



České vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Diplomová práce

Koncepce budoucího využití modulárních
reaktorů v ČR

Václav Poživil

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Bouček
2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Poživil** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **487015**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Koncepce budoucího využití modulárních reaktorů v České republice

Název diplomové práce anglicky:

The concept of the future use of modular reactors in the Czech Republic

Pokyny pro vypracování:

- 1) Malé modulární reaktory.
- 2) Role SMR v přechodu k nízkouhlíkové energetice.
- 3) Koncepce sekundárního okruhu SMR pro budoucí uplatnění v České republice.
- 4) Klíčové aspekty proveditelnosti projektu SMR ve zvolené lokalitě.

Seznam doporučené literatury:

- 1) BEČVÁŘ JOSEF. Jaderné elektrárny. 1. vyd. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-237-81
- 2) DOLEŽAL JAROSLAV, ŠŤASTNÝ JIŘÍ, ŠPETLÍK JAN, BOUČEK STANISLAV a BRETTSCHEIDER ZBYNĚK. Jaderné a klasické elektrárny. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5
- 3) IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022 Edition [online]. 2022 [vid. 2022-10-18]. Dostupné z: https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet_rev11_with%20cover.pdf
- 4) KLIK FRANTIŠEK a DALIBA JAROSLAV. Jaderná energetika. 2. vyd. Praha: Vydavatelství Českého vysokého učení technického, 2002. ISBN 80-010-2550-0
- 5) SKLENKA LUBOMÍR. Malé a modulární jaderné reaktory a jejich potenciální využití v České Republice [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská. 2014 [vid. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2014-01-Sklenka.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Stanislav Bouček katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.02.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **16.02.2025**

Ing. Stanislav Bouček
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Ústí nad Labem dne 25. 05. 2023

.....

Václav Poživil

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Stanislavu Boučkovi za veškerou odbornou pomoc, vstřícnost a ochotu, kterou mi věnoval při vypracování této diplomové práce. Rovněž bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali nejenom při zpracování této práce, ale i během celého mého studia.

V Ústí nad Labem dne 25. 05. 2023

.....

Václav Poživil

Abstrakt

Cílem diplomové práce je popsání koncepce možného využití malých modulárních reaktorů v energetice České republiky v kontextu plánovaného přechodu k nízkouhlíkové energetice a dosažení klimatické neutrality.

Začátek diplomové práce je věnován vymezení pojmu malého modulární reaktoru, popisu jeho základních vlastností, jeho zakotvení v legislativní úpravě České republiky a klasifikací malých modulárních reaktorů. V následujících kapitolách je rozebrán současný stav energetiky České republiky spolu s plánem přechodu České republiky k nízkouhlíkové energetice. Následně je zhodnocena aktuální připravenost konceptů malých modulárních reaktorů ke komerčnímu užití a je popsána koncepce sekundárního okruhu malého modulární reaktoru s technologií PWR.

V závěru diplomové práce jsou popsány klíčové aspekty proveditelnosti projektu malého modulárního reaktoru spolu s návrhem koncepce sekundárního okruhu ve zvolené lokalitě a shrnutí přínosu této technologie pro energetiku v České republice.

Klíčová slova

Malý modulární reaktor, modularita, pasivní bezpečnost, SMR, PWR, teplárenství v ČR, elektroenergetika v ČR, nízkouhlíková energetika, sekundární okruh.

Abstract

The aim of the diploma thesis is to describe the concept of possible use of small modular reactors in the Czech Republic in the context of the planned transition to low-carbon energy and achieving climate neutrality.

The beginning of the diploma thesis is devoted to the definition of the concept of small modular reactor, description of its general characteristics, its anchoring in the legislation of the Czech Republic and classification of small modular reactors. In the following chapters is analysed the current state of the Czech Republic's energy sector together with the Czech Republic's plan for transition to low-carbon energy. Subsequently is assessed the current readiness of small modular reactor concepts for commercial use and is described the concept of a secondary circuit of a small modular reactor with PWR technology.

The thesis concludes with a description of the key aspects of the feasibility of a small modular reactor project together with a design for a secondary circuit concept in the selected location and a summary of the benefits of this technology for the power industry in the Czech Republic.

Keywords

Small modular reactor, modularity, passive safety, SMR, PWR, heating industry in the Czech Republic, electricity power industry in the Czech Republic, low-carbon energy, secondary circuit.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Malé modulární reaktory	3
2.1	Základní specifikace a vlastnosti SMR.....	5
2.1.1	Modularita	9
2.1.2	Integrální uspořádání reaktoru.....	10
2.1.3	Zvýšená bezpečnost.....	11
2.1.4	Snížení investičních a provozních nákladů.....	15
2.1.5	Flexibilita.....	17
2.1.6	Další vlastnosti.....	18
2.2	Legislativní úprava SMR v ČR	19
2.3	Rozdělení technologií SMR	20
2.3.1	Lehkovodní reaktory (LWR).....	22
2.3.2	Těžkovodní reaktory (PHWR)	25
2.3.3	Superkritické vodní reaktory (SCWR)	26
2.3.4	Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR).....	28
2.3.5	Reaktory s roztavenou solí (MSR).....	30
2.3.6	Rychlé reaktory (FR)	32
3	Role SMR v přechodu k nízkouhlíkové energetice	37
3.1	Současný stav energetiky v ČR.....	37
3.2	Plán přechodu ČR k nízkouhlíkové energetice.....	43
3.3	Možnosti využití SMR pro budoucí potřeby ČR	46
3.4	Přípravenost technologií SMR ke komerčnímu využití	47
3.4.1	Koncepty SMR v zahraničí.....	48
3.4.2	Koncepty SMR v České republice.....	56
3.5	Okrajové podmínky nasazení SMR v ČR	59

4	Koncepce sekundárního okruhu SMR pro budoucí uplatnění v ČR.....	61
4.1	Technologické systémy sekundárního okruhu	62
4.1.1	Výměníky tepla	62
4.1.2	Parní turbíny	70
4.1.3	Generátor	73
4.1.4	Čerpadla.....	74
4.1.5	Potrubí a armatury	76
4.1.6	Pomocné systémy	77
4.2	Uspořádání sekundárního okruhu SMR pro výrobu tepelné energie	79
4.3	Uspořádání sekundárního okruhu SMR pro výrobu elektrické energie ..	82
4.4	Uspořádání sekundárního okruhu SMR pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie.....	85
5	Klíčové aspekty proveditelnosti projektu SMR ve zvolené lokalitě	91
5.1	Okrajové podmínky lokality	93
5.2	Uplatnění vhodného konceptu SMR ve zvolené lokalitě	95
5.3	Koncepce sekundárního okruhu navrženého SMR ve zvolené lokalitě....	96
5.3.1	Schéma parního oběhu.....	97
5.3.2	Energetické bilance a vztahy použité k výpočtu	99
5.3.3	Vyhodnocení parního oběhu.....	102
5.4	Přínos technologie SMR pro energetiku ČR.....	105
6	Závěr	107
	Seznam literatury a zdrojů informací.....	111
	Seznam použitých symbolů a zkratk	119
	Seznam příloh	123

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Vývoj generací jaderných reaktorů.....	6
Obrázek 2.2 Principiální ilustrace lehkovodního SMR.....	8
Obrázek 2.3 Srovnání dvousmyčkového reaktoru AP1000 a integrálně uspořádaného SMR Westinghouse.....	10
Obrázek 2.4 Ovlivnění měrných nákladů u SMR.....	16
Obrázek 2.5 Klasifikace SMR	21
Obrázek 2.6 Technologické schéma reaktoru PWR.....	23
Obrázek 2.7 Technologické schéma reaktoru BWR.....	24
Obrázek 2.8 Technologické schéma reaktoru PHWR.....	26
Obrázek 2.9 Technologické schéma reaktoru SCWR	27
Obrázek 2.10 Technologické schéma reaktoru HTGR	29
Obrázek 2.11 Technologické schéma reaktoru MSR.....	30
Obrázek 2.12 Technologické schéma reaktoru GFR.....	33
Obrázek 2.13 Technologické schéma reaktoru LFR	34
Obrázek 2.14 Technologické schéma reaktoru SFR	35
Obrázek 3.1 BWRX-300 a koncepční rozložení elektrárny BWRX-300.....	49
Obrázek 3.2 NUWARD™ a koncepční rozložení reaktorů NUWARD™	50
Obrázek 3.3 SMR-160	52
Obrázek 3.4 Rolls-Royce SMR	53
Obrázek 3.5 VOYGR™.....	54
Obrázek 4.1 Schématické uspořádání parogenerátoru v JE Temelín	65
Obrázek 4.2 Princip průtočného a oběhového chlazení.....	67
Obrázek 4.3 Zjednodušené schéma horkovodní a parní výtopny	80
Obrázek 4.4 Zjednodušené schéma II. Okruhu SMR s kondenzační turbínou.....	83
Obrázek 4.5 Zjednodušené schéma II. Okruhu SMR s protitlakou turbínou a regulovaným odběrem páry	86
Obrázek 4.6 Zjednodušené schéma II. Okruhu SMR s kondenzační turbínou a regulovaným odběrem páry	87
Obrázek 5.1 Zjednodušené schéma II. Okruhu navrženého SMR ve zvolené lokalitě	98

Seznam grafů

Graf 3.1 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto – 2021	38
Graf 3.2 Podíl jednotlivých sektorů národního hospodářství na celkové spotřebě elektřiny v ČR.....	39
Graf 3.3 Podíl instalovaného výkonu v ES ČR – 2021.....	39
Graf 3.4 Podíl jednotlivých sektorů národního hospodářství na spotřebě tepla v ČR	41
Graf 3.5 Podíl paliv na výrobě tepla brutto – 2021	41
Graf 3.6 Netto instalovaný výkon v Konzervativním scénáři pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů.....	44
Graf 3.7 Netto instalovaný výkon v Progresivním scénáři pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů.....	45

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 Porovnání bezpečnostních systémů dnešních elektráren a SMR.....	14
Tabulka 5.1 Hodnocení lokalit společností ČEZ, a.s.....	92
Tabulka 5.2 Parametry SMR VOYGR™.....	96
Tabulka 5.3 Vstupní parametry	97
Tabulka 5.4 Hmotnostní průtoky	103

1 Úvod

Jaderná energetika a jak ji využít v přechodu k nízkouhlíkové energetice je jedním z aktuálně diskutovaných témat ve společnosti. Instalovaný výkon jaderných elektráren v posledních dvaceti letech celosvětově mírně narostl, ovšem v Evropské Unii došlo k poklesu. S tím, jak přichází tlak na přechod k nízkouhlíkové energetice a ke klimatické neutralitě, začínají jednotlivé státy v EU, ale i ve světě, uvažovat jakým způsobem musí proměnit svou energetiku, aby těchto cílů dosáhly. Právě jaderné zdroje jsou jedním z bezemisních zdrojů pomocí kterých lze těchto cílů dosáhnout. V posledních letech se v jaderné energetice diskutuje zejména nad malými modulárními reaktory (dále také „SMR“), které by mohly mít potenciál nejenom ve výrobě elektrické energie, ale například i ve výrobě tepla, vodíku a podobně.

Tématem zpracování diplomové práce jsou malé modulární reaktory a jejich koncepce budoucího užití v České republice. V úvodní části diplomové práce je rozebrána definice, historický vývoj a základní vlastnosti malých modulárních reaktorů. Následuje zakotvení SMR v legislativní úpravě České republiky a klasifikace malých modulárních reaktorů podle použité technologie spolu s jejich bližším popisem.

V následující části je rozebrán současný stav energetiky v ČR současně s plánem přechodu ČR k nízkouhlíkové energetice, okrajovými podmínkami nasazení a možností využití malých modulárních reaktorů v ČR. Dále je zhodnocena aktuální připravenost konceptů SMR ke komerčnímu využití. Následně je rozebrána koncepce sekundárního okruhu malého modulárního reaktoru s technologií PWR v kontextu možného uplatnění v ČR.

Na závěr jsou uvedeny lokality v ČR zvažované pro výstavbu SMR, z nichž je vybrána jedna možná lokalita, u které jsou popsány její okrajové podmínky, možnost uplatnění aktuálních konceptů SMR v dané lokalitě a návrh koncepce sekundárního okruhu spolu s jeho vyhodnocením.

2 Malé modulární reaktory

Malý modulární reaktor je definován jako pokročilý jaderný reaktor s elektrickým výkonem až do 300 MWe na jeden reaktor, což odpovídá přibližně 1/3 výkonu tradičního jaderného reaktoru, podle Mezinárodní agentury pro atomovou energii (dále také „IAEA“). Z názvu malého modulárního reaktoru vyplývá jeho další vlastnost a tou je jeho modularita. To znamená, že jeho technické či provozní soubory jsou složeny z modulů, které jsou vyrobeny ve výrobním závodě a následně jsou dovezeny na místo určené k jeho instalaci¹. Malý modulární reaktor je nejčastěji označován zkratkou SMR, která vychází z anglického názvu „Small Modular Reactor“. V některých literaturách vychází zkratka SMR z anglického názvu „Small and Medium sized Reactors“ (malé a střední reaktory), jelikož ne všechny SMR jsou malého výkonu.

Mezinárodní agentura pro atomovou energii (IAEA) klasifikuje reaktory podle elektrického výkonu a to na:

- Mikro reaktory s výkonem do 10 MWe,
- malé modulární reaktory s výkonem od 10 MWe do 300 MWe,
- střední reaktory s výkonem od 300 MWe do 700 MWe a
- velké (konvenční) reaktory s výkonem nad 700 MWe. [32]

Této klasifikaci neodpovídají všechny designy SMR jako například design Rolls-Royce od britské společnosti Rolls-Royce SMR Ltd. s výkonem 470 MWe. Přesto tento reaktor IAEA považuje za SMR, a proto nelze tuto klasifikaci brát za pevně danou, ale spíše za obecné výkonové rozdělení.

Dalšími požadovanými vlastnostmi SMR jsou například zvýšená bezpečnost pomocí pasivních a inherentních bezpečnostních opatření, prodloužená kampaň reaktoru na dva a více let či výrobní i výkonová flexibilita, která má zajistit jednak možnost výroby více forem energií pro širší spektrum uživatelů, tak i rychlejší změny výkonu reaktoru a zabránění vzniku xenonové prostorové oscilace. Jednou z možných vlastností je také snížení investičních a provozních nákladů oproti

¹ Tzv. „území k umístění“ dle § 47 zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů.

stávajícím zdrojům elektrické energie, ale tato vlastnost je projevív pravděpodobně až při sériové výrobě SMR (tzv. reaktorů NOAK). U definice SMR je kladen důraz zejména na pasivní a inherentní bezpečnostní opatření a na jejich modularitu. Uvedené vlastnosti a také další vlastnosti budou podrobněji rozebrány v následující kapitole. [24]

Některé konstrukční prvky malých modulárních reaktorů se objevují už od 40. let 20. století. Na konci 40. let v USA začal vývoj malých jaderných reaktorů, které by mohly pohánět vojenská plavidla (ponorky, letadlové lodě, torpédoborce...). Hlavně u ponorek znamenaly jaderné reaktory velký technologický i strategický posun, jelikož se jim zvýšil jejich akční rádius, nemusely tak často doplňovat palivo a mohly zůstat pod vodou mnohem delší dobu. Dnešní moderní jaderné ponorky mohou zůstat nepozorovaně pod hladinou až 3 měsíce, aniž by se musely vynořit. V roce 1955 USA uvedly do provozu první ponorku na jaderný pohon USS Nautilus s tlakovodním reaktorem S2W od společnosti Westinghouse. V roce 1957 byla spuštěna na vodu první civilní loď na jaderný pohon, sovětský ledoborec Lenin, s třemi tlakovodními reaktory OK-150 od společnosti OKB. Každý reaktor měl tepelný výkon 90 MWt a jako palivo používal palivové články ve formě keramického UO_2 s opláštěním ze zirkonia či slitiny zirkonium-niob. Jedna vsázka paliva činila 75 až 85 kg a palivo bylo obohacené uranem ^{235}U na úrovni 5 %. Aktivní zóna měla výšku 1,6 m a průměr 1 m a jako chladivo a zároveň moderátor se používala destilovaná voda. Následoval vývoj a zdokonalování jaderných reaktorů do dalších vojenských a civilních plavidel. [4, 54]

Spojené státy americké vyvíjely také malé reaktory pro výrobu elektrické energie a tepla ve vzdálených a nedostupných lokalitách skrze program „Army Nuclear Power Program“. Tímto programem bylo postaveno 8 reaktorů, z nichž 5 reaktorů bylo mobilních. Například mobilní reaktor PM-3A byl uveden do provozu v roce 1962, nacházel se v McMurdo Sound v Antarktidě a sloužil k výrobě elektrické i tepelné energie. Reaktor sloužil až do roku 1972. Reaktor jako palivo používal vysoce obohacený uran a poskytoval 9 MWt tepelného výkonu či 1,5 MWe. [57]

Jedním z posledních milníků v oblasti SMR je úplné připojení ruské plovoucí jaderné elektrárny Akademik Lomonosov k síti v květnu roku 2020. Elektrárna se nachází u poloostrova Čukotka a je složena ze dvou tlakovodních reaktorů KLT-40S

s obohacným uranem ^{235}U na úrovni 14,1 %, které dohromady poskytují 300 MWt tepelného výkonu anebo 70 MWe elektrického výkonu. Reaktory slouží, jak k dodávce elektrické, tak i tepelné energie do přilehlého města Pevek. Další významnou událostí je připojení čínské jaderné elektrárny s dvěma demonstračními reaktory HTR-RM k síti v prosinci roku 2021. HTR-RM je vysokoteplotní a plynem chlazený reaktor s tepelným výkonem 250 MWt a s obohacním paliva uranem ^{235}U na úrovni 8,5 %. Oba reaktory poskytují dohromady 210 MWe elektrického výkonu.^[24]

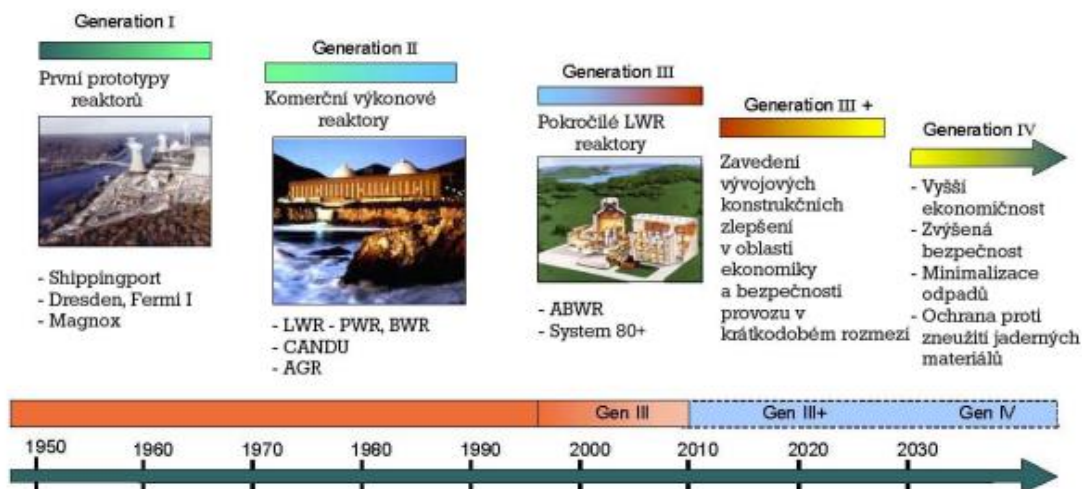
2.1 Základní specifikace a vlastnosti SMR

Lehkovodní malé modulární reaktory vychází z konceptů tradičních jaderných elektráren, které však dále rozvíjí a zdokonalují zejména v oblasti bezpečnostních opatření či v jejich modularitě. Nelze proto říci, že SMR jsou pouze zmenšenou verzí současných tradičních jaderných elektráren, ale jsou to další vývojové stupně jaderných reaktorů, které čerpají zkušenosti získané během desítek let provozu komerčních a výzkumných reaktorů.

Jaderné reaktory, které se nacházejí v tradičních jaderných elektrárnách, jsou nejvíce zastoupeny II. generací jaderných reaktorů. Celkem je v provozu přes 400 reaktorů II. generace, které se využívají ke komerčnímu provozu. II. generace je druhým vývojovým stádiem, které má poskytovat ekonomičtější a spolehlivější provoz než reaktory I. generace. Obvyklá doba životnosti reaktorů je 40 let, ale obvykle je možné dobu životnosti prodloužit na více než 50 nebo 60 let s ohledem na opotřebení reaktoru a všech ostatních komponent elektrárny a jsou dimenzovány do velkých elektrických sítí. Typickými představiteli této generace jsou reaktory typu PWR (VVER), BWR či CANDU. Reaktory II. generace mají aktivní bezpečnostní prvky, které potřebují ke své činnosti elektřinu a jejich spouštění zajišťuje buď operátor bloku manuálně, anebo bezpečnostními systémy automaticky. V některých reaktorech se nacházejí pasivní bezpečnostní prvky, které nepotřebují ke své správné funkci dodávku elektřiny a mohou pracovat bez zásahu operátoru bloku. Pravděpodobnost poškození aktivní zóny těchto reaktorů se pohybuje okolo hodnoty 10^{-5} za rok, tedy tavení aktivní zóny nastane pravděpodobně jednou za 100 000 let provozu reaktoru. Tyto reaktory produkují

velké množství použitého paliva a k řešení otázky konce palivového cyklu přistupují země rozdílnými způsoby. Například lze palivo uložit do úložiště vysoce radioaktivního odpadu nebo palivo částečně přepracovat. [21]

Dalším vývojovým stádiem u reaktorů tradičních jaderných elektráren jsou reaktory III. či III+ generace. V tradičních jaderných elektrárnách jsou v provozu nižší desítky kusů těchto reaktorů. Oproti předchozí generaci dosahují vylepšení palivového cyklu, tepelné účinnosti, standardizaci a bezpečnostních systémů. Obvyklá doba životnosti reaktorů je 60 let, s možností jejího prodloužení o další desítky let. Typickými představiteli této generace jsou reaktory typu APWR či ABWR. III. generace využívá co nejvíce možných pasivních bezpečnostních systémů a naproti tomu se snaží minimalizovat množství aktivních bezpečnostních systémů. Generace III+ klade důraz na vyšší vyhoření paliva, a tedy snížení jeho plýtvání. Zároveň tato generace obsahuje další stupeň pasivních bezpečnostních systémů, které nepotřebují manuální řízení od operátora bloku či automatického systému a ke své funkci využívají fyzikální zákony jako je gravitace či přirozená konvekce. Pravděpodobnost poškození aktivní zóny těchto reaktorů silně závisí na typu reaktoru a na podmínkách lokality. Pravděpodobnost poškození aktivní zóny se pohybuje od hodnoty $6 \cdot 10^{-7}$ až po hodnotu $3 \cdot 10^{-8}$ za rok, tedy tavení aktivní zóny nastane pravděpodobně jednou za 1,5 až 33 milionů let provozu reaktoru. Na následujícím obrázku je zobrazen vývoj generací jaderných reaktorů v čase spolu s uvedením jejich zástupců či vlastností. [21]



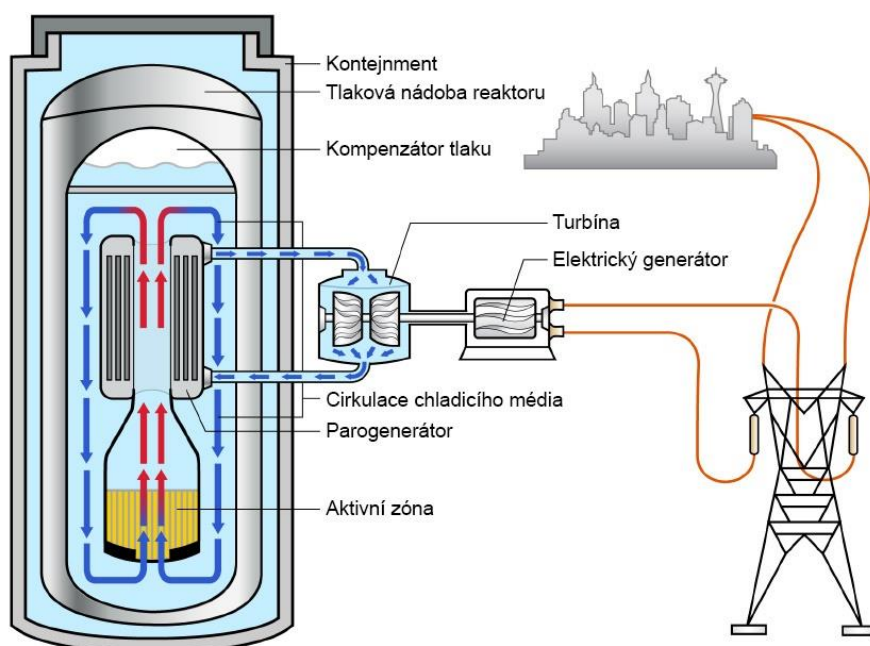
Obrázek 2.1 Vývoj generací jaderných reaktorů [44]

Malé modulární reaktory, které více vychází z tradičních jaderných reaktorů, jsou koncipovány jako reaktory III+ generace, jež byly popsány výše. Naproti tomu pokročilé modulární reaktory, které jsou aktuálně ve vývoji, cílí na IV. generaci reaktorů, které dalece překračují dnešní typy reaktorů z technologického i bezpečnostního hlediska. Reaktory IV. generace oproti předchozím generacím, dosahují vyšší provozní teploty primárního okruhu, jejíž hodnota se pohybuje od 510 °C do 850 °C. Díky vyšší provozní teplotě dosáhnout tyto reaktory efektivnější výroby elektrické energie a lze je využít i k výrobě vodíku, k výrobě syntetických paliv nebo ve vyšší míře i k dodávce tepla pro dálkové vytápění. Dnešní reaktory využívají jen malou část energie uloženou v jaderném palivu a zároveň vytváří pro ně již neštěpitelný materiál (např. transurany). Reaktory IV. generace oproti dnešním reaktorům II, III./III.+ generace využívají nové typy chladiva, zvyšují účinnost palivového cyklu (díky uzavřenému palivovému cyklu) a obecně budou splňovat vyšší nároky na bezpečnost, ekonomickou hospodárnost, udržitelný rozvoj jaderných zdrojů a ochranu proti zneužití jaderného materiálu pro šíření jaderných zbraní. Typickými představiteli této generace jsou reaktory typu VHTR, MSR, SCWR, LFR, SFR či GFR. Tato generace se zaměřuje na reaktory s rychlými neutrony (tj. s neutrony, které vytváří více štěpitelného materiálu než sami spotřebují) a s uzavřeným palivovým cyklem, který umožňuje vyšší využití jaderného paliva, a tedy nižší vznik radioaktivního odpadu. Zároveň budou moci využít jako jaderné palivo například i transurany, které produkují dnešní typy reaktorů a které jsou neštěpitelné u těchto typů reaktorů. Dále se zaměřuje na reaktory s tepelnými neutrony, které dokážou poskytnout pracovní látku o teplotě téměř 1 000 °C nebo vyšší, čímž nemusí reaktory sloužit pouze na výrobu elektřiny, ale také na výrobu vodíku či vysokoteplotní páry pro chemický průmysl. Reaktory IV. generace obsahují stejné bezpečnostní prvky jako reaktory III+ generace, ale je opět kladen důraz na využití co nejvíce pasivních bezpečnostních systémů, tak aby byla nemožná nebo téměř nemožná těžká havárie jaderného reaktoru. [21]

Existují desítky konceptů SMR, které se liší použitou technologií, chladivem, uspořádáním či úrovní obohacení, ale principiálně fungují stále stejně jako tradiční jaderné reaktory. Základem SMR je reaktor, ve kterém se nachází aktivní zóna, v níž probíhá štěpná řetězová reakce. Touto reakcí dochází k uvolnění velkého množství

tepelné energie, kterou dále odebírá chladivo (voda, plyn, tekutý kov, sůl...). Chladivo obvykle odvádí tepelnou energii do tepelného výměníku (tzv. parogenerátoru), který předává tepelnou energii vodě měnící se na páru. Pára je následně vedena do turbíny, ve které se přeměňuje tepelná energie na kinetickou energii a roztáčí hřídel. Hřídel je dále napojena na generátor, kde se tato kinetická energie přeměňuje na elektrickou energii. Tento konstrukční princip je pouze jedním z mnoha možných konstrukčních typů jaderných reaktorů a další typy budou detailněji popsány v následující kapitole. Princip přeměny tepelné energie na elektrickou energii je graficky zobrazen na následujícím obrázku.

Na obrázku se dále nachází kompenzátor objemu, který se stará o udržení konstantní hodnoty tlaku, na kterou je primární okruh dimenzován a kontejnment, který slouží jako ochranná obálka proti úniku nebezpečných radioaktivních látek do ovzduší a zároveň slouží jako mechanická ochrana reaktoru proti vnějším vlivům.



Obrázek 2.2 Principiální ilustrace lehkovodního SMR [11]

V následujících podkapitolách jsou popsány základní vlastnosti malých modulárních reaktorů, které mají být výhodou oproti tradičním jaderným elektrárnám. Klíčovými vlastnostmi, kterými se malé modulární reaktory liší, jsou modularita, bezpečnost, ekonomika a flexibilita.

2.1.1 Modularita

Základní vlastností SMR je jejich modularita, což lze definovat jako uplatňování modulárního přístupu ve výrobě a individuálním vyzkoušení částí provozních souborů tam, kde je to z hlediska realizace výhodné. Moduly jsou vyrobeny v továrnách a s jejich výrobou lze očekávat vyšší produktivitu práce a lepší kontrolu kvality než na samotném staveništi. Modularita je zajištěna díky zjednodušené konstrukci modulárních reaktorů. SMR by měl být složen z co nejmenšího počtu modulů, aby se co nejvíce usnadnila konstrukce na vybraném místě a zároveň je třeba uzpůsobit rozměry i váhu modulů tak, aby byla vůbec realizovatelná doprava na určené místo. Respektive lepším výrazem místo slova „konstrukce“ je slovo „sestavění“, jelikož se SMR nebudou stavět, ale sestavovat jako stavebnice. Toto lze uplatnit jen u některých provozních částí (například u systému kontroly řízení či elektrických rozvodů je modularizace téměř nemožná nebo omezená). Modularita může zjednodušit i dopravu na určené místo, čímž mohou být SMR postaveny v odlehlých a těžko dostupných místech.

To je velkou výhodou oproti tradičním jaderným elektrárnám, u nichž se musí nadměrné části elektrárny svářet a složitě spojovat až na daném místě. Díky modularizaci je také možná sériová výroba modulárních reaktorů, což se projeví hlavně ve standardizaci (tzn. zvýšení kvality a zrychlení výroby), snížení investičních nákladů na SMR a ve zrychlení doby výstavby oproti tradičním jaderným elektrárnám. Zároveň modularitou dojde k velkému snížení rozlohy elektrárny. Například u jaderné elektrárny Dukovany na 1 MWe instalovaného elektrického výkonu vychází potřebná plocha na 441 m², naproti tomu VOYGRTM od společnosti NuScale bude potřebovat plochu okolo 150 m² na 1 MWe instalovaného elektrického výkonu.

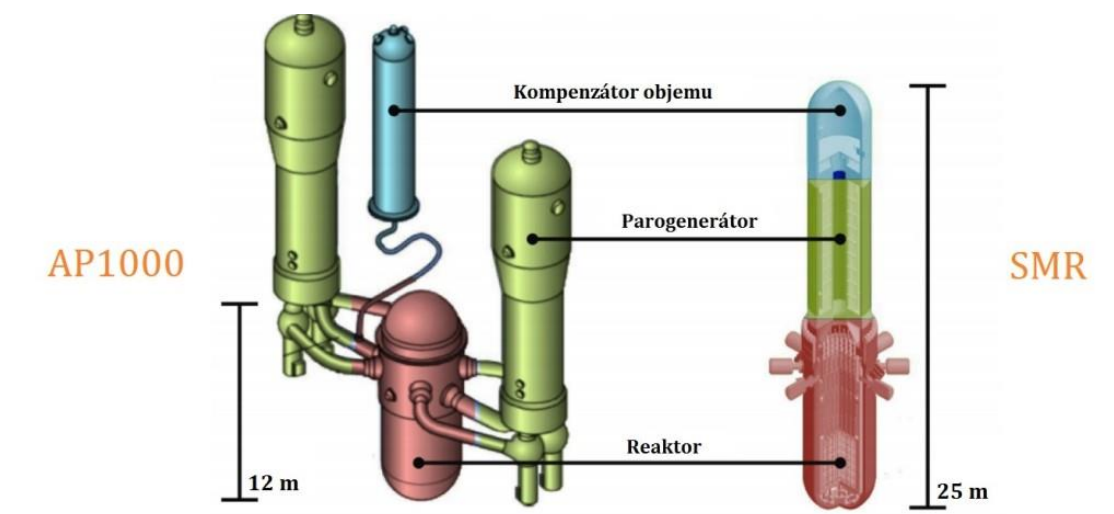
Druhým významem modularity může být spojení několika reaktorů (modulů) do jednoho většího výkonového celku, jak je to navrženo například u designu VOYGRTM, u kterého se v jedné elektrárně může nacházet až 12 reaktorů, které mohou pracovat nezávisle na sobě. [42]

2.1.2 Integrální uspořádání reaktoru

Integrální konstrukce souvisí úzce s modularitou, jelikož také zjednodušuje konstrukci SMR a zároveň zvyšuje bezpečnost. Většina dnešních jaderných reaktorů (např. PWR reaktory) má smyčkové uspořádání, tj. na reaktor obsahující aktivní zónu je napojen systém potrubí (tzv. cirkulační potrubí), kterým cirkuluje chladivo mezi reaktorem a parogenerátory. Toto potrubí je součástí primárního okruhu spolu s reaktorem, parogenerátorem, oběhovým čerpadlem a kompenzátorem objemu. V primárním okruhu jsou obvykle 2 až 4 smyčky cirkulačního systému.

Malé modulární reaktory se v mnoha případech navrhují v tzv. integrálním uspořádání, ve kterém jsou všechny potřebné komponenty primárního okruhu integrovány do jedné tlakové nádoby, která je uložena v kontejneru. Díky tomuto uspořádání nebude potřeba cirkulační potrubí a dojde ke zjednodušení celé konstrukce. Méně pokročilé designy SMR využívají k cirkulaci chladiva stále oběhová čerpadla, tj. nucenou konvekci. Pokročilejší designy SMR plánují integrální uspořádání bez potřeby oběhových čerpadel, ve kterém chladivo cirkuluje v primárním okruhu jen díky přirozené konvekci i za normálního provozu. [51]

Na následujícím obrázku je uvedeno srovnání mezi smyčkovým a integrálním uspořádáním reaktoru.



Obrázek 2.3 Srovnání dvousmyčkového reaktoru AP1000 a integrálně uspořádaného SMR Westinghouse^[51]

2.1.3 Zvýšená bezpečnost

Jak bylo popsáno výše, tak důležitou charakteristikou bezpečnosti je pravděpodobnost poškození aktivní zóny, která bude mnohem nižší u SMR než u tradičních jaderných elektráren. Dnešní elektrárny mají pravděpodobnost poškození aktivní zóny okolo $1 \cdot 10^{-5}$ za rok, ale SMR jako reaktory III+ generace a vyšší budou mít tuto pravděpodobnost nižší než $6 \cdot 10^{-7}$ za rok, tedy tavení aktivní zóny nastane s pravděpodobností méně než jednou za 1,5 milionu let provozu reaktoru.

Hlavními znaky zvýšené bezpečnosti jsou tzv. inherentní a pasivní bezpečnost, které pomohou snížit počet aktivních bezpečnostních systémů. Inherentní bezpečnost je taková bezpečnost, která vychází ze základních fyzikálních principů použité reaktorové technologie, tj. je nezávislá na lidské činnosti. Příkladem inherentní bezpečnosti je uspořádání reaktoru, resp. aktivní zóny, které poskytne záporný teplotní či výkonový koeficient reaktivity. Záporný teplotní koeficient reaktivity způsobí, že při vzrůstu teploty chladiva (či moderátoru u LWR - obvykle H_2O) se zmenší jeho hustota, což vede ke zvětšování vzdáleností mezi jednotlivými molekulami moderátoru a k horšímu zpomalování neutronů. Tímto způsobem dojde ke snížení reaktivity, což má za následek snížení výkonu reaktoru a pokles teploty. Záporný výkonový koeficient reaktivity způsobí, že vzrůstem výkonu reaktoru vzroste teplota paliva, čímž dojde k rozšíření rezonančního pásma paliva (zejména uranu ^{238}U) a k nárůstu pravděpodobnosti zachytu neutronů v tomto pásmu. Takto opět dojde ke snížení reaktivity a následně i ke snížení výkonu reaktoru. Do inherentní bezpečnosti je možné zařadit i integrální uspořádání reaktoru, které vylučuje havárii se ztrátou chladiva (tzv. LOCA), jelikož toto uspořádání integruje veškeré komponenty primárního okruhu do jedné nádoby (reaktoru), čímž není potřebné žádné potrubí cirkulačních smyček primárního okruhu, u kterého by mohlo dojít k poškození a k úniku chladiva. ^[40]

Pasivní bezpečností se rozumí takové bezpečnostní systémy, které ke své funkci, tj. zabránění jaderné havárii či úniku nebezpečných látek, nepotřebují dodávky elektrického proudu. Pasivní bezpečnostní systémy využívají fyzikální zákony (např. gravitace a konvekce). Pasivními bezpečnostními systémy jsou například:

- Havarijní absorpční tyče – za normálního provozu jsou plně vysunuty nad aktivní zónou. Při nebezpečí havárie povolí elektromagnety (elektromagnet je sepnut, dokud je napájen a po ztrátě napájení se vypne) držící tyče nad aktivní zónou a tyče se následně samovolně zasunou do aktivní zóny.
- Systém havarijního chlazení aktivní zóny – slouží k zaplavení aktivní zóny v případě poklesu tlaku v primárním okruhu. Chladivo obsahuje kyselinu boritou, která absorbuje neutrony, a proudí ze zásobníku pouze působením gravitace a proto je zásobník umístěn nad aktivní zónou. Zároveň musí být zásobník natlakovaný na určitou úroveň, aby byla zabezpečena jeho správná funkce (například v JE Temelín je zásobník natlakovaný na 6 MPa a k jeho zareagování dojde až po poklesu tlaku v primárním okruhu z 15,75 MPa na 6 MPa).

Pasivní bezpečností se také rozumí využití přirozené konvekce chladiva při odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny. Některé SMR využívají přirozenou konvekci chladiva i při normálním provozu a tudíž nepotřebují cirkulační čerpadla při svém normálním provozu, což zvyšuje celkovou spolehlivost primárního okruhu.

Některé SMR dále považují za pasivní bezpečnost i odvod zbytkového tepla skrze stěnu nádoby reaktoru do okolní nádrže s vodou, kde se voda vaří, odpařuje se a tudíž je potřeba její doplňování, anebo má nádrž velkou tepelnou kapacitu, nedochází k varu a tudíž není potřeba doplňování vody.

Výše popsané prvky pasivní bezpečnosti lze uvést na příkladu reaktoru VOYGR™ od společnosti NuScale. Tento modulární reaktor využívá přirozenou konvekci i za normálního provozu. V případě havarijního odstavení dochází nejprve k odvodu zbytkového tepla pomocí přirozené konvekce do parogenerátorů, které je možné napojit na externí tepelné výměníky umístěné v reaktorovém bazénu. V případě poškození parogenerátorů je možné odtakovat reaktor do prostoru kontejnmentu, kde se zbytkové teplo bude odvádět přes stěnu kontejnmentu do reaktorového

bazénu. Množství vody v reaktorovém bazénu vystačí pro dodatečné chlazení bez doplňování vody na dobu 30 dnů. Po 30 dnech poklesne zbytkový výkon na takovou úroveň, při které již postačí chlazení reaktoru vzduchem pomocí přirozené cirkulace.^[51]

Z důvodu zvýšení bezpečnosti velká část designů SMR uvažuje s postavením reaktoru pod úrovní terénu, čímž bude reaktor lépe ochráněn přes vnějšími vlivy (přírodní pohromy, teroristické útoky...). Zároveň u některých SMR nebude probíhat výměna paliva přímo v elektrárně, ale část aktivní zóny se spolu s palivem odveze do specializovaného závodu, kde proběhne jeho výměna. Tímto se zvýší ochrana proti zneužití jaderného materiálu přímo v elektrárně, a zároveň se sníží počet zařízení a prostor (například sklad vyhořelého paliva apod.) potřebných k výměně paliva a jeho uchování.

Posledním principem na zvýšení bezpečnosti je tzv. ochrana do hloubky. Tento princip je složen z několika na sobě nezávislých technických a organizačních opatření, která slouží k ochraně při havárii, aby nedošlo k úniku radioaktivních látek, záření či jiných nebezpečných látek z reaktoru. Ochrana do hloubky je odstupňovaná do pěti úrovní, aby při selhání jedné úrovně mohla převzít ochrannou funkci další (vyšší) úroveň. Cílem SMR je mít co nejpropracovanější princip ochrany do hloubky tak, aby při havárii reaktoru nebylo ohroženo ani nejbližší okolí. Tím dojde ke zmenšení frekvence výskytu radiační havárie a s tím související zmenšení zóny havarijního plánování (dále jen „ZHP“), která by se mohla u SMR zmenšit až na hranici elektrárny, čímž by se mohly SMR stavět blíže k hustě obydleným sídlům. ZHP se nestanovuje, resp. končí na hranici elektrárny, pokud je frekvence výskytu radiační havárie nižší než $1 \cdot 10^{-7}$ za rok, a to dle přílohy č. 2 k vyhlášce SÚJB č. 359/2016 Sb., o podrobnostech k zajištění zvládnutí radiační mimořádné události. Například zóna havarijního plánování JE Dukovany je rozdělena na tři pásma představující kružnice o poloměru 5 km, 10 km a 20 km od jaderné elektrárny. ^[40, 46]

V následující tabulce je zobrazeno porovnání bezpečnostních systémů dnešních elektráren (II. generace reaktorů) a malých modulárních reaktorů.

Bezpečnostní systémy	
Dnešní jaderné elektrárny	Malé modulární reaktory
Vysokotlaké a nízkotlaké vstřikovací systémy při úniku chladiva z primárního okruhu.	Netřeba aktivní vstřikovací systémy. Chlazení aktivní zóny je udržováno pasivními systémy.
Havarijní jímky a s tím související požadavky na čistou pozitivní sací výšku (NPSH) bezpečnostních čerpadel.	Netřeba čerpadel pro zmírnění nehod a proto odpadá potřeba havarijních jímek a ochrana jejich sacího přívodu.
Nouzové diesel generátory.	Pasivní systém nepotřebuje záložní zdroj proudu k chlazení aktivní zóny.
Aktivní systém kontejnmentu pro odvod tepla a systém sprchování kontejnmentu.	Není potřeba díky pasivnímu odvodu tepla z kontejnmentu, čímž není potřeba ani systém sprchování sloužící ke snížení tlaku páry nebo k odstranění radioaktivity z kontejnmentu.
Iniciace nouzového chladícího systému aktivní zóny (ECCS), systém kontroly a řízení (I&C). Komplexní systém vyžaduje značné množství online testů.	Zjednodušené a/nebo pasivní bezpečnostní systémy vyžadují méně testování a nejsou tak náchylné k neúmyslnému spuštění.
Nouzový systém napájecí vody, zásobníky kondenzátu a s tím související nouzové zásoby chladící vody.	Schopnost odvést teplo z aktivní zóny bez nouzového systému napájecí vody je značné zvýšení bezpečnosti. (pasivní odvod tepla)
Těsnění čerpadla chladící kapaliny reaktoru.	Integrální konstrukce snižuje potřebu těsnění.

Tabulka 2.1 Porovnání bezpečnostních systémů dnešních elektráren a SMR [1]

Tabulka, uvedená výše, ukazuje značné zjednodušení bezpečnostních systémů SMR oproti dnešním jaderným elektrárnám. Zároveň dojde i ke zvýšení bezpečnosti, díky aplikaci těchto systémů. Díky těmto bezpečnostním opatřením by mohlo dojít ke značné redukci havarijních plánů a personálu potřebného k obsluze u SMR v budoucnosti.

2.1.4 Snížení investičních a provozních nákladů

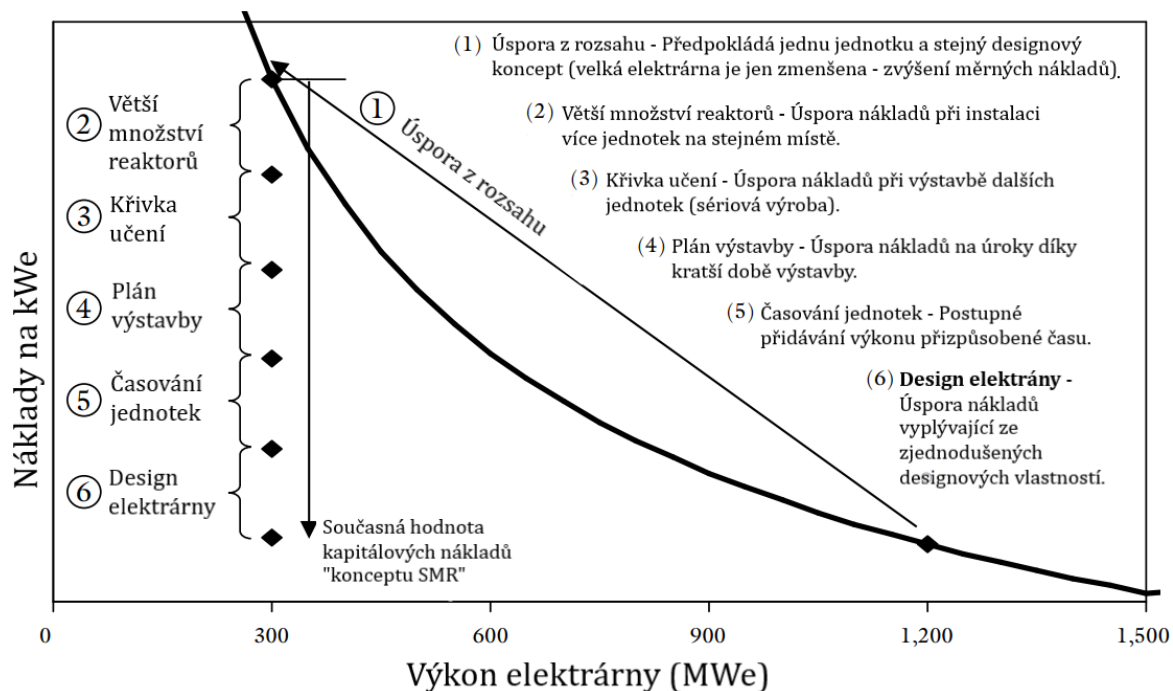
Další vlastností malých modulárních reaktorů by mělo být snížení jejich investičních a provozních nákladů. Ovšem u této vlastnosti nejsou zatím přesné informace a jedná se pouze o odhady. Náklady spojené s výstavbou a provozem elektrárny lze rozdělit na:

- Kapitálové náklady – jsou veškeré náklady spojené s projektováním, povolováním, výstavbou, prvním spuštěním a financováním elektrárny.
- Náklady na údržbu a provoz (dále jen „provozní náklady“) – zahrnují i náklady na palivo, mzdy personálu, modernizaci technologií, neočekávané události a další režijní náklady.
- Náklady na vyřazení zařízení z provozu – zahrnují i náklady na ochranu životního prostředí a na nakládání s odpady.

Kapitálové náklady jaderných elektráren jsou velmi vysoké a mohou dosahovat více než 50 % celkových nákladů vynaložených na výstavbu, provoz a vyřazení elektrárny v průběhu celého životního cyklu elektrárny. Naproti tomu náklady na provoz, údržbu a paliva jsou relativně nízké oproti uhelným či plynovým elektrárnám. Tradiční jaderné elektrárny mají ekonomickou návratnost v řádu desítek let, což je jeden z důvodů, proč nejsou příliš žádané u investorů.

Malé modulární reaktory by měly být pravděpodobně levnější, jak na výstavbu, tak i na provoz, právě díky zjednodušené technologii, modularizaci, sériové výrobě, kratší době výstavby a dalším výhodným vlastnostem. Ovšem v současné situaci je nemožné přesně odhadnout, jaké budou skutečné náklady u většiny designů SMR, jelikož nejsou postaveny ani demonstrační jednotky. Také je důležité rozlišovat, jestli uvedené náklady platí pro první konstruovanou elektrárnu (tzv. FOAK – first of a Kind) nebo platí pro další sériově vyrobenou stejnou elektrárnu (tzv. NOAK – N-th of a Kind), protože u malých modulárních reaktorů by u n-tého reaktoru mělo dojít k velkému poklesu nákladů oproti prvnímu zkonstruovanému reaktoru.

Na následujícím obrázku je graficky zobrazeno, jak vlastnosti SMR ovlivňují měrné náklady na kWe u malých modulárních reaktorů.



Obrázek 2.4 Ovlivnění měrných nákladů u SMR [21]

Tradiční jaderné elektrárny dosahují snížení měrných kapitálových nákladů (náklady na 1 MWe instalovaného elektrického výkonu) pomocí úspor z rozsahu, tj. zvýšením objemu produkce čili instalovaného elektrického výkonu. Pokud by byly SMR pouze zmenšenou verzí tradičních elektráren, tak by jejich měrné kapitálové náklady byly větší až o 70 % a jejich měrné provozní náklady by byly větší až o 51 %, jelikož by SMR nedosáhly takových úspor z rozsahu jako tradiční elektrárny. Postavením více malých modulárních reaktorů na jednom místě lze dosáhnout okolo 14 % úspory na měrných kapitálových nákladech a až 15 % úspory na měrných provozních nákladech. Dále s každým dalším postaveným SMR se získávají zkušenosti ve výrobě i výstavbě, čímž dochází k jejich zefektivnění a lze tím dosáhnout okolo 8 % úspory na měrných kapitálových nákladech. Malé modulární reaktory mají rychlejší dobu výstavby, čímž lze dosáhnout další 6 % úspory na měrných kapitálových nákladech. Dále SMR svým zjednodušeným designem a modularitou dosáhnou okolo 16 % úspory na měrných kapitálových nákladech. Díky vyššímu faktoru kapacity SMR, dosaženého zejména prodlouženou dobou kampaně reaktoru, lze dosáhnout 7 % úspory na měrných provozních

nákladech. Po započtení těchto úspor budou měrné kapitálové náklady SMR pouze o 5 % vyšší oproti tradičním jaderným elektrárnám a měrné provozní náklady SMR vyšší o 19 %. Fixní provozní náklady SMR lze ještě snížit o 10 % až 20 % díky společnému umístění a provozování SMR. Variabilní provozní náklady SMR lze ještě snížit o 5 % získáním provozních zkušeností. Podle dalších studií mohou být tyto náklady u SMR srovnatelné s měrnými náklady tradičních jaderných elektráren či mírně nižší, což je jeden z cílů SMR. [25, 33]

2.1.5 Flexibilita

Flexibilita u malých modulárních reaktorů má několik možných významů. Prvním významem je flexibilní přizpůsobení se proměnlivým požadavkům v energetické síti na poptávané množství elektrické energie či dalších dodávaných komodit (teplo, vodík apod.) a s tím související rychlé změny výkonu reaktoru v čase. Tradiční reaktory provozované v dnešní době nemají příliš vysokou flexibilitu, která činí okolo 1 % reaktorového výkonu za minutu. Hlavní důvod, proč dnešní jaderné elektrárny nejsou flexibilní, je čistě ekonomický, jelikož je výstavba těchto elektráren velice nákladná a zároveň provozní náklady jsou nízké, tak je u tohoto typu zdroje kladen důraz na téměř nepřetržitý provoz s maximálním výkonem, aby byl jeho provoz co nejvýnosnější.

Dle nejnovějších evropských požadavků na budoucí jaderné elektrárny musí reaktor reagovat minimálně rychlostí 3 % reaktorového výkonu za minutu mezi 100 % výkonu a minimální operační úrovní. Zároveň se definuje i četnost změn výkonů, kdy během dne může změna výkonu nastat dvakrát, během týdne pětkrát a kumulativně až 200krát za rok. U malých modulárních reaktorů je snaha dosáhnout ještě větších procentuálních změn, a to minimálně o 5 % reaktorového výkonu za minutu mezi 50 % až 100 % jmenovitého výkonu. Tato flexibilita jaderných zdrojů by byla již výrazná a malé modulární reaktory by se tak mohly více zapojit do podpůrných služeb (např. sekundární či terciální regulace) poskytovaných provozovateli přenosové soustavy.

Dalším významem flexibility je možnost vyrábět více forem energie v jednom SMR. Tradiční jaderné elektrárny slouží hlavně k výrobě elektrické energie. Dodatečně je možné ještě odebírat tepelnou energii sloužící na vytápění, ale to není příliš

časté. U modulárních reaktorů se uvažuje nejenom s výrobou elektrické a tepelné energie, ale také s výrobou vodíku nebo se zkapalňováním či zplyňováním uhlí. Zároveň by tepelná energie nebyla využívána pouze k vytápění objektů, ale mohla by být využívána i ve vysokoteplotních procesech v průmyslu. [58]

2.1.6 Další vlastnosti

Díky modularitě a dalším výše uvedeným vlastnostem dojde také ke snížení doby výstavby malých modulárních reaktorů. Tradiční jaderné elektrárny se staví více než 6 let, ale ze zkušeností dnešní doby se tento čas může lehce znásobit. Například 3. výrobní blok u finské jaderné elektrárny Olkiluoto měl být spuštěn v roce 2009 po 4 letech výstavby, ale nakonec byl spuštěn se zpožděním 13 let až v roce 2022. Malé modulární reaktory směřují ke snížení doby výstavby na 3 až 5 let. Této zrychlené výstavbě by pomohl i vhodnější proces licencování SMR, který bude rozebrán v kapitole o legislativní úpravě.

Poslední zmíněnou vlastností malých modulárních reaktorů je prodloužení intervalu výměny paliva (tzv. kampaně reaktoru). Tradiční jaderné elektrárny vyměňují nebo přeskupují palivo každých 12 až 18 měsíců. Malé modulární reaktory zvyšují tento interval na každé 2 roky nebo déle. Některé SMR uvažují i s kampaní reaktoru v řádu desítek let nebo až s délkou kampaně srovnatelnou s životností reaktoru. S délkou kampaně reaktoru souvisí i míra obohacení paliva, jelikož během kampaně dochází k vyhořívání paliva, takže po určité době již nelze udržet kritický stav reaktoru a je třeba vyměnit či přeskupit palivo. Proto mají SMR často vyšší obohacení paliva (typicky nad míru 5 %), tak aby udržely reaktor v kritickém stavu po delší dobu (v řádu let).

Na závěr je třeba zmínit, že ne všechny koncepty SMR obsahují všechny výše uvedené vlastnosti anebo je obsahují pouze částečně v závislosti na tom, jak jsou tyto koncepty koncipované a pokročilé z technologického hlediska. Zároveň je většina konceptů SMR ve vývojové fázi a tak je nemožné přesně odhadnout jejich cenu a kdy dojde k jejich masivnímu nasazení do energetických sítí, což je znevýhodňuje oproti jiným zdrojům elektrické energie, protože tato nejistota není příliš vítaná u investorů.

2.2 Legislativní úprava SMR v ČR

Česká republika má již dlouholeté zkušenosti s jadernými zdroji a disponuje obsáhlou legislativní úpravou těchto zdrojů. Malé modulární reaktory spadají spolu se všemi jadernými zařízeními pod zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů (dále také „AZ“). S tímto zákonem dále souvisí prováděcí vyhlášky vydávané Státním úřadem pro jadernou bezpečnost (dále také „SÚJB“). Dále se SMR dotýkají například zákona č. 183/2006 Sb., o územním plánování a stavebním řádu (od 1. 7. 2023 zákon č. 283/2021 Sb., stavební zákon) a zákonu č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů.

V AZ jsou stanoveny požadavky, které musí splnit jaderné zařízení, aby získalo povolení k jeho provozu. Povolení vydává SÚJB a toto povolení není jediným povolením, které musí jaderné zařízení získat od SÚJB, ale navazuje na řadu předchozích povolení jako je například povolení o umístění, výstavbě, prvního fyzikálního spouštění, energetického spouštění či jednotlivých etapách vyřazování z provozu. K tomu musí plnit ještě podmínky ze stavebního zákona, jako je například získání územního rozhodnutí, stavebního povolení a kolaudačního souhlasu a další souhlasná stanoviska od desítek dotčených orgánů státní správy.

Při podání žádosti o vydání povolení k umístění musí žadatel například zaplatit poplatek na odbornou činnost SÚJB, který činí 19,6 milionů Kč za jeden reaktor a 120 milionů Kč za jeden reaktor při podání žádosti o vydání povolení k výstavbě. K tomu přichází otázka, jestli by při výstavbě několika reaktorů v jedné lokalitě, jak to je například u návrhu SMR VOYGR™, který počítá až s 12 reaktory, byl poplatek zahrazen zvlášť za každý reaktor nebo dohromady za celek. Dále k této žádosti musí žadatel přiložit doklad o pojištění za jadernou škodu.

AZ je formulován obecně tak, aby pokryl veškerá jaderná zařízení v ČR a díky tomu lze podle tohoto zákona uvést SMR do provozu a není potřeba provést změny v legislativě. Ovšem toto se týká reaktorů typu PWR, jelikož s touto technologií jsou v ČR zkušenosti. U dalších typů reaktorů je nejasné, jestli je bude možnost uvést do provozu se současnou legislativou. Z toho důvodu je vhodné při vybírání

technologie, která se bude stavět v nejbližší době v ČR, vybrat reaktory minimálně typu LWR.

Do budoucna je žádané, aby se legislativa ČR upravila k potřebám SMR, tak aby mohly být uváděny do provozu všechny typy SMR. Dalším důvodem k úpravě legislativy je fakt, že doba na vyřízení všech povolení je velice dlouhá, v řádu jednotek let, což odporuje základní vlastnosti SMR, a to rychlé výstavbě. Zároveň se posuzuje každý reaktor či zařízení zvlášť, což opět odporuje předpokladu rychlé sériové výroby SMR. Úpravou legislativy samozřejmě není myšleno její zjednodušení na úkor její kvality a snížení kontrolních a bezpečnostních mechanismů jaderných zařízení.

Problém s legislativou neřeší pouze Česká republika, ale i další státy, a proto je snaha o spolupráci jednotlivých států ohledně povolovacích procesů a jejich výstupů. Jestliže by jeden stát s kvalitní legislativou a silnou dozornou autoritou vydal licenci (např. stavebně-provozní apod.) na daný design SMR, tak by ostatní státy, v rámci zjednodušeného povolovacího procesu, přijaly tuto licenci za vlastní, čímž by se velice zrychlil a zjednodušil povolovací proces u SMR. V budoucnu by se proto v ČR nehodnotil každý SMR reaktor zvlášť, ale pokud by měl takový reaktor platnou stavebně-provozní licenci, tak by se žádalo primárně o povolení k umístění reaktoru v konkrétní lokalitě. ^[30]

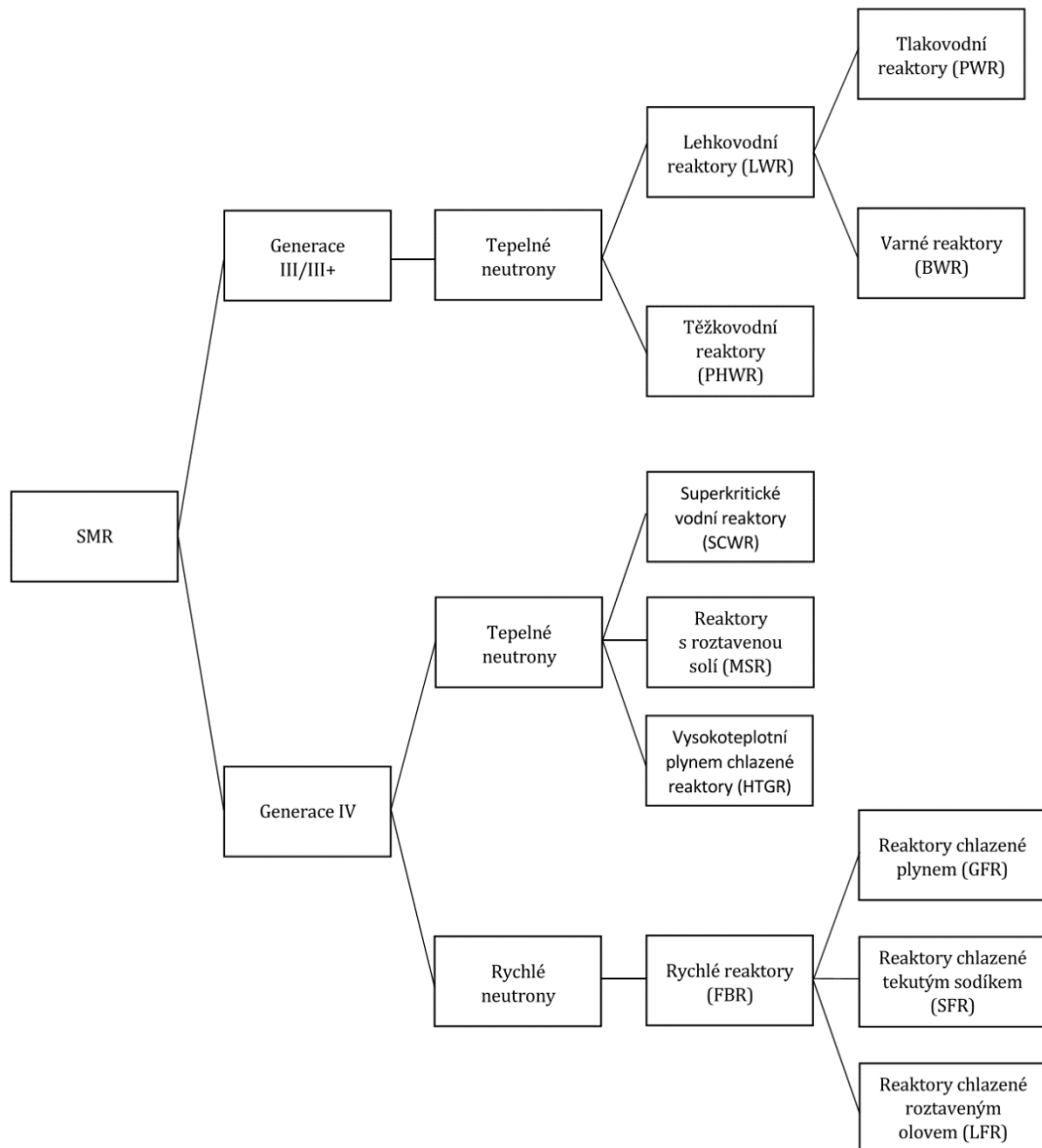
2.3 Rozdělení technologií SMR

Velká část konceptů malých modulárních reaktorů vychází z již známých technologií používaných u tradičních jaderných elektráren. Dále koncepty SMR vychází z technologií, které jsou již známé, ale nejsou prozatím nasazeny v komerčním využití a reaktory využívající tuto technologii jsou pouze experimentální či teprve ve vývoji. SMR lze klasifikovat dle generace reaktorů, které lze dále rozdělit podle neutronového spektra a použité technologie. Jednotlivé generace reaktorů již byly zmíněny v kapitole 2.1.

Neutronové spektrum lze rozdělit na tepelné a rychlé neutrony. Neutrony vznikají při štěpné jaderné reakci, při níž dochází ke štěpení těžšího jádra na 2 atomy lehčích prvků s uvolněním 2 až 3 volných neutronů o střední energii 2 MeV. Tepelné neutrony mají kinetickou energii okolo 0,025 eV a vznikají průchodem

neutronů (vznikajících při štěpné jaderné reakci) moderátorem, který sníží jejich kinetickou energii (tj. jejich rychlost) na požadovanou hodnotu pomocí srážek neutronů s jádry atomů moderátoru. Rychlé neutrony mají kinetickou energii okolo 1–20 MeV a vznikají již při štěpné jaderné reakci. Tudíž nepotřebují žádný moderátor k moderaci jejich kinetické energie. [34]

Klasifikace SMR je přehledně zobrazena na obrázku níže.



Obrázek 2.5 Klasifikace SMR

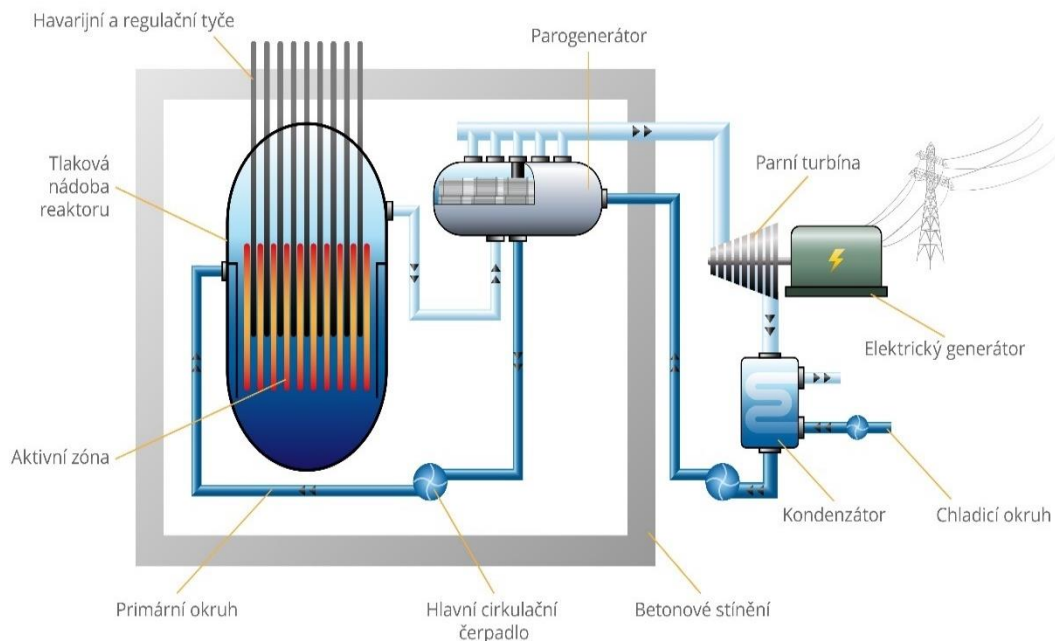
2.3.1 Lehkovodní reaktory (LWR)

Lehkovodní reaktory se řadí mezi tepelné reaktory, jelikož pro štěpnou jadernou reakci využívají tepelné neutrony. Zkratka LWR vychází z anglického názvu „Light Water Reactor“. Chladivem a zároveň i moderátorem je demineralizovaná voda. Lehkovodní reaktory lze rozdělit na tlakovodní (PWR) a varné (BWR) reaktory. U dnešních jaderných elektráren je nejrozšířenější právě tento typ reaktorů a aktuálně je v provozu 304 PWR a 49 BWR s instalovaným výkonem okolo 340,7 GWe, což odpovídá 90 % celkového instalovaného výkonu všech jaderných reaktorů. Tepelná účinnost LWR se pohybuje okolo 33 %. [26]

2.3.1.1 Tlakovodní reaktory (PWR)

Tlakovodní reaktor je tepelný reaktor chlazený a moderovaný demineralizovanou vodou. Zkratka PWR vychází z anglického názvu „Pressurized light-Water moderated and cooled Reactor“. Ruský typ tlakovodního reaktoru je označován zkratkou VVER (Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor). Palivem reaktoru je obohacený uran, s mírou obohacení 3 až 5 % uranem U^{235} , ve formě tabletek oxidu uraničitého (UO_2), jež jsou uspořádané do palivových tyčí a dále do palivových kazet/souborů. Výměna/překládka paliva probíhá jednou za 1 až 1,5 roku během odstavení reaktoru, kdy se vyměňuje pouze určitá část vyhořelého paliva (např. ¼ paliva).

PWR je složen ze dvou okruhů, což zvyšuje jeho bezpečnost, jelikož radioaktivní médium protéká pouze primárním okruhem uzavřeným v kontejnmentu, který slouží jako ochranná obálka proti úniku nebezpečných radioaktivních látek do ovzduší a zároveň jako mechanická ochrana reaktoru proti vnějším vlivům. V primárním okruhu se nachází reaktor s aktivní zónou a systémem řízení, parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo a kompenzátor objemu. Primárním okruhem cirkuluje voda pod vysokým tlakem (15,7 MPa) a o teplotě nad 300 °C, která odebírá tepelnou energii z aktivní zóny a odvádí ji do parogenerátoru. [12]



Obrázek 2.6 Technologické schéma reaktoru PWR ^[12]

V parogenerátoru je předávána tepelná energie vodě sekundárního okruhu, která se v parogenerátoru přeměňuje na suchou páru. Následně je suchá pára odvedena do turbíny, ve které se transformuje tepelná energie na kinetickou energii a roztáčí hřídel. Hřídel je dále napojena na generátor, ve kterém se tato kinetická energie přeměňuje na elektrickou energii. Hlavní cirkulační čerpadlo zajišťuje potřebnou cirkulaci chladiva a kompenzátor objemu se stará o udržení konstantní hodnoty tlaku, na kterou je primární okruh dimenzován.

Výhodou této technologie je zvládnutý technologický postup a mnohé zkušenosti, které lze uplatnit při vývoji nových SMR. Nevýhodou této technologie je vysoký tlak v primárním okruhu, kvůli kterému je nutné použití dražších a odolnějších materiálů. Zároveň je teplota chladiva v primárního okruhu relativně nízká oproti jiným technologiím, čímž je omezena účinnost tepelného cyklu.

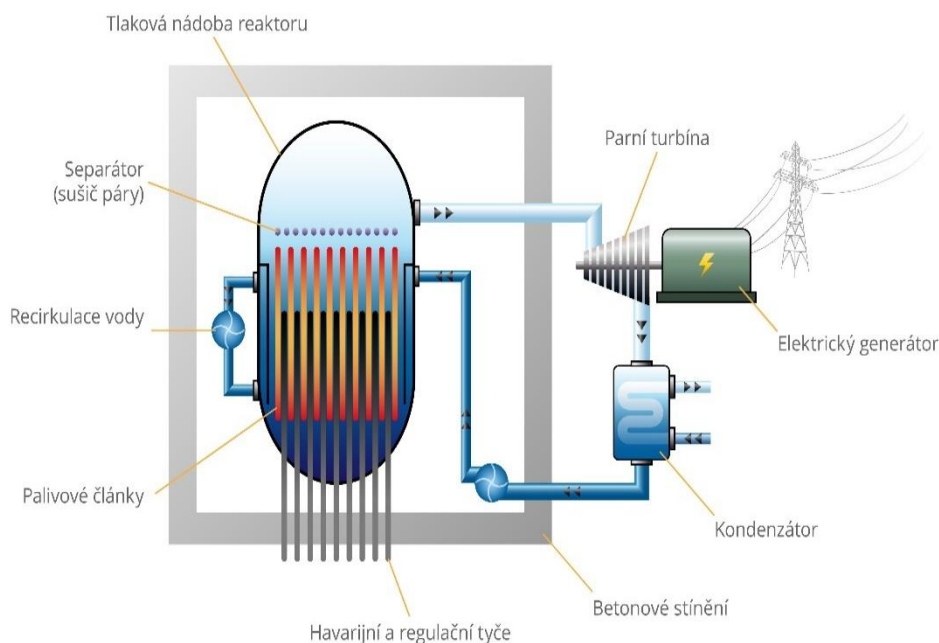
Dnešní jaderné reaktory jsou tzv. smyčkového uspořádání, které je zobrazeno na obrázku 2.6. Ovšem většina konceptů SMR používá technologii PWR s integrálním uspořádáním (tzv. iPWR), ve kterém jsou všechny potřebné komponenty primárního okruhu integrovány do jedné tlakové nádoby, která je uložena v kontejnmentu. Aktuálně existuje několik desítek konceptů SMR s touto

technologií, z nichž některé již prošly, anebo procházejí licencováním či jsou aktuálně ve výstavbě.

2.3.1.2 Varné reaktory (BWR)

Varný reaktor je tepelný reaktor chlazený a moderovaný demineralizovanou vodou. Zkratka BWR vychází z anglického názvu „Boiling Water Reactor“. Palivem reaktoru je opět obohacený uran, s mírou obohacení 2 až 3 % uranem U^{235} , ve formě tabletek oxidu uraničitého. Výměna/překládka paliva probíhá také jednou za 1 až 1,5 roku během odstavení reaktoru, kdy je vyměněna pouze určitá část vyhořelého paliva. Aktuálně je ve vývoji několik konceptů SMR s touto technologií.

BWR je složen pouze z jednoho okruhu, což zvyšuje tepelnou účinnost díky menším ztrátám způsobených přestupem mezi okruhy. Základem je opět reaktor s aktivní zónou a systémem řízení. Voda se ohřívá až do varu přímo v tlakové nádobě reaktoru. Pára se hromadí v horní části nádoby, kde je zároveň zbavena vlhkosti pomocí separátoru. Z reaktoru vystupuje suchá pára o teplotě okolo 286 °C a tlaku 7 MPa, která proudí do turbíny. V turbíně a generátoru opět dochází k přeměně tepelné energie na kinetickou energii a následně i na elektrickou energii. [12]



Obrázek 2.7 Technologické schéma reaktoru BWR [12]

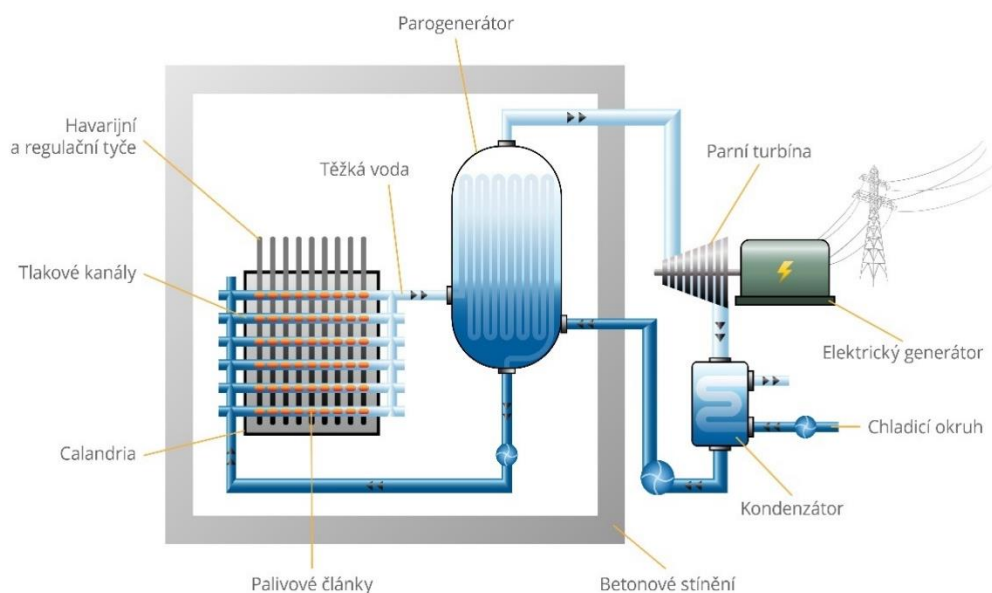
Výhodou BWR je jednodušší a levnější technologie oproti PWR, jelikož neobsahují parogenerátory a sekundární okruh. Dále mají nižší tlak vody, což snižuje nároky na použité materiály, ale zároveň snižuje teplotu výstupní páry, a tedy i tepelnou účinnost. U BWR reaktorů jsou kladeny odlišné nároky na konstrukci turbíny, jelikož přes ni proudí médium obsahující radioaktivní nuklidy, čemuž musí být uzpůsoben i bezpečnostní systém.

2.3.2 Těžkovodní reaktory (PHWR)

Těžkovodní reaktor je tepelný reaktor chlazený a moderovaný těžkou vodou (D_2O). Zkratka PHWR vychází z anglického názvu „Pressurized Heavy-Water Reactor“. Palivem reaktoru je přírodní neobohacený uran ve formě oxidu uraničitého UO_2 . Aktuálně je ve vývoji několik konceptů SMR s touto technologií.

PHWR je složen ze dvou okruhů stejně jako PWR. V primárním okruhu se nachází reaktor s aktivní zónou a systémem řízení, parogenerátor, hlavní cirkulační čerpadlo a kompenzátor objemu. Primárním okruhem cirkuluje těžká voda o tlaku okolo 9 MPa a o teplotě přes 300 °C, která odebírá tepelnou energii z aktivní zóny a odvádí ji do parogenerátoru. Primární okruh je opět uzavřen v kontejnmentu. V sekundárním okruhu PHWR je použita lehká (obyčejná) voda stejně jako u PWR a principiálně je sekundární okruh stejný jako u technologie PWR. Rozdílem oproti PWR je tvar nádoby aktivní zóny, jelikož PWR využívají tlakovou nádobu ve tvaru stojícího válce, ale PHWR používají nádobu ve tvaru ležícího válce (tzv. calandria) s tlakovými kanály, jimiž protéká chladivo. Tím je od sebe oddělen moderátor a chladivo, jelikož se moderátor nachází v calandrii a chladivo cirkuluje tlakovými kanály. Díky tomu není potřeba tlakové nádoby reaktoru, jelikož moderátor v calandrii nepotřebuje mít zvýšenou hodnotu tlaku, tak jako chladivo. ^[12]

TĚŽKOVODNÍ REAKTOR CANDU



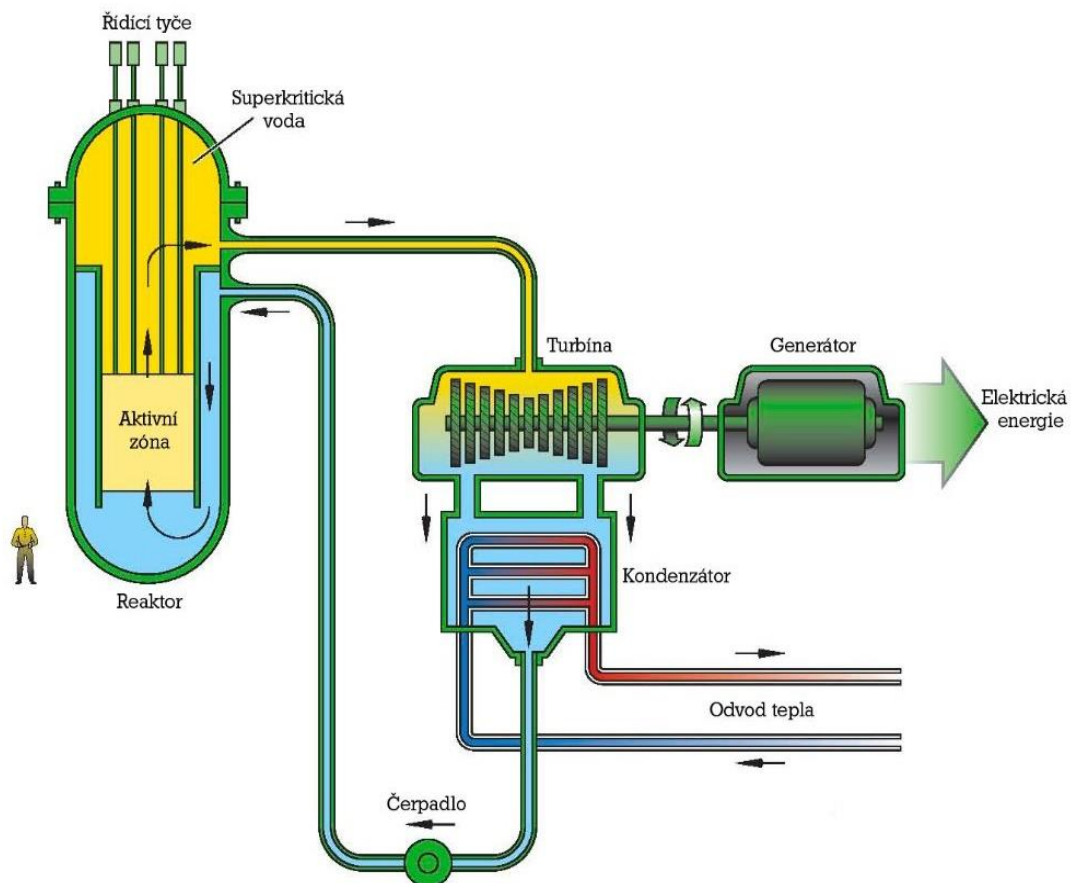
Obrázek 2.8 Technologické schéma reaktoru PHWR [12]

Výhodou této technologie je možnost využití neobohaceného paliva, díky vyšší moderační schopnosti těžké vody, což zvyšuje jeho hospodárnost s palivem. Dále je možno vyměňovat palivo za plného provozu a není třeba reaktor odstavovat, což zvyšuje faktor kapacity. Nevýhodou je nutnost použití těžké vody, která je náročnější na výrobu než demineralizovaná lehká voda. Zároveň je potřebná častější výměna paliva, kvůli nižšímu obsahu energie v přírodním uranu, oproti obohacenému uranu.

2.3.3 Superkritické vodní reaktory (SCWR)

Superkritický vodní reaktor je tepelný reaktor IV. generace chlazený a moderovaný lehkou vodou. Zkratka SCWR vychází z anglického názvu „SuperCritical Water Reactor“. Tato technologie vychází z LWR, ale pracuje nad kritickým bodem vody, tj. s tlakem větším než 22,1 MPa a teplotou větší než 374 °C. Dnešní studie uvažují s tlakem okolo 25 MPa a teplotou mezi 500 až 600 °C jako výstupními parametry chladiva proudícího z reaktoru. Aktuálně je tato technologie ve vývoji u velkých jaderných reaktorů. Žádný koncept SMR s touto technologií není prozatím vyvíjen.

SCWR kombinuje technologie PWR a BWR dohromady. Jedná se o jednookruhový reaktor. Základem je opět reaktor s aktivní zónou a systémem řízení. Voda se v aktivní zóně ohřívá až nad kritický bod vody, kdy vymizí rozdíl mezi vlastnostmi kapaliny a páry. Toto médium lze využít přímo v turbíně, čímž odpadá potřeba parogenerátoru, separátoru a dalších podobných zařízení. Díky nadkritickým hodnotám dosahuje pára vysoké hodnoty entalpie, což umožňuje snížit hmotnostní průtok za daného tepelného výkonu a zmenšit turbínový systém oproti LWR. [43]



Obrázek 2.9 Technologické schéma reaktoru SCWR [8]

Výhodou této technologie je vyšší tepelná účinnost oproti LWR, jelikož dosahuje hodnoty okolo 45 % a zároveň by mělo dojít ke snížení nákladů potřebných na výstavbu. Nevýhodou je potřeba materiálů odolávajících vyšší teplotě a tlaku.

U této technologie se uvažuje i s využitím těžké vody jako moderátoru a chladiva, tak jako tomu je u PHWR, čemuž by musela být uzpůsobena i konstrukce. Dále se uvažuje i s konstrukčním typem, který by dovolil používat rychlé neutrony, čímž by se mohlo použít jaderné palivo na bázi thoria a plutonia. Veškeré typy konstrukcí

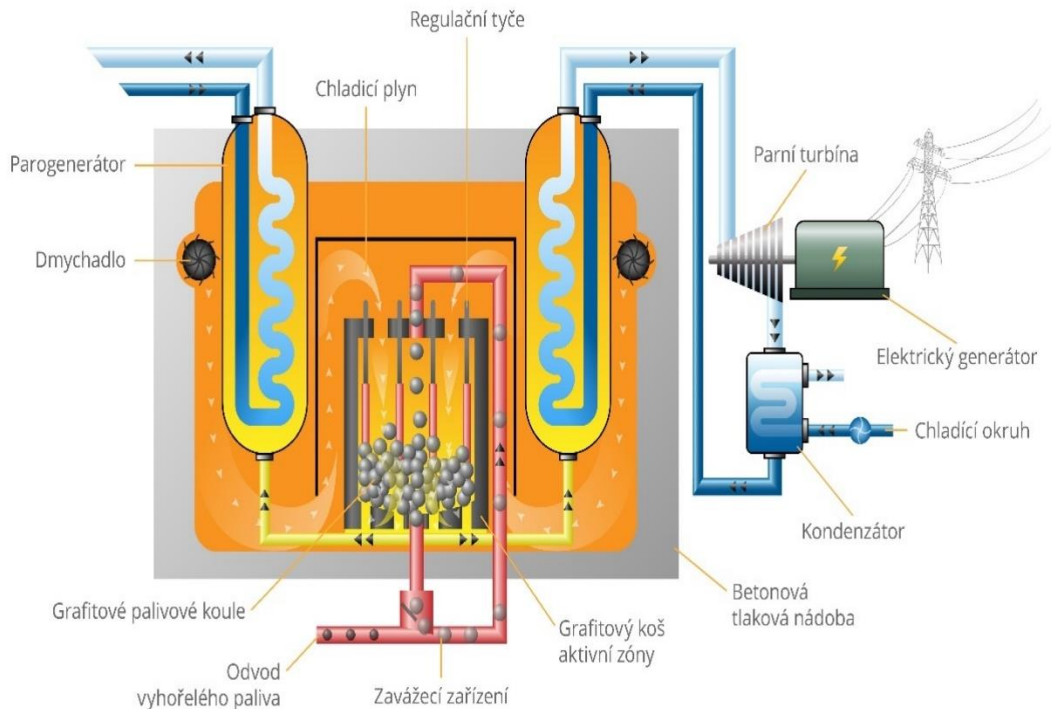
této technologie jsou prozatím ve fázi zkoumání a hledá se optimální varianta, která by byla konstrukčně proveditelná, ekonomicky rentabilní, a to hlavně s ohledem na bezpečnost a spolehlivost provozu. [43]

2.3.4 Vysokoteplotní plynem chlazené reaktory (HTGR)

Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor je tepelný reaktor chlazený héliem či roztavenou solí a moderovaný grafitem. Zkratka HTGR vychází z anglického názvu „High Temperature Gas Cooled Reactor“. Provozní teplota tohoto reaktoru může dosáhnout až 750 °C, ovšem v posledních letech se prosazuje vývoj vysokoteplotních plynem chlazených reaktorů, které by měly dosáhnout provozní teploty mezi 750 až 1 000 °C. Tyto reaktory se označují zkratkou VHTR, která vychází z anglického názvu „Very High Temperature Reactor“. Díky vysoké teplotě by měla celková účinnost při výrobě elektrické energie dosáhnout hodnoty vyšší než 40 %, zároveň díky vysoké teplotě dosahuje palivo vyššího vyhoření, což redukuje tvorbu radioaktivního odpadu. Aktuálně je ve vývoji několik konceptů SMR s technologií HTGR.

Palivo využívané u této technologie se nazývá TRISO. Jedná se o kuličky paliva s průměrem okolo 0,9 mm složené z jádra, které je obaleno čtyřmi vrstvami. Jádro je z UO_2 (0,5 mm) obohaceného maximálně do 20 %. První vrstva je z porézního grafitu. Následuje vnitřní vrstva pyrolytického grafitu (PyC) na kterou navazuje vrstva z karbidu křemíku (SiC) a po které následuje vnější vrstva PyC. To celé je zapouzdřeno do grafitových pelet. Vrstvy pomáhají udržet štěpné produkty uvnitř i za vysokých teplot (až 1 600 °C), což zvyšuje bezpečnost. V budoucnu se předpokládá využití i jiných druhů paliva (např. uran-plutonium, směs oxidů MOX).

[43, 53]



Obrázek 2.10 Technologické schéma reaktoru HTGR [12]

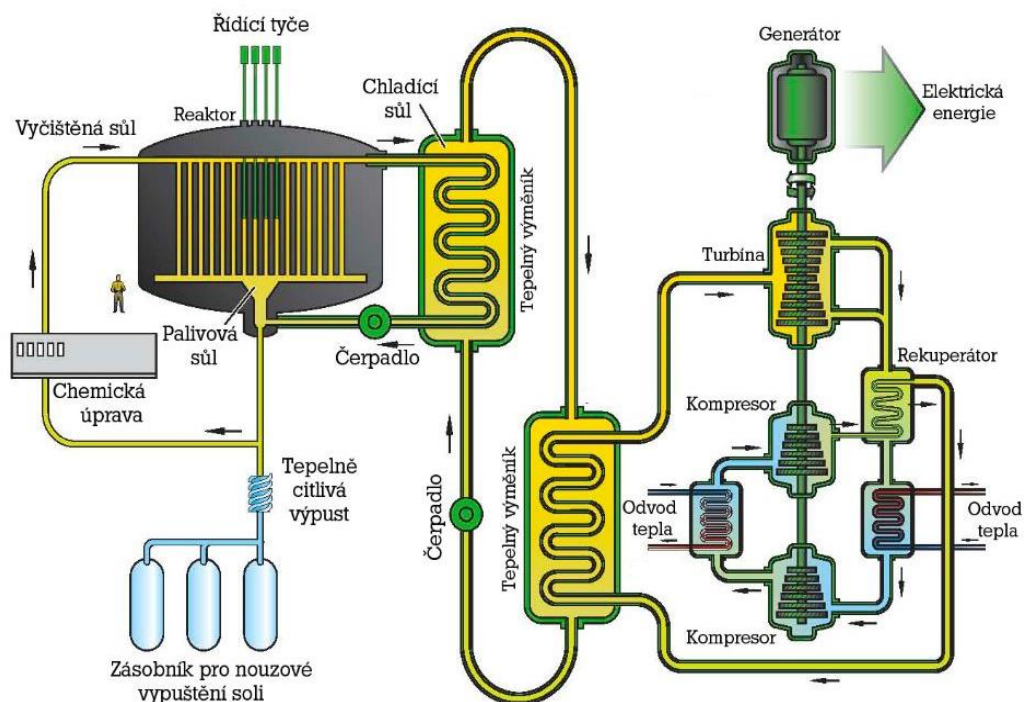
Reaktor je navržen jako dvouokruhový, ovšem mohl by být provozován i jako jednookruhový, jestliže by to technologické limity vzhledem k teplotě chladiva dovolily. Základem je opět reaktor s aktivní zónou a systémem řízení. Tlak v primárním okruhu se pohybuje okolo 6 MPa. Hélium (či jiný inertní plyn) se v aktivní zóně ohřívá a pomocí dmychadel cirkuluje k parogenerátoru, kde předává tepelnou energii pracovní látce sekundárního okruhu. Primární okruh je opět uzavřen v kontejmentu. V sekundárním okruhu HTGR je použita lehká voda stejně jako u PWR a principiálně je sekundární okruh stejný jako u PWR. [8, 43]

Výhodou této technologie je možnost průběžného doplňování paliva do aktivní zóny a zároveň možnost průběžného odebírání vyhořelého paliva. Nevýhodou jsou vysoké požadavky na používané materiály technologických komponent, jak z důvodu vysoké teploty, tak i z důvodu vyššího tlaku. Hélium nemoderuje neutrony a po průchodu aktivní zónou se nestává radioaktivním, což je velkou výhodou oproti jiným chladivům. U této technologie se stále počítá s otevřeným palivovým cyklem. Vznikající vysokoteplotní médium lze využít pro průmyslovou výrobu vodíku nebo v dalších vysokoteplotních procesech v chemickém, petrochemickém a hutnickém průmyslu.

2.3.5 Reaktory s roztavenou solí (MSR)

Reaktor s roztavenou solí je schopen pracovat jak s tepelnými, tak i s rychlými neutrony a je navržen jako jeden z reaktorů IV. generace. Zkratka MSR vychází z anglického názvu „Molten Salt Reactor“. Technologie s tepelnými neutrony byla úspěšně otestována dvěma demonstračními reaktory v USA již v 50. a 60. letech 20. století, ale i s perspektivními výsledky výzkum dále nepokračoval. Aktuálně je ve vývoji několik konceptů SMR s touto technologií.

Reaktor je navržen jako tříokruhový z důvodu zvýšení bezpečnosti a snížení možnosti úniku nebezpečných látek do ovzduší. Primárním chladivem je směs roztavených fluoridových solí (např. FLiBe) téměř eutektického složení, aby se dosáhlo co nejnižší teploty tání. Výhodou směsi s příměsí berylia je ve snížení redoxního potenciálu a tím i snížení rychlosti koroze. Chladivem v sekundárním okruhu je opět směs roztavené soli a pracovní látkou v terciálním okruhu může být pára či jiné plyny (CO_2 či He), které proudí do turbíny. K výměně tepelné energie mezi okruhy slouží tepelné výměníky. Směsi roztavených solí mají vysokou tepelnou kapacitu a vysokou teplotu varu. Proto není potřeba zvýšeného tlaku pro zvýšení teploty varu a mohou tak pracovat za atmosférického tlaku. [52]



Obrázek 2.11 Technologické schéma reaktoru MSR [8]

Jedním z bezpečnostních prvků jsou nouzové zásobníky umístěné pod reaktorem. V případě poruchy se chladivo primárního okruhu i s palivem vypustí do těchto nádob tak aby palivo opustilo aktivní zónu. Nouzové zásobníky jsou pak například ochlazovány vodní lázní.

Mezinárodním fórem pro IV. generaci jsou upřednostňovány dva typy reaktorů MSR. Prvním typem je tzv. fluoridovou solí chlazený vysokoteplotní reaktor (FHR) pracující s tepelnými neutrony. Palivo tohoto reaktoru je ve formě palivových tyčí, což omezuje možnosti snadného přepracování paliva. Moderátorem u tohoto reaktoru jsou tyče z grafitu. Druhým typem je tzv. rychlý reaktor s roztavenou solí (MSFR), který pracuje s rychlými neutrony a bez moderátoru. Palivo tohoto reaktoru je rozpuštěno v chladivu primárního okruhu. Výhodou tohoto typu je možnost odčerpání části chladiva z primárního okruhu a jeho následné zpracování tak, aby se vyčistilo od štěpných produktů (např. Xe^{135}), které mohou například pohlcovat neutrony, což umožní využít nejen uranový, ale i thoriový cyklus. Výhodou je i možnost průběžně doplňovat palivo za provozu. Dále kombinuje výhody rychlých reaktorů, jako je širší spektrum využití paliva (či využití vyhořelého paliva z tepelných reaktorů), minimalizace vznikajícího radioaktivního odpadu, využití uzavřeného palivového cyklu a další.

Provozní teplota reaktoru u této technologie se uvažuje okolo 700 až 800 °C, ale potenciálně by mohla ještě narůst, jelikož je nyní limitována konstrukčním materiálem. Vysoká provozní teplota zvyšuje celkovou účinnost, která by mohla dosáhnout hodnot okolo 42 až 45 %. Zároveň se u této technologie uvažuje s využitím tepla pro průmyslovou výrobu vodíku či jiné průmyslové aplikace. [43,52]

2.3.6 Rychlé reaktory (FR)

Rychlé reaktory využívají pro štěpnou jadernou reakci rychlé neutrony. Zkratka FR vychází z anglického názvu „Fast Reactor“. Rychlé reaktory lze rozdělit podle typu chladiva na rychlé reaktory chlazené plynem (GFR), tekutým sodíkem (SFR) nebo roztaveným olovem (LFR). Všechny rychlé reaktory jsou klasifikovány jako reaktory IV. generace. Na rozdíl od tepelných reaktorů, rychlé reaktory nepotřebují moderátor. Na druhou stranu potřebují vysoce obohacené palivo (obohacení nad 20 %), jelikož je pravděpodobnost štěpení jaderného paliva rychlým neutronem nižší než pravděpodobnost štěpení tepelným neutronem. Rychlé reaktory by měly dosáhnout vyšší účinnosti než LWR, která by se měla pohybovat okolo 40 % nebo výše. S ohledem na aktuální postup ve vývoji a licencování konceptů SMR se počítá, že se pro komerční využití SMR s technologií rychlých reaktorů zprovozní až okolo roku 2040.

Rychlé reaktory budou mít možnost vyprodukovat více štěpného materiálu, než sami spotřebují. Tyto reaktory se nazývají tzv. rychlé množivé reaktory (FBR). Používané chladivo by mělo mít vysoký součinitel přestupu tepla, velkou tepelnou kapacitu, minimální moderační schopnost a nízkou absorpci neutronů. Výhodou oproti LWR je použití chladiva, které má vyšší teplotu varu, a tedy není potřeba tak vysokého tlaku v primárním okruhu, jako je tomu u LWR, což zvyšuje bezpečnost a klade menší nároky na materiál technologických celků.

U rychlých reaktorů se opět využije palivových tyčí, stejně jako u dnešních reaktorů. Jaderným palivem obsaženým v palivových tyčích mohou být opět tabletky z obohaceného uranu, ale i plutonia nebo thoria či směsného oxidu MOX, který se může získat přepracováním použitého paliva. U rychlých reaktorů se předpokládá využití uzavřeného palivového cyklu, jelikož rychlé reaktory dokážou vyprodukovat více štěpného materiálu, než sami spotřebují. Vyprodukovaný štěpný materiál by se mohl dále přepracovat a znovu využít tak, aby se využil co nejvyšší energetický potenciál jaderného paliva. Tím dojde k minimalizaci produkce radioaktivního odpadu. ^[56]

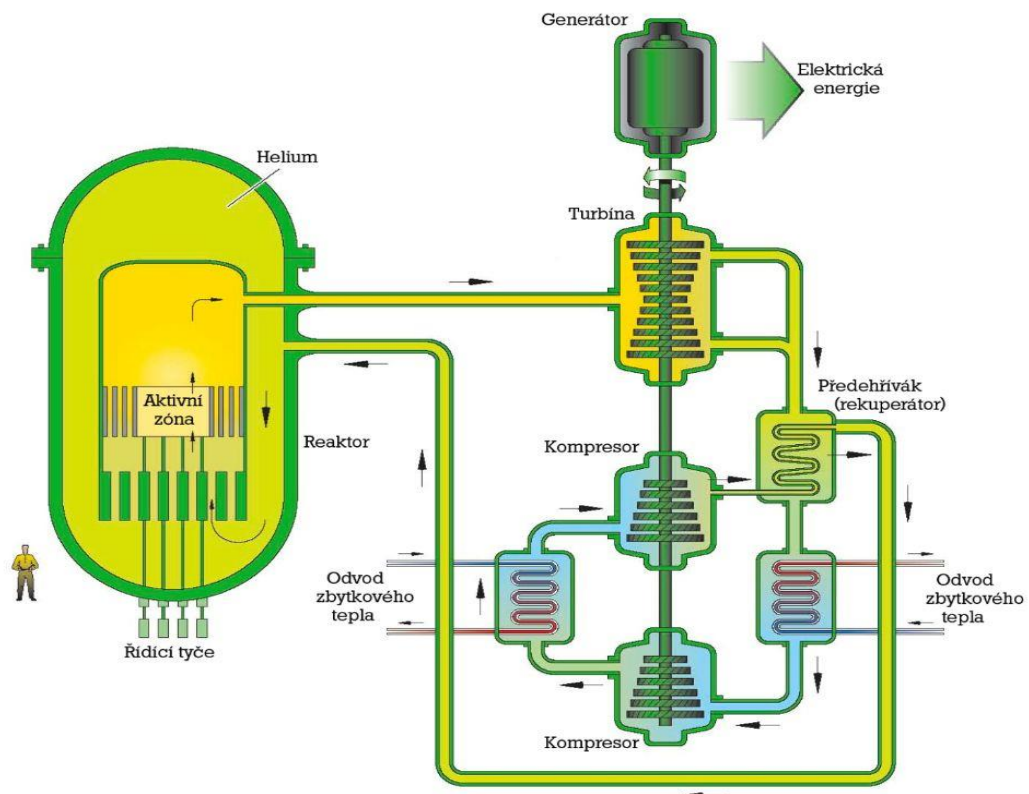
Díky vysoké teplotě chladiva není zapotřebí vysokého tlaku jako u PWR. Zároveň teplo o vysoké teplotě lze využít pro průmyslovou výrobu vodíku nebo v dalších

vysokoteplotních průmyslových aplikacích. Nevýhodou jsou ovšem vysoké požadavky na používané materiály technologických komponent.

2.3.6.1 Rychlé reaktory chlazené plynem (GFR)

Rychlý reaktor chlazený plynem používá jako chladivo obvykle hélium nebo také CO₂. Zkratka GFR vychází z anglického názvu „Gas-cooled Fast Reactor“. Výhody této technologie byly již rozebrány v předchozí kapitole. Aktuálně je ve vývoji několik konceptů SMR s touto technologií.

Reaktor je navržen jako jednookruhový. Základem je opět reaktor s aktivní zónou a systémem řízení. Chladivo je zároveň i pracovní látkou v plynové turbíně s přímým Braytonovým cyklem. Po výstupu z turbíny chladivo dále cirkuluje přes rekuperátor a kompresory zpět do reaktoru. Výstupní teplota z reaktoru může dosahovat až 850 °C. Ve vývoji se dále uvažuje i s využitím zbytkového tepla plynu pro výrobu páry v parogenerátoru a následným využitím páry v parní turbíně. [8, 43]

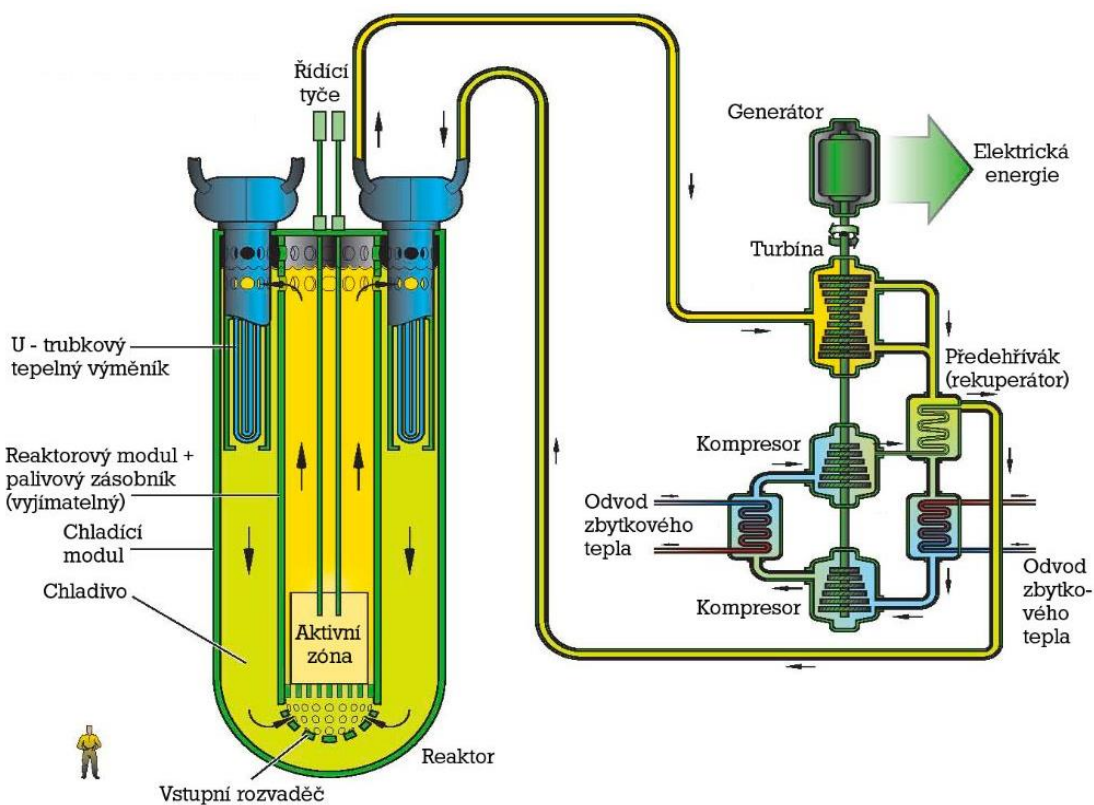


Obrázek 2.12 Technologické schéma reaktoru GFR [8]

2.3.6.2 Rychlé reaktory chlazené roztaveným olovem (LFR)

Rychlý reaktor chlazený roztaveným olovem používá jako primární chladivo olovo nebo eutektickou slitinu olova a bismutu. Zkratka LFR vychází z anglického názvu „Lead-cooled Fast Reactor“. Výhody této technologie byly již rozebrány v předchozí kapitole. Aktuálně je ve vývoji několik konceptů SMR s touto technologií.

Reaktor je navržen jako dvouokruhový. Základem je opět reaktor s aktivní zónou a systémem řízení. Primární chladivo předává tepelnou energii z aktivní zóny pracovní látce v sekundárním okruhu pomocí tepelného výměníku. Výstupní teplota z reaktoru je typicky v rozmezí 500 až 600 °C, ovšem s rozvojem pokročilejších materiálů bude možné tuto teplotu zvýšit až nad 800 °C. Vlivem vysoké teploty varu chladiva lze reaktor provozovat za nízkého tlaku chladiva v primárním okruhu. Pracovní látkou v sekundárním okruhu, která proudí do plynové turbíny s přímým Braytonovým cyklem, je například CO₂. [8, 43]



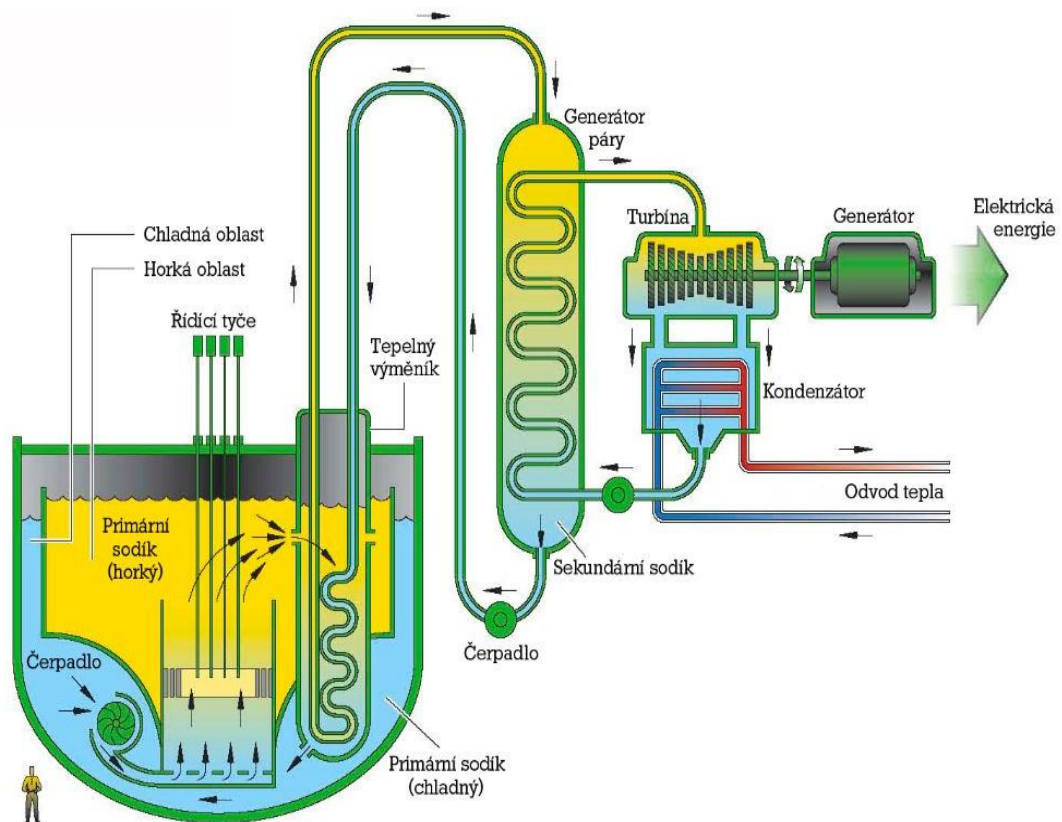
Obrázek 2.13 Technologické schéma reaktoru LFR [8]

Roztavené olovo působí částečně jako reflektor, který odráží neutrony zpět do aktivní zóny. Olovo velmi dobře pohlcuje gama záření a jiné ionizující záření, což se projeví ve zlepšení bezpečnosti.

Nevýhodou tohoto chladiva je jeho možné tuhnutí, pokud by nebyl reaktor v provozu. Proto je nutné chladivo i při odstavení reaktoru udržovat neustále na určité teplotě tak, aby neztuhlo (olovo má bod tání na 327,5 °C, slitina olovo-bismut má bod tání na 123,5 °C). Další nevýhodou je možná koroze vnitřních částí reaktoru vlivem působení olova. Také bismut je poměrně vzácný a velmi drahý, což zhoršuje ekonomickou stránku tohoto chladiva. Reaktory s menším výkonem lze chladit pouze přirozenou konvekcí za normálního provozu. Ovšem reaktory s velkým výkonem je potřeba chladit nucenou konvekcí. [20]

2.3.6.3 Rychlé reaktory chlazené tekutým sodíkem (SFR)

Rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem používá jako primární chladivo sodík. Zkratka SFR vychází z anglického názvu „Sodium-cooled Fast Reactor“. Výhody této technologie byly již rozebrány v předchozí kapitole. Aktuálně se tato technologie vyvíjí u velkých jaderných reaktorů. Žádný koncept SMR s touto technologií není prozatím vyvíjen.



Obrázek 2.14 Technologické schéma reaktoru SFR [8]

Reaktor je navržen jako tříokruhový a technologickým schématem se podobá MSR. Základem je opět reaktor s aktivní zónou a systémem řízení. Primární chladivo předává tepelnou energii z aktivní zóny chladivu v sekundárním okruhu pomocí tepelného výměníku. Výstupní teplota z reaktoru je typicky v rozmezí 500–550 °C. Chladivem v sekundárním okruhu je opět sodík a pracovní látkou v terciálním okruhu je pára, která proudí do parní turbíny. Místo páry lze, jako pracovní látku využít také například oxid uhličitý (CO₂) nebo dusík, ovšem současně s využitím plynové turbíny s braytonovým cyklem místo parní turbíny. [8, 43]

Sodík nezpůsobuje korozi ocelové části reaktoru, což je jeho velkou výhodou oproti jiným chladivům. Ovšem velkou nevýhodou je jeho reaktivita s vodou, jelikož s ní reaguje za vzniku hydroxidu sodného a vodíku, který při kontaktu se vzduchem hoří. Z toho důvodu sodík po kontaktu s vodou tvoří výbušnou směs, a proto je pro zvýšení bezpečnosti reaktor tříokruhový a jako pracovní látku je vhodnější zvolit spíše CO₂ nebo dusík. Tato nežádoucí reaktivita zvyšuje celkové nároky na těsnost okruhů a případně zvyšuje riziko havárie. Další nevýhodou sodíku je opět nutnost udržovat jeho teplotu nad bodem tání (98 °C). Na druhou stranu má sodík bod varu okolo 883 °C a díky čemu lze provozovat reaktor za nízkého tlaku chladiva. [43]

3 Role SMR v přechodu k nízkouhlíkové energetice

V této kapitole je popsán současný stav energetiky v České republice, respektive je popsána elektroenergetika a teplárenství, s nimiž úzce souvisí problematika malých modulárních reaktorů. Dále je popsán plán přechodu České republiky k nízkouhlíkové energetice, jež úzce souvisí s plánem přechodu Evropské unie k nízkouhlíkové energetice. V této podkapitole jsou například popsány základní pilíře tohoto přechodu či legislativa, která se této problematice týká.

Dále je popsána možnost budoucího využití malých modulárních reaktorů v České republice. Jedna z posledních podkapitol se zaměřuje na připravenost technologií malých modulárních reaktorů ke komerčnímu využití. S tímto souvisí i následující podkapitola, která popisuje okrajové podmínky nasazení technologie SMR v České republice.

3.1 Současný stav energetiky v ČR

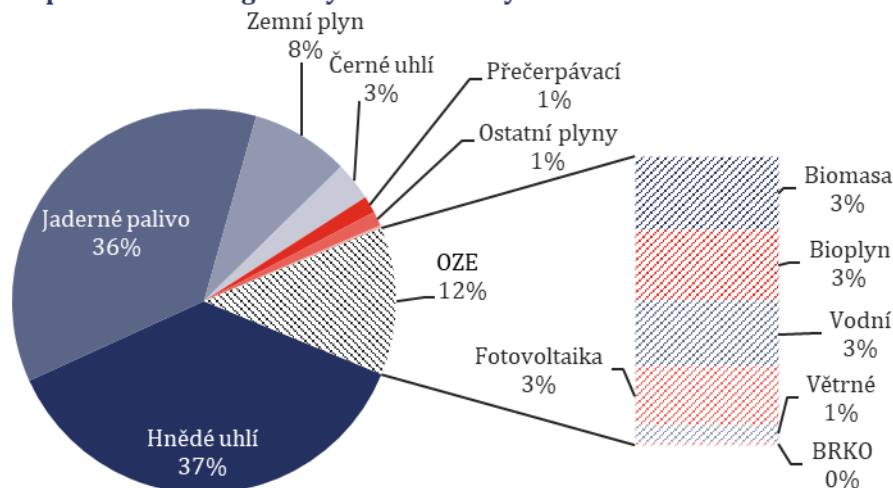
Energetika se zabývá získáváním, přeměnou a distribucí všech forem energie. V této podkapitole se budeme zajímat hlavně o elektroenergetiku, jež se primárně zabývá výrobou, distribucí a spotřebou elektrické energie a dále o teplárenství, jež se primárně zabývá výrobou, distribucí a spotřebou tepla.

Hlavním legislativním předpisem, jež se týká těchto odvětví, je zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů. Níže uvedené informace vychází zejména z roční zprávy o provozu elektrizační soustavy ČR pro rok 2021 a z roční zprávy o provozu teplárenských soustav ČR za rok 2021 vydávaných Energetickým regulačním úřadem (ERÚ).

Největšími zdroji elektrické energie v ČR jsou uhelné (40 %) a jaderné (36 %) elektrárny. Dále se na výrobě elektrické energie podílí elektrárny využívající obnovitelné zdroje (12 %), zemní plyn (8 %) a další. Podíl jednotlivých zdrojů elektrické energie je zobrazen v grafu 3.1. Celková roční výroba elektřiny brutto se pohybuje okolo 85 TWh s roční změnou 2 až 3 TWh posledních 15 let. Celková roční

výroba elektřiny netto se pohybuje okolo 80 TWh. Celková roční tuzemská brutto spotřeba se pohybuje okolo 73 TWh s roční změnou 1 až 2 TWh posledních 15 let. Celková roční tuzemská netto spotřeba se pohybuje okolo 62 TWh. Celkové roční ztráty, zahrnující ztráty v distribučních a přenosových soustavách, se pohybují okolo 4 TWh. Česká republika je exportérem elektrické energie, a tedy dosahuje záporné hodnoty přeshraničního salda (pod -10 TWh).

Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto - 2021

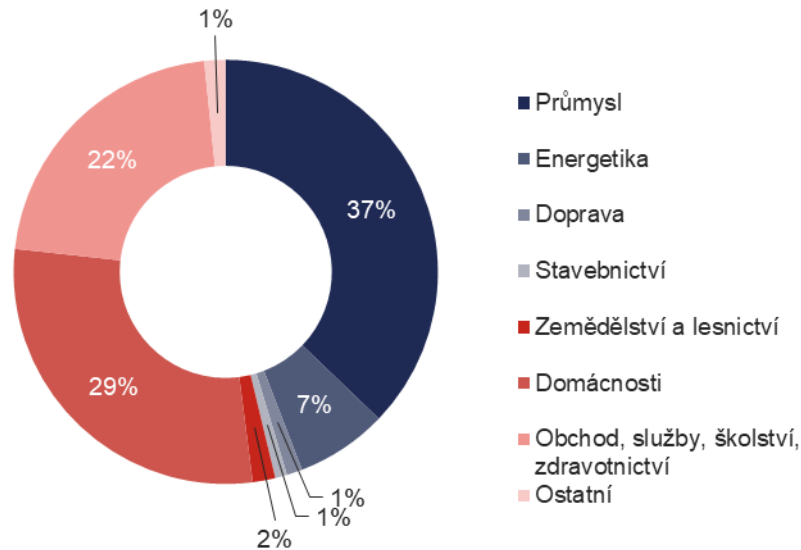


Graf 3.1 Podíl paliv a technologií na výrobě elektřiny brutto - 2021 [17]

Nevýhodou některých obnovitelných zdrojů energie (dále jen „OZE“) jsou jejich sezonní výkyvy ve výrobě. Zároveň je výroba elektřiny z OZE závislá na umístění zdroje, tzv. na lokálnosti. Fotovoltaické elektrárny vyrábí nejvíce elektřiny v létě, v zimě jejich výroba výrazně klesá. Naproti tomu větrné elektrárny vyrábí nejvíce elektřiny během jara, podzimu a zimy a nejméně vyrábějí v létě. U vodních elektráren platí, že nejvyšší výroby dosahují na jaře po roztání sněhu a nejnižší výroby dosahují na podzim. Elektrárny na biomasu a bioplyn dosahují stabilní výroby během celého roku. Nejvyššího podílu na výrobě elektřiny dosahuje OZE přes letní měsíce a to okolo 15–16 %. Naproti tomu přes zimu dosahuje hodnota tohoto podílu okolo 9–10 %.

Největším spotřebitelem elektrické energie je průmysl (37 %), dále za ním jsou domácnosti (29 %), terciální sektor služeb (22 %), energetika (7 %) a další. Podíl jednotlivých spotřebitelů elektrické energie je zobrazen v grafu 3.2. [17]

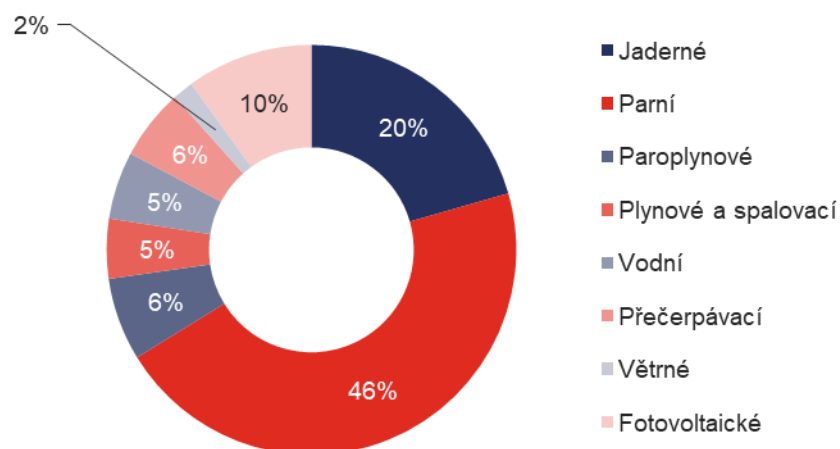
Podíl jednotlivých sektorů národního hospodářství na celkové spotřebě elektřiny v ČR



Graf 3.2 Podíl jednotlivých sektorů národního hospodářství na celkové spotřebě elektřiny v ČR ^[17]

Celkový instalovaný výkon elektráren činil 20,9 GW v roce 2021. Z hlediska podílu instalovaného výkonu v elektrizační soustavě (dále jen „ES“) ČR, jak je vidět v grafu 3.3, mají nejvyšší podíl parní elektrárny (46 %), dále jaderné (20 %), fotovoltaické (10 %) a další. Do parních elektráren se řadí elektrárny vyrábějící z uhlí, biomasy, bioplynu, zemního plynu a jiných paliv. Instalovaný výkon se u jaderných, vodních, přečerpávacích a fotovoltaických elektráren během posledních let téměř nezměnil. ^[17]

Podíl instalovaného výkonu v ES ČR – 2021



Graf 3.3 Podíl instalovaného výkonu v ES ČR – 2021 ^[17]

U parních elektráren dochází v posledních letech ke snižování instalovaného výkonu z důvodu odstavování uhelných elektráren. V roce 2021 se jednalo například o Elektrárnu Mělník III. U paroplynových elektráren došlo v roce 2014 k navýšení instalovaného výkonu na hodnotu 1 363 MW. U plynových a spalovacích elektráren došlo během posledních let k navyšování instalovaného výkonu až na hodnotu 984 MW. U větrných elektráren docházelo k navyšování instalovaného výkonu do roku 2019, kde se výkon ustálil na hodnotě 339,4 MW.

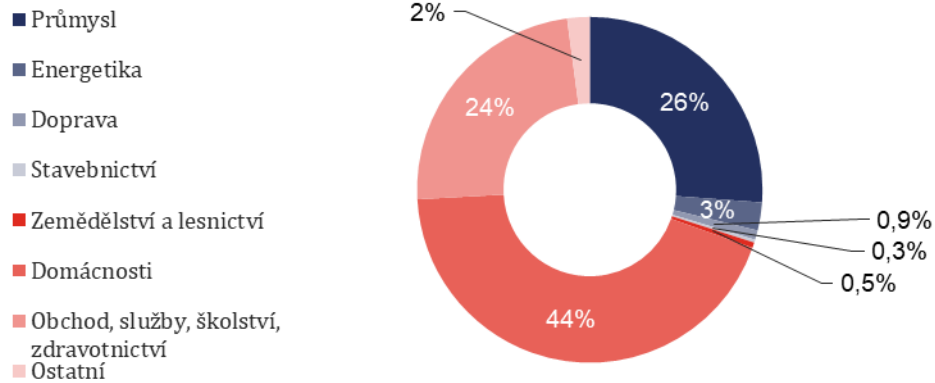
V Ústeckém kraji se nachází nejvíce elektráren, co se týče instalovaného výkonu, který v tomto kraji dosahuje více než 5 GW. Největší zastoupení zde mají uhelné elektrárny (Ledvice, Tušimice, Počerady, Pruněřov...), jelikož se v tomto kraji nacházejí uhelné doly. Další parní elektrárny se nacházejí v Moravskoslezském, Pardubickém a Středočeském kraji. Ve Středočeském kraji mají také velké zastoupení vodní elektrárny. Jaderné elektrárny jsou lokalizovány v Jihočeském kraji (Temelín o výkonu 2,25 GW) a kraji Vysočina (Dukovany o výkonu 2,04 GW). V Jihočeském kraji se nachází nejvíce instalovaného výkonu ve fotovoltaických elektrárnách, jež dosahuje hodnoty okolo 450 MW, což je dáno vhodnými podmínkami slunečního svitu (resp. intenzitou slunečního záření).

V roce 2021 dominoval export elektřiny zejména s Rakouskem (10,9 TWh) a Slovenskem (8,9 TWh). S Německem byl export (6,1 TWh) a import (6,2 TWh) elektřiny téměř vyrovnaný. U Polska dominoval hlavně import (8,4 TWh). Počet odběrných míst narůstá každý rok o hodnotu okolo 40 000 a v roce 2021 dosáhl počet odběrných míst hodnoty 6 139 436. Z celkového počtu odběrných míst je více než 99,5 % na nízké napěťové hladině. Nízkou napěťovou hladinu lze rozdělit na maloodběr obyvatelstva, jež činí 88 % a na maloodběr podnikatelů, jež činí 12 % na této napěťové hladině. Největším distributorem, z hlediska počtu odběrných míst, je stále společnost ČEZ Distribuce, a.s. (61 %). Dále je společnost EG.D, a.s. (26 %) a společnost PREdistribuce, a.s. (13 %).^[17]

Teplárenství je v České republice velmi rozšířeno. Na soustavu zásobování tepelnou energií (tzv. dálkové vytápění) je napojeno přibližně 1,7 milionu domácností, což odpovídá počtu 4 milionů obyvatel nebo 40 % populace v ČR. Celková délka rozvodů tepla je přibližně 4 500 km. Největším spotřebitelem tepla z dálkového vytápění jsou domácnosti (44 %), dále za ním je průmysl (26 %),

terciální sektor služeb (24 %) a další. Podíl jednotlivých spotřebitelů tepla je zobrazen v grafu 3.4.

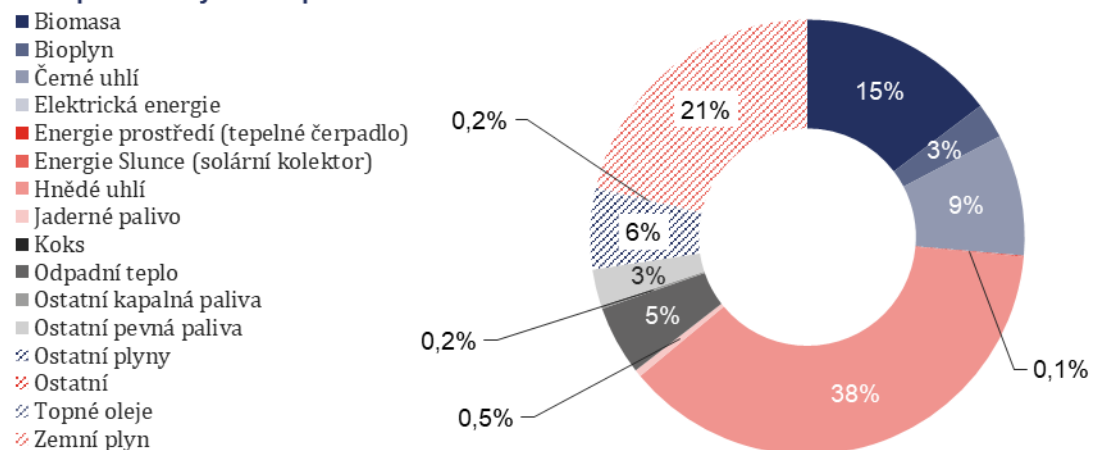
Podíl jednotlivých sektorů národního hospodářství na spotřebě tepla v ČR



Graf 3.4 Podíl jednotlivých sektorů národního hospodářství na spotřebě tepla v ČR [18]

Celková roční výroba tepla brutto v roce 2021 byla 161 647 TJ, z toho 99 015 TJ užitečného tepla bylo vyrobeno z kombinované výroby elektřiny a tepla (dále jen „KVET“). Z KVET bylo zároveň vyrobeno 10,6 TWh brutto elektřiny. Množství dodávaného tepla v roce 2021 bylo 92 429 TJ, to odpovídá 57 % brutto výroby. Dále 28 % z brutto výroby tepla bylo spotřebováno ve vlastním podniku nebo zařízení, 6 % z brutto výroby tepla šlo na technologickou vlastní spotřebu a 8 % z brutto výroby tepla připadlo na ztráty při výrobě a distribuci. Největší podíl na výrobě tepla má hnědé uhlí (38 %), dále pak zemní plyn (21 %), biomasa (15 %) a černé uhlí (9 %). Podíl paliv na výrobě tepla brutto je zobrazen v grafu 3.5. [18]

Podíl paliv na výrobě tepla brutto - 2021



Graf 3.5 Podíl paliv na výrobě tepla brutto – 2021 [18]

Oproti roku 2017 došlo k poklesu brutto výroby tepla z hnědého uhlí o 14 %, což souvisí s postupným útlumem těžby uhlí a odstavením zdrojů s vysokou emisí CO₂. Naopak u biomasy došlo k nárůstu brutto výroby tepla o 35 % oproti roku 2017. Nejvíce využívanou biomasou je dřevní odpad z těžby dřeva (piliny, kůra, štěpky a jiné), jež se podílí na dodávce tepla ze 77 %. Další hojně využívanou biomasou jsou celulózové výluhy (9 %), brikety a pelety (9 %).

Celkový instalovaný výkon výroby tepla činí okolo 39 GW_t. Nejvíce vyroben tepla se nachází v Ústeckém kraji (9,9 GW_t, tj. 25 %), dále v Moravskoslezském kraji (6,1 GW_t, tj. 16 %), ve Středočeském kraji (4,4 GW_t, tj. 11 %) a v Pardubickém kraji (3,7 GW_t, tj. 10 %). V těchto krajích se kumuluje nejvíce instalovaného výkonu, jelikož se v těchto krajích nacházejí uhelné doly. Moravskoslezský kraj má největší podíl při dodávce tepla z černého uhlí, odpadního tepla a ostatních plynech (tj. jiné než zemní plyn). V Jihočeském kraji a v kraji Vysočina je dodáváno teplo i z jaderných zdrojů, ale toto množství je vůči celkové hodnotě téměř zanedbatelné. [18]

Česká republika patří mezi státy Evropské unie s nejmenší energetickou dovozní závislostí, tj. závislostí na dovozu primárních energetických zdrojů. Energetická dovozní závislost ČR se postupně zvyšuje, jelikož v roce 2010 dosahovala hodnoty 25,5 %. V roce 2020 dosahovala hodnoty 39 %. I přes tento nárůst patří stále ČR mezi země s nízkou energetickou dovozní závislostí, jelikož průměr energetické dovozní závislosti EU v roce 2020 činil 57,5 %. Největší energetickou dovozní závislost máme na Rusku, která v roce 2020 činila 23,7 %, na kterém jsme byli téměř výhradně závislí z hlediska dovozu zemního plynu a částečně závislí z hlediska dovozu surové ropy a ropných produktů. Ovšem po událostech, které se udály v roce 2022, došlo k velké změně v dodávkách surovin a z hlediska dovozu zemního plynu již nejsme vůbec závislí na Rusku a objem dovozu surové ropy a ropných produktů je z této země rychle snižován. Dovozní závislost pevných fosilních paliv postupně narostla z hodnoty -15,4 % v roce 2010 až na 13,1 % v roce 2020. Tento nárůst je dán postupným útlumem těžby uhlí v ČR a v tomto ohledu měla ČR v roce 2020 největší dovozní závislost na Polsku, o hodnotě 15,8 %. Celková energetická dovozní závislost na Polsku činí 6,1 %. Mezi další země, na kterých je ČR dovozně závislá, patří Ázerbájdžán (3,6 %) a Německo (4,6 %). [5]

3.2 Plán přechodu ČR k nízkouhlíkové energetice

Směřování energetiky České republiky popisuje hlavně aktualizovaná Státní energetická koncepce (dále jen „ASEK“) vydaná v roce 2015, jež stanovuje výhled až do roku 2040. Hlavním cílem ASEK je zajistit spolehlivou, bezpečnou a k životnímu prostředí šetrnou dodávku energie jak pro potřeby obyvatelstva, tak i ekonomiky ČR. To vše za konkurenceschopné a přijatelné ceny. Dalším cílem je například zabezpečení nepřerušovaných dodávek energie v krizových situacích. ASEK stanovuje cílové hodnoty k roku 2040, z nichž některé již nejsou aktuální.

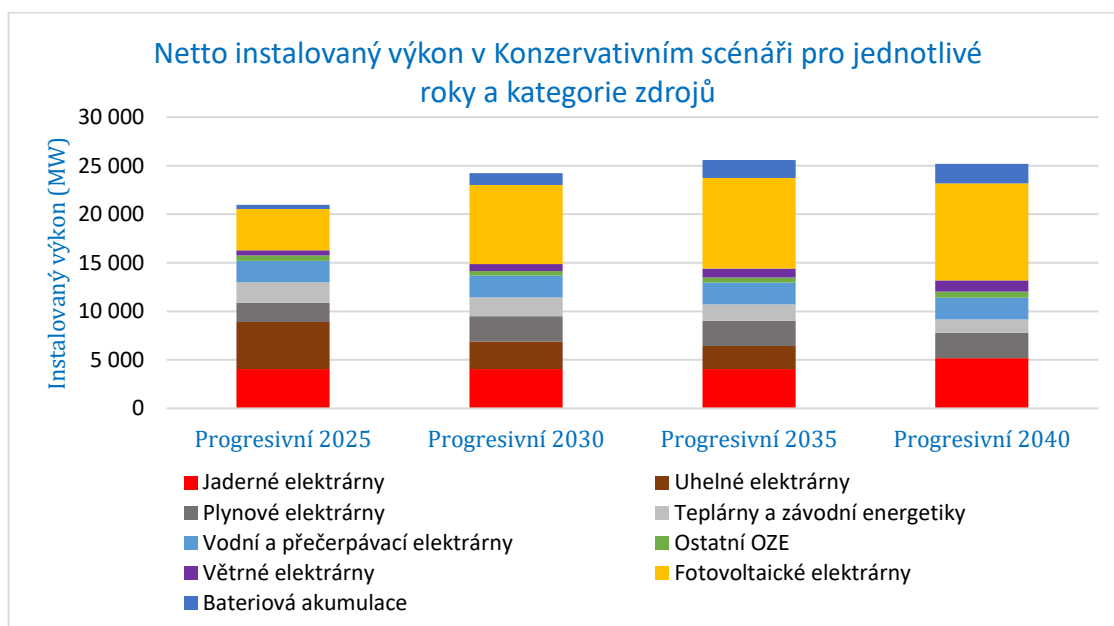
Z hlediska jaderné energie ASEK spolu s Národním akčním plánem rozvoje jaderné energetiky v ČR stanovují, že do roku 2040 by měl vzrůst podíl jaderné energie na výrobě elektřiny nad 50 % spolu se snahou maximalizovat využití tepla z těchto zdrojů v dálkovém vytápění. Dále doporučují výstavbu nových jaderných zdrojů o celkovém výkonu do 2 500 MW a optimálně prodloužit životnost JE Dukovany až na 60 let.

ASEK neodpovídá cílům dnešní doby. Zejména v ní nejsou implementovány změny schválené po roce 2015 a se SMR nepočítá vůbec. Z těchto důvodů se plánuje vydání další aktualizace Státní energetické koncepce na konci roku 2023, která by stanovila výhled české energetiky do roku 2050. ^[36, 37]

V roce 2017 Česká republika ratifikovala Pařížskou dohodu o změně klimatu, jež si klade za cíl udržet nárůst globální průměrné teploty výrazně pod hranicí 2 °C oproti hodnotám před průmyslovou revolucí. Na tuto dohodu dále navazuje tzv. Zelená dohoda pro Evropu (Green Deal), kterou schválila ČR v roce 2020, jež stanovuje cíl, aby EU dosáhla klimatické neutrality do roku 2050. V roce 2021 na tuto dohodu navázal balíček legislativních návrhů Evropské komise (tzv. Fit for 55), které mají vést k 55 % snížení emisí skleníkových plynů na úrovni EU do roku 2030 v porovnání s rokem 1990. Sektor zahrnutý do Evropského systému pro obchodování s emisemi (dále jen „EU ETS“) by měl dosáhnout snížení emisí až o 61 % do roku 2030 oproti roku 2005. Dále by se měl EU ETS postupně rozšířit i o silniční, leteckou a námořní dopravu a o stavebnictví. Dále by měl být do roku 2030 například zvýšen podíl OZE na spotřebě energie v EU na 40 % (pro ČR to znamená navýšení na 28–30 %) či snížena spotřeba primární energie o 39 %. ^[19]

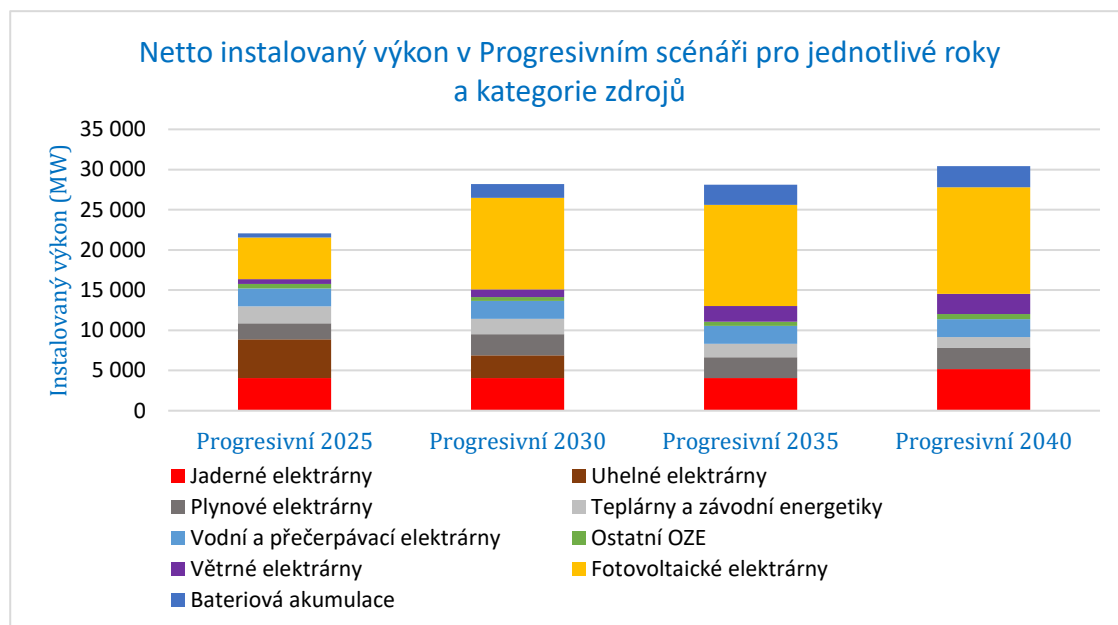
Z výše uvedených legislativních předpisů je zřejmý odklon od zdrojů produkujících skleníkové plyny, transformace energetiky na vysoký podíl OZE a zvyšování energetické účinnosti. V České republice lze nahradit fosilní paliva pomocí OZE pouze omezeně, jelikož je ČR limitována klimatickými a geografickými podmínkami. Dále u OZE narážíme na sezónní výkyvy ve výrobě a s tím související potřebou akumulace velkého množství energie. Uhelná komise doporučila na konci roku 2020 jako nejvhodnější rok útlumu těžby uhlí rok 2038. [38]

Společnost ČEPS, a.s., obdobně jako ostatní provozovatelé přenosových soustav v EU, každoročně zpracovává Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (dále jen „MAF CZ“) v souladu s Nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/943 o vnitřním trhu s elektřinou. MAF CZ navrhuje tři scénáře a to referenční, konzervativní a progresivní. Akumulace s využitím technologie Power-to-Gas není v těchto scénářích uvažována, jelikož prozatím není vytvořena legislativa pro tuto technologii a k jejímu rozšíření by mělo dojít až po roce 2030. Akumulace do vodíku není též v těchto scénářích uvažována, jelikož neexistují konkrétní plány na rozvoj vodíkové infrastruktury v ČR. Zároveň se uvažuje s 60letou životností jaderných reaktorů v Dukovanech a dostavbou nového jaderného zdroje v této lokalitě. Konzervativní scénář uvažuje s útlumem uhlí v souladu s doporučením uhelné komise a se zvýšením instalovaného výkonu zejména fotovoltaických, ale i větrných elektráren. [6]



Graf 3.6 Netto instalovaný výkon v Konzervativním scénáři pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů [6]

Progresivní scénář uvažuje s útlumem uhlí již v roce 2033 a s ještě vyšším navýšením instalovaného výkonu fotovoltaických i větrných elektráren oproti konzervativnímu scénáři.



Graf 3.7 Netto instalovaný výkon v Progresivním scénáři pro jednotlivé roky a kategorie zdrojů [6]

Referenční scénář uvažuje se stejným instalovaným výkonem fotovoltaických a větrných elektráren jako u konzervativního scénáře a s pozvolným útlumem uhlí až do roku 2050. Všechny scénáře dále uvažují s navýšením instalovaného výkonu zdrojů na biomasu a s využitím bateriové akumulace, jejíž instalovaný výkon by měl odpovídat 20 % instalovaného výkonu fotovoltaických elektráren po roce 2030.

Z provedené simulace vychází, že u všech scénářů bude potřeba import elektřiny do ES v ČR již v roce 2025 a importní saldo přesáhne 10 % spotřeby elektřiny v ČR. U progresivnějšího scénáře je import nejvýraznější a to přes 20 TWh v roce 2040. U konzervativnějšího scénáře se import pohybuje okolo 16 TWh v roce 2040. U obou scénářů bude proto potřeba provést dozdvojení, tzn. navýšení instalovaného výkonu, kvůli dodržení bezpečnostního parametru (tj. pokrytí min. 90 % spotřeby tuzemskými zdroji) a spolehlivostního parametru (tj. LOLE do 15 h/rok). U konzervativního scénáře bude potřeba dozdvojení až v roce 2040 v objemu 479 MW. U progresivnějšího scénáře bude potřeba dozdvojení již v roce 2035 v objemu 2 658 MW. [6]

U dekarbonizace dálkového vytápění se uvažuje se postupným odklonem od uhlí dle doporučení uhelné komise. Jako náhradní zdroje, mimo již výše zmíněné, se uvažují zdroje využívající biomethan, vodík, geotermální energie, solární energie a zdroje odpadního tepla. Zároveň je potřeba do dálkového vytápění co nejvíce zapojit jadernou energii, jejíž potenciál je v ČR v oblasti dálkového vytápění prozatím téměř nevyužit. [35]

3.3 Možnosti využití SMR pro budoucí potřeby ČR

V České republice je nyní více než 9,5 GW_e instalovaného výkonu v uhelných elektrárnách, které vyrábějí okolo 32 TWh brutto elektřiny, z toho 10,6 TWh je vyrobeno v KVET spolu s 99 015 TJ užitečného tepla. S postupným odklonem od uhlí, jež by měl být dokončen do roku 2038, bude minimálně potřeba nahradit výše uvedené množství elektrické a tepelné energie. Z předcházejících kapitol je tedy zřejmá potřeba instalace nových zdrojů jak elektrické, tak i tepelné energie, které nahradí emisní zdroje, jakými jsou zejména uhelné, ale také i plynové zdroje. Malé modulární reaktory představují jedno z možných řešení, čím emisní zdroje nahradit.

SMR budou poskytovat elektřinu zejména v základním zatížení, jelikož jsou stabilním a spolehlivým zdrojem. SMR by mohl být i zdroj pro pološpičkové zatížení, ovšem je otázkou, jestli by dosáhl ekonomického provozu. Například, aby se zabránilo snížení výkonu reaktoru, a tudíž snížení jeho využití v době snížené poptávky po elektřině, mohl by se generovaný tepelný výkon využít k jiné transformaci energie (např. do vodíku) tak, aby se dosáhlo co nejvyššího ekonomického provozu. V případě špičkového zatížení se jako zdroje elektřiny SMR neuvažují, jelikož by se v důsledku velmi nepravidelného zatížení z ekonomického hlediska nevyplatily. Zároveň se u SMR plánuje s vyšším zapojením do poskytování podpůrných služeb provozovateli přenosové soustavy. SMR nejsou plánovány jako náhrada za velké jaderné zdroje, ale jako doplňkový zdroj elektřiny k nim, jelikož by měl vzrůst podíl jaderné energie na výrobě elektřiny v ČR nad 50 % do roku 2040 dle ASEK. Malé modulární reaktory je ideální provozovat jako zdroje kombinované výroby elektrické energie a tepla (tzv. KVET),

jelikož dojde k vyššímu využití energie z paliva, ke zvýšení celkové účinnosti až nad 80–90 % a ke zvýšení ekonomické hospodárnosti. [36]

Z hlediska dodávky tepelné energie mají SMR také velký potenciál, jelikož by mohly nahradit stávající teplárny a dodávat teplo do dálkového vytápění. Ovšem nevýhodou u dálkového vytápění je potřeba nepřerušené dodávky tepla, což by mohl být problém v případě náhrady původního zdroje tepla za SMR, jelikož je velmi těžké odhadnout, zda by bylo vůbec možné stavět nový SMR za stálého provozu zdroje tepla ve stejné lokalitě, a to jak z hlediska legislativního, tak i z hlediska technického provedení. V České republice je velmi rozšířen hutnický, chemický, petrochemický a strojírenský průmysl, které jsou energeticky velmi náročné a jimž by mohly SMR poskytovat tepelnou energii v budoucnosti jak pro nízkoteplotní procesy, tak i pro vysokoteplotní procesy.

Po roce 2030 se počítá s rozšířením vodíku pro běžné využití a akumulaci v oblasti elektroenergetiky, teplárenství, a i v dopravě, čímž vznikne velká poptávka po zdrojích vyrábějících vodík. S těmito zdroji by mohly spolupracovat SMR jak z pohledu dodávky elektrické energie pro nízkoteplotní elektrolýzu vodíku, tak zejména z pohledu dodávky tepla pro vysokoteplotní elektrolýzu vodíku.

3.4 Připravenost technologií SMR ke komerčnímu využití

Existuje více než 80 konceptů SMR v různých fázích vývoje a nasazení v 18 členských státech. Dva koncepty SMR jsou již v provozu a to KLT-40S v Rusku a HTR-PM v Číně. Dva tlakovodní reaktory KLT-40S, o celkovém elektrickém výkonu 70 MWe, byly připojeny k síti v květnu roku 2020. Dva vysokoteplotní plynem chlazené reaktory HTR-PM, o celkovém elektrickém výkonu 210 MWe, byly připojeny k síti v prosinci roku 2021. SMR koncept CAREM25 je ve výstavbě v Argentině a první kritičnosti by měl dosáhnout v roce 2026. Dále je ve výstavbě SMR koncept ACP1000 v Číně, jehož spuštění komerčního provozu se plánuje na konci roku 2026. Posledním SMR ve výstavbě je dle dostupných zdrojů BREST-OD-300 v Rusku, jehož dokončení je plánováno v roce 2026. [24]

S budoucím nasazením ruských a čínských konceptů SMR se v ČR za stávající politické situace neplánuje, a proto nebudou koncepty z těchto států blíže specifikovány v následujících kapitolách.

Z desítek konceptů SMR se v pokročilejší fázi vývoje nachází pouze několik jednotek z nich. Naprostá většina konceptů je pouze ve fázi koncepčního nebo jednoduchého návrhu, a tudíž jejich nasazení v blízké budoucnosti nelze očekávat.

Z časového hlediska mají nejbliže ke komerčnímu nasazení SMR s technologií LWR dle dostupných zdrojů. Většina vývojově nejpokročilejších konceptů SMR jsou tlakovodního typu (PWR), jejichž první reaktory by mohly být uvedeny do provozu již před rokem 2030 a většího komerčního nasazení by dosáhly ve 30. letech 21. století. SMR s reaktory IV. generace nejsou v tak pokročilé fázi vývoje jako SMR s lehkovodními reaktory, a proto se očekává, že první reaktory tohoto typu budou uvedeny do provozu spíše na konci 30. let a k jejich komerčnímu nasazení dojde pravděpodobně až v průběhu 40. let. Ovšem to celé zcela závisí na rychlosti a úspěšnosti vývoje daných konceptů SMR. [24]

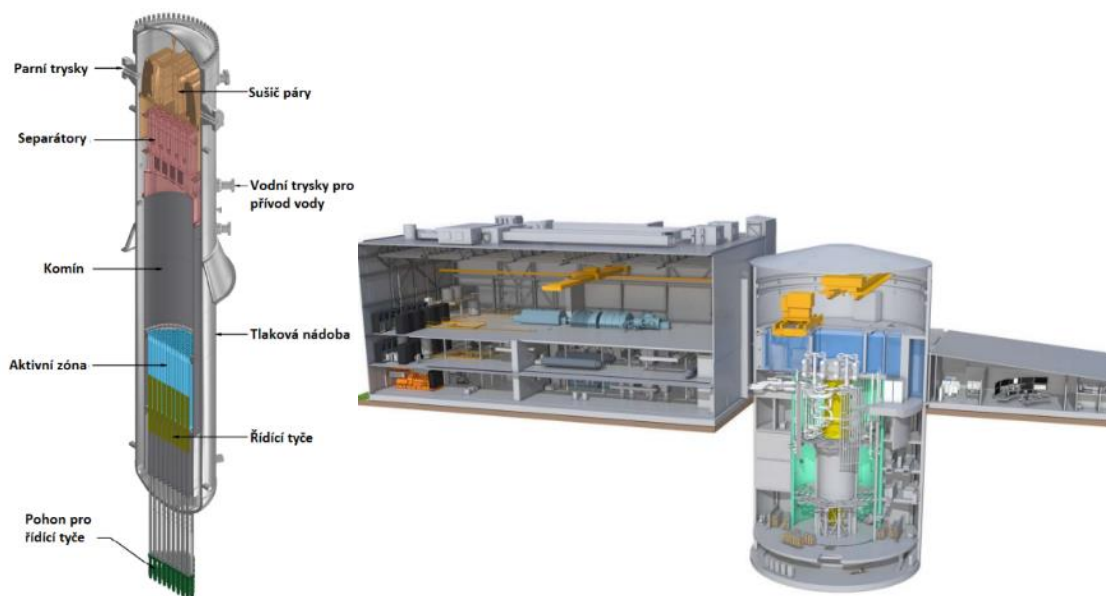
Společnost ČEZ, a.s., která plánuje vybudovat první SMR v ČR v lokalitě Temelín, podepsala memoranda o spolupráci v oblasti malých modulárních reaktorů se společnostmi GE-Hitachi, EDF, KHNP, Holtec, Rolls Royce a NuScale. V následujících podkapitolách budou popsány zejména SMR s technologií PWR a BWR z důvodu využití desítky let ověřené technologie, dřívějšího časového nasazení do provozu a již navázané spolupráce mezi výše zmíněnými společnostmi. SMR s jinou technologií budou zmíněny pouze okrajově. Bližší informace a principy daných technologií SMR jsou uvedeny v kapitole 2.3. [31]

3.4.1 Koncepty SMR v zahraničí

3.4.1.1 BWRX-300

BWRX-300 je vyvíjen americko-japonskou společností GE-Hitachi Nuclear Energy a je založen na technologii varného reaktoru (BWR), resp. na reaktoru ESBWR. Společnost uvažuje s využitím tohoto reaktoru, jak pro produkci elektrické energie, tak i pro dodávku tepla do dálkového vytápění či produkci vodíku. Tepelný výkon reaktoru činí 870 MWt a dokáže poskytnout necelých 300 MWe elektrického výkonu. Reaktor má mít faktor kapacity, tj. poměr mezi skutečným množstvím vyrobené energie za určité období k množství energie, jež by byla vyrobena zdrojem na jmenovitém výkonu za nepřetržitého provozu, vyšší než 95 %.

Reaktor je integrálního uspořádání a využívá již ověřené materiály. Palivem je obohacený uran s mírou obohacení 3,81 % a délka kampaně reaktoru bude mezi 12 až 24 měsíci. Chladivo primárního okruhu cirkuluje pouze pomocí přirozené konvekce a výstupní teplota chladiva z reaktoru je 288 °C. Bezpečnostní systém je založen hlavně na pasivních prvcích. Pro nouzové chlazení reaktoru slouží izolovaný kondenzační systém, jež v případě potřeby odvádí páru z tlakové nádoby do tepelných výměníků umístěných v chladicím bazénu, ve kterých pára kondenzuje zpět na kapalinu a vrací se do reaktoru a zároveň předávají zbytkové teplo do vody v chladicím bazénu. Toto nouzové chlazení zajistí chlazení reaktoru po dobu minimálně 7 dní bez napájení nebo zásahu operátora.



Obrázek 3.1 BWRX-300 a koncepční rozložení elektrárny BWRX-300 [24]

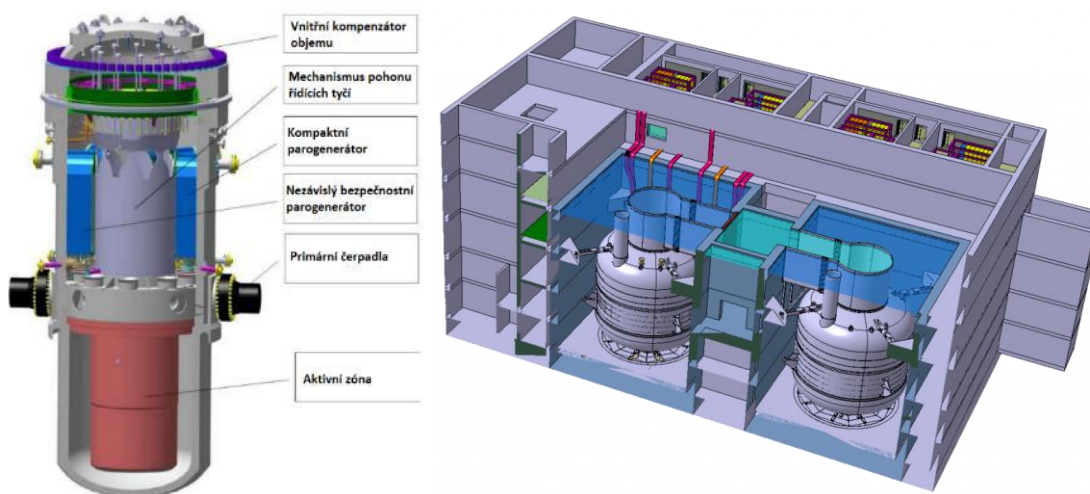
Plocha elektrárny by měla dosáhnout rozlohy okolo 9 800 m². Nyní je koncept SMR ve fázi detailního návrhu a prošel již předběžnými kontrolami v USA, UK a Kanadě. V brzké době se očekává podání žádosti o licenci, jelikož společnost GE-Hitachi ve spolupráci s Ontario Power Generation plánují zahájení komerčního provozu tohoto SMR v roce 2028 v Kanadě v lokalitě Darlington. [24]

3.4.1.2 NUWARD™

NUWARD™ je vyvíjen francouzskou společností EDF jako náhrada za elektrárny spalující fosilní paliva s elektrickým výkonem v rozsahu 300 až 400 MWe. NUWARD™ je založen na technologii tlakovodního reaktoru (PWR). Společnost

uvažuje s využitím tohoto reaktoru jak pro produkci elektrické energie, tak i pro kogeneraci elektřiny a tepla či produkci vodíku. Tepelný výkon reaktoru činí 540 MWt a dokáže poskytnout 170 MWe elektrického výkonu. Elektrárna je navržena se dvěma reaktory. Reaktor má mít faktor kapacity vyšší než 90 %.

Reaktor je integrálního uspořádání a cílí na jednoduchost a standardizaci výroby. Palivem je obohacený uran (s mírou obohacení do 5 %) a délka kampaně reaktoru bude 24 měsíců. Chladivo primárního okruhu cirkuluje pomocí nucené konvekce a výstupní teplota chladiva z reaktoru je 307 °C. Mezi reaktorovými bazény se má nacházet bazén vyhořelého paliva sdílený pro oba reaktory. Bezpečnostní systém je založen na aktivních i pasivních bezpečnostních prvcích. Jedním z aktivních bezpečnostních prvků je aktivní vstřikování vody s borem ke snížení reaktivity nebo vstřikování dusíku ke snížení rizika při spalování vodíku. V případě poruchy lze odvádět zbytkové teplo z aktivní zóny do reaktorového bazénu, jež poskytne chlazení reaktoru po dobu minimálně 3 dní bez potřeby koncového jímače tepla.



Obrázek 3.2 NUWARD™ a koncepční rozložení reaktorů NUWARD™ [2, 24]

Plocha elektrárny by měla dosáhnout rozlohy okolo 3 500 m². Nyní je koncept SMR ve fázi koncepčního návrhu a připravuje se na předlicencovací fázi. Na schvalovacích procesech s francouzským úřadem pro jadernou bezpečnost (ASN) se podílí i Státní úřad pro jadernou bezpečnost v ČR (SÚJB) a Finský úřad pro radiační a jadernou bezpečnost (STUK), jelikož společnost EDF má zájem o to, aby obě země schválily následné licencování tohoto SMR. Společnost EDF plánuje začátek výstavby FOAK ve Francii okolo roku 2030. [24]

3.4.1.3 SMART

SMART je vyvíjen společnostmi KAERI a K.A.CARE a je založen na technologii tlakovodního reaktoru (PWR). Reaktor je určen pro produkci elektrické energie, dodávku tepla do dálkového vytápění, odsolování a dodávku procesního tepla pro průmysl. Tepelný výkon reaktoru činí 365 MWt a dokáže poskytnout 107 MWe elektrického výkonu. SMART má potenciál zajistit poptávku po elektřině a sladké vodě u města se 100 000 obyvateli. Elektrárna je navržena se dvěma reaktory a přívodem slané vody.

Reaktor je integrálního uspořádání a využívá již ověřené materiály a postupy. Palivem je obohacený uran s mírou obohacení do 5 % a délka kampaně reaktoru bude 30 měsíců. Chladivo primárního okruhu cirkuluje pomocí nucené konvekce a výstupní teplota chladiva z reaktoru je 322 °C. Bezpečnostní systém je založen na aktivních i pasivních bezpečnostních prvcích. V případě poruchy pasivní bezpečnostní systém zajistí odvod zbytkového tepla z aktivní zóny minimálně po dobu 3 dní bez potřeby zásahu operátora.

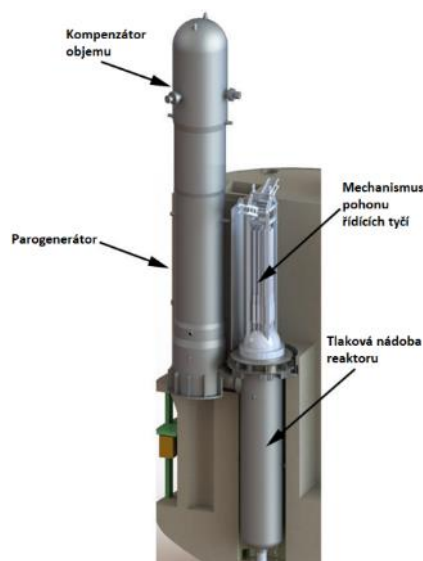
Plocha elektrárny by měla dosáhnout rozlohy okolo 90 000 m². Nyní je koncept SMR ve fázi detailního návrhu. V roce 2019 byla podána žádost o standardní schválení návrhu, tj. schválení konečného návrhu jaderného zařízení. První FOAK by měla být postavena v Saudské Arábii, ale datum počátku výstavby není prozatím známo. [24]

3.4.1.4 SMR-160

SMR-160 je vyvíjen americkou společností Holtec International a je založen na technologii tlakovodního reaktoru (PWR). Reaktor je určen pro produkci elektrické energie, dodávku tepla do dálkového vytápění, odsolování, či výrobu vodíku. Tepelný výkon reaktoru činí 525 MWt a dokáže poskytnout 160 MWe elektrického výkonu. SMR-160 je vhodný i do míst s nedostatkem vody, jelikož má patentovanou technologii vzduchem chlazeného kondenzátoru. Zároveň je schopen startu ze tmy, což je výhodné pro oblasti s nestabilní rozvodnou sítí. Reaktor má mít faktor kapacity vyšší než 95 %. Společnost Holtec uvažuje o nahrazení uhelných zdrojů svým reaktorem, a proto podala žádost o patent na vícestupňové kompresory, jež by dovolily zachovat okruh páry a další části uhelné elektrárny a nahradit pouze

uhelný kotel právě za SMR-160, čímž by došlo ke zjednodušení výstavby a k úspoře finančních prostředků. [39]

SMR-160 není plně integrálního uspořádání, jelikož má tlakovou nádobu reaktoru oddělenou od parogenerátoru, ve kterém je integrován kompenzátor objemu. Palivem je obohacený uran s mírou obohacení okolo 4 % a délka kampaně reaktoru bude 24 měsíců. Chladivo primárního okruhu cirkuluje pomocí přirozené konvekce a výstupní teplota chladiva z reaktoru je 321 °C. Bezpečnostní systém je založen na pasivních bezpečnostních prvcích. V případě poruchy



Obrázek 3.3 SMR-160 [23]

pasivní bezpečnostní systém zajistí bezpečné odstavení a odvod zbytkového tepla z aktivní zóny do chladícího bazénu po neomezeně dlouhou dobu bez potřeby napájení či zásahu operátora.

Plocha elektrárny by měla dosáhnout rozlohy okolo 28 000 m². Nyní je koncept SMR ve fázi předběžného návrhu a společnost Holtec spolupracuje s několika mezinárodními regulátory zároveň, aby se přiblížila k úspěšnému dokončení konceptu. Připojení k síti tohoto SMR by mělo proběhnout okolo roku 2030, ale prozatím není známa lokalita ani počátek jeho výstavby. [24]

3.4.1.5 Rolls-Royce SMR

Rolls-Royce SMR je vyvíjen britskou společností Rolls-Royce SMR Ltd. a je založen na technologii tlakovodního reaktoru (PWR). Reaktor je primárně určen pro produkci elektrické energie v základním zatížení, ale umožňuje také kogeneraci elektřiny a tepla, či poskytnutí výkonu pro produkci syntetických paliv. Tepelný výkon reaktoru činí 1 358 MWt a dokáže poskytnout 470 MWe elektrického výkonu. Společnost Rolls-Royce nemá snahu modularizovat pouze reaktor a jeho přilehlé části, ale má snahu o modularizaci i ostatních částí elektrárny, aby se dosáhlo co nejnižších investičních nákladů a zrychlené doby výstavby. Reaktor má mít faktor kapacity vyšší než 90 % a má dosáhnout rychlosti změny reaktorového výkonu o 3 až 5 % za minutu mezi 50 % až 100 % jmenovitého výkonu.

Rolls-Royce SMR je smyčkového uspořádání a je složen ze 3 smyček primárního okruhu. Palivem je obohacený uran (s mírou obohacení do 4,95 %) a délka kampaně reaktoru bude 18 měsíců. Chladivo primárního okruhu cirkuluje pomocí nucené konvekce a výstupní teplota chladiva z reaktoru je 325 °C. Bezpečnostní systém je založen na aktivních a pasivních bezpečnostních prvcích, které se již využívají u III. generace velkých jaderných reaktorů. V případě poruchy pasivní bezpečnostní systém zajistí odvod zbytkového tepla z aktivní zóny minimálně po dobu 3 dní bez potřeby napájení či zásahu operátora.



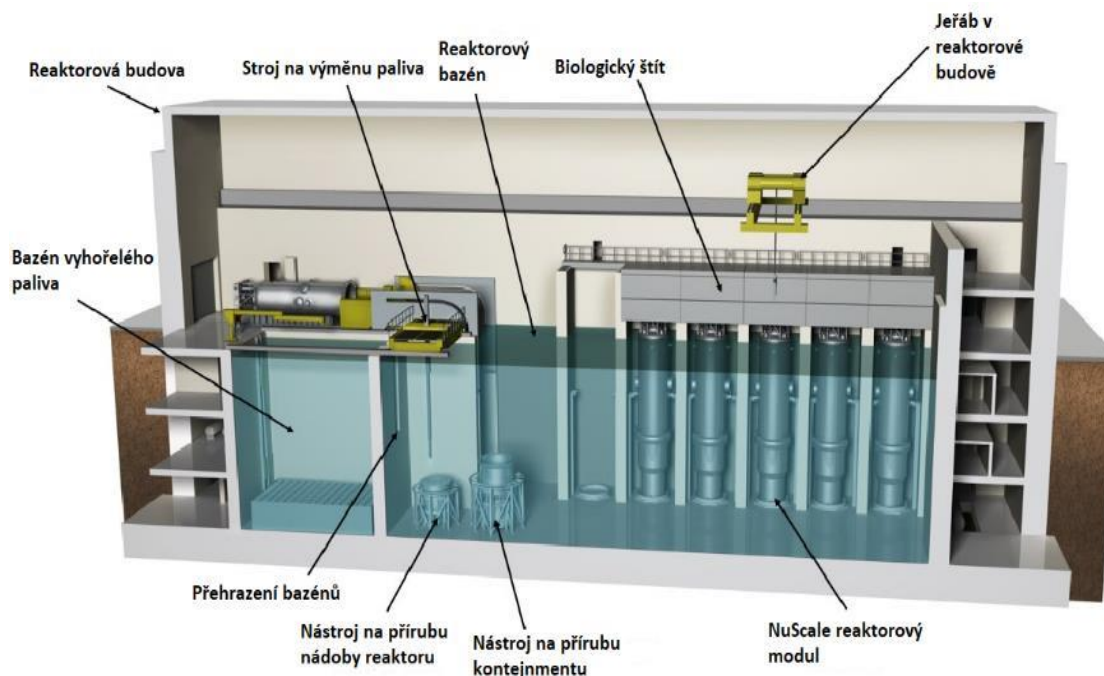
Obrázek 3.4 Rolls-Royce SMR [45]

Plocha elektrárny by měla dosáhnout rozlohy okolo 40 000 m². Nyní je koncept SMR ve fázi detailního návrhu a v roce 2022 započalo formální posouzení návrhu, tj. posouzení navržené technologie pro zkonstruování, provoz a vyřazení z provozu ve Velké Británii, britskými regulačními orgány s cílem dokončení tohoto posouzení tak, aby začala výstavba FOAK již v roce 2026. Zahájení komerčního provozu FOAK je plánováno v roce 2030. [24]

3.4.1.6 VOYGR™

VOYGR™ je vyvíjen americkou společností NuScale Power Corporation a je založen na technologii tlakovodního reaktoru (PWR). Reaktor je primárně určen pro produkci elektrické energie s flexibilní změnou zatížení, ale umožňuje také kogeneraci elektřiny a tepla. Tepelný výkon reaktoru činí 250 MWt a dokáže poskytnout 77 MWe elektrického výkonu. Reaktor má mít faktor kapacity okolo 95 %. Elektrárna je navržena se 4, 6 nebo až s 12 reaktory. Každý reaktor je samostatným modulem, který pracuje nezávisle na ostatních reaktorech a všechny

reaktory jsou řízeny z jedné kontrolní místnosti. Pro řízení elektrárny s 12 reaktory bude potřeba minimálně 3 proškolených operátorů na směnu a celkově bude potřeba okolo 270 zaměstnanců elektrárny za normálního provozu.



Obrázek 3.5 VOYGR™ [24]

VOYGR™ je integrálního uspořádání. Palivem je obohacený uran (s mírou obohacení do 4,95 %) a délka kampaně reaktoru bude 18 měsíců. Chladivo primárního okruhu cirkuluje pomocí přirozené konvekce a výstupní teplota chladiva z reaktoru je 316 °C. Bezpečnostní systém je založen na pasivních bezpečnostních prvcích. V případě havarijního odstavení dochází nejprve k odvodu zbytkového tepla pomocí přirozené konvekce do parogenerátorů, které je možné napojit na externí tepelné výměníky umístěné v reaktorovém bazénu. V případě poškození parogenerátorů je možné odtlakovat reaktor do prostoru kontejnmentu, kde se zbytkové teplo bude odvádět přes stěnu kontejnmentu do reaktorového bazénu. Množství vody v reaktorovém bazénu vystačí pro dodatečné chlazení bez doplňování vody na dobu 30 dnů. Po 30 dnech poklesne zbytkový výkon na takovou úroveň, při které již postačí chlazení reaktoru vzduchem pomocí přirozené cirkulace. Reaktor tedy lze chladit po neomezeně dlouhou dobu bez potřeby napájecího zdroje, dodatečné chladící vody či zásahu operátora.

Plocha elektrárny s 12 reaktory by měla dosáhnout rozlohy okolo 140 000 m². V roce 2020 získal VOYGR™ o tepelném výkonu 160 MWt (50 MWe) jako první SMR stavebně-provozní licenci od amerického jaderného regulačního úřadu (NRC). V roce 2022 byla podána žádost na zvýšení tepelného výkonu na 250 MWt u níž se očekává dokončení revize do roku 2024. První elektrárna bude mít 6 reaktorů a bude umístěna v USA v lokalitě Idaho Falls. Zahájení komerčního provozu této elektrárny je plánováno v roce 2029. [24]

3.4.1.7 Pokročilé koncepty SMR

Mezi pokročilé koncepty SMR můžeme zařadit GTHTR300, vyvíjený japonským konsorciem JAEA Consortium, který je založen na technologii HTGR s jednookruhovým cyklem. Chladivem je hélium, moderátorem je grafit a palivem je TRISO palivo. Délka kampaně reaktoru má být 48 měsíců. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 45 až 50 %, elektrického výkonu 300 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru mezi 850 až 950 °C. Aktuálně je SMR ve fázi základního návrhu a spuštění demonstrační jednotky se plánuje ve 40. letech 21. století.

IMSR400 je vyvíjený kanadskou společností Terrestrial Energy Inc. a je založen na technologii MSR s tepelnými neutrony. Chladivem je fluoridová sůl, moderátorem je grafit a palivo je rozptýleno v soli. Délka kampaně reaktoru má být 84 měsíců. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 45 %, elektrického výkonu 195 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru 700 °C. Aktuálně je SMR ve fázi detailního návrhu a spuštění první elektrárny se plánuje v roce 2031. Kvůli nízkým zkušenostem s touto technologií, délce povolovacích procesů a podobně je dodržení tohoto časového výhledu velmi nejisté.

MCSFR je vyvíjený americkou společností Elysium Industries a je založen na technologii MSR s rychlými neutrony. Chladivem je směs roztavených solí a palivo je rozptýleno ve směsi. Délka cyklu má být 480 až 720 měsíců. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 40 %, elektrického výkonu 50, 200, 400 nebo 1 200 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru až 950 °C. Aktuálně je SMR ve fázi koncepčního návrhu a začátek výstavby první jednotky se plánuje mezi roky 2027-2030. Kvůli nízkým zkušenostem s touto technologií, délce povolovacích procesů a podobně je dodržení tohoto časového výhledu velmi nejisté. [24]

ARC-100 je vyvíjený kanadskou společností ARC Clean Energy a je založen na technologii SFR. Chladivem je tekutý sodík a palivem je obohacený uran ve formě kovové slitiny. Délka kampaně reaktoru má být 240 měsíců. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 35 %, elektrického výkonu 100 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru až 510 °C. Aktuálně je SMR ve fázi předběžného návrhu. V roce 2029 je plánováno získání licence k provozu FOAK a příprava na výstavbu.

Westinghouse LFR je vyvíjený americkou společností Westinghouse Electric Company a je založen na technologii LFR. Chladivem je olovo a palivem může být obohacený uran (s mírou obohacení do 19,75 %) ve formě oxidu. Délka kampaně reaktoru má být 8 až 15 let. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 50 %, elektrického výkonu 450 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru až 650 °C. Aktuálně je SMR ve fázi koncepčního návrhu. V roce 2030 je plánováno spuštění demonstrační jednotky s elektrickým výkonem do 300 MWe. Ve 30. letech se plánuje licencování a spuštění FOAK s elektrickým výkonem okolo 450 MWe. Kvůli nízkým zkušenostem s touto technologií, délce povolovacích procesů a podobně je dodržení tohoto časového výhledu velmi nejisté.

FMR je vyvíjený americkou společností General Atomics a je založen na technologii GFR. Chladivem je helium a palivem může být obohacený uran (s mírou obohacení do 19,75 %) ve formě oxidu. Délka kampaně reaktoru má být 96 měsíců. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 50 %, elektrického výkonu 50 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru až 800 °C. Aktuálně je SMR ve fázi koncepčního návrhu. Ve 30. letech se plánuje licencování a spuštění prvního prototypu elektrárny. ^[24]

3.4.2 Koncepty SMR v České republice

V České republice za poslední roky vzniklo mnoho konceptů SMR, které se dále rozvíjejí. Ovšem jedná se hlavně o předběžné návrhy (tzv. koncepční designy), které nejsou v pokročilé fázi vývoje, jako je tomu u některých konceptů SMR v zahraničí. Proto lze jen těžko odhadnout, kdy dojde k jejich nasazení a jestli se vůbec dopracují k fázi povolování. Lze tedy konstatovat, že jako první realizované SMR v ČR budou koncepty vyvíjené v zahraničí, jelikož jsou v pokročilejších fázích vývoje. Mezi koncepty III. generace, vycházející z technologie PWR, lze zařadit

Teplator™, DAVID SMR a CR-100. Naopak koncepční designy Energy Well a HeFASTo reprezentují reaktorové systémy IV. generace.

3.4.2.1 DAVID SMR

DAVID SMR je vyvíjený společností Witkowitz Atomica a.s. a je založen na technologii PWR. Reaktor o tepelném výkonu 175 MWt a elektrickém výkonu 50 MWe je částečného integrálního uspořádání a má zejména sloužit pro výrobu elektřiny a dodávku tepla do dálkového vytápění, či do průmyslu. Výstupní teplota chladiva z reaktoru má být 314 °C a palivem bude obohacený uran (s mírou obohacení do 5 %). U tohoto reaktoru se uvažuje s přepravou celé vnitřní nádoby reaktoru, v níž se nachází aktivní zóna, do výrobního závodu, ve kterém proběhne výměna paliva, aby nemusela probíhat výměna paliva přímo v elektrárně, čímž dojde ke snížení investičních nákladů. V roce 2025 se plánuje začátek fáze detailního návrhu a diskuse o podmínkách povolování. Z časového hlediska se jedná o velmi mladý koncept, který má potenciální využití v budoucnu. [55]

3.4.2.2 Energy Well

Energy Well je vyvíjený společností Centrum výzkumu Řež s.r.o. a je založen na technologii fluoridovou solí chlazeného vysokoteplotního reaktoru (FHR). Chladivem primárního okruhu je tekutá sůl FLiBe, sůl NaBF₄ má být chladivem sekundárního okruhu a terciální pracovní látkou je CO₂. Palivo je na bázi TRISO (s mírou obohacení 15 %) a délka kampaně reaktoru má být 84 měsíců. SMR má dosáhnout celkové účinnosti okolo 40 %, elektrického výkonu 8 MWe a výstupní teploty chladiva z reaktoru až 700 °C. Aktuálně je SMR ve fázi koncepčního designu. Do roku 2032 by mělo proběhnout experimentální ověření pomocí integrovaného testovacího zařízení. [24]

3.4.2.3 HeFASTo

HeFASTo je vyvíjený společností ÚJV Řež, a.s. a je založen na technologii GFR. Chladivem je helium a palivem je obohacený uran (s mírou obohacení do 19,5 %) nebo vyhořelé palivo z PWR reaktorů. Délka kampaně reaktoru má být 5 let. SMR má tepelný výkon 200 MWt a výstupní teplotu chladiva z reaktoru až 900 °C. Hlavním cílem tohoto konceptu je využití vyhořelého paliva z PWR reaktorů,

aplikace v chemickém průmyslu a efektivní výroba vodíku. Pro využití vyhořelého paliva je potřeba palivo přepracovat v přepracovatelském závodě, jehož technologie, kterou vyvíjí pár států na světě, je finančně velice nákladná a v ČR není s touto technologií žádná zkušenost. Proto bude potřeba vytvořit metodiku, jak s vyhořelým palivem bezpečně a ekonomicky nakládat a zároveň bude potřeba vynaložit nemalé finanční prostředky na vybudování této infrastruktury.

Aktuálně je SMR ve fázi předkoncepčního návrhu. Do roku 2035 se plánuje dokončení základního návrhu a zahájení povolovacího řízení. Dokončení detailního návrhu a získání povolení k výstavbě se plánuje do roku 2040. [50]

3.4.2.4 Teplator™

Teplator™ je vyvíjený společnostmi ZČU Plzeň a CIIRC ČVUT a je založen na technologii PWR. Reaktor o tepelném výkonu 50 až 150 MWt má sloužit pro dodávku tepla do dálkového vytápění a být náhradou za stávající uhelné teplárny. Dále může poskytovat procesní teplo do průmyslu. Chladivem i moderátorem je těžká voda a výstupní teplota chladiva z reaktoru má být menší 192 °C. Teplator™ má využívat vyhořelé jaderné palivo z tradičních jaderných PWR reaktorů a jeho další výhodou mají být nízké investiční náklady, jež mají být nižší než 30 milionů EUR v cenách z roku 2019. Aktuálně je SMR ve fázi koncepčního návrhu a první jednotka se plánuje uvést do provozu po roce 2028. [24]

Odborníci ze SÚJB a jiných organizací upozorňují na celkovou nepřipravenost tohoto konceptu a zpochybňují uvedení do provozu plánované první jednotky v navrženém harmonogramu, jelikož jiným konceptům trval přechod z koncepční fáze do fáze realizační řádově desítky let. Hlavními problémy jsou nejasná řešení ohledně průběhu manipulace s vyhořelým palivem při závázkách, zabezpečení strukturální integrity a hermetičnosti využívaného paliva a množství jaderného odpadu vznikajícího při provozu zařízení či průběhu vyřazení SMR z provozu. Ohledně vyhořelého paliva jsou u tohoto konceptu stejné nejistoty jako již zmíněné u konceptu HeFASTo. Zároveň bude potřeba uvážit spolu s investičními náklady i náklady potřebné k vybudování infrastruktury na výrobu těžké vody a na přepracování vyhořelého paliva. [16, 47]

3.5 Okrajové podmínky nasazení SMR v ČR

Úspěšné zprovoznění nového jaderného zdroje v podobě SMR v České republice nezávisí pouze na technologických podmínkách daného konceptu a vhodného výběru dodavatele SMR, ale závisí také na dalších mnohých faktorech. Možné okrajové podmínky nasazení SMR v České republice jsou rozebrány níže v této podkapitole. Okrajové podmínky lze rozdělit na tři hlediska, a to na hledisko legislativní, časové a hledisko lokality.

Legislativní hledisko se týká hlavně legislativní úpravy v ČR a její návaznosti na povolování výstavby SMR. Legislativní úprava je již zmíněna v kapitole 2.2 a zmiňuje hlavně tzv. atomový zákon, jež stanovuje požadavky, které musí splnit jaderné zařízení, aby získalo povolení k jeho provozu. Z hlediska umístění a požadavků na projekt se tento zákon odkazuje na prováděcí vyhlášku č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení, a vyhlášku č. 329/2017 Sb., o požadavcích na projekt jaderného zařízení. Před samotnou výstavbou je potřeba získat povolení na umístění a na výstavbu jaderného zařízení, a to v souladu se stavebním a atomovým zákonem. S tím nepřímo souvisí, pokud se uvažuje s výstavbou v tzv. jaderné či nejaderné lokalitě. V jaderné lokalitě již proběhly určité studie a schvalovací procesy, které umožňují v této lokalitě vystavět jaderné zařízení při splnění určitých omezení. Naproti tomu v nejaderné lokalitě neproběhlo žádné povolování, a tudíž se může celý povolovací proces prodloužit. Dalším aspektem je legislativní schválení konkrétního konceptu SMR příslušnými regulačními úřady. Průběh tohoto schvalování by mohl být urychlen, pokud by společnosti, jež vyvíjejí SMR, komunikovali s regulačními úřady již v průběhu vývoje SMR a zároveň, pokud by jednotlivé regulační úřady spolupracovaly dohromady při schvalování daných konceptů. SÚJB vydalo několik bezpečnostních návodů, které mají pomoci ke splnění současných právních požadavků. K povolení o umístění jaderného zařízení se váže bezpečnostní návod BN-JB-4.1 a BN-JB-4.2. Bezpečnostní návody přímo upravující technologie SMR prozatím nejsou zpracované. Průběh legislativního schvalování může ovlivnit i znalost technologie SMR. Například v ČR je legislativa dobře aplikovatelná na PWR reaktory, ale u jiných technologií chybí znalost i potřebná legislativa, jež by se musela připravit.

Časové hledisko se týká hlavně časového harmonogramu nasazení a zprovoznění daných konceptů SMR. K tomuto hledisku se váže i legislativní hledisko, jelikož právě schvalovací procesy mohou velmi pozměnit časový harmonogram nasazení. Například společnost ČEZ, a.s., plánuje zprovoznění prvního SMR v ČR v lokalitě Temelín okolo roku 2032, s tím souvisí i časový harmonogram, který by se měl dodržet, aby se tento cíl splnil. Tento cíl klade podmínky na jednotlivé koncepty, resp. na jejich výrobce a to, zda budou schopni dodržet dílčí časové milníky a stihnout splnit stanovený cíl.

Hledisko lokality se týká hlavně limitujících podmínek dané lokality. V tomto hledisku může být zahrnuto velmi mnoho parametrů, jakými mohou být například možné uplatnění SMR (výroba elektřiny, tepla a jiné), dosažitelnost infrastruktury, maximální rozloha elektrárny a maximální výkon reaktoru. S maximálním výkonem reaktoru souvisí možnosti chlazení, a tedy jestli je zde dostatečný zdroj chladící vody či je zde dostatečně velká plocha na suché chladiče využívající k chlazení proud vzduchu místo vody. Dále s maximálním výkonem souvisí možnosti vyvedení výkonu z elektrárny, jež souvisí s elektrizační sítí nebo s teplotněnskou soustavou. Lokalita se opět váže na legislativní hledisko, jelikož daná lokalita musí mít provedené hodnocení určitých vlastností a jevů, jež jsou stanoveny ve vyhlášce č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení. Jedná se o vlastnosti a jevy, jež by mohly ovlivnit jadernou bezpečnost a tím i vyloučit danou lokalitu jako jadernou. Těmito vlastnostmi a jevy jsou například seismičita, povodně, přírodní požár, pád letadla, silné vibrace, výbuchy a elektromagnetické interference.

4 Koncepce sekundárního okruhu SMR pro budoucí uplatnění v ČR

U malých modulárních reaktorů se počet okruhů, spolu s dalšími pomocnými systémy, liší podle technologie SMR. Například technologii BWR postačuje pouze jeden okruh, jelikož v primárním okruhu je již tvořeno pracovní médium (pára) pro parní turbínu. Technologie PWR je složena ze dvou okruhů, jelikož v primárním okruhu proudí pouze chladivo (voda) v kapalném skupenství a pracovní médium (pára) pro parní turbínu je vytvořeno až v parogenerátoru, jež předává energii z primárního do sekundárního okruhu. Z důvodu zvýšené bezpečnosti se využívají i tříokruhové systémy jako tomu je například u technologie SFR.

Koncepty SMR nabízejí mnoho různých řešení jejich okruhů, ovšem v této kapitole se budu zabývat okruhy u technologie PWR, jelikož SMR s technologií PWR by měly být uvedeny do provozu jako první, a to již před rokem 2030, mají tedy nejbližší komerčnímu nasazení. SMR s reaktory IV. Generace budou uvedeny do provozu spíše až na konci 30. let 21. století. Zhodnocení a popis konceptů SMR je uveden v kapitole 3.4.

Technologie PWR je obvykle složena z primárního okruhu, sekundárního okruhu a okruhu chladící vody. Mimo hlavní technologické části okruhu, které zajišťují plnění funkce daného okruhu, je dále okruh tvořen z pomocných systémů, jež napomáhají ke správné a bezpečné funkci daného okruhu. V této kapitole bude rozebrán zejména sekundární okruh. Dále bude zmíněn okruh chladící vody a pomocné systémy sekundárního okruhu.

Sekundární okruh je navržen podle toho, na jakou formu energie chceme přepracovat vstupní energii z paliva. U SMR lze přepracovat vstupní energii z paliva na elektrickou energii, teplo anebo na vodík. V této kapitole se budu zabývat přeměnou na elektrickou energii a na tepelnou energii (teplo). Výroba vodíku je s technologií PWR možná, ovšem je zde několik omezujících podmínek, kvůli kterým je nejistá realizace výroby vodíku s technologií PWR a zároveň v ČR není prozatím ani uvažováno s výrobou vodíku u prvních zprovozněných SMR. Proto v této práci nebude uvažováno s možností výroby vodíku. Omezující podmínkou je například

nízká teplota pracovní látky, kvůli které je relativně nízká účinnost přeměny tepelné energie na vodík oproti vysokoteplotní přeměně, což zvyšuje energetickou náročnost, a tedy i náklady celého procesu. Další omezující podmínkou je chybějící existence konkrétního plánu na rozvoj vodíkové infrastruktury v ČR, čímž není prozatím zřejmé v jakém množství a podobě bude vodík potřeba. Zároveň ani v MAF CZ není s využitím vodíku uvažováno, právě kvůli jeho nejistému uplatnění v blízkém časovém horizontu. Ovšem hlavní omezující podmínkou je nemožnost výstavby závodu produkující vodík v blízkosti jaderného zdroje, jehož výstavbu by nedovolila dnešní legislativa z důvodu nebezpečí výbuchu vodíku, a tedy vysoké míry ohrožení jaderného zdroje.

4.1 Technologické systémy sekundárního okruhu

Před samotným návrhem koncepcí sekundárního okruhu je nejprve potřeba popsat technologické systémy nacházející se právě v tomto okruhu a případně také jejich pomocné systémy.

4.1.1 Výměníky tepla

Výměník tepla je zařízení, které slouží k přenosu tepelné energie z teplejší látky do látky chladnější. Hlavními požadavky na výměníky jsou minimální rozměry, hmotnost, cena, tlaková ztráta a vysoká spolehlivost. Výměníky lze klasifikovat podle několika kritérií.

Nezákladnější rozdělení výměníků tepla je podle principu a to na:

- a) směšovací – při přenosu tepelné energie dochází ke směšování látek za vzniku homogenní směsi,
- b) rekuperační – teplonosné látky jsou od sebe odděleny nepropustnou teplosměnnou stěnou. Tyto výměníky lze dále rozdělit podle směru proudění látek na souproudé, protiproudé, křížové a smíšené. U jaderných elektráren se používá zejména tento typ výměníků, aby radioaktivní látky z primárního okruhu neunikaly do dalších částí elektrárny a do ovzduší,
- c) regenerační – teplonosné látky střídavě protékají vymezeným prostorem vyplněným hmotou, jež akumuluje tepelnou energii z teplejší látky a předává ji do látky chladnější.

Další rozdělení je podle účelu, a to například na:

- a) ohříváče (chladiče) – ohřívána (ochlazovaná) látka zvyšuje svoji teplotu beze změny fáze,
- b) výparníky a odparky – ohřívána kapalná látka se přeměňuje v páru,
- c) přehříváče/přihříváče – slouží k ohřevu mokré, syté či přehřáté páry,
- d) kondenzátory – látka v parní fázi kondenzuje na kapalnou fázi (kondenzát),
- e) odplyňovače – slouží k vylučování pohlcených plynů pomocí ohřevu vody k bodu varu. [28]

Dále lze výměníky rozdělit podle konstrukčního řešení teplosměnných ploch (bubnové, deskové, trubkové, žebrované...) nebo podle kombinace teplotních médií (voda/voda, voda/pára, pára/vzduch...).

Na tepelné výměníky, jež oddělují primární a sekundární okruh u jaderných zdrojů, jsou kladeny vysoké konstrukční požadavky, jelikož musí dokonale těsnit, aby nedošlo k úniku radioaktivních látek z primárního okruhu. Zároveň musí vydržet velmi vysoký tlak a vysoké hmotnostní průtoky teplotních látek, jelikož předávají poměrně vysoký tepelný výkon při poměrně nízkých teplotách.

Energetická (tepelná) bilance výměníku, jestliže uvažíme dvoulátkový výměník, ve kterém látka A předává tepelnou energii látce B, lze podle 1. věty termodynamické pro otevřené soustavy vyjádřit rovnicí:

$$\dot{Q}_A = \dot{Q}_B + \dot{Q}_Z, \quad (\text{kW}) \quad (4.1)$$

kde \dot{Q}_A je tepelný tok látky A (kW),

\dot{Q}_B je tepelný tok látky B (kW) a

\dot{Q}_Z je ztrátový tepelný tok (kW), tj. tepelný tok odvedený do okolí. [28]

Ztrátový tepelný tok lze vyjádřit účinností výměníku, která se pohybuje v rozmezí 0,98–0,999 a rovnici 4.1 lze zapsat ve tvaru:

$$\dot{Q}_A \cdot \eta_{TV} = \dot{Q}_B. \quad (\text{kW}) \quad (4.2)$$

V praxi lze ovšem účinnost výměníku η_{TV} (resp. ztráty) většinou zanedbat, a proto pro rovnici 4.2 platí:

$$\dot{Q}_A = \dot{Q}_B = \dot{Q}. \quad (\text{kW}) \quad (4.3)$$

Rovnici 4.3 lze dále rozepsat do tvaru:

$$\dot{m}_A(h_{A1} - h_{A2}) = \dot{m}_B(h_{B2} - h_{B1}), \quad (\text{kW}) \quad (4.4)$$

kde \dot{m}_A, \dot{m}_B jsou hmotnostní průtoky látky A a látky B ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

h_{A1}, h_{A2} jsou vstupní a výstupní entalpie látky A ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) a

h_{B1}, h_{B2} jsou vstupní a výstupní entalpie látky B ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$). [28]

Pokud nedochází k fázové přeměně látek, lze rovnici 4.4 napsat ve tvaru:

$$\dot{m}_A c_A (t_{A1} - t_{A2}) = \dot{m}_B c_B (t_{B2} - t_{B1}), \quad (\text{kW}) \quad (4.5)$$

kde c_A, c_B jsou měrné tepelné kapacity látky A a látky B ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

t_{A1}, t_{A2} jsou vstupní a výstupní teploty látky A ($^{\circ}\text{C}$) a

t_{B1}, t_{B2} jsou vstupní a výstupní teploty látky B ($^{\circ}\text{C}$). [28]

Pro vyjádření tepelného toku \dot{Q} přeneseného přes teplosměnnou stěnu o ploše S se využije tohoto vztahu:

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \Delta T_{STŘ}, \quad (\text{kW}) \quad (4.6)$$

kde k je součinitel prostupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) a

$\Delta T_{STŘ}$ je střední teplotní spád výměníku (K). [28]

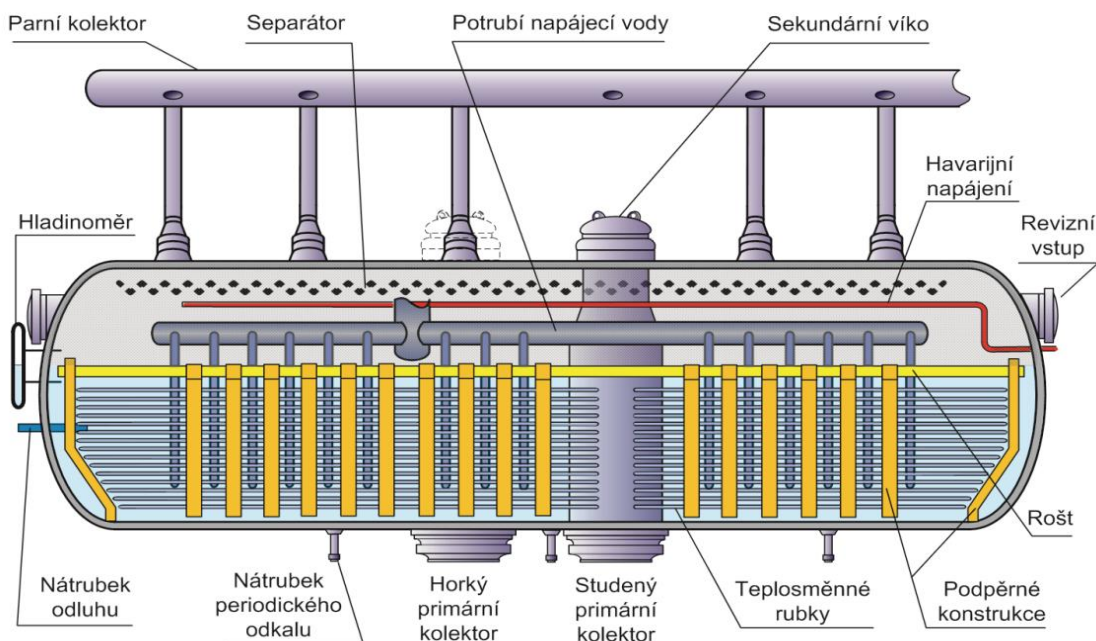
4.1.1.1 Parogenerátor

Parogenerátor (zkráceně „PG“) je rekuperační tepelný výměník, jež slouží k výrobě páry (resp. syté páry u reaktorů PWR) pomocí tepelné energie předané z teplejší látky. V jaderné elektrárně se obvykle nachází na rozhraní primárního a sekundárního okruhu, kde je pára pracovní látkou sekundárního okruhu a chladivo (voda) je teplonosnou látkou primárního okruhu, která předává svou tepelnou energii v parogenerátoru.

Parogenerátor je obvykle složen z nádoby (např. válcové), ve které se nachází vysoký počet teplosměnných trubek a další části. Parogenerátor může být jak vertikální, tak i horizontální konstrukce. Horizontální konstrukce má výhody například ve větší ploše hladiny vody a nedochází u ní ke strhávání kapek vody. Naproti tomu je nevýhodou potřeba využití větší plochy.

Teplosměnné trubky mají obvykle tvar lomeného U, průměr okolo 11–21 mm a tloušťku stěny okolo 1–1,5 mm. Nízká tloušťka stěny je velmi výhodná z hlediska odporu proti vedení tepla stěnou a z hlediska spotřeby materiálu. Materiál všech částí parogenerátoru musí být odolný proti korozi a zároveň musí být chemicky stabilní při kontaktu s teplotou látkou. Proto se používá například austenitická nerezavějící ocel. Teplotní látka o vyšším tlaku (až 17 MPa) většinou proudí uvnitř trubek, zatímco vně trubek proudí teplotní látka o tlaku nižším. Výhodou tohoto uspořádání teplotních látek je například nižší namáhání tělesa výměníku nebo větší prostor pro separaci vody ze syté páry, tj. separátoru, který se nachází přímo v nádobě parogenerátoru. [3]

Bližší popis horizontálního parogenerátoru o tepelném výkonu 750 MW je viditelný na obrázku 4.1. Průměr nádoby je 4 m, délka nádoby je 14,75 m, teplosměnná plocha je 6 115 m², počet trubek je 11 000 ks a průměr trubek je 16 mm. [14]



Obrázek 4.1 Schématické uspořádání parogenerátoru v JE Temelín [14]

4.1.1.2 Kondenzátor

Kondenzátor (zkráceně „K“) je rekuperační tepelný výměník, jež slouží ke kondenzaci látky v parní fázi na kapalnou fázi (tzv. kondenzát). Funkcí kondenzátoru je odvedení nízkopotenciální tepelné energie z tepelného oběhu za co nejmenšího tlaku a teploty kondenzátu. Čím nižšího tlaku v kondenzátoru je dosaženo, tím více se prodlouží expanze páry v turbíně, čímž dojde ke zvýšení práce turbíny a zvýšení tepelné účinnosti.

Součástí kondenzátoru je i vývěva, která má za úkol odsávat vzduch z kondenzátoru, jež se do něj dostal vlivem netěsností podtlakové části turbíny a kondenzátoru, protože přítomnost vzduchu zvyšuje celkový tlak a snižuje součinitel přestupu tepla k , resp. zhoršuje blánovou kondenzaci.

Kondenzátor je složen z válcové či hranaté nádoby, ve které se nachází trubkovnice s teplosměnnými trubkami. Teplosměnnými trubkami proudí chladící voda a na vnějším povrchu trubek kondenzuje pára na kondenzát. Kondenzát, který se hromadí ve spodní části kondenzátoru, je následně odváděn z kondenzátoru do oběhu. Kondenzátor má samoregulační vlastnost, jelikož při kondenzaci páry závisí teplota kondenzace na okamžitém tlaku páry. Teplosměnné trubky mají průměr okolo 20–28 mm a tloušťku stěny okolo 0,5–1 mm, jež je závislá na použitém materiálu. Délka trubek se běžně pohybuje okolo 4–6 m, ale u turbín vysokých výkonů může být délka i 10 m. Maximální rychlost vody v trubkách závisí na materiálu trubek a pohybuje se okolo $2\text{--}5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [14]

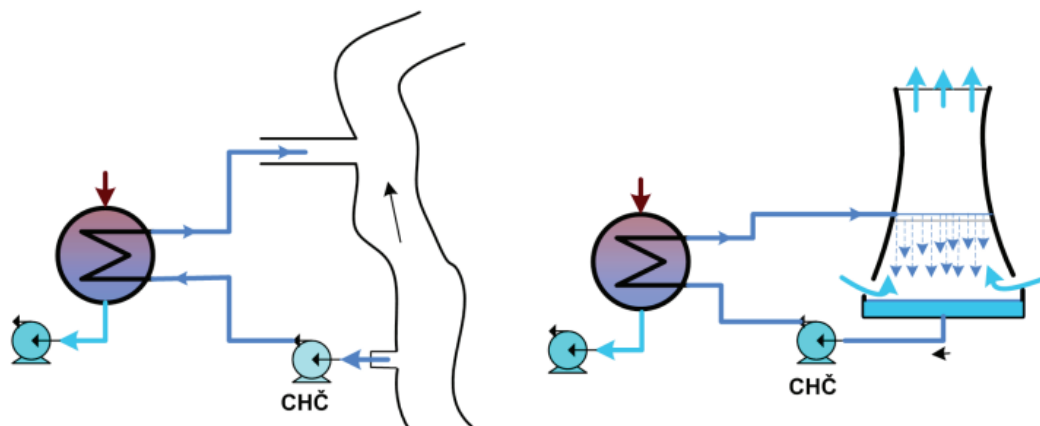
4.1.1.3 Regenerační ohříváče

Regenerační ohříváč může být rekuperační, anebo směšovací tepelný výměník, jež slouží k ohřevu kondenzátu či napájecí vody pomocí topné páry odebrané z turbíny po částečné expanzi. Cílem je využití kondenzačního tepla páry, jež by bylo bez užitku odvedeno v kondenzátoru. Tyto ohříváče mohou zvýšit tepelnou účinnost i o více než 10 %, v případě zapojení více ohříváčů do oběhu. Regenerační ohříváč, stejně jako kondenzátor, má samoregulační vlastnost. Výhodou při zavedení ohříváčů je snížení hmotnostního průtoku páry v nízkotlaké části turbíny, čímž se mohou snížit rozměry této části turbíny a také rozměry kondenzátoru. Dále díky menšímu odvedenému teplu v kondenzátoru se sníží spotřeba chladící vody.

Regenerační ohřívač je obvykle rekuperační trubkový výměník. Teplosměnnými trubkami proudí ohřívána napájecí voda a na vnějším povrchu trubek kondenzuje topná pára. Vzniklý topný kondenzát může být smíchán s napájecí vodou před či za ohřívačem, anebo je odveden do kondenzátoru. Směšovací výměníky, u kterých není tlakově oddělena ohřívací a ohřívána látka, se příliš nepoužívají, a to z důvodu obtížné regulovatelnosti, ačkoliv jsou termodynamicky výhodnější. [14]

4.1.1.4 Chladicí věž

Chladicí věž je směšovací nebo rekuperační tepelný výměník, jež slouží k předání tepelné energie z chladicí vody do okolního vzduchu. Nejjednodušší způsob chlazení je tzv. průtočné chlazení, ovšem k tomuto chlazení je potřeba řeka se stabilním a dostatečným průtokem vody. Zároveň dojde k oteplení vody o zhruba 10 °C, což by mohlo negativně ovlivnit ekosystém vodního zdroje. Proto se v podmínkách České republiky používá tzv. oběhové chlazení, kde se chladicí voda ohřátá v kondenzátoru ochlazuje v chladicí věži.



Obrázek 4.2 Princip průtočného a oběhového chlazení [14]

Chladicí věže lze rozdělit například podle způsobu předávání tepla mezi médi, a to na:

- suché chladicí věže – jedná se o rekuperační výměník, jež využívá pouze prostupu tepelné energie,
- mokré chladicí věže – jedná se o směšovací výměník, jež využívá prostupu tepelné energie a výparného chlazení,
- hybridní chladicí věže – kombinuje vlastnosti obou předchozích typů.

Dále lze chladicí věže rozdělit podle tahu věže (přirozený tah, nucený/ventilátorový tah). V místech, kde není dostatečná rozloha pro výstavbu velkých chladících věží s přirozeným tahem se mohou využít chladicí věže s ventilátory, které pomohou vytvořit potřebný proud vzduchu k dostatečnému chlazení. Nevýhodou ventilátorů jsou dodatečné investiční náklady a náklady na jejich provoz a údržbu.

V mokřích chladících věžích se chladicí voda rozstříkuje do vzduchu, jež vlivem komínového efektu proudí vzhůru, resp. na chladicí systém, který zvyšuje teplosměnnou plochu. Nevýhodou tohoto typu je poměrně velká ztráta chladicí vody vlivem odparu (přeměna chladicí vody na plynné skupenství) a únosu (ztráta chladicí vody ve formě kapiček odnesených proudem vzduchu). Odpar vytváří výrazný chladicí efekt, naproti tomu únos nevytváří žádný chladicí efekt. Proto je únos minimalizován pomocí tzv. eliminátorů, které snižují množství odnesených kapek. Ochlazená chladicí voda stéká do sběrné jímky na dně chladicí věže, ze které je následně dopravována chladicími čerpadly zpět do kondenzátoru.

Suché chladicí věže jsou vhodné do míst, kde je nedostatek vody. Jelikož u nich není ztráta odparem či únosem. Nevýhodou tohoto typu je potřeba větších teplosměnných ploch a v častých případech je potřeba využívat i ventilátor. Dále jsou u tohoto typu větší teplotní rozdíly mezi teplotou kondenzace páry a teplotou vstupujícího chladícího vzduchu do chladicí věže a to okolo 25–35 °C (u mokré chladicí věže je to okolo 13 °C), díky čemuž je v kondenzátorech vyšší tlak, což snižuje výkon, resp. entalpický spád, turbíny.

Hybridní chladicí věží je například tzv. Hellerův systém. Tento systém obsahuje vstřikový kondenzátor, ve kterém dochází rozstříkáním chladicí vody ke kondenzaci páry z turbíny. Následně se kondenzát páry společně se vstřikovanou chladicí vodou dopravuje chladícím čerpadlem do rekuperačních výměníků umístěných v suché chladicí věži, ve které se ochlazuje proudícím vzduchem. Zároveň je tímto čerpadlem dopravována tato vodní směs jako napájecí voda do parogenerátoru. Množství napájecí vody odpovídá asi jen 2 % z celkového množství obíhající vodní směsi. Chladicí čerpadlo zvyšuje tlak této vodní směsi nad tlak atmosférický, aby se v případě netěsností do chladicí vody nedostal vzduch. V kondenzátoru je potřeba mnohem nižší tlak, než je atmosférický, a proto je za

rekuperačními výměníky zařazena turbína, jež snižuje tlak vodní směsi a získanou energii využívá k pohonu chladicího čerpadla, jako pomoc elektromotoru čerpadla. Z turbíny je následně vodní směs jako chladící voda dopravována do trysek ve vstřikovacím kondenzátoru a cyklus se opakuje. [22]

Při výpočtu se standardně uvažuje s relativní vlhkostí vzduchu $\varphi = 70\%$ a s teplotou vzduchu $t_{vz} = 15\text{ }^\circ\text{C}$. Výpočet množství vody $\dot{m}_{chl,d}$, které je potřeba doplňovat do okruhu chladící vody vlivem ztrát u mokré chladící věže, lze vyjádřit rovnicí:

$$\dot{m}_{chl,d} = \dot{m}_{chl,un} + \dot{m}_{chl,odp}, \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (4.7)$$

kde $\dot{m}_{chl,un}$ je hmotnostní průtok vody ztracené únosem, jež u mokrých chladících věží s eliminátory činí okolo $0,1\%$ \dot{m}_{chl} ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

$\dot{m}_{chl,odp}$ je hmotnostní průtok vody ztracené odparem ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

Hmotnostní tok vody ztracené odparem $\dot{m}_{chl,odp}$ lze vypočítat úpravou této energetické bilance:

$$\dot{m}_{chl,odp}(h_{pvz} - h_{vvz}) = \dot{m}_{chl} \cdot c_w(T_{chlT} - T_{chIS}), \quad (\text{kW}) \quad (4.8)$$

kde h_{pvz}, h_{vvz} je entalpie páry a vody při teplotě dané teplotou páry unikající z věže ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

\dot{m}_{chl} je hmotnostní průtok chladící vody ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

c_w je měrná tepelná kapacita vody ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

T_{chIS}, T_{chlT} je vstupní a výstupní teplota chladící vody v kondenzátoru ($^\circ\text{C}$). [7]

4.1.1.5 Další výměníky tepla

Mezi další výměníky tepla užívané v sekundárním okruhu patří separátor, přehříváč a napájecí nádrž s odplyňovačem. V separátoru dochází k odloučení vlhkosti z pracovní páry vycházející z vysokotlakého dílu parní turbíny. Následně tato pára proudí do přehříváče, kde dochází k přehřátí této pracovní páry nad mez sytosti pomocí páry odebrané před parní turbínou. Z přehříváče pára proudí do nízkotlakého dílu parní turbíny.

Odplyňovač slouží k odstranění všech plynů (zvláště pak kyslíku a CO₂) z kondenzátu za účelem zvýšení účinnosti parního cyklu a ochrany proti korozi. Do odplyňovače vstupuje nejenom kondenzát z kondenzátoru, resp. z nízkotlakých ohříváčů, ale i z dalších částí sekundárního okruhu (kondenzát z vysokotlaké regenerace, ze separátoru či z odluhu parogenerátoru...). Z odplyňovače jde odplyněný kondenzát do napájecí nádrže. Napájecí nádrž slouží jako zásobník napájecí vody pro napájení parogenerátoru díky čemuž i v případě výpadku kondenzátních čerpadel je možno provozovat blok na nominálním výkonu po určitý čas. Tento získaný čas umožňuje provádět nápravná opatření, jež napomůžou udržení bloku v provozu, aniž by se musel odstavit.

4.1.2 Parní turbíny

Parní turbína slouží k přeměně tepelné energie na mechanickou, jež se následně pomocí hřídele přenesou na generátor, ve kterém dochází k přeměně mechanické energie na elektrickou.

Parní turbíny lze rozdělit podle tlaku za posledním stupněm na:

- a) Kondenzační – výstupní pára při nízkém tlaku (cca 4–5 kPa) kondenzuje v kondenzátoru. Tlak v kondenzátoru závisí na teplotě chladicí vody na vstupu do kondenzátoru. Kondenzační turbína je nejčastější typ turbín užívaných v elektrárnách, jelikož dosahuje vyššího entalpického spádu, a tedy stejné množství páry vyrobí více elektrické energie než u protitlaké turbíny. Kondenzační turbíny se pohybují ve výkonové řadě okolo 100 až 1 000 MW.
- b) Protitlaké – tlak na výstupu z turbíny je vyšší než tlak atmosférický a v parním cyklu není obsažen kondenzátor, jelikož je pára dále využita odběratelem. Velikost tlaku na výstupu se volí podle potřeb odběratele páry z protitlaku. Pro účely vytápění se volí tlak okolo 0,07 až 0,25 MPa a pro průmyslové účely se volí tlak až do 0,7 MPa. Nevýhodou tohoto typu je přímá závislost výroby elektrické energie na množství odebírané páry (dodávce tepla) a proto se volí tento typ turbíny tam, kde je zaručen celoroční odběr výstupní páry.

- c) S regulovaným odběrem páry – dovoluje současnou dodávku elektrické energie a tepla. Tento typ turbín spojuje výhody kondenzačních a protitlakých turbín, jelikož do určité míry odstraňuje závislost výroby elektrické energie na dodávce tepla.

Další rozdělení je podle principu přeměny energie na:

- a) Rovnotlaké turbíny – tlak před a za oběžnými lopatkami je stejný a expanze probíhá pouze v rozváděcích lopatkách. Rozváděcí lopatky jsou uloženy v rozváděcím kole a oběžné lopatky jsou uchyceny na disku, se kterým tvoří oběžné kolo.
- b) Přetlakové turbíny – tlak za oběžným kolem je nižší než tlak před ním a expanze probíhá v rozváděcích i oběžných lopatkách. Rozváděcí lopatky jsou uloženy přímo do tělesa turbíny a oběžné lopatky jsou uloženy v rotoru bubnového provedení.

Dále lze parní turbíny rozdělit podle počtu stupňů (jedno/víceступňové) nebo podle parametrů páry na vstupu do turbíny (s přehřátou/sytou párou).

Víceступňové turbíny se navrhují u velkých výkonů v závislosti na velikosti tepelného spádu turbíny tak, aby bylo dosaženo maximální účinnosti turbíny. Jednostupňová turbína hospodárně zpracovává tepelný spád cca do $500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Jednotlivé stupně turbíny se volí právě s ohledem na přiměřenou obvodovou rychlost u tak, aby byl zachován optimální podíl, mezi obvodovou rychlostí u a absolutní rychlostí c_1 , při němž se dosahuje maximální účinnosti stupně.

Turbíny lze regulovat škrcením, skupinovou regulací či regulací klouzavým tlakem. U regulace škrcením dochází ke změně tlaku páry vstupující do turbíny, resp. dojde ke změně tepelného spádu turbíny. Jedná se o kvalitativní regulaci, jelikož při ní dochází k nevratným ztrátám energie, čímž dochází ke snížení účinnosti. Výhodou regulace je její jednoduchost a rychlost. ^[48]

Dalším typem regulace je skupinová (dýzová) regulace, u které dochází ke změně hmotnostního toku, resp. ke změně průtočného průřezu, pomocí otevírání/zavírání regulačních ventilů u dýz. Jedná se o kvantitativní regulaci. Výhodou regulace je možnost dlouhodobého provozu při částečných výkonech

s přijatelnou účinností. Nevýhodou je nerovnoměrné pevnostní namáhání z důvodu částečného ostříku oběžného kola.

Posledním typem je regulace klouzavým tlakem, u které je změna hmotnostního toku zajištěna změnou tlaku napájecího čerpadla, resp. změnou jeho příkonu. Tato regulace je výhodná u velkých bloků s téměř stabilním výkonem. Nevýhodou je pomalá rychlost regulace, jelikož je třeba zohlednit setrvačnost parogenerátoru.

U protitlakých turbín je nutné udržet konstantní výstupní tlak z turbíny, jež má vliv na množství a kvalitu odběrové páry, při proměnném odběru hmotnostního toku páry odběratelem. Regulace se provádí ovládáním regulačního ventilu na vstupu do protitlaké turbíny. U turbín s regulovaným odběrem páry je při regulaci nutné zajistit, aby při změně hmotnostního toku odběrové páry byl zachován konstantní svorkový výkon na generátoru a zároveň konstantní tlak odběrové páry. Dále při změně svorkového výkonu na generátoru musí být zachován konstantní hmotnostní tok odběrové páry a zároveň konstantní tlak odběrové páry. Nezbytnou součástí parních turbín jsou i jejich ochrany. Mezi ochrany turbíny se řadí například rychlostní regulátor, ochrana proti poklesu tlaku oleje pro mazání ložisek rotoru, ochrana proti nedovolenému axiálnímu posuvu rotoru či ochrana proti ztrátě vakua v kondenzátoru. V případě působení ochran se spouští regulační ventil a v krajním případě i rychlouzavírací ventil, který okamžitě uzavře přívod páry do turbíny.

V jaderných elektrárnách se užívají převážně parní turbíny na sytou páru, jež má tlak okolo 4–7 MPa a teplotu okolo 250–290 °C na vstupu do turbíny. Při expanzi se snižuje suchost páry, jež by neměla klesnout pod 0,86–0,88, jinak vznikající kapičky kondenzátu naráží do lopatek a způsobují erozi náběžných hran lopatek. Proto se turbína obvykle rozděluje na vysokotlaký (zkráceně „VT“) a nízkotlaký (zkráceně „NT“) díl, kdy po expanzi ve VT dílu, než započne další expanzi v NT dílu, se pára zbavuje vlhkosti v separátoru. Mezní výkon turbíny, který může protéct jedním dílem, resp. jedním výstupem páry do kondenzátoru, činí u dnešních elektráren zhruba 150–200 MW. Pokud je výkon turbíny větší, tak je třeba rozdělit proud páry do více nízkotlakých těles (např. JE Temelín má 3 NT díly). Parní turbíny v jaderných elektrárnách o velkých výkonech pracují obvykle s otáčkami 1 500 min⁻¹ nebo s 3 000 min⁻¹.^[48]

Výkon na svorkách generátoru P_G se určí ze vztahu:

$$P_G = \dot{m} \cdot \Delta h_{is} \cdot \eta_{td,t} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_g, \quad (\text{kW}) \quad (4.9)$$

kde \dot{m} je hmotnostní průtok páry procházející turbínou ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

Δh_{is} je rozdíl entalpií páry na vstupu a na výstupu z turbíny ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

$\eta_{td,t}$ je termodynamická účinnost turbíny a je rovna 0,75 až 0,85 (-),

η_{mech} je mechanická účinnost turbíny a je rovna 0,98 až 0,995 (-),

η_g je účinnost generátoru a je rovna 0,98 až 0,99 (-).

V případě, že se v turbíně nachází další odběry páry, například pro regenerační ohřev kondenzátu, je potřeba zahrnout jejich vliv na P_G .^[48]

V parních turbínách neprobíhá ideální adiabatická expanze, jelikož při expanzi v reálné tekutině dochází k nevratnému přírůstku entropie (ztrátám). Tato nevratná adiabatická expanze v turbíně je charakterizována termodynamickou účinností turbíny $\eta_{td,t}$, jež se určí ze vztahu:

$$\eta_{td,t} = \frac{h_a - h_{e'}}{h_a - h_e}, \quad (-) \quad (4.10)$$

kde h_a je entalpie páry na vstupu do turbíny ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

$h_{e'}$ je entalpie páry na výstupu z turbíny při nedokonalé (nevratné) expanzi ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),

h_e je entalpie páry na výstupu z turbíny při ideální expanzi ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

4.1.3 Generátor

Generátor je točivý elektromechanický stroj, jež přeměňuje mechanickou energii získanou v turbíně na energii elektrickou. Mechanická energie rotoru je přenesena elektromagnetickou indukcí do vinutí statoru, ve kterém se indukují střídavé napětí. Generátory indukující střídavé napětí se označují jako alternátory a generátory stejnosměrného napětí se označují jako dynama. Generátory se vyrábějí v řádu jednotek wattů až po tisíce megawattů.

V jaderných elektrárnách se nejčastěji využívají třífázové synchronní generátory s hladkým rotorem o výkonech stovek megawattů, tzv. turbogenerátory. U takto vysokých výkonů je rotor generátoru chlazen pomocí přetlakového vodíku procházejícím dutými vodiči a stator generátoru je chlazen pomocí demineralizované vody. Generátor je obvykle s turbínou na společné hřídeli, aby se nemuselo využívat převodového stupně. Proto se turbína otáčí stejnou rychlostí jako generátor a rychlost generátoru závisí na počtu pólů rotoru. Při frekvenci sítě 50 Hz se dvupólový rotor otáčí rychlostí $3\,000\text{ min}^{-1}$, kdežto čtyřpólový rotor se otáčí rychlostí $1\,500\text{ min}^{-1}$. U generátorů s velmi vysokým výkonem (např. 1 000 MW) se obvykle volí čtyřpólový rotor z důvodu menšího působení odstředivých sil na lopatky turbíny oproti dvupólovému rotoru a omezení mechanické pevnosti rotoru.

Jmenovité napětí se volí s ohledem na jmenovitý proud, parametry izolace a podobně. Například pro generátor o výkonu 1 000 MW se volí jmenovité napětí o hodnotě 24 kV, u generátorů o výkonu 200 až 500 MW se volí hodnota 15,75 kV, u generátorů menších výkonů se volí hodnoty 13,8 kV, 10,5 kV anebo 6,3 kV. Jmenovitý proud u generátoru o výkonu 1 000 MW dosahuje hodnoty až 27 kA. Účinnost generátoru se pohybuje okolo 0,98 až 0,99. ^[10]

4.1.4 Čerpadla

Čerpadla jsou nezbytnou součástí každé jaderné elektrárny. Mezi nejdůležitější čerpadla v jaderné elektrárně patří hlavní cirkulační čerpadlo, napájecí čerpadlo, kondenzátní čerpadlo a chladicí čerpadlo. Kromě výše uvedených čerpadel se samozřejmě v jaderné elektrárně nachází mnoho dalších pomocných čerpadel dopravujících chladicí vodu do strojních zařízení, oleje, chemické roztoky a jiné. Hlavní cirkulační čerpadlo slouží k dopravě chladiva z parogenerátoru do reaktoru. Napájecí čerpadla slouží k dopravě napájecí vody z napájecí nádrže do parogenerátoru. Kondenzátní čerpadlo slouží k dopravě kondenzátu z kondenzátoru do napájecí nádrže, resp. do regeneračního ohříváče. Chladicí čerpadlo slouží k dopravě chladicí vody z chladicí věže do kondenzátoru. Používá se zapojení několika čerpadel dohromady (např. 2 + 1), zejména k zajištění dostatečného proudění kapaliny v případě poruchy některého z čerpadel, a také

z důvodu vysokého přenášeného množství kapaliny, jež by samotným čerpadlem nebylo možné realizovat.

U jaderných elektráren typu PWR je používají nejčastěji mechanická, resp. odstředivá, čerpadla převážně radiálního typu. Čerpadlo může být poháněno elektromotorem anebo také parní turbínou, jež využívá páru ze sekundárního okruhu k pohonu turbíny. V případě poruchy v dodávce páry ze sekundárního okruhu může být jako zdroj páry využita vnější nezávislá parní kotelná, anebo sekundární okruh dalšího jaderného bloku. Turbonapáječka, jež je poháněna parní turbínou, se využívá hlavně u čerpadel vysokých výkonů (vyšší jednotky megawatt). V případě poruchy turbonapáječky při havárii anebo při najíždění elektrárny (v době kdy není produkována žádná pára) je obvykle místo turbonapáječky využito pomocných napájecích čerpadel, jež jsou poháněna elektromotorem.

Odstředivá čerpadla lze rozdělit na zapouzdřená čerpadla a na čerpadla s těsněním hřídele. Zapouzdřená čerpadla mají elektromotor spolu s čerpadlem uložený v hermetickém tlakovém pouzdru, čímž nedochází k úniku dopravovaného média. Čerpadla s těsněním hřídele mají elektromotor vně tlakového pouzdra a v pouzdře se nachází pouze čerpadlo, jež se spojeno s elektromotorem hřídelí, která má na sobě těsnění zabraňující úniku dopravovaného média. Čerpadla s těsněním hřídele mají nižší investiční náklady, jednodušší údržbu, vyšší účinnost a nižší hmotnost oproti zapouzdřeným čerpadlům. Zároveň lze umístit na hřídel setrvačníky, jež zajistí dostatečně dlouhý doběh čerpadla (až 100 s) v případě výpadku elektromotoru, kdežto u odstředivých čerpadel setrvačníky zajistí doběh pouze na cca 5 s.

U čerpadel se nachází spousta pomocných systémů zajišťující například kontrolu těsnění, mazání a chlazení čerpadla. [3]

Příkon čerpadla se vypočítá ze vztahu:

$$P = \frac{\dot{m}}{\eta} \left(H \cdot g + \frac{p_v - p_s}{\rho} + \frac{w_v^2 - w_s^2}{2} \right), \quad (\text{kW}) \quad (4.11)$$

kde \dot{m} je hmotnostní průtok kapaliny proudící čerpadlem ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),

η je účinnost čerpadla (-),

H je výtlak čerpadla (m),

g je tíhové zrychlení ($m \cdot s^{-2}$),

p_s, p_v je tlak ve vstupním a výstupním průřezu čerpadla (Pa),

ρ je hustota kapaliny v čerpadle ($kg \cdot m^{-3}$),

w_s, w_v je rychlost kapaliny ve vstupním a výstupním průřezu čerpadla ($m \cdot s^{-1}$). [22]

U čerpadel, stejně jako u parních turbín, dochází k disipaci energie, resp. k nevratnému nárůstu entropie. K disipaci energie dochází například vlivem ztrát třením či netěsnostmi. Tato nevratná adiabatická komprese je charakterizována termodynamickou účinností čerpadla $\eta_{td,čerp}$, jež se určí ze vztahu:

$$\eta_{td,čerp} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2'}}, \quad (-) \quad (4.12)$$

kde h_1 je entalpie vody na vstupu do čerpadla ($kJ \cdot kg^{-1}$),

h_2 je entalpie vody na výstupu z čerpadla při nedokonalé (nevratné) kompresi ($kJ \cdot kg^{-1}$),

$h_{2'}$ je entalpie vody na výstupu z čerpadla při ideální kompresi ($kJ \cdot kg^{-1}$). [48]

4.1.5 Potrubí a armatury

Další nezbytnou částí sekundárního okruhu jsou potrubí a armatury. Potrubí lze rozdělit podle několika hledisek, a to například podle tekutiny proudící potrubím (vodní, parní, olejové...), účelu (sací, výtlačné, chladící...) nebo podle pracovního tlaku (nízko/středo/vysokotlaké). Potrubí se obvykle skládá z trubek různých dimenzí, spojů trubek, uzavírek (ventily), tvarovek (ohyby a kolena), kompenzátorů, uložení potrubí (podpěry a závěsy), ochranného pláště, tepelné izolace, pojistných a bezpečnostních zařízení. V jaderných elektrárnách se nachází zejména svařované nebo přírubové spoje, jelikož jsou na potrubí kladeny vysoké požadavky, a to zejména na těsnost. Kompenzátory slouží pro vyrovnání tepelné dilatace potrubí způsobené změnou jeho teploty. Dimenze potrubí se stanovuje

zejména s ohledem na maximální pracovní přetlak a maximální pracovní teplotu média proudícího v potrubí.

Tepelná izolace se instaluje u potrubí, ve kterém je teplota proudící látky potrubím vyšší než 45 °C. Tepelná izolace by měla mít součinitele tepelné vodivosti $\lambda < 0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a lze užít například tepelnou izolaci z minerální vlny. Na povrch izolace se obvykle přidává ochranný plášť (hliníkový plech), jež slouží k ochraně izolace proti mechanickému poškození a vlhkosti. Tepelné ztráty potrubí v sekundárním okruhu lze obvykle zanedbat, jelikož je potrubí velmi dobře zaizolováno.

Parní potrubí v sekundárním okruhu jaderných elektráren patří mezi nejnáročnější, jelikož sytá pára má nižší parametry oproti přehřáté páře, jež se užívá v jiných elektrárnách. Kvůli tomuto je potřeba zhruba dvojnásobného množství syté páry oproti cyklům s přehřátou párou. Z toho důvodu je potřeba potrubí o velké dimenzi, jež může narazit na výrobní limity, a proto se často používá paralelního zapojení potrubí.

Armatury slouží k regulaci proudění pracovních látek jak v potrubí, tak i v nádobách a v jiných zařízeních. Lze je rozdělit podle funkčního určení na uzavírací, regulační, rozdělovací, pojistné, bezpečnostní a pro rozdělení fází. Uzavírací armatury slouží k úplnému přerušování proudění pracovní látky a v jaderné elektrárně činí asi 80 % všech armatur. Pojistné armatury zabraňují havarijnímu zvýšení tlaku vypuštěním přebytečného množství pracovní látky. Armatury pro rozdělení fází slouží k samočinnému rozdělení fází pracovní látek (vody, páry) a patří mezi ně například odvaděče kondenzátu. [22]

4.1.6 Pomocné systémy

Pomocné systémy jsou nedílnou součástí všech hlavních technologických systémů, protože jim napomáhají ke správné funkci a k zajištění bezpečnosti jak při normálním provozu, tak i za havarijní situace. Pomocné systémy zajišťují například hospodaření s mazacím olejem, chlazení tepelně namáhaných strojů, potřebnou čistotu a úpravu vody v sekundárním okruhu a další. Pomocné systémy se také podílí na kontrolní a regulační činnosti jednotlivých systémů. Některé pomocné systémy jsou blíže popsány níže v této kapitole.

4.1.6.1 Pomocné systémy parní turbíny a generátoru

System olejového hospodářství zajišťuje dodávku mazacího oleje pro mazání a chlazení ložisek turbosoustrojí, odvod tepla z otepleného oleje, kontinuální čištění oleje, průběžné doplňování oleje a další.

System plynového a vodního hospodářství zajišťuje zejména chlazení rotoru, statorového vinutí a budícího vinutí generátoru. Dále zajišťuje potřebnou čistotu, doplňování a odvod tepla z chladícího média do okruhu chlazení. K chlazení rotoru se používá vodík a k chlazení statorového vinutí se používá demineralizovaná voda. Mezi tento systém a okruh chlazení bývá vložen meziokruh, jež má zabránit průniku „znečištěné“ cirkulační chladící vody do systému náročného na čistotu.

System ucpávek zajišťuje zejména utěsnění pracovního prostoru turbíny od vnějšího prostředí pomocí labyrintových ucpávek, utěsnění os armatur a jiné. U VT dílu slouží k zamezení úniku páry z turbíny a u NT dílu slouží k zamezení nasátí vzduchu do pracovního prostoru turbíny.

Regulační a zabezpečovací systém zajišťuje zejména regulaci výkonu generátoru, resp. turbíny a bezpečné odstavení a najetí částí sekundárního okruhu. Do tohoto systému patří i otáčecí zařízení, umístěné na společné hřídeli, které slouží k rovnoměrnému dochlazení parní turbíny, dokud teplota na VT dílu neklesne pod 100 °C. Otáčecí zařízení se připojuje při snížení otáček na 26 min⁻¹. Toto zařízení slouží i k rozehrátí turbíny při najíždění bloku.

System neregulovaných odběrů slouží k dodávce páry do vybraných spotřebičů (přihříváč, NTO, VTO...), jež napomáhají ke zvýšení tepelné účinnosti parního cyklu.

System odvodu kondenzátu zajišťuje odvod kondenzátu z pracovního prostoru parní turbíny, aby se zamezilo erozi lopatek působením kapiček kondenzátu. ^[59]

4.1.6.2 Chemická úprava vody

Chemická úprava vody (zkráceně „CHÚV“) slouží k čištění vody, jež je následně dodávána do primárního okruhu, sekundárního okruhu anebo do jiných horkovodních systémů, a to například z důvodu krytí ztrát způsobených netěsnostmi. Surová voda je nejprve hrubě předčištěna, následuje čiření a filtrace. Následně je voda zbavena ideálně všech iontově rozpustných látek a křemíku, jež

by mohly způsobovat korozi nebo nežádoucí chemickou reakci s konstrukčním materiálem prvků v daných systémech. Takto vzniká demineralizovaná voda do níž se v případě potřeby dávkuje dalších chemické sloučeniny sloužící k udržení žádaných parametrů v daném prostředí. Například je demineralizovaná voda doplňována do sekundárního okruhu u kondenzátoru pomocí pomocných kondenzátních čerpadel.

S úpravou vody také souvisí bloková úprava kondenzátu (zkráceně „BÚK“), jež slouží k vyčištění demineralizované vody sekundárního okruhu, před najetím bloku, od usazenin a vzniklých korozních produktů. BÚK se obvykle nachází u kondenzátního čerpadla. V tomto místě dochází i k dávkování amoniaku pro udržení předepsaného pH nebo hydrazinu v případě objevení kyslíku. [49]

4.1.6.3 Pomocný systém kondenzace

Tento systém zajišťuje další činnosti, které se vážou ke kondenzátoru a k samotné kondenzaci. Jedná se například o zajištění udržování čistoty teplosměnných ploch kondenzátorů, aby nebyla snížena maximální účinnost přestupu tepla teplosměnnou plochou, pomocí systému TAPROGGE. Tento systém dávkuje kuličky z molitanu do chladicí vody, které následně prochází trubičkami a čistí je zevnitř.

Pomocný systém zajišťuje také sběr pomocných kondenzátů vzniklých v jiných zařízeních a jejich vracení do sekundárního okruhu. Dále je zde systém vodoproudých vývěv zajišťující odsávání parovzdušné směsi z kondenzátoru do atmosféry tak, aby byl udržen nízký tlak v kondenzátoru. K tomuto pomocnému systému náleží také bloková úprava kondenzátu a dávkování amoniaku či hydrazinu. [59]

4.2 Uspořádání sekundárního okruhu SMR pro výrobu tepelné energie

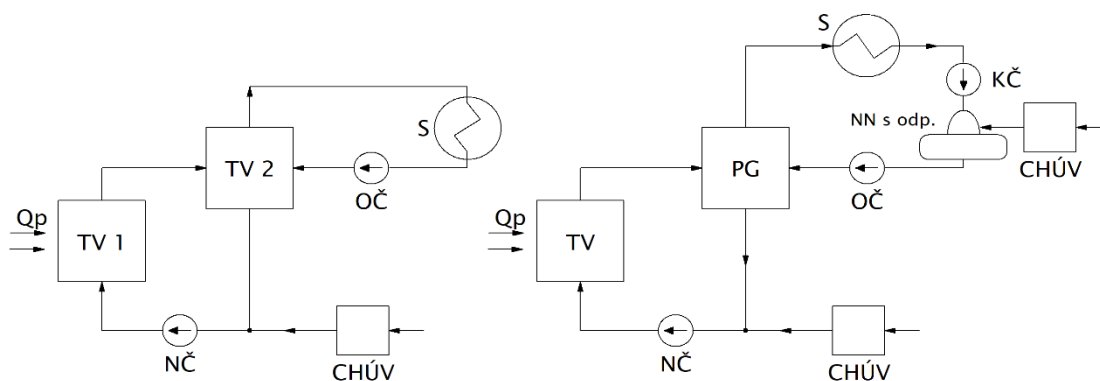
Jednou z možností využití SMR je ve výrobě tepelné energie (dále také „tepla“), jelikož je v České republice rozsáhlá soustava zásobování tepelnou energií (tzv. dálkové vytápění), jež dopravuje tepelnou energii zejména do domácností, průmyslu a terciálního sektoru služeb. Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, tak uhelné zdroje, které by měly být v následujících letech postupně odstaveny, se podílí na výrobě tepla ze 47 % a zdroje na zemní plyn, jež se považují pouze za

přechodné zdroje k bezemisní energetice, se podílí na výrobě tepla z 21 %. Jestliže by SMR sloužil pouze k dodávce tepla, tak by se označoval za tzv. výtopnu, resp. jadernou výtopnu. [18]

Z tepelného zdroje (výtopny) je teplo dopravováno tepelnou sítí přímo k odběrateli anebo do předávací stanice, jež upraví výstupní teplotnosné médium na vhodné parametry tak, aby mohlo být užito odběratelem. Teplo je dopravováno:

- a) Teplovodem – teplotnosné médium je voda s maximální teplotou do 110 °C a tlakem do 1,6 MPa. Pro dopravu tepla přímo ke spotřebiteli, bez užití předávací stanice, může být teplota vody snížena na 95 °C a tlak na 0,6 MPa. Teplovody se využívají pouze na malé vzdálenosti z důvodu poměrně vysokých ztrát.
- b) Horkovodem – teplotnosné médium je voda s maximální teplotou do 180 °C a tlakem do 2,5 MPa. K dopravě horké vody je potřeba oběhových čerpadel. Horkovody se využívají na velké vzdálenosti (až desítky kilometrů).
- c) Parovodem – teplotnosné médium je pára (sytá nebo přehřátá) s maximální teplotou do 240 °C a tlakem do 1,8 MPa. Díky tlakové energii páry je zajištěno proudění páry v potrubí. Parovody se využívají na velké vzdálenosti.

V České republice se využívá nejvíce horkovody a zároveň mají spolu s teplovody vyšší akumulační schopnost oproti parovodům. Na druhou stranu parovody nepotřebují přečerpávací stanice, jež kryjí tlakové ztráty, a mají velký měrný výkon. Na následujícím obrázku je zobrazeno zjednodušené schéma horkovodní a parní výtopny. [15]



Obrázek 4.3 Zjednodušené schéma horkovodní a parní výtopny

Horkovodní výtopna užívá horkou vodu jako teplotnosné médium v tepelné síti. Primární okruh je od tepelné sítě oddělen sekundárním okruhem z důvodu snížení rizika nebezpečí úniku radioaktivních látek právě do tepelné sítě. Nejprve je přijata tepelná energie z primárního okruhu Q_p v tepelném výměníku č. 1 (TV 1), která je následně předána teplotnosnému médiu sekundárního okruhu (demineralizovaná voda). Teplotnosným médiem primárního okruhu, resp. chladičem, je také demineralizovaná voda, která se následně z TV 1 vrací zpět do reaktoru. Teplotnosné médium sekundárního okruhu následně proudí do tepelného výměníku č. 2 (TV 2), jež předává tepelnou energii ze sekundárního okruhu do tepelné sítě. Tepelnou sítí proudí horká voda až ke spotřebiteli (S) či do předávací stanice a poté se vrací zpět do TV 2 pomocí oběhového čerpadla (OČ). Dále se voda sekundárního okruhu vrací zpět do TV 1 pomocí napájecího čerpadla (NČ). Chemická úprava vody (CHÚV) se nachází před NČ a slouží k doplňování vody do sekundárního okruhu. V okruhu se může také nacházet kompenzátor objemu pro lepší udržení zadaných parametrů či k rychlému doplnění sekundárního média v případě havárie v sekundárním okruhu.

Parní výtopna užívá sytou páru jako teplotnosné médium v tepelné síti. Schéma je podobné horkovodní výtopně s tím rozdílem, že teplotnosné médium sekundárního okruhu proudí z tepelného výměníku (TV) do parogenerátoru (PG), který předává tepelnou energii ze sekundárního okruhu do tepelné sítě a vyrábí sytou páru. Tepelnou sítí proudí sytá pára až ke spotřebiteli (S) či do předávací stanice, kde předá svoji energii a z kondenzuje na tzv. kondenzát. Následně je kondenzát čerpán kondenzátním čerpadlem (KČ) do napájecí nádrže s odplyňovačem (NN s odp.). Z napájecí nádrže je čerpána napájecí voda znovu do PG pomocí oběhového čerpadla (OČ). Do napájecí nádrže také ústí potrubí z chemické úpravy vody (CHÚV) pro tepelnou síť. V obou koncepcích se samozřejmě dále nachází další dílčí části jako například regulační ventily, olejové hospodářství a jiné. Bližší popis jednotlivých částí sekundárního okruhu je uveden v kapitole 4.1.

Výtopny mají velmi vysokou tepelnou účinnost (více než 95 %), jelikož ztráty v tepelných výměnících, potrubí, čerpadlech a ostatních částech sekundárního okruhu jsou velmi malé či zanedbatelné.

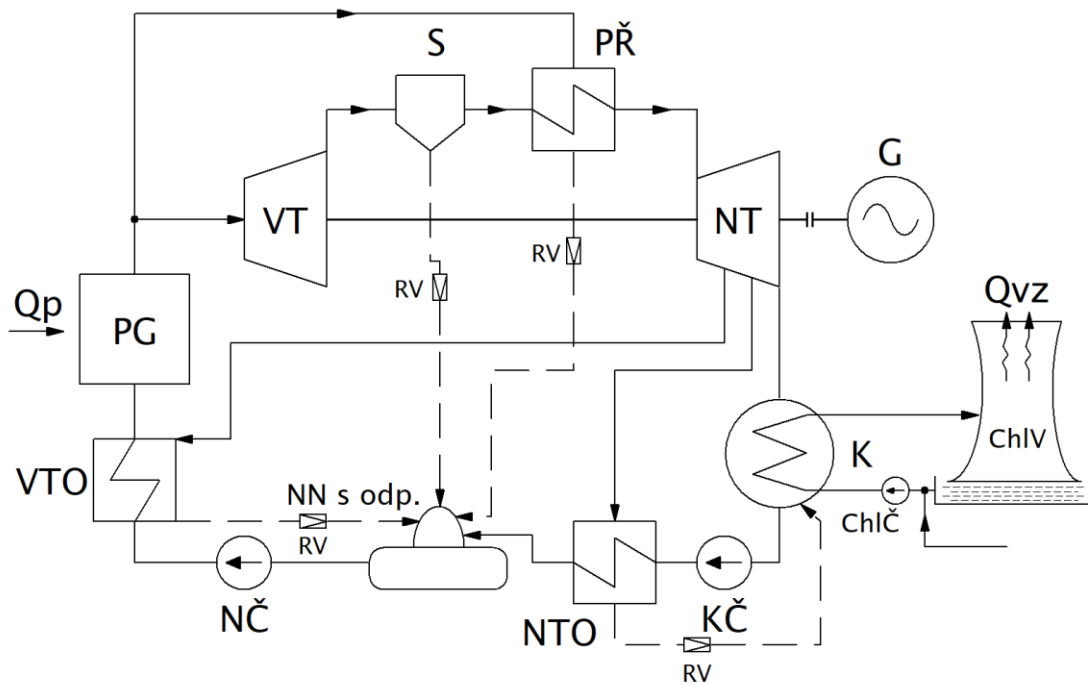
Výhodou oproti teplárně, která slouží k dodávce tepelné i elektrické energii, je jednodušší konstrukce sekundárního okruhu spolu s nižšími investičními náklady. Velkou nevýhodou výtopny je sezonní změna odebíraného množství tepla, jelikož dálkové vytápění slouží zejména k dodávce tepla na vytápění v zimním období. Například průmysl sníží spotřebu tepla v létě oproti zimě o cca 60 % a domácnosti spolu s terciálním sektorem služeb o více než 80 %. Tato sezonní změna je pro SMR velmi negativní, jelikož výstavba SMR je velice nákladná a z důvodu co nejrychlejší návratnosti investice je vhodné SMR provozovat téměř bez přerušování provozu a za nominálního výkonu, tj. bez sezonního snižování výkonu reaktoru. ^[18]

S ohledem na výše uvedenou skutečnost není užití SMR jako výtopny nejvhodnějším řešením. SMR jako výtopna lze doporučit k realizaci v případě, kdy bude potřeba celoroční nepřerušované kontinuální dodávky tepla, čehož lze dosáhnout v průmyslovém odvětví při dodávce tepla do technologických procesů.

4.3 Uspořádání sekundárního okruhu SMR pro výrobu elektrické energie

Z historie jaderných zdrojů je zřejmé, že tyto zdroje slouží primárně k výrobě elektrické energie. Zároveň všechny koncepty SMR, se kterými uvažuje ČEZ, a.s., při výstavbě prvního SMR v ČR v lokalitě Temelín, jsou navrženy tak, aby mohly vyrábět zejména elektrickou energii. První SMR v ČR patrně nebude výjimkou a bude pravděpodobně sloužit pouze k výrobě elektrické energie, čímž by mohl nahradit některé zdroje elektrické energie, jež budou na hranici své morální životnosti a jeho reálné uspořádání bude proto podobné tomuto koncepčnímu uspořádání.

V případě, že SMR by sloužilo pouze k výrobě elektrické energie, tak lze tento zdroj označovat jako elektrárnu, resp. kondenzační jadernou elektrárnu. Jako kondenzační se označuje z toho důvodu, že je v tomto uspořádání užitá kondenzační turbína, díky níž se dosahuje vyšší tepelné účinnosti při výrobě elektrické energie oproti protitlaké turbíně. Tepelná účinnost SMR se u tohoto typu uspořádání pohybuje okolo 30 až 35 %. Na následujícím obrázku je zobrazeno zjednodušené schéma sekundárního okruhu (zkráceně „II. Okruh“) s kondenzační turbínou.



Obrázek 4.4 Zjednodušené schéma II. Okruhu SMR s kondenzační turbínou

SMR s kondenzační turbínou slouží pouze k výrobě elektrické energie. Nejprve je přijata tepelná energie z primárního okruhu Q_p v parogenerátoru (PG), která je následně předána teplotnosnému médiu sekundárního okruhu (demineralizovaná voda). Teplotnosným médiem primárního okruhu, resp. chladičem, je také demineralizovaná voda, která se následně z PG vrací zpět do reaktoru. V parogenerátoru se napájecí voda vypařuje až na sytou páru. Sytá pára dále proudí do vysokotlakého dílu parní turbíny (VT), kde částečně expanduje, čímž poklesnou její parametry. Z VT je mokrá pára vedena do separátoru (S), ve kterém dojde k odloučení vlhkosti až na mez sytosti. Vzniklý kondenzát je odveden do odplyňovače. Ze separátoru sytá pára proudí do přehříváče (PŘ), ve kterém dojde k přehřátí páry až nad mez sytosti, tzn. vzniká přehřátá pára, za pomoci syté páry odebrané před VT. Vzniklý topný kondenzát je odveden do odplyňovače. Pokud zůstalo v topném kondenzátu větší množství tepelné energie, lze jej užít například ve vysokotlakém ohříváči (VTO) místo topné páry z turbíny.

Přehřátá pára dále proudí do nízkotlakého dílu parní turbíny (NT), ve kterém dokončí svou expanzi. Po částečné expanzi je z NT odebrána topná pára neregulovanými odběry do nízkotlakého a vysokotlakého ohříváče. Zbytek páry proudí do kondenzátoru (K), ve kterém dojde ke kondenzaci par za vzniku

kondenzátu. Vzniklé teplo je z kondenzátoru odvedeno chladící vodou do chladící věže (ChIV), kde je toto teplo předáno do okolního vzduchu. Z chladící věže, resp. ze shromažďovacího bazénu umístěného pod chladící věží, se vrací ochlazená chladící voda zpět do kondenzátoru za pomoci chladícího čerpadla (ChIČ). Před ChIČ se také doplňují ztráty chladící vody způsobené únosem, odparem apod. Vzniklý kondenzát je odveden pomocí kondenzátního čerpadla (KČ) do nízkotlakého ohříváče (NTO), ve kterém dojde k jeho ohřátí. Vzniklý topný kondenzát je odveden do kondenzátoru, v němž se smíchá s kondenzátem. Ohřátý kondenzát následně proudí do odplyňovače, ve kterém dojde k odstranění všech plynů. Z odplyňovače je kondenzát odveden do napájecí nádrže (NN). V NN se z kondenzátu stává napájecí voda, jež se dopravuje pomocí napájecího čerpadla (NČ) do VTO. U elektrárny s vysokým výkonem se jako NČ užije turbonapáječka. Napájecí nádrž poskytuje dostatek napájecí vody pro udržení bloku na nominálním výkonu po určitý čas pro případ nestandardní situace (např. při výpadku kondenzátních čerpadel). Ve VTO dojde k ohřátí napájecí vody, která dále proudí do PG, čímž se okruh uzavírá. Topný kondenzát vzniklý ve VTO je odveden do odplyňovače. V této koncepci jsou uvedeny pouze dva regenerační ohříváče (NTO a VTO), ale v praxi je jich v okruhu obvykle více. Například jaderná elektrárna Temelín má 1x VTO a 4x NTO. [59]

Vyústění z chemické úpravny vody (CHÚV), která primárně slouží k doplňování vody do sekundárního okruhu, se nachází před KČ. V případě směšování různých teplotných médií je potřeba, aby všechna média měla stejnou hodnotu tlaku před započnutím směšování. Toho se docílí buď redukčními ventily (RV), anebo čerpadly. Například topný kondenzát proudící z NTO do kondenzátoru má vyšší hodnotu tlaku, než je tlak v kondenzátoru. A proto je u topného kondenzátu před kondenzátor vložen regulační ventil, jež sníží jeho tlak na tlak kondenzátu. V okruhu se nachází další pomocné systémy, jejichž bližší popis, a i bližší popis jednotlivých částí sekundárního okruhu je uveden v kapitole 4.1.

4.4 Uspořádání sekundárního okruhu SMR pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie

Posledním navrženým uspořádáním II. Okruhu u SMR je pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie (zkráceně „KVET“). Toto uspořádání kombinuje předchozí uspořádání spolu s jejich výhodami. Obecně lze zdroj s takto navrženým uspořádáním označovat jako teplárnu, ovšem v praxi se běžně kombinované výrobní označují i jako elektrárny a výběr označení souvisí hlavně s tím, jestli ve zdroji dochází převážně k výrobě elektrické anebo tepelné energie.

V teplárnách se užívají protitlaké turbíny s regulovaným odběrem páry, u nichž je výroba elektrické energie přímo závislá na odebíraném množství páry, anebo kondenzační turbíny s regulovaným odběrem páry, u nichž je výroba elektrické energie do určité míry nezávislá na odebíraném množství páry. Odběr páry může probíhat například buď přímo z NT dílu turbíny ve spolupráci s redukční stanicí, anebo po dokončení expanze ve VT dílu turbíny (mezi VT a NT dílem). U obou typů je vždy teplo předáváno přes výměňkovou stanicí (resp. rekuperační výměník) přímo odběrateli anebo do tepelné sítě. Bližší informace k typům tepelných sítí (dálkové vytápění) je uvedeno v kapitole 4.2.

U zdrojů KVET se často užívá tzv. teplárenský součinitel α a modul teplárenské výroby elektřiny e . Teplárenský součinitel α se určí ze vztahu:

$$\alpha = \frac{Q_T}{Q_{max}}, \quad (-) \quad (4.13)$$

kde Q_T je tepelný tok dodávaný odběrovou parou z turbíny (MW),

Q_{max} je maximální tepelný tok dodávaný odběrovou parou (MW). [29]

Teplárenský součinitel α určuje optimální stav, kdy dochází k maximalizaci výroby elektrické energie u teplárny a souvisí s dobou využití maximálního zatížení τ_v (doba, za kterou by bylo dodáno stejné množství energie při maximálním zatížení jako při proměnném zatížení za celý rok). Například při hodnotě $\tau_v = 2000$ h za rok je optimální hodnota α okolo 0,4–0,55 a s rostoucí dobou využití narůstá až k hodnotě 1. [29]

Modul teplárenské výroby elektřiny e , či zkráceně teplárenský modul, slouží k porovnání jednotlivých zdrojů KVET a určí se ze vztahu:

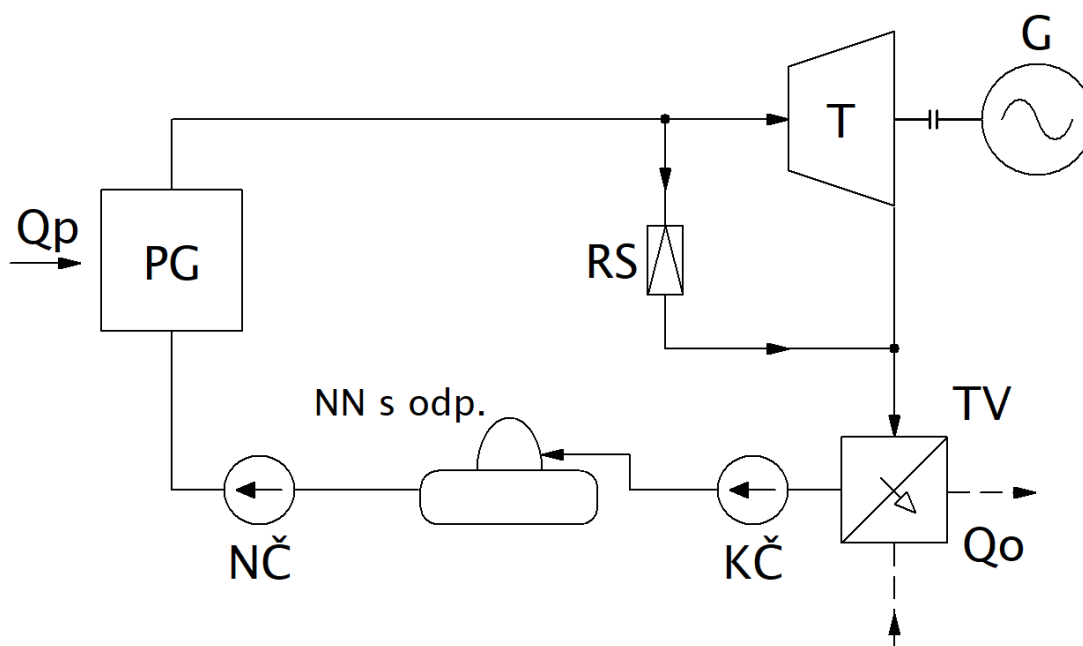
$$e = \frac{E}{Q_d}, \quad (-) \quad (4.14)$$

kde E je množství vyrobené elektrické energie (MWh),

Q_d je množství vyrobené tepelné energie (MWh). [29]

Parní teplárny dosahují hodnoty tohoto modulu okolo 0,1–0,4. Ze vztahu je zřejmé, že výtopny mají hodnotu tohoto modulu rovnou 0 a elektrárny mají naopak hodnotu teplárenského modulu obvykle mnohem vyšší než 1. [29]

Na následujícím obrázku je zobrazeno zjednodušené schéma sekundárního okruhu s protitlakou turbínou.

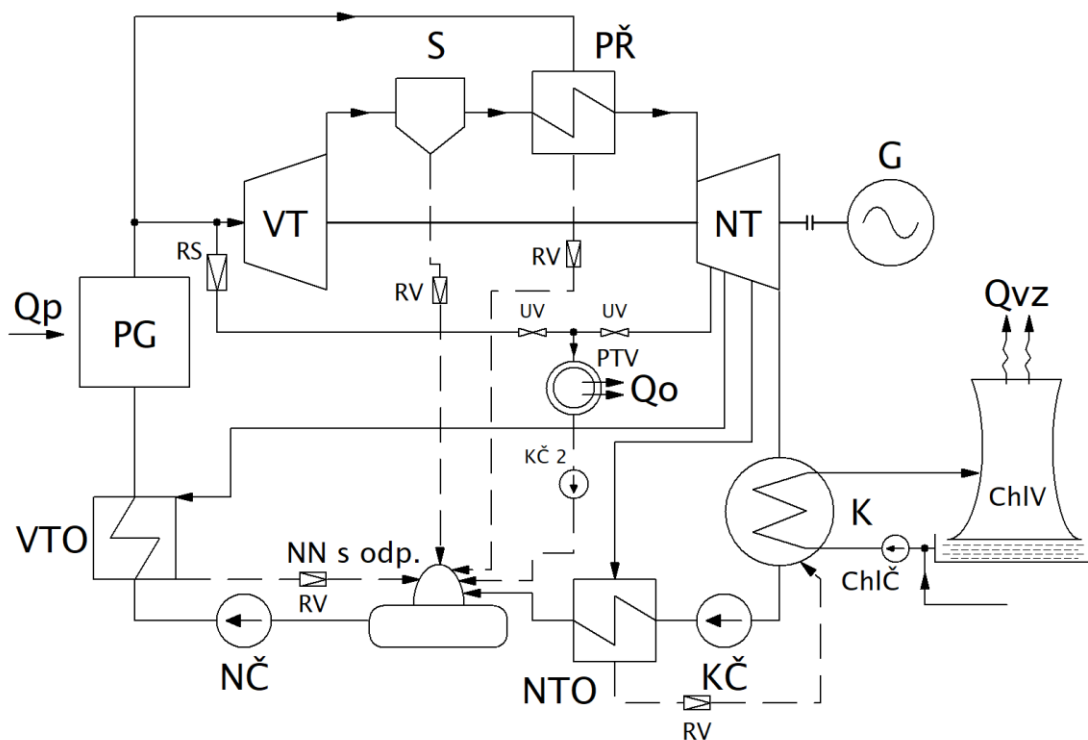


Obrázek 4.5 Zjednodušené schéma II. Okruhu SMR s protitlakou turbínou a regulovaným odběrem páry

U SMR s protitlakou turbínou a regulovaným odběrem páry je nejprve přijata tepelná energie z primárního okruhu Q_p v parogenerátoru (PG), která je následně předána teplonosnému médiu sekundárního okruhu (demineralizovaná voda). Teplonosným médiem primárního okruhu, resp. chladičem, je také demineralizovaná voda, která se následně z PG vrací zpět do reaktoru. V parogenerátoru se napájecí voda vypařuje až na sytou páru. Sytá pára dále

proudí do protitlaké turbíny (T), kde proběhne expanze páry. Následně je odběrová pára z turbíny sloučena s parou dodanou přes redukční stanici (RS) a tato směs proudí do výměňkové stanice (TV), jež předává tepelnou energii ze sekundárního okruhu do tepelné sítě. Tepelnou sítí je obvykle horkovod, jež je podrobněji popsán u vytopen v kapitole 4.2 a jeho parametry se volí podle technických možností okruhu a podle požadavku spotřebitele. Vzniklý kondenzát je odveden pomocí kondenzátního čerpadla (KČ) do odplyňovače, ve kterém dojde k odstranění všech plynů. Z odplyňovače je kondenzát odveden do napájecí nádrže (NN). Napájecí nádrž poskytuje dostatek napájecí vody pro udržení bloku na nominálním výkonu po určitý čas pro případ nestandardní situace (např. při výpadku kondenzátního čerpadla). V NN se z kondenzátu stává napájecí voda, jež se dopravuje pomocí napájecího čerpadla (NČ) zpět do PG, čímž se okruh uzavírá.

Na následujícím obrázku je zobrazeno zjednodušené schéma sekundárního okruhu s kondenzační turbínou a regulovaným odběrem páry.



Obrázek 4.6 Zjednodušené schéma II. Okruhu SMR s kondenzační turbínou a regulovaným odběrem páry

Schéma a princip II. Okruhu SMR s kondenzační turbínou a regulovaným odběrem páry je velmi podobný schématu II. Okruhu SMR s kondenzační turbínou uvedeným v kapitole 4.3, a proto zde není podrobně rozebrán základní princip kondenzační elektrárny, který se lze dočíst právě ve výše uvedené kapitole. V parogenerátoru (PG) se napájecí voda vypařuje až na sytou páru, která proudí do vysokotlakého dílu parní turbíny (VT), kde částečně expanduje. Z VT je mokrá pára vedena do separátoru (S), ve kterém dojde k odloučení vlhkosti až na mez sytosti. Následně sytá pára proudí do přehříváče (PŘ), ve kterém dojde k přehřátí páry až nad mez sytosti, tzn. vzniká přehřátá pára, za pomoci syté páry odebrané před VT. Přehřátá pára dále proudí do nízkotlakého dílu parní turbíny (NT), ve kterém dokončí svou expanzi. Po částečné expanzi je z NT odebírána topná pára neregulovanými odběry do nízkotlakého a vysokotlakého ohříváče a regulovaným odběrem do výměňkové stanice (PTV). Zbytek páry proudí do kondenzátoru (K), ve kterém dojde ke kondenzaci par za vzniku kondenzátu. Vzniklé teplo je z kondenzátoru odvedeno chladicí vodou do chladicí věže (ChV), kde je toto teplo předáno do okolního vzduchu. Z chladicí věže se vrací ochlazená chladicí voda zpět do kondenzátoru za pomoci chladicího čerpadla (ChČ).

Vzniklý kondenzát je odveden pomocí kondenzátního čerpadla (KČ) do nízkotlakého ohříváče (NTO), ve kterém dojde k jeho ohřátí. Ohřátý kondenzát následně proudí do odplyňovače, ve kterém dojde k odstranění všech plynů. Z odplyňovače je kondenzát odveden do napájecí nádrže (NN). V NN se z kondenzátu stává napájecí voda, jež se dopravuje pomocí napájecího čerpadla (NČ) do VTO. U teplárny s vysokým výkonem se jako NČ užíje turbonapáječka. Napájecí nádrž poskytuje dostatek napájecí vody pro udržení bloku na nominálním výkonu po určitý čas pro případ nestandardní situace (např. při výpadku kondenzátních čerpadel). Ve VTO dojde k ohřátí napájecí vody, která dále proudí do PG, čímž se okruh uzavírá. V této koncepci jsou uvedeny pouze dva regenerační ohříváče (NTO a VTO), ale v praxi je jich v okruhu obvykle více.

Z regulovaného odběru NT dílu turbíny a z redukční stanice (RS), jež odebírá sytou páru před VT dílem, je dodávána pára přes uzavírací ventily (UV) do výměňkové stanice (PTV), resp. do protitlakého rekuperačního výměníku. PTV předává tepelnou energii ze sekundárního okruhu do tepelné sítě, jež je podrobněji popsána

u výtopen v kapitole 4.2. Vzniklý topný kondenzát je odveden pomocí kondenzátního čerpadla č. 2 (KČ 2) do odplyňovače. U tohoto uspořádání je možné vložit tzv. neblokovanou výměňkovou stanicí mezi tepelnou síť a výměňkovou stanicí, resp. tzv. blokovanou výměňkovou stanicí, čímž vznikne meziokruh. Cílem této úpravy je snížení rizika znečištění a poškození II. Okruhu v případě poškození PTV, jelikož v tepelné síti není tak velký nárok na čistotu teplotního média.

Vyústění z chemické úpravny vody (CHÚV), která primárně slouží k doplňování vody do sekundárního okruhu, se u obou uspořádání nachází před KČ. V okruhu se nachází další pomocné systémy, jejichž bližší popis, a i bližší popis jednotlivých částí sekundárního okruhu je uveden v kapitole 4.1.

U SMR, které budou sloužit pravděpodobně zejména k dodávce elektrické energie je výhodnější typ s kondenzační turbínou, jelikož tento typ do určité míry umožňuje výrobu elektrické energie nezávisle na odebíraném množství páry. Na druhou stranu nevýhodou schématu s kondenzační turbínou oproti schématu s protitlakou turbínou je zejména složitější a technologicky náročnější konstrukce sekundárního okruhu.

Zdroj KVET kombinuje výhody předchozích uspořádání, jelikož zajišťuje dodávku jak elektrické, tak i tepelné energie, čímž dosahuje mnohem vyšší celkové účinnosti oproti čistě kondenzační elektrárně. Výtopna sice dosáhne pravděpodobně o pár procent vyšší celkové účinnosti oproti zdroji KVET, ale zdroj KVET má možnost eliminovat problém se sezonní změnou odebíraného množství tepla, což je velmi důležité u jaderných zdrojů, protože je vhodné SMR provozovat téměř bez přerušení provozu a za nominálního výkonu, z důvodu co nejrychlejší návratnosti investice. Celková účinnost u zdroje KVET může dosáhnout 80 až 90 %.

S ohledem na výše uvedené skutečnosti je užití II. okruhu SMR s kondenzační turbínou a regulovaným odběrem pravděpodobně nejvhodnějším řešením, protože jeho výhody dalece převyšují výhody ostatních popsaných uspořádání. Samozřejmě při návrhu SMR je potřeba hledět na vnější, resp. lokální podmínky, které mohou výběr optimálního řešení ovlivnit.

5 Klíčové aspekty proveditelnosti projektu SMR ve zvolené lokalitě

Při výběru lokalit zvažovaných pro budoucí umístění malého modulárního reaktoru je potřeba, aby dané lokality splňovaly klíčové aspekty proveditelnosti. Těmito aspekty jsou určité vlastnosti území a také, aby zdroj zvažovaný pro tuto lokalitu splnil veškeré okrajové, resp. limitující podmínky lokality. Okrajové podmínky nasazení SMR v ČR již byly zmíněny v kapitole 3.5. Vlastnosti území, které jsou nutné k vyhodnocení daných lokalit, jsou uvedeny ve vyhlášce č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení spolu se způsobem a rozsahem posuzování území k umístění jaderného zařízení.

Společnost ČEZ, a.s., již zvolila lokalitu, kde by mělo dojít ke zprovoznění prvního SMR okolo roku 2032. Dále společnost ČEZ, a.s., pracuje na identifikaci dalších vhodných lokalit pro umístění SMR. Respektive ČEZ, a.s., vybírá z vlastněných uhelných elektráren, protože má zájem o nahrazení uhelných zdrojů za SMR, aby naplnila cíle budoucí nízkoemisní energetiky. Výhodou těchto lokalit je například již přivedená dopravní i energetická infrastruktura, existence vhodné pracovní síly anebo existující zdroj vody. Zároveň je možné z již existujících elektráren využít některé jejich části, pokud to technické podmínky dovolí. Rovněž je v lokalitách vyřešeno vlastnické právo, jelikož společnost ČEZ, a.s., tyto lokality vlastní.

Do užšího výběru se dostaly elektrárny Tušimice, Prunéřov, Dětmárovice, Ledvice a Poříčí. U vybraných lokalit provedla společnost ČEZ, a.s., předběžné hodnocení dle vyhlášky č. 378/2016 Sb., o umístění jaderného zařízení. Výsledky hodnocení jsou uvedeny v tabulce níže. Z hodnocení lokalit byly vybrány dvě lokality, které budou podléhat podrobnějšímu hodnocení. Těmito lokalitami jsou elektrárna Tušimice v Ústeckém kraji a elektrárna Dětmárovice v Moravskoslezském kraji. Elektrárny Prunéřov a Ledvice jsou ponechány jako záložní lokality u nichž dojde pouze k částečnému prohloubení znalostí o daných lokalitách. Elektrárna Dětmárovice je preferována před elektrárnou Prunéřov z důvodu vyššího potenciálu v dodávce tepla. Elektrárnu Poříčí je doporučeno dále nerozvíjet, kvůli téměř jisté přítomnosti aktivního zlomu v blízkosti elektrárny. ^[41]

Oblast požadavků V378	Tušimice	Pruněřov	Dětmarovice	Ledvice	Poříčí
Seismicita	G	G	PY	G	R
Porušení území zlomem	PY	PR	PR	Y	B
Povodně	G	G	G	G	G
Oběh podzemní vody	G	G	PG	PR	G
Vulkanismus a projevy postvulkanické činnosti	G	G	G	G	G
Svahové pohyby	G	G	G	G	G
Propady a deformace území	G	G	G	Y	G
Nepříznivé vlastnosti základových půd	PY	PY	PY	Y	G
Meteorologické jevy					
Působení živých organismů					
Přírodní požáry					
Pád letadla a jiných objektů					
Výbuchy a požáry, které mají původ v činnosti člověka					
Kolize s ochrannými a bezpečnostními pásmy	G	G	G	G	G
Vliv stávajícího JZ v území					
Silné vibrace	G	G	PY	G	G
Elektromagnetická interference					
Vířivé elektrické proudy					
Negativní projevy letecké, silniční, železniční a vodní dopravy	G	Y	G	Y	G
Působení produktovodů a energetického vedení	G	G	G	G	G
Znečištění ovzduší, horninového prostředí, povrchových a podzemních vod	G	G	G	G	G
Nebezpečné provozy	G	G	G	G	G
Jiné jevy s vlivem na JB, RO, MRS, ZRMU a zabezpečení JZ	G	G	G	G	G
Jevy ovlivňující šíření RaL okolím a potravinovým řetězcem	PG	PG	PG	PG	PG
Rozložení a hustota osídlení	G	G	Y	G	G

Legenda:

PG	Bez rizika, znalost částečná
Y	Malé riziko, znalost dostačená
PY	Malé riziko, znalost částečná
R	Významné riziko, znalost dostatečná
PR	Významné riziko, znalost částečná
B	No-Go, znalost se nevyhodnocuje
	Oblasti nerelevantní v Etapě 2

Tabulka 5.1 Hodnocení lokalit společnosti ČEZ, a.s. [41]

Z výše uvedených lokalit vybírám lokalitu elektrárny Tušimice z důvodů jejího velmi kladného hodnocení a dalších důvodů již výše zmíněných. U této lokality uvedu dále v kapitole některé její charakteristické vlastnosti týkající se sekundárního okruhu, navrhu možný koncept, který by mohl být realizován v této lokalitě, a vytvořím zjednodušenou koncepci sekundárního okruhu navrženého SMR.

5.1 Okrajové podmínky lokality

Uhelná elektrárna Tušimice se nachází u obce Tušimice v těsné blízkosti dolu Nástup Tušimice, zhruba 5 km východně od města Kadaň v okrese Chomutov. V letech 1963–1964 zde byla uvedena do provozu Elektrárna Tušimice I (ETU I), se šesti 110 MW bloky. Následně v letech 1974–1975 byla uvedena do provozu Elektrárna Tušimice II (ETU II), se čtyřmi 200 MW bloky. ETU I byla definitivně uzavřena v roce 1998. V letech 2007–2012 proběhla komplexní modernizace ETU II, která zajistila zvýšení životnosti elektrárny o 25 let, resp. do roku 2035, kdy se předpokládá vyčerpání uhelných zásob v blízkém okolí, při zachování evropských standardů. Rozloha elektrárny činí okolo 80 ha. [9]

Po modernizaci je výkon každého bloku 203,85 MWe a účinnost bloku netto dosahuje 39 %. Elektrárna Tušimice vyrobí okolo 5 TWh za rok a jmenovitý parní výkon kotle je $553 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$, což odpovídá tepelnému výkonu o hodnotě necelých 450 MWt. Jmenovitý tlak přehřáté páry činí 18,47 MPa a jmenovitá teplota činí 573,3 °C. Teplota napájecí vody činí 248,2 °C. Parní turbína je třítělesová, rovnotlaká kondenzační turbína s jmenovitými otáčkami $3\,000 \text{ min}^{-1}$ a s přehříváním páry za VT dílem. Turbína je vybavena 8 neregulovanými odběry páry pro regeneraci, topení napájecí nádrže, pohon turbonapáječky apod. Vyvedení výkonu z elektrárny je do soustavy 400 kV, resp. do rozvodny Hradec, pomocí linky č. V463/464. Rezervní zdroj napájení je pomocí linek ze 110 kV a případně pomocí dieselaagregátů.

Jmenovitá teplota chladící vody je 19,5 °C a maximální teplota chladící vody je 32 °C. Tlak v kondenzátoru se pohybuje mezi 3 až 11 kPa v závislosti na teplotě chladící vody. Odvod tepla z chladící vody probíhá pomocí čtyř chladících věží s přirozeným tahem, každá na jeden výrobní blok. Jmenovitý hmotnostní průtok chladící vody do hlavního kondenzátoru činí $5\,570 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

Elektrárna zásobuje teplem město Kadaň a další menší odběratele. Roční dodávka tepla odběratelům činí cca 500 TJ pomocí výměňkové stanice o jmenovitém tepelném výkonu 80 MWt. Tepelnou sítí je horkovod o tlaku 2,5 MPa a teplotou oběhové vody 150/70 °C. Odpadní teplo z elektrárny je využíváno například v blízkých sklenících na zeleninu vystavěné na ploše vzniklé po demolici ETU I. [27]

Stanice pro čerpání surové vody je vybudována na levém břehu řeky Ohře. Zhruba 3 km od čerpací stanice se po proudu řeky nachází vodní nádrž Nechranice. Z čerpací stanice se voda čerpá do vodojemů ETU I a ETU II s celkovým objemem 3 000 m³. Z vodojemů je dále voda rozváděna pomocí gravitačních řádů po elektrárně. Vyčištěná odpadní voda z elektrárny se odvádí do Lužického potoka, jež se vlévá do řeky Ohře. Z vodního toku Ohře je dovoleno odebírat průměrně 600 l · s⁻¹ surové vody. Maximální dovolený odběr činí 1 200 l · s⁻¹ nebo 25 000 000 m³ · rok⁻¹. Do vodního toku Lužický potok je dovoleno celkově vypouštět průměrně 70 l · s⁻¹ vyčištěné odpadní vody. Maximální dovolené vypouštění činí 220 l · s⁻¹, 500 000 m³ · měsíc⁻¹ nebo 3 500 000 m³ · rok⁻¹. Dlouhodobý průměrný průtok řeky Ohře ve stanici LG Stranná, jež se nachází za vodní nádrží Nechranice, činí 30,7 m³ · s⁻¹. Nejnižších denních průtoků během nejsušších roků dosahuje řeka Ohře v letních měsících a to okolo 7–10 m³ · s⁻¹ v závislosti na hydrologické situaci. [13, 27]

Z výše uvedených údajů je zřejmé, že lokalita poskytuje několik výhod pro možné budoucí umístění SMR. Hlavní výhodou je již existující energetická i dopravní infrastruktura, protože je zde přivedena 110 kV i 400 kV soustava, horkovod a silniční i železniční síť. Rozloha elektrárny je dostačující na budoucí SMR a zároveň je možné realizovat rozšíření areálu nebo výstavby SMR mimo areál ČEZu, protože západním směrem od elektrárny se nachází nezastavěné území v majoritním vlastnictví společnosti Severočeské doly a.s. a Ústeckého kraje. Řeka Ohře poskytuje i velké množství vody, kterou z ní lze odebírat a například oproti řece Olši, která slouží k odběru surové vody pro Elektrárnu Dětmarovice, má dovolené dvojnásobné množství odebírané vody. Zároveň bude možné využít některé stávající části elektrárny pro budoucí potřeby SMR (např. čerpací stanice, vodojemy, odtokové/ přítokové kanály a další). Ukončení provozu elektrárny je navrženo okolo roku 2035 a již při útlumu výroby a ukončování výroby by se mohlo začít s počátečními fázemi výstavby nového SMR v dané lokalitě. Jednou z mála nevýhod této lokality je její blízké umístění k uhelnému dolu, jež by například mohl způsobovat vibrace. Ovšem k ukončení těžby by mělo dojít také před samotnou výstavbou SMR.

5.2 Uplatnění vhodného konceptu SMR ve zvolené lokalitě

Do navržené lokality lze uvažovat o konceptech SMR uvedených v kapitole 3.4. Při výběru je vhodné uvažovat zejména s koncepty, s jejichž společnostmi podepsala společnost ČEZ, a.s., memoranda o spolupráci z důvodu výběru dodavatele SMR pro výstavbu prvního SMR v ČR v lokalitě Temelín. Pokud výstavba prvního SMR proběhne dle očekávání, mohl by být stejný dodavatel zvolen i pro výstavbu následujících SMR. Společnost ČEZ, a.s., navázala spolupráci s dodavateli konceptů BWRX-300, NUWARD™, SMART, SMR-160, Rolls-Royce SMR a VOYGR™.

První tři zmíněné koncepty SMR nebudou s velkou pravděpodobností využity pro výstavbu v navržené lokalitě, protože u konceptu SMART není znám přesný časový harmonogram, koncept NUWARD™ plánuje zahájení provozu FOAK až v roce 2034 a u konceptu BWRX-300 je sice plánované zahájení provozu FOAK okolo roku 2030, ovšem jedná se o varný reaktor, s nímž nejsou v ČR žádné zkušenosti.

Koncept SMR-160, o tepelném výkonu reaktoru 525 MWt, plánuje zahájení provozu FOAK okolo roku 2030 a mezi jeho výhody patří zejména schopnost startu ze tmy, cirkulace chladiva primárního okruhu volnou konvekcí anebo nová patentová technologie, jež dovolí u reaktoru typu PWR zachovat okruh páry a další části uhelných elektráren, což by vedlo ke zjednodušení výstavby. Ovšem je otázkou, zda tato technologie bude skutečně uvedena v praxi. Nevýhodou tohoto konceptu je, že se nachází ve fázi předběžného návrhu.

Koncept Rolls-Royce SMR, o tepelném výkonu reaktoru 1 358 MWt, plánuje zahájení provozu FOAK okolo roku 2030 a mezi jeho výhody patří zejména snaha o modularizaci i ostatních částí elektrárny, rychlé změny reaktorového výkonu o 3 až 5 % za minutu mezi 50 % až 100 % jmenovitého výkonu a nízká pravděpodobnost poškození aktivní zóny, díky níž by se mohla zóna havarijního plánování zmenšit až na hranice elektrárny. Nevýhodou tohoto konceptu může být cirkulace chladiva primárního okruhu nucenou konvekcí, smyčkové uspořádání nebo potřeba využití aktivních bezpečnostních prvků.

Koncept VOYGR™, o tepelném výkonu reaktoru 250 MWt, plánuje zahájení provozu FOAK okolo roku 2029 a mezi jeho výhody patří možnost navržení elektrárny se 4, 6 nebo až s 12 reaktory, které pracují nezávisle na sobě a jsou

řízeny z jedné kontrolní místnosti. Dále mezi výhody patří integrální uspořádání reaktoru, cirkulace chladiva primárního okruhu volnou konvekcí a také již získaná první SMR stavebně-provozní licence pro reaktor o tepelném výkonu 160 MWt. Nevýhodou tohoto konceptu mohou být zvýšené investiční náklady z důvodu výstavby několika nezávislých sekundárních okruhů a jejich přidružených částí.

Výše tři popsané koncepty SMR mají určité výhody a nevýhody. Záleží na každé lokalitě, jaké vlastnosti jsou pro ni nejvhodnější. Navržená lokalita nevylučuje žádný koncept SMR, kvůli svým omezením. Pro účely návrhu zjednodušené koncepce sekundárního okruhu SMR v lokalitě Tušimice vybírám koncept VOYGR™, z důvodu již získané stavebně-provozní licence, nejbližšímu plánovanému zahájení provozu FOAK, integrálnímu uspořádání a využití pasivních bezpečnostních prvků.

5.3 Koncepte sekundárního okruhu navrženého SMR ve zvolené lokalitě

Koncepte II. Okruhu je navržena pro malý modulární reaktor VOYGR™ od společnosti NuScale Power Corporation. Níže v tabulce jsou uvedeny některé parametry tohoto SMR, které jsou dohledatelné ve veřejně dostupné literatuře.

Tepelný výkon	250	MWt
Elektrický výkon (brutto)	77	MWe
Tepelná účinnost	>30	%
Tlak v primárním okruhu	13,8	MPa
Tlak před vstupem do Turbíny	4,3	MPa
Vstupní/výstupní tlak chladiva	249/316	°C
Faktor kapacity	95	%
Životnost	60	let
Délka kampaně reaktoru	18	měsíců
Výška tlakové nádoby reaktoru	17,7	m
Průměr tlakové nádoby reaktoru	2,7	m
Chladivo	demineralizovaná voda	
Typ a míra obohacení paliva	UO2 tabletky s obohacením $\leq 4,95$ %	

Tabulka 5.2 Parametry SMR VOYGR™ [24]

Následně jsem zvolil další potřebné vstupní parametry, jež byly převzaty z hodnot současných jaderných elektráren typu PWR a ze získaných parametrů dané lokality. Tyto vstupní parametry jsou uvedeny v tabulce níže.

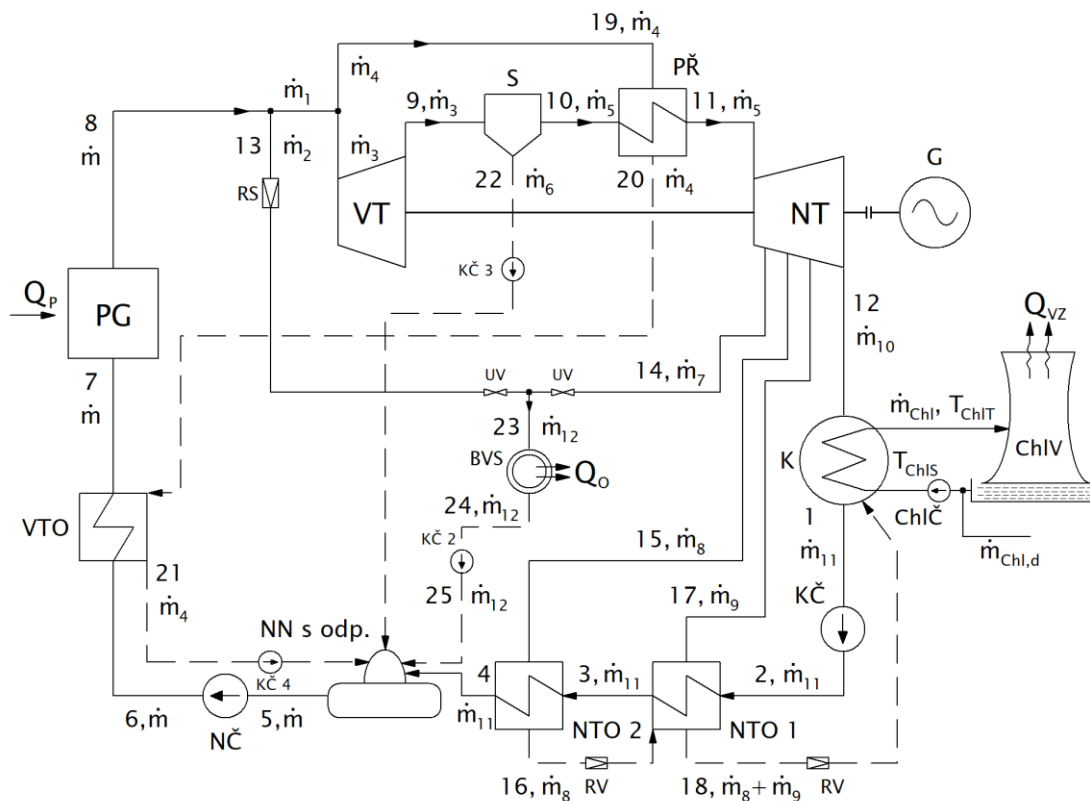
Sekundární okruh			
Teplota na výstupu z PG	T_8	255,00	°C
Teplota na vstupu do PG	T_7	130,00	°C
Teplota v kondenzátoru	T_1	35,00	°C
Teplota po přehřátí	T_{11}	245,00	°C
Tlak po přehřátí	$p_{11} = p_{10} = p_9$	0,70	MPa
Tlak za KČ	$p_2 = p_3 = p_4 = p_5$	1,00	MPa
Tlak odběrové páry	$p_o = p_{14}$	0,40	MPa
Teplotní spád výměníků	$\Delta T_{TO, \text{výstup}}$	0,00	K
Oteplení kondenzátu v NTO	$\Delta T_{NTO, \text{ohřev}}$	35,00	°C
Oteplení napájecí vody v VTO	$\Delta T_{VTO, \text{ohřev}}$	25,00	°C
Koeficient odběru	α_1	0,02	
Odběrový tepelný výkon	\dot{Q}_o	30,00	MWt
Měrná tepelná kapacita vody	c_w	4 180,00	J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
Mechanická účinnost	η_{mech}	0,99	
Izoentropická účinnost turbíny	$\eta_{\text{is, turb}}$	0,85	
Izoentropická účinnost čerpadla	$\eta_{\text{is, čerp}}$	0,85	
Účinnost generátoru	η_{gen}	0,97	
Okruh chladící vody			
Teplota vzduchu	T_{vzduch}	25,00	°C
Oteplení chladící vody	ΔT_{Chl}	15,00	K
Ztráty únosem	Δm_{un}	0,001	
Entalpie vody při 25 °C	$h_{v,vz}$	104,83	kJ·kg ⁻¹
Entalpie páry při 25 °C	$h_{p,vz}$	2 546,51	kJ·kg ⁻¹

Tabulka 5.3 Vstupní parametry

V této koncepci jsou zanedbány tepelné ztráty ve všech výměnících i v potrubí a zároveň zde není uvažováno s tlakovými ztrátami.

5.3.1 Schéma parního oběhu

Schéma parního oběhu vychází z poznatků získaných v kapitole 4 a bližší popis tohoto uspořádání lze nalézt ve výše uvedené kapitole. V navržené lokalitě je možnost dodávat jak elektrickou energii, tak i tepelnou energii. Z toho důvodu navrhuji uspořádání sekundárního okruhu pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Na následujícím obrázku je zobrazeno zjednodušené schéma sekundárního okruhu SMR s kondenzační turbínou a regulovaným odběrem páry ve zvolené lokalitě.



Obrázek 5.1 Zjednodušené schéma II. Okruhu navrženého SMR ve zvolené lokalitě

V sekundárním okruhu je navržena turbína s VT a NT dílem, aby nedošlo k nežádoucímu poklesu suchosti pod hodnotu 0,88. Odběr tepla je zajištěn pomocí blokové výměňkové stanice (BVS), do níž je dodávána pára z regulovaného odběru NT dílu turbíny anebo z redukční stanice (RS). Z důvodu snížení rizika znečištění a poškození II. Okruhu v případě poškození BVS není tepelná síť napojena přímo na BVS, ale je mezi ně vložena neblokovaná výměňková stanice.

Odvod tepla z chladicí vody je možné realizovat pomocí cirkulační mokré chladicí věže s přirozeným tahem, jelikož zvolená lokalita pro ni poskytuje dostatečně velký prostor a v blízkosti se nachází zdroj vody pro doplňování ztrát chladicí vody. Tudíž není potřeba výstavby suchých chladících věží nebo mokrých chladících věží s nuceným tahem, které by zvyšovaly vlastní spotřebu elektrárny. Kondenzátní čerpadla KČ 3 a KČ 4 slouží ke zvýšení tlaku teplotnosného média, jelikož jeho tlak je nižší, než tlak v odplyňovači. Dále je pomocí redukčních ventilů uvažováno s úpravou tlaku po výstupu teplotnosného média z obou nízkotlakých ohříváčů (NTO), aby došlo ke srovnání tlaku před vstupem do dalšího zařízení.

Ve vybrané lokalitě lze zvolit výstavbu elektrárny o 6 anebo o 12 reaktorech typu VOYGR™, jelikož ze získaných údajů nevyplývá žádná okrajová podmínka, která by výstavbu nedovolovala. Dodávky tepla odběratelům budou zachovány pomocí neblokované výměňkové stanice o jmenovitém tepelném výkonu 90 MWt. Do této stanice bude možné dodávat teplo alespoň ze 4 reaktorů pomocí blokových výměňkových stanic o jmenovitém tepelném výkonu 30 MWt. Na dodávce tepla, při jmenovitých hodnotách, se budou vždy podílet 3 reaktory.

5.3.2 Energetické bilance a vztahy použité k výpočtu

Vypočet zjednodušeného modelu byl proveden v programu Microsoft Excel s pomocí doplňkového programu Coolprop, jež slouží jako knihovna termodynamických vlastností. Dolní index „r“ značí „reálnou“ nevratnou adiabatickou expanzi (kompresi) a dolní index „id“ značí ideální adiabatickou expanzi (kompresi).

Energetická bilance parogenerátoru je:

$$\dot{Q}_p = \dot{m} \cdot (h_8 - h_7) \quad (\text{kW}) \quad (5.1)$$

Energetická bilance VT a NT dílu turbíny je:

$$\dot{W}_{VT} = \dot{m}_3 \cdot (h_8 - h_{9,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{NT} = \dot{m}_5 \cdot (h_{11} - h_{12,r}) - \dot{m}_7 \cdot (h_{14} - h_{12,r}) - \dot{m}_8 \cdot (h_{15} - h_{12,r}) \\ - \dot{m}_9 \cdot (h_{17} - h_{12,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.3) \end{aligned}$$

Hodnota entalpie páry na konci nevratné adiabatické expanze $h_{9,r}$ je určena úpravou rovnice 4.10 a to na:

$$h_{9,r} = h_8 - \eta_{is,turb} \cdot (h_8 - h_{9,id}) \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (5.4)$$

Kde $h_{9,id}$ je hodnota entalpie páry na konci ideální adiabatické expanze. Z tohoto vztahu se vyjde i při určení dalších entalpií na konci expanze.

Výkon na svorkách generátoru P_E se určí ze vztahu:

$$P_E = (\dot{W}_{VT} + \dot{W}_{NT}) \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_g \quad (\text{kW}) \quad (5.5)$$

Odběrový tepelný výkon je:

$$\dot{Q}_O = \dot{Q}_{O,R} + \dot{Q}_{O,T} \quad (\text{kW}) \quad (5.6)$$

Kde odběrový tepelný tok odebraný redukční stanicí $\dot{Q}_{O,R}$ je určen ze vztahu:

$$\dot{Q}_{O,R} = \dot{m}_2 \cdot (h_{13} - h_{24}) \quad (\text{kW}) \quad (5.7)$$

Odběrový tepelný tok odebraný turbínou $\dot{Q}_{O,T}$ je určen ze vztahu:

$$\dot{Q}_{O,T} = \dot{m}_7 \cdot (h_{14,r} - h_{24}) \quad (\text{kW}) \quad (5.8)$$

Účinnosti oběhu:

Celková účinnost se určí ze vztahu:

$$\eta_{celk} = \eta_E + \eta_T \quad (\%) \quad (5.9)$$

Kde účinnost oběhu při výrobě elektřiny η_E se určí ze vztahu:

$$\eta_E = \frac{P_E}{\dot{Q}_P} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5.10)$$

Účinnost oběhu při výrobě tepla η_T se určí ze vztahu:

$$\eta_T = \frac{\dot{Q}_O}{\dot{Q}_P} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5.11)$$

Energetická bilance kondenzátoru je:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{odv} = \dot{m}_{chl} \cdot c_w \cdot (T_{chlT} - T_{chlS}) = \dot{m}_{10} \cdot h_{12,r} - \dot{m}_{11} \cdot h_1 \\ - (\dot{m}_8 + \dot{m}_9) \cdot h_{18} \quad (\text{kW}) \quad (5.12) \end{aligned}$$

Energetická bilance NTO 1 je:

$$\dot{m}_8 \cdot (h_{15} - h_{16}) = \dot{m}_{11} \cdot (h_4 - h_3) \quad (\text{kW}) \quad (5.13)$$

Energetická bilance NTO 2 je:

$$\dot{m}_8 \cdot h_{16} + \dot{m}_9 \cdot h_{17} - (\dot{m}_8 + \dot{m}_9) \cdot h_{18} = \dot{m}_{11} \cdot (h_3 - h_{2,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.14)$$

Energetická bilance přehříváče je:

$$\dot{m}_4 \cdot (h_{19} - h_{20}) = \dot{m}_5 \cdot (h_{11} - h_{10}) \quad (\text{kW}) \quad (5.15)$$

Energetická bilance VTO je:

$$\dot{m}_4 \cdot (h_{20} - h_{21}) = \dot{m} \cdot (h_7 - h_{6,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.16)$$

Energetická bilance odplyňovače je:

$$\dot{m} \cdot h_5 = \dot{m}_4 \cdot h_{21} + \dot{m}_6 \cdot h_{22} + \dot{m}_{11} \cdot h_4 + \dot{m}_{12} \cdot h_{25} \quad (\text{kW}) \quad (5.17)$$

Energetické bilance čerpadel jsou:

$$\dot{W}_{K\check{C}} = \dot{m}_{11} \cdot (h_1 - h_{2,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.18)$$

$$\dot{W}_{N\check{C}} = \dot{m} \cdot (h_5 - h_{6,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.19)$$

$$\dot{W}_{K\check{C}2} = \dot{m}_{12} \cdot (h_{24} - h_{25,r}) \quad (\text{kW}) \quad (5.20)$$

Hodnota entalpie páry na konci nevratné adiabatické komprese $h_{2,r}$ je určena úpravou rovnice 4.12 a to na:

$$h_{2,r} = h_1 - \frac{(h_1 - h_{2,id})}{\eta_{is,\check{c}erp}} \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (5.21)$$

Kde $h_{2,id}$ je hodnota entalpie páry na konci ideální adiabatické komprese a určí ze vztahu:

$$h_{2,id} = h_1 + v_1 \cdot (p_2 - p_1) \quad (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (5.22)$$

Kde v_1 je měrný objem syté kapaliny před čerpadlem ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) a p_1, p_2 jsou tlaky kapaliny před a za čerpadlem (Pa). Z těchto vztahů se vyjde i při určení dalších entalpií na konci komprese.

Ztráty chladicí vody:

Množství vody $\dot{m}_{chl,d}$, které je potřeba doplňovat do okruhu chladicí vody vlivem ztrát u mokré chladicí věže se určí ze vztahu:

$$\dot{m}_{chl,d} = \dot{m}_{chl,un} + \dot{m}_{chl,odp} = \Delta m_{un} \cdot \dot{m}_{chl} + \frac{c_w(T_{chlT} - T_{chlS})}{(h_{pvz} - h_{vvz})} \cdot \dot{m}_{chl} \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (5.23)$$

Vztahy pro výpočet teplotenského součinitele α a modulu e jsou:

$$\alpha = \frac{\dot{Q}_{o,T}}{\dot{Q}_o}, \quad (-) \quad (5.24)$$

Vztahy pro hmotnostní průtoky v dílčích částech okruhu jsou:

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.25)$$

$$\dot{m}_1 = (1 - \alpha_1) \cdot \dot{m} = \dot{m}_3 + \dot{m}_4 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.26)$$

$$\dot{m}_2 = \alpha_1 \cdot \dot{m} \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.27)$$

$$\dot{m}_3 = (1 - \alpha_2) \cdot \dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.28)$$

$$\dot{m}_4 = \alpha_2 \cdot \dot{m}_1 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.29)$$

$$\dot{m}_5 = (1 - \alpha_3) \cdot \dot{m}_3 = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10} \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.30)$$

$$\dot{m}_6 = \alpha_3 \cdot \dot{m}_3 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.31)$$

$$\dot{m}_7 = \alpha_4 \cdot \dot{m}_5 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.32)$$

$$\dot{m}_8 = \alpha_5 \cdot \dot{m}_5 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.33)$$

$$\dot{m}_9 = \alpha_6 \cdot \dot{m}_5 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.34)$$

$$\dot{m}_{10} = (1 - \alpha_4 - \alpha_5 - \alpha_6) \cdot \dot{m}_5 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.35)$$

$$\dot{m}_{11} = (1 - \alpha_4) \cdot \dot{m}_5 = \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_{10} \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.36)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{12} &= (\alpha_1 + (1 - \alpha_4) \cdot (1 - \alpha_3) \cdot (1 - \alpha_2) \cdot (1 - \alpha_1)) \cdot \dot{m} \\ &= \dot{m}_2 + \dot{m}_7 \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (5.37) \end{aligned}$$

Kde α_i je koeficient rozdělení toku i -tého odběrného místa (bodu rozdělení) (-).

5.3.3 Vyhodnocení parního oběhu

Reaktor typu VOYGR™, s výše navrženým koncepčním uspořádáním II. Okruhu, poskytne výkon na svorkách generátoru $P_E = 74,15$ MW, na němž se VT díl turbíny podílí z 36 % a NT díl turbíny z 64 %, a odběrový tepelný tok $\dot{Q}_O = 30$ MWt za předpokladu přivedeného tepelného výkonu $\dot{Q}_P = 250$ MWt. Generovaný elektrický výkon je menší oproti elektrickému výkonu udávanému výrobcem SMR, a to z důvodu kombinované výroby. Výkon na svorkách generátoru je tzv. brutto výkon, jelikož do něj není započítána vlastní spotřeba elektrárny, která se u dnešních jaderných elektráren pohybuje okolo 5 až 8 % z vyrobené elektrické energie. Výhodou reaktoru VOYGR™ je přirozená konvekce chladiva, u které není

potřeba cirkulačního čerpadla v primárním okruhu, což může snížit vlastní spotřebu o 20 až 30 %. [3]

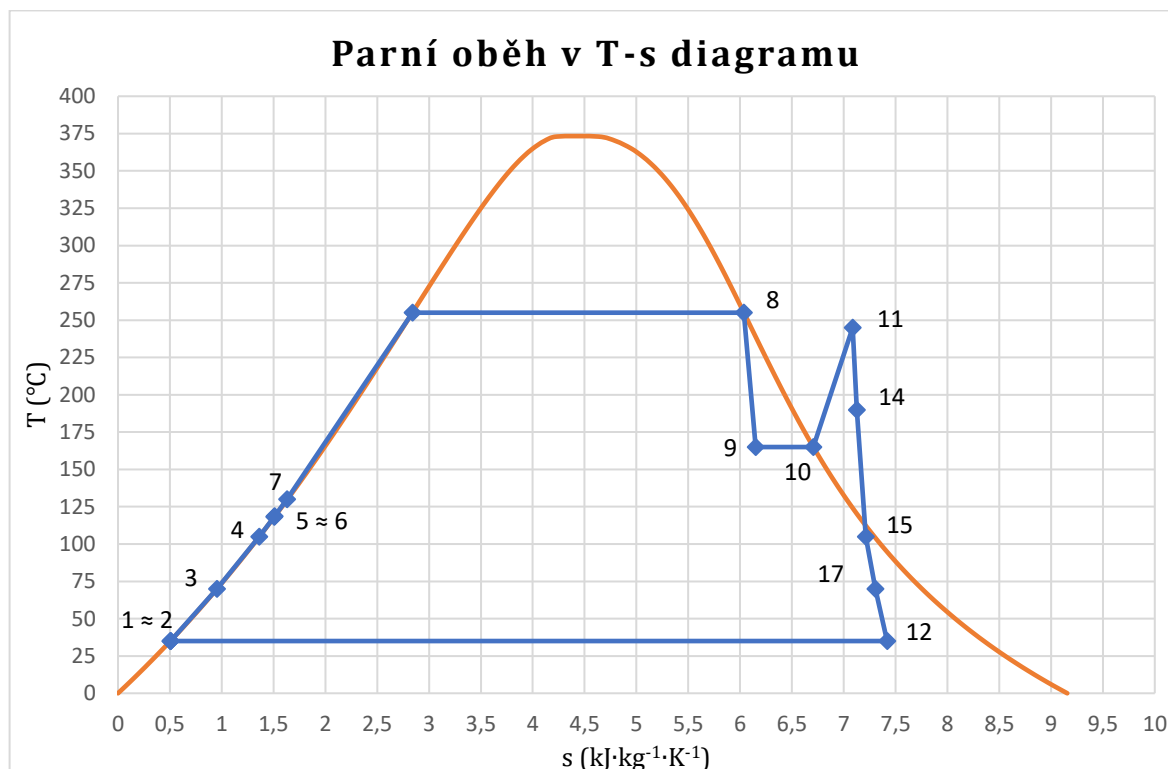
Celková účinnost oběhu η_{celk} je rovna 41,66 % a účinnosti oběhu při výrobě elektřiny a tepla jsou $\eta_E = 29,66 \%$ a $\eta_T = 12,00 \%$. Díky kombinované výrobě elektřiny a tepla je dosaženo vyšší celkové účinnosti, jelikož v případě výroby pouze elektřiny by celková účinnost oběhu činila mírně nad 30 %. Celkový hmotnostní průtok teplotnosného média v sekundárním okruhu \dot{m} je roven $111,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, přes blokovou výměňkovou stanici proudí $\dot{m}_{12} = 12,46 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ a do turbíny proudí $\dot{m}_5 = 87,75 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Ostatní hmotnostní průtoky jsou uvedeny v tabulce níže.

m_1	108,89	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	m_7	11,24	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_2	2,22	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	m_8	5,09	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_3	99,51	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	m_9	4,78	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_4	9,38	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	m_{10}	66,64	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_6	11,76	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	m_{11}	76,51	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 5.4 Hmotnostní průtoky

Odvedený tepelný výkon kondenzátorem \dot{Q}_{adv} činí 143,4 MW, který následně chladicí voda s hmotnostním průtokem $\dot{m}_{chl} = 2\,287,13 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ odvede do chladicí věže. Množství vody $\dot{m}_{chl,d}$, které je potřeba doplňovat do okruhu chladicí vody vlivem ztrát odparem a únosem u mokré chladicí věže je $61,02 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, což dovoluje výstavbu více reaktorů tohoto typu v navržené lokalitě, u níž je dovoleno odebírat průměrně $600 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ surové vody z vodního toku Ohře. Ve zvolené lokalitě lze zvolit výstavbu elektrárny o 6 reaktorech typu VOYGR™. Elektrárnu o 12 reaktorech typu VOYGR™ nelze s tímto uspořádáním II. Okruhu realizovat z důvodu velkého celkového odběru surové vody na doplnění ztrát chladicí vody, jež by činily přes $730 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro realizaci takto velké elektrárny by muselo být využito suchých chladících věží, anebo vzduchového chlazení s ventilátorem. Dodávky tepla odběratelům budou zachovány pomocí neblokované výměňkové stanice o jmenovitém tepelném výkonu 90 MWt, které bude možné dodávat teplo alespoň ze 4 reaktorů pomocí blokových výměňkových stanic každé o jmenovitém tepelném výkonu 30 MWt. Na dodávce tepla, při jmenovitých hodnotách, se budou vždy podílet 3 reaktory, resp. blokové výměňkové stanice.

Teplárenský součinitel α dosahuje vysoké hodnoty, a to 0,84. Pro teplárnu, resp. elektrárnu s SMR s velmi vysokou hodnotou doby využití maximálního zatížení je doporučeno, aby teplárenský součinitel dosahoval hodnoty 1, což lze zajistit omezením proudění páry přes redukční stanici. Na následujícím grafu je zobrazen parní oběh v T-s diagramu.



Graf 5.1 Parní oběh v T-s diagramu

V grafu je viditelný parní oběh se sytou párou a následným přehříváním páry (mezi body 10 a 11) po expanzi ve VT dílu turbíny. Dále je zde označen regulovaný odběr páry (bod 14) v NT dílu turbíny pro dodávku tepla do BVS a neregulované odběry páry (body 15 a 17) v NT dílu turbíny pro odběr topné páry pro NTO. Mezi body 8-9 a 11-12 dochází k nevratné adiabatické expanzi. Mezi body 2-3, 3-4 a 6-7 dochází k přehřívání kondenzátu, resp. napájecí vody. Mezi body 1-2 a 5-6 dochází k práci kondenzátního čerpadla, resp. napájecího čerpadla, jež slouží k oběhu kondenzátu, resp. napájecí vody.

5.4 Přínos technologie SMR pro energetiku ČR

Z výše uvedeného příkladu možného uplatnění SMR ve zvolené lokalitě je viditelný potenciál malých modulárních reaktorů v energetice ČR. Jak bylo popsáno v kapitole 3.1, tak v České republice je nyní více než 9,5 GW_e instalovaného výkonu v uhelných elektrárnách, které se podílí na výrobě elektřiny ze 40 %. Dále v teplárenství se uhelné zdroje podílí na výrobě tepla ze 47 % a zdroje na zemní plyn se podílí na výrobě tepla z 21 %. S postupným přechodem k nízkouhlíkové energetice bude potřeba nahradit tyto zdroje ve výrobě elektřiny a tepla.

Malé modulární reaktory mají potenciál být jedním z možných řešení, čím tyto emisní zdroje nahradit a mohou být nesporným přínosem pro energetiku ČR. Zejména v teplárenství představují SMR pravděpodobně jedno z nejlepších řešení, díky možné kombinované výrobě elektřiny a tepla, protože v našich podmínkách nebude možné dodávat teplo pouze ze zdrojů na biomasu a prozatím není příliš mnoho dalších bezemisních zdrojů tepla, které by měli potenciál většího rozšíření.

V České republice je velmi rozšířen energeticky náročný průmysl, do něhož patří například hutnický, chemický, petrochemický a strojírenský průmysl. U všech odvětví průmyslu bude také potřeba přechodu k nízkouhlíkovému průmyslu, při němž by se mohly opět uplatnit SMR v podobě dodávky technologického tepla jak pro nízkoteplotní, tak i pro vysokoteplotní procesy.

SMR mohou poskytnout větší flexibilitu než klasické jaderné reaktory, čímž by se mohly více zapojit do poskytování podpůrných služeb provozovateli přenosové soustavy. Ovšem současně nejsou SMR plánovány jako náhrada za velké jaderné zdroje, ale jako doplňkový zdroj elektřiny k nim.

Malé modulární reaktory mohou být jednou z možných cest k nízkouhlíkové energetice ve výše uvedených příkladech, ovšem stále zůstává otázkou, zda se jejich potenciál využije naplno či ne, protože SMR prozatím nejsou rozšířené ve světě a ke zprovoznění prvních komerčně využívaných jednotek dojde až okolo roku 2030. Tudíž je nejisté, jestli se uplatní ve větší míře při přechodu k nízkouhlíkové energetice za předpokladu dodržení stanovených časových rámců tohoto přechodu.

6 Závěr

Diplomová práce se zabývá problematikou malých modulárních reaktorů a jejich budoucímu uplatnění v České republice. Potenciál SMR v posledních letech narůstá zejména z důvodu hledání nových zdrojů jak elektrické, tak tepelné energie. Ty by mohly nahradit dnešní emisní zdroje (uhelné a plynové zdroje), aby se Česká republika i další státy Evropské unie přiblížily k přechodu k nízkouhlíkové energetice a následně až k uhlíkové neutralitě. Tyto cíle si Evropská unie stanovila postupně tzv. Pařížskou dohodou o změně klimatu, Zelenou dohodou pro Evropu a v neposlední řadě balíčkem legislativních návrhů Evropské komise (Fit for 55).

V úvodní kapitole 2 je definován pojem malého modulárního reaktoru spolu s jeho základními vlastnostmi, mezi které patří zejména modularita, integrální uspořádání reaktoru, zvýšená bezpečnost a flexibilita. Výše zmíněné vlastnosti, ale i další vlastnosti, mají hlavně za cíl zvýšit bezpečnost těchto zdrojů, zjednodušit a zrychlit výstavbu tohoto zdroje a v neposledně řadě snížit investiční a provozní náklady. Je důležité zmínit, že ne všechny koncepty SMR obsahují veškeré výše uvedené vlastnosti, nebo je obsahují pouze částečně v závislosti na tom, jak jsou tyto koncepty koncipované a pokročilé z technologického hlediska. Dále je popsáno zasazení SMR v legislativní úpravě České republiky a jejich klasifikace podle technologií.

V následující kapitole 3 je zhodnocen současný stav energetiky v České republice, v níž se na výrobě elektrické energie podílí emisní zdroje okolo 48 % a na výrobě tepelné energie pro dálkové vytápění se podílí zdroje na uhlí a zemní plyn přes 68 %. Dále je popsán plán přechodu ČR k nízkouhlíkové energetice a okrajové podmínky nasazení SMR v ČR. Ve světě existuje přes 80 konceptů SMR v různých fázích vývoje a nasazení. Z hlediska připravenosti konceptů SMR se nejbližší ke komerčnímu nasazení nachází SMR s technologií PWR, jejichž první reaktory by mohly být uvedeny do provozu již okolo roku 2030. Mezi tyto koncepty patří BWRX-300, NUWARD™, SMART, SMR-160, Rolls-Royce SMR a VOYGR™. SMR s reaktory IV. generace budou uvedeny do provozu pravděpodobně až na konci 30. let 21. století a k jejich komerčnímu nasazení dojde pravděpodobně až v průběhu 40. let.

V kapitole 4 je popsán koncept sekundárního okruhu SMR, jež by se mohl uplatit v ČR. Pro návrh této koncepce je zvolen SMR s technologií PWR právě z důvodu nejbližšího časového nasazení. V kapitole jsou popsány technologické i pomocné systémy sekundárního okruhu, které jsou nezbytné pro jeho správnou funkci. Dále jsou v práci navržena tři možná uspořádání sekundárního okruhu, a to pro výrobu pouze tepelné, či pouze elektrické energie anebo pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie. U každého uspořádání je popsáno z jakých technologických systémů se skládá a jaké jsou jeho výhody či omezení. Uspořádání II. Okruhu SMR pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie je pravděpodobně optimálním řešením, jelikož umožní nepřetržitý provoz zdroje a zároveň díky kombinované výrobě dojde ke zvýšení celkové účinnosti.

V poslední kapitole 5 jsou popsány klíčové aspekty proveditelnosti konceptu SMR ve zvolené lokalitě. Dále jsou zde uvedeny lokality zvažované pro výstavbu SMR v ČR, z nichž je vybrána jedna možná lokalita do které je vybrán vhodný koncept SMR a proveden koncepční návrh sekundárního okruhu tohoto reaktoru podle okrajových podmínek lokality. Zvolenou lokalitou je uhelná elektrárna Tušimice nacházející se v blízkosti města Kadaň, v níž je možné po ukončení provozu této elektrárny realizovat výstavbu elektrárny o 6 anebo 12 reaktorech typu VOYGR™. Reaktor typu VOYGR™ může poskytnout výkon na svorkách generátoru $P_E = 74,15 \text{ MW}$ a odběrový tepelný tok $\dot{Q}_O = 30 \text{ MWt}$ za předpokladu přivedeného tepelného výkonu $\dot{Q}_P = 250 \text{ MWt}$. Výhodou reaktoru VOYGR™ je přirozená konvekce chladiva, u které není potřeba cirkulačního čerpadla v primárním okruhu, což může snížit vlastní spotřebu elektrárny o 20 až 30 %. Celková účinnost oběhu η_{celk} je rovna 41,66 %. Na závěr práce je sepsáno krátké shrnutí přínosu malých modulárních reaktorů pro energetiku v ČR, jež mají velký potenciál uplatnění při přechodu k nízkouhlíkové energetice. Otázkou pro další bádání je, zda se SMR uplatní ve větší míře při tomto přechodu za předpokladu dodržení stanovených časových rámců. Jelikož SMR nejsou prozatím komerčně rozšířené a ke zprovoznění prvních komerčně využívaných jednotek dojde až okolo roku 2030.

Doufám, že tato práce povede k inspiraci pro zpracování podrobnějších návrhů, jelikož na tuto práci lze navázat zpracováním detailnějšího návrhu sekundárního

okruhu malého modulárního reaktoru s technologií PWR, anebo s využitím i jiné technologie.

Věřím, že jsem splnil veškeré stanovené cíle v této diplomové práci a alespoň částečně přispěl k osvětě problematiky malých modulárních reaktorů a jejich sekundárních okruhů. Právě prohloubení znalostí odborné veřejnosti v této problematice považuji za jeden z hlavních cílů této práce, jelikož do dnešní doby neexistuje příliš mnoho prací zabývajících se podrobně touto problematikou.

Za osobní přínos této diplomové práce považuji prohloubení znalostí a orientaci v problematice malých modulárních reaktorů, s tím souvisejícími sekundárními okruhy jaderných reaktorů, energetikou ČR, psaní odborných textů, analýz výsledků a stylizaci závěrů odborných textů.

Seznam literatury a zdrojů informací

- [1] ANS. Interim Report of the American Nuclear Society President's Special Committee on Small and Medium Sized Reactors (SMR): Generic Licensing Issues. In: *ans.org* [online]. Illinois: American Nuclear Society, 2010 [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <http://www2.ans.org/pi/smr/ans-smr-report.pdf>
- [2] ANS. NUWARD SMR to be test case for European regulatory review. In: *ans.org* [online]. Illinois: American Nuclear Society, 2022 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.ans.org/news/article-4033/nuward-smr-to-be-test-case-for-european-regulatory-review/>
- [3] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. 1. vyd. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 04-237-81.
- [4] BELLONA. Nuclear icebreaker Lenin. In: *bellona* [online]. 2003 [vid. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://bellona.org/news/arctic/russian-nuclear-icebreakers-fleet/2003-06-nuclear-icebreaker-lenin>
- [5] BUFKA, Aleš a Miloslav MODLÍK. *Energetická dovozní závislost České republiky v letech 2010–2020* [online]. Praha: MPO ČR, 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/energeticke-bilance/2022/3/Dovozni-zavislost-CR-2010-2020.pdf>
- [6] ČEPS, a.s. *Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040 (MAF CZ) - 2021* [online]. Praha: ČEPS, a.s., 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/elektroenergetika/2022/2/Hodnoceni-zrojove-primerenosti-elektrizacni-soustavy-CR_2021_v2.pdf
- [7] ČERŇAN, Martin. *Cvičení č. 9 z předmětu ENY - Příklad 4.1*. Praha: ČVUT v Praze. 13. duben 2021
- [8] ČEZ, a.s. Budoucnost jaderných technologií. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/budoucnost-jadernych-technologiei>

- [9] ČEZ, a.s. Elektrárny Tušimice. In: *ČEZ* [online]. Praha: ČEZ, 2023 [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarny-tusimice-58175>
- [10] ČEZ, a.s. *ELEKTRICKÝ GENERÁTOR*. In: *Svět energie* [online]. Praha: Simopt, 2020 [vid. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/elektricky-generator/vyklad>
- [11] ČEZ, a.s. MALÉ A MIKRO REAKTORY. In: *Svět energie* [online]. Praha: Simopt, 2020 [vid. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/male-a-mikro-reaktory/vyklad>
- [12] ČEZ, a.s. Typy reaktorů. In: *Svět energie* [online]. Praha: Simopt, 2020 [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-podrobne/charakteristika-zdroje/typy-reaktoru>
- [13] ČHMÚ. Hlásná a předpovědní povodňová služba. In: *chmi.cz* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2023 [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/vodnosti/vodnosti.html#prikklad>
- [14] DOLEŽAL, Jaroslav, Jiří ŠŤASTNÝ, Jan ŠPETLÍK, Stanislav BOUČEK a Zbyněk BRETTSCHEIDER. *Jaderné a klasické elektrárny*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [15] DONE, s.r.o. Teplárenství - Dodávka energie. In: *mojeenergie.cz* [online]. 2023 [vid. 2023-05-07]. Dostupné z: <http://www.mojeenergie.cz/cz/teplarenstvi-dodavka-energie#Decentral>
- [16] DUSPIVA JIŘÍ. Posouzení technologie TEPLATOR. In: *ALL FOR POWER* [online]. Praha: AF POWER agency a.s., 2022 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/posouzeni-technologie-teplator-547>

- [17] ERÚ. *Roční zpráva o provozu ES ČR pro rok 2021* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/rocnizprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>
- [18] ERÚ. *Roční zpráva o provozu teplárenských soustav ČR za rok 2021* [online]. Jihlava: Energetický regulační úřad, 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/kopie-z-rocnizprava-o-provozu-teplarenskych-soustav-cr-za-rok-2021>
- [19] EVROPSKÁ UNIE. Zelená dohoda pro Evropu. In: *www.consilium.europa.eu* [online]. 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/>
- [20] GEN IV INTERNATIONAL FORUM. *Technology Systems* [online]. [vid. 2023-02-22]. Dostupné z: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9353/systems
- [21] GOLDBERG, Stephen M. a Robert ROSNER. *Nuclear Reactors: Generation to Generation* [online]. B.m.: American Academy of Arts and Sciences, 2011 [vid. 2022-12-07]. ISBN 0-87724-090-6. Dostupné z: <https://www.amacad.org/sites/default/files/academy/pdfs/nuclearReactors.pdf>
- [22] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-01-01220-4.
- [23] IAEA. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2020 Edition* [online]. 2020 [vid. 2022-10-18]. Dostupné z: https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf
- [24] IAEA. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2022 Edition* [online]. 2022 [vid. 2022-10-18]. Dostupné z: https://nucleus.iaea.org/sites/smr/Shared%20Documents/2022%20IAEA%20SMR%20ARIS%20Booklet_rev11_with%20cover.pdf

- [25] IAEA. Economic Evaluation of Alternative Nuclear Energy Systems Supplement for the INPRO ASENES Service [online]. 2022 [vid. 2022-12-14]. Dostupné z: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-2014web.pdf>
- [26] IAEA. PRIS - Reactor status reports - In Operation & Suspended Operation [online]. 2022 [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByType.aspx>
- [27] JEŘÁBKOVÁ, Irena. INTEGROVANÉ POVOLENÍ pro zařízení „Elektrárna Tušimice II – Výroba a dodávka elektrické energie a tepla“ společnosti ČEZ, a.s., Praha 4, provozovatel Elektrárny Tušimice. In: <https://ippc.mzp.cz/> [online]. Ústí nad Labem: Krajský úřad Ústeckého kraje, odbor životního prostředí a zemědělství, 2023 [vid. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://ippc.mzp.cz/ippc/ippc.nsf/%24pid/mzpprhv1uut2>
- [28] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. *Teplárenství*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-7204-222-X.
- [29] KADRNOŽKA, Jaroslav a Ladislav OCHRANA. *Teplárenství*. Brno: CERM, 2001.
- [30] KLOBOUČEK, Eduard. Malé modulární reaktory z pohledu schvalovacích procesů. In: *youtube.com* [online]. 2022 [vid. 2022-12-08]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=0sgKH3fkFmE&ab_channel=Institutprove%C5%99ejnoudiskusi
- [31] KŘÍŽ LADISLAV. *V Temelíně vznikne prostor pro malé modulární reaktory* [online]. Praha: ČEZ. 2022 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/v-temeline-vznikne-prostor-pro-male-modularni-reaktory-156986>
- [32] LIOU JOANNE. What are Small Modular Reactors (SMRs)? In: *IAEA* [online]. Vienna: IAEA, 2021 [vid. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>

- [33] MIGNACCA, B. a G. LOCATELLI. Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **118** [vid. 2022-12-14]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/J.RSER.2019.109519
- [34] MINAPREM.COM. Difference Between Thermal Neutron and Fast Neutron. In: *difference.minaprem* [online]. nedatováno [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://www.difference.minaprem.com/npp/difference-between-thermal-neutron-and-fast-neutron/>
- [35] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR. *Posouzení dekarbonizace dálkového vytápění v České republice* [online]. 2022 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/posouzeni-dekarbonizace-dalkoveho-vytapeni-v-cesku--268470>
- [36] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR. *Státní energetická koncepce České republiky* [online]. 2014 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statni-energeticka-politika/2016/12/Statni-energeticka-koncepce-_2015_.pdf
- [37] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR a MINISTERSTVO FINANČÍ ČR. *Národní akční plán rozvoje jaderné energetiky v České republice* [online]. 2015 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54251/61936/640148/priloha001.pdf>
- [38] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR a MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ ČR. *Průběžné výstupy a doporučení Uhelné komise* [online]. 2021 [vid. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/uhelna-komise/uhelna-komise--248771>

- [39] NIK. Americká společnost Holtec tvrdí, že pro výstavbu modulárního reaktoru může použít jakoukoli uhelnou elektrárnu. In: *ekonomickydenik.cz* [online]. Praha: Media Network, 2023 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/americka-spolecnost-holtec-tvrdi-ze-pro-vystavbu-modularniho-reaktoru-muze-pouzit-jakoukoli-uhelnou-elektrarnu/>
- [40] NOVÁK, Martin. *Bezpečnost jaderných elektráren* [online]. Plzeň: Fakulta strojní Západočeské univerzity v Plzni. 2019 [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~novakm42/clovek_a_energie-KKE-CE_2019_2020/CE_9_cviceni_podklady.pdf
- [41] NOVOTNÝ, L. a J. (ČEZ) LÍMAN. Malé jaderné reaktory • Kariérní dny FS a FEL. In: *youtube.com* [online]. Praha: ČVUT FEL, 2023 [vid. 2023-05-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=nCWYIVqrgvw&ab_channel=CVUTFEL
- [42] NUCLEAR ENERGY AGENCY. Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities [online]. 2021 [vid. 2022-12-08]. Dostupné z: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-03/7560_smr_report.pdf
- [43] PIORO, Igor L. *Woodhead Publishing Series in Energy: Number 103: Handbook of Generation IV Nuclear Reactors* [online]. 1. vydání. Duxford, Velká Británie: Elsevier Ltd., 2016. ISBN 9780081001493. Dostupné z: doi:10.1016/C2014-0-01699-1
- [44] PUCHNAR, Jiří. Reaktory 4. generace - rychlé reaktory FNR a další. In: *oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2016 [vid. 2022-12-07]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/reaktory-4-generace-rychle-fnr-a-dalsi>
- [45] ROLLS-ROYCE PLC. Rolls-Royce Small Modular Reactors [online]. 2023 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/innovation/small-modular-reactors.aspx#section-why-rolls-royce-smr>

- [46] SETH, Kirshenberg, Jackler HILARY, Eun JANE, Oakley BRIAN a Goldenberg WIL. *Small Modular Reactors: Adding to Resilience at Federal Facilities* [online]. prosinec 2017 [vid. 2022-12-12]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/ne/downloads/small-modular-reactors-adding-resilience-federal-facilities>
- [47] SÚJB. Malé modulární reaktory: Jak je vidí SÚJB? In: *sujb.cz* [online]. 2021 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/aktualne/detail/male-modularni-reaktory-jak-je-vidi-sujb>
- [48] ŠKOPEK, Jan. *Tepelné turbíny a turbokompresory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2010. ISBN 978-80-7043-862-6.
- [49] ŠTAMBERG, Karel a Rostislav SILBER. *Chemie provozu jaderných elektráren* [online]. 2007 [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.jaderna-chemie.cz/data/documents/vyuka/stamberg/CHJE.pdf>
- [50] ÚJV ŘEŽ, a. s. HeFASTo - projekt rychlého plynem chlazeného modulárního reaktoru. In: *ujv.cz* [online]. 2023 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/veda-a-vyzkum/hefasto>
- [51] VÁCLAVEK, Martin. Perspektivy malých modulárních reaktorů. In: *oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2016 [vid. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/perspektivy-malych-modularnich-reaktoru>
- [52] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Molten salt reactor. In: *en.wikipedia.org* [online]. B.m.: Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2023 [vid. 2023-02-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_reactor
- [53] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Nuclear fuel. In: *en.wikipedia.org* [online]. B.m.: Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2023 [vid. 2023-02-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fuel#TRISO_fuel
- [54] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. United States naval reactors. In: *en.wikipedia.org* [online]. B.m.: Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2022 [vid. 2022-12-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_naval_reactors#History

- [55] WITKOWITZ ATOMICA. DAVID SMR. In: *witkowitz-atomica.cz* [online]. 2023 [vid. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.witkowitz-atomica.cz/david-smr#>
- [56] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Fast Neutron Reactors [online]. 2022 [vid. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fast-neutron-reactors.aspx>
- [57] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Small Nuclear Power Reactors [online]. 2022 [vid. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>
- [58] ŽIŽKA, Jan. Flexibilita jaderných elektráren – šance pro zastánce atomu? In: *oenergetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, 2018 [vid. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/flexibilita-jadernych-elektraren-sance-zastance-atomu>
- [59] *UČEBNÍ TEXTY PRO PŘÍPRAVU PERSONÁLU JE - SEKUNDÁRNÍ ČÁST JE VVER 1000 - M1, I. ČÁST*. Brno: ČEZ, a. s., útvar základní příprava JE. 2021

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol/zkratka	Význam	Jednotka
ABWR	Advanced boiling water reactor (Pokročilý varný reaktor)	-
APWR	Advanced pressurized water reactor (Pokročilý tlakovodní reaktor)	-
ASEK	Aktualizovaná Státní energetická koncepce	-
ASN	Autorité de sûreté nucléaire (Francouzský úřad pro jadernou bezpečnost)	-
AZ	Zákon č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů	-
BÚK	Bloková úprava kondenzátu	-
BVS	Bloková výměňková stanice	-
BWR	Boiling water reactor (Varný reaktor)	-
CANDU	CANada Deuterium-Uranium (Kanadský jaderný reaktor moderovaný a chlazený těžkou vodou)	-
ČR	Česká republika	-
ERÚ	Energetický regulační úřad	-
ES	Elektrizační soustava	-
ESBWR	Economic simplified boiling water reactor (Ekonomicky zjednodušený varný reaktor)	-
EU ETS	EU Emissions Trading System (Evropský systém pro obchodování s emisemi)	-
FBR	Fast neutron reactor (Rychlý množivý reaktor)	-
FHR	Fluoride salt-cooled high-temperature reactor (Fluoridovou solí chlazený vysokoteplotní reaktor)	-
FOAK	First of a Kind (První svého druhu)	-
FR	Fast reactor (Rychlý reaktor)	-
G	Generátor	-
GFR	Gas-cooled fast reactor (Rychlý reaktor chlazený plynem)	-
HTGR	High-temperature gas reactor (Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor s provozní teplotou do 750 °C)	-
ChIČ	Čerpadlo chladící vody	-
ChIV	Chladící věž	-
CHÚV	Chemická úpravna vody	-
IAEA	International Atomic Energy Agency (Mezinárodní agentura pro atomovou energii)	-
II. Okruh	Sekundární okruh	-
iPWR	Integral pressurized water reactor (Tlakovodní reaktor s integrálním uspořádáním)	-
JE	Jaderná elektrárna	-
K	Kondenzátor	-
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla	-
LFR	Lead-cooled fast reactor (Rychlý reaktor chlazený roztaveným olovem)	-

LOCA	Loss-of-coolant accident (Havárie se ztrátou chladiva)	-
Lokalita	tzv. „území k umístění“ dle § 47 zákona č. 263/2016 Sb., atomový zákon, ve znění pozdějších předpisů	-
LWR	Light-water reactor (Lehkovodní reaktor)	-
MAF CZ	Hodnocení zdrojové přiměřenosti ES ČR do roku 2040	-
MSFR	Molten salt fast reactor (Rychlý reaktor s roztavenou solí)	-
MSR	Molten salt reactor (Reaktor s roztavenou solí)	-
NČ/KČ/OČ	Napájecí, kondenzátní, oběhové čerpadlo	-
NN s odp.	Napájecí nádrž s odplyňovačem	-
NOAK	N-th of a Kind (N-tý svého druhu)	-
NRC	Nuclear Regulatory Commission (Americký jaderný regulační úřad)	-
NT/VT	Nízkotlaký/vysokotlaký	-
NTO/VTO	Nízkotlaký/vysokotlaký regenerační ohřívač	-
OZE	Obnovitelné zdroje energie	-
PG	Parogenerátor	-
PHWR	Pressurized heavy-water reactor (Těžkovodní reaktor)	-
PŘ	Přihřívač	-
PWR	Pressurized water reactor (Tlakovodní reaktor)	-
RV/RS	Redukční ventil/stanice	-
S	Spotřebitel	-
S	Separátor	-
SCWR	Supercritical water reactor (Superkritický vodní reaktor)	-
SFR	Sodium-cooled fast reactor (Rychlý reaktor chlazený tekutým sodíkem)	-
SMR	Small modular reactor (Malý modulární reaktor)	-
STUK	Säteilyturvakeskus (Finský úřad pro radiační a jadernou bezpečnost)	-
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost	-
T	Turbína	-
TV	Tepelný výměník	-
UK	United Kingdom (Spojené království)	-
USA	United States of America (Spojené státy americké)	-
UV	Uzavírací ventil	-
VHTR	Very-high-temperature reactor (Vysokoteplotní plynem chlazený reaktor s provozní teplotou nad 750 °C)	-
ZHP	Zóna havarijního plánování	-
c_w	Měrná tepelná kapacita vody	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
e	Modul teplárenské výroby elektřiny	(-)
g	Tíhové zrychlení	(m·s ⁻²)
h	Měrná entalpie	(J·kg ⁻¹)
H	Výtlak čerpadla	(m)
k	Součinitel prostupu tepla	(W·m ⁻² ·K ⁻¹)

p	Tlak	(Pa)
P nebo Q nebo \dot{Q}	Tepelný tok/výkon	(W)
s	Měrná entropie	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
S	Plocha	(m ²)
t nebo T	Teplota	(°C) nebo (K)
\dot{w}	Měrná mechanická práce	(J·kg ⁻¹)
\dot{W}	Mechanická práce	(W)
$\Delta T_{STŘ}$	Střední teplotní spád výměníku	(K)
α	Teplárenský součinitel	(-)
α_i	Koeficient rozdělení toku	(-)
η	Účinnost	(-)
η_t	Tepelná účinnost	(-)
τ_v	Doba využití maximálního zatížení	(h)
ρ	Hustota kapaliny	(kg·m ⁻³)
λ	Součinitele tepelné vodivosti	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)

Seznam příloh

- [1] Příloha č. 1: Výpočetní model sekundárního okruhu SMR ve zvolené lokalitě