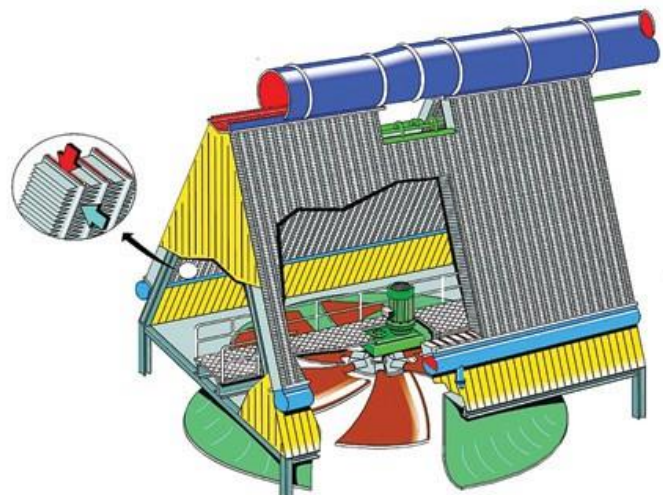
Ve světě je průtočné chlazení využíváno mnohonásobně více než u nás. Jedná se zejména o státy s možností průtočného chlazení v moři. Takovým případem je například Japonsko (obr. 5.2), které právě díky výstavbě jaderných elektráren v přímé blízkosti s velkým vodním zdrojem nepotřebuje stavět chladicí věže, čímž vzniká ekonomická a prostorová úspora na výstavbě [19].



Obr. 5.2: Japonské jaderné elektrárny s průtočným chlazením [18]

Suché chlazení využívá teplosměnných ploch. Voda je zde vedena soustavou uzavřených potrubí a ochlazována vzduchem (obr. 5.3). V České republice můžeme princip suchého chlazení nalézt u některých tepláren, obecně je ale v naší zemi tento princip využíván velmi málo. Suché systémy se využívají v místech, kde je nedostatečná dodávka vody. To se týká například uhelné elektrárny Kogan Creek v australské poušti v blízkosti uhelných dolů [19]. Nicméně s technologiemi této doby je lepší budovat elektrárny u vodního zdroje a použít principu mokrého chlazení, a to z důvodu několika nevýhod suchých systémů.

Zásadní nevýhodou suchého chlazení přes teplosměnné trubky je nízká tepelná kapacita vzduchu. Pokud budeme mít suchý systém a zároveň mokrou chladičí věž o stejném výkonu, vždy bude zapotřebí mnohem větší plochy právě u suchého systému. Pro zlepšení účinnosti těchto systémů se zavádí ventilátory. Ty jsou závislé na elektrické energii. Takže je výstavba a zároveň i provoz suchých systémů zpravidla investičně nákladnější než systémů mokrého chlazení [19].



Obr. 5.3: Suché chlazení [19]

## 6 Chladicí věž

První zmínky o chlazení pochází z počátků 19. století, kdy bylo zapotřebí chladit parní stroje z důvodu nižší spotřeby paliva. Pro chlazení se v té době využívalo kondenzátorů, které však spotřebovaly obrovské množství vody a jejich provoz nebyl ekonomicky výhodný.

Chladicí věže se začaly stavět na počátku 20. století. Výška stavby se většinou pohybovala okolo 50 m a konstrukce věží se budovala ze dřeva, následně z oceli [28].

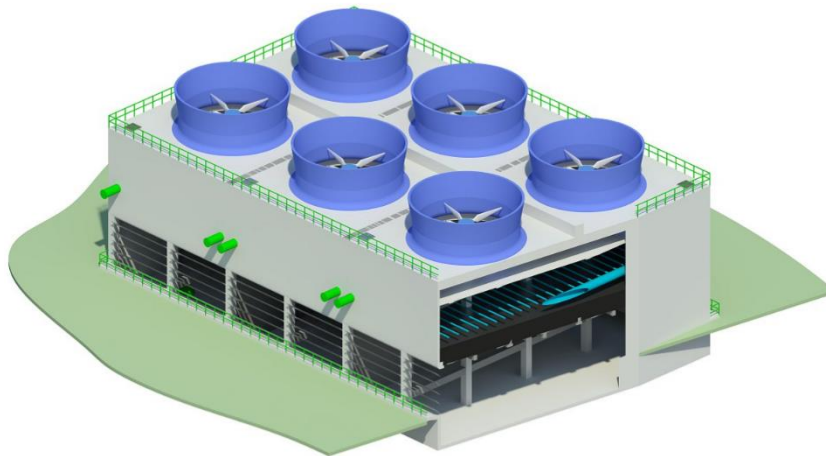
Chladicí věže, jak je známe dnes, se začaly vyrábět na přelomu padesátých let minulého století, kdy byl vynalezen železobeton. Jejich železobetonová stavba ve tvaru hyperboloidu slouží k zajištění dostatečného tahu vzduchu pro chlazení vody terciálního okruhu [12]. Studium chladicích věží a jejich možné vylepšení je stále aktuálním tématem. Zejména z důvodu možných ekonomických úspor elektráren [28].

Chladicí věže se rozlišují podle způsobu předávání tepla mezi médii na suché, mokré a hybridní nebo podle způsobu vytváření tahu na věže s nuceným tahem a s přirozeným tahem. Suché chladicí věže jsou využívány zejména v místech s omezeným zdrojem vody, kde dochází pouze k ochlazování za pomoci sdílení tepla přes teplosměnné plochy. Mokré chladicí věže využívají vzájemného styku ohřáté vody a chladicího vzduchu. Hybridní chladicí věže jsou kombinací mokré i suché chladicí věže. Nejdříve je ohřáté médium ochlazováno přes teplosměnné plochy. Následně vchází do mokré chladicí části věže a voda je rozstříkována a dále ochlazována okolním vzduchem a sbírána v bazénu pod věží [25]. V Jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín se vyskytují podle předávání tepla mezi médii pouze mokré chladicí věže. Avšak způsob tahu věží je jak přirozený, tak i nucený.

### 6.1 Mokrý chladicí věž s nuceným tahem

Chladicí věž s nuceným tahem (obr. 6.1) pracuje za pomoci elektrických ventilátorů. Oproti chladicí věži s přirozeným tahem umožňuje regulování objemu proudícího vzduchu. Tím chladicí věž udržuje stálý výkon za jakýchkoliv klimatických podmínek. Využití ventilátorových věží pro veškeré chlazení v jaderné elektrárně není možné z důvodu stálé potřeby elektrické energie pro pohon ventilátorů. V případě, že by se ventilátorovými věžemi chladila veškerá voda, docházelo by k velké ekonomické ztrátě.

Z hlediska jaderné bezpečnosti je ventilátorová věž velmi důležitá. Voda, která prochází chladicí věží s nuceným tahem, se nazývá technickou vodou důležitou. Technická voda důležitá slouží pro chlazení zařízení v primárním okruhu jaderné elektrárny, které se nesmějí přestat chladit ani na omezenou dobu provozu [10].



Obr. 6.1: Ventilátorová chladicí věž [29]

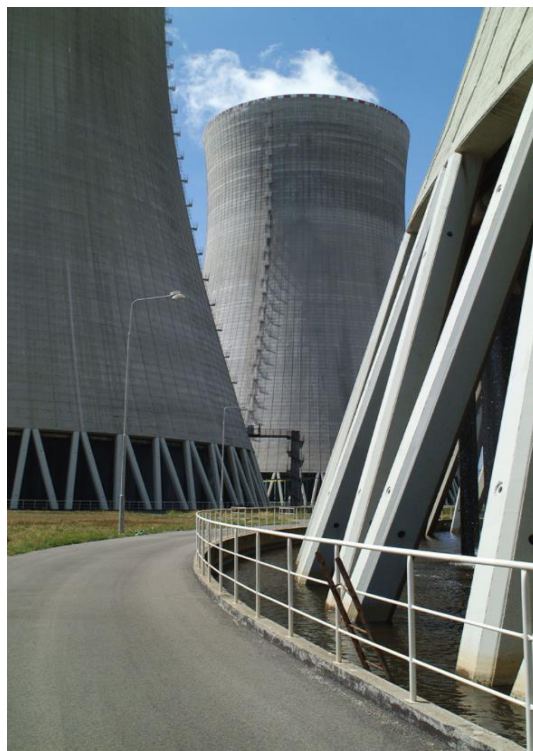


## 6.2 Mokrý chladicí věž s přirozeným tahem

Chladicí věž s přirozeným tahem (obr. 6.2) oproti ventilátorové chladicí věži nevyužívá pro proudění vzduchu žádných mechanických součástí. Proudění vzduchu zde vzniká tzv. komínovým efektem. Díky rozstříkávání ohřáté vody z okruhu dochází ve věži ke zvyšování teploty a snižování hustoty vzduchu. Teplota okolního vzduchu je vždy nižší než teplota vzduchu ve věži. Z toho vyplývá, že hustota vzduchu v okolí je vždy větší než hustota vzduchu uvnitř. Díky těmto hustotám se mění tlak ve věži. Tlak se na výstupu z věže snaží o vyrovnání a zapříčiňuje tím proudění vzduchu, tzv. tah. Abychom dosáhli optimálního tahu věže, je zapotřebí dostatečná konstrukční výška chladicí věže (obr. 6.3) [28].

Chladicí věž pracuje nepřetržitě, ale její účinnost chlazení se mění v závislosti změn klimatu. V zimním období dosahuje chladicí věž zpravidla vyšší účinnosti z důvodu nižších teplot okolí, a tedy vyššího ochlazení chladicí vody. Na účinnost chlazení má vysoký vliv také okolní vítr. Ten vyvolává uvnitř věže škodlivé víření vzduchu, které vytváří podtlak v chladicí věži a tím zamezuje rovnoměrnému průtoku vzduchu. Zmenšení průtoku vzduchu potom snižuje účinnost ochlazování rozstříkované vody [25].

Cirkulační voda z chladicí věže primárně slouží k chlazení kondenzátoru turbíny, ale zahrnuje i tzv. technickou vodu nedůležitou, která je určena k chlazení dalších spotřebičů v hlavním výrobním bloku a v pomocných provozech. U zařízeních chlazených technickou vodou nedůležitou je v případě poruch možno na omezenou dobu přerušit odvod tepla [11].

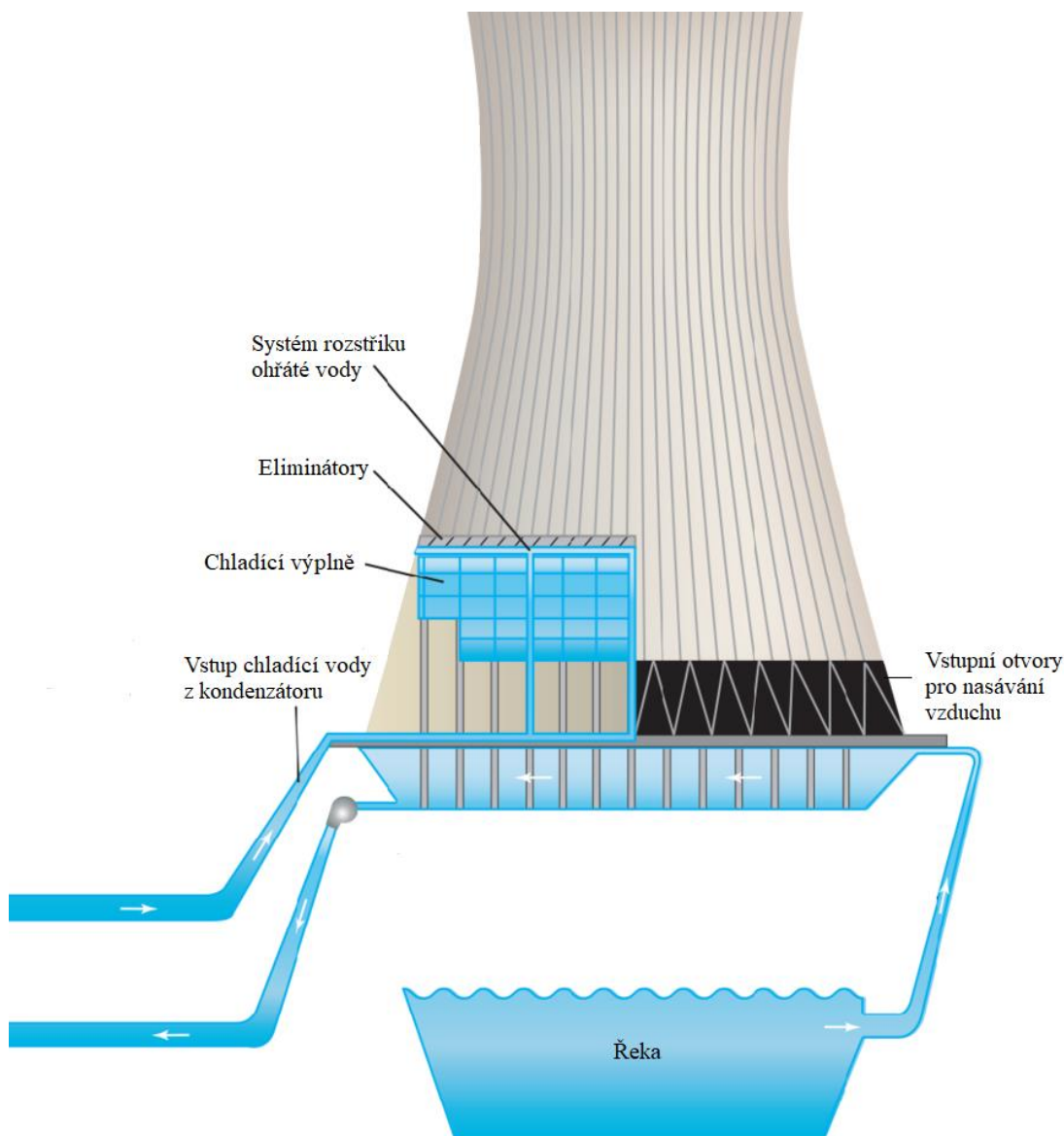


Obr. 6.2: Chladicí věž z blízkosti [11]



Obr. 6.3: Chladicí věže s přirozeným tahem [11]

Chladicí věž jaderné elektrárny dosahuje 150 až 200 metrů konstrukční výšky. Má tloušťku stěn pouze několik desítek centimetrů a celý plášť je postaven na systému podpěrných sloupů, které zahrnují vstupní otvory pro nasávání okolního vzduchu do věže. Technologické zařízení uvnitř věže tvoří betonový rošt s několika vrstvami plastových chladicích výplní, sprchový systém rozstříku vody a eliminátory zabraňující úletu malých kapiček vody. Celá tato kompozice je umístěna uvnitř věže nad hranou vstupních otvorů nasávání vzduchu ve výšce asi 10 až 20 metrů. Prostor nad eliminátory až ke koruně věže je úplně prázdný a slouží jen jako komín [10]. Rozmístění komponent v chladicí věži lze vidět na obr. 6.4. Ochlazovaná voda se shromažďuje v bazénu (jímce) umístěném pod chladicí věží, z kterého následně vede potrubí do čerpací stanice. Ochlazovací bazén pod věží má stejný průměr jako chladicí věž a každou minutu musí odejmout z chladicí věže přes tisíc krychlových metrů ochlazené vody.



Obr. 6.4: Schéma chladicí věže s přirozeným tahem [8]

## 7 Kondenzátor

Kondenzátor je tepelný výměník, který odebírá tepelnou energii páře vycházející z koncových dílů turbíny. Kondenzace páry v kondenzátoru probíhá celou dobu za konstantního tlaku.

Páře vystupující z koncových dílů parní turbíny je potřeba odebírat teplo. V případě, že bychom do tepelného cyklu nezařadili kondenzátor, bylo by zapotřebí páru odvádět do atmosféry přímo z turbíny. V takovém případě bychom přicházeli o obrovské množství čisté, demineralizované vody<sup>1</sup>, kterou právě díky kondenzátoru lze opakovaně využít. Zároveň by při vypouštění páry přímo do atmosféry docházelo k nižšímu entalpickému spádu na turbíně, což značí nižší výkon turbíny a celkovou nižší tepelnou účinnost celého cyklu. Je tedy zřejmé, že bez kondenzátoru prakticky nelze realizovat výstavbu elektrárny a je pro chod celého cyklu velmi důležitým aspektem [15].

Základní rozdělení kondenzátorů je podle typu chladicího média. Ve světě se lze setkat s vodou chlazenými kondenzátory, vzduchovými kondenzátory nebo s kondenzátory chlazenými nemrznoucí směsí (méně časté).

Existují i další důležité způsoby rozdělení kondenzátorů, a to na kondenzátory povrchové a směšovací kondenzátory. Povrchové kondenzátory jsou ty, kde se nachází určitá teplosměnná plocha (trubky). U kondenzátorů směšovacích dochází přímo k míchání páry s chladicí vodou.

Dále bychom mohli kondenzátory rozdělit i podle dalších kritérií, například podle uspořádání tahů chladicí vody na jednotahové, dvoutahové a vícetahové nebo také podle pohledu umístění vzhledem k výstupu páry z turbíny na radiální, axiální a bokové [15].

### 7.1 Kondenzátor chlazený vzduchem

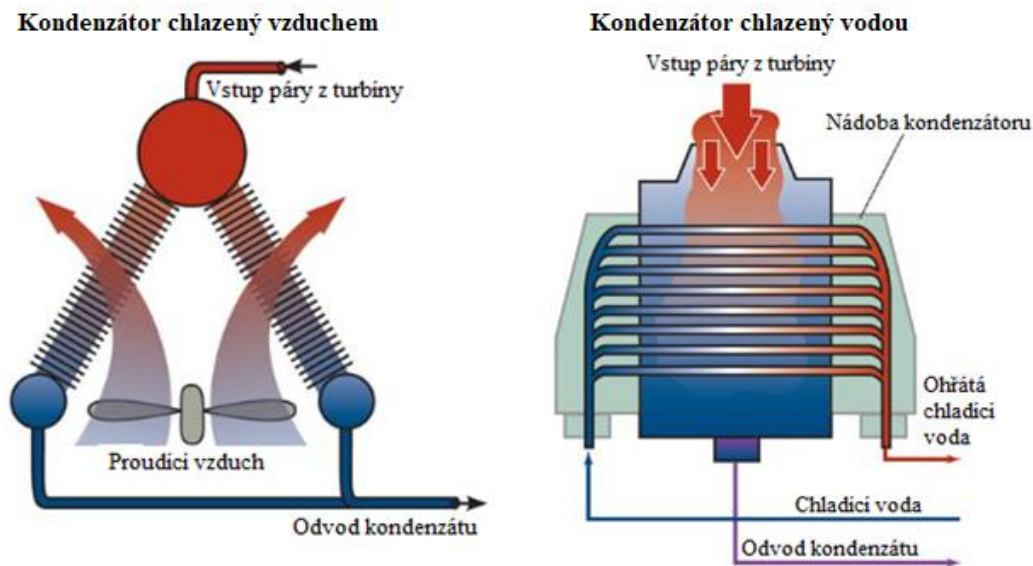
Pára vystupující z turbíny do vzduchové kondenzátoru prochází teplosměnnými trubkami, které jsou na vnějším povrchu žebrované a uloženy do tvaru písmene A. Chladicí vzduch, který je přiváděn ze spodní části kondenzátoru za pomoci ventilátoru, proudí vně trubek a ochlazuje páru uvnitř trubek přes teplosměnnou plochu (obr. 7.1). Vzduch páru ochladí a ta v trubkách zkondenzuje. Vzniklý kondenzát je odváděn pryč z kondenzátoru.

Oproti kondenzátorům chlazených vodou jsou vzduchové kondenzátory oproštěny od nutnosti čištění. Vzduch tedy není třeba nikterak čistit a nenarušuje zařízení tak jako voda (korozemi apod.). U vzduchových kondenzátorů je naopak zapotřebí dát pozor na prach a okolní nečistoty, které mohou snížit účinnost odvodu tepla. Z tohoto důvodu se vzduchové kondenzátory konstruují vysoko nad zemí tak, aby se omezilo nasávání nečistot ventilátorem.

Vzduchové kondenzátory se používají v případě, kdy se v oblasti stavby nevyskytuje schopný vodní zdroj. Zároveň je třeba dbát na umístění tohoto typu kondenzátoru. V místech s vysokou okolní teplotou bude práce kondenzátoru méně účinná. Obecně se kondenzátory chlazené vzduchem používají spíše pro menší průtoky kondenzátu tak, aby byly schopny médium dostatečně vychladit [15].

---

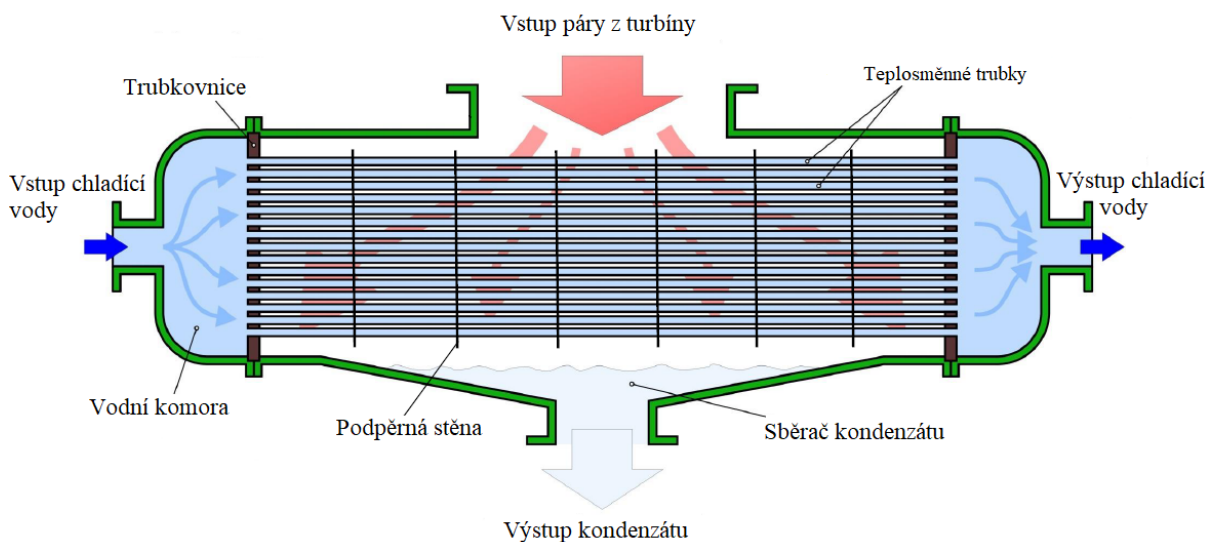
<sup>1</sup> Demineralizovaná voda je chemicky čistá voda neobsahující žádné vápenaté sloučeniny a jiné minerály.



Obr. 7.1: Kondenzátor chlazený vzduchem a kondenzátor chlazený vodou [15]

## 7.2 Kondenzátor chlazený vodou

V jaderných elektrárnách je využíván pouze typ povrchového kondenzátoru chlazeného vodou. Kondenzátory chlazené vodou jsou velké svařené nádoby s obrovským množstvím tenkých přímých trubek upevněných na obou koncích v trubkovnicích. Průhybu trubek při vibracích zabraňují podpěrné stěny, které drží trubky ve správné vzdálenosti od sebe a podpírají je proti pádu. Rozvod chladicí vody do trubek zastávají vodní komory. Vnitřkem trubek protéká chladicí voda, která ochlazuje páru proudící z koncového dílu parní turbíny. Pára z kondenzuje a stéká dolů do sběrače kondenzátu. Popis částí kondenzátoru lze vidět na obr. 7.2 [15].



Obr. 7.2: Schématické znázornění parního kondenzátoru [15]

### 7.3 Čištění trubek kondenzátoru

Chladicí voda (procházející trubkami kondenzátoru) je v každém cyklu z důvodu ztrát odpařem, úletem a odluhem (vznikajících v chladicí věži) doplňována o vodu čerpanou z vodního zdroje. Znamená to, že čištění takové vody na kvalitu demineralizované by bylo velmi náročné a pravděpodobně finančně neekonomické. Protože chladicí voda protéká trubkami kondenzátoru a není natolik čistá jako voda demineralizovaná, dochází zde ke značným problémům se zanášením trubek v kondenzátoru. Z takového důvodu musí být vnitřek trubek pravidelně čištěn [12].

Jednou z možností čištění, která se však nevyužívá v českých elektrárnách, nýbrž zejména při chlazení mořskou vodou, je čištění za pomoci reverzace proudu. To znamená, že se v trubkách otočí směr toku vody a díky této náhlé změně proudu dojde k výplachu nečistot.

V českých elektrárnách se naproti tomu využívá pro čištění kondenzátorů za provozu kuliček z pěnové hmoty (obr. 7.3). Kuličky se dávkuje do chladicí vody před vstupem do kondenzátoru. Odtud proud chladicí vody vnáší kuličky do vodní komory a nahodile je vede k jednotlivým trubkám. Kuličky se dostávají díky tlakové ztrátě kondenzátoru a tlakovému spádu vody přes trubky na výstup chladicí vody, kde jsou zachytávány do sít. Za pomoci čerpadla jsou ze síta odebírány a znovu vháněny do chladicí vody před vstupem do kondenzátoru.

Existuje poměrně velké množství kuliček, které se od sebe liší provedením i povrchovými úpravami. Je to z důvodu, že existují různé druhy chladicích vod i různé materiály trubek [15].



Obr. 7.3: Taprogge kuličky pro čištění trubek kondenzátoru [15]

## 8 Teoretický popis výpočtu

Cílem bakalářské práce je vypočítat množství doplňkové vody chladicího (terciálního) okruhu v průběhu roku. Doplňková voda je náhrada za vzniklé ztráty, takže součet vzniklých ztrát se musí rovnat množství doplňkové vody. Z toho plyne, že pro výpočet doplňkové vody je nejdříve nutné vypočítat ztráty v chladicím okruhu.

### 8.1 Ztráty v chladicím okruhu

Vzniklé ztráty chladicího okruhu (úlet, odpar, odluh) se pravidelně doplňují vodou z vodního zdroje. Což znamená, že množství doplňkové vody  $\dot{m}_{dopl}$  lze určit jako součet ztrát chladicího okruhu. Nejdůležitějšími ztrátami jsou odpar  $\dot{m}_{odpar}$ , odluh  $\dot{m}_{odluh}$  a úlet  $\dot{m}_u$ . Ztráty se liší v závislosti na výkonu bloku, ročním období či povětrnostních podmínkách. Jsou to ztráty, které lze v nějaké možné míře naměřit a počítat [2].

$$\dot{m}_{dopl} = \dot{m}_{odpar} + \dot{m}_{odluh} + \dot{m}_u \quad (8.1)$$

V potrubí a celém systému rozvodu chladicí vody se dále mohou objevit například ztráty netěsnostmi a průsakem. Tyto ztráty jsou u plně funkčního zařízení velmi malé a lze je ve výpočtu zanedbat [22].

Pro proces chlazení v chladicí věži je ztráta odpařováním zcela nutná. Dochází zde k ochlazení chladicí vody za pomoci vzduchu. Jakmile je voda rozstříkována do věže, část vody se odpaří a část vody zkondenzuje a vrátí se zpět do chladicího okruhu.

Ztrátu odparem je možné vypočítat pomocí rovnice 8.2, kde  $\dot{m}_w$  je množství chladicí vody v okruhu,  $\Delta t_w$  je rozdíl teplot chladicí vody na vstupu do věže  $t_{w2}$  a chladicí vody na výstupu z věže  $t_{w1}$ , dále  $cp = 4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$  je měrná tepelná kapacita vody a  $H_v = 2260 \text{ kJ/kg}$  je latentní teplo, tedy energie, při které dochází ke změně skupenství (voda/pára) [2].

$$\dot{m}_{odpar} = \frac{\dot{m}_w \cdot \Delta t_w \cdot cp}{H_v} \quad (8.2)$$

V chladicí věži se do atmosféry odpařuje pouze čistá voda. Minerály a nečistoty vody nejsou schopné se odpařovat a spadají do bazénu. Proto je zapotřebí tyto minerály odvádět v takové míře, aby nedocházelo ke vzniku vody s vysokým obsahem minerálů. Taková voda by měla za následek koroze a zanášení zařízení.

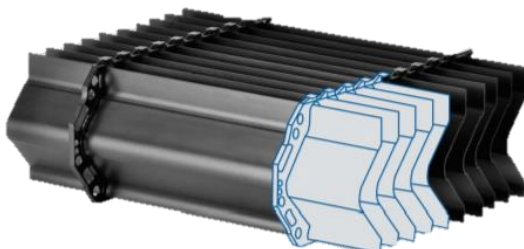
K odvádění nadbytečných minerálů ve vodě využíváme odčerpání části vody z bazénu zpět do vodního zdroje. Tuto činnost nazýváme jako ztrátu odluhem. Ztrátu odluhem vypočítáme pomocí množství odparu  $\dot{m}_{odpar}$  a počtu cyklů koncentrace  $COC$ . Cyklus koncentrace  $COC$  je bezrozměrné číslo udávající poměr mezi parametrem v chladicí vodě a parametrem v doplňkové vodě. Parametrem je míněna buď tvrdost chladicí a doplňkové vody nebo vodivost těchto vod. Takový poměr je zpravidla v číselném rozsahu 3–7 cyklů [2].

$$\dot{m}_{odluh} = \frac{\dot{m}_{odpar}}{COC - 1} \quad (8.3)$$

Ke ztrátě úletem dochází v momentě, kdy jsou kapičky vody rozstříkovány do chladicí věže. Část kapiček je vzhledem k jejich malé hmotnosti odnášena proudem vzduchu pryč z chladicí věže do atmosféry a dochází tedy ke ztrátám. Ztráty úletem se značně snižují díky eliminátorům (obr. 8.1). Tvar eliminátorů zapříčiňuje prudké změny směru proudění, a tím i od-

dělení kapiček nárazem na stěny eliminátorů od vzduchového proudu. Kapičky vody po eliminátorech stečou a dále spadají do bazénu pod chladicí věží. Z celkového průtoku chladicí vody  $\dot{m}_w$  jsou potom ztráty úletem 0,01 % [25].

$$\dot{m}_u = \frac{0,01 \cdot \dot{m}_w}{100} \quad (8.4)$$



Obr. 8.1: Lamelový eliminátor pro chladicí věž s přirozeným tahem [6]

## 8.2 Vodní bilance

Pro určení ztrát chladicího okruhu je zapotřebí znát celkový průtok chladicí vody. Průtok chladicí vody lze vyjádřit pomocí předávaného tepla v kondenzátoru mezi parou a chladicí vodou.

Množství tepla přiváděného do kondenzátoru v podobě páry vycházející z turbíny:

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) \quad (8.5)$$

Množství tepla, které je nutno odvést chladicí vodou pryč z kondenzátoru:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot (t_{w2} - t_{w1}) \quad (8.6)$$

Tím vzniká tepelná bilance kondenzátoru, kterou lze zapsat v následujícím znění:

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \cdot (i_p - i_k) = \dot{m}_w \cdot c_p \cdot (t_{w2} - t_{w1}) \quad (8.7)$$

Z tepelné bilance se dále odvede vzorec pro množství chladicí vody v terciálním okruhu.

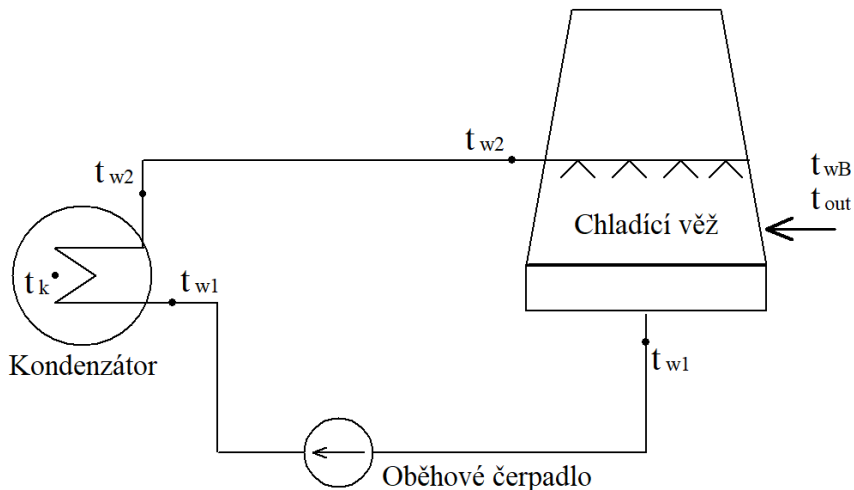
$$\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_p \cdot (i_p - i_k)}{c_p \cdot (t_{w2} - t_{w1})} \quad (8.8)$$

V případě výpočtu množství chladicí vody je ze zadaných hodnot známo pouze množství páry vycházející z turbíny  $\dot{m}_p$  a měrná tepelná kapacita vody  $c_p$ . Dále je zapotřebí znát teploty chladicí vody  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  na vstupu a výstupu z kondenzátoru, entalpii páry vystupující z turbíny  $i_p$  a entalpii vzniklého kondenzátu  $i_k$ .

## 8.3 Teploty v chladicím okruhu jaderné elektrárny

Teplota chladicí vody je zásadně ovlivňována klimatickými změnami v průběhu roku, a to zejména relativní vlhkostí  $\varphi_{out}$  a teplotou  $t_{out}$  okolního vzduchu. Tyto hodnoty lze získat z Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) a jsou nedílnou součástí pro zjištění teplot chladicího okruhu [3].

Teploty související s výpočtem terciálního okruhu jaderné elektrárny jsou zakresleny na obr. 8.2. Jedné se o teplotu chladicí vody na výstupu z věže (vstupu do kondenzátoru)  $t_{w1}$ , teplotu v kondenzátoru  $t_k$  a teplotu chladicí vody na vstupu do věže (výstupu z kondenzátoru)  $t_{w2}$ .



Obr. 8.2: Zjednodušené schéma terciálního okruhu

Teplotu chladicí vody vycházející z chladicí věže  $t_{w1}$  je možné určit pomocí součtu teplot vlhkého teploměru a přiblížení se k teplotě vlhkého teploměru.

Teplota vlhkého teploměru  $t_{wB}$  je měřena pomocí vlhkoměru. ČHMÚ tyto hodnoty neposkytuje veřejnosti, a proto je teplota vlhkého teploměru vypočítána z teploty suchého teploměru  $t_{out}$ , vlhkosti okolního vzduchu  $\varphi_{out}$  a atmosférického tlaku  $p_A = 101\,325$  Pa. Pro zjednodušení je možné využít výpočetní kalkulačku, která se nachází v odkazu [14]. Teplota vlhkého teploměru je kvůli chlazení odpařováním v případě relativní vlhkosti v mezi 0-99 % vždy nižší než teplota suchého teploměru. Při 100% relativní vlhkosti jsou si teploty vlhkého a suchého teploměru rovné.

Chladicí věž je schopna ochladit pracovní médium k teplotě blízké se teplotě vlhkého teploměru. Toto přiblížení  $t_{APPROACH}$  se u mokrých chladicích věží s přirozeným tahem udává v rozmezí 8-12 °C. Hodnota přiblížení se pak odvíjí od konstrukce chladicí věže, jejím průměru, výšce a velikosti vstupních otvorů pro nasávání vzduchu.

$$t_{w1} = t_{wB} + t_{APPROACH} \quad (8.9)$$

Rozdíl teplot chladicí vody na vstupu do kondenzátoru  $t_{w1}$  a chladicí vody na výstupu z kondenzátoru  $t_{w2}$  je dán chladicím pásmem  $\Delta t_w$ . Chladicí pásmo udává o kolik stupňů je schopna chladicí voda odebrat teplo páře, tedy o kolik stupňů se chladicí voda v kondenzátoru ohřeje. Tento rozsah se pohybuje v rozmezí od 6 do 12 °C a závisí na konstrukčních vlastnostech kondenzátoru.

$$\Delta t_w = t_{w2} - t_{w1} \quad (8.10)$$

Po úpravě rovnice 8.10 lze teplotu na výstupu z kondenzátoru  $t_{w2}$  vypočítat jako součet teplot chladicí vody na vstupu do kondenzátoru  $t_{w1}$  a chladicího pásma  $\Delta t_w$ .

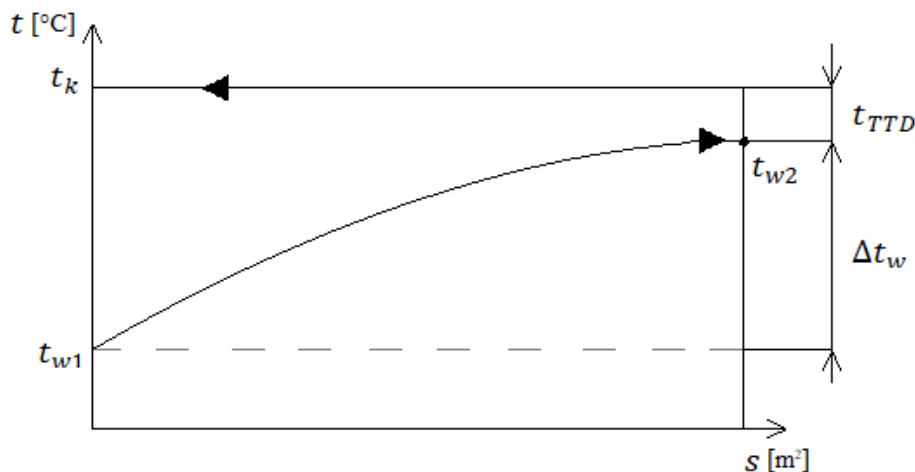
$$t_{w2} = t_{w1} + \Delta t_w \quad (8.11)$$



K získání entalpie páry a vzniklého kondenzátu je nutné nejdříve zjistit teplotu sytosti v kondenzátoru  $t_k$ . Tu lze zjistit jako součet teploty na výstupu z kondenzátoru  $t_{w2}$  a koncového rozdílu teploty  $t_{TTD}$ . Koncový rozdíl teploty  $t_{TTD}$  je v mezích od 2 do 3 °C [2].

$$t_k = t_{w2} + t_{TTD} \quad (8.12)$$

Vzájemné závislosti výše uvedených teplot jsou na obr. 8.3.



Obr. 8.3: Závislost teplot chladicího okruhu

#### 8.4 Entalpie vody a vodní páry

Aby bylo možné vypočítat entalpii páry  $i_p$  a entalpii kondenzátu  $i_k$ , je zapotřebí si nejdříve určit tlak v kondenzátoru  $p_k$ . Tlak v kondenzátoru  $p_k$  se určí za pomoci tabulek vodní páry pro stav sytosti.

$$p_k = f(t_k [\text{°C}]; x [-]) = f(t_k; 1) \quad (8.13)$$

Pro výpočet entalpií je spolu s tlakem v kondenzátoru také důležitá suchost  $x$ . V případě entalpie kondenzátu musí být suchost na výstupu z kondenzátoru nulová.

$$i_k = f(p_k [\text{bar}]; x [-]) = f(p_k; 0) \quad (8.14)$$

Pro páru vcházející do kondenzátoru je entalpie páry  $i_p$  závislá na suchosti  $x = 0,9$ . V tabulkách vody a vodní páry je možné určit pouze entalpii syté páry ( $x = 1$ ).

$$i = f(t_k [\text{°C}]; x [-]) = f(t_k; 1) \quad (8.15)$$

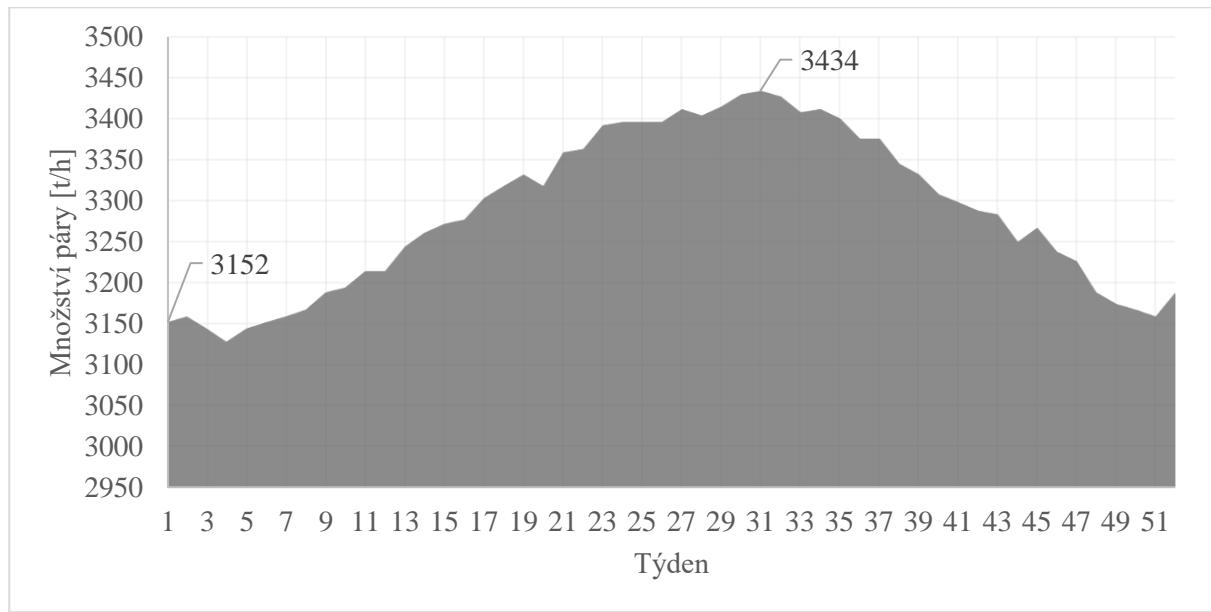
Poté je možné na základě entalpie syté páry  $i$ , syté vody  $i_k$  a suchosti  $x = 0,9$  vypočítat entalpii mokré páry  $i_p$  podle následující rovnice.

$$i_p = i_k + x \cdot (i - i_k) \quad (8.16)$$

Pro výpočet množství doplňkové vody odebírané z vodního zdroje do chladicího okruhu v průběhu roku jsou výše uvedené vzorce a hodnoty dostačující.

## 9 Stanovení množství doplňkové vody

Pro výpočet chladicího okruhu s jednou mokrou chladicí věží o přirozeném tahu je uvažována tlakovodní jaderná elektrárna o nominálním výkonu 1200 MWe. Z koncového dílu parní turbíny odchází do kondenzátoru mokrá pára o suchosti 0,9. Hmotnostní průtok páry, který byl zadán vedoucím práce, není během roku konstantní a jeho grafický průběh je zobrazen na obr. 9.1.



Obr. 9.1: Průtok páry v průběhu roku

Při výpočtu se vychází z návrhových parametrů uvedených v tab. 3. Hodnoty podbarvené šedou barvou jsou mnou zvolené hodnoty, se kterými je řešen následující výpočet. Dále se vychází z některých zjednodušujících předpokladů, jako je zanedbání tepelných ztrát, ztrát průsakem a netěsnostmi a tlakovou ztrátou v kondenzátoru.

Tab. 3: Návrhové parametry [2]

$t_{APPROACH}$ [°C]	$\Delta t_w$ [°C]	$TTD$ [°C]	$COC$ [-]
8	6	2	3
9	7	2,5	4
10	8	3	5
11	9		6
12	10		7
	11		
	12		

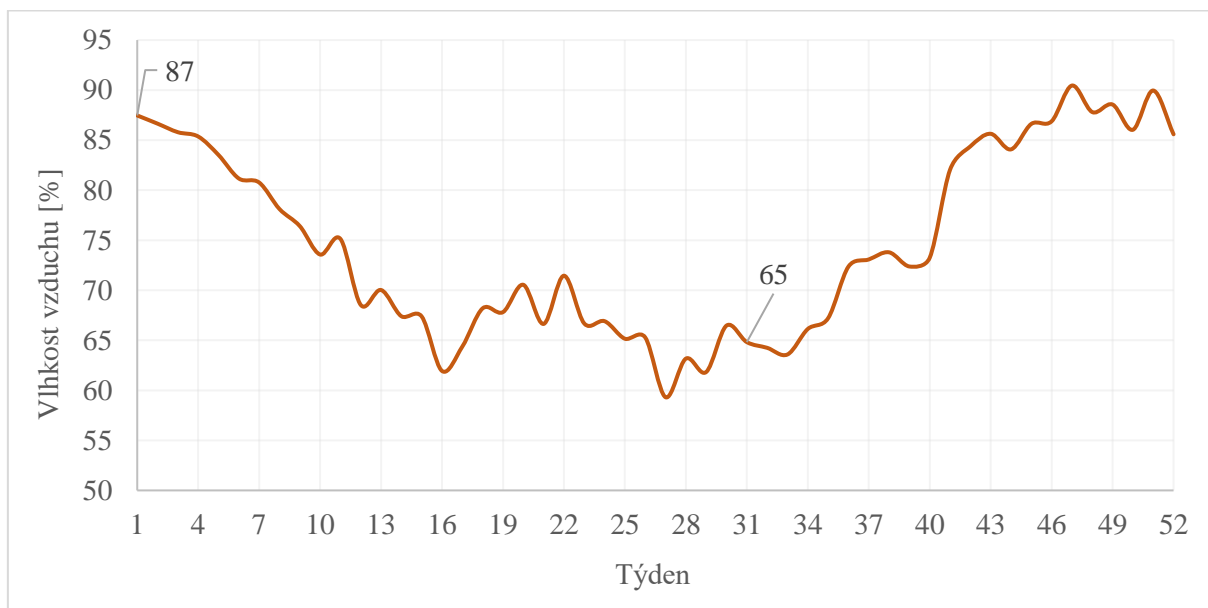
Ke stanovení teploty vlhkého teploměru je použito výpočetní kalkulačky, která byla vyvinuta na Technické fakultě ČZU v Praze [14]. Tlak a entalpie jsou určeny pomocí výpočetního programu X Steam Tables, který vyvinul Magnus Holmgren [10].

Ve výpočetní části práce je uváděn číselný výpočet doplňkové vody pro první týden roku (1.–7. ledna).

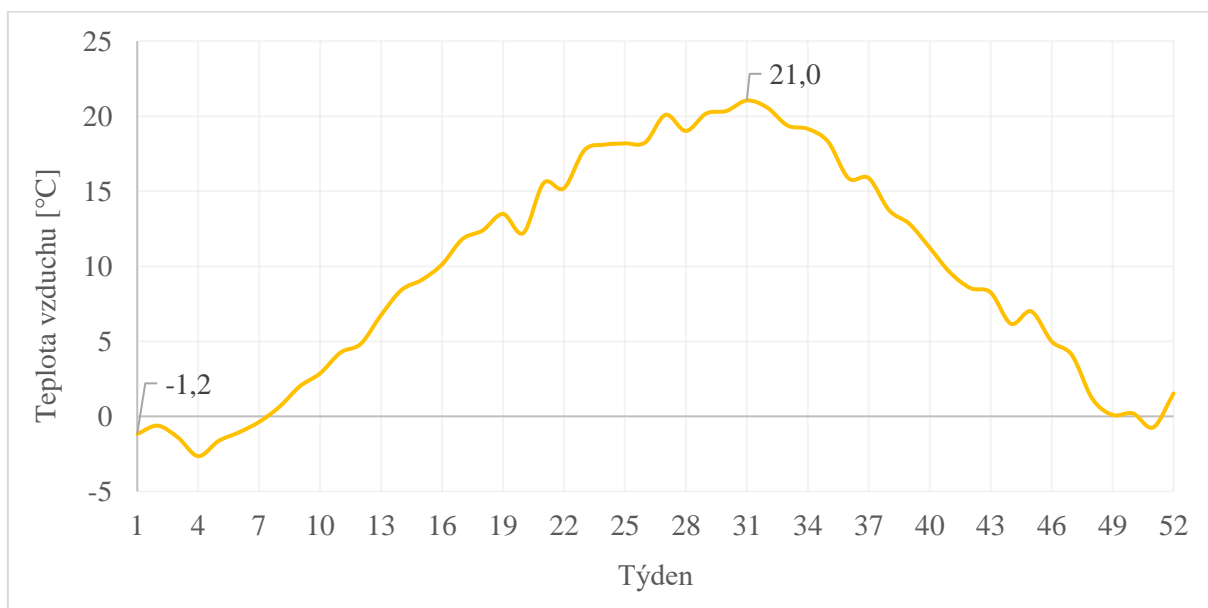
V každém z grafů je vyčíslena hodnota pro 1. týden roku (měsíc leden) a 31. týden roku (měsíc srpen). Tyto hodnoty jsou vykresleny pro lepší přehlednost a orientaci v grafech.

Z portálu ČHMÚ byly vybrány hodnoty relativní vlhkosti  $\varphi_{out}$  a teploty vzduchu  $t_{out}$  v okolí Dukovan z let 2009–2019 [3]. Z těchto hodnot byly následně vytvořeny průměrné hodnoty pro jednotlivé týdny v roce. Tím byly získány teploty a relativní vlhkosti v průběhu roku, při kterých dlouhodobě pracují chladicí věže v Jaderné elektrárně Dukovany.

Vlhkost okolního vzduchu se stejně jako teplota v průběhu roku značně mění. Nejvyšší roční hodnoty obsahu vodní páry ve vzduchu přísluší letnímu období (obr. 9.2) a nejnižší teploty okolního vzduchu zase naopak zimnímu období (obr. 9.3).



Obr. 9.2: Vlhkost okolí v průběhu roku



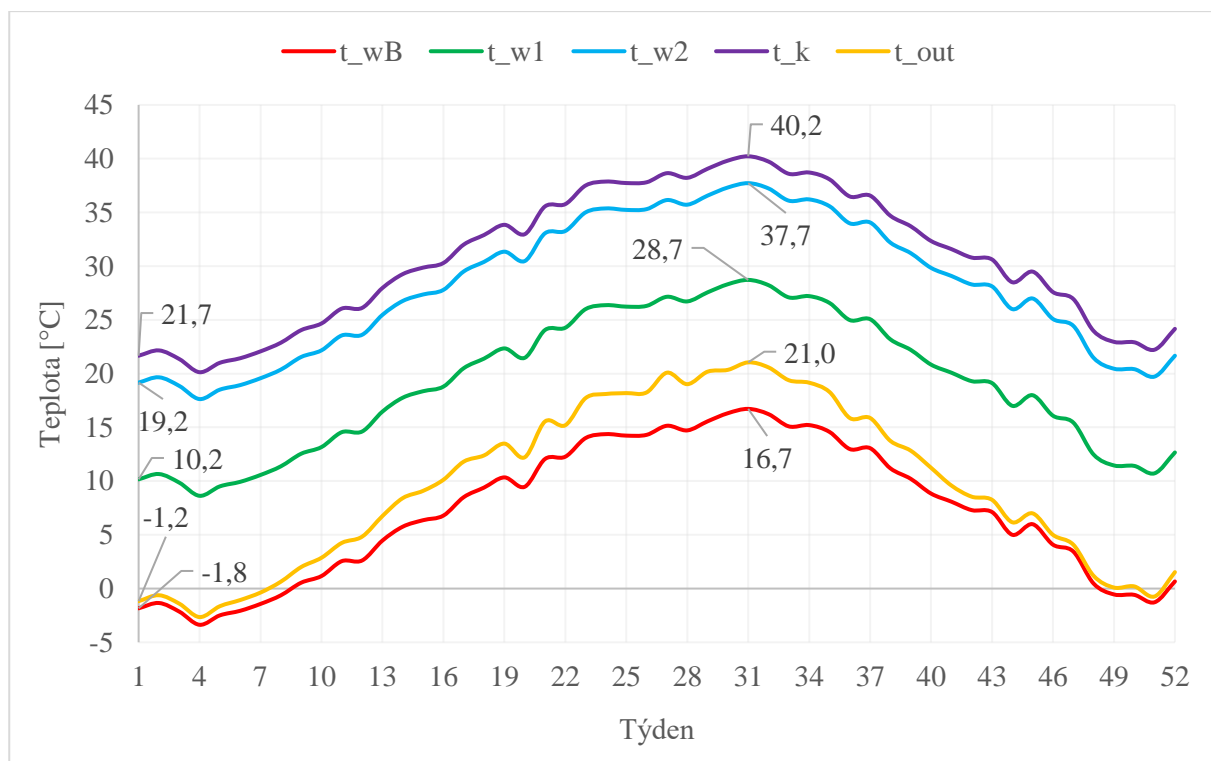
Obr. 9.3: Teplota okolí v průběhu roku

Průměrná teplota okolního vzduchu v prvním týdnu roku činí  $-1,2\text{ °C}$  a relativní vlhkost vzduchu 87 %. S využitím výpočetní kalkulačky je stanovena teplota vlhkého teploměru  $-1,8\text{ °C}$  [14]. Díky návrhovým parametrům  $t_{APPROACH}$ ,  $\Delta t_w$ ,  $t_{TTD}$  a teplotě vlhkého teploměru  $t_{wB}$  jsou vypočteny teploty v chladicím okruhu  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  a teplota v kondenzátoru  $t_k$ . Průběh teplot je uveden na obr. 9.4.

$$t_{w1} = t_{wB} + t_{APPROACH} = -1,8 + 12 = 10,2\text{ °C} \quad (9.1)$$

$$t_{w2} = t_{w1} + \Delta t_w = 10,2 + 9 = 19,2\text{ °C} \quad (9.2)$$

$$t_k = t_{w2} + t_{TTD} = 19,2 + 2,5 = 21,7\text{ °C} \quad (9.3)$$



Obr. 9.4: Závislosti teplot chladicího okruhu

S využitím teploty v kondenzátoru  $t_k$  a X Steam tabulek [10] je možné určit tlak a entalpie v kondenzátoru.

$$p_k = f(21,7; 1) = 0,026\text{ bar} = 2,6\text{ kPa} \quad (9.4)$$

$$i_k = f(0,026; 0) = 90,9\text{ kJ/kg} \quad (9.5)$$

$$i = f(21,7; 1) = 2540\text{ kJ/kg} \quad (9.6)$$

$$i_p = i_k + x \cdot (i - i_k) = 90,9 + 0,9 \cdot (2540 - 90,9) = 2296\text{ kJ/kg} \quad (9.7)$$

Velikost průtoku chladicí vody v terciálním okruhu se poté dopočítá dle rovnice 9.8.

$$\dot{m}_w = \frac{\dot{m}_p \cdot (i_p - i_k)}{c_p \cdot (t_{w2} - t_{w1})} = \frac{3152 \cdot (2296 - 90,9)}{4,18 \cdot (19,2 - 10,2)} = 184\,717 \text{ t/h} \quad (9.8)$$

Doplňková voda je součet ztrát chladicího okruhu, proto je nutno provést následný výpočet ztrát úletem, odparem a odluhem.

$$\dot{m}_u = \frac{0,01 \cdot \dot{m}_w}{100} = \frac{0,01 \cdot 184\,717}{100} = 18,5 \text{ t/h} \quad (9.9)$$

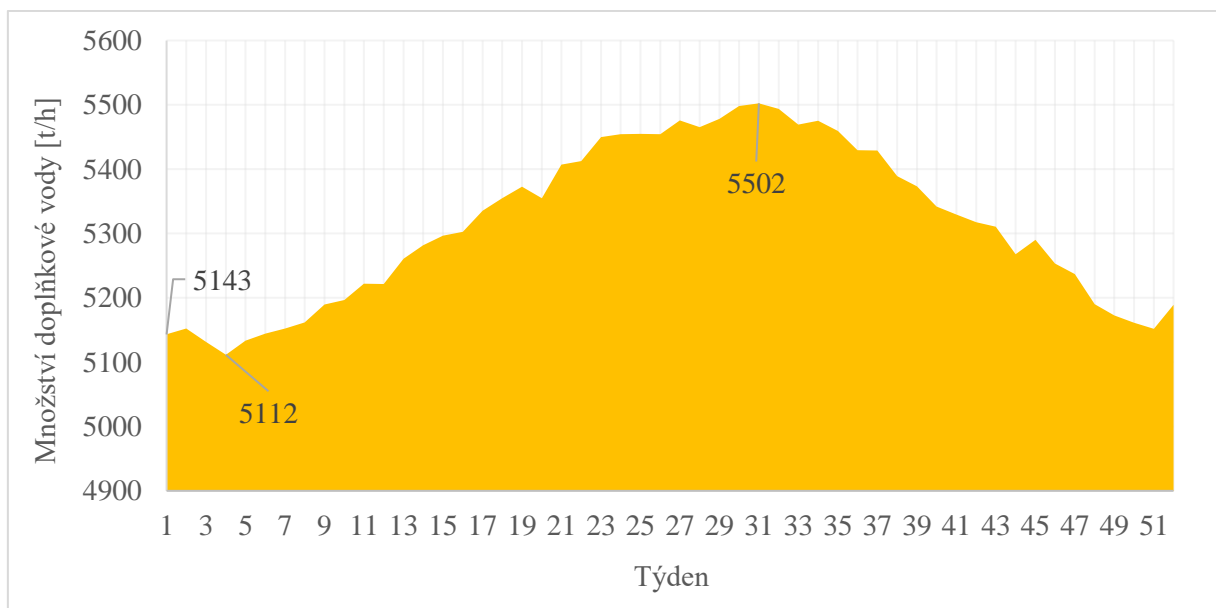
$$\dot{m}_{odpar} = \frac{\dot{m}_w \cdot \Delta t_w \cdot c_p}{H_v} = \frac{184\,717 \cdot 9 \cdot 4,18}{2\,260} = 4099 \text{ t/h} \quad (9.10)$$

$$\dot{m}_{odluh} = \frac{\dot{m}_{odpar}}{COC - 1} = \frac{4099}{5 - 1} = 1025 \text{ t/h} \quad (9.11)$$

Množství doplňkové vody, které je zapotřebí kontinuálně přivádět z řeky Jihlavy do chladicího okruhu v průběhu prvního týdne roku.

$$\dot{m}_{dopl} = \dot{m}_u + \dot{m}_{odpar} + \dot{m}_{odluh} = 18,5 + 4099 + 1025 = 5143 \text{ t/h} \quad (9.12)$$

Přiváděná doplňková voda v průběhu roku je zakreslena v obr. 9.5. Nejméně doplňkové vody je vedeno do chladicího okruhu ve 4. týdnu roku (měsíc leden). Naopak nejvíce vody z vodního zdroje je zapotřebí přivádět v 31. týdnu roku (měsíc srpen).



Obr. 9.5: Množství doplňkové vody v průběhu roku

Z výpočtu doplňkové vody chladicího okruhu se zjistilo, že množství vody, které by bylo zapotřebí odebírat z řeky Jihlavy do jaderné elektrárny o nominálním výkonu 1200 MWe, by se pohybovalo v rozmezí od 5112 t/h do 5502 t/h. Tyto hodnoty byly určovány pouze pro průměrné teploty v okolí Dukovan, proto lze očekávat různé výkyvy, kdy se potřebné množství doplňkové vody bude od těchto hodnot lišit. Odlišné hodnoty mohou nastat při teplotních výkyvech, jako je nadměrný mráz či parno. I při takových teplotách musí být chladicí okruh schopen optimálně pracovat.

Pro porovnání rozdílů mezi průměrnými hodnotami a maximem a minimem teplot byla ze souboru dat vybrána absolutní průměrná denní minimální a maximální teplota okolního vzduchu  $t_{out}$  a jejich příslušná relativní vlhkost  $\varphi_{out}$ . Pro tyto teploty bylo stejným postupem jako pro průměrné hodnoty stanoveno množství doplňkové vody  $\dot{m}_{dopl}$  (tab. 4).

Tab. 4: Hodnoty maxima a minima

	Minimum	Maximum
Teplota vzduchu $t_{out}$ [°C]	-14,3	29,4
Vlhkost vzduchu $\varphi_{out}$ [%]	75	40
Teplota vlhkého teploměru $t_{wB}$ [°C]	-14,9	19,6
Teplota na výstupu z věže $t_{w1}$ [°C]	-2,9	31,6
Teplota na vstupu do věže $t_{w2}$ [°C]	6,1	40,6
Teplota v kondenzátoru $t_k$ [°C]	8,6	43,1
Tlak v kondenzátoru $p_k$ [kPa]	1,1	8,7
Entalpie kondenzátu $i_k$ [kJ/kg]	36,1	180,7
Entalpie mokré páry $i$ [kJ/kg]	2517	2579
Entalpie páry $i_p$ [kJ/kg]	2269	2339
Množství páry $\dot{m}_p$ [t/h]	3119	3552
Množství vody $\dot{m}_w$ [t/h]	185 092	203 813
Množství ztráty úletem $\dot{m}_u$ [t/h]	18,5	20,4
Množství ztráty odparem $\dot{m}_{odpar}$ [t/h]	4108	4524
Množství ztráty odluhem $\dot{m}_{odluh}$ [t/h]	1027	1131
Množství doplňkové vody $\dot{m}_{dopl}$ [t/h]	5154	5675

Množství doplňkové vody se při teplotních výkyvech od průměru liší, ale tato změna není natolik významná, aby ohrozila bezpečný chod jaderné elektrárny.



Obr. 9.6: Zamrzání chladicí věže [12]

V zimním období je odběr doplňkové vody z vodního zdroje obecně nižší, což souvisí s nižším odparem v chladicí věži. Zároveň je v tomto období obecně vyšší průtok řek, a tedy případný problém s nedostatkem vody ve vodním zdroji spadá spíše na období letní. Zásadní problém, který nastává při mrazech (teplotách nižších než  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), je zamrzání vody v chladicích věžích a celém okruhu (obr. 9.6). Při výpočtu doplňkové vody byl uvažován návrhový parametr chladicí věže  $t_{\text{APPROACH}} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , který při nízkých venkovních teplotách jako je uvedené minimum  $-14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (tab.4) nedokáže teplotu na výstupu z věže  $t_{w1}$  uvést nad teplotu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pro tyto případy se používají na chladicích věžích tzv. vodní clony a zimní ochrany, které v případě velkých mrazů zabráňují vstupu okolního vzduchu dovnitř chladicí věže, a tím zabráňují nadměrnému ochlazení chladicí vody vstupující do věže  $t_{w2}$ . Vodní clony a zimní ochrany jsou při výpočtech doplňkové vody zanedbány. Hodnoty, kdy teploty na výstupu z věže  $t_{w1}$  dosahují nižších teplot, než je  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jsou nereálné a nebylo by možné v takovém případě optimálně provozovat chladicí okruh.

V letním období dokáže průměrná denní teplota v okolí Dukovan dosáhnout až  $29,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  (tab. 4). Při takto vysokých teplotách dochází k vyšším ztrátám, tedy i k vyšším odběrům doplňkové vody z vodního zdroje. Zároveň je v letních měsících kvůli suchu a vyšším teplotám okolního vzduchu nižší průtok řek. Aby provoz Jaderné elektrárny Dukovany neohrozil malý průtok řeky, byla na řece Jihlavě vybudována Vodní nádrž Dalešice. Vodní nádrž Dalešice pojme až 144 miliónů kubíků vody, přičemž její stálé nadržení je 59 miliónů kubíků. To znamená, že občasná potřeba vyšších odběrů surové vody v žádném případě neohrozí chod jaderné elektrárny [16].

### 9.1 Množství doplňkové vody v průběhu roku

V jaderných elektrárnách dochází k pravidelnému odstavení za účelem výměny části jaderného paliva, servisu a kontrolám zařízení. Tyto odstávky se provádí pravidelně s frekvencí dvanáct až patnáct měsíců v závislosti na návrhu palivové vsázky. Během odstávky dochází k vychlazení daného bloku jaderné elektrárny. Po tomto vychlazení již není potřeba tak velkého množství vody pro chlazení. Okruh cirkulační chladicí vody je odstaven a v provozu zůstává pouze technická voda důležitá, která zajišťuje odvod zbytkového tepla z odstaveného a vychlazeného reaktoru. Pro návrh terciálního okruhu (okruhu cirkulační chladicí vody) to znamená, že během výměny paliva není jeho provoz nutný.

Pro výpočet je uvažováno s palivovou kampaní dlouhou 15 měsíců a odstávkou trvající 2 měsíce. Což znamená, že dva měsíce ze sedmnácti nebude potřeba odebírat doplňkovou vodu z vodního zdroje. Mnou vypočtené množství doplňkové vody (z rovnice 9.12) tedy bude vynásobeno patřičným koeficientem, čímž získáme průměrný průtok doplňkové vody s uvažováním palivových kampaní a odstávek pro výměnu paliva.

$$\dot{m}_{dopl15/17} = \frac{15}{17} \cdot 5143 = 4538 \text{ t/h} \quad (9.13)$$

K výpočtu množství doplňkové vody v průběhu celého roku je nutné nejdříve vytvořit sumu všech 52 týdnů, což činí 276 305 t/h. Následně součet všech týdnů vynásobit počtem dní v týdnu, počtem hodin během dne a výše uvedeným koeficientem 15/17.

Tím se dosáhlo výsledné hodnoty, která je kromě teploty a vlhkosti okolního vzduchu vysoce závislá i na mnou zvolených návrhových parametrech. Za celý rok by se tedy do jaderné elektrárny o nominálním výkonu 1200 MWe doplnilo z řeky Jihlavy necelých 41 miliónů kubíků vody.

$$\dot{m}_{dopltrok} = \frac{15}{17} \cdot 7 \cdot 24 \cdot 276\,305 = 40\,958\,194 \text{ t/rok} \quad (9.14)$$

Kromě toho, že si chladicí okruh vodu z řeky odebírá, část chladicí vody do řeky i vrací. Jde o ztrátu odluhem  $\dot{m}_{odluh}$ , která v sumě 52 týdnů činí 55063 t/h. Následně se její množství za celý rok vypočítá jako v rovnici 9.14.

$$\dot{m}_{odluhrok} = \frac{15}{17} \cdot 7 \cdot 24 \cdot 55\,063 = 8\,162\,219 \text{ t/rok} \quad (9.15)$$

Odečtením množství odluhu od množství doplňkové vody dojdeme k množství vody, kterou si chladicí okruh z řeky Jihlavy odebere a již nevrátí (chladicí okruh přijde o vodu jinými ztrátami).

$$\dot{m}_{celk} = \dot{m}_{dopltrok} - \dot{m}_{odluhrok} = 40\,958\,194 - 8\,162\,219 = 32\,795\,976 \text{ t/rok} \quad (9.16)$$

Celkové množství odebrané vody z vodního toku, která se do něj již nevrátí, je necelých 33 milionů metrů kubických za rok. Dle [5] je dlouhodobý průměrný průtok řeky Jihlavy do vodní nádrže Dalešice  $5,98 \text{ m}^3/\text{s}$ . Což znamená, že celkem za rok do nádrže přiteče 188 metrů kubických vody viz (9.17)

$$\dot{m}_{přítok} = 5,98 \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 7 \cdot 52 = 188\,068\,608 \text{ t/rok} \quad (9.17)$$

Takovýto přítok do vodního díla Dalešice tedy znamená, že i při uvažování současných dukovanských bloků zbývá dostatečné množství vody v řece Jihlavě pro umožnění provozu nového jaderného bloku o nominálním výkonu 1200 MWe a pro zachování dostatečného průtoku v řece Jihlavě.



## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s typy jaderných elektráren, s jejich funkcí, zejména pak s funkcí jaderných elektráren s lehkovodním tlakovým reaktorem, které se nacházejí v obou českých jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Dále bylo v teoretické části práce popsáno možné chlazení elektráren, chladicí věže, kondenzátory, chladicí voda a obecně celý chladicí okruh jaderné elektrárny.

Ve výpočetní části práce bylo poté cílem optimálně navrhnout množství doplňkové vody v průběhu roku pro jadernou elektrárnu o nominálním výkonu 1200 MWe.

Nejdříve je v této práci uvedena teorie k výpočtu, jsou zde vysvětleny vznikající ztráty v chladicí věži, vodní bilance, entalpie a veškeré změny teplot, ke kterým v chladicím okruhu dochází. Následně jsou navrženy a vypočítány parametry pro chladicí okruh.

Chladicí okruh úzce souvisí s okolními teplotami vzduchu, bylo tedy nutné určit lokalitu jaderné elektrárny pro výpočet v této práci. Jelikož se v současné době uvažuje o možné výstavbě nových jaderných zdrojů v Dukovanech, byly zvoleny hodnoty vzduchu pro oblast Dukovany. Před samotným výpočtem bylo zapotřebí určit pomocí portálu Českého hydrometeorologického ústavu průměrné hodnoty teplot a vlhkostí okolního vzduchu pro 52 týdnů v průběhu roku. Aby průměrné hodnoty odpovídaly dlouhodobému provozu elektráren, byly sestaveny z více po sobě jdoucích let (2009–2019). Z portálu [2] byly stanoveny návrhové parametry pro chladicí okruh jaderné elektrárny. Díky těmto hodnotám a zadanému průtoku množství páry, který byl stanoven vedoucím práce, se následně stanovilo množství doplňkové vody a celkový odběr vody z Vodní nádrže Dalešice za celý jeden rok.

Jaderná elektrárna Dukovany o instalovaném výkonu 2 040 MWe má stávající odběr vody z vodního zdroje okolo 55 000 000 m<sup>3</sup>/rok [16]. Nový zdroj v Dukovanech o nominálním výkonu 1 200 MWe by podle vypočtených hodnot měl odběr vody okolo 33 000 000 m<sup>3</sup>/rok. Tyto číselné výsledky mají od doplňkové vody odečteny ztráty odluhem, tedy množství vody, které se z elektrárny vrátí zpět do vodního zdroje. Aby bylo možné plně nahradit dosluhující jaderné zdroje v Dukovanech, bylo by zapotřebí postavit dva nové jaderné bloky. Podle dokumentace vlivů záměru na životní prostředí [16] je možno z VD Dalešice odebírat pro nové jaderné zdroje v součtu maximálně 73 milionů kubíků ročně. Z toho vyplývá, že by Vodní nádrž Dalešice byla schopna uchlazení k současným čtyřem jaderným blokům o nominálním výkonu 440 MWe další dva jaderné bloky o nominálním výkonu 1200 MWe.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BEČVÁŘ, Josef, a kol. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 1. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1978, 636 s. ISBN 04-226-78.
- [2] Cooling Tower Efficiency Calculations. In: *Chemical Engineering Site* [online]. Chemical Engineering Site, c2016-2020, 27.10.2020 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://chemicalengineeringsite.in/cooling-tower-efficiency-calculations/>
- [3] Denní data dle zákona 123/1998 Sb. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2006 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/historicka-data/pocasi/denni-data/Denni-data-dle-z-123-1998-Sb#>
- [4] DOLEŽAL, Jaroslav, ŠŤASTNÝ Jiří, ŠPETLÍK Jan, BOUČEK Stanislav a BRETT-SCHNEIDER Zbyněk. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 259 s. ISBN 978-80-01-04963-5.
- [5] Dlouhodobé průměrné průtoky v profilech vodních útvarů. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: ČHMÚ, VÚV T. G. M. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://chmi.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=4c9d11fbb8e347e483ec2bc792df09da>
- [6] DRIFT ELIMINATORS: REDUCE WATER LOSS AND EMISSIONS. In: *ENEXIO* [online]. ENEXIO MANAGEMENT, c2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.enexio.com/cooling-solutions/wet-cooling-towers/cooling-tower-components/drift-eliminators/>
- [7] Energostat – aktuální data z energetiky. oEnergetice.cz – denní zpravodajství z energetiky [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energostat>
- [8] Expanded Material Degradation Assessment. In: *Research Gate* [online]. ResearchGate, c2008-2021, 2014 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-natural-draft-cooling-tower-16-Concrete-structures-in-a-generic-NDCT\\_fig11\\_272153597](https://www.researchgate.net/figure/Example-of-natural-draft-cooling-tower-16-Concrete-structures-in-a-generic-NDCT_fig11_272153597)
- [9] HEZOUČKÝ, František, KAŇOVSKÝ Pavel a NAŇO Ján. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze. Strojní fakulta
- [10] HOLMGREN, Magnus. *Excel Engineering: Properties for water and steam* [online]. 2006 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://xsteam.sourceforge.net/>
- [11] CHLADICÍ VĚŽ. In: *Svět Energie* [online]. Praha: Simopt, c2020 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderna-elektrany/jaderna-elektrarna-podrobne/chladici-vez/vyklad>

- [12] JADERNÉ ELEKTRÁRNY 3D. In: *Svět Energie* [online]. Praha: Simopt, c2020, 2017 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/stahuj-zdarma/aplikace/3d-energetika/jaderne-elektrarny-3d>
- [13] Jadrová elektrárna V1. In: *Javys* [online]. Simopt [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.javys.sk/mobile/sk/popup/informacny-servis/multimedia/interaktivne-schemy/jadrova-elektraren-v1>
- [14] KOTEK, Martin. Výpočet teploty vlhkého teploměru. *Meteorologická stanice České zemědělské univerzity v Praze* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <http://meteostanice.agrobiologie.cz/vypocet.php>
- [15] LOUTHAN, Jindřich. *Parní turbíny a kondenzátory: 1. přednáška –Kondenzace a regenerace* [online]. Fakulta strojní Západočeská univerzita v Plzni, 2018 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/104943501-Parni-turbiny-a-kondenzatory.html>. Přednáška. Fakulta strojní Západočeská univerzita v Plzni.
- [16] *Nový jaderný zdroj v lokalitě Dukovany: Dokumentace vlivů záměru na životní prostředí*. Brno: Amec Foster Wheeler, 2017, C1982-16-0. Dostupné také z: [https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX01aUDQ2OV9kb2t1bWVud-GFjZURPQ184MjQzNjcwMzc0Mzc3MjY0MzA4LnBkZg/MZP469\\_dokumentace.pdf](https://portal.cenia.cz/eiasea/download/RUIBX01aUDQ2OV9kb2t1bWVud-GFjZURPQ184MjQzNjcwMzc0Mzc3MjY0MzA4LnBkZg/MZP469_dokumentace.pdf)
- [17] MAJLING, Eduard. S koncem roku skončil i další jaderný blok v Německu, zbylých 6 ukončí provoz do 3 let. In: *OENERGETICE.cz* [online]. 2020 [cit. 2021-04-16]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-evropa/koncem-roku-skoncil-i-dalsi-jaderny-blok-nemecku-zbylych-6-ukonci-provoz-3-let>
- [18] Map Shippingport Atomic Power Station Onagawa Nuclear Plant. In: *PNGHUT* [online]. c2021, 31.3.2016 [cit. 2021-04-18]. Dostupné z: <https://pnghut.com/png/h8tMm212aA/map-shippingport-atomic-power-station-onagawa-nuclear-plant-geospatial-information-authority-of-japan-transparent-png>
- [19] MOLEK, Tomáš. Chladicí soustavy tepelných elektráren. In: *OENERGETICE.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 6. září 2015 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/chladici-soustavy-tepelných-elektraren>
- [20] Polsko přijalo strategii pro transformaci své energetiky. Rozvíjet chce OZE i jádro. In: *OENERGETICE.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2. únor 2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/zahranicni/polsko-prijalo-strategii-pro-transformaci-sve-energetiky-rozvijet-chce-oze-i-jadro>
- [21] PRIS – Reactor status reports – Operational & Long-Term Shutdown – By Type. Object moved [online]. Copyright ©2021 International Atomic Energy Agency [cit. 14.3.2021]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/worldstatistics/OperationalReactorsByType.aspx>

- [22] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2009, 239 s. ISBN 978-80-214-3961-0.
- [23] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 3. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2008, 222 s. ISBN 978-80-214-3770-8.
- [24] Rankine Cycle – Steam Turbine Cycle. *Nuclear Power* [online]. Nuclear Power for Everybody, c2021 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/thermodynamic-cycles/rankine-cycle-steam-turbine-cycle/>
- [25] ŠAPOŠNIKOV, Vsevolod Vladimirovič, František POMAŽL a Ivo POSSELT. *Atmosférické chladiče a chladičí věže*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977, 183 s. Řada strojírenské literatury.
- [26] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, Transformační technologie, 2006-11, [last updated 2020-11-05]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/06.html>.
- [27] TVRDÝ, Miroslav. Návrh programu pro výpočet výkonu a průtoku aktivní zónou z parametrů sekundárního okruhu pro JE s reaktorem VVER 440. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Pavel Nerud.
- [28] VOSTAL, Lukáš. *Železobetonová konstrukce chladičí věže*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Pavel Šulák, Ph.D.
- [29] VÝSTAVBA DVOU VENTILÁTOROVÝCH CHLADICÍCH VĚŽÍ DUKOVANY. In: *REKO PRAHA, a.s.* [online]. Praha: REKO [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.reko-praha.cz/reference/vystavba-dvou-ventilatorovych-chladicich-vezi-dukovany/>
- [30] Zmírnění změny klimatu. In: *Evropská agentura pro životní prostředí* [online]. Copenhagen: EEA Webový tým, 23.11.2020 [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/themes/climate/intro>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
<i>BWR</i>	Varný lehkovodní reaktor	
<i>COC</i>	Počet cyklů koncentrace	–
$c_p$	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	kJ/(kg · K)
<i>ČHMÚ</i>	Český hydrometeorologický ústav	
<i>FBR</i>	Rychlý množivý reaktor	
<i>GCR</i>	Magnoxový reaktor	
<i>HCC</i>	Hlavní cirkulační čerpadlo	
<i>HTGR</i>	Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor	
$H_v$	Latentní teplo	kJ/kg
$i$	Entalpie mokré páry	kJ/kg
$i_k$	Entalpie kondenzátu	kJ/kg
$i_p$	Entalpie páry	kJ/kg
<i>JE</i>	Jaderná elektrárna	
<i>LWGR</i>	Grafitový reaktor chlazený obyčejnou vodou	
$\dot{m}_{celk}$	Hmotnostní průtok odebrané vody vodnímu zdroji	t/rok
$\dot{m}_{dopl}$	Hmotnostní průtok doplňkové vody	t/h
$\dot{m}_{doplrok}$	Hmotnostní průtok doplňkové vody za celý rok	t/rok
$\dot{m}_{dopl15/17}$	Hmotnostní průtok doplňkové vody během kampaně	t/h
$\dot{m}_{odl}$	Hmotnostní průtok odluhu	t/h
$\dot{m}_{odluhrok}$	Hmotnostní průtok odluhu za celý rok	t/rok
$\dot{m}_{odp}$	Hmotnostní průtok odparu	t/h
$\dot{m}_p$	Hmotnostní průtok páry v kondenzátoru	t/h
$\dot{m}_{přítok}$	Přítok vody z řeky Jihlavy do VD za celý rok	t/rok
$\dot{m}_u$	Hmotnostní průtok úletu	t/h
$\dot{m}_w$	Hmotnostní průtok vody terciálního okruhu	t/h
<i>NT</i>	Nízkotlaký	
<i>PHWR</i>	Tlakový těžkovodní reaktor	
$p_k$	Tlak v kondenzátoru	bar; kPa
<i>PWR, VVER</i>	Lehkovodní tlakový reaktor	
<i>RC</i>	Rankin-Clausiův cyklus	
$t_{APPROACH}$	Teplota přiblížení k vlhkému teploměru	°C
$t_k$	Teplota v kondenzátoru	°C
$t_{out}$	Teplota okolního vzduchu	°C
$t_{TTD}$	Koncový rozdíl teplot $t_{w2}$ a $t_k$	°C
$t_{wB}$	Teplota vlhkého teploměru	°C
$t_{w1}$	Teplota chladicí vody na výstupu z věže	°C
$t_{w2}$	Teplota chladicí vody na vstupu do věže	°C
<i>VD</i>	Vodní dílo	
<i>VT</i>	Vysokotlaký	
$x$	Suchost páry	–
$\varphi_{out}$	Relativní vlhkost okolního vzduchu	%
$\Delta t_w$	Teplota chladicího pásma	°C



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Světové zastoupení reaktorů podle států.....	11
Obr. 1.2: Počet jaderných energetických reaktorů ve výstavbě [21] .....	12
Obr. 1.3: Podíl zdrojů na výrobě elektřiny v Polsku, rok 2020 [7].....	13
Obr. 1.4: Podíl zdrojů na výrobě elektřiny v České republice, rok 2020 [7].....	13
Obr. 2.1: Počet jaderných energetických reaktorů v provozu [21] .....	14
Obr. 2.2: Jednookruhový oběh jaderné elektrárny .....	16
Obr. 2.3: Dvouokruhový oběh jaderné elektrárny .....	16
Obr. 2.4: Tříokruhový oběh jaderné elektrárny .....	16
Obr. 3.1: Schéma Rankin-Clausiova cyklu .....	17
Obr. 3.2: T-s diagram ideálního RC cyklu [24] .....	17
Obr. 3.3: Reálný RC cyklus v T-s digramu vody a vodní páry [27].....	18
Obr. 4.1: Schéma jaderné elektrárny [13] .....	19
Obr. 5.1: Způsoby chlazení jaderných elektráren [4].....	22
Obr. 5.2: Japonské jaderné elektrárny s průtočným chlazením [18].....	23
Obr. 5.3: Suché chlazení [19].....	23
Obr. 6.1: Ventilátorová chladicí věž [29] .....	24
Obr. 6.2: Chladicí věž z blízkosti [11] .....	25
Obr. 6.3: Chladicí věže s přirozeným tahem [11] .....	25
Obr. 6.4: Schéma chladicí věže s přirozeným tahem [8] .....	26
Obr. 7.1: Kondenzátor chlazený vzduchem a kondenzátor chlazený vodou [15].....	28
Obr. 7.2: Schématické znázornění parního kondenzátoru [15].....	28
Obr. 7.3: Taprogge kuličky pro čištění trubek kondenzátoru [15].....	29
Obr. 8.1: Lamelový eliminátor pro chladicí věž s přirozeným tahem [6].....	31
Obr. 8.2: Zjednodušené schéma terciálního okruhu.....	32
Obr. 8.3: Závislost teplot chladicího okruhu.....	33
Obr. 9.1: Průtok páry v průběhu roku .....	34
Obr. 9.2: Vlhkost okolí v průběhu roku .....	35
Obr. 9.3: Teplota okolí v průběhu roku.....	35
Obr. 9.4: Závislosti teplot chladicího okruhu .....	36
Obr. 9.5: Množství doplňkové vody v průběhu roku .....	37
Obr. 9.6: Zamrzání chladicí věže [12] .....	39

## **SEZNAM TABULEK**

Tab. 1: Rozdělení jaderných energetických reaktorů [23] .....	15
Tab. 2: Popis bodů v T-s diagramu sekundárního okruhu [27] .....	18
Tab. 3: Návrhové parametry [2] .....	34
Tab. 4: Hodnoty maxima a minima .....	38