



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

OKRUHY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

CIRCUITS OF NUCLEAR POWER PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Pavlíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Martin Pavlíček**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2019/20

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:

Okruhy jaderných elektráren

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jaderné elektrárny mají podle typu reaktoru dva až tři okruhy. Znalost jednotlivých okruhů u jaderných elektráren je důležitá vzhledem k principu funkce a jaderné bezpečnosti.

Cíle bakalářské práce:

- teorie jaderné energetiky
- rešerše nejčastěji provozovaných jaderných reaktorů
- popis jednotlivých okruhů v jaderné elektrárně
- okruhy v jaderné elektrárně a jaderná bezpečnost

Seznam doporučené literatury:

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

KLIK, František a Jaroslav DALIBA. Jaderná energetika. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 189 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-01-02550-0.

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.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje historii a začátkům jaderné energetiky, vysvětlení základních poznatků jaderné energetiky a uvedení do dané problematiky. Poté je popsáno rozdělení jaderných reaktorů podle různých kritérií. Dále je popsáno řešení jednotlivých okruhů v jaderné elektrárně podle typu použitého reaktoru. Jednotlivé okruhy jsou popsány na jaderné elektrárně Temelín. Poslední část se věnuje jaderné bezpečnosti a různým bezpečnostním systémům, bez kterých by jaderná elektrárna nemohla být spuštěna.

Klíčová slova

Jaderná energetika, jaderné reaktory, okruhy jaderných elektráren, jaderná bezpečnost.

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the history and beginnings of nuclear energy, an explanation of the basic knowledge of nuclear energy and an introduction to the issue. Then, the division of nuclear reactors according to various criteria is described. Furthermore, the solution of individual circuits in a nuclear power plant is described according to the type of reactor used. The individual circuits are described at the Temelin nuclear power plant. The last part deals with nuclear safety and various safety systems, without which a nuclear power plant could not be started.

Key words

Nuclear energetics, nuclear reactors, nuclear power plant circuits, nuclear safety.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLÍČEK, Martin. *Okruhy jaderných elektráren* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124309>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *bakalářskou* práci na téma **Okruhy jaderných elektráren** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Martin Pavlíček

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Pavlovi Milčákovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 JADERNÁ ENERGETIKA.....	12
1.1 Historie.....	12
1.2 Jaderné palivo	12
1.3 Výroba elektrické energie v jaderné elektrárně	13
2 Jaderné reaktory.....	15
2.1 Druhy jaderných reaktorů	15
2.1.1 Tlakovodní reaktor	16
2.1.2 Varný reaktor.....	17
2.1.3 Těžkovodní reaktor	18
2.1.4 Plynem chlazený reaktor	19
2.1.5 Lehkovodní grafitový reaktor.....	20
2.1.6 Rychlý množivý reaktor	21
2.2 Reaktory I. generace	22
2.3 Reaktory II. generace	23
2.4 Reaktory III. generace.....	23
2.5 Reaktory III+. generace	23
2.6 Reaktory IV. generace	24
3 Okruhy v jaderných elektrárnách	25
3.1.1 Jednookruhové elektrárny	25
3.1.2 Dvouokruhové elektrárny.....	26
3.1.3 Tří okruhové elektrárny.....	26
3.2 Primární okruh	27
3.2.1 Parogenerátor	27
3.2.2 Cirkulační čerpadlo	29
3.2.3 Kompenzátor objemu	31
3.2.4 Hlavní cirkulační potrubí	31
3.3 Sekundární okruh	32
3.3.1 Parní turbína	32
3.3.2 Elektrický generátor	34
3.3.3 Kondenzační systém.....	35
3.3.4 Separátor a přehřívák páry	36
3.3.5 Nízkotlaká regenerace	36
3.3.6 Napájecí zařízení	36
3.3.7 Vysokotlaká regenerace	37
3.4 Chladicí okruh.....	37
3.4.1 Chladicí věž.....	37
4 BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY JADERNÝCH ELEKTRÁREN	39
4.1 Jaderná bezpečnost	39
4.1.1 Pasivní bezpečnost	39
4.1.2 Aktivní bezpečnost.....	39
4.1.3 Bezpečnostní bariéry	39

4.1.4	Ochrana do hloubky	40
4.2	Bezpečnostní systémy reaktoru AP1000	41
4.2.1	Automatický systém odtlakování ADS	41
4.2.2	Pasivní chladicí systém jádra PXS	41
4.2.3	Pasivní odstraňování zbytkového tepla	42
4.2.4	Doplnění chladicí látky reaktoru s nízkým tlakem.....	42
4.3	Jaderná havárie	42
4.3.1	Stupnice hodnocení jaderných událostí.....	43
4.3.2	Havárie Černobyl	44
4.3.3	Havárie Jaslovské Bohunice	44
	ZÁVĚR.....	46
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	47
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK	52

ÚVOD

Jaderná energetika hraje v dnešní době významnou roli ve výrobě elektrické energie. Výroba elektřiny v jaderných elektrárnách se dostává stále více do popředí. V Evropě už tvoří výroba elektřiny z jádra skoro jednu třetinu. Mezi jednu z výhod jaderné elektrárny patří téměř nulový únik skleníkových plynů do ovzduší. Do budoucna hovoří pro jadernou energetiku i zásoba surovin pro výrobu paliva.

Začátky jaderné energetiky započaly na konci 19.století. Během několika let vědci přišli na různé druhy jaderných reaktorů, které se postupně vyvíjeli a zdokonalovali. V dnešní době jsou ve výstavbě i několik nejnovější typů reaktorů, založených na recyklaci použitého paliva, které většina nyní používaných elektráren neumí využít.

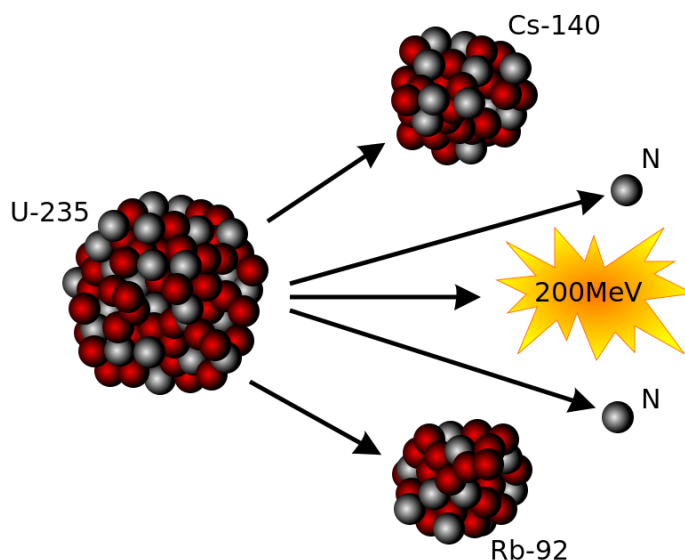
1 JADERNÁ ENERGETIKA

1.1 Historie

Historie jaderné energetiky sahá do roku 1896, kdy H. Becquerel objevil přirozenou radioaktivitu a v roce 1905 Albert Einstein zformuloval poznání o ekvivalenci hmoty a energie. Již tehdy se ukázalo, že za specifických podmínek může být hmota zdrojem velkého množství energie.

Problém byl v tom, že při přirozeném radioaktivním rozpadu se energie uvolňuje pomalu. E. Rutherford zahájil v roce 1919 období umělých přeměn prvků za pomoci přirozeného radioaktivního rozpadu.

Zlom nastal až v roce 1939, kdy O.Hahn a F. Strassmann experimentálně zjistili, že ozářený uran se v některých případech štěpí. V praxi tuto reakci poprvé využil E.Fermi dne 2.prosince 1945 v grafitovém reaktoru CP-1 o výkonu 0,5 W. Poté následovala série dalších úspěšných pokusů o realizovatelnou štěpnou reakci v jaderném reaktoru. [1]



Obr. 1.1.1 Jedna z možností štěpení jádra uranu neutronem. [2]

1.2 Jaderné palivo

Jaderné palivo je palivo, které slouží k udržení jaderné štěpné reakci. Mezi nejběžnější paliva je dneska používán uran ^{235}U a plutonium ^{238}Pu .

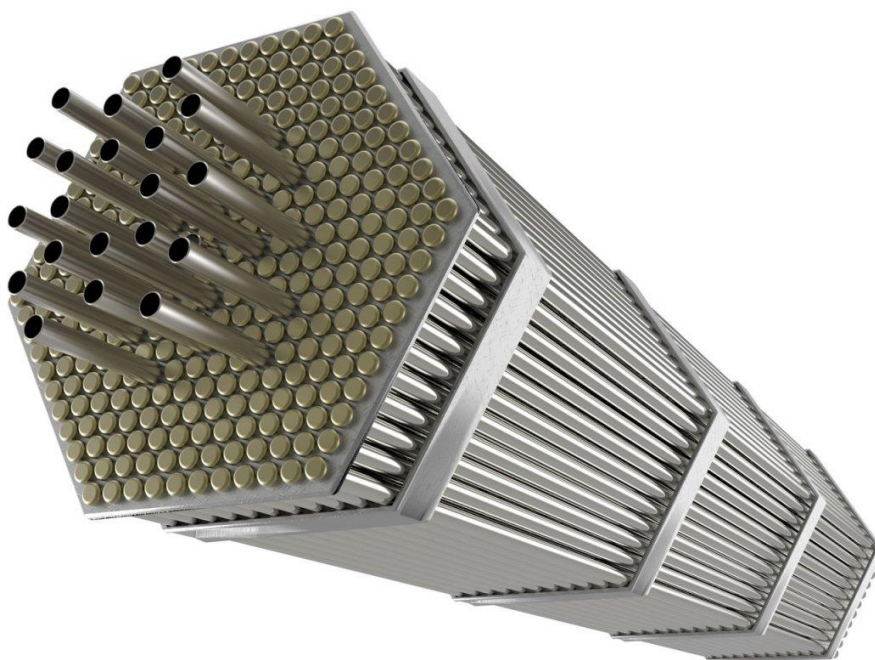
Uran po vytěžení je nutné obohatit. Nejčastější metody obohacování uranu jsou difúze a odstředivá metoda, popřípadě kombinace obou metod. Výsledkem obohaceného paliva je uran, který má větší obsah izotopu ^{235}U než přírodní uran. Obohacený uran totiž umožňuje s reaktorem pracovat na potřebném výkonu i po dlouho dobu.

Důležitou otázkou je, jak naložit s použitým jaderným palivem. Po vyhoření paliva v něm totiž zůstává velké množství nespoteřovaného uranu, plutonia a dalších těžkých prvků. V současnosti se vyhořelé palivo ukládá do připraveného bazénu vedle reaktoru na dobu přibližně 4 let. Palivo musí být neustále chlazeno, protože radioaktivním rozpadem v palivových článkách stále produkuje teplo. [3]

V dnešní době existují 3 varianty, jak naložit s radioaktivním odpadem. Jedna možnost je po ochlazení paliva v bazénu ho uchovat v hlubinných uložistištích. Uložistiště jsou umístěna hluboko pod povrch Země, aby byly mimo dosah biosféry. Bezpečnost uložistiště je důkladně

kontrolována, aby nedošlo k žádnému kontaktu s odpadem. Další alternativou je okamžité přepracování vyhořelého paliva. Došlo by tak k úbytku odpadu a ke snížení spotřeby paliva. V dnešní době se spotřebovává pouze 10 % vyhořelého paliva. Je to způsobené hodně vysokou cenou. Poslední možností je palivo uchovat a počkat až se zefektivní a zlevní přepracování paliva nebo objeví se nová účinnější technologie na přepracování vyhořelého paliva. [4], [5]

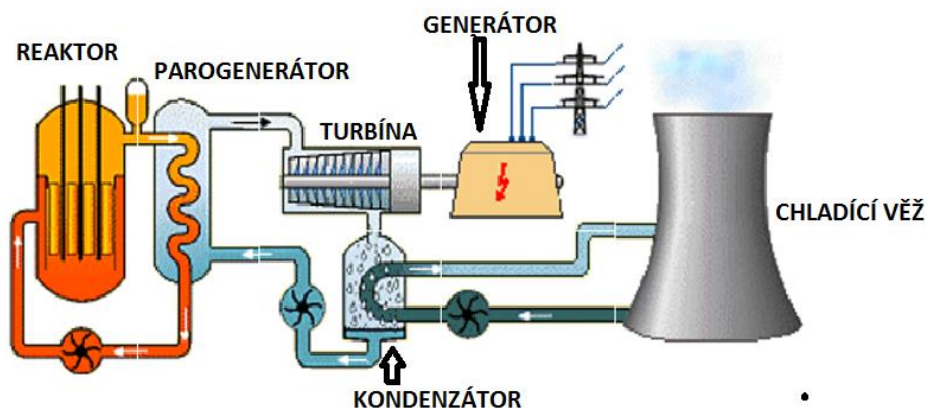
Dneska už existuje palivo vzniklé z přepracovaného jaderného paliva – palivo MOX. Toto palivo je tvořeno směsí plynů oxidu uraničitého UO_2 a oxidu plutoničitého PuO_2 , který vzniká jako vedlejší produkt při jaderných reakcích v reaktoru. MOX je používán převážně v Evropských zemích a Japonsku. V Evropě ho hojně využívají státy jako Francie, Švýcarsko, Belgie, Německo. [6]



Obr. 1.2 Model palivové kazety s trubkami obsahující regulační tyče. [7]

1.3 Výroba elektrické energie v jaderné elektrárně

Jaderné elektrárny jsou ve světě stále více populární a v současnosti v ČR je 34% energie vytvořeno právě v jaderných elektrárnách. [8] Na Obr. 3 je vidět základní schéma jaderné elektrárny, ve které se nachází nejpoužívanější typ reaktoru – tlakovodní.



Obr. 1.3 Základní schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem. [9]

Jako ve všech elektrárnách, tak i v jaderné vzniká elektřina v generátoru, který je poháněn turbínou. Sekundární okruh jaderné elektrárny pracuje na stejném principu jako sekundární okruh elektrárny uhelné. V uhelné elektrárně teplo k vytvoření páry vzniká spalováním uhlí, přičemž v jaderné se využívá teplo vznikající při řízené štěpné reakci jader uranu. Při štěpné reakci, která probíhá v reaktoru, vzniká velké množství tepla, které je vedeno pomocí chladiva, převážně vodou. Voda cirkulující v primárním okruhu, předává svoji tepelnou energii vodě sekundárního okruhu. Tento proces probíhá v tepelném výměníku tzv. parogenerátoru. Voda se v sekundárním okruhu přemění na páru a ta putuje na turbínu, která roztáčí generátor. V generátoru se mechanická energie mění na energii elektrickou. Do kondenzátoru přichází z turbíny pára, která zde kondenzuje a vrací se zpátky do parogenerátoru ve formě vody. Teplo z kondenzátoru je odváděno za pomoci vody terciálního okruhu, která je následně ochlazována v chladící věži. [10]

2 Jaderné reaktory

Jaderný reaktor je takovým srdcem jaderné elektrárny. Je to technické zařízení, které je tvořeno tlakovou nádobou s odnímatelným víkem, pod kterým se nachází aktivní zóna. V aktivní zóně najdeme systém pro řízenou štěpnou reakci a jaderné palivo. Jaderný reaktor se skládá z paliva, moderátoru, absorbátoru a chladiwa, konstrukčních materiálů a řídicích systémů.



Obr. 2.1 Tlaková nádoba jaderného reaktoru v čínské jaderné elektrárně. [11]

Palivo je v jaderném reaktoru dodáváno formou palivových kazet. Kazetu tvoří palivové proutky o velikosti cca 9 mm, ve kterých jsou malé tabletky paliva naskládané na sebe, a ochranný povlak.

Další složku v jaderném reaktoru tvoří moderátor. Používá se pouze u tepelného jaderného reaktoru a slouží ke zpomalování rychlých neutronů vzniklých ze štěpné reakce. Převážně se používá jako moderátor voda, těžká voda nebo případně i grafit.

Dál se v jaderném reaktoru nachází absorbátor. Jak už název napovídá, tak absorbátor slouží k pohlcení neutronů. Absorbátor, nejčastěji ve formě kyseliny borité H_3BO_3 , se nachází v reaktoru také ve formě tyčí, podobně jako palivo. Palivové tyče se většinou skládají ze dvou částí – jedna část je palivo a druhá absorbátor. Podle zasunutí tyče se dá regulovat výkon reaktoru a případně i úplně zastavit.

Poslední důležitou částí je chladiwo. Hlavní funkcí chladiwa je odvod tepla vzniklé při štěpení jader. Nejčastěji se používá obyčejná voda, těžká voda, oxid uhličitý a případně soli nebo slitiny. [12]

2.1 Druhy jaderných reaktorů

V současnosti je ve světě v provozu více než 440 jaderných reaktorů. Jaderné reaktory se dělí na šest základních typů, podle druhu odvádění tepla, podle látky, která zpomaluje neutrony a také podle druhu paliva. [13]

Tab. 2.1 Přehled používaných jaderných reaktorů ke konci roku 2019. [13]

Typ reaktoru	Hlavní země	Počet	Výkon v Gwe	Palivo	Chladivo	Moderátor
Tlakovodní (PWR)	USA, Francie, Japonsko, Rusko, Čína, Jižní Korea	300	284	Obohacený UO ₂	voda	voda
Varný (BWR)	USA, Japonsko, Švédsko	65	65	Obohacený UO ₂	voda	voda
Těžkovodní (PHWR)	Kanada, Indie	48	24	Přírodní UO ₂	těžká voda	těžká voda
Plynem chlazený (AGR)	Velká Británie	14	8	Přírodní a obohacený UO ₂	CO ₂	grafit
Lehkovodní grafitový (RBMK)	Rusko	13	9	Obohacený UO ₂	voda	grafit
Rychlý množivý (FBR)	Rusko	2	1.4	Směs UO ₂ a PuO ₂	tekutý sodík	-
Celkem		442	391			

2.1.1 Tlakovodní reaktor

Tlakovodní reaktor nesoucí zkratku PWR anebo VVER je v současnosti nejpoužívanějším typem jaderného reaktoru. Ve světě představuje cca 60 % všech světových jaderných reaktorů. [14]

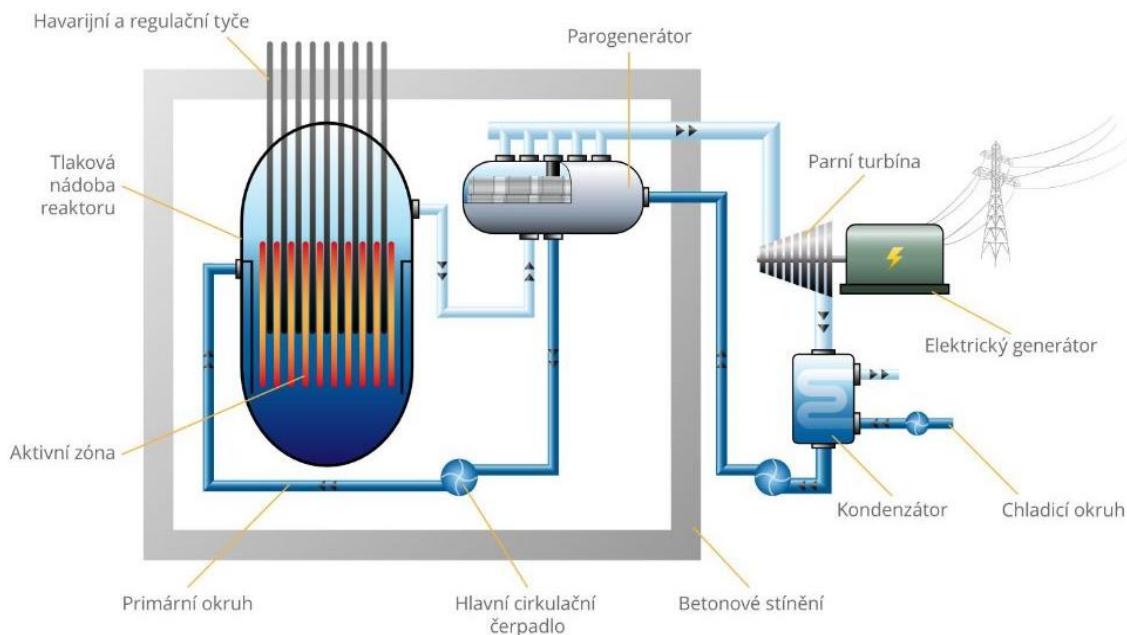
Kvůli své vysoké bezpečnosti měli reaktory nejprve sloužit pro americkou armádu jako pohon pro jadernou ponorku. Tuto koncepci pak převzalo Rusko, tehdy Sovětský svaz, kde jsou známy tlakovodní reaktory pod zkratkou VVER. [15]

Palivem v tlakovodním reaktoru je obohacený uran izotopem ²³⁵U na 3 % - 4,4 % ve formě tabletek oxidu uraničitého, který je uspořádán ve formě palivových tyčí. Výměna paliva probíhá zpravidla jednou za rok maximálně za rok a půl při odstaveném reaktoru. Nahradím se přibližně třetina vyhořelých článků. [14], [16]

Moderátorem a zároveň i chladivem je zde lehká voda H₂O. Tato voda je demineralizovaná a proudí v primárním okruhu pod velmi vysokým tlakem a vysokou teplotou okolo 300 °C v kapalném stavu. [14]

Výhodou tlakovodního reaktoru je jeho bezpečnost způsobena negativním teplotním koeficientem. Když voda začne zvyšovat svou teplotu a začne se vypařovat, dojde ke zpomalení štěpné reakce, což zabrání nebezpečí v aktivní zóně.

Mezi nevýhody patří vysoký tlak chladicí kapaliny. V případě závady v potrubí chladivo rychle uniká, a proto musí být reaktor opatřen několika záložními zařízeními. [17]



Obr. 2.2 Schéma tlakovodního reaktoru PWR. [14]

2.1.2 Varný reaktor

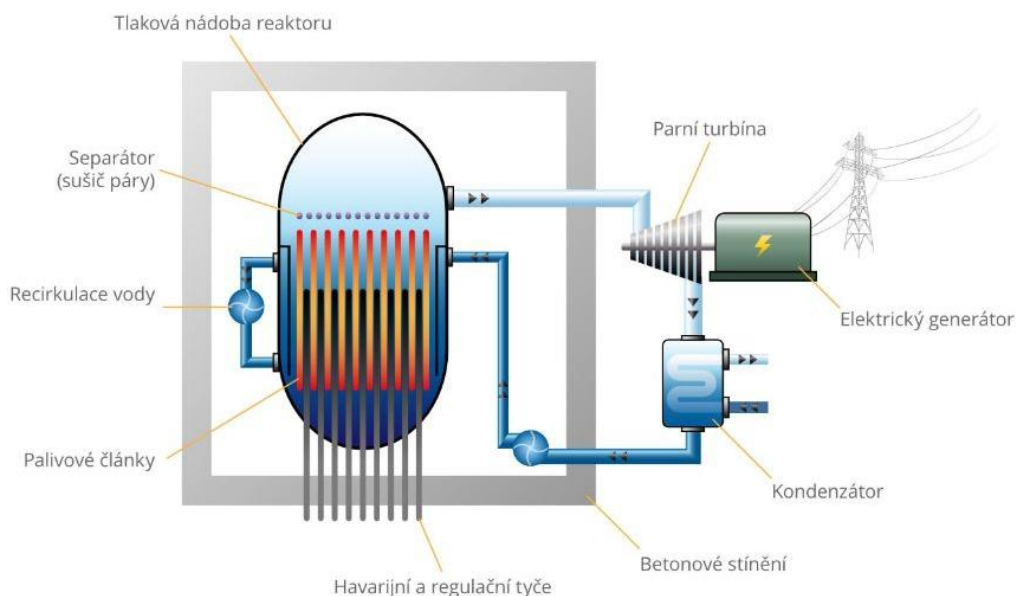
Druhým nejrozšířenějším typem reaktoru je varný reaktor BWR. V současnosti je v provozu 65 varných reaktorů, což představuje cca 15 % všech reaktorů na světě. Největší rozšíření tohoto typu reaktoru se nachází v Japonsku, USA a Švédsku (viz tab. 2.1). [18]

Palivem je podobně jako u typu PWR obohacený uran izotopem ^{235}U , ale pouze na 2,1 % až 2,6 %. Výměna paliva je stejná jako u PWR, což znamená přibližně jednou za rok dochází k výměně.

Chladivem a moderátorem je obyčejná voda. Oproti tlakovodnímu reaktoru dochází k varu vody už v primárním okruhu. Za těchto podmínek je teplota varu cca 286 °C a tlak vody se pohybuje kolem 7 MPa. [14], [18]

Výhodou varného reaktoru je jeho jednoduchost. Používá se v jednobokových elektrárnách, které se vyznačují nižšími náklady. Varný reaktor totiž nepotřebuje parogenerátor, protože pára potřebná k roztocení turbíny vzniká přímo v reaktoru. Další předností je jednoduchost regulace výkonu pomocí regulace množství protékající vody v primárním okruhu.

Z výhody se ale stává i nevýhoda. Turbína je totiž zanášena lehce radioaktivní parou, která se vytváří v generátoru. Jelikož se v reaktoru nachází voda i pára, tak to zatěžuje i bezpečnostní analýzu. V případě, kdyby došlo k výpadku napájení tzv. blackout, je složité odstavit reaktor. Tato situace se stala osudnou pro jadernou elektrárnu Fukušima v roce 2011. [16], [17]



Obr. 2.3 Schéma varného typu reaktoru. [14]

2.1.3 Těžkovodní reaktor

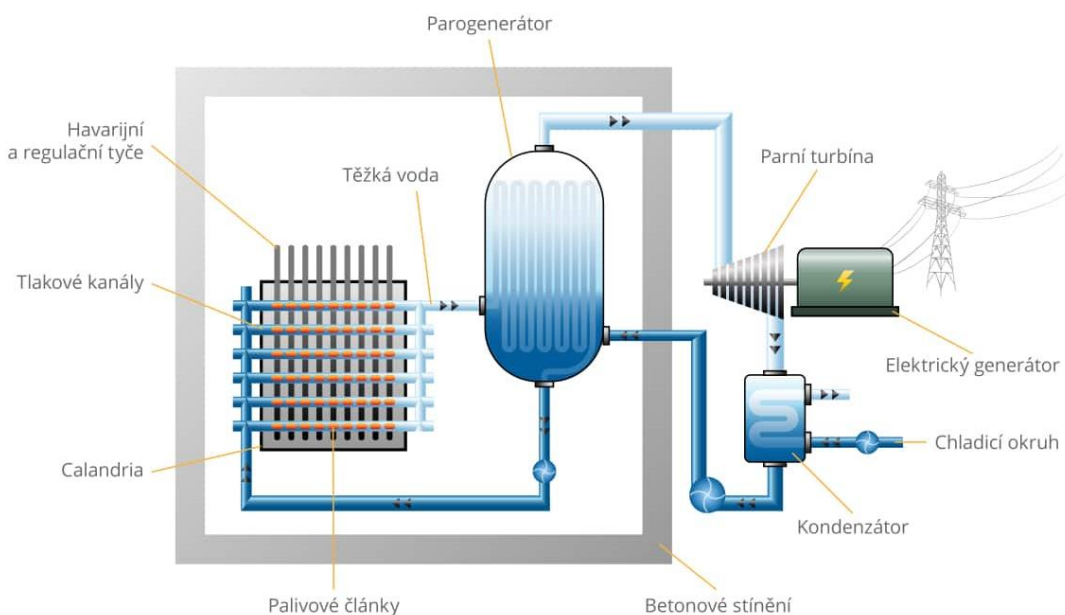
Dalším typem jaderného reaktoru je těžkovodní reaktor se zkratkou CANDU. Reaktor byl navržen a postaven v 50. letech 20. století v Kanadě, odkud pak byl exportován třeba do Indie, Argentiny anebo třeba do Rumunska. Všechny jaderné elektrárny v Kanadě jsou poháněny CANDU reaktorem. [19]

Reaktory CANDU je jedinečný v tom, že jako palivo používá přírodní neobohacený uran. Často se používá jako palivo materiál z vyrazených jaderných zbraních, což ve značné míře snižuje náklady a globální problémy. [20]

Jak už název napovídá, moderátorem a chladivem je těžká voda D_2O . Rozdíl mezi lehkou vodou a těžkou je v tom, že molekuly těžké vody obsahují místo atomů vodíku jeho izotop deuterium. Těžká voda snadno neabsorbuje neutrony, proto se nemusí obohacovat uran jako palivo. Díky těmto vlastnostem je těžká voda nejúčinnějším dostupným moderátorem. [21]

Mezi velkou výhodou CANDU reaktoru patří tzv. online doplňování paliva. Palivové složky jsou totiž umístěny v horizontálních trubkách. Tyto nádoby mohou být naloženy vzdáleně z obou konců, tím pádem nemusí dojít k odstávce reaktoru. Další výhodou jsou nízké náklady na palivo, jelikož se uran nemusí obohacovat. Reaktory CANDU jsou mimořádně bezpečné. Bezpečnostní systémy pracují nezávisle na elektrárně a každá důležitá bezpečnostní složka má tři zálohy. [20]

K nevýhodám patří velká spotřeba těžké vody a s tím i spojené náklady, protože těžká voda je nákladná na výrobu. Další nevýhodou by mohl být kladný tepelný koeficient, který musí být kompenzován jinými absorpcemi materiály. [19], [20]



Obr. 2.4 Schéma těžkovodního reaktoru CANDU. [14]

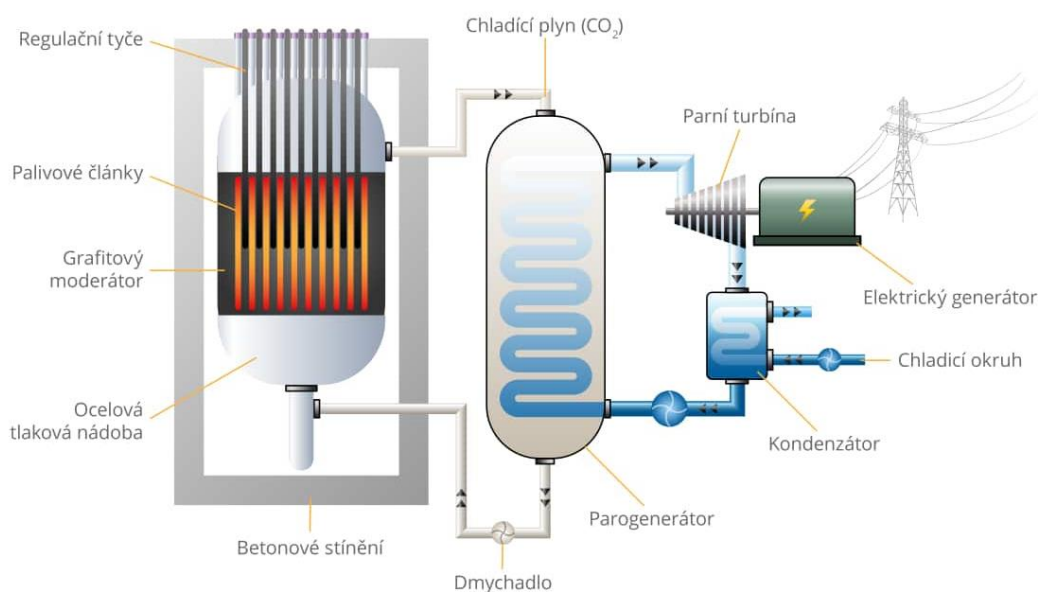
2.1.4 Plynem chlazený reaktor

Magnox GCR je plynem chlazený reaktor používající se převážně ve Velké Británii. V dnešní době tento typ už dosluhuje a je nahrazen novou generací AGR. Novějších typů je na světě momentálně 14 a všechny jsou ve Velké Británii.

Palivem v AGR jsou pelety uranu obohaceného izotopem ^{235}U ve formě oxidu uraničitého. Jelikož AGR fungují při vysoké teplotě plynu, aby se dosáhlo zlepšení tepelné účinnosti, a proto je potřeba, aby plášť paliva z nerezové oceli odolal vysokým teplotám. Nerezové opláštění paliva zachytí víc neutronů než první generace Magnox, proto je nutné pouze nízké obohacení palivo. [22]

Stejně jako u první generace Magnox, tak i AGR používá jako moderátor grafit a chladiivo oxid uhličitý. Ten dosahuje tlaku 2,75 MPa a teploty až 650 °C.

Mezi výhodou patří stejně jako u těžkovodního reaktoru doplňování paliva přímo za provozu bez odstávky reaktoru. [23]



Obr. 2.5 Schéma první generace plynem chlazeného reaktoru Magnox GCR. [14]

2.1.5 Lehkovodní grafitový reaktor

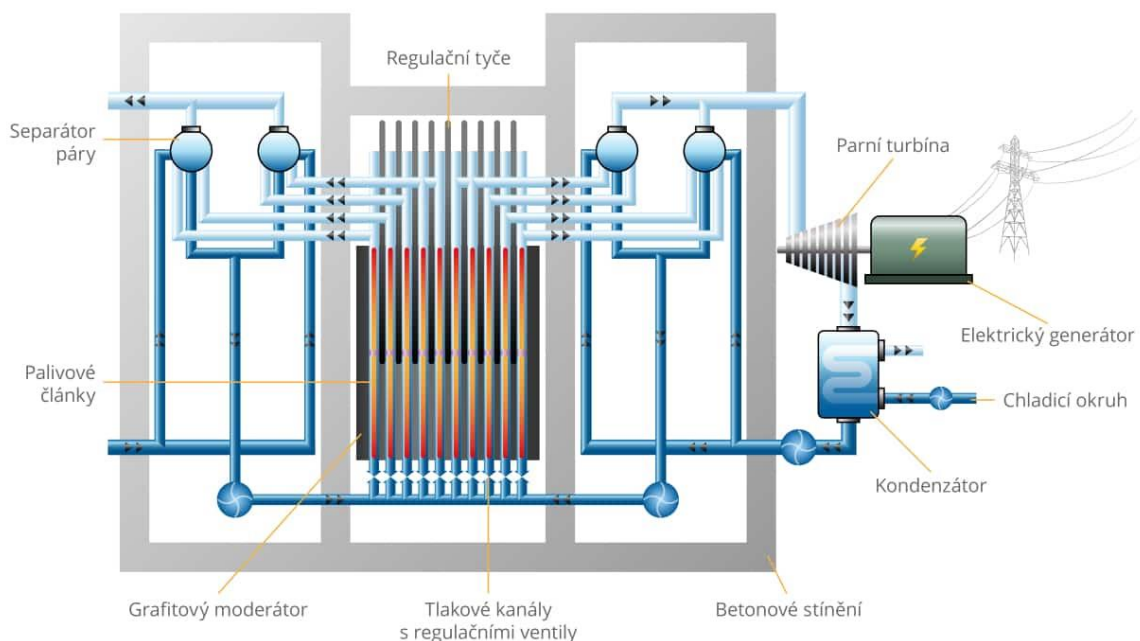
Reaktory RBMK známe i pod zkratkou LWGR se používají na území bývalého Sovětského svazu. V současnosti je v provozu 13 reaktorů, ale další reaktory tohoto typu už se nestaví. Typ RBMK byl použit v první jaderné elektrárně v Obninsku. Stejný byl použit i ve světově známé jaderné elektrárně v Černobylu, kde se stala největší jaderná havárie všech dob. [12]

Jako palivo se používá přírodní anebo mírně obohacený uran ve formě oxidu uraničitého. Palivové tyče jsou uloženy v reaktoru v kanálech, kudy proudí i chladivo, které je zde ve formě obyčejné vody. Voda dosahuje až teploty 290 °C.

Jako moderátor je zde použit grafit, který obklopuje kanály.

Výhodou tohoto reaktoru je, že elektrárna je jednookruhová, kdy pára z reaktoru proudí přímo do turbíny a vytváří se tak elektrická energie. Další výhodou je možnost výměny paliva za provozu tzv. online tankování.

Naopak mezi nevýhody patří kladný koeficient reaktivity a také nestabilita reaktoru. Pokud dojde k přerušení dodávky chladicí vody, reaktor se začne přehřívat a vzroste tlak v aktivní zóně reaktoru. Tím bude štěpná reakce samovolně růst, protože je přítomný grafitový moderátor. Pokud by selhaly tedy bezpečnostní systémy, mohlo by dojít ke stejné havárii jako v Černobylu. [24]



Obr. 2.6 Schéma jaderného reaktoru typu RBMK. [14]

2.1.6 Rychlý množivý reaktor

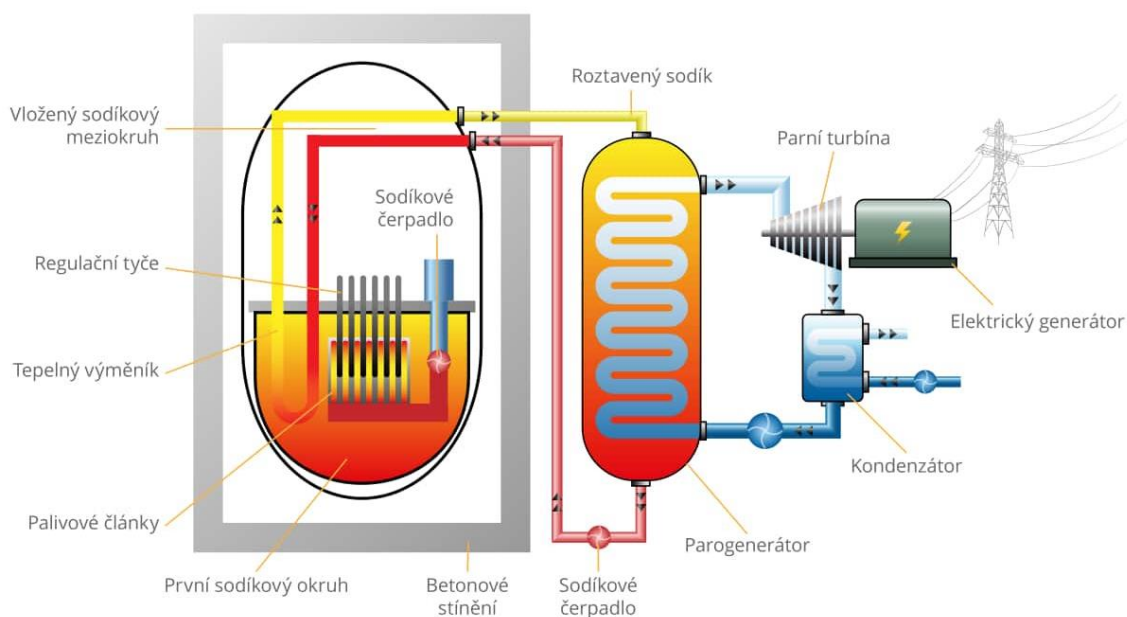
Množivý reaktor FBR je nejmodernější typ jaderných reaktorů. FBR reaktor se liší od klasického tlakovodního reaktoru tím, že neobsahuje moderátor. Řízená štěpná reakce zde probíhá působením nezpomalených, rychlých neutronů. V provozu se jich v dnešní době nachází přibližně 20, ale ne všechny jsou určeny pro výboru elektřiny. Některé se používají čistě na vědecké výzkumy, ale také k výzkumu odsolování mořské vody. [25]

Palivem ve FBR reaktorech je směs oxidu plutoničitého a oxidu uraničitého nebo vysoce obohacený uran. Některé reaktory dokonce používají obohacení štěpitelným plutoniem 239, které si reaktor dříve vyrobil.

Jak už bylo zmíněno, tak rychlý množivý reaktor neobsahuje moderátor. Naopak je důležité, aby bylo zajištěno účinné chlazení reaktoru. FBR reaktor uvolňuje až 10x více tepla než klasický reaktor. Proto se jako chladivo používá tekutý sodík nebo lehký kov, který je při teplotách nad 100 °C tekutý. [26]

Předností rychlého množivého reaktoru je schopnost vytvářet nové palivo, které šetří životní prostředí. Další výhodou je, že umí spalovat svůj vlastní odpad.

Naopak mezi nevýhody těchto reaktorů patří velká chemická reaktivita sodíku s kyslíkem. Proto se musí zajistit co nejlepší oddělení sodíkového okruhu od vzduchu a zajistit spolehlivý protipožární systém. [26], [27]



Obr. 2.7 Schéma rychlého množivého reaktoru FBR. [14]

2.2 Reaktory I. generace

Jedná se o reaktory, které byly vyvinuty hlavně v 50. a 60. letech 20. století. Pouze některé reaktory se v té době uplatnily v energetice, hodně z nich bylo provozováno jako experimentální reaktory. Většinou se jednalo o prototypy komerčních reaktorů, na kterých se testovalo a ověřovalo jejich využití při výrobě elektrické energie.

Reaktory I. generace měli pouze základní bezpečnostní systémy, které se s přibývajícím věkem a zkušenostmi postupně zlepšovali. Na konci roku 2015 byl odstaven poslední reaktor I. generace v jaderné elektrárně v Británii Wylva.

U nás, ještě v bývalém Československu, byl pouze jeden zástupce této generace, a to v Jaslovských Bohunicích. Jednalo se o reaktor HWGCR, který byl chlazený oxidem uhličitým a moderovaný těžkou vodou.

Další významní zástupci I. generace:

- EBWR v Americe – experimentální varný reaktor
- PLWBR v Shippingportu – lehkovodní tlakový množivý reaktor
- Magnox v Británii – plynem chlazený reaktor
- UNGG ve Francii – plynem chlazený reaktor
- EBWR – experimentální varný reaktor
- Agesta R3 ve Švédsku – tlakový těžkovodní reaktor (první reaktor použitý pro společnou výrobu elektřiny a tepla)
- Rolphton v Kanadě – prototyp reaktoru CANDU
- Obninsk AM-1 v Rusku – reaktor typu LWGR (historicky první prototyp jaderné elektrárny)
- AMB-100 (Bělojarsk-1) v Rusku – reaktor typu LWGR, předchůdce typu RBMK
- VVER-210 v Rusku – prototyp tlakovodního reaktoru VVER
- Jaslovské Bohunice A-1 v Československu – reaktor HWGCR [14], [28]

2.3 Reaktory II. generace

Projektování a výstavba jaderných reaktorů II. generace se datuje do 70. let 20. století. Reaktory této generace vychází z úspěšných a spolehlivých reaktorů I. generace. Úroveň reaktorů II. generace oproti reaktorům předcházející generace je o dost vyšší. Hlavně se zlepšily bezpečnostní systémy a prvky.

Intenzivní rozvoj a velké finanční investice byly způsobeny velkým nárůstem ceny ropy. Obrovské investice do jaderné energetiky byly v USA.

Největší zastoupení této generace mají reaktory lehkovodní, tlakovodní a varné. Oproti ostatním typům měli spoustu provozních a ekonomických důvodů, způsobené použitím lehké vody jako moderátoru, která je velmi dostupná a levná. V dnešní době je většina reaktorů, sloužící k výrobě elektrické energie, právě z této II. generace.

Nejvýznamnější zástupci této generace:

- Tlakovodní reaktor PWR, VVER
- Tlakovodní reaktor CANDU
- Varný reaktor BWR
- Varný reaktor RBMK
- Varný reaktor EGP-6
- Těžkovodní reaktory CANDU
- Plynem chlazený AGR [28]

2.4 Reaktory III. generace

Reaktory této generace navazují na své předchůdce z II. generace. Oproti reaktorům II. generace se III. generace vyznačuje modernizací základních typů. Hlavním cílem bylo zjednodušení a zvýšení aktivní i pasivní bezpečnosti.

Tato generace se vyznačuje jednodušší a robustnější konstrukcí, která umožňuje jednodušší provoz, a hlavně větší odolnost proti lidským chybám. Taky se předpokládá delší životnost – více než 60 let. Dbá se také na efektivnější využití jaderného paliva. Vyšším podílem vyhořelého jaderného paliva se snižuje i objem vysoce radioaktivních odpadů.

Do této generace patří následující typy reaktorů:

- Pokročilý tlakovodní reaktor APWR
- Pokročilý varný reaktor ABWR
- CANDU 6
- Vylepšený varný reaktor VVER [14], [15]

2.5 Reaktory III+. generace

Jedná se prozatím o nejlepší generaci jaderných reaktorů. Tato generace je výrazně spojená s III. generací. Nová generace se liší zejména větším důrazem na pasivní bezpečnostní prvky. V nové generaci jsou zapracovány analýzy z havárie ve Fukušimě, dále je zlepšená bezpečnost vůči vnějším vlivům (zemětřesení, přívalové deště, záplavy atd.), vyšší autonomie, rozmanitost bezpečnostních systémů, které jsou schopny zvládnout i vícenásobné poruchy a dokážou si tak samy poradit s problémem.

Zástupci III+. generace jsou následující:

- Tlakovodní reaktor EPR
- Tlakovodní reaktor AP-1000
- Tlakovodní reaktor ATMEA1
- Tlakovodní reaktor CAP1400
- Varný reaktor KERENA

- Varný reaktor ESBWR
- Těžkovodní reaktor ACR-1000 [14], [15]

2.6 Reaktory IV. generace

Reaktory této generace jsou zatím ve vývoji a výzkumu. Konference „Generation IV International Forum (GIF)“ představila v roce 2003 šest typů reaktorů, které by měly představovat budoucnost jaderné energetiky. Jedná se o reaktory, které se vyznačují ekologií, velkou bezpečností, finanční efektivitou a účinností. Taky se u této generace klade důraz na zneužití materiálu pro jaderné zbraně a ochranu před teroristickými útoky. Výstavba generátorů IV. generace se očekává mezi lety 2030 a 2040 a její komerční spuštění na rok 2050.

Koncepční typy reaktorů IV. generace:

- Rychlé reaktory chlazené plynem GFR
- Vysokoteplotní reaktory VHTR
- Nadkritické lehkovodní reaktory SCWR
- Sodíkem chlazené rychlé reaktory SFR
- Olovem chlazené rychlé reaktory LFR
- Reaktory založené na roztavených solí MSR [14], [29]

3 Okruhy v jaderných elektrárnách

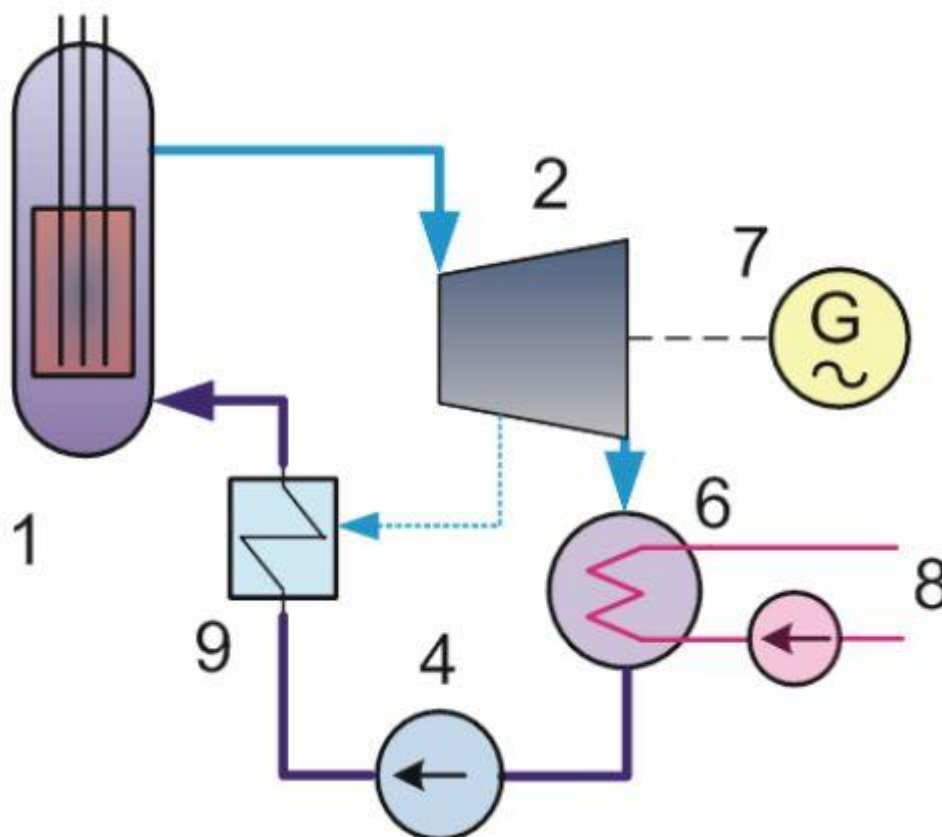
Většina jaderných elektráren se skládá ze tří částí/okruhů – primární okruh, sekundární okruh a chladicí okruh. Existují ale i jaderné elektrárny s méně než třemi okruhy. Záleží na typu reaktoru, který je použit.

3.1.1 Jednookruhové elektrárny

Tato koncepce jaderné elektrárny se využívá především u varných reaktorů jako jsou například BWR nebo RBMK. Teplo, které vznikne ze štěpení jaderného paliva se odvádí z reaktoru za pomoci chladiva. Princip jednookruhových elektráren je takový, že chladivo odvádí teplo přímo do turbíny, a ne do tepelného výměníku, jak jsme zvyklí u tepelných elektráren.

Výhodou tohoto typu elektrárny je jednodušší tepelný cyklus a jeho vyšší účinnost. Je to způsobené menšími ztrátami na tepelných výměnících a s nimi spojené další technologie. Pára je schopna mít na vstupu do turbíny vyšší parametry.

Nevýhodou jednoho okruhu je to, že chladivo, obsahující radioaktivní látky, prochází přes všechny důležité části jaderné elektrárny. Proto musí být zavedeny přísnější bezpečnostní prvky zvyšující spolehlivost a živostnost jaderné elektrárny. Dokonce je i kontaminována strojovna elektrárny, a tak během provozu je vstup do ní zakázán. I přes úspory způsobené jedním okruhem, jsou celkové náklady na elektrárnu vyšší, protože náklady na bezpečnostní prvky jsou vysoké. [30], [31]



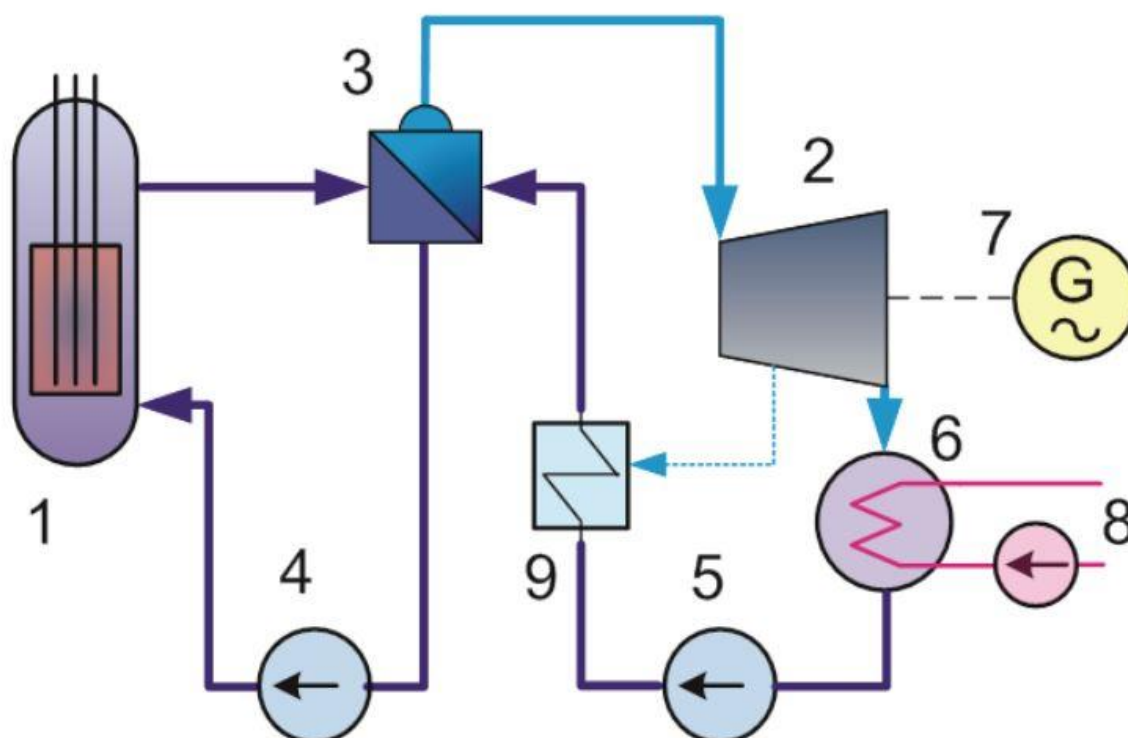
Obr. 3.1 Jednookruhové schéma jaderné elektrárny s parní turbínou

1 – varný reaktor, 2 – turbína, 4 – oběhové čerpadlo, 6 – kondenzátor, 7 – generátor, 8 – chladicí věž, 9 – přehřívák. [31]

3.1.2 Dvouokruhové elektrárny

Jedná se o nejpoužívanější typ jaderných elektráren, protože je možnost využít více typů reaktorů. Vložený primární okruh zajišťuje nepřítomnost radioaktivních látek mimo reaktorovou část elektrárny. Oproti jednookruhové elektrárně se zde nachází tepelný výměník. Vzniklá pára neobsahující žádné radioaktivní prvky přechází do turbíny a vytváří se elektrická energie. Ve strojovně se nachází jednodušší bezpečnostní zařízení, která jsou zde pouze z důvodu, kdyby došlo k porušení těsnění parního generátoru.

Mezi výhody patří výše zmiňovaná univerzálnost. Další velkou výhodou je, že se s párou může zacházet jako s párou v tepelných elektrárnách. [31], [32]

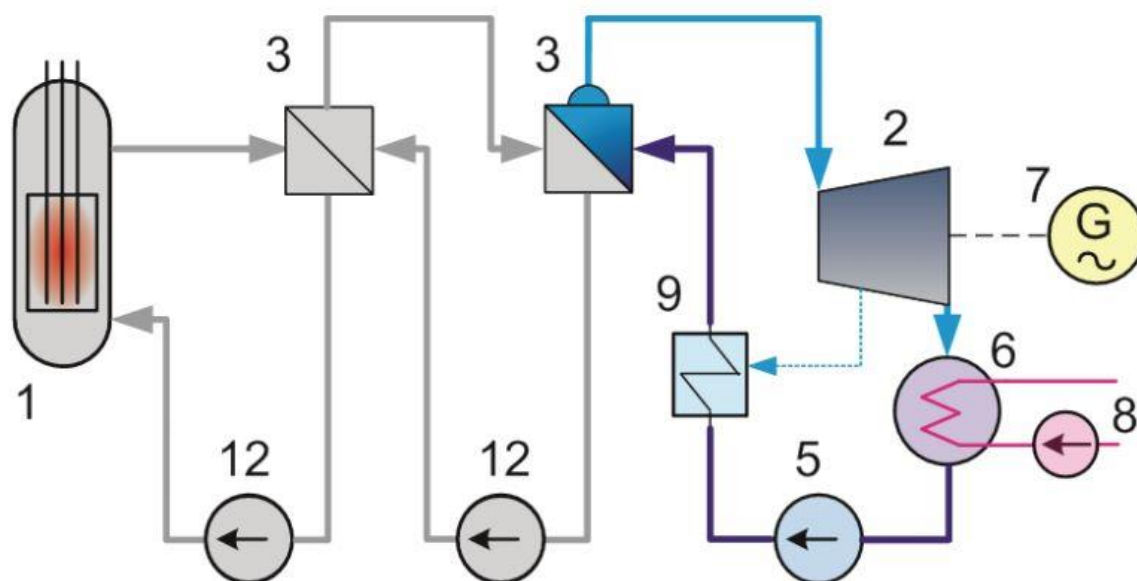


Obr. 3.2 Dvouokruhové schéma jaderné elektrárny

1 – varný reaktor, 2 – turbína, 3 – tepelný výměník, 4 – oběhové čerpadlo, 5 – napájecí čerpadlo, 6 – kondenzátor, 7 – generátor, 8 – chladicí věž, 9 – přehřívák. [31]

3.1.3 Tří okruhové elektrárny

Tří okruhů se využívá v elektrárnách používající rychlé reaktory, tj. reaktory chlazené tekutým kovem. U těchto typů je kromě primárního a sekundárního okruhu ještě jeden okruh tzv. vložený okruh. Okruh je vložen z důvodu zvýšení bezpečnosti jaderné elektrárny. Ve vloženém okruhu se používá sodík nebo směs sodíku jako teplotonosná látka. Při průniku páry ze sekundárního do primárního okruhu by mohla vysoká afinita páry způsobit havárii v kritickém místě (přechod sodík – voda). Konkrétní tepelná schémata se liší. Záleží na typu použitého reaktoru, jeho parametrech, umístění elektrárny, možnosti chlazení, regulací přenosové soustavy a další.



Obr. 3.3 Jedno z možných schémat tří okruhové jaderné elektrárny

1 – varný reaktor, 2 – turbína, 3 – tepelný výměník, 5 – napájecí čerpadlo, 6 – kondenzátor, 7 – generátor, 8 – chladicí věž, 9 – přehřívák, 12 – sodíkové čerpadlo. [31]

3.2 Primární okruh

Pro detailní popis okruhů v jaderných elektrárnách jsem zvolil českou jadernou elektrárnu Temelín.

Hlavním úkolem primárního okruhu je přenos tepelné energie z aktivní zóny reaktoru do parogenerátoru. Následně se v parogenerátoru předá teplo do sekundárního okruhu.

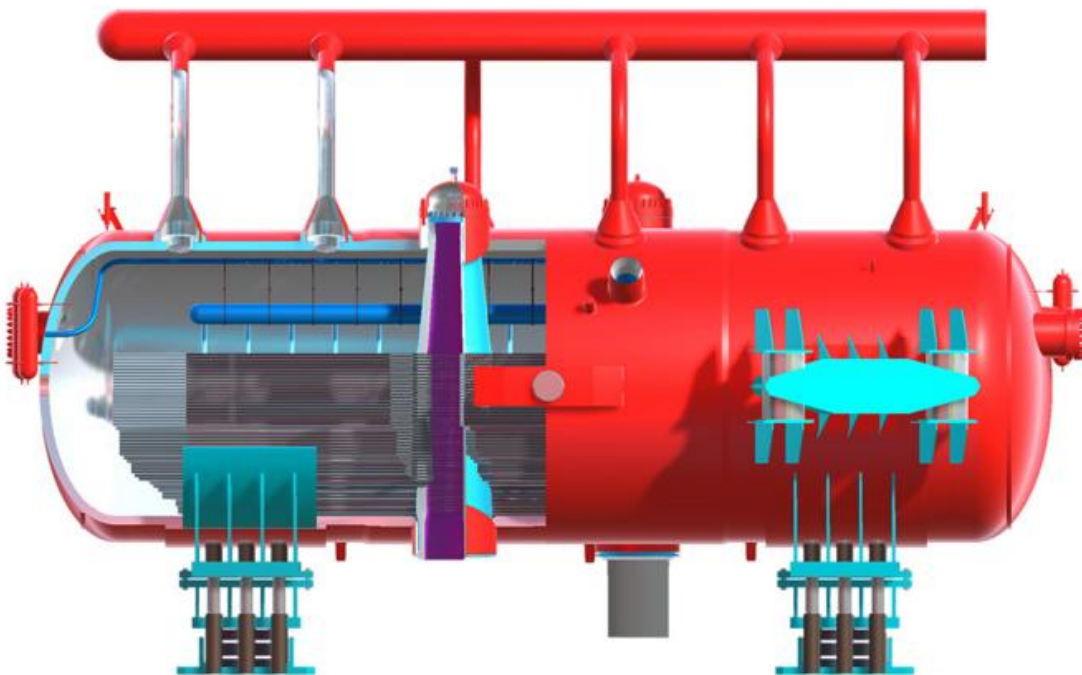
V primárním okruhu se nachází jaderný reaktor, parogenerátory, cirkulační čerpadla, kompenzátor objemu a hydroakumulátor. [33]

3.2.1 Parogenerátor

V temelínské elektrárně jsou čtyři parogenerátory na každý reaktor. Tyto generátory mají tvar velké kovové válcové nádoby, do které by se vešel i autobus. Leží naležato hned vedle reaktoru a váží přes 400 tun.

V jaderné elektrárně pracuje parogenerátor na stejném principu jako například elektrická varná konvice. Rozdíl je akorát v tom, že teplo nevzniká za pomoci elektrického proudu, ale vzniká pomocí horké vody vedoucí z reaktoru. Horká voda protéká trubkami o velikosti palce zahnutých to tvaru písmene U.

Parogenerátor je k primárnímu okruhu připojen potrubím, které je napojeno na dvě tlustostěnné děrované roury nacházející se ve středu parogenerátoru. Na každou díru ve stěně je napojena jedna trubička – začátek na vstupní, konec na výstupní. Horká voda v potrubí přitéká na vstupní rouru a rovnoměrně se rozdělí do všech otvorů. Přes trubičky a výstupní rouru voda odtéká z parogenerátoru. [34], [35]



Obr. 3.4 Model horizontálního parogenerátoru. [34]

Tab. 3.1 Parametry parogenerátoru jaderné elektrárny Temelín. [36]

Parametry parogenerátoru JE Temelín	
tepelný výkon jednoho parogenerátoru	750 MW _t
počet parogenerátorů na jeden blok	4 ks
hmotnost parogenerátoru	cca 416 t
Tlaková nádoba	
vnitřní průměr	4 000 mm
celková délka nádoby	13 840 mm
tloušťka stěny prostředních prstenců	145 mm
tloušťka stěny bočních kroužků	105 mm
tloušťka stěny eliptických den	120 mm
materiál nádoby	10GN2MFA
Primární médium	
teplota na vstupu do parogenerátoru	320 °C
teplota na výstupu z parogenerátoru	290 °C
tlak primárního média	15,69 MPa
objemový průtok	5,88 m ³ /s
Sekundární médium	
teplota napájecí vody	220 °C
teplota syté páry	278,5 °C
tlak generované páry	6,3 MPa
hmotnostní průtok generované páry	1 470 t/h

Teplosměnné trubky	
celkový počet trubek	11 000 ks
vnější průměr a tloušťka stěny trubky	16 mm × 1,5 mm
průměrná délka trubky	11,1 m
celková délka trubek	122 100 m
materiál trubek	08Ch18N10T
rychlost média v trubkách	4,21 m/s
výpočtová teplosměnná plocha	5 040 m ²
skutečná teplosměnná plocha (vnější průměr trubek)	6 115 m ²

3.2.2 Cirkulační čerpadlo

V jaderných elektrárnách se nacházejí stovky různých čerpadel. Nejdůležitější čerpadla jsou hlavní cirkulační nacházející se v primárním okruhu. Za pomoci cirkulace chladiva zabezpečují odvod tepla z aktivní zóny reaktoru do parogenerátoru.

Hlavní cirkulační čerpadlo je složité a náročné zařízení. Čerpadlo musí zvládnout velký průtok chladiva, vysoký tlak v rozmezí 12-16 MPa, a také vysokou teplotu okolo 300 °C. Aby nedošlo k úniku radioaktivních látek mimo primární okruh, musí mít spolehlivé bezpečnostní bariéry.

Počet cirkulačních čerpadel v primárním okruhu závisí na počtu cirkulačních smyček. Čerpadla se nachází na tzv. studených větvích primárních smyček. Větší počet smyček dovoluje možnost provozovat blok s nižším výkonem i při poruše jedné ze smyček, zatímco u menšího počtu smyček to není možné. [1], [34]



Obr. 3.5 Model cirkulačního čerpadlo. [34]

Tab. 3.2 Parametry cirkulačních čerpadel v jaderné elektrárně Temelín. [36]

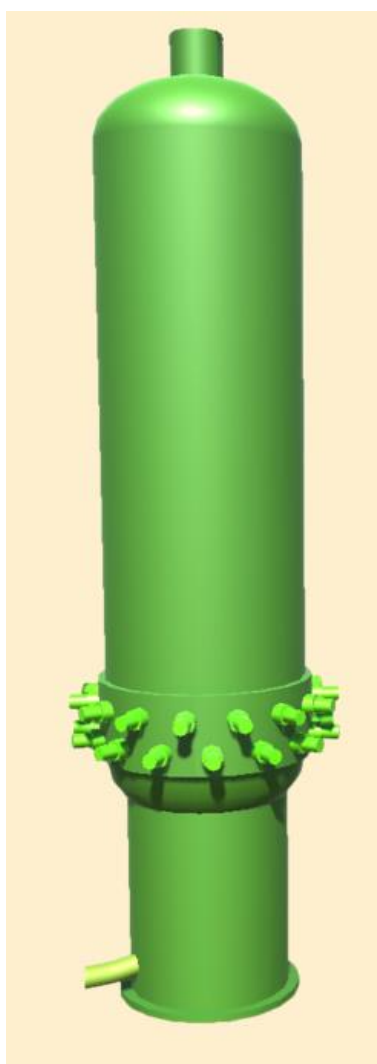
Parametry cirkulačních čerpadel JE Temelín	
Typové označení čerpadla	GCN-195M
Provedení čerpadla	Vertikální odstředivé
Počet cirkulačních čerpadel na jeden blok	4 ks
Výška cirkulačního čerpadla	11,9 m
Nominální otáčky čerpadla	1 000 otáček/min.
Tlak média v sání cirkulačního čerpadla	15,3 MPa
Zvýšení tlaku média při průchodu čerpadlem	0,675 MPa
Teplota média v sání cirkulačního čerpadla	290 °C
Provozní objemový průtok čerpadlem	22 000 m ³ /hod.
Elektrický příkon čerpadla	5,1 MW
Účinnost cirkulačního čerpadla	78 %
Hmotnost agregátu čerpadla	110 t

3.2.3 Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu je vertikální nádoba vyrobená z nízkolegované oceli. Na vnitřní straně je obalena asi centimetrovou nerezovou vrstvou. Kompenzátor je umístěný nad úrovní primárního okruhu, se kterým je neoddělitelně spojen potrubím.

Jedná se o velice důležité zařízení. Úkolem kompenzátořem je ochránit potrubí v primárním okruhu před mechanickým poškozením způsobeným vysokým tlakem a také, aby se voda nezačala vařit při náhlém poklesu tlaku.

Nádoba kompenzátořu je zhruba ze dvou třetin naplněna primární vodou. Zbylou třetinu vyplňuje dusík nebo nějaký jiný inertní plyn. Kompenzátoř funguje na principu rovnováhy vodní páry a nasycené páry. Voda, která je v kompenzátořu, je ohřátá až na teplotu sytosti při daném tlaku. Díky tomu umí zařízení samovolně regulovat malé změny tlaku vody. Při velkých změnách tlaku pomáhají kompenzátořu skupiny elektrických ohříváčů zapojených v dolní části kompenzátořu. [37], [38]

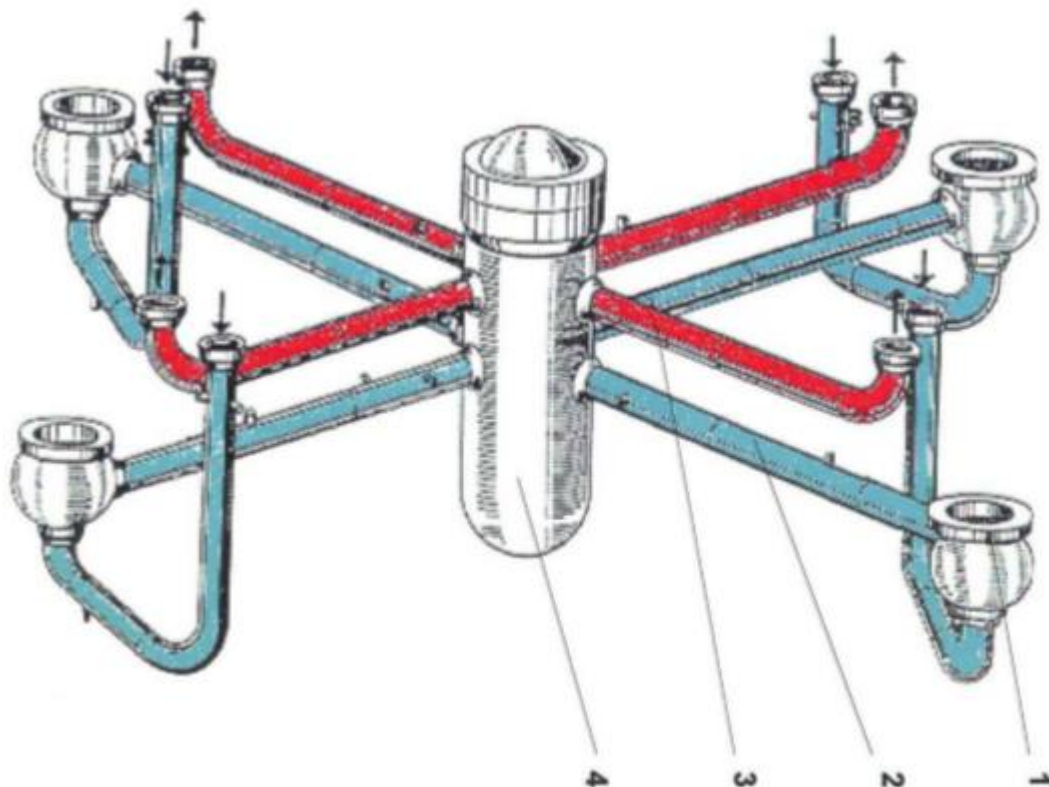


Obr. 3.6 Model kompenzátořu objemu s prstenci ohříváků. [34]

3.2.4 Hlavní cirkulační potrubí

Jedná se o hlavní potrubí, kterým cirkuluje chladivo primárního okruhu z reaktoru do parogenerátoru. Odtud se chladivo vrací zpět za pomoci hlavního cirkulačního čerpadla do reaktoru a vytváří tzv. smyčku.

Potrubí je vyrobeno z nízko legované oceli a má dvouvrstevný návar o tloušťce mezi 5 mm a 7 mm. Potrubí má vnitřní světlost 850 mm, vnější průměr je 995 mm a tloušťka stěny je pak 145 mm. [1], [34], [38]



Obr. 3.7 Hlavní cirkulační čerpadlo

1 – ulita hlavního cirkulačního čerpadla, 2 – studená větev cirkulační smyčky, 3 – horká větev cirkulační smyčky, 4 – reaktor. [38]

3.3 Sekundární okruh

Sekundární okruh jaderné elektrárny navazuje na primární okruh. Tento okruh pracuje stejně jako u tepelné elektrárny. V sekundárním okruhu dochází k transportu páry z parogenerátoru a k její přeměně vnitřní energie na točivý pohyb turbíny. Vzniklá energie z rotující turbíny se v generátoru přeměňuje na elektrickou energii. Pára na výstupu z turbíny se shromažďuje v kondenzátoru. Zde se ochladí a zkondenzuje na vodu. Vodu lze poté následně přeměnit zase na páru a celý cyklus opakovat.

3.3.1 Parní turbína

V temelínské elektrárně je jako parní turbína použita speciální prototypová čtyřtělesová turbína na sytou páru. Turbína se skládá z jednoho vysokotlakého dílu a poté na společné hřídeli se nacházejí zbylé 3 paralelní nízkotlaké díly. Mezi vysokotlakým a nízkotlakými díly nalezneme také ještě přihříváč neboli separátor. Ten je zde z důvodu negativního vlivu syté páry na účinnost a životnost turbíny.

Z parogenerátorů přichází sytá pára, o teplotě 280 °C a tlaku 6,3 MPa, skrz regulační a rychlozávěrné ventily do dvou Proudového vysokotlakého dílu turbíny. Zde sytá pára expanduje a odevzdá přibližně 2/5 své energie – tím se dostane pára do stavu mokré páry. Kvůli zvýšení životnosti turbíny putuje mokrá pára do separátorů umístěných za

vysokotlakou částí turbíny. Po opuštění separátoru pára putuje dál do nízkotlaké části turbíny. Z důvodu expanze má pára větší měrný objem a je nutné ji rozdělit až do tří dvouproudových nízkotlakých dílů.

Temelínská turbína je unikátní zařízení jak v ČR, tak i ve světové energetice. Spolu s generátorem měří 60 metrů a váží přes 2000 tun. [34], [39]



Obr. 3.8 Parní turbína v jaderné elektrárně Temelín. [34]

Tab. 3.3 Parametry parní turbíny v JE Temelín. [36]

Parametry parních turbíny JE Temelín	
Typ turbíny	Kondenzační
Nominální elektrický výkon	1 080 MW
Počet turbín na blok	1 ks
Počet VT dílů	1 ks
Počet NT dílů	3 ks
Nominální otáčky	3 000 ot. /min.
Průtok páry při 100 % výkonu v kondenzátním režimu	5 262,9 t/h
Hmotnost VT dílu / NT dílu	260 t / 480 t
Teplota vstupní páry	280 °C
Tlak vstupní páry	6,3 MPa
Teplota přehřáté páry	251 °C
Tlak přehřáté páry	0,77 MPa

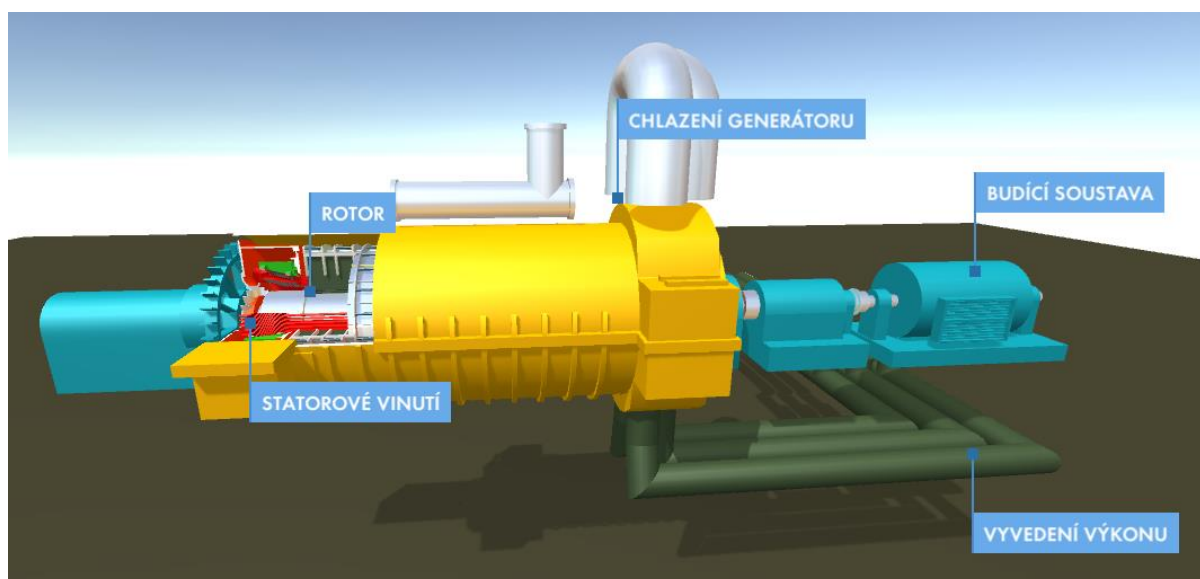
Teplota páry vystupující z turbíny	39 °C
Délka / váha nejdelší lopatky	1,22 m / 47 kg
Počet stupňů VT dílu	2 × 5 stupňů
Počet stupňů NT dílu	3 × 2 × 5 stupňů

3.3.2 Elektrický generátor

Elektrický generátor je velký elektrický stroj, který převádí energii z otáčející se ho rotoru na elektrickou energii. Turbína společně s generátorem jsou uloženy na společné hřídeli z důvodu optimálního přenosu kroutícího momentu. Generátor pracuje na principu elektromagnetické indukce. Jedná se o zvláštní jev, kdy na elektrický vodič působí magnetické pole.

Temelínský generátor má kostru rotoru složenou z magneticky orientovaných plechů s drážkami. Na drážkách je uloženo duté měděné třífázové satorové vinutí. Skrz plynotěsné průchodky jsou vedeny konce vinutí až do zapouzdřených vodičů. Následně jsou vyvedeny přes generátorový vypínač do transformátorů. Vodiče cívek i magnetický obvod satoru je potřeba chladit, aby nedošlo k přehřátí. Vodiče jsou chlazeny demineralizovanou vodou a magnetický obvod pak vodíkem.

Rotor generátoru je vyroben z jednoho kusu oceli. Na rotoru jsou vyfrézovány drážky, na kterých jsou nalisovány měděné vodiče rotorového vinutí. Do vinutí se přivádí budicí napětí za pomoci sběracího ústrojí. Za pomoci usměrňovačů se odvádí stejnosměrné budicí napětí. Na stejné hřídeli jako je hlavní generátor se nachází také třífázový generátor. Ten zde zabezpečuje buzení rotoru. [34], [40]



Obr. 3.9 Model elektrického generátoru JE Temelín. [34]

Tab. 3.4 Parametry alternátorů v jaderné elektrárně Temelín. [36]

Parametry alternátorů v JE Temelín	
Typ alternátoru	Dvoupólový, třífázový, synchronní
Nominální zdánlivý výkon	1 111 MVA
Výkon na svorkách alternátoru	981 MW
Dodávaný výkon do elektrické sítě	912 MW
Vlastní spotřeba bloku	69 MW

Účinník	0,9
Nominální sdružené napětí	24 kV
Nominální fázový proud	26 726 A
Nominální frekvence	50 Hz
Délka / hmotnost rotoru alternátoru	14,8 m / 90 t
Chlazení	vodík – voda
Tlak vodíku	500 kPa
Teplota chladicí vody	25 °C
Hmotnost alternátoru	564 t
Jmenovité budící napětí	513 V _{ss}
Jmenovitý budící proud	7 280 A

3.3.3 Kondenzační systém

Kondenzační systém v jaderné elektrárně má za úkol zajistit hned několik funkcí:

- odvod kondenzačního tepla z parní turbíny
- odvod tepla do kondenzátoru při provozu přepouštění stanice
- dopravu kondenzátu do napájecí stanice
- čištění teplosměnných ploch kondenzátoru

Kondenzátor turbíny, sloužící k odvodu kondenzačního tepla z turbíny, je tvořen třemi díly, které mají stejnou funkci. Jedná se kondenzátory pružně uložené na základech pod nízkotlakými díly parní turbíny. Na konci tohoto procesu je kondenzát chladiva sekundárního okruhu.

Skrz titanové trubky proudí chladicí voda, která je dodávána pomocí systému cirkulační chladicí vody. K cirkulaci vody dochází za pomoci dvou axiálních čerpadel s natáčecími lopatkami. K chlazení cirkulační chladicí vody je potřeba vysoká chladicí věž viz. kapitola 4.4.

K udržení čistoty teplosměnných ploch kondenzátoru je používán čistící systém TAPROGE. Princip tohoto systému je takový, že pomocí čerpadla jsou do přívodního potrubí před kondenzátorem vháněny kuličky z gumové pěny o průměru 21 mm. Kuličky projdou kondenzátorem a následně jsou zachyceny v lapači a opět jsou dopraveny před kondenzátor.

Z kondenzátoru stéká do sběračů kondenzát chladiva sekundárního okruhu. Jedním společným potrubím je veden na sání kondenzačních čerpadel nacházejících se ve strojovně. [34], [38]

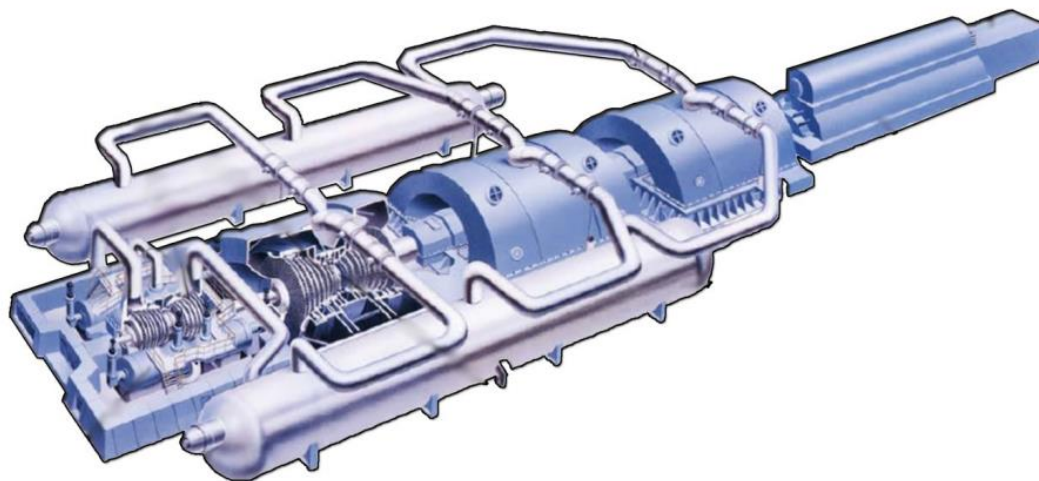
Tab. 3.5 Parametry kondenzátoru v jaderné elektrárně Temelín. [36]

Parametry kondenzátoru v JE Temelín	
Počet kondenzátorů na jednu turbínu	3 ks
Zapojení kondenzátorů po vodní straně	paralelní
Počet trubek v jednom kondenzátoru	31 900 ks
Průměr/síla stěny trubek	20/0,7 mm
Délka trubek	12 m
Materiál trubek	titan
Teplosměnná plocha	23 200 m ²

Tlak v kondenzátoru	6 kPa
Maximální teplota chladicí vody	34 °C
Množství chladicí vody	36 500 m ³ /h
Celková hmotnost kondenzátoru	540 t
Čištění trubek kondenzátoru	TAPROGGE

3.3.4 Separátor a přehřívák páry

V temelínské elektrárně se nachází separátory neboli přehříváče označené jako SPP 1000. Jedná se o systém sloužící ke zlepšení parametrů páry, která projde turbínou, konkrétně vysokotlakou částí. Separátor má za úkol přehřát páru na 250 °C a poté odseparovat kapky vody, které kdyby se neodseparovali, tak by došlo k poškození nízkotlakých lopatek turbíny. Přehřátí a následná separace probíhá v tzv. speciálních žaluziích. Na každou turbínu připadají dva horizontální separátory nacházející se zrcadlově na obou stranách turbíny. [41]



Obr. 3.10 Separátor SPP 1000 [42]

3.3.5 Nízkotlaká regenerace

Regenerace v jaderných elektrárnách se používá u všech větších bloků. Slouží k tomu, aby byla zvýšena účinnost tepelného oběhu. Princip regenerace spočívá v odebrání určitého množství páry z vysokotlaké nebo nízkotlaké části turbíny, jejíž tepelná energie slouží pro ohřev napájecí vody nebo kondenzátu.

Nízkotlaká regenerace je regenerace na části nízkotlaké turbíny, kde dochází k ohřevu kondenzátu. V systému nízkotlaké regenerace se nacházejí čtyři (tři v provozu, jedno v záloze) vertikální kondenzátní čerpadla. Čerpadla čerpají ze sběračů kondenzátu kondenzát, který následně vedou do ohříváků.

3.3.6 Napájecí zařízení

Do systému napájecích zařízení patří napájecí nádrž s odplynovákem a také napájecí čerpadla.

Napájecí nádrž slouží k akumulaci a termickému odplynění. V podstatě se napájecí nádrž chová jako směšovací tepelný výměník. Kondenzát, který vystupuje z nízkotlaké regenerace, putuje do čtyř termických odplynovačů. Odplynovače jsou umístěny nad napájecí nádrží. Zde dochází k rozptýlení do formy drobných kapek za pomoci trysek. Tento rozptýlený kondenzát je zbaven kyslíku, aby nedošlo k následné korozi a poškození systému. Odplyněný kondenzát poté následně stéká do napájecí nádrže.

Napájecí čerpadla slouží k napájení parogenerátorů. K pohánění těchto čerpadel jsou použity parní turbíny od firmy Škoda a mají celkový výkon cca 8 MWe. Každé turbo napájecí soustrojí je tvořeno z poháněcí turbíny, podávacího a napájecího čerpadla. V jaderné elektrárně Temelín jsou celkem instalovány tři napájecí čerpadla. Podle provozního režimu jsou v provozu buď dvě anebo dokonce pouze jenom jedno čerpadlo. Zbylé třetí čerpadlo je pouze rezervní. [41]

3.3.7 Vysokotlaká regenerace

Jednostupňová dvouvětvá vysokotlaká regenerace má za úkol ohřívat napájecí vodu před vstupem do parogenerátorů. Dochází k tomu ve dvou tepelných výměnících a voda je zde ohřata až na teplotu 219 °C za pomoci odběrové páry z turbíny a zbytkové tepelné energie kondenzátu. Ohřev se provádí ve vertikálním vysokotlakém výměníku, který má nerezovou teplosměnnou plochu tvořenou trubkami. Těmito trubkami protéká napájecí voda. Na vnějším povrchu poté dochází ke kondenzaci páry. [41]

3.4 Chladicí okruh

Jedná se o poslední okruh v jaderné elektrárně. Podle názvu se jedná o okruh, ve kterém dochází k odvodu kondenzačního tepla pro fázovou přeměnu páry na vodu. V chladicím okruhu se nachází chladicí věž, cirkulační čerpadla a výměníky tepla.

3.4.1 Chladicí věž

Při pohledu na jadernou elektrárnu si nejde nevšimnout obrovských věžích. Tyto věže jsou vysoké 155 metrů a jsou tvořeny z železobetonového pláště mající tvar rotačního hyperboloidu. Celá věž stojí na více než stovce šikmých sloupů, které vytváří takové vstupní okno pro nasávání vzduchu.

V temelínské elektrárně se nachází 4 chladicí věže s přirozeným tahem – každý blok využívá ke chlazení 2 věže. Chladicí voda se za pomoci potrubí dostává z kondenzátoru do věže do výšky cca 30 metrů. Zde je voda za pomoci speciálních rozprašovačů rozprašována na chladicí výplň, která je instalována uvnitř věže a je tvořena z PVC bloků. S využitím přirozeného komínového efektu je do věže vháněn studený vzduch, který ochlazuje vodu protékající výplní. V dolní části věže se nachází velký 3 metry hluboký sběrný bazén, do kterého padá ochlazená voda z výplně. Z bazénu se následně voda odčerpává zpět do kondenzátoru a oběh se opakuje. Vnitřkem věže pak odchází do atmosféry vlhký a teplý vzduch. Vzduch je nejdřív studený, ale je ohříván od padající vody a následně vzniká vlhký a teplý vzduch. Při výstupu pára částečně kondenzuje a vytváří oblaka, která jsou viditelná nad chladicí věží. [43]

Tab. 3.6 Parametry chladicí věže v jaderné elektrárně Temelín. [36]

Parametry chladicích věží v JE Temelín	
Typ chladicí věže	s přirozeným tahem
Výška věže	154,8 m
Patní průměr	130,7 m
Průměr v koruně věže	82,6 m
Tloušťka pláště tahového komína	0,9–0,18 m
Celková plocha pláště	81 000 m ²
Hmotnost pláště	27 500 t
Objem sběrné nádrže	35 000 m ³
Výška nasávacího otvoru	10,7 m
Počet šikmých stojek	112

Zastavěná plocha	13 700 m ²
Obestavěný prostor (objem věže)	1 069 700 m ³
Tepelný výkon jedné věže	1 100 MW _t
Průtok vody jednou věží	17,2 m ³ /s
Odpar z jedné věže	413 l/s

4 BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

4.1 Jaderná bezpečnost

Jaderná bezpečnost patří mezi nejdůležitější prioritu jaderné elektrárny. Pod pojmem jaderná bezpečnost se rozumí schopnost zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce a zabránit případnému úniku radioaktivních látek a dalšímu znečištění životního prostředí. Požadavky na jadernou bezpečnost jsou dány Atomovým zákonem a jeho předpisy, dále pak mezinárodními doporučeními od Mezinárodní agentury pro atomovou energii a jinými organizacemi např. WANO, WENRA, NEA. Ze zákona je za jadernou bezpečnost zodpovědný provozovatel jaderné elektrárny. [44]

4.1.1 Pasivní bezpečnost

V jaderné elektrárně slouží prvky pasivní bezpečnostní k zajištění, aby se z případné nehody v elektrárně nestala havárie. V případě, kdyby došlo k havárii, tak mají prvky pasivní bezpečnosti za úkol snížit únik nebezpečných látek, a to i v případě selhání aktivních systémů. Pasivní prvky nepotřebují k fungování žádnou elektrickou energii. Fungují s využitím fyzikálních zákonů jako např. gravitační zákon, konvekce atd. [45]

4.1.2 Aktivní bezpečnost

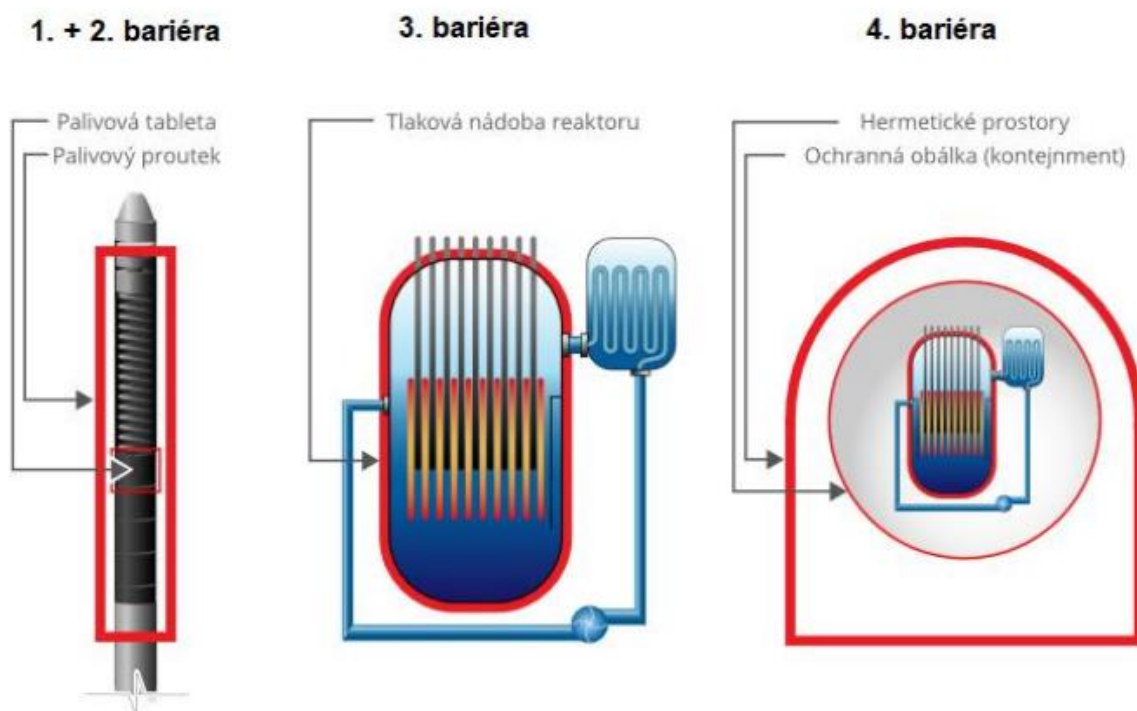
Aktivní systémy neboli autoregulace reaktoru, řídí celý chod jaderné elektrárny. S pomocí autoregulačních systému se řeší běžné provozní odchylky. Na rozdíl od pasivní bezpečnosti se aktivní bezpečnost spoléhá na zásah obsluhy nebo počítače. Aktivní bezpečnostní systémy jsou závislé na dodávce elektrického proudu. Aktivní systémy jsou minimálně 3x zálohované dodávkou elektrické energie z důvodu nehody nebo havárie. [45]

4.1.3 Bezpečnostní bariéry

Největším nebezpečím jaderné elektrárny je únik nebezpečným radioaktivních látek do prostředí. K zabránění úniku slouží systém 4 ochranných bezpečnostních bariér. Bezpečnostní bariéry jsou základním předpokladem každé jaderné elektrárny. [45], [46]

- 1) Palivová matrice – První bariérou je samotná sktruktura jaderného paliva. Krystalická struktura keramického válečku nejčastěji používaného oxidu uraničitého UO_2 je velmi pevná a odolná. Proto je schopna zadržet až 99 % radionuklidů
- 2) Obal palivových proutků – Úkolem druhé bariéry je zachytit zbylé 1 % radioaktivních látek a zabránit úniku radioaktivity do primárního okruhu. Obal paliva je hermeticky uzavřen a zabraňuje, aby se pelety dostali do kontaktu s chladicí látkou. Palivový obal je tvořen ze speciální slitiny na bázi zirkonia.
- 3) Reaktorová nádoba – třetí bariérou je samotná nádoba reaktoru, která musí být velmi pevná, silná a schopna odolat vysokému tlaku. Nádoba je většinou vyrobena z oceli a tloušťka její stěny dosahuje až 30 cm. Reaktorová nádoba má zajistit, aby nedošlo k radioaktivnímu úniku do prostoru jaderné elektrárny.
- 4) Kontejnment – poslední bariéru představuje kontejnment. Jedná se železobetonový obal, ve kterém je schovaný reaktor a primární okruh. Kontejnment musí být navržen tak, aby vydržel např. pád letadla, vnější explozi, tornádo a další přírodní vlivy. Je taky vybaven ventilací, radiačními filtry a šnekovým sprchováním. V případě těžké havárie je možnost vypouštět přetlakovou páru, která projde přes radiační filtr a do

ovzduší se dostane čistá bez známek radiace. V případě prasknutí primárního okruhu se zapne šnekové sprchování, aby se tlak uvnitř udržel na úrovni, kterou kontejnment vydrží. [45], [46]



Obr. 4.1 Ukázka schémat bezpečnostních bariér. [45]

4.1.4 Ochrana do hloubky

Tento bezpečnostní princip využívá všechny zmíněné bezpečnostní bariéry. Jedná se o systém mnohonásobně postupně na sobě nezávislých opatření. Ochrana do hloubky je rozdělena na 5 různých úrovní. Kdyby došlo k selhání nějakého bezpečnostního prvku anebo také k lidskému selhání je velmi důležitá kompenzace problému. Došlo by k selhání na jedné úrovni, je připravena ochranná funkce, která převezme další vyšší úroveň.

- I. První úroveň – Úkolem první úrovně je prevence a odchýlení od poruch elektráren. Do první úrovně patří např. správné dodržování bezpečnostních pokynů, ale také i vhodně zvolená lokalita pro jadernou elektrárnu, konstrukce elektrárny z kvalitních materiálů atd.
- II. Druhá úroveň – Další úroveň slouží k včasnému zjištění příčiny, kontroly nad vznikem abnormálního provozu a snahy co nejrychleji se dostat do normálního provozu. Příkladem mohou být předpisy pro abnormální provoz, kontrola teplot, systém na limitování maximálního výkonu, pojišťovací ventily atd.
- III. Třetí úroveň – Do třetí úrovně patří bezpečnostní systémy, které mají za úkol zvládnout projektovou havárii. Jedná se především o systémy zajišťující chlazení aktivní zóny, aby bylo zabráněno jejímu tavení.
- IV. Čtvrtá úroveň – Kdyby nezabránili poškození aktivní zóny první tři úrovně, dojde na řadu čtvrtá úroveň. Ta má za úkol co nejvíc minimalizovat následky nadprojektové havárie a zabránit, aby nedošlo k úniku radioaktivních látek do životního prostředí. K zajištění tohoto problému je kontejnment viz. kap. 4.1.3.
- V. Pátá úroveň – Jedná se o poslední úroveň. Do páté úrovně ochrany do hloubky patří havarijní plány a jejich prostředky, kdyby došlo k úniku radioaktivních

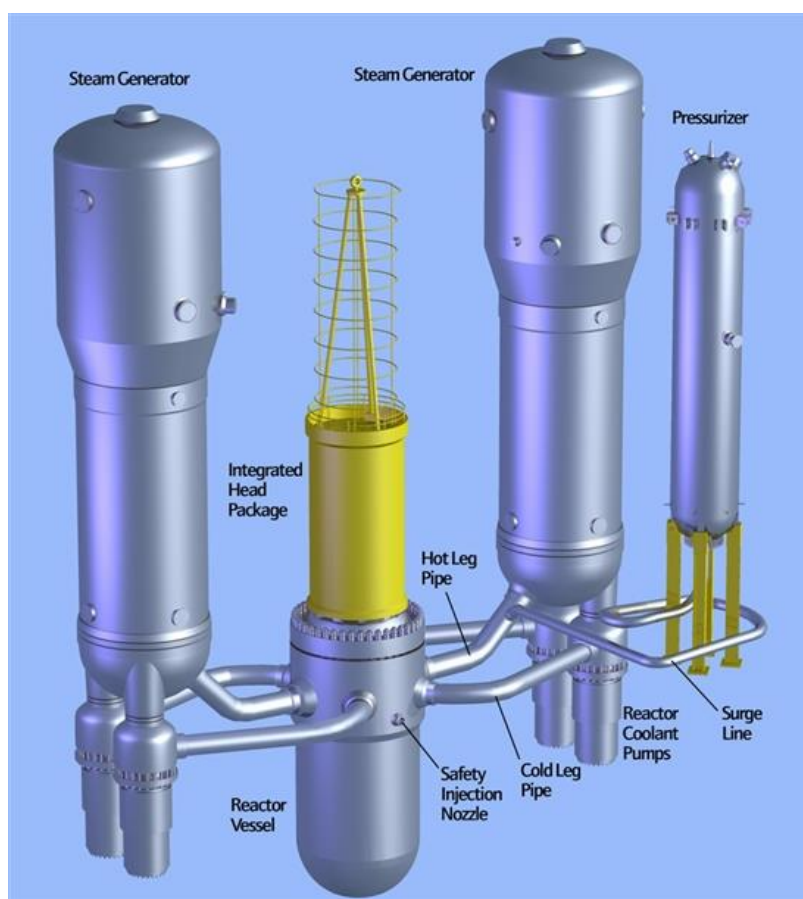
látek do životního prostředí. Jedná se například o evakuaci okolí, likvidaci havárie atd. [47], [48]

4.2 Bezpečnostní systémy reaktoru AP1000

Reaktor AP1000 je tlakovodní reaktor vyrobený americkou jadernou společností Westinghouse Electric Company. Jedná se o reaktor, který byl projektován s maximálním počtem pasivních bezpečnostních prvků. Snaží se využít pro zajištění bezpečnosti přírodní síly jako například gravitace, vypařování, přirozenou cirkulaci plynů a další. Reaktor na základě pasivních bezpečnostních prvků je schopen, i při výpadku elektřiny, zajistit odvod zbytkového tepla, aby nedošlo k havárii. [49]

4.2.1 Automatický systém odtlakování ADS

Bezpečnostní systém ADS se skládá z ventilů třetího a čtvrtého stupně. Ventily jsou uspořádány tak, aby se otevíraly v předepsané sekvenci. Systém odtahuje chladicí systém reaktoru a umožní, aby se dostala vstříkovací voda s nízkým tlakem do jádra a reaktorové nádoby. ADS se spustí podle požadované hodnoty hladiny v doplňovací nádrži. [50], [51]



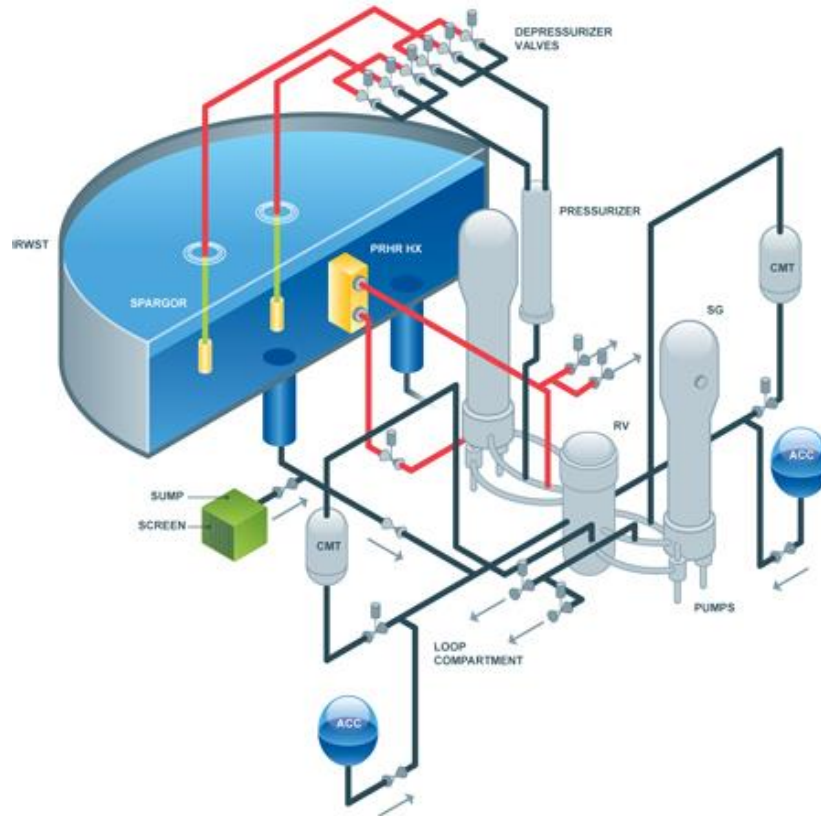
Obr. 4.2 Model automatického systému na odtlakování. [51]

4.2.2 Pasivní chladicí systém jádra PXS

Tento chladicí systém má za úkol plnit hlavní dvě funkce:

- I. První funkcí je bezpečnostní vstříkování a doplňování chladicí látky reaktoru ze základní doplňovací nádrže (CMT) a z akumulární nádrže (IRWST) a dlouhodobá recirkulace v uzavřeném prostoru.
- II. Jako druhou funkcí je pasivní odvod zbytkového tepla využívající akumulární nádrž na doplňování vody a tepelný výměník pasivního zbytkového tepla.

Na reaktorové nádobě se nachází dvě trysky, které jsou připojeny jako zdroj bezpečného vstřikování. Dříve se tato spojení používala ve dvouokruhových elektrárnách. Dnes se používá tato technologie zejména v případě velké havárie. [51], [52]



Obr. 4.3 Schéma zapojení pasivního chladičského systému jádra. [52]

4.2.3 Pasivní odstraňování zbytkového tepla

Reaktor AP1000 má systém na bezpečný odvod zbytkového tepla. Systém chrání zařízení před přechodnými stavy narušující normální odvádění tepla z primárního okruhu. Systém se skládá z tepelného výměníku, který má 100 % všech trubek umístěných uvnitř akumulární nádrže. Tepelný výměník je připojený za pomoci cirkulační smyčky do chladičského systému elektrárny. Smyčka je izolovaná od chladičského systému reaktoru pomocí ventilů. Ventily jsou v základní poloze vypnuté a otevrou tehdy, když dojde ke ztrátě energie nebo jiné řídicí ochranné signály. [51], [52]

4.2.4 Doplnění chladičské látky reaktoru s nízkým tlakem

Vstřikovací voda se dodává za pomoci gravitace z velké akumulární nádrže. Nádrž se nachází nad smyčkami chladičského systému reaktoru. Tlak v této nádrži je nižší než atmosférický, a proto se musí chladičský systém reaktoru před zahájením vstřikování odtlakovat. Po odtlakování je tlak v chladičském systému reaktoru malý a za pomoci gravitace se dostane potřebná voda z akumulární nádrže. [52], [53]

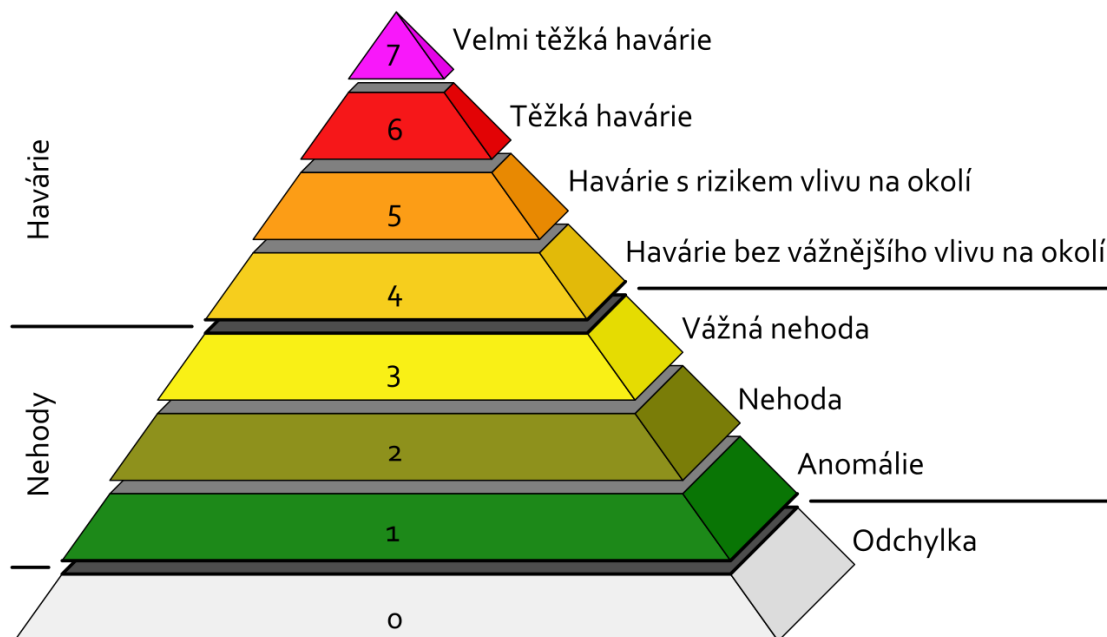
4.3 Jaderná havárie

Je to havárie jakéhokoli jaderného zařízení, při níž došlo ke kontaminaci životního prostředí radioaktivním materiálem. Jedná se o havárie, při kterých dojde k:

- narušení těsnění obalu jaderného paliva v jaderném reaktoru
- úniku radioaktivních prvků do chladicí látky nebo moderátoru
- úniku radioaktivní směsi z primárního okruhu do reaktorového bloku
- úniku radioaktivní směsi do životního prostředí [44]

4.3.1 Stupnice hodnocení jaderných událostí

Pro posuzování poruch a havárie je zavedena osmistupňová škála. Tuto stupnici zavedly Mezinárodní agentura pro atomovou energii IAEA a Agentura pro jadernou energii OECD. Jedná se o mezinárodní stupnici jaderných událostí (zkratka INES).



Obr. 4.4 Pyramida INES. [45]

INES rozděluje nehodové události na nehody (stupeň 1 až 3), kde není ohroženo okolí a není potřeba žádné mimořádné opatření, a na havárie (stupeň 4 až 7), kde dochází k úniku radioaktivních látek do okolí a jsou potřeba mimořádné opatření.

Každá země je povinna informovat koordinační centrum MAAE v přesně stanoveném termínu o každé havárii či nehodě. Koordinační centrum vyhodnotí situaci, a podle nejhoršího dopadu na životní prostředí ohodnotí nehodu/havárii příslušným stupněm.

- **0.stupeň** – Jedná se pouze o odchylky, kde nejsou porušeny limity a podmínky. Jsou to události, které nemají význam pro bezpečnost a jsou bezpečně zvládnutelné.
- **1.stupeň** – Pouze odchylka od normálního provozu. Pouze odhaluje nedostatky bezpečnostního opatření, ale nepředstavuje žádné riziko.
- **2.stupeň** – Technická porucha, která vedou k přehodnocením bezpečnostním opatřením, ale neovlivní to bezpečnost elektrárny. S poruchou se vypořádá hloubkový systém. Do druhého stupně patří i ozáření zaměstnance, které překračuje roční limit.
- **3.stupeň** – Jedná se už o vážnou nehodu, při které došlo k malému úniku radioaktivních látek nad povolené limity. Jsou to také události, při kterých dojde uvnitř zařízení k těžké kontaminaci. Ozáření zaměstnanců, které jim způsobí zdravotní následky. Také všechny nehody, při kterých by nebyly bezpečnostní

systemy schopny zabránit havárii. U tohoto stupně ještě nejsou nutné opatření pro obyvatelstvo.

- **4. stupeň** – Havárie, která nemá vážnější vliv na okolí. U tohoto stupně dochází k částečnému porušení aktivní zóny, ozáření personálu, a i ozáření blízkého obyvatelstva nad daný limit.
- **5. stupeň** – Jde o havárii s rizikem vlivu na okolní prostředí. Dochází zde k velkému úniku radioaktivity do okolí. Velké porušení aktivní zóny a je nutná evakuace blízkého okolí jaderné elektrárny.
- **6. stupeň** – Závažná havárie, kde dochází ještě k většímu úniku radioaktivity než u páté úrovně. U tohoto stupně je nutné využít havarijních plánů k ochraně okolního prostředí.
- **7. stupeň** – Posledním stupněm je velmi těžká havárie. Dochází k úniku radioaktivity na velkém území, k okamžitým zdravotním problémům a také je ohroženo dlouhodobě životní prostředí v okolí elektrárny. [45], [54]

4.3.2 Havárie Černobyl

Mezi nejznámější jaderné havárie patří havárie v černobylské jaderné elektrárně. Jedná se o nejzávažnější havárii v historii jaderné energetiky.

Během technické zkoušky v časných ranních hodinách došlo k velkému nárustu výkonu a prudkému zvýšení tlaku páry v reaktoru RBMK-1000. Následovala ve 4. bloku mohutná exploze, která odhodila víko reaktoru a došlo k požáru. Následovali další exploze a roztavení reaktoru.

Do atmosféry se dostal mrak plný radioaktivních látek. Mrak putoval přes západní část SSSR, východní Evropu a Skandinávii až do celé severní polokoule. Dosud není znám přesný počet obětí této tragické havárie.

Mezi příčiny havárie je zařazeno typ použitého jaderného reaktoru, špatně provedený pokus, nedostatečná kvalifikace personálu, špatný krizový plán a další. Černobylská havárie jsou společně s havárií jaderné elektrárny Fukušima I jediné havárie, která dostala hodnocení posledního 7. stupně Mezinárodní stupnice jaderných událostí. [55], [56]

4.3.3 Havárie Jaslovské Bohunice

Jako jedinou jadernou havárií na území Československa je dvojnásobná havárie v jaderné elektrárně Jaslovské Bohunice.

První havárie se stala v lednu roku 1976. K havárii došlo při výměně palivového souboru. Došlo k neúplnému uzamčení těsnění palivové kazety. Po odstýkování zavázacího stroje od reaktoru došlo za působení tlaku chladiva k vymrštění z reaktoru. Do prostoru reaktorového sálu začal unikat oxid uhličitý. Později bylo zjištěno, že byla chyba v montáži těsnící zátky. Jejím vlivem nebyl umožněn úplný pohyb kulisového mechanismu těsnící zátky, a proto nedošlo k úplnému vysunutí zajišťovacích kamenů. Na pokyn osoby pověřené řízením likvidace havárie se najelo zavázacím strojem zpátky a palivový kanál se uzavřel. Bohužel uniklý oxid uhličitý stihl zabít 2 pracovníky elektrárny, kteří se nacházeli ve spodních prostorách reaktovny, kde se oxid uhličitý nacházel ve velkém množství.

Druhá havárie hned za rok v únoru 1977 také při výměně palivové článku. Dělníci při přípravě palivových článků si všimli, že sáček, který fungoval jako absorbér vlhkosti je roztrhlý a kuličky silikagelu jsou rozsypané v palivové kazetě. Většinu kuliček povysávali, ale bohužel některé kuličky zůstaly uvnitř. To vedlo k tomu, že chladící médium nemohlo volně proudit a došlo k roztavení palivových proutků a propálení těžkovodní nádoby moderátoru. Těžká voda se dostala do primárního okruhu a poškodila palivové krytí. Z důvodu špatného těsnění parogenerátoru, nebyl kontaminován jenom primární okruh, ale také i sekundární

okruh. Jednalo se o největší jadernou havárii na území Československa, která dostala hodnocení podle INES 4.stupeň. [57]

ZÁVĚR

Jaderná energetika se oproti začátkům hodně posunula vpřed. I když v dnešní době jsou výstavby nových jaderných elektráren opožděné z různých důvodů, dá se říct, že se jaderná energetika dostává do popředí mezi výrobou jaderné energetiky.

Hodně k tomu přispívá i vývoj nových jaderných reaktorů tzv. rychlých množivých reaktorů. Tyto reaktory se snaží být více a více ekologičtější vzhledem k okolnímu prostředí. Reaktory se projektují tak, aby se jako zdroj paliva používalo vyhořelé palivo z jiných elektráren. Využití zbytkové paliva by ulehčilo uskladňování paliva, které člověk zatím nemá, jak jinak využít. Snaha do budoucna je nahradit dnes používané reaktory právě rychlými množivými reaktory.

Podle typu použitého reaktoru se jaderná elektrárna rozděluje na potřebné okruhy. Každá elektrárna má primární okruh, ve kterém se odehrává to nejdůležitější, štěpná reakce. Některým elektrárnám stačí právě pouze primární okruh tzv. jednookruhové elektrárny. Ale i naopak, jsou elektrárny, které potřebují sekundární, respektive i terciální okruh. Terciální okruh se hlavně používá u rychlých množivých reaktorů z důvodu zvýšení bezpečnosti.

Poslední část mé práce se věnuje jaderné bezpečnosti. Jaderná bezpečnost patří mezi nejdůležitější části při výstavbě jaderné elektrárny, protože nikdo už nechce zažít jaderné katastrofy, které se odehráli třeba v Černobylu nebo ve Fukušimě. Hodně se věnuje pozornost pasivní bezpečnosti v elektrárnách, které se stále zdokonalují a přispívají tak ke zlepšení bezpečnosti jaderných elektráren.

V dnešní době se stávají jaderné elektrárny mnohem více ekologické, méně finančně náročné a při správném používání i bezpečnější než jiné elektrárny. Do budoucna se jedná nejefektivnější zdroj elektrické energie.

Přínos mé práce je ve shrnutí základních poznatků jaderné energetiky, rozdělení typů jaderných reaktorů, popis jednotlivých okruhů v jaderné elektrárně a její pochopení, které je důležité z hlediska jaderné bezpečnosti.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny: celostátní vysokošk. učebnice*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978. Řada strojírenské literatury.
- [2] Jaderná energie. *Wikiwand.com* [online]. [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/cs/Jadern%C3%A1_energie
- [3] Použité jaderné palivo. *Svět energie: vzdělávací portál ČEZ* [online]. ČEZ [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jadern-elektrarny/pouzite-jadern-palivo>
- [4] *Správa vyhořelého oaliva* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/energie-pro-budoucnost/zajistit-udrzitelny-provoz/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/sprava-vyhoreleho-jaderneho-paliva>
- [5] *Pokročilé jaderné technologie a skupina ČEZ*. Praha: ČEZ, 2006.
- [6] MOX - Jaderné palivo pro moderní reaktory. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/mox-palivo-ze-smesi-oxidu>
- [7] Jaderný energetický reaktor. *Svět energie: vzdělávací portál ČEZ* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jadern-elektrarny/jaderny-energeticky-reaktor>
- [8] Mít víc než polovinu energie z jádra do roku 2040? Nerealné, míní Míl. *Česká televize: ČT24* [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/ekonomika/2959229-mit-vic-nez-polovinu-energie-z-jadra-do-roku-2040-nerealne-mini-mil>
- [9] Jaderné elektrárny. *Informační portál: energetické gramotnosti* [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.informacni-portal.cz/clanek/jadern-elektrarny>
- [10] Jak pracuje elektrárna. *Dukovany.cz* [online]. [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <http://www.dukovany.cz/jak-pracuje-elektrarna.html>
- [11] Nuclear shares soar after China plans to invest US\$12 billion in new reactors for first time since 2016. *South China Morning Post* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.scmp.com/business/companies/article/3002379/nuclear-shares-soar-after-china-plans-invest-us12-billion-new>
- [12] *Z čeho se skládá reaktor* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/reaktor_2.html
- [13] Nuclear Power Reactors. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>
- [14] Základní typy jaderných reaktorů. *ČEZ.cz* [online]. [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [15] Reaktory III. generace. *Osel.cz: Objective Source E-Learning* [online]. [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.osel.cz/3531-reaktory-iii-generace.html>
- [16] Typy reaktorů. *Svět energie: vzdělávací portál ČEZ* [online]. ČEZ [cit. 2020-04-25]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jadern-elektrarny/typy-reaktoru>

- [17] What is a nuclear reactor?. *Whatisnuclear.com* [online]. [cit. 2020-04-30].
Dostupné z: <https://whatisnuclear.com/reactors.html#types>
- [18] Nuclear Power in Japan. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-04-30].
Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/japan-nuclear-power.aspx>
- [19] Candu reactors. *Teachnuclear.ca* [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z:
<https://teachnuclear.ca/all-things-nuclear/nuclear-energy/candu-reactors/>
- [20] Candu technology. *Canadian Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-05-02].
Dostupné z: <https://cna.ca/technology/energy/candu-technology/>
- [21] Heavy water. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z:
<https://www.britannica.com/science/heavy-water>
- [22] Advanced Gas-cooled Reactor. *Wikipedia.com* [online]. [cit. 2020-05-04].
Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Gas-cooled_Reactor
- [23] AGR – Advanced Gas-cooled Reactor. *Nuclear Power* [online]. [cit. 2020-05-04].
Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/agr-reactor/>
- [24] Reaktor RBMK. *Chernobylzone.cz* [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z:
<https://chernobylzone.cz/reaktor-rbmk/>
- [25] Rychlé množivé reaktory (FBR): Účinnější využití uranu. *Oenergetice.cz* [online].
[cit. 2020-05-08]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/rychle-mnozive-reaktory-fbr-ucinne-vyuziti-uranu>
- [26] Rychlé množivé reaktory. *ČEZ.cz* [online]. [cit. 2020-05-08]. Dostupné z:
https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/rychlreakt_8.html
- [27] Fast Neutron Reactors. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-05-08].
Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>
- [28] Generace jaderných reaktorů – jaké generace máme, čím se navzájem liší.
Atominfo.cz: Aktuálně o jádru [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z:
<https://atominfo.cz/2016/03/generace-jadernych-reaktoru-jake-generace-mame-cim-se-navzajem-lisi/>
- [29] Reaktory 4. generace - rychlé reaktory FNR a další. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/reaktory-4-generace-rychle-fnr-a-dalsi>
- [30] *Jaderné elektrárny* [online]. Vysoké učení technické v Praze [cit. 2020-05-15].
Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/EN1Podklady/Elektroenergetika-1-Jaderne%20elektrarny.pdf>
- [31] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [32] Jaderná elektrárna Temelín – technický skvost z jižních Čech. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-temelin-technicky-skvost-z-jiznich-cech>
- [33] Primární okruh. *Energyweb.cz* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z:
https://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=prim_okruh.html
- [34] Jaderné elektrárny 3D. *Svět energie* [online]. ČEZ [cit. 2020-05-18]. Dostupné z:
<https://www.svetenergie.cz/cz/aplikace/jaderne-elektrarny-3d>
- [35] DUBŠEK, František. *Jaderná energetika*. Vyd. 2. dopl. Brno: PC-DIR, 1997. ISBN 80-214-0833-2.

- [36] Technologie a zabezpečení. *ČEZ.cz* [online]. ČEZ [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1#p8>
- [37] Kompenzátor objemu. *ČEZ.cz* [online]. ČEZ [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/kompen_obj.html
- [38] *Sborník přednášek pro JADERNOU MATURITU* [online]. Temelín, 2004 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://ivana.stdin.cz/_media/sbornikjm2014.pdf
- [39] Parní turbína. *ČEZ.cz* [online]. ČEZ [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/par_turb.html
- [40] Jaderná elektrárna Temelín. *Svět energie: vzdělávací portál ČEZ* [online]. ČEZ [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/elektrarny/jaderne-elektrarny/jaderne-elektrarny-cez/jaderna-elektrarna-temelin>
- [41] Jaderná elektrárna Temelín. *Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni* [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~novakm42/clovek_a_energie-KKE-CE/CE_7_cviceni_podklady.pdf
- [42] RICHTER, Aleš. *Separátor a přehříváč jaderné elektrárny MIR 1200*. Ostava, 2011. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, fakulta strojní. Vedoucí práce Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
- [43] Chladicí soustavy tepelných elektráren. *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/chladici-soustavy-tepelných-elektraren>
- [44] Jaderné elektrárny. *Státní ústav radiační ochrany, v. i. i.* [online]. [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/usmernovani-ozareni-pri-cinnostech/jaderne-elektrarny>
- [45] Bezpečnost jaderných elektráren. *Fakulta strojní západočeské univerzity v Plzni* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~novakm42/clovek_a_energie-KKE-CE/CE_9_cviceni_podklady.pdf
- [46] Safety of Nuclear Power Reactors. *World Nuclear Association* [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/safety-of-plants/safety-of-nuclear-power-reactors.aspx>
- [47] *DEFENCE IN DEPTH IN NUCLEAR SAFETY* [online]. Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1996 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1013e_web.pdf
- [48] URBANČÍK, Libor. *Jaderná a radiační bezpečnost provozu českých jaderných elektráren*. Vydání první. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-214-5238-1.
- [49] AP1000® PRESSURIZED WATER REACTOR. *Westinghouse* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.westinghousenuclear.com/new-plants/ap1000-pwr>
- [50] Bezpečnostní systém jaderných reaktorů - Nuclear reactor safety system. *Wikipedia.com* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: https://cs.qwe.wiki/wiki/Nuclear_reactor_safety_system

- [51] Safety System. *Nuclearstreet.com* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://nuclearstreet.com/nuclear-power-plants/w/nuclear_power_plants/safety-system
- [52] M. BAJOREK, PH. D., Stephen. *AP1000 Passive Safety Systems* [online]. United States Nuclear Regulatory Commission, 2007 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.nrc.gov/docs/ML1523/ML15230A043.pdf>
- [53] Nuclear reactor safety system. *Wikipedia.com* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor_safety_system
- [54] INES Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných a radiačních událostí. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/INES-2008_cz_preklad.pdf
- [55] Jaderná elektrárna Černobyl. *Jadernéinfo.cz* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://jaderneinfo.webnode.cz/je-chernobyl-detailni/>
- [56] Černobylská havárie. In: *Wikipedia.com* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cernobylsk%C3%A1_hav%C3%A1rie
- [57] Havárie elektrárny Jaslovské Bohunice A1. In: *Wikipedia.com* [online]. [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hav%C3%A1rie_elektr%C3%A1rny_Jaslovsk%C3%A9_Bohunice_A1

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Jedna z možností štěpení jádra uranu neutronem [2].....	12
Obr. 1.2 Model palivové kazety s trubkami obsahující regulační tyče [7].	13
Obr. 1.3 Základní schéma jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem [9].....	14
Obr. 2.1 Tlaková nádoba jaderného reaktoru v čínské jaderné elektrárně [11].	15
Obr. 2.2 Schéma tlakovodního reaktoru PWR [14].	17
Obr. 2.3 Schéma varného typu reaktoru [14].	18
Obr. 2.4 Schéma těžkovodního reaktoru CANDU [14].	19
Obr. 2.5 Schéma první generace plynem chlazeného reaktoru Magnox GCR [14].	20
Obr. 2.6 Schéma jaderného reaktoru typu RBMK [14].	21
Obr. 2.7 Schéma rychlého množivého reaktoru FBR [14].	22
Obr. 3.1 Jednookruhové schéma jaderné elektrárny s parní turbínou.....	25
Obr. 3.2 Dvouokruhové schéma jaderné elektrárny.....	26
Obr. 3.3 Jedno z možných schémat tří okruhové jaderné elektrárny	27
Obr. 3.4 Model horizontálního parogenerátoru [34].	28
Obr. 3.5 Model cirkulačního čerpadlo [34].	30
Obr. 3.6 Model kompenzátoru objemu s prstenci ohříváků [34].	31
Obr. 3.7 Hlavní cirkulační čerpadlo	32
Obr. 3.8 Parní turbína v jaderné elektrárně Temelín [34].	33
Obr. 3.9 Model elektrického generátoru JE Temelín [34].	34
Obr. 4.1 Ukázka schémat bezpečnostních bariér [43].	40
Obr. 4.2 Model automatického systému na odtlakování [47].	41
Obr. 4.3 Schéma zapojení pasivního chladicího systému jádra [49].	42
Obr. 4.4 Pyramida INES [43].	43

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Přehled používaných jaderných reaktorů ke konci roku 2019 [13].	16
Tab. 4.1 Parametry parogenerátoru jaderné elektrárny Temelín [36].	28
Tab. 4.2 Parametry cirkulačních čerpadel v jaderné elektrárně Temelín [36].	30
Tab. 3.3 Parametry parní turbíny v JE Temelín [36].	33
Tab. 3.4 Parametry alternátorů v jaderné elektrárně Temelín [36].	34
Tab. 3.5 Parametry kondenzátoru v jaderné elektrárně Temelín [36].	35
Tab. 3.6 Parametry chladicí věže v jaderné elektrárně Temelín [36].	37