



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

HAVÁRIE LEHKOVODNÍCH REAKTORŮ

ACCIDENTS OF LIGHT WATER REACTORS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Bejček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Foral

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Patrik Bejček

ID: 164887

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Havárie lehkovodních reaktorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište primární a sekundární okruh vybrané jaderné elektrárny s lehkovodním reaktorem.
2. Rozved'te pojmy jaderná bezpečnost a stupnice INES.
3. Uved'te příklady havarijních událostí, které mohou nastat, nebo již nastaly při provozu jaderné elektrárny s lehkovodním reaktorem.
4. Zjistěte možnosti simulátorů PCTran pro simulaci těchto událostí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 24. 5. 2016

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Foral

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce

BEJČEK, P. *Havárie lehkovodních reaktorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 62 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Štěpán Foral.

Čestné prohlášení

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně 16. května 2016

.....
Patrik Bejček

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat svému vedoucím Ing. Štěpánu Foralovi za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi velmi pomohly při vypracovávání bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá popisem vybraných částí primárního a sekundárního okruhu jaderné elektrárny s reaktory VVER-440. Dále práce popisuje jadernou bezpečnost, její jednotlivé faktory, a také stupnici INES. Následuje popis společností, které v jaderné bezpečnosti velmi výrazně figurují, přičemž největší pozornost je věnována SÚJB. V části, věnující se jaderné bezpečnosti, jsou nastíněny události, které mohou v jaderné elektrárně nastat. Podrobněji je potom popsána havárie spojená s únikem chladiva Large Break LOCA. V praktické části se práce zabývá popisem a návodem k simulátoru PCTran od společnosti Micro-Simulation Technology. V závěrečné části práce je vytvořena analýza vybraných parametrů nasimulovaných v simulátoru PCTran, parametrů, které byly nasimulovány v simulátoru RELAP 5, a také výpočet teplotních parametrů pro palivo TVSA-T a jejich simulace.

Abstract

This thesis deals with the description of primary and secondary circuit of nuclear power plant with reactor VVER-400. Moreover, this thesis describes nuclear safety, its particular factors, and also international nuclear event scale. It is followed by a description of companies playing a significant role in the field of nuclear safety and a close attention is paid to SÚJB. In a section dedicated to nuclear safety, the focus is on events which can occur in nuclear power plant. In addition, the accident Large Break LOCA is described in detail. The practical part deals with the description and instructions to simulator PCTran developed by Micro-Simulation Technology. In the last part, there is an analysis of selected parameters which are simulated in simulator PCTran, parameters simulated in simulator RELAP5 5 and also the calculation of the temperature parameters of fuel TVSA-T and their simulation.

Klíčová slova

Jaderná elektrárna, jaderný reaktor, jaderná bezpečnost, stupnice INES, simulátor PCTran

Key words

Nuclear power plant, nuclear reactor, nuclear safety, international nuclear event scale, simulator PCTran

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
1 ÚVOD	12
2 PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ OKRUH JADERNÉ ELEKTRÁRNY	13
2.1 PRIMÁRNÍ OKRUH.....	13
2.1.1 JADERNÝ REAKTOR	13
2.1.2 PAROGENERÁTOR	16
2.1.3 KOMPENZÁTOR OBJEMU	18
2.1.4 HLAVNÍ CÍRKULAČNÍ ČERPADLA	19
2.1.5 HLAVNÍ UZAVÍRACÍ ARMATURA.....	19
2.2 SEKUNDÁRNÍ OKRUH	20
2.2.1 PARNÍ TURBÍNA.....	20
2.2.2 KONDENZÁTOR	20
2.2.3 NÍZKOTLAKÁ REGENERACE A NAPÁJECÍ NÁDRŽE	21
2.2.4 NAPÁJECÍ SYSTÉM A VYSOKOTLAKÁ REGENERACE	21
2.2.5 OKRUH CÍRKULAČNÍ CHLADÍCÍ VODY	21
3 BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY JADERNÝCH ELEKTRÁREN	23
3.1 KONTEJNMENTOVÝ SYSTÉM	23
3.1.1 VAKUO-BARBOTÁŽNÍ SYSTÉM	24
3.1.2 BEZPEČNOST A TESTOVÁNÍ KONTEJNMENTŮ	25
3.2 AKTIVNÍ SPRCHOVÝ SYSTÉM.....	25
3.3 REGULAČNÍ KAZETY	25
3.4 PASIVNÍ SYSTÉM HAVARIJNÍHO CHLAZENÍ.....	25
3.5 VYSOKOTLAKÝ AKTIVNÍ SYSTÉM	26
3.6 NÍZKOTLAKÝ AKTIVNÍ SYSTÉM.....	26
3.7 NOUZOVÉ NAPÁJENÍ EDU	27
3.8 DIESELGENERÁTOROVÁ STANICE.....	28
3.9 ZÁLOŽNÍ BATERIOVÉ ČLÁNKY	28
4 JADERNÁ BEZPEČNOST A STUPNICE INES.....	29
4.1 JADERNÁ BEZPEČNOST	29
4.1.1 HLOUBKOVÁ OCHRANA	29
4.1.2 RADIAČNÍ OCHRANA	29
4.1.3 LIDSKÝ FAKTOR	29
4.1.4 MEZINÁRODNÍ AGENTURA PRO ATOMOVOU ENERGIÍ (MAAE)	30
4.1.5 INFORMAČNÍ SYSTÉM WANO (WORLD ASSOCIATION OF NUCLEAR OPERATORS)	30

4.1.6 TECHNICKÁ INSPEKCE ČESKÉ REPUBLIKY (TIČR)	31
4.1.7 STÁTNÍ ÚŘAD PRO JADERNOU BEZPEČNOST (SÚJB).....	31
4.2 STUPNICE INES.....	32
4.2.1 PŘÍKLADY JADERNÝCH UDÁLOSTÍ HODNOCENÝCH DLE STUPNICE INES	33
5 INICIAČNÍ UDÁLOSTI JADERNÝCH ELEKTRÁREN S LEHKOVODNÍM JADERNÝM REAKTOREM.....	35
5.1 UDÁLOST LOCA (LOSS OF COOLANT ACCIDENT).....	35
6 SIMULÁTORY PCTRAN.....	38
6.1 SEZNÁMENÍ S UŽIVATELSKÝM PROSTŘEDÍM PCTRAN VVER 1000.....	38
6.2 NASTAVENÍ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT REAKTORU VVER 1000	39
6.3 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY, HAVÁRIE A SELHÁNÍ	42
6.4 GRAFICKÉ PRŮBĚHY SIMULACE, SLED UDÁLOSTÍ A ZOBRAZENÍ STAVU LÁTEK.....	45
6.5 NASTAVENÍ PARAMETRŮ JADERNÉ ELEKTRÁRNY	47
7 VERIFIKACE VÝSLEDKŮ ZE SIMULÁTORU PCTRAN.....	49
7.1 NASTAVENÍ PARAMETRŮ	49
7.2 SIMULACE A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	49
8 VÝPOČET A SIMULACE TEPELNÝCH PARAMETRŮ PALIVA TVSA-T	53
8.1 VÝPOČET TEPELNÝCH PARAMETRŮ.....	53
8.2 SIMULACE VYPOČTENÝCH TEPELNÝCH PARAMETRŮ	55
9 ZÁVĚR.....	58
10 LITERATURA	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Schéma primárního a sekundárního okruhu jaderné elektrárny [2].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2: Řez jaderným reaktorem VVER-440/V-213 [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 3: Detailní řez palivové tyče [9]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4: Schéma parogenerátoru reaktoru VVER-440, Upraveno a převzato z [5]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5: Kompenzátor objemu reaktoru VVER-440 [20]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6: Chladicí věže JE Dukovany [11]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7: Řez JE s reaktorem VVER-440/V213 [38]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8: Systém klobouček – mezera (1 – klobouček, 2 – mezera), Upraveno a převzato z [13] ...</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9: Vysokotlaký aktivní systém, Upraveno a převzato z [30]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 10: Nízkotlaký aktivní systém, Upraveno a převzato z [31]</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 11: Jednotlivé stupně stupnice INES [15]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 12: Přehled událostí INES 1 a 0 v JE Dukovany v letech 2000 až 2006 [17]</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 13: Obtok chladiva kolem aktivní zóny reaktoru s LB LOCA [22].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 14: Popis uživatelského prostředí simulátoru PCTran VVER 1000.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 15: a) Zapnutý pouze jede z ohříváků b) Všechny ohříváky vypnuty c) Tabulka parametrů ohříváků.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 16: a) Zapnutý ventil b) Vypnutý ventil c) Z části otevřený ventil d) Tabulka parametrů ventilu</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 17: a) Zapnuté čerpadlo b) Vypnuté čerpadlo c) Selhání čerpadla d) Tabulka parametrů čerpadla.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 18: a) Zapnutý ventilátor b) Vypnutý ventilátor c) Selhání ventilátoru d) Tabulka parametrů ventilátoru</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 19: a) Zapnutý/Vypnutý výměník tepla b) Selhání výměníku tepla c) Tabulka parametrů výměníků tepla.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 20: Seznam možných havárií v simulátoru PCTran VVER 1000.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 21: Parametry vybrané havárie</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 22: a) Nabídka počátečních podmínek b) Seznam počátečních podmínek</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 23: Vytvoření nové počáteční podmínky</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 24: a) Cesta k nabídce grafických průběhů simulací b) Seznam možností grafických průběhů</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 25: Nabídka nastavení parametrů grafického průběhu</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 26: a) Cesta k nabídce exportu grafických průběhů b) Nabídka exportu grafických průběhů</i>	<i>46</i>

<i>Obr. 27: a) Seznam proběhlých událostí b) Tabulka nastavení zobrazení a exportu těchto událostí</i>	46
<i>Obr. 28: Uživatelské prostředí Dose Mimic</i>	47
<i>Obr. 29: a) Seznam nabídky Edit (Editovat) b) Příklad tabulky jednotlivých parametrů</i>	47
<i>Obr. 30: Tepelný výkon reaktoru v závislosti na čase</i>	50
<i>Obr. 31: Grafická závislost průběhu maximální teploty pokrytí paliva na čase</i>	50
<i>Obr. 32: Závislost tlaků v RCS na čase</i>	51
<i>Obr. 33: Závislost množství chladiva, které proteče trhlinou na čase</i>	52
<i>Obr. 34: Grafická závislost jednotlivých integrálních vodivostí</i>	54
<i>Obr. 35: Průběh teplot v palivovém proutku a jeho pokrytí</i>	54
<i>Obr. 36: Závislost maximální teploty pokrytí paliva s aktivními havarijními chladicími systémy (LB LOCA)</i>	55
<i>Obr. 37: Závislost maximální teploty pokrytí paliva bez aktivních havarijních chladicích systémů (LB LOCA)</i>	56
<i>Obr. 38: Závislost maximální teploty paliva s aktivními havarijními chladicími systémy (LB LOCA)</i>	57
<i>Obr. 39: Závislost maximální teploty paliva bez aktivních havarijních chladicích systémů (LB LOCA)</i>	57

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Seznam identifikátorů jednotlivých stupňů stupnice INES [16]</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 2: Seznam oddílů souboru ListData.mdb</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 3: Nastavované parametry v simulátoru PCTran [37]</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 4: Vypočtené teplotní parametry pro palivo TVSA-T.....</i>	<i>55</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

INES	The International Nuclear Event Scale
NEA	Agentura pro jadernou energii
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
VVER	Vodo-vodní energetický reaktor
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
JE	Jaderná elektrárna
MAAE	Mezinárodní agentura pro atomovou energii
OSART	Operational Safety Team
INSAG	International Nuclear Safety Group
WANO	World Association of Nuclear Operators
TIČR	Technická Inspekce České republiky
U. S. NRC	The U. S. Nuclear Regulatory Commission
LOCA	Loss of coolant accident
LB LOCA	Large break Loss of coolant accident
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany
PG	Parogenerátor
TPCT	Fuel Peak Clad Temperature
TFPK	Fuel Peak Clad Temperature
$P_{1kazeta}$	Výkon jedné palivové kazety
$P_{1proutek}$	Výkon jednoho palivového proutku
$q_{H(TVSA-T)}$	Lineární tepelný výkon
ϑ_{UO2}	Integrální tepelná vodivost paliva
ϑ_2	Rozdíl mezi spočítanou ϑ_{UO2} a novou integrální tepelnou vodivostí
T_{avg}	Průměrná teplota palivové kazety při 100% výkonu

1 ÚVOD

Základním faktorem pro růst lidské kultury, vědy a dalších odvětví lidské společnosti je vytváření a využívání různých zdrojů energie. Procesy vytváření a využívání energie jsou základními procesy, které zkoumá fyzika. Z důvodu vzrůstající spotřeby energie jsou kladeny čím dál větší nároky na výrobu elektrické energie a také na její zdroje. Tyto potřeby můžeme pokrýt z obnovitelných a neobnovitelných zdrojů. Mezi obnovitelné zdroje je řazeno sluneční záření, vítr, voda, atd. Z neobnovitelných zdrojů je nejvíce využíváno uhlí, zemní plyn a ropa.

Z důvodu docházejících zásob těchto zdrojů musíme hledat i jiné alternativy k výrobě energie. Protože nízká výkonová hustota obnovitelných zdrojů má za následek využití pouze na malých energetických celcích a také geografickou polohu, je předpoklad, že bude podíl těchto zdrojů v rozmezí 5 až 10 % z celkové spotřeby energie na celém světě. Další a asi jedinou vhodnou cestou k výrobě elektrické energie jsou jaderné elektrárny, které k výrobě energie využívají jaderné štěpení nebo jadernou syntézu. [1]

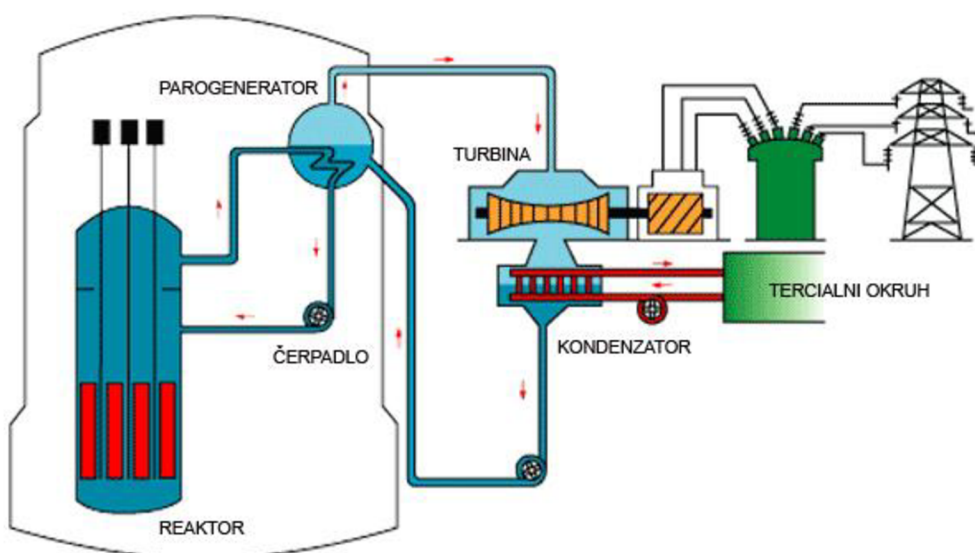
Jelikož je jaderná energetika a získávání energie z jaderného štěpení nebo jaderné syntézy velmi složitý proces, je nutné zajistit tzv. jadernou bezpečnost a vyloučit rizika, která by mohla nastat. Dá se říci, že se žádné jiné lidské činnosti nedostává tak výrazné bezpečnosti jako provozu jaderných elektráren. Všechny jaderné elektrárny ve světě musí podléhat velmi striktním a přísným bezpečnostním pravidlům. Tato pravidla se s postupem času a řadou událostí, které v historii jaderných elektráren nastaly, zpříšňovala, až do podoby, v jaké jsou dnes. V žádném oboru nebo zařízení nemůžeme dosáhnout absolutní bezpečnosti, a proto se v jaderných oborech uvádí pojem „ maximálně dosažitelná bezpečnost“.

Po dohodě s vedoucím práce se bakalářská práce zaměřuje na reaktory typu VVER 440, protože popis všech typů a modifikací lehkovodních jaderných reaktorů by byl příliš obsáhlý.

2 PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ OKRUH JADERNÉ ELEKTRÁRNY

2.1 Primární okruh

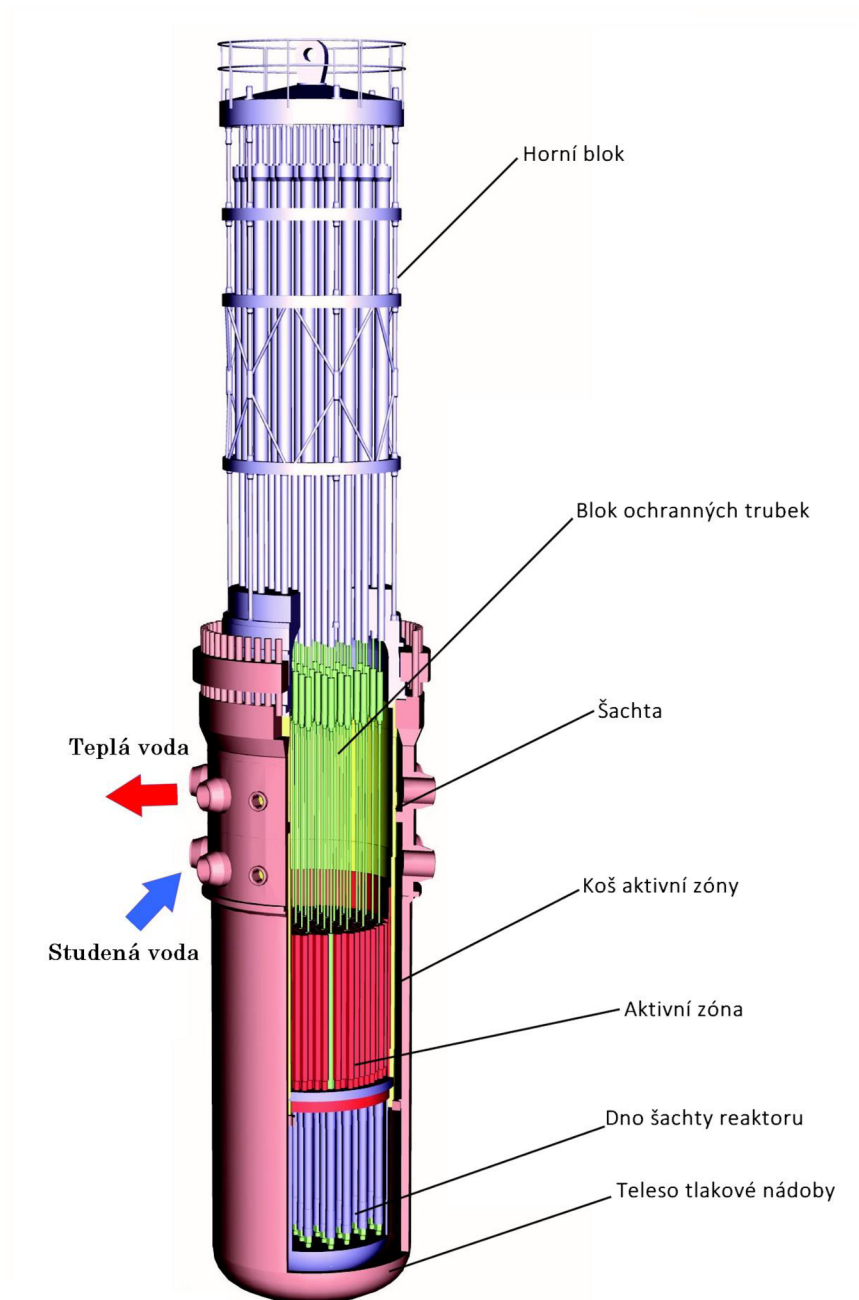
Zásadním rozdílem od jaderných elektráren s varnými reaktory, kde se pára tvoří přímo uvnitř reaktoru a odchází z něj do turbíny, jsou jaderné elektrárny s reaktory typu VVER-440, které jsou tvořeny jako dvouokruhové. V uzavřeném primárním okruhu proudí radioaktivní voda, která je od sekundárního okruhu oddělena parogenerátorem. Primární okruh je tvořen zařízeními, která slouží k přenosu tepelné energie z aktivní zóny do parogenerátoru. Pro cirkulaci tepelné energie je zde šest cirkulačních čerpadel. Primární okruh se skládá z reaktoru, parogenerátoru, šesti hlavních cirkulačních čerpadel, kompenzátoru objemu a primárního potrubí. Schéma primárního a sekundárního okruhu je vidět na Obr. 1. [1]



Obr. 1: Schéma primárního a sekundárního okruhu jaderné elektrárny [2]

2.1.1 Jaderný reaktor

Je základní energetickou částí jaderné elektrárny. Samotná reaktorová nádoba je složena ze dvou základních částí, a to z těla nádoby a víka, ve kterém jsou zabudovány nástavce pro zapojení pohonů regulačních tyčí. Nejčastěji se reaktorová nádoba vyrábí z nízkolegované oceli, která je opatřena z vnitřní strany návarem z nerezavějící oceli. Dále je mezi aktivní zónou a reaktorovou nádobou umístěna tepelná izolace, která zabraňuje poškození nádoby radiací. Vstupní a výstupní hrdla jsou umístěna u vrchu reaktorové nádoby tak, aby při každé poruše vždy zůstala zatopená celá aktivní zóna chladící vodou. Pro přívod chladící vody jsou využívána vstupní hrdla, která nejdříve přivádí chladící vodu přes koš aktivní zóny a stěnu nádoby až do spodní části. V této části se cesta vody obrací a odvádí teplo z palivových tyčí pryč přes výstupní hrdla. Aby mohla být chladící voda v aktivní zóně usměrňována, tak jsou z venkovní strany umístěny pravoúhlé segmenty. Dále jsou nad celou aktivní zónou umístěna antivibrační pouzdra chránící regulační tyče před vibracemi. [1]



Obr. 2: Řez jaderným reaktorem VVER-440/V-213 [3]

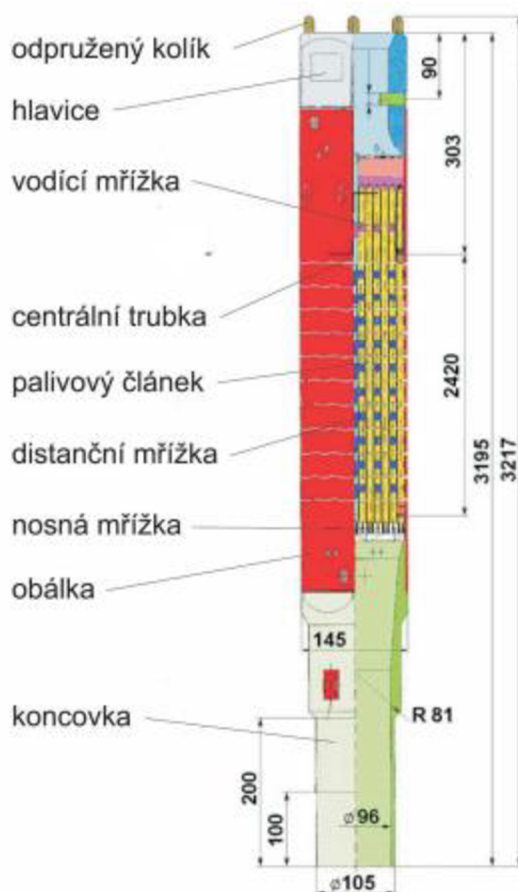
2.1.1.1 Aktivní zóna

Aktivní zónu si lze představit jako soubor palivových článků, které jsou uspořádány v trojúhelníkové mříži. Palivo se musí po určité době používání měnit a odstraňují se vždy nejvíce vyhořelé palivové články z aktivní zóny. V aktivní zóně reaktoru VVER-440 je 349 palivových článků, z čehož je 312 pevných a 37 regulačních. Pomocí regulačních článků se zajišťuje ochrana před havárií, regulace výkonu a kompenzace reaktivity v reaktoru. [1]

2.1.1.2 Palivové tyče

Palivové tyče jsou uspořádány v trojúhelníkové mříži. V reaktoru VVER-440 je 126 palivových tyčí, které jsou udržovány pomocí deseti distančních mřížek v přesně definovaném geometrickém uspořádání. Tyto mřížky jsou spojeny tzv. centrální trubkou ze zirkonia, která je naplněna vodou. Skládají se z palivových sloupců (viz Obr. 3), které jsou uloženy v trubce, a ta je uzavřena koncovkami. V palivovém proutku se nachází pružina, která udržuje tablety v pracovní poloze. Když se palivové proutky vyrábí, tak se plní héliem o tlaku v rozmezí 300 až 700 kPa. V jednom palivovém proutku je obsaženo přibližně 0,93 kg uranu a počáteční obohacení uranem je asi 3,5 %. [1]

Výška palivových tablet se pohybuje mezi 10 až 30 mm a minimální hustota je asi $10\ 200\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. [1]



Obr. 3: Detailní řez palivové tyče [9]

Reaktor VVER-440 má také regulační kazety, které se mohou vertikálně pohybovat a mají dva díly. První (horní) část obsahuje absorpční nástavec a spodní část je pracovní. Regulace u reaktoru VVER-440 se dosahuje změnou výšky regulačních tyčí, čím více jsou zasunuty, tím více neutronů je absorbováno a snižuje se výkon. Naopak pokud budou více vysunuty, tak nebude docházet k absorpci neutronů a výkon bude vyšší. [1]

2.1.1.3 Koš aktivní zóny

Koš aktivní zóny je komponenta reaktoru, která slouží k zachycení a uložení palivových článků a kazet ve vertikální poloze a také zabezpečuje rovnoměrné rozložení chladiva do všech článků rovnoměrně. Základní částí koše je nosná deska s průměrem 3070 mm a o tloušťce přibližně 300 mm. V této desce je 312 děr, do kterých jsou zasunuty konce palivových článků a 37 děr šestibokého tvaru s ucpávkou pro průchod tandemů ARK kazet na dno šachty. Na nosnou desku je navázán plášť, který má uvnitř části, na kterých je umístěn tvarovaný plech, tvarovaný nákržek a pera sloužící k vedení ochranných trubek. Po celém obvodu mezi plechem a pláštěm je vedeno šest trubek. Tyto trubky jsou symetricky zabudovány a slouží k ustanovení detekce systému kontroly při vyměňování paliva.

2.1.1.4 Dno šachty

Je složeno ze svařované konstrukce. Je tvořeno z horní a dolní části. Obě části jsou spojeny ochrannými trubkami a válcovým pláštěm, který má eliptické dno. Dolní deska má v sobě díry pro proudění chladiva mezi kanály ARK kazet a horní deska má díry vybavené clonami. Dno šachty je z nerezové oceli a dochází zde k vyrovnávání rychlosti chladiva a k jeho uklidnění. [5]

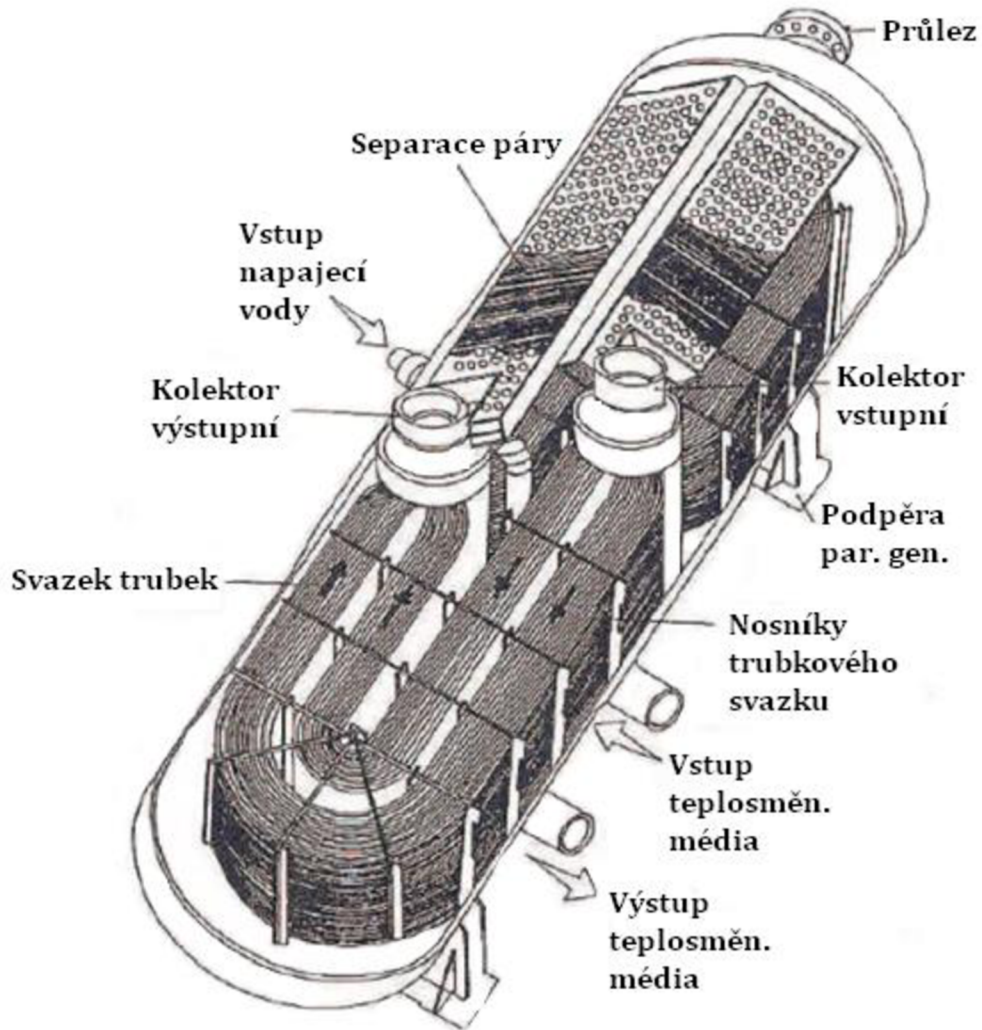
2.1.1.5 Blok ochranných trubek

Blok ochranných trubek je složen ze svařované konstrukce, která má horní a dolní desku. Obě tyto desky jsou spojeny 37 ochrannými trubkami s délkou přibližně 5200 mm pro vedení ARK kazet. K horní desce je přivařen plášť bloku, ke kterému je připojeno 72 přítlačných pružinových bloků. Tyto bloky přitlačují blok ochranných trubek ke koši aktivní zóny, a tím se do nosné desky koše přitlačují také palivové tyče. Blok ochranných trubek má na sobě upevnění trubek termočlánků a také vyvedení pro vnitřní reaktorové měření neutronů. Každá ochranná trubka je vybavena tyčí, která spojuje pohon s ARK kazetou. [5]

2.1.2 Parogenerátor

Parogenerátor je součástí každé cirkulační smyčky v jaderné elektrárně. Je to prvek, který slouží k výměně tepla z primárního okruhu, pracovní látky sekundárního okruhu. Samotné tělo parogenerátoru (viz Obr. 4) je tvořeno válcovou nádobou složenou ze šesti kroužků a dvou den, která mají tvar elipsy. Tělo i dna jsou z uhlíkatého materiálu.

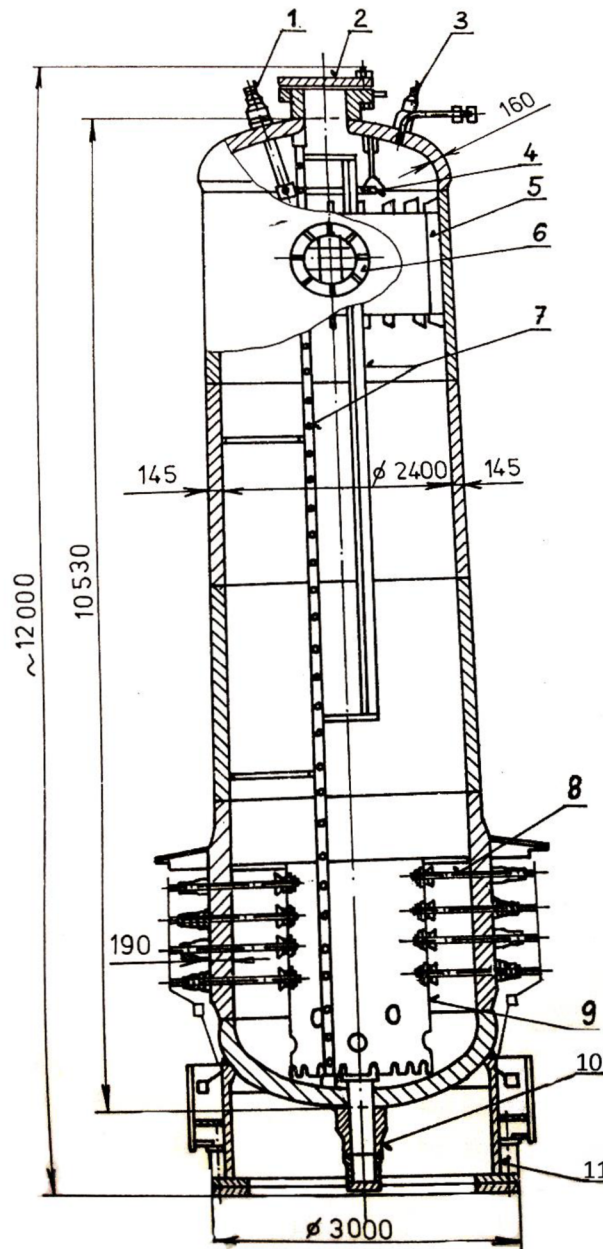
Vnitřní teplosměnná plocha parogenerátoru je tvořena pomocí trubek, které mají tvar U z austenitické nerezové oceli. Tyto trubky jsou napojeny na vstup a výstup kolektoru pro přívod chladiva z primárního okruhu. Teplota primárního chladiva se při jmenovitém výkonu bloku pohybuje kolem 297 °C a výstupní teplota je potom přibližně 267 °C. Teplosměnné trubky jsou uloženy v distančních elementech podpěrného systému. Také jsou celé pod vodou sekundárního okruhu a napájecí voda je přiváděna pod tuto hladinu vody v samotném parogenerátoru. Pára, která se vyrobí v parogenerátoru, je vháněna do sběračů páry přes žaluziový systém a odtud potom do parovodu. [9]



Obr. 4: Schéma parogenerátoru reaktoru VVER-440, Upraveno a převzato z [5]

2.1.3 Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu je důležitý prvek, který slouží k tomu, aby byl tlak v okruhu konstantní. Jelikož je změna výkonu v reaktoru doprovázena změnou střední hodnoty chladiva a protože se jedná o uzavřený okruh, kde se mění i tlak chladiva, tak jsou velké změny tlaků pro plynulý provoz nežádoucí. Kompenzátor objemu (viz Obr. 5) je samostatná, uzavřená nádoba, ve které je pomocný objem pro vyrovnávání tlaků. [6]



Obr. 5: Kompenzátor objemu reaktoru VVER-440 [20]

(1 - nátrubek DN 100, 2 - průlezný otvor, 3 - nátrubek DN 100 pro vývod páry a směry plynů, 4 - rozstříkovací trysky, 5 - tepelný štít, 6 - nástavec k uchycení, 7 - žebřík s ochranným zábradlím, 8 - ponorné elektrické ohříváky, 9 - nosný válec k podepření ponorných elektrických ohříváků, 10 - spojovací hrdlo DN 300, 11 - opěrná konstrukce) [20]

2.1.4 Hlavní cirkulační čerpadla

V jaderné elektrárně je velké množství čerpadel, ale z hlediska náročnosti výrobního procesu a postavení jsou nejdůležitější hlavní cirkulační čerpadla. Největší nároky jsou na ně kladeny z toho důvodu, že pracují za vysokých tlaků a teplot a při provozu je čerpadlo nedostupné z toho důvodu, že jím protéká radioaktivní voda. Jaderné elektrárny s reaktory VVER-440 mají 6 smyček a v každé z nich jedno cirkulační čerpadlo. Tato čerpadla jsou vyráběna jako jednostupňová. Konstruují se jako vertikální, tedy se svislým hřídelem, a elektromotor bývá umístěn nad čerpadlem. Ložiska těchto čerpadel musí vydržet dlouhodobý chod ve vodě při teplotě 100 °C a krátkou dobu až 300 °C. Celé cirkulační čerpadlo je konstruováno, tak aby bez poruchy bylo schopno pracovat alespoň jeden rok, aby revize nebo opravy mohly být prováděny v době odstávky reaktoru při výměně paliva. [20]

2.1.5 Hlavní uzavírací armatura

V EDU je k oddělování hlavní cirkulační smyčky od reaktoru určena hlavní uzavírací armatura. Každá ze smyček obsahuje dvě tyto oddělovací armatury, a to pro horkou a studenou větev.

2.2 Sekundární okruh

Je to okruh, který je svým principem stejný jako u každé elektrárny, která k výrobě elektrické energie využívá páru. Dále pára pokračuje do turbíny, která přeměňuje tepelnou energii na energii rotační a roztáčí generátor, vyrábějící elektrický proud. [7]

Jednou z nejdůležitějších funkcí sekundárního okruhu je efektivní přeměna tepelné energie na mechanickou energii, která se dále převádí na energii elektrickou. Dále máme v sekundárním okruhu systémy nízkotlaké a vysokotlaké regenerace, napájecí nádrž a napájecí systém. [8]

2.2.1 Parní turbína

V jaderné elektrárně je využívána k přeměně tepelné energie na energii mechanickou. Je to tepelný točivý stroj a jeden blok jaderné elektrárny s jaderným reaktorem VVER-440 obsahuje dvě kondenzační parní turbíny o celkovém výkonu 440 MW. Každá turbína je konstruována jako tři tělesová, z čehož jeden díl je vysokotlaký a další dva jsou nízkotlaké. Pracovní otáčky parní turbíny jsou 3000 min^{-1} . Je vyrobena na provoz s vlhkou párou a při jmenovitých podmínkách vstupuje za hodinu do vysokotlaké části turbíny 1356 tun ostré páry, která má tlak 4,42 MPa a teplotu $256 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dochází zde k expanzi, kde se část tepelné energie páry přemění na energii mechanickou. Při expanzi dochází k částečné kondenzaci páry a pára již o vlhkosti přibližně 10 % má nepříznivý vliv na životnost a účinnost turbíny. Proto se tato pára zavede do dvojice separátorů (přihříváčů). Separátory mají za úkol oddělit páru od vlhkosti a přehřát ji na teplotu asi $217 \text{ }^\circ\text{C}$. Poté se pára o tlaku 0,45 MPa přivádí do nízkotlaké části turbíny, kde dochází k další přeměně tepelné energie na mechanickou energii. V nízkotlakých částech se produkuje za jmenovitých podmínek po 30 % celkového výkonu turbosoustrojí, zatímco ve vysokotlaké části je to asi 40 %. [9]

Lopatky nízkotlaké části turbíny, patří k nejnamáhanějším prvkům celého sekundárního okruhu, a proto se dbá na kvalitní materiály použité při výrobě. [7]

Aby parní turbína pracovala správně, tak má několik pomocných systémů. Jsou jimi olejový systém, systém ucpávek páry, systém odvodnění turbíny, hydraulický regulační systém, systém pro zabezpečování, separační a přihřívací systém a systém neregulovaných odběrů. [9]

2.2.2 Kondenzátor

Kondenzátor je dalším důležitým zařízením v sekundárním okruhu. Je to zařízení, které přijímá parovodní směs z nízkotlaké části turbíny. Tato parovodní směs, která do kondenzátoru vstupuje, má vlhkost asi 10 %. Kondenzátor je rozdělen na dva díly a každý z nich je pod jedním z dílů nízkotlaké části parní turbíny. Ke kondenzaci páry dochází odvodem tepla pomocí chladící vody. Z důvodu, že není kondenzátor 100% vzduchotěsný, jsou na něm umístěny tři vodoproudé vývěvy, které zajišťují odvod parovzdušné směsi pryč z kondenzátoru.

Pro přívod cirkulační vody je používána dvojice potrubí, kde vstupní voda má tlak 0,35 MPa a výstupní pak 0,28 MPa. Kondenzátorem za hodinu proteče přibližně $35\,000 \text{ m}^3$ chladící vody, ta má vstupní teplotu od $14,5$ do $32 \text{ }^\circ\text{C}$. Jmenovitá teplota chladící vody je $20 \text{ }^\circ\text{C}$. [9]

2.2.3 Nízkotlaká regenerace a napájecí nádrže

U nízkotlaké regenerace a napájecí nádrže na začátku celého cyklu stéká kondenzát do sběrných vakuových nádob. Z těchto nádob je kondenzát odváděn do sání kondenzátních čerpadel 1. stupně. Dále je kondenzát protlačen až do sání kondenzátních čerpadel 2. stupně přes úpravnu kondenzátu a odtud je kondenzát veden přes nízkotlakou regeneraci až do tepelné úpravy vody. V průběhu průchodu přes nízkotlakou regeneraci se kondenzát ohřívá pomocí páry z neregulovaných odběrů parní turbíny v pěti, sériově řazených výměnících. Kvůli spolehlivosti systému je jeho nízkotlaká regenerace rozdělena na tři nezávislé celky. Funkcí nízkotlaké regenerace je zvyšování účinnosti oběhu. [9]

2.2.4 Napájecí systém a vysokotlaká regenerace

Princip funkce napájecího systému a vysokotlaké regenerace je takový, že po příchodu do napájecí nádrže je kondenzát odsáván a následně je veden do dvoustupňové vysokotlaké regenerace. Ta má za úkol ohřát napájecí vodu na teplotu 223 °C pomocí odběrové páry. Důležitou funkcí vysokotlaké regenerace je omezení tepelného namáhání parogenerátoru, a tím se zvyšuje také účinnost oběhu.

Dále napájecí voda putuje z vysokotlakých regenerací do napájecího kolektoru, ze kterého je vedena až do parogenerátoru přes napájecí hlavy, které slouží k regulaci průtoku. Do každého z parogenerátorů proudí až 460 tun napájecí vody za hodinu.

Jestliže není možné zajistit napájení parogenerátoru, tak je blok odstaven a uveden do havarijního stavu. Do provozu je uveden pouze systém superhavarijního napájení parogenerátoru a do vybraných částí parogenerátoru je vpouštěna demineralizovaná voda z nádrží na tuto vodu. [9]

2.2.5 Okruh cirkulační chladicí vody

V jaderné elektrárně je třeba také chlazení, a k tomu slouží právě okruh cirkulační chladicí vody. Tento systém zajišťuje zejména odvod tepelné energie z kondenzátoru do okolí. Tuto energii můžeme odvádět pomocí velkého zdroje vody nebo chladicími věžemi (viz Obr. 6).

Principem je vhánění vody z hlavního rozváděcího kolektoru do kondenzátoru, kde se její teplota zvýší na 32 °C. Voda s touto teplotou je odváděna do rozvodné plošiny chladících věží, kde je rozstříkována na deskový systém. Díky tomuto systému se zvětšuje povrch vodního proudu, a tím se zvětší intenzita předávání tepla do vzduchu. Voda se částečně odpařuje a vzniklá pára se prouděním vzduchu v chladících věžích dostává do atmosféry. Zbytek vody padá do vany pod chladící věží, odkud je odváděna zpátky do čerpadel cirkulační chladicí vody. Jelikož se voda částečně odpařuje, tak má záměr zahušťování, a proto je nutné okruh této vody odluhovat a doplňovat ztráty, které odpařováním vznikly. [9]



Obr. 6: Chladicí věže JE Dukovany [11]

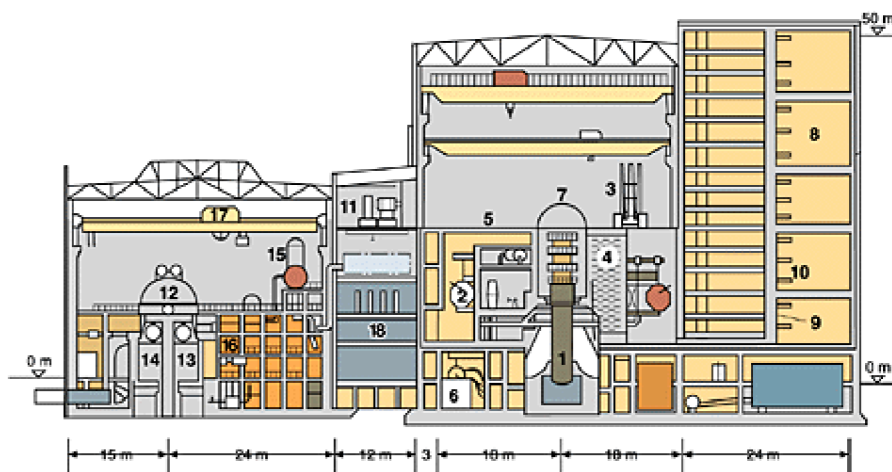
Jmenovitý průtok chladicích věží je udáváný hodnotou $38\,000\text{ m}^3$ za hodinu a jmenovitý výkon je 483 MWt . Při různých teplotách okolí je nutné střídat počet chladicích věží a čerpadel v chodu tak, aby byla teplota vody vystupující z chladicí věže v intervalu přibližně $12,5$ až $32\text{ }^\circ\text{C}$. [9]

3 BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

V jaderné elektrárně je nutno zajistit, aby se nedostaly radioaktivní látky do okolí, a proto je zde spousta zařízení a systémů, které jsou k tomuto účelu určené. Tyto systémy podléhají velkým technologickým nárokům a při projektování se počítá s největší možnou havárií, která může nastat. Probíhají nejdříve dlouhodobé zkušební testy, než se dostanou tato zařízení do provozu jaderné elektrárny. Musí probíhat pravidelné revize, aby se co nejvíce vyloučilo riziko jejich selhání.

3.1 Kontejnmentový systém

Jedním z hlavních bezpečnostních systémů v jaderné elektrárně je kontejnmentový systém. V jaderné elektrárně Dukovany je kontejnmentový systém tvořen silnou betonovou budovou, která má velmi vysokou těsnost vůči okolnímu prostředí (viz Obr. 7). Nejzákladnější odlišností od kontejnmentů západní koncepce je ta, že betonová budova má tvar obdélníku s barbotážní věží. Systém se skládá s hermeticky uzavřených boxů, ve kterých jsou umístěna zařízení reaktoru, potrubí primárního okruhu a lokalizační plynajem, který je spojený s hermetickými prostory, kterých je přibližně 40. [13], [26]



Obr. 7: Řez JE s reaktorem VVER-440/V213 [38]

1 - Reaktorová nádoba, 2 - Parogenerátor, 3 - Zavážecí stroj, 4 - Bazén vyhořelého paliva, 5 - I.okruh, 6 - Systém dodávky napájecí vody, 7 - Viko reaktoru, 8 - Hranice systému I. okruhu, 9 - Barbotážní přepážky, 10 - Pojistné ventily barbotáže, 11 - Vzduchotechnika, 12 - Turbína 2x220 MWe, 13 - Kondenzátor, 14 - Blok turbíny, 15 - Napájecí nádrž s odplyňovákem, 16 - Separátor a přehříváč, 17 - Jeřáb, 18 - Elektrické vybavení a řízení Upraveno a převzato z [38]

Z hermetických prostor, ze kterých je složen kontejnmentový systém JE Dukovany, jsou vytvářeny bezpečnostní analýzy, pro které jsou nejdůležitější: šachta reaktoru, box parogenerátorů a místnost pro obsluhu elektromotorů hlavního cirkulačního čerpadla. [10], [13]

3.1.1 Vakuo-barbotážní systém

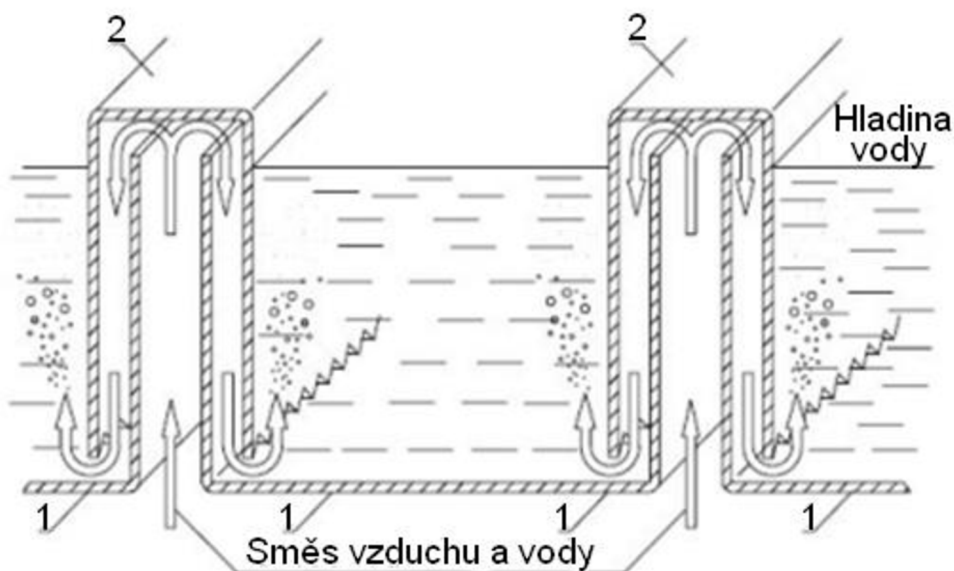
Jedná se o pasivní systém, který není energeticky závislý a je dimenzován na maximální projektovanou havárii. Nachází se v barbotážní věži a tato věž je propojena s kobkami, které jsou hermeticky uzavřeny. Používá se pro potlačení tlaku, v havarijních situacích, u reaktoru typu VVER-440/V-213. Toto potlačení tlaku se používá při havárii, kdy unikne chladivo. Potlačení tlaku se realizuje pomocí expanze páry do velkého objemu. Po tomto kroku se pára kondenzuje v barbotážních žlabech.

Samotná barbotážní věž má rozměry půdorysu 39 x 21,5 m a její výška je 41,9 m. S hermeticky uzavřeným prostorem kontejnmentu je propojena pomocí koridoru, který je rozdělen pomocí železobetonové stěny, která je tlustá 1 m a má dvě části. Maximální těsnosti je zde docíleno pomocí ocelových vystýlek po celém jejím povrchu. Do barbotážní věže se vejde přibližně 1500 m³ vody, a ta je rozdělena do jednotlivých žlabů.

Vakuo-barbotážní systém má tři důležité funkce, a to snížení tlaku v kontejnmentu na atmosférický tlak, zachycení nekondenzovaných plynů a zachycení radioaktivních produktů vzniklých při štěpení. [13]

3.1.1.1 Vakuobarbotážní žlaby

Tyto žlaby jsou vstupní části barbotéru na každém z podlaží barbotážní věže. Je v ní celkem 12 podlaží. Každý žlab stojí na dvou nosnících a tvoří ho sedmnáct sekcí. Každá ze sekcí je tvořena devíti systémy „klobouček-mezera“ (viz Obr. 8). Kloboučky slouží k tomu, aby byl tok páry proudící v mezeře otočen o 180° směrem dolů. [13]



Obr. 8: Systém klobouček – mezera (1 – klobouček, 2 – mezera), Upraveno a převzato z [13]

3.1.2 Bezpečnost a testování kontejnmentů

Důležitou problematikou kontejnmentů je jejich bezpečnost, a proto se každý kontejnment důkladně testuje. Jelikož by bylo velmi náročné a drahé testování kontejnmentu elektrárny v měřítku 1:1, tak se testují zmenšené prototypy. Hlavním bodem testování byl tlak, který daný kontejnment snese. Díky těmto testováním se vyvinuly přesné teoretické modely, které dále slouží k popisu chování elektrárny, bez toho aniž by se kvůli testům musely ničit celé elektrárny. Testování probíhalo tak, že se daný kontejnment naplnil vodou, plynem nebo směsí vody a plynu. Po naplnění se sledovalo, jak se kontejnment chová při rostoucím tlaku. Ocelové struktury vydržely 4krát až 6 krát větší tlak, než ke kterému byly vytvořeny, zatímco betonové struktury pouze 2,5krát až 3,5 krát vyšší tlak. Přitom tlak, na který je kontejnment vytvořený, je asi čtyřnásobek atmosférického tlaku. [4]

3.2 Aktivní sprchový systém

Tento systém slouží ke snížení tlaku v prostoru parogenerátoru při kondenzaci na rozstříkovaných kapkách. Slouží také k odvodu tepla uvolňujícího se při haváriích s únikem chladiva pomocí výměníků, kterými se teplo odvádí ze sprchových systémů. Další funkcí tohoto systému je převod aktivních aerosolů do roztoku pomocí pracovního média. Konečnou úlohou je sbírání roztoku z hermeticky uzavřených prostor a následná recirkulace po filtrování a ochlazování. [13], [27]

Další důležitou částí bezpečnostních systémů je pasivní systém havarijního chlazení, vysokotlaký systém aktivního chlazení a nízkotlaký systém.

3.3 Regulační kazety

Vedle aktivního sprchového systému a vaukobarbotážního systému jsou dalším důležitým bezpečnostním prvkem regulační kazety, které jsou rozděleny do šesti skupin. Prvních pět skupin regulačních kazet není určeno k řízení výkonu jaderného reaktoru. Jsou umístěny v takové poloze, že jejich palivové části jsou uvnitř aktivní zóny, a kdyby nastal havarijní stav, tak by začaly klesat volným pádem do jaderného reaktoru. Palivová část bude pod aktivní zónou a část určená k absorpci bude uvnitř aktivní zóny a bude tlumit štěpnou řetězovou reakci. Šestá skupina obsahuje 7 tyčí, které slouží k řízení výkonu jaderného reaktoru. Při snižování reaktivity se zasouvá větší část absorpční kazety do aktivní zóny a palivová část je pod aktivní zónou. Je-li třeba reaktivitu zvýšit, tak se kazeta z aktivní zóny vysune více. [1], [29]

3.4 Pasivní systém havarijního chlazení

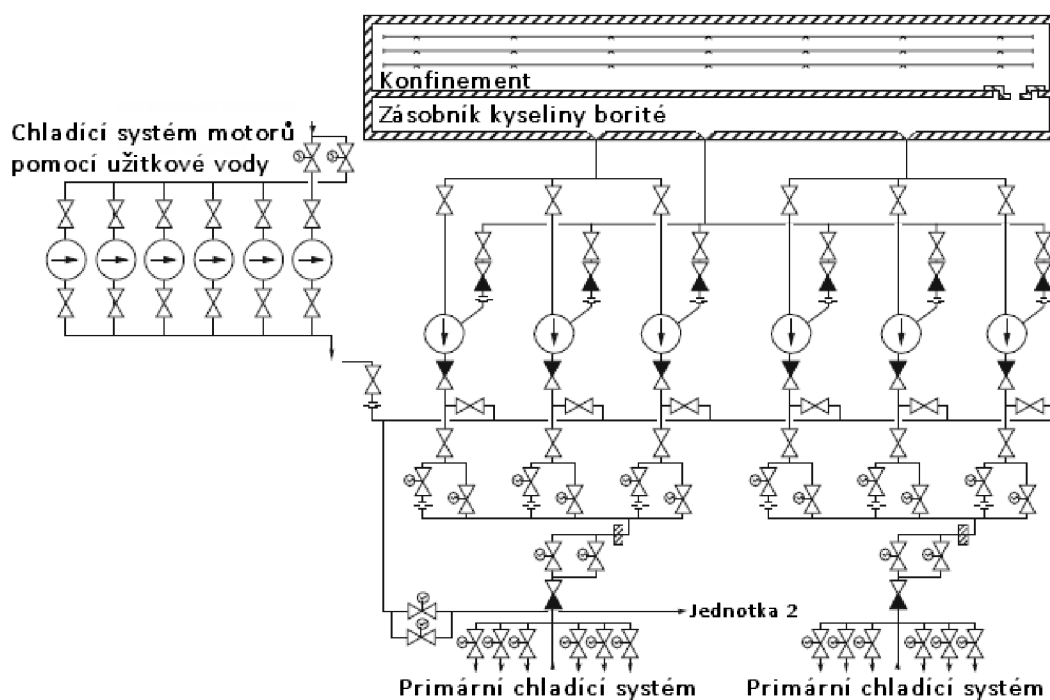
Pasivní systém havarijního chlazení je určen k zalití aktivní zóny vodou, která obsahuje kyselinu boritou. K zalití dojde v případě, že tlak v primárním okruhu klesne pod hodnotu 6 MPa. Tento systém je tvořen dvěma tlakovými nádobami. Tlak je v nich udržován pomocí dusíkového polštáře. Druhou částí je potrubí, které přivádí bórovou vodu do reaktoru. Celý systém má 100% zálohu. [19]

3.5 Vysokotlaký aktivní systém

Vysokotlaký aktivní systém (viz Obr. 9) je určen ke kompenzaci malého úniku chladiva v neodstavitelné části primárního okruhu. Avšak pracuje i při větších únicích. Slouží ke snižování reaktivity a zachování podkritičnosti jaderného reaktoru při nehodě. Při běžném provozu je systém v pohotovostním režimu. [19]

Skládá se z šesti bezpečnostních čerpadel, která jsou rozdělena do dvou skupin. První skupina čerpadel dodává kyselinu boritou do primárního okruhu k čištění a druhá skupina čerpadel dodává do primárního okruhu kyselinu boritou, která se vrací z čistící smyčky. Každé z čerpadel je připojeno pomocí ručního ventilu ke společné recirkulační smyčce. Jedná se o testovací smyčku. Každý z těchto kolektorů je propojen s druhou skupinou.

V případě, že selže jedno z čerpadel, tak může být nahrazeno druhým, pokud je dostatečná doba k jeho přípravě. Vysokotlaký aktivní systém může být spuštěn automaticky, pokud úroveň kompenzátoru objemu klesne na úroveň 700 mm a tlak v primárním okruhu klesne na hodnotu 11,77 MPa v případě velké netěsnosti, nebo pokud tlak v primárním okruhu klesne pod hodnotu 9 MPa. [30]

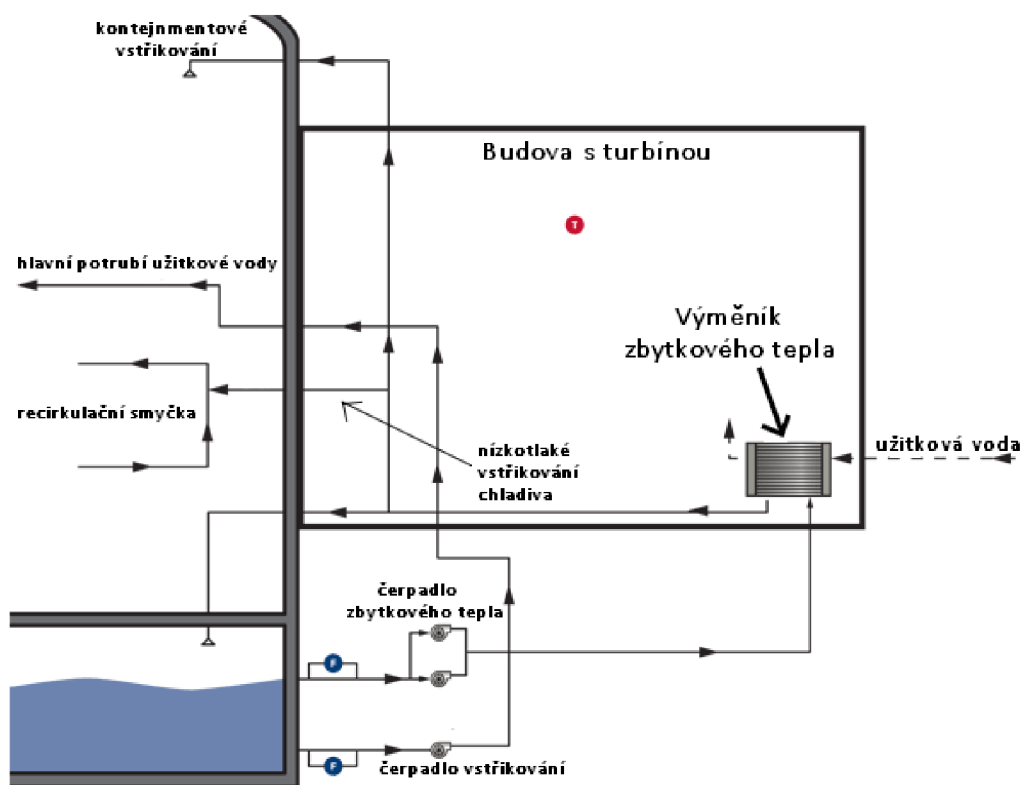


Obr. 9: Vysokotlaký aktivní systém, Upraveno a převzato z [30]

3.6 Nízkotlaký aktivní systém

Nízkotlaký systém je částí aktivního systému jaderné elektrárny (viz Obr. 10). Dodává vodu do aktivní zóny reaktoru v době, kdy je vyprázdněna voda z tlakových zásobníků pasivního systému. Tyto tlakové zásobníky slouží k dodávání bórové vody do aktivní zóny reaktoru při havárii. Mají v sobě i zásobník stlačeného dusíku, který vytlačuje bórovou vodu ven ze zásobníků, v případě, že klesne hodnota tlaku v primárním okruhu pod určenou úroveň. Systém je složen z pracovního čerpadla a dvojité zálohy. Pracuje bez přívodu energie [19], [32]

Aktivní havarijní chladicí systém jaderné elektrárny má tři vysokotlaká čerpadla, tři nízkotlaká čerpadla a zásobník na bórovou vodu. Každé z těchto čerpadel umí pokrýt předpokládaný únik chladiva. Dvojice zbývajících čerpadel vytváří 200% záložní systém. Jestliže nastane situace, kdy dojde voda v zásobníku, tak vysokotlaká i nízkotlaká čerpadla pracují s vodou z podlah hermetických prostorů. [19]



Obr. 10: Nízkotlaký aktivní systém, Upraveno a převzato z [31]

3.7 Nouzové napájení EDU

V JE Dukovany je zdrojem technologické vody, určené především pro chlazení, vodní dílo Dalešice a její vyrovnávací nádrž Mohelno.

Na vyrovnávací nádrži Mohelno je umístěna čerpací stanice a vyrovnávací vodojem. V čerpací stanici je 8 čerpadel (4 jsou v provozu a 4 v rezervě), každé o výkonu 1440 m³/hod a při tlaku 1,32 MPa vytlačují surovou vodu z nádrže Mohelno do gravitačního vodojemu, ze kterého voda samospádem putuje podzemním potrubím až do JE Dukovany a zde se pak dále upravuje dle potřeby. [24], [25]

V případě, že by nastal v JE Dukovany, „Station blackout“ neboli úplná ztráta elektrické energie, tak Dalešice nabízejí nouzové napájení elektrické energie. Turbína o výkonu 1,2 MW na nádrži Mohelno slouží jako zdroj rozjezdového napájení pro turbínu o výkonu 120 MW, která je na Dalešické přehradě. Tato turbína vytvoří elektrický proud, který je veden přes rozvodnu Slavětice až do Dukovan. [28]

3.8 Dieselgenerátorová stanice

Dieselgenerátorová stanice je prvkem, který slouží pro napájení jaderné elektrárny v extrémních podmínkách, které mohou nastat. Slouží k napájení nejdůležitějších částí jaderné elektrárny při úplném výpadku elektrické energie. Patří do zdrojů elektrického napájení spotřebičů druhé kategorie, což jsou spotřebiče, které nemohou být bez napájení déle jak 3 minuty. Z požárních důvodů jsou umístěny každý samostatně a udržovány v horké rezervě. [20]

Jaderná elektrárna Dukovany má celkem 18 dieselgenerátorů o celkovém výkonu přibližně 41,4 MW. Pevných dieselgenerátorů je v Dukovanech 12, kde každý výrobní blok má 3 s výkonem 2,8 MW. Další dva jsou vysoce odolné SBO dieselgenerátory o celkovém výkonu 6,4 MW a čtyři mobilní dieselgenerátory o celkovém výkonu 1,4 MW, které mají svůj podvozek. Elektrické vedení těchto dieselgenerátorů je dlouhé 1,3 km a má svůj vlastní dopravní systém pro lepší manipulaci. [21]

V sekundárním okruhu jsou další systémy, které souvisí s přenosem tepla z primárního okruhu za normálních podmínek. Patří mezi ně systém na dochlazování primárního okruhu, olejové hospodářství, kanalizace a vypouštění odpadních vod nebo plynové hospodářství. [9]

3.9 Záložní bateriové články

Kromě dieselgenerátorů jsou v jaderných elektrárnách také záložní bateriové články pro záložní napájení elektrické energie.

V jaderných elektrárnách se používají olověné typy baterií s tekutým elektrolytem v průhledných nádobách kvůli dobré preventivní kontrole, která se provádí kontrolou hladiny a hustoty elektrolytu.

JE Dukovany má staniční bateriové články o kapacitě 1600 Ah. Tyto typy zdroje napájení jsou v JE Dukovany zařazeny do čtyř systémů. Systémy 1 až 3 napájejí bezpečnostní systémy, jako například nouzové osvětlení, střídače a další. Systém 4 slouží například k napájení olejových čerpadel, střídačů a dalších věcí. Než se tyto baterie zařadí do provozu, tak se testují na mechanické poškození nebo na další schopnost provozu po vybití. Znamená to, že při zkušebních vibracích odebírá baterie proud 50 A a provádí se záznam její nepřerušené dodávky během vibrací. Po těchto testech se provede kapacitní zkouška, která potvrdí schopnost funkce baterie během a po seizmické aktivitě.

Další testy se provádí na odolnost proti přebíjení, schopnost uchování náboje, zkratový proud a vnitřní odpor. Testy na zalití vodou se testují pouze při zvláštních požadavcích. [23]

4 JADERNÁ BEZPEČNOST A STUPNICE INES

4.1 Jaderná bezpečnost

Jaderná bezpečnost je v dnešní době velmi důležité téma a s každou událostí, která se v jaderných zařízeních stala, narůstá. Z pohledu jaderné bezpečnosti je důležité dodržet vysokou kvalitu návrhu jaderné elektrárny a montáže. Je důležitá také odborně proškolená obsluha jaderných zařízení. O dohled a kontrolu nad jadernou bezpečností se stará celý systém různých organizací, díky kterým je v dnešní době jaderná bezpečnost na tak vysoké úrovni.

4.1.1 Hlubková ochrana

Důležitým pojmem v jaderné bezpečnosti je hloubková ochrana, kterou lze rozdělit na dvě části, a to prevenci nehod a zmírňování nehod.

Prevenci nehod lze rozumět jako způsobu předcházení nehodám. Lze toho dosáhnout kvalitním návrhem, konstrukcí a provozem jaderných zařízení.

Zmírňování nehod potom lze vysvětlit jako plánování a provozování praktik, které vedou ke zmírnění nehod, které nastanou. Tato fáze zvládnutí havárií zahrnuje bezpečné odstavení reaktoru a dochlazování radioaktivního paliva. [26]

Kritéria, kterými se hodnotí jaderná bezpečnost, stanovuje vždy státní dozorový orgán země, v České republice je to SÚJB. V České republice skupiny ukazatelů jaderné bezpečnosti vycházejí z principů, které jsou podrobně popsány v dokumentu od organizace MAAE. Je to soubor uznaných pravidel mezi společnostmi ČEZ a SÚJB. [5]

4.1.2 Radiační ochrana

S pojmem jaderné bezpečnosti souvisí také radiační ochrana, což je systém technických a organizačních opatření, která chrání osoby a životní prostředí před radiačním zářením. Veškerá tato opatření mají svůj význam při radiační nehodě, tedy při události, která má za následek únik radiačních látek nebo ionizujícího záření do okolí v nepřijatelném množství, nebo také ozáření osob, nebo životního prostředí při radiační havárii. [5]

4.1.3 Lidský faktor

Nedílnou a velmi důležitou součástí jaderné bezpečnosti, ale i jakékoliv jiné bezpečnosti, je lidský faktor, který má často velký podíl na různých zvláštních stavech, které nastanou.

Jde o selhání (chybu) člověka při obsluze jaderných zařízení, návrhem, údržbou nebo modifikací tohoto zařízení. V konečném důsledku je lidský faktor zodpovědný za snížení jaderné bezpečnosti a spolehlivosti provozu jaderných zařízení. Z průzkumů ve světě, ale i v České republice, vyplývá, že tento faktor ovlivňuje při obsluze a provozu jaderných zařízení počet vzniklých událostí v kvalitaci INES. Z toho důvodu jsou veškerí pracovníci, kteří se jakýmkoliv způsobem podílejí na obsluze nebo provozu jaderných zařízení, školeni a podléhají státnímu dozoru kvůli zajištění jaderné bezpečnosti. [5]

4.1.4 Mezinárodní agentura pro atomovou energii (MAAE)

Je třeba, aby v jaderných elektrárnách byl neustálý dohled nad jadernou bezpečností, a proto byla v roce 1957 vytvořena Mezinárodní agentura pro atomovou energii se sídlem ve Vídni, kde je má dodnes. Svou funkcí výrazně přispěla ke snížení rizika pro zaměstnance i širokou veřejnost. Tato rizika plynou z provozu jaderných zařízení. MAAE má svůj vlastní kontrolní orgán OSART (Operational Safety Team), který prověřuje jadernou bezpečnost podle mezinárodních norem a pravidel pro jadernou bezpečnost. MAAE využívá i pomoci WANO (World Association of Nuclear Operators), což je skupina sdružující provozovatele jaderných zařízení. Dále využívá služeb poradní skupiny pro jadernou bezpečnost INSAG (International Nuclear Safety Group). [5]

Obecně se jaderná bezpečnost v České republice hodnotí podle zákona č. 18/1997 sb. jako „stav a schopnost jaderného zařízení a osob obsluhujících jaderné zařízení zabránit nekontrolovatelnému rozvoji štěpné řetězové reakce nebo nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření do životního prostředí a omezovat následky nehod“ [18].

Při souladu doporučení MAAE lze tuto definici chápat jako schopnost plnit tři základní funkce:

- 1) Bezpečné odstavení reaktoru a také bezpečný průběh celé odstávky za všech okolností, které s odstávkou souvisejí
- 2) Odvod veškeré tepelné energie z aktivní zóny, která souvisí s normálním provozem i odstávkou
- 3) Zajištění toho, aby neunikala žádná radioaktivní látka a ionizující záření do okolí nad povolenou hodnotu stanovenou mezními hodnotami za všech situací, které souvisí s provozem nebo odstávkou.

Požadavky, které jsou kladeny na stav jaderných zařízení a osob, které tato zařízení obsluhují, nejsou konstantní v čase, ale zvětšují se tak, aby bylo dosahováno „*mezinárodně akceptovatelné úrovně*“.

Z toho vyplývá, že úroveň jaderné bezpečnosti nemůže být zajišťována pouze provozovatelem tohoto zařízení, ale musí být zohledněno doporučení mezinárodních společností nebo mezinárodně uznávaných doporučení a norem (například U.S. NRC – The U.S. Nuclear Regulatory Commission). Veškerá jaderná bezpečnost se s časem vyvíjí, a to jak rozsahem, tak i opatřeními, která zabezpečují udržování akceptovatelné mezinárodní bezpečnosti. [5]

4.1.5 Informační systém WANO (World Association of Nuclear Operators)

Provozovatelé jaderných zařízení se rozhodli, že založí systém, kam by mohli vkládat svá data. Systém funguje pro jejich vlastní potřebu a jeho členové do něj mohou vkládat data přímo, tedy bez státních dozorných orgánů. Znamená to tedy, že tu jde o výměnu provozních zkušeností, trendů výroby nebo také srovnávání pracovních výsledků, atd. [5]

4.1.6 Technická inspekce České republiky (TIČR)

U jaderných zařízení je třeba dohlížet nejen na ochranu před zářením, ale také na technickou bezpečnost, kvalitu zpracování dokumentace jaderného zařízení, revize, opravy, montáž, atd. V České republice tuto činnost provádí Technická inspekce České republiky (TIČR). Je to státní organizace a její činností se zabývá vyhláška č. 73/2010 Sb. Platná od 1. 6. 2010. [5]

4.1.7 Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB)

Zabývá se jadernou bezpečností a jejími kontrolami v České republice. Kontroluje se primární část a její pomocné okruhy, bezpečnostní systémy, palivo, sekundární část, elektrosystémy, stavební část, vzduchotechnika, požární zařízení, diagnostické systémy a také systémy pro manipulaci a nakládání s radioaktivním odpadem. [15]

Mezi jeho činnost spadá také vydávání povolení k výstavbě, rekonstrukce a uvádění do provozu jednotlivých částí jaderné elektrárny. Také ustavuje státní odborné komise pro kontrolu znalostí jednotlivých pracovníků. [5]

SÚJB provádí kontrolu jaderných elektráren, která zahrnuje pět částí. První z nich je provoz jaderné elektrárny. Tato kontrola prověřuje činnost související s provozem jaderných zařízení. Vyhodnocují se zde činnosti, jako například samotná obsluha zařízení, monitorování a zaznamenávání stavu při normálním provozu, ale také v rámci zvláštních stavů. Druhou částí je kontrola údržby jaderných zařízení. Provádí se zde kontrola činnosti diagnostické, prediktivní, preventivní a korektní údržby systému, jednotlivých komponentů a struktur jaderných zařízení a také kalibrační zkoušky a zkoušky těsnosti hermetických prostorů. Třetí částí je kontrola inženýrské a technické podpory. Tato kontrola testuje připravenost a znalosti technické a inženýrské podpory ve vybraných činnostech a oblastech jaderné elektrárny. Čtvrtou částí jsou testy radiační ochrany. V této části kontrol se testují veškeré oblasti, které jsou spojeny s radiační ochranou, bezpečností zdrojů ionizujícího záření, ale také připraveností na havarijní stavy. Poslední částí je kontrola přepravy jaderných materiálů a radioaktivních látek a ochrana při této manipulaci. Testuje se celá oblast zabývající se přepravou jaderných materiálů, včetně bezpečnosti. [15]

4.2 Stupnice INES

Jedná se o stupnici hodnotící závažnost jaderných událostí (INES – The international Nuclear Event Scale). Tato stupnice byla uvedena na veřejnost v březnu roku 1990 Mezinárodní agenturou pro jadernou energii (MAEE) a Agenturou pro jadernou energii (NEA). Hlavním účelem stupnice je usnadnit komunikaci mezi odborným nukleárním společenstvím, prostředky pro sdělování a širokou veřejností v případě, že by se vyskytla nějaká událost na jaderných zařízeních nebo jakékoliv události, které by byly spojeny s radioaktivním materiálem a radiací.

Stupnice má sedm stupňů. První tři stupně se označují jako nehody, stupně čtyři až sedm jsou označeny jako havárie. Události bez významného bezpečnostního významu jsou označovány stupněm nula a jsou označeny jako odchylky. Také jsou zde události, které nijak nesouvisejí s bezpečností, a ty se označují jako události mimo stupnici. Popis jednotlivých stupňů je zobrazen na Obr. 11. [15]

7 VELMI TĚŽKÁ HAVÁRIE
6 TĚŽKÁ HAVÁRIE
5 HAVÁRIE S RIZIKEM VNĚ ZAŘÍZENÍ
4 HAVÁRIE BEZ RIZIKA VNĚ ZAŘÍZENÍ
3 VÁŽNÁ NEHODA
2 NEHODA
1 ANOMÁLIE
0 ODCHYLKA

Obr. 11: Jednotlivé stupně stupnice INES [15]

Stupnice INES neslouží ke klasifikaci průmyslových nebo jiných nejaderných havárií, které by v jaderné elektrárně mohly nastat. Například kdyby proběhla nějaká událost spjatá s turbínou nebo parogenerátorem, tak by sice mohla mít vliv na vybavení, které souvisí s bezpečností, ale pokud by šlo pouze o poruchu ovlivňující jen její provozuschopnost, tak by se jednalo pouze o událost mimo stupnici. [16]

V následující tabulce (Tab. 1) je uvedena základní struktura indikátorů jednotlivých událostí.

Tab. 1: Seznam identifikátorů jednotlivých stupňů stupnice INES [16]

	OBLAST DOPADU		
	DOPAD VNĚ ZAŘÍZENÍ	DOPAD UVNITŘ ZAŘÍZENÍ	DOPAD NA OCHRANU DO HLOUBKY
7 VELMI TĚŽKÁ HAVÁRIE	ROZSAHLÝ UNIK: ŠIROCE ROZŠÍŘENÉ DOPADY NA ZDRAVÍ A ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ		
6 TĚŽKÁ HAVÁRIE	ZÁVAŽNÝ UNIK: PRAVDĚPODOBNÉ NASAZENÍ VEŠKERÝCH PLÁNOVANÝCH PROTIOPATŘENÍ		
5 HAVÁRIE S RIZIKEM VNĚ ZAŘÍZENÍ	OMEZENÝ UNIK: PRAVDĚPODOBNÉ ČÁSTEČNÉ NASAZENÍ PLÁNOVANÝCH PROTIOPATŘENÍ	VÁŽNĚ POŠKOZENÍ AKTIVNÍ ZÓNY REAKTORU/ RADIČNÍCH BARIÉR	
4 HAVÁRIE BEZ VÁŽNĚJŠÍHO RIZIKA VNĚ ZAŘÍZENÍ	MENŠÍ UNIK: OZÁŘENÍ OBYVATELSTVA ŘÁDOVÉ V POVOLENÝCH MEZÍCH	VÝZNAMNÉ POŠKOZENÍ AKTIVNÍ ZÓNY REAKTORU /RADIČNÍCH BARIÉR/ SMRTELNÉ OZÁŘENÍ ZAMĚSTNANCŮ	
3 VÁŽNÁ NEHODA	VELMI MALÝ UNIK: OZÁŘENÍ OBYVATELSTVA ZLOMKEM POVOLENÝCH LIMITŮ	VELKÉ ROZŠÍŘENÍ KONTAMINACE /AKUTNÍ ÚČINKY NA ZDRAVÍ ZAMĚSTNANCŮ	TEMĚŘ HAVARIJNÍ STAV NEZŮSTALY ŽÁDNÉ BEZPEČNOSTNÍ BARIÉRY
2 NEHODA		VÝZNAMNÉ ROZŠÍŘENÍ KONTAMINACE/ NADMĚRNÉ OZÁŘENÍ ZAMĚSTNANCE	NEHODA S VÝZNAMNÝM POŠKOZENÍM BEZPEČNOSTNÍCH OPATŘENÍ
1 ANOMÁLIE			ANOMÁLIE OD SCHVÁLENÉHO PROVOZNÍHO REŽIMU
0 ODCHYLKA	ŽÁDNÝ BEZPEČNOSTNÍ VÝZNAM		

4.2.1 Příklady jaderných událostí hodnocených dle stupnice INES

Havárie v Černobylu (Ukrajina, Pripjat) v roce 1986 měla velké dopady na životní prostředí i zdraví lidí, a proto je hodnocena stupněm 7.

Havárie, která se stala v přepracovatelském závodě Kyštym v roce 1957, měla za následek únik velkého množství radioaktivních látek do okolí, ale díky evakuaci obyvatelstva a havarijním opatřením, je tato událost hodnocena stupněm 6. [16]

V roce 1957 došlo k havárii vzduchem chlazeného výzkumného reaktoru ve Windscale (v současnosti Sellafield) ve Velké Británii. V důsledku úniku štěpných produktů do okolí a následnému dopadu na okolí je tato událost hodnocena stupněm 5.

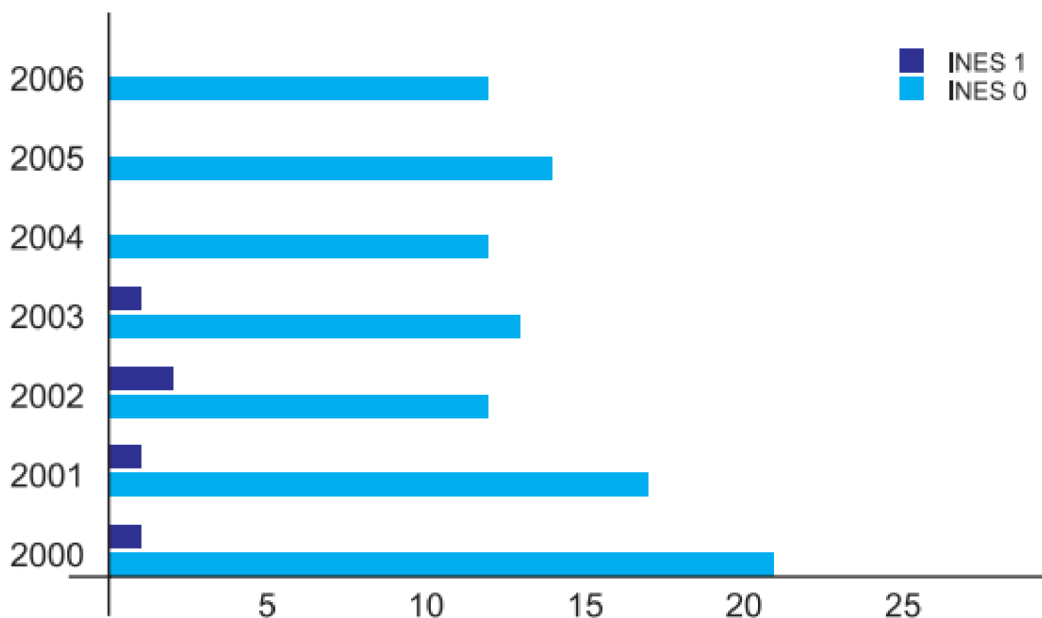
Další událost se stala v přepracovatelském závodě, taktéž ve Windscale v roce 1973. Došlo zde k úniku radioaktivních materiálů uvnitř provozní nádoby v důsledku exotermické reakce.

V důsledku dopadu účinků radioaktivních materiálů uvnitř zařízení byla tato událost hodnocena stupněm 4.

V roce 1989 se stala nehoda v elektrárně Vandellos ve Španělsku. Nedošlo k úniku radioaktivních látek, ani k poškození aktivní zóny, avšak v důsledku poškození bezpečnostních systémů požárem se výrazně zhoršila ochrana do hloubky. Proto je tato událost hodnocena stupněm 3. [16]

V roce 1991 v jaderné elektrárně Mihama praskla trubka v parním generátoru, a díky tomu poklesl tlak na nepřipustnou hodnotu a reaktor se automaticky odstavil. Vzniklá díra o rozměru 2 cm² způsobila únik 20 tun radioaktivního paliva do sekundárního okruhu, kde zamořila čistou vodu. Událost byla ihned pod kontrolou, a díky tomu je hodnocena stupněm 2. [17]

Událostí 1 a 0 proběhne v jaderné energetických zařízeních více, než událostí od stupně 2. Názorná ukázka je na Obr. 12, na kterém jsou zobrazeny zvláštní události v JE Dukovany, které byly klasifikovány stupněm 1 a 0.



Obr. 12: Přehled událostí INES 1 a 0 v JE Dukovany v letech 2000 až 2006 [17]

V následujícím grafu můžeme vidět, kolik událostí nastalo v JE Dukovany od roku 2000 do roku 2006. Je vidět, že od roku 2000 spíše počet událostí INES 0 klesal, než rostl.

5 INICIAČNÍ UDÁLOSTI JADERNÝCH ELEKTRÁREN S LEHKOVODNÍM JADERNÝM REAKTOREM

V jaderné elektrárně s lehkovodními reaktory může nastat velké množství iniciačních událostí, které se dají rozdělit do tří kategorií, a to očekávané, možné, nepravděpodobné.

Mezi očekávané patří události jako neřízené ředění primárního chladiva, ztráta průtoku napájecí vody, pokles tlaku v chladicím systému reaktoru z důvodu nefunkčnosti aktivní komponenty, netěsnosti v systému přeměny energie, která by měla za následek nezabránění řízeného odstavení reaktoru a jeho dochlazení.

Za možné události, které mohou nastat v jaderné elektrárně, považujeme malou LOCA, úplné prasknutí jedné z trubek parogenerátoru, pád kazety vyhořelého paliva nebo únik z bazénu vyhořelého paliva větší, než je kapacita normálního doplňování.

Za události, které jsou málo pravděpodobné a které by měly vážné následky v jaderné elektrárně, považujeme velkou havárii LOCA s prasknutím velké části potrubí primárního okruhu, vystřelení jednoho regulačního elementu a pád kazety s vyhořelým palivem na jiné kazety vyhořelého paliva. [16]

Největší nebezpečí, které může v jaderné elektrárně nastat, je únik radioaktivních látek z aktivní zóny do životního prostředí. Takový únik látek je možný při vysokých teplotách spojených s tavením paliva, které není chlazeno z důvodu havárie spojené se ztrátou chladiva.

5.1 Událost LOCA (Loss Of Coolant Accident)

Jedná se o nejzávažnější havárii, která může v jaderné elektrárně s lehkovodními reaktory nastat. Největší vliv na životní prostředí má prasknutí potrubí primárního okruhu, které se nazývá LB LOCA (Large Break Loss Of Coolant Accident). Při projektování se o této havárii uvažuje jako o maximální možné havárii, která může nastat. Snížení celkových důsledků, které vznikají při této havárii, se dosahuje pomocí havarijního dochlazování a dalšími bezpečnostními prvky.

Celkový průběh LOCA havárie lze rozdělit na 4 části. Nejdříve dochází k dekompresi a vyprazdňování primárního chladiva, poté dochází k zaplavování spodní části reaktoru. Následuje zaplavení aktivní zóny reaktoru. Avšak s tímto lze počítat pouze při zásahu havarijních dochlazovacích systémů, které pokud by nezasáhly, tak by došlo k přehřívání a tavení paliva.

Ihned po prasknutí chladné větve primárního okruhu dochází k úniku chladiva, na straně reaktoru se chladivo rychle vypařuje do kontejnmentu. Při úniku chladiva tlak v reaktorové nádobě klesá, avšak v kontejnmentu tlak rychle narůstá. Po pár sekundách se tlak ustálí na konstantní hodnotě. S těmito událostmi se počítá při návrhu ochranných obálek, které musí chránit nejen před vnějšími vlivy, ale také před únikem radioaktivních látek z reaktoru. Kontejnment musí být schopný čelit narůstajícímu tlaku, a proto se zpravidla uvnitř drží podtlak, který v případě porušení jeho těsnosti, zajistí uchování částic uvnitř. O snížení tlaku při LOCA havárii v JE Dukovany se stará vakuo-barbotážní kontejnment složený

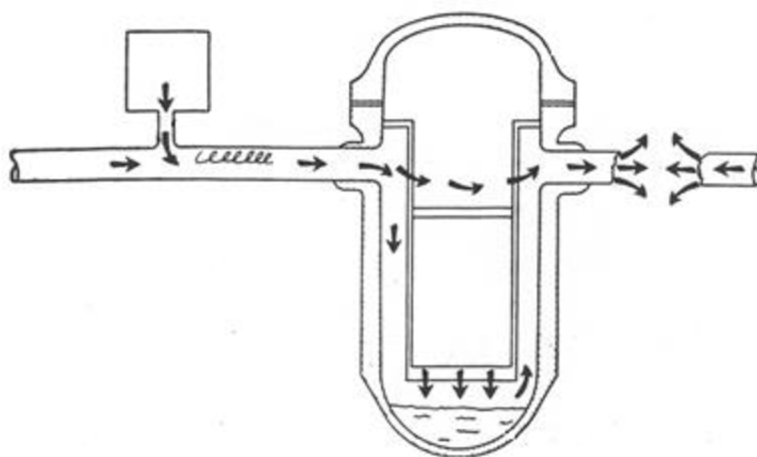
z hermetických boxů a barbotážní věže, ve kterých by se nastřádala uniklá pára, a tím by se zamezilo riziku úniku radioaktivních látek.

Ve fázi, kdy dochází k vyprazdňování primárního okruhu, dále dochází k zastavování štěpné reakce vlivem záporné reaktivity a tepelný výkon reaktoru klesá i bez zasunutí absorbátorů, protože voda ztrácí schopnost moderace vlivem přechodu do plynné fáze. Při znovu zaplavení aktivní zóny musí být zasunuty absorpční tyče, aby nedošlo k opětovnému kritickému stavu.

Vysokotlaká čerpadla začínají pracovat ihned po prasknutí primárního potrubí a vhání vodu s vysokým obsahem bóru do primárního okruhu. Vysokotlaký systém nouzového chlazení slouží k dochlazování aktivní zóny při malých a středních únicích. V podkritickém stavu teplota paliva klesá, ale je nutné zabezpečit, aby nedošlo k jeho tavení. V této fázi dochází k obnažování paliva. Po následném znovu zaplavení aktivní zóny může dojít ke ztrátě hermetičnosti povlaků jaderného paliva z důvodu rychlé změny teplot a následnému úniku plynných produktů, vzniklých při štěpení, do primárního okruhu. Tyto produkty představují jen zlomek radiačního rizika, jelikož většina pevných částic zůstane vázána v palivových tabletách. Mnohem důležitější záležitostí je otázka změny geometrie paliva, protože vlivem tavení povlaků může dojít k zamezení proudění chladiva a velkému nárůstu teplot díky ztrátě chlazení palivových tyčí. Z tohoto důvodu je nejvíce kladen důraz na udržení teploty povlaků pod hodnotou 1200 °C.

Při poklesu tlaku v primárním okruhu pod 6 MPa dojde k otevření ventilů hydroakumulátorů, které vypustí vysoké množství kyseliny borité do primárního okruhu pomocí stlačeného dusíku, který je umístěn nad její hladinou.

Vzniká zde problém s obtokem aktivní zóny při jejím zplavování (viz Obr. 13). Je to v důsledku působení velkého sloupce přehřáté páry, která stoupá proti průtoku vody protékající směrem do aktivní zóny. Velká část chladiva je tak unášena porušeným potrubím ven z reaktoru, bez kontaktu s aktivní zónou. [22]



Obr. 13: Obtok chladiva kolem aktivní zóny reaktoru s LB LOCA [22]

Mimo vnitřních vlivů mohou havárie způsobit také různé lidské činnosti, které jsou klasifikovány jako vnější vlivy. Mezi tyto vlivy patří pád letadla, ohrožení vlivem dopravy v okolí elektrárny, rizika z provozu průmyslových objektů v okolí jaderné elektrárny, vnější požáry a výbuchy, šíření hořlavých, toxických a korozních plynů, atd.

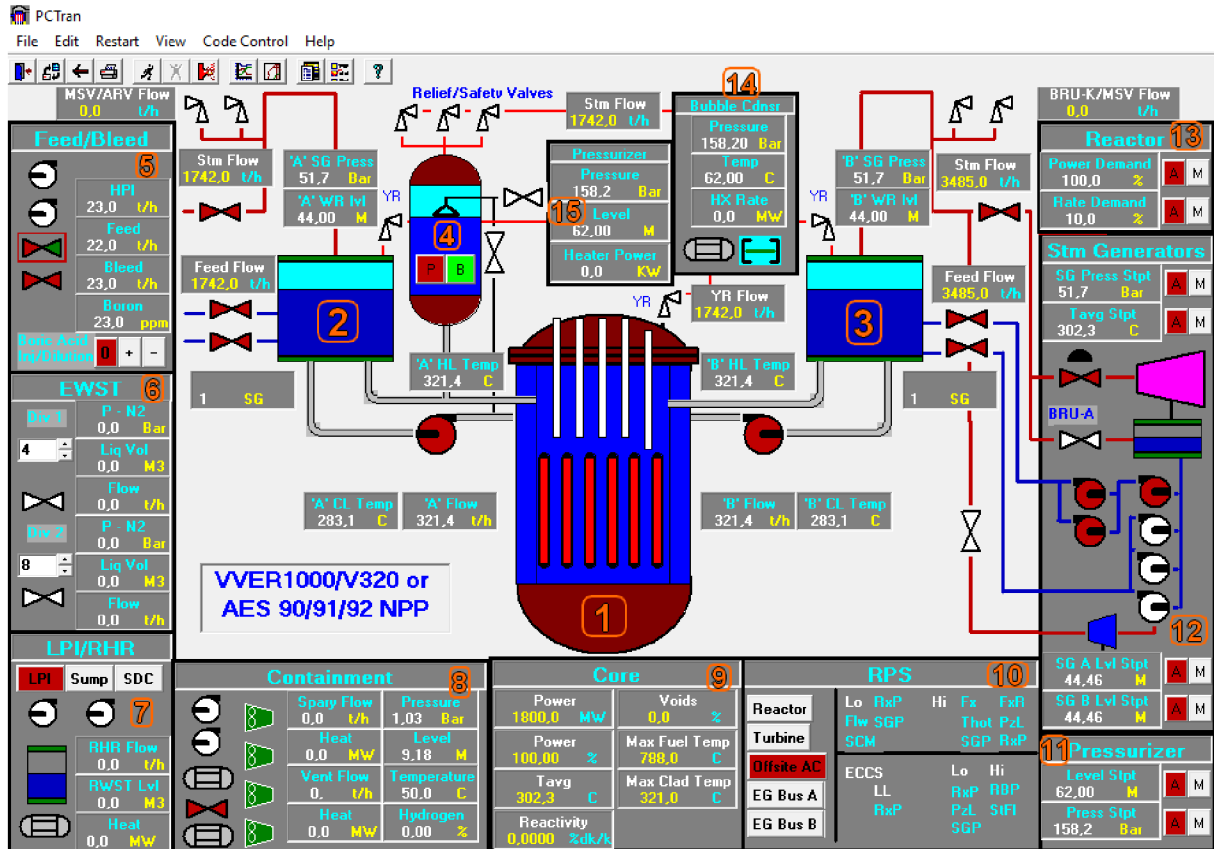
6 SIMULÁTORY PCTRAN

Vývojářem simulátorů PCTran je společnost Micro-Simulation Technology, která byla založena v roce 1985 v New Jersey v USA. Společnost vytvořila vůbec první počítačový simulátor jaderné elektrárny s lehkovodním jaderným reaktorem, který se postupně zdokonaloval a vyvíjel. Kromě simulátoru pro jaderný reaktor VVER 1000 najdeme na stránkách společnosti simulátory pro reaktory PWR, BWR, Westinghouse AP1000, ESBWR a další.

Společnost byla vybrána organizací IAEA, která její simulátory používá jako školicí platformu pro své každoroční školicí dílny a na její požadavek byl také vytvořen simulátor PCTran VVER 1000. Simulátory jaderných elektráren byly instalovány v elektrárnách po celém světě, aby simulovaly praktickou aplikaci pro školení, analýzy, pravděpodobnosti hodnocení bezpečnosti cvičení pohotovosti.

6.1 Seznámení s uživatelským prostředím PCTran VVER 1000

Uživatelské prostředí PCTranu je graficky velmi rozmanité (viz Obr. 14) a nabízí širokou škálu nastavovaných parametrů, které mají vliv na celkový chod jaderné elektrárny. Můžou zde být nastaveny počáteční podmínky, které jsou přednastaveny od vývojářů, ale mohou být vytvořeny i nové. Dále zde mohou být nastaveny různé havárie a selhání různých komponent. V průběhu celé simulace může být měněna rychlost jejího průběhu, abychom nemuseli čekat na data v reálném čase a mohli stihnout více typů simulací. Tuto rychlost můžeme zrychlit až 16krát. V průběhu simulace můžeme sledovat, jak se nám mění v systému parametry, které můžeme ovlivňovat zapínáním a vypínáním jednotlivých komponentů.



Obr. 14: Popis uživatelského prostředí simulátoru PCTran VVER 1000

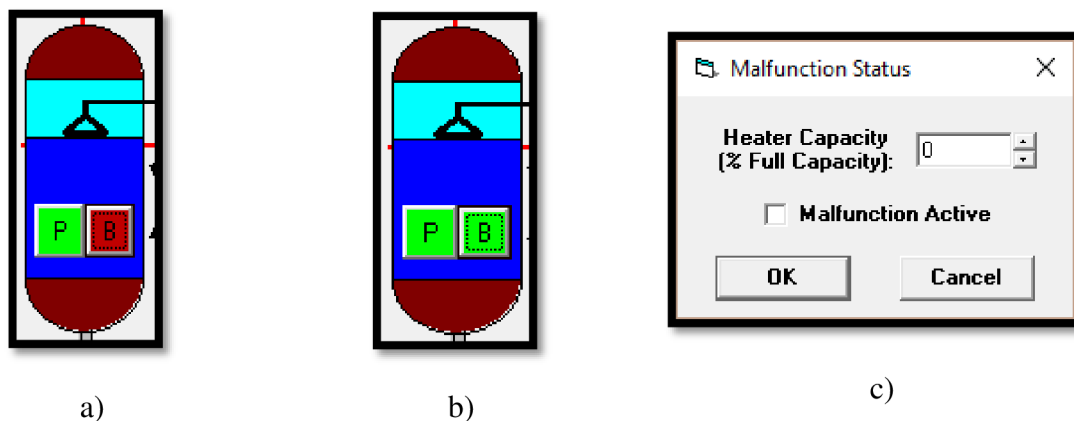
(1 - Jaderný reaktor, 2 - Parogenerátor A, 3 - Parogenerátor B, 4 - Kompenzátor objemu, 5 - Zavodňovací systém napájecí vody / Odvzdušňovací systém, 6 - Zásobník borité vody, 7 - Nizkotlaký vsřikovací systém / Systém na odstranění zbytkového tepla, 8 - Parametry kontejnmentu (Tlak, objem, tepelný výkon, teplota, obsah dusíku, průtoky ventilů), 9 - Parametry aktivní zóny, 10 - Ukazatele ochranného systému reaktoru, 11 - Parametry kompenzátoru objemu (Obsah chladiva, tlak chladiva), 12 - Ukazatele, čerpadla a turbíny parogenerátorů, 13 - Parametry reaktoru (Výkon reaktoru, hodnocení řízení), 14 - Kondenzátor, 15 - Parametry kompenzátoru objemu (Tlak, objem, teplotní výkon)

6.2 Nastavení jednotlivých komponent reaktoru VVER 1000

Mimo to, že nám simulátor umožňuje sledovat různé parametry, které se v průběhu chodu jaderné elektrárny s reaktorem VVER 1000 mění, tak je možné nastavovat dle potřeby i kapacity jednotlivých čerpadel, ventilů, výměníků tepla, ohříváků a ventilátorů. Nastavení těchto parametrů je vytvořeno tak, aby mohl být velmi jednoduše a rychle nastaven požadovaný parametr. Každá z těchto komponent má svůj tvar, aby byla lehce rozeznatelná a zapamatovatelná. Pro zobrazení parametrů, které chceme nastavit, je třeba vždy kliknout pravým tlačítkem myši na příslušný prvek. Po kliknutí se nám otevře nabídka, kde si nastavíme vše potřebné a potvrdíme tlačítkem OK. Pokud chceme nějaký z prvků zapnout či vypnout, tak na něj musíme kliknout levým tlačítkem myši.

Ohříváky

Jsou prvními z komponent, kterými můžeme nastavit parametry. Ohříváky mohou mít tři stavy, tedy vypnutý, zapnutý anebo může být zapnut pouze jeden z nich (viz Obr. 15a). Jejich grafické zobrazení v simulátoru vypadá velmi jednoduše (viz Obr. 15).

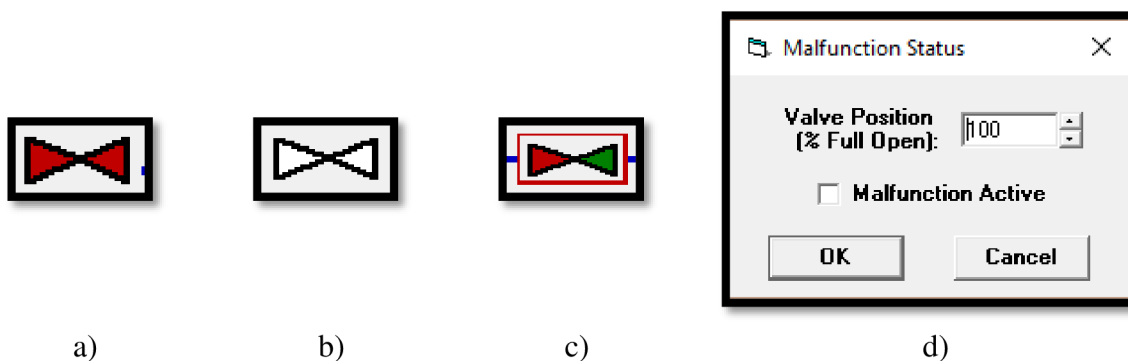


Obr. 15: a) Zapnutý pouze jede z ohříváků b) Všechny ohříváky vypnuty c) Tabulka parametrů ohříváků

Mimo tyto tři stavy u nich můžeme nastavit i jejich kapacitu a také to, jestli fungují správně anebo je na nich nějaké selhání (viz Obr. 15c).

Ventily

Stejně jako u ohříváků, tak i u ventilů můžeme nastavit několik stavů, ve kterých se může ventil nacházet. Můžeme jej zapnout, vypnout a také může být otevřený pouze z části (viz Obr. 16c).

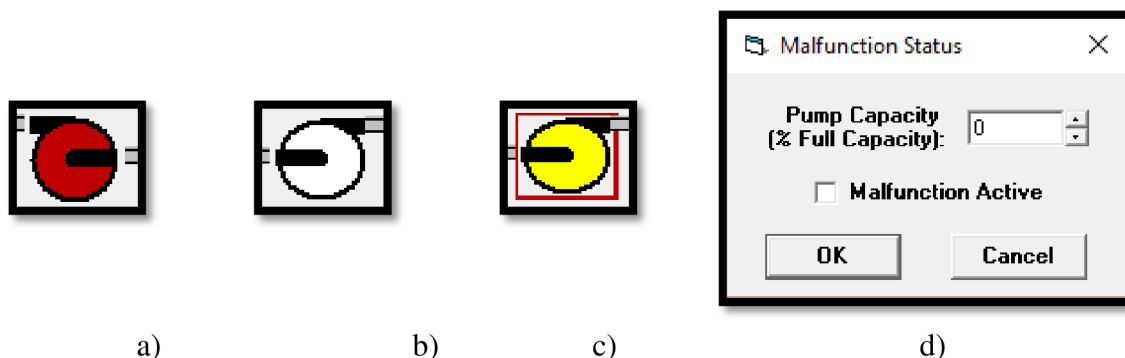


Obr. 16: a) Zapnutý ventil b) Vypnutý ventil c) Z části otevřený ventil d) Tabulka parametrů ventilu

Mimo zapnutí a vypnutí ventilů jimi můžeme nastavit i jejich pozici a to, jestli bude funkční nebo nefunkční (viz Obr. 16d).

Čerpadla

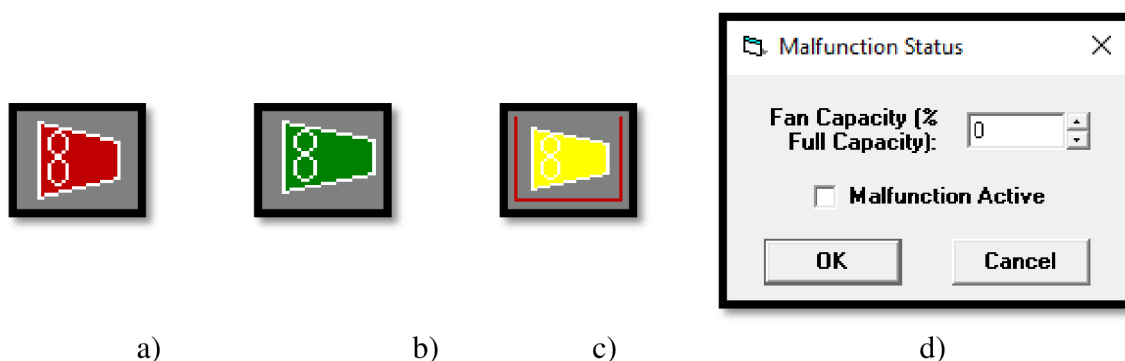
Vedle ventilů a ohříváků můžeme nastavovat stavy i pro čerpadla. Ta mohou mít dva stavy, tedy zapnutá a vypnutá čerpadla. Pokud budeme chtít provádět simulaci se selhaným čerpadlem (viz Obr. 17c), tak toto selhání můžeme nastavit tak, že klikneme pravým tlačítkem myši na dané čerpadlo a po tomto kliknutí se nám zobrazí tabulka s možnostmi (viz Obr. 17d).



Obr. 17: a) Zapnuté čerpadlo b) Vypnuté čerpadlo c) Selhání čerpadla d) Tabulka parametrů čerpadla

Ventilátory

Nezbytnou součástí každé elektrárny jsou také ventilátory, které jsou i v simulátoru. Můžeme je zapnout nebo vypnout (viz Obr. 18a, 18b). Mimo dva základní stavy může být i u ventilátoru nastaveno selhání, které lze nastavit obdobně jako u předchozích prvků. Tedy po kliknutí pravým tlačítkem myši na daný ventilátor se nám zobrazí tabulka (viz Obr. 18d) a nastavíme si kapacitu ventilátoru a selhání.



Obr. 18: a) Zapnutý ventilátor b) Vypnutý ventilátor c) Selhání ventilátoru d) Tabulka parametrů ventilátoru

Výměníky tepla

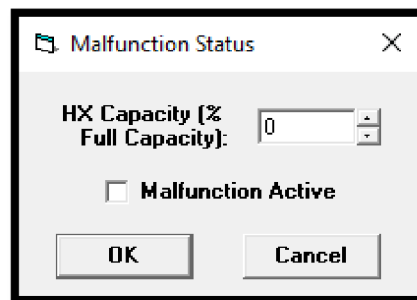
Stejně, jako u předešlých komponent, mají v simulátoru i výměníky tepla dva základní stavy, zapnuto a vypnuto (viz Obr. 19a). Doplňkovým stavem je stav selhání (viz Obr. 19b). To nastavíme nám již známým způsobem, tedy kliknutím pravým tlačítkem myši na daný výměník tepla, po kterém se nám zobrazí tabulka, ve které si kromě selhání můžeme nastavit také jeho kapacitu (viz Obr. 19c)



a)



b)



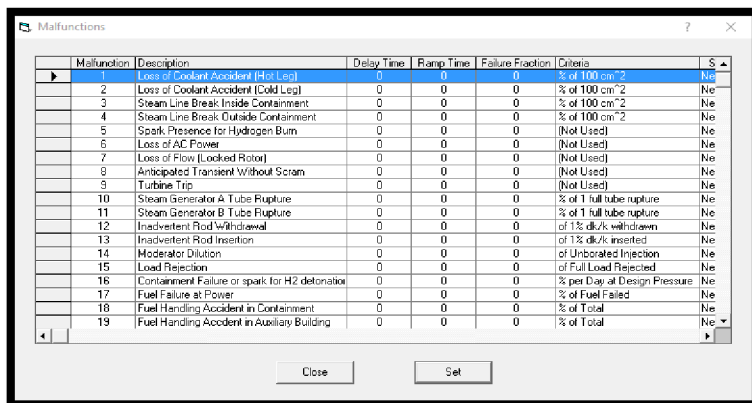
c)

Obr. 19: a) Zapnutý/Vypnutý výměník tepla b) Selhání výměníku tepla c) Tabulka parametrů výměníků tepla

6.3 Počáteční podmínky, havárie a selhání

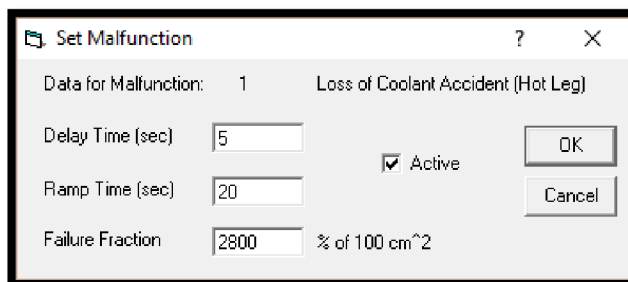
Kromě nastavení jednotlivých částí v simulátoru PCTran VVER 1000 máme na výběr z několika možností havárie, které mohou v jaderné elektrárně nastat. Tyto havárie můžeme nastavit kdykoliv v průběhu chodu simulace nebo před jejím spuštěním. Patří mezi ně například LB LOCA na teplé a studené větvi, prasknutí parního potrubí parogenerátoru, poškození nebo selhání turbíny, poškození bezpečnostních ventilů a také neúmyslné vytažení nebo zasunutí regulačních kazet.

Do jejich nabídky se dostaneme po kliknutí levým tlačítkem myši na Malfunction (Havárie) v levém dolním rohu základního uživatelského prostředí (viz Obr. 14). Následně se nám otevře tabulka, ve které je vypsán jejich seznam (viz Obr. 20), ze kterého si levým tlačítkem myši vybereme potřebnou havárii.



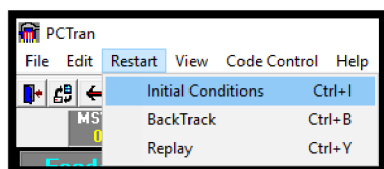
Obr. 20: Seznam možných havárií v simulátoru PCTran VVER 1000

U každého typu havárie je možné nastavit zpoždění (Delay Time), náběžný čas (Ramp Time) a její rozsah (Failure Fraction). Toto nastavení provedeme kliknutím na tlačítko Set, které se nachází ve spodní části seznamu možných havárií. Poté se nám otevře nabídka s výše uvedenými možnostmi (viz Obr. 21). Aby byla havárie aktivní, je třeba zaškrtnout možnost, aby byla havárie aktivní (Active). Vše dokončíme kliknutím na tlačítko OK.

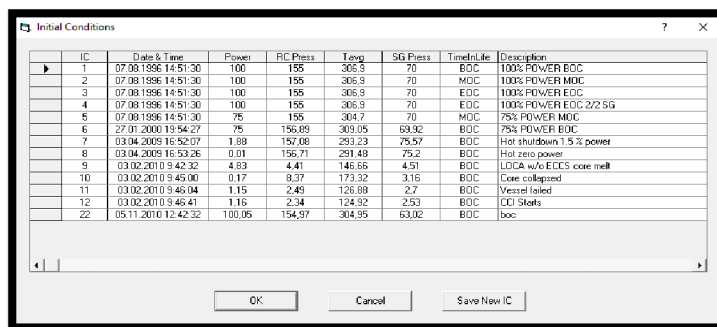


Obr. 21: Parametry vybrané havárie

Další parametr, který musí být vždy nastaven, jsou Initial Conditions (Počáteční podmínky). Do jejich seznamu se dostaneme po kliknutí na tlačítko Restart v horní nabídce simulátoru a dále po kliknutí na Initial Conditions (viz Obr. 22a) se zobrazí jejich seznam (viz Obr. 22b), kde je 13 základních podmínek, přednastavených od vývojářů.



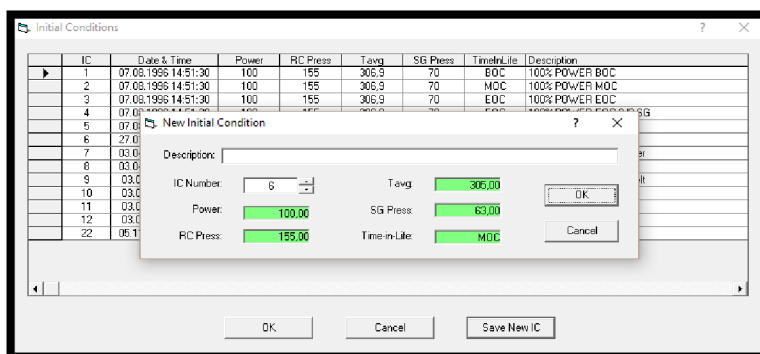
a)



b)

Obr. 22: a) Nabídka počátečních podmínek b) Seznam počátečních podmínek

Vytvoření nové počáteční podmínky je možné provést velmi jednoduše. Stačí kliknout levým tlačítkem myši na tlačítko Save New IC (Uložit novou počáteční podmínku) a zadat základní parametry (viz Obr. 23). Podrobnější parametry se dále nastavují až v databázi programu Access. V této databázi se nachází široké spektrum parametrů, které mají nějaký vliv na chod jaderné elektrárny.



Obr. 23: Vytvoření nové počáteční podmínky

Po otevření souboru **ListData.mdb**, který se nachází ve složce simulátoru PCTran VVER 1000, je na výběr hned několik oddílů obsahujících parametry, které mohou být měněny. Tyto oddíly jsou v Tab. 2.

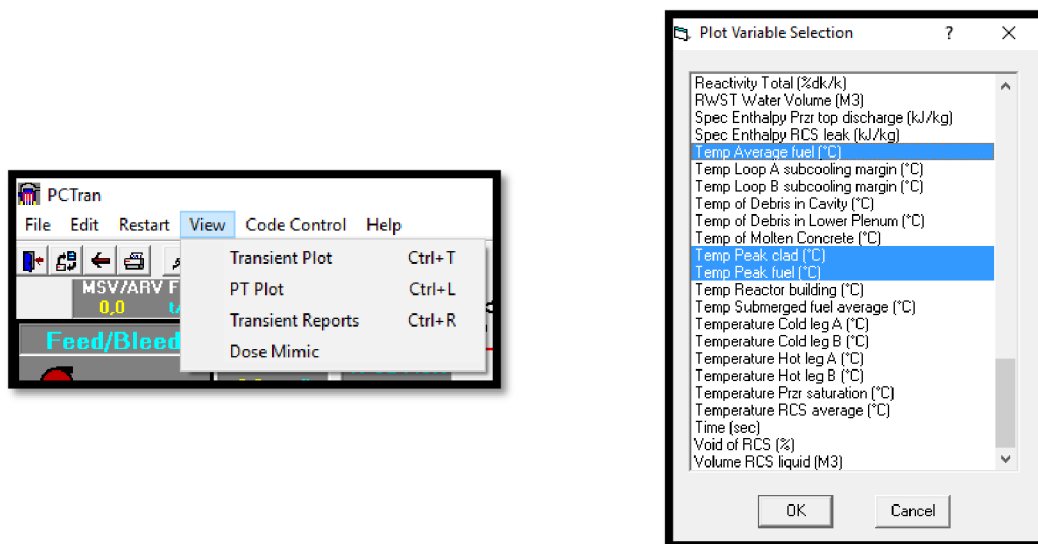
Tab. 2: Seznam oddílů souboru *ListData.mdb*

BasicData	Základní data jaderné elektrárny
ICControlsData	Stavy ovládacích tlačítek jednotlivých počátečních podmínek
ICFanData	Stavy ventilátorů
ICFanMalfData	Stavy selhání ventilátorů
ICHXData	Stavy výměníků tepla
ICHXMalfData	Stavy selhání výměníků tepla
ICMalfData	Základní parametry havárií
ICMalfDataTemp	Dočasný soubor pro havárie
ICPumpData	Stav čerpadel
ICPumpMalfData	Stav selhání čerpadel
ICThermoData	Soubor parametrů počátečních podmínek
ICTripData	Stavy selhání turbín
ICValveData	Stavy ventilů
ICValveMalfData	Stavy selhání ventilů
ListIC	Soubor s popisy jednotlivých počátečních podmínek
ListMalf	Soubor s popisy jednotlivých havárií

Jelikož každý oddíl obsahuje velký počet parametrů, tak je každý z nich stručně popsán. Tento popis se objevuje v levém dolním rohu po kliknutí na daný parametr v této databázi.

6.4 Grafické průběhy simulace, sled událostí a zobrazení stavu látek

Do možnosti vykreslování grafických průběhů námi provedených simulací se dostaneme po kliknutí levým tlačítkem myši v horní nabídce, kde se nám otevře seznam hned několika možností (viz Obr. 24a).

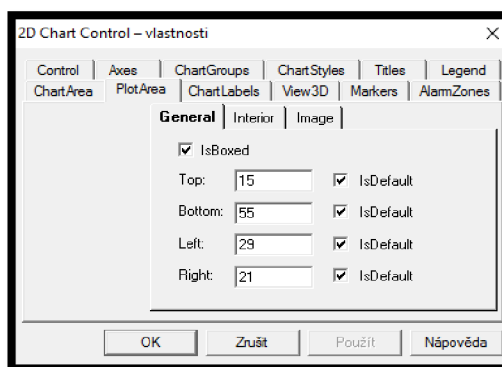


a)

b)

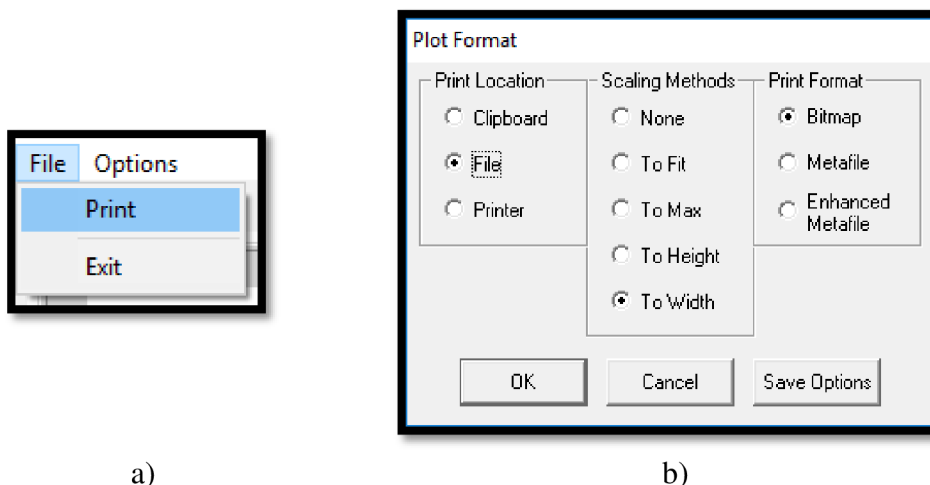
Obr. 24: a) Cesta k nabídce grafických průběhů simulací b) Seznam možností grafických průběhů

První z možností, kterou je možné vybrat, je Transient Plot (Přechodný děj). Slouží ke grafickému zobrazování jednotlivých veličin a parametrů v závislosti na délce simulace. Po kliknutí levým tlačítkem myši na tuto možnost se rozbalí široká tabulka parametrů, které je možné graficky zobrazit (viz Obr. 24b). V jednom grafickém průběhu může být více parametrů, což je dobré při různých porovnáváních a velmi to zjednodušuje práci. Aby tyto grafické průběhy lépe vypadaly a byly přehledné, tak je možné nastavit mnoho různých náležitostí, jako například název grafu, vzhled legendy, pozici vykreslované oblasti, atd. (viz Obr. 25). Tato nabídka se zobrazí po kliknutí pravým tlačítkem do okna grafického průběhu.



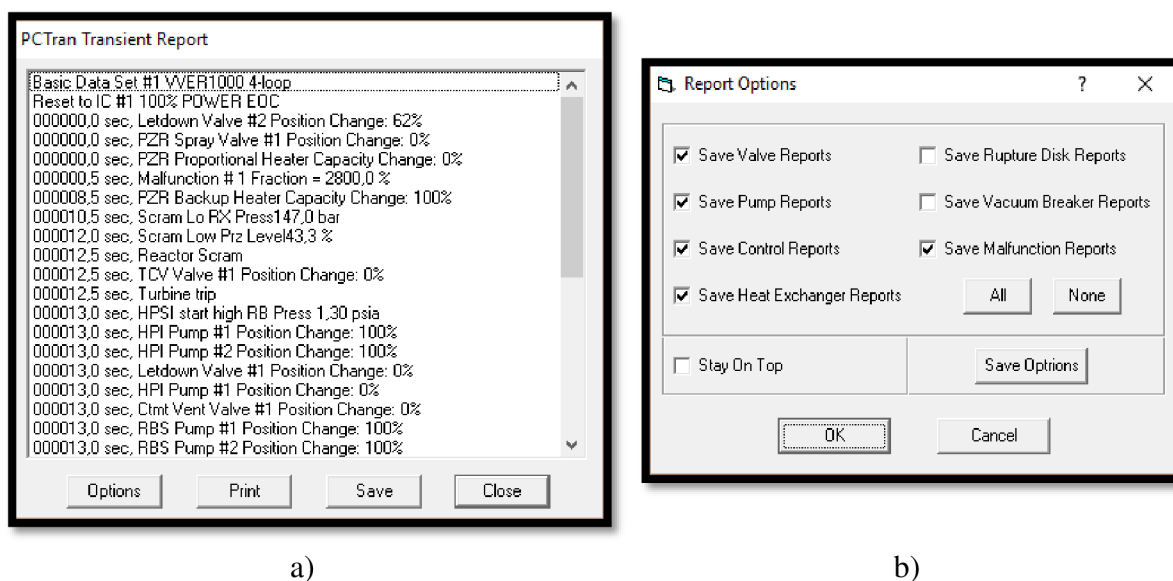
Obr. 25: Nabídka nastavení parametrů grafického průběhu

Následně, po nastavení všech potřebných parametrů, lze grafický průběh vyexportovat. Nabídka se zobrazí po kliknutí levým tlačítkem myši na File (Soubor) v horní nabídce a následně na Print (Tisk) (viz Obr. 26a). Následně se zobrazí tabulka, kde jsou tři možnosti exportu, a to do souboru, schránky nebo přímo vytisknout (viz Obr. 26b).



Obr. 26: a) Cesta k nabídce exportu grafických průběhů b) Nabídka exportu grafických průběhů

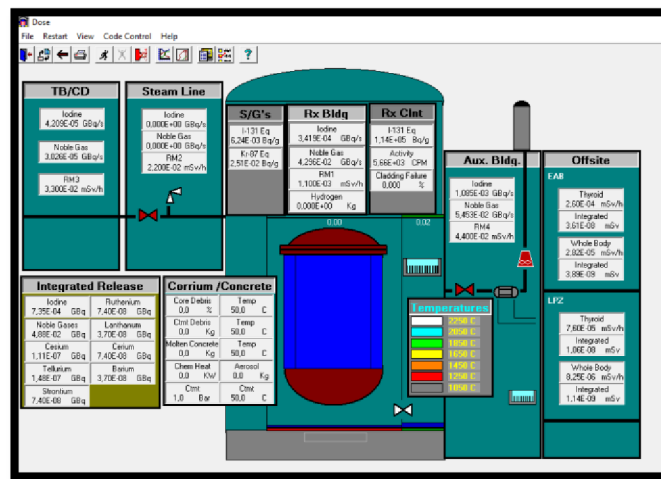
Kromě vykreslování a exportování grafických průběhů můžeme také sledovat sled v čase jednotlivých událostí, které se v průběhu situace dějí (viz Obr. 27a). Do této nabídky se dostaneme kliknutím levým tlačítkem myši v nabídce (viz Obr. 24a) na Transient Reports (Zpráva o přechodných událostech).



Obr. 27: a) Seznam proběhlých událostí b) Tabulka nastavení zobrazení a exportu těchto událostí

Můžeme si také vybrat, které události mají být zobrazovány. Toto nastavení se zobrazí kliknutím na tlačítko Options (Nastavení) (viz Obr. 27a). Po zvolení všech potřebných parametrů provedeme potvrzení tlačítkem OK (viz. Obr. 27b). V průběhu simulace nebo po jejím ukončení může být tento sled událostí vyexportován do externího PDF souboru. Tento krok se provede kliknutím levého tlačítka myši na Print (Tisk) (viz Obr. 27a).

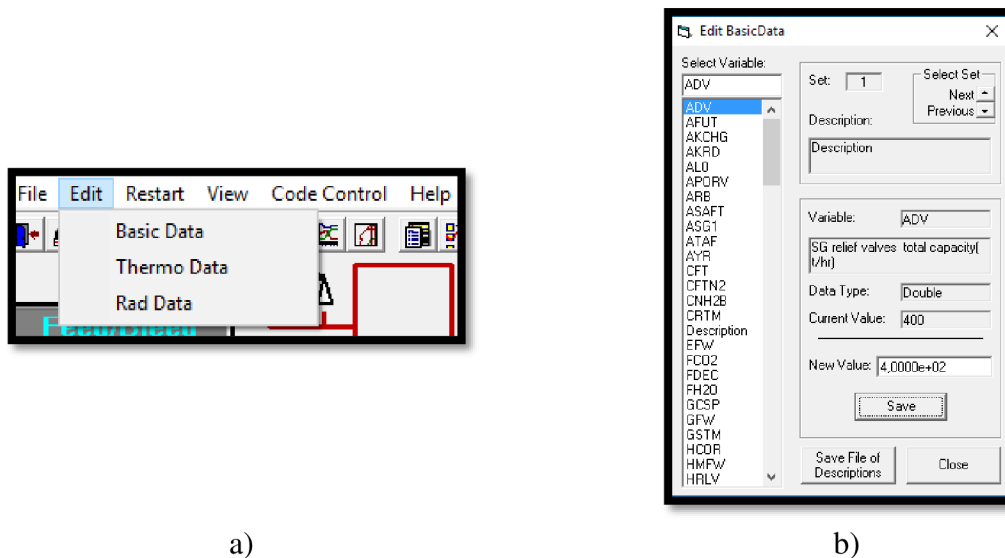
Poslední částí nabídky View je Dose Mimic (Dávkové prostředí) a je to grafické znázornění Nuclear Steam Supply System (Systém pro dodávku páry). Tohle prostředí umožňuje sledovat stav a úniky látek v oblasti jaderné elektrárny (viz Obr. 28). Jsou zde zobrazena také zařízení pro omezení těchto úniků.



Obr. 28: Uživatelské prostředí Dose Mimic

6.5 Nastavení parametrů jaderné elektrárny

Přímo v simulátoru je možné nastavit mnoho parametrů jaderné elektrárny. Mohou být nastavovány základní parametry (Basic Data), tepelné parametry (Thermo Data) a radiační data (Rad Data) (viz Obr. 29a).



Obr. 29: a) Seznam nabídky Edit (Editovat) b) Příklad tabulky jednotlivých parametrů

Po kliknutí levým tlačítkem myši na jednu z možností se zobrazí tabulka s jednotlivými parametry, které lze upravovat. Každý parametr obsahuje jednoduchý popis, včetně jednotek. Novou hodnotu parametru lze zadat do pole New Value (Nová hodnota) a následně potvrdit tlačítkem Save (Uložit). Je zde také možnost exportu textového souboru s celým seznamem parametrů, včetně popisu a jednotek. Tento export lze provést kliknutím levým tlačítkem myši na Save File of Descriptions (Uložit Soubor Popisků). V simulátoru jsou také nastavena data pro PWR, která mohou být nahrána kliknutím na šipku v poli Select Set (Vybrat nastavení). Pokud je vše nastaveno, tak stačí tabulku zavřít kliknutím na tlačítko Close (Zavřít) (viz Obr. 29b).

7 VERIFIKACE VÝSLEDKŮ ZE SIMULÁTORU PCTRAN

Na základě [36] bylo zjištěno, že DEMO verze simulátoru VVER 1000, která byla původně zamýšlena k využití, obsahuje chybu. Tato chyba zamezuje docílení ustáleného stavu jaderné elektrárny, a proto byla simulace prováděna v simulátoru PCTran VVER 1200, který má stejné uživatelské prostředí se stejnými možnostmi a nabízí možnost nastavení parametrů reaktoru VVER 1000. Výsledný výpočet v simulátoru PCTran musí být brán s opatrností a jistým nadhledem, protože teplotní výpočtový model, který simulátor obsahuje, je zjednodušený, jak je uvedeno v manuálu. [39]

Verifikace simulátoru PCTran je prováděna na základě srovnání výsledků pro havárii typu LOCA s výsledky, které jsou publikovány v [37].

7.1 Nastavení parametrů

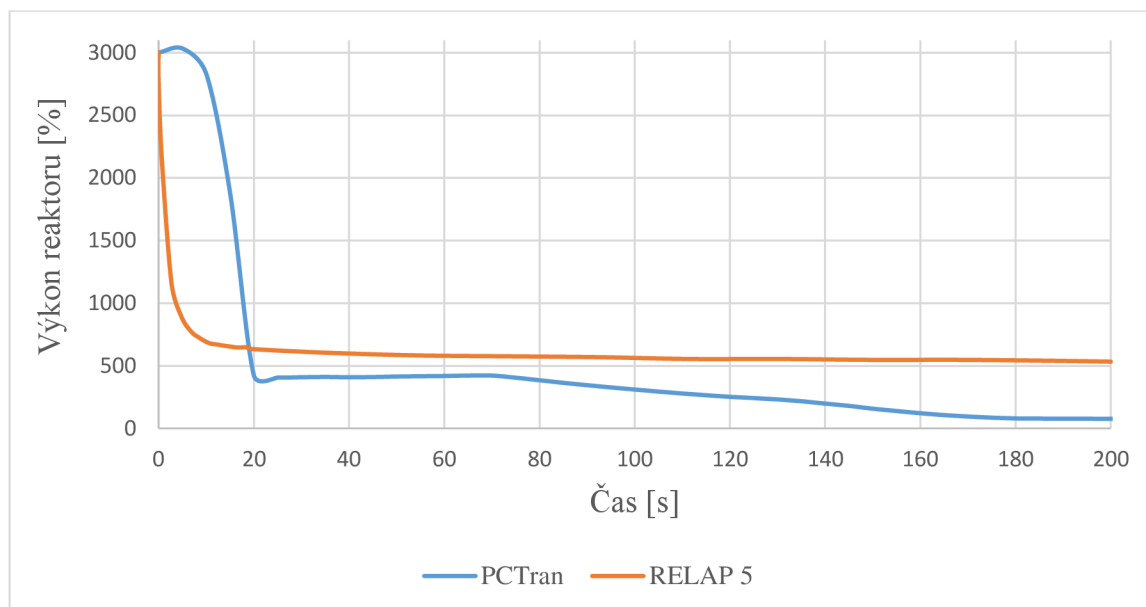
Před simulací byly nastaveny některé parametry (viz Tab. 3), které byly nastaveny i při simulaci v programu RELAP 5, se kterým jsme nasimulované výsledky dále porovnávali.

Tab. 3: Nastavované parametry v simulátoru PCTran [37]

Parametr	Hodnota
Tlak na primární straně [MPa]	15,8
Tlak na sekundární straně [MPa]	6,27
Maximální teplota pokrytí paliva [°C]	350
Maximální teplota paliva [°C]	2215
Maximální tepelný výkon reaktoru [MW _t]	3120
Maximální průtok chladiva aktivní zónou [t/hod]	55548

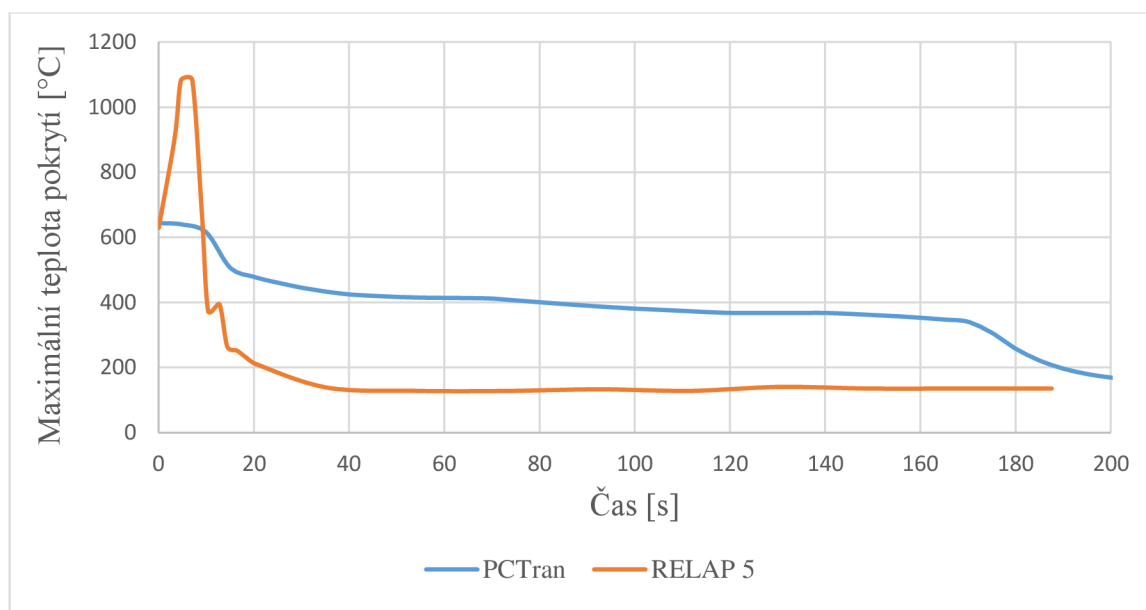
7.2 Simulace a porovnání výsledků

Na začátku byl nejprve simulován a porovnáván tepelný výkon reaktoru (viz. Obr. 30). V průběhu, který byl simulován v PCTranu, došlo po odstavení reaktoru k malému nárůstu a následnému rychlému poklesu tepelného výkonu reaktoru pod hodnotu 400 MW_t za prvních 20 sekund (viz Obr. 30). Dále již tepelný výkon klesal pozvolněji a v čase 200s byl přibližně na hodnotě 100 MW_t. V simulátoru RELAP 5 tepelný výkon od začátku havárie klesal a za prvních 10 sekund klesl na hodnotu přibližně 700 MW_t. Od tohoto okamžiku se jeho pokles velmi zmírnil a v dalším průběhu se téměř ustálil.



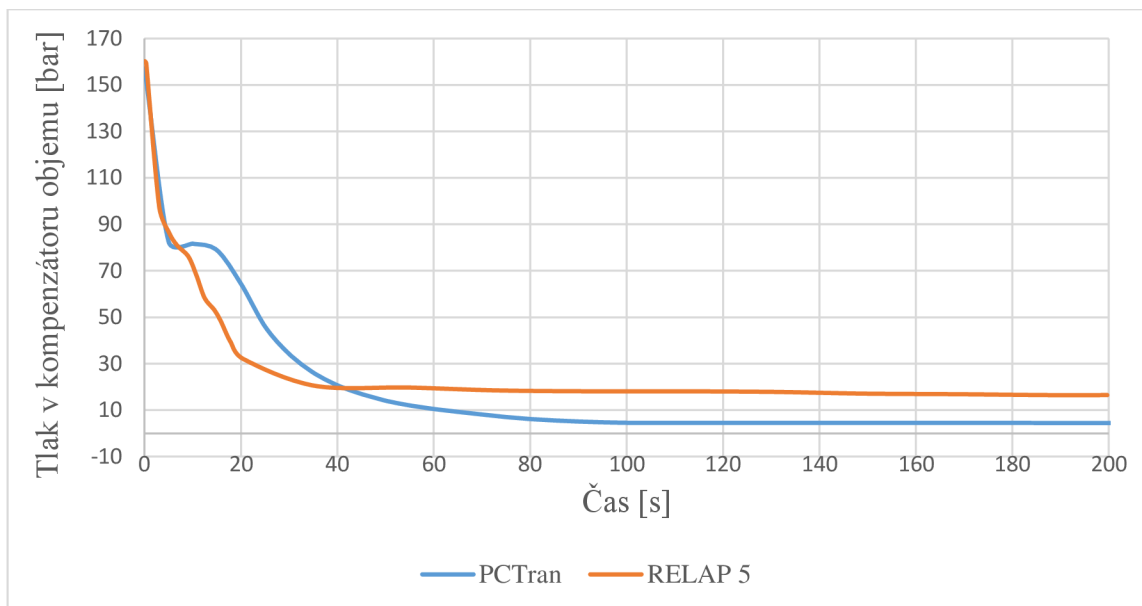
Obr. 30: Tepelný výkon reaktoru v závislosti na čase

Vývoj maximální teploty pokrytí je vidět na Obr. 31. Oba průběhy maximální teploty pokrytí paliva se liší, a to kvůli rozdílné přesnosti obou simulátorů. Tepelný model v simulátoru PCTran je zjednodušený a umožňuje zobrazení teplot pokrytí paliva za normálního provozu a při havárii. Pro výpočet je aktivní zóna reaktoru rozdělena na 6 celků, ze kterých simulátor v průběhu simulace využívá data, z nichž je vytvořen výsledný průběh teplot. Model simulátoru RELAP 5 je přesnější, protože je aktivní zóna rozdělena na více částí, tedy NODů. Při tepelném výpočtu v simulátoru RELAP 5 je brán zřetel na mnohem více parametrů, které ovlivňují průběh teploty v pokrytí paliva.



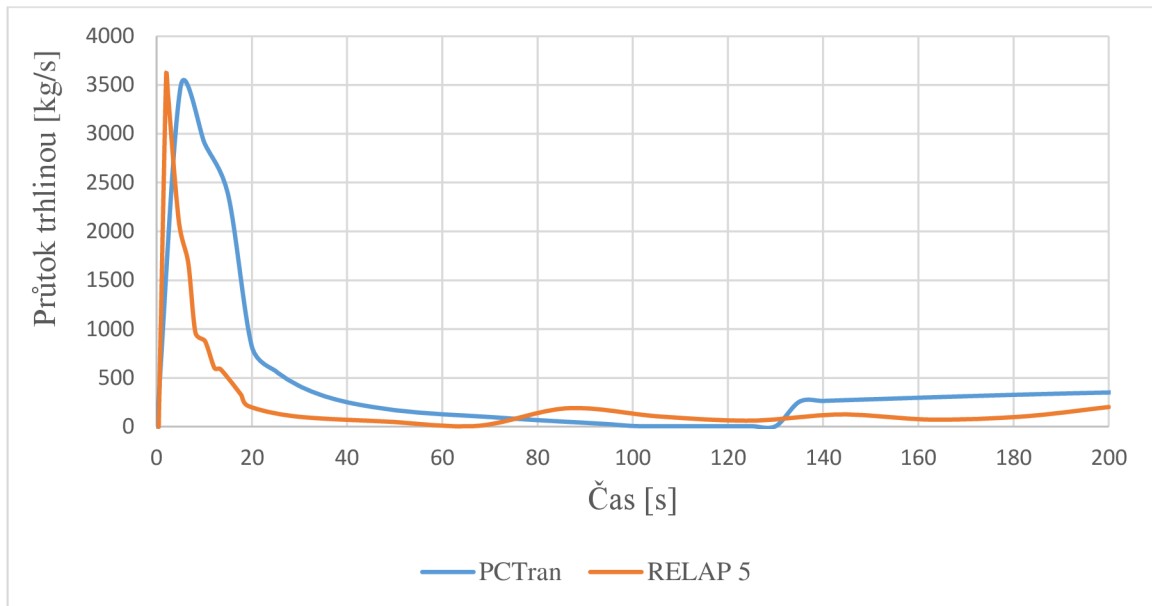
Obr. 31: Grafická závislost průběhu maximální teploty pokrytí paliva na čase

Dalším důležitým parametrem, který byl simulován a porovnán, je tlak v RCS. Výsledky analýzy jsou vidět na Obr. 32. Tlak v RCS velmi rychle společně klesal do doby 10 sekund. V této době došlo ke krátkodobému ustálení tlaku u simulátoru PCTran, což souvisí s vývojem tepelného výkonu reaktoru. Ten ve stejném časovém úseku lehce vzrostl, a tím byl ovlivněn tento tlak. Když dále začal tepelný výkon reaktoru klesat, tak i tlak v RCS začal výrazně klesat a kolem 60. sekundy simulace se toto klesání velmi zmírnilo. U simulátoru RELAP 5 došlo ke zmírnění poklesu dříve, jelikož se i pokles tepelného výkonu reaktoru zmírnil dříve. Celkové hodnoty tlaků v RCS jsou tedy závislé na vývoji tepelného výkonu reaktoru.



Obr. 32: Závislost tlaků v RCS na čase

Posledním porovnávaným parametrem bylo množství, které proteče v místě trhliny na potrubí studené větve (viz. Obr. 33). Ihned po prasknutí překročil průtok chladiva hodnotu 3500 kg/s u obou simulátorů. U simulátoru PCTran v 10. sekundě nastal zlom a množství chladiva, které protéká trhlinou, začíná výrazně klesat přibližně do 30. sekundy, kdy se tento pokles výrazně zmírní. V průběhu, ze simulátoru RELAP 5, je posunutí tohoto zlomu blíže k začátku havárie, což je způsobeno jeho přesností. Veškeré způsobené rozdíly se odvíjí od tlaků v RCS, které jsou vidět na Obr. 32.



Obr. 33: Závislost množství chladiva, které proteče trhlinou na čase

8 VÝPOČET A SIMULACE TEPELNÝCH PARAMETRŮ PALIVA TVSA-T

8.1 Výpočet tepelných parametrů

Výpočet tepelných parametrů byl prováděn pro palivo typu TVSA-T s délkou 3,942 m. K výpočtům byla použita hodnota nominálního tepelného výkonu 3000 MW_t. Bylo uvažováno, že je v reaktoru 163 palivových kazet, kde každá obsahuje 312 palivových proutků.

Nejprve bylo třeba spočítat výkon v palivové kazetě (viz rov. (1)) a z něj potom výkon pro jeden palivový proutek (viz rov. (2)). Pro palivovou kazetu vyšel tento výkon 18,4 MW a pro palivový proutek 5,9 kW.

$$P_{1kazeta} = \frac{P_{nominální}}{\text{Počet palivových kazet}} \text{ (W)} \quad (1)$$

$$P_{1proutek} = \frac{P_{1kazeta}}{\text{Počet proutků v palivové kazetě}} \text{ (W)} \quad (2)$$

Když byly známy výkony, tak mohl být proveden výpočet lineárního tepelného výkonu (viz rov. (3)). Po dosazení parametrů vyšel lineární tepelný výkon 14,927 kW/m. [35]

$$q_{H(TVSA-T)} = \frac{P_{1proutek}}{l_{TVSA-T}} \text{ (W/m)} \quad (3)$$

kde l_{TVSA-T} – délka palivového proutku typu TVSA-T

Dále byla spočítána integrální tepelná vodivost (viz rov. (4)). [35]

$$\vartheta(t) = \int_0^T \lambda(t) dt \text{ (W/m)} \quad (4)$$

kde λ – součinitel prostupu tepla; t – teplota ve °C

Po zintegrování a dosazení do rovnice (4) vyšla výsledná rovnice (5) pro integrální tepelnou vodivost UO₂. Okrajová teplota pelety T_p byla určena jako modelová teplota 650 °C z [35]. Po zjištění této teploty byl proveden výpočet integrální tepelné vodivosti UO₂ (viz rov. (5)).

$$\vartheta_{UO_2}(t) = a_0 + a_1 \ln(a_3 + t) + a_2(t + 273,15)^n \text{ (W/m)} \quad (5)$$

kde je $a_0 = -2,4 \cdot 10^{-6}d$; $a_1 = 4000d$; $a_2 = 6,8 \cdot 10^{-15}$; $a_3 = 403,15$; $n = 5$; $d_{UO_2} = 0,96$;

t – teplota ve °C

Po dosazení všech známých parametrů vyšly výsledné integrální tepelné vodivosti uvedené v Tab. 4.

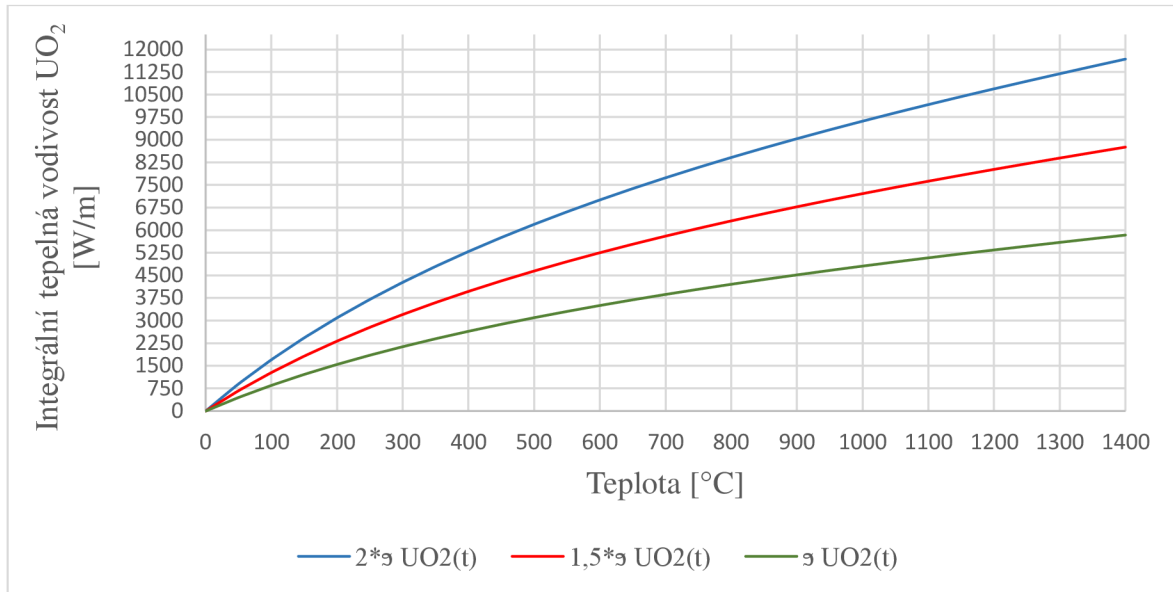
Dalším určeným parametrem byl rozdíl mezi spočítanou ϑ_{UO_2} a novou ϑ_{UO_2} (viz rov. (6)). Po zjištění tohoto rozdílu, který po dosazení do rovnice (6) vyšel 1188 W/m, byla spočítána nová integrální tepelná vodivost UO₂ (viz rov. (7)).

$$\vartheta_2 = \frac{q_{H(TVSA-T)}}{4\pi} \text{ (W/m)} \quad (6)$$

$$\vartheta_{UO_2nová}(t) = \vartheta_2 + \vartheta_{UO_2} \text{ (W/m)} \quad (7)$$

Po dosazení do rovnice (6) vyšly nové integrální tepelné vodivosti uvedené v Tab. 4. Nyní, když byly známy hodnoty nových integrálních tepelných vodivosti, tak bylo možné určit teploty v centru palivového proutku. Tyto teploty byly určeny z grafické závislosti (viz Obr. 34) a pro jejich určení bylo využito nových spočítaných integrálních tepelných vodivosti.

Z grafické závislosti byly odečteny teploty T_c , které jsou uvedeny v Tab. 4. S rostoucí integrální tepelnou vodivostí klesala teplota v centru palivového proutku. Teplotní rozdíly pro $1,5 \cdot \epsilon_{UO_2}$ a $2 \cdot \epsilon_{UO_2}$ již nejsou moc velké.



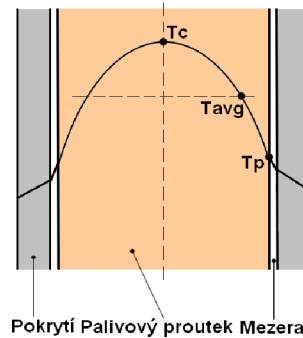
Obr. 34: Grafická závislost jednotlivých integrálních vodivostí

Ze zjištěných teplot v centru paliva byl spočten poslední parametr, kterým byla průměrná teplota palivového proutku při 100% výkonu (viz rov. (8)). Výsledné hodnoty těchto teplot jsou uvedeny v Tab. 4.

$$T_{avg} = \frac{T_p + T_c}{2} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (8)$$

kde je T_p – okrajová teplota pelety a T_c – teplota v centru palivového proutku

Na Obr. 35 je vidět, jaký mají přibližně průběh vypočítané teploty v palivovém proutku.



Obr. 35: Průběh teplot v palivovém proutku a jeho pokrytí

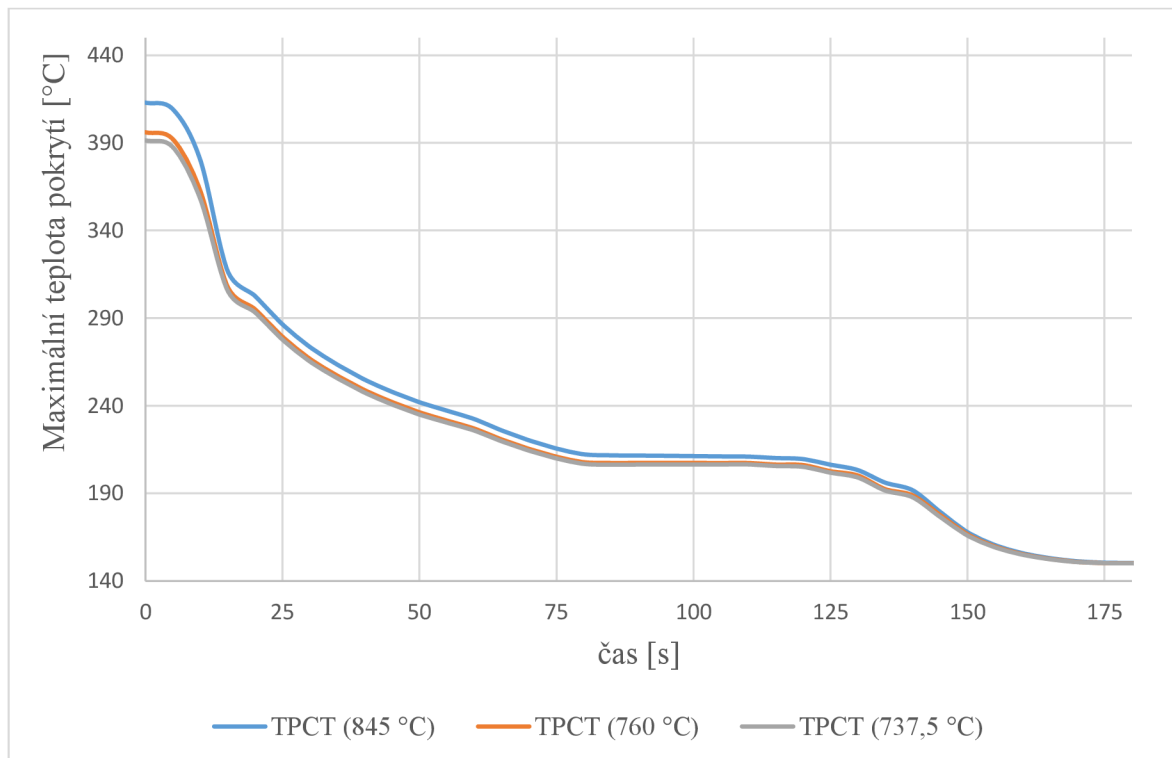
Tab. 4: Vypočtené teplotní parametry pro palivo TVSA-T

	$q_{UO_2nová}$ (W/m)	T_c (°C)	T_{avg} (°C)
UO ₂	4877	1040	845
1,5*UO ₂	6722	870	760
2*UO ₂	8566	825	737,5

8.2 Simulace vypočtených tepelných parametrů

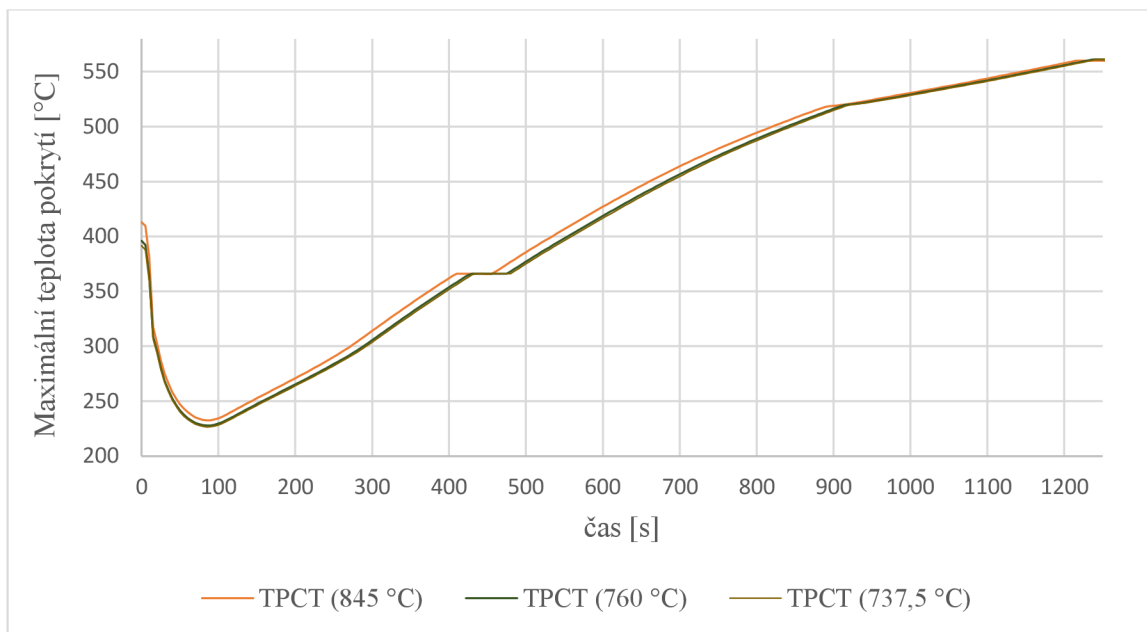
Pro výše zjištěné teploty byla provedena simulace v simulátoru PCTran. Tato simulace byla prováděna pro dvě zcela rozdílné situace. Dále bylo zjištěno, že díky zvýšení tepelné vodivosti palivového proutku se zvýšila i počáteční teplota pokrytí paliva a také teplota v centru palivového proutku. (viz Obr. 36 a Obr. 37.).

V prvním případě byly zapnuty havarijní chladicí systémy a je vidět (viz Obr. 36), že ihned po vzniku havárie LB LOCA došlo k jejich aktivaci a zaplavení aktivní zóny. Z toho důvodu začaly klesat teploty pokrytí paliva. V prvních 20 sekundách byl pokles teplot vyšší, protože došlo k rychlému zaplavení aktivní zóny. V dalším průběhu se postupně pokles teplot zmírňoval, až došlo, přibližně v čase 140 sekund, k ustálení na téměř totožnou teplotu z důvodu zaplavení celé aktivní zóny.



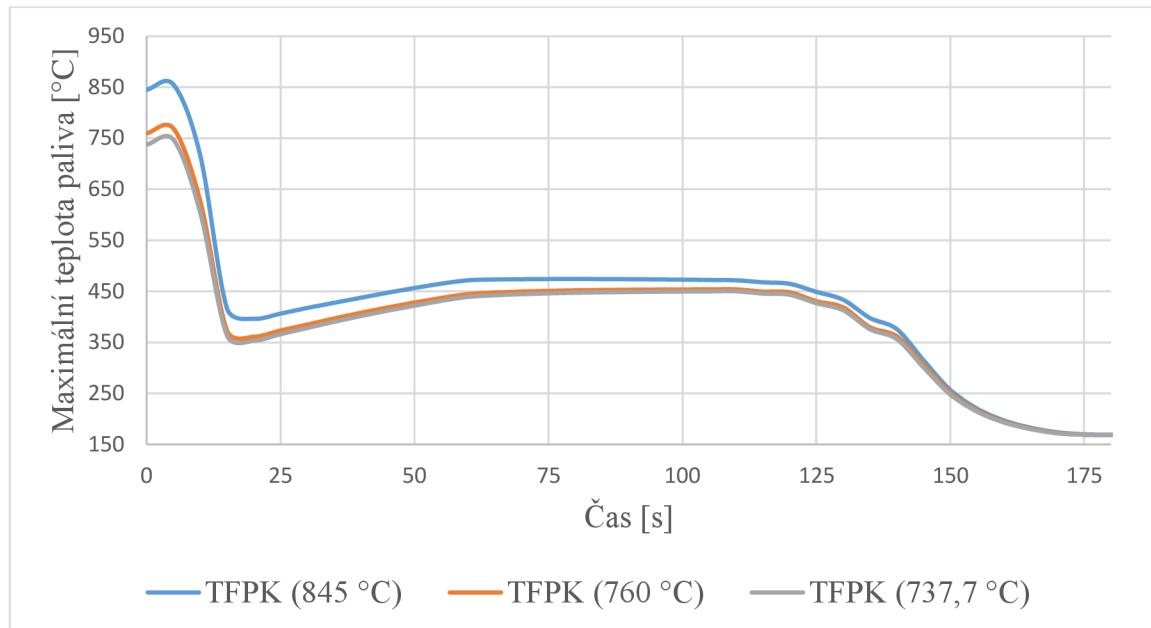
Obr. 36: Závislost maximální teploty pokrytí paliva s aktivními havarijními chladicími systémy (LB LOCA)

V druhém případě byly zablokovány všechny havarijní chladicí systémy. Z toho důvodu začala teplota pokrytí paliva narůstat od 80. sekundy, kdy se začalo vypařovat chladivo z aktivní zóny, což způsobilo obnažování paliva a nárůst teplot (viz Obr. 37). Počáteční pokles teplot, který trval přibližně 80 sekund, byl způsoben dostatkem chladiva v aktivní zóně. Od této doby se začalo palivo obnažovat, a díky tomu začala narůstat teplota pokrytí paliva. V časovém rozmezí 430 sekund až 480 sekund došlo k úplnému obnažení paliva, což se projevilo průběhu teplot (viz. Obr. 37). Teplota pokrytí paliva rostla až do doby přibližně 1250 sekund. V této době došlo k ustálení teploty na hodnotě 560 °C, což je krajní hodnota teploty, pro kterou je prováděn výpočet simulátorem. V této době již byla aktivní zóna dávno bez chladiva, které se vypařilo vlivem vysokých teplot.



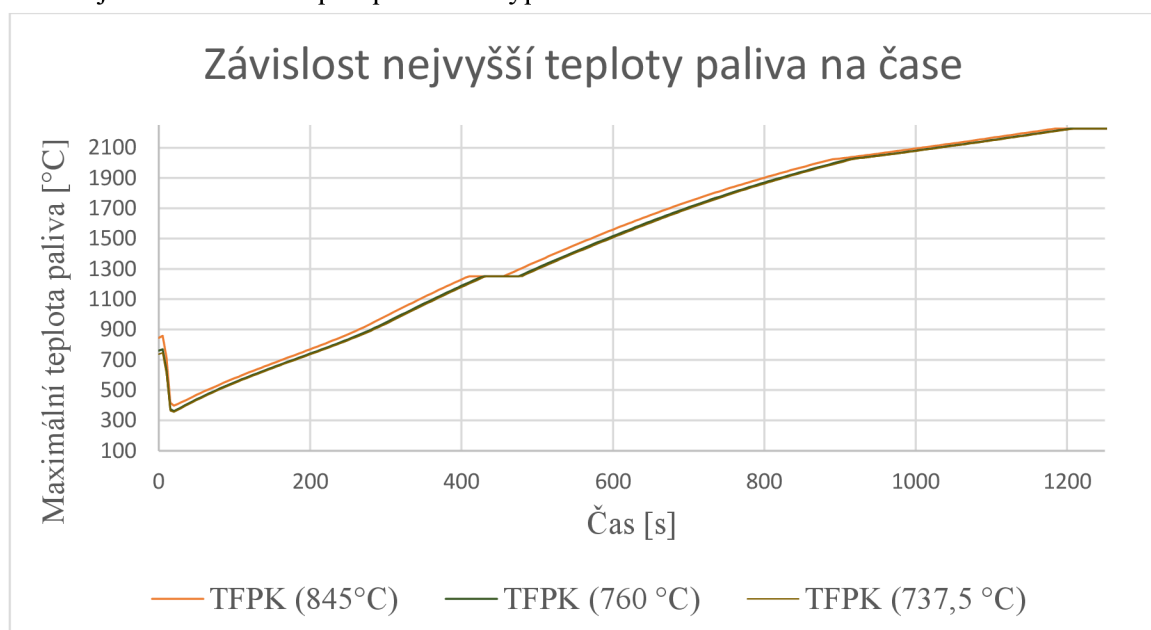
Obr. 37: Závislost maximální teploty pokrytí paliva bez aktivních havarijních chladicích systémů (LB LOCA)

Byla nasimulována i maximální teplota paliva pro stejné situace, jako maximální teplota pokrytí paliva. V prvním případě byly zapnuty havarijní chladicí systémy, a proto teplota nepřekročila teplotu, při které by došlo k poškození paliva, a havárie byla zvládnuta. Pokles teplot v prvních 20 sekundách byl vyšší, protože bylo dostatek chladiva v aktivní zóně (viz Obr. 38). Od 20 sekund do 110 sekund probíhal mírný nárůst teploty, protože unikla část chladiva a od 110. sekundy začala být opět zaplavována aktivní zóna a v době 170 sekund byla celá zaplavena a pokles teplot se ustálil.



Obr. 38: Závislost maximální teploty paliva s aktivními havarijními chladicími systémy (LB LOCA)

V druhém případě maximální teplota pokrytí paliva prudce klesala v prvních 25 sekundách ze stejného důvodu jako při zapnutých havarijních chladicích systémech, tedy protože bylo dostatek chladiva v aktivní zóně. Od 25 sekund začalo chladivo unikat a palivo se postupně obnažovalo. V době 430 sekund až 480 sekund se obnažilo celé palivo, což se projevilo v průběhu teplot (viz Obr. 39). Je vidět, že se tento jev projevil ve stejné době, jako u maximální teploty pokrytí paliva, jen ve vyšších hodnotách teplot. Dále teploty stále rostly až do doby přibližně 1250 sekund, kdy došlo k ustálení na teplotě 2250 °C, což je nejvyšší teplota, pro kterou je simulátor schopen provádět výpočet.



Obr. 39: Závislost maximální teploty paliva bez aktivních havarijních chladicích systémů (LB LOCA)

9 ZÁVĚR

Jedním z cílů bakalářské práce bylo vysvětlení a popis jednotlivých částí primárního a sekundárního okruhu se zaměřením na jaderné reaktory typu VVER-440, bezpečnostní systémy a jaderné bezpečnosti i s příklady situací, které mohou nastat. K popisu jsem si vybral tyto jaderné reaktory z důvodu, že jsou nejrozšířenějším typem jaderných reaktorů po celém světě. Jejich moderátorem i chladivem je lehká voda, která je pod vysokým tlakem, což zaručuje, že nedojde do bodu varu.

Další část práce se věnuje vybraným bezpečnostním systémům, které musí být v každé jaderné elektrárně. Tyto systémy jsou velmi důležité a musí být pečlivě navrženy již při projektování celé jaderné elektrárny. Mezi bezpečnostní systémy patří kontejnment, který je u Dukovan vakuobarbovázní, a nejedná se tedy o klasický kontejnment. Protože je velmi důležitá bezpečnost kontejnmentů, tak je část této kapitoly věnována krátkému popisu jejich testování a zkouškám, které se provádí před zařazením do provozu v jaderné elektrárně. Dalšími důležitými bezpečnostními systémy jsou aktivní sprchový systém, nízkotlaký aktivní systém a vysokotlaký aktivní systém. Tyto dva systémy jsou velmi důležité při havárii LOCA, která souvisí s unikem chladiva z primárního okruhu. Nepostradatelnou součástí v oblasti bezpečnostních systému jsou podpůrné systémy pro dodávku energie vlastní spotřeby jaderné elektrárny, kterými jsou dieselgenerátorové stanice a záložní bateriové články. Havárie a události, které nastanou nebo mohou nastat, se musí nějak klasifikovat, a proto je část práce věnována popisu mezinárodní stupnice INES, která je k tomuto účelu určena. Stupnice je rozdělena na 7 částí, kde nejvyšší číslo představuje nejhorší událost a nejnižší číslo pak událost nejméně závažnou. V práci jsou uvedeny také příklady událostí, které se staly na jaderných elektrárnách a nechybí ani jejich hodnocení dle stupnice INES. Jsou zde i události, které jsou tak málo závažné, že se hodnotí jako události mimo tuto stupnici. Následuje rozdělení těchto událostí do základních kategorií, které se dělí na očekávané, možné a málo pravděpodobné. Mezi ty málo pravděpodobné patří i havárie LOCA. Pro případ vzniku této havárie je v elektrárně nízkotlaký aktivní systém a vysokotlaký aktivní systém. Oba tyto systémy slouží ke zvládnutí havárie tohoto typu.

Praktická část bakalářské práce se věnuje seznámení se se simulátorem jaderné elektrárny, který se jmenuje PCTran a byl vytvořen společností Micro-Simulation Technology. Seznámení je vytvořeno formou jednoduchého uživatelského manuálu pro jeho ovládání. Jsou v něm popsány jednotlivé části a parametry, které se v něm nachází a mohou být modifikovány. Druhou praktickou částí je analýza nasimulovaných dat v PCTranu a dat, která byla simulována pomocí simulátoru RELAP 5 a publikována v [37]. Při bližším porovnání bylo zjištěno, že se výsledky obou simulací liší. Tento jev mohl být způsoben rozdílnou přesností výpočtů a rozdílnými teplotními modely u obou simulátorů. Dále byl proveden výpočet teplotních parametrů pro palivo TVSA-T a následná simulace pro dva rozdílné případy, které by mohly v jaderné elektrárně nastat. V prvním z nich byly zapnuty všechny havarijní chladicí systémy, a díky tomu klesaly teploty pokrytí paliva. V druhém případě byly zablokovány všechny havarijní chladicí systémy, díky čemuž začala velmi rychle narůstat teplota pokrytí, které ztrácí ve vysokých teplotách své mechanické vlastnosti. Z výsledků bylo zjištěno, že s rostoucí

integrální tepelnou vodivostí rostla i maximální teplota pokrytí paliva a maximální teplota paliva.

Simulátor PCTran nabízí široké množství simulací pro různé stavy, které mohou v jaderné elektrárně nastat, což může do budoucna ještě více pomoci ke zkvalitnění připravenosti personálu, který v jaderných elektrárnách pracuje a umožní vytvořit si lepší představu o tom, jaký průběh tyto situace mohou mít.

10 LITERATURA

- [1] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Vyd. 2. Brno: Zdeněk Novotný, 2005,c2002, 196 s. ISBN 80-214-2945-3.
- [2] Jan Holovka 2015. *Reaktor VVER 440 (v 230)* [online]. 2015 [cit. 2015-10-07]. Dostupné z: <http://jenda.moxo.cz/wp-content/uploads/vver.jpg?2733ab>
- [3] Paksi Atomerómű Zrt. *Az MVM Paksi Atomerómű Zrt.* [online]. Maďarsko, 2015 [cit. 2015-11-11]. Dostupné z: http://www.atomeromu.hu/hu/PublishingImages/Hogy_mukodik_4.jpg
- [4] Třípól: e-zin popularizující vědu a techniku. *Třípól: e-zin popularizující vědu a techniku* [online]. 2012. 2012 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/510-co-vydrzi-kontejnment-jaderne-elektrany>
- [5] MATAL, Oldřich a Hugo ŠEN. *Jaderná zařízení a jejich bezpečnost*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s. r. o, 2011. ISBN 978-80-214-4349-5.
- [6] Simopt, s.r.o. *Simopt, s.r.o.* [online]. 1998 [cit. 2015-10-01]. Dostupné z: http://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/kompen_obj.html
- [7] Magazín Třípól. *Magazín Třípól* [online]. 2010 [cit. 2015-10-01]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=i2ymvJWYsh4>
- [8] *Modernizace sekundárního okruhu JE Dukovany* [online]. Brno, 2009 [cit. 2015-10-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18515
Bakalářská práce. VUT Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Hugo Šen.
- [9] TVRDÝ, Bc. Miloslav. *Návrh programu pro výpočet výkonu a průtoku aktivní zónou z parametrů sekundárního okruhu pro JE s reaktorem VVER 440*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Nerud.
- [10] NUCLEAR ENERGY. In: *Agency committe on the safety of nuclear installations: answers to remaining questions on bubbler condenser* [online]. 2003 [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2003/csni-r2003-12.pdf>
- [11] Allforpower.cz. *Allforpower.cz* [online]. 2008 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/jaderna-revoluce-je-zpet-britove-postavi-nove-reaktory/>
- [12] *Jaderna-bezpecnost.cz*. *Jaderna-bezpecnost.cz* [online]. 2007 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: <http://www.jaderna-bezpecnost.cz/bezpecnost-jaderneho-reaktoru.htm>

- [13] STUDÝNKA, Bc. Radim. *Modely a analýzy v kontejmentovém systému s potlačením tlaku při haváriích s únikem chladiva* [online]. Brno, 2014 [cit. 2015-10-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87498
Diplomová práce. VUT Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jiří Martinec, Ph.D.
- [14] Jadrova a vyradovacia spoločnosť, a.s. *Jadrova a vyradovacia spoločnosť, a.s* [online]. 2015 [cit. 2015-10-07].
Dostupné z: <http://www.javys.sk/en/information-service/photo-gallery/v1-nuclear-power-plant?p=30>
- [15] Státní úřad pro jadernou bezpečnost. *Státní úřad pro jadernou bezpečnost* [online]. Praha, 2015 [cit. 2015-10-07]. Dostupné z: <https://www.sujb.cz/jaderna-bezpecnost>
- [16] Mezinárodní stupnice hodnocení závažnosti jaderných událostí: Uživatelská příručka. SÚJB, 2001.
Dostupné z: <https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/dokumenty/publikace/INES.pdf>
- [17] Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí. ČEZ. *Mezinárodní stupnice pro hodnocení jaderných událostí* [online]. 2006 [cit. 2015-10-08].
Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/stupnice.pdf>
- [18] ZÁKON č. 18/1997 Sb: o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů. In: *Sbírka zákonů*. 1997.
Dostupné z: https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/legislativa/zakony/Atomovy_zakon_20120103.pdf
- [19] MATOUŠEK, Antonín. *Výroba elektrické energie*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Ústav elektroenergetiky, 2007, 139 s. ISBN 978-80-214-3317-5.
- [20] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Vyd. 3. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005, 211 s. ISBN 80-010-3189-6.
- [21] JE Dukovany, největší koncentrace velkých dieselgenerátorů. ČEZ, A. S. *JE Dukovany, největší koncentrace velkých dieselgenerátorů* [online]. 2014 [cit. 2015-10-14]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektřiny/lto-dukovany/aktuality/6.html>
- [22] Havárie spojené se ztrátou chladiva (LOCA). *Atomová energie, zpravodajství – portal Atominfo.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-10-17].
Dostupné z: <http://atominfo.cz/2013/12/havarie-spojene-se-ztratou-chladiva/>
- [23] O záložních bateriových člancích. *AF POWER agency, a.s.* [online]. 2012 [cit. 2015-10-23].
Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/enersys.pdf>
- [24] Virtuální prohlídka JE Dukovany. ČEZ, a. s. [online]. 2015 [cit. 2015-10-27].
Dostupné z: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-dukovany/>
- [25] Písemná komunikace s Pavlem Skoupým (Výcvikový inženýr JE ČEZ / Základní příprava JE ČEZ) dne 27. října 2015.

- [26] SLUGENĚ, Vladimír. *Safety of VVER-440 reactors: barriers against fission products release*. New York: Springer, c2011, xi, 178 p. ISBN 18-499-6419-X.
- [27] *Design basis and design features of WWER-440 model 213 nuclear power plants: Reference plant: Bohunice V2 (Slovakia)*. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1994. ISBN 0014-2751. ISSN 1011-4289.
- [28] Atomová katedrála po 25 letech - II. *Sdružení směnového personálu jaderných elektráren* [online]. 2010 [cit. 2015-11-01].
Dostupné z: <http://www.dukovany.cz/atomova-katedrala-po-25-letech-ii.html>
- [29] BODANSKY, David. *Nuclear energy: principles, practices, and prospects*. University of Washington: Springer, 2004. ISBN 0-387-20778-3.
- [30] KOVACS, Zoltan. *Probabilistic safety assessment of WWER440 reactors: Quantification and Management of the Risk*. New York: Springer, 2014, pages cm. ISBN 978-331-9085-470.
- [31] Sorinc: Engineered to Order with Off-the-Shelf Speed. *Sorinc* [online]. 2015 [cit. 2015-11-12].
Dostupné z: <http://www.sorinc.com/industries/nuclear-power-generation/lpci-low-pressure-emergency-core-cooling-systems/>
- [32] Pressurized Water Reactor (PWR) Systems. In: *Pressurized Water Reactor (PWR) Systems* [online]. 2015 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>
- [33] UGRYUMOV, Alexander. Nuclear fuel for NPP:.. In: *Current status and main fields of the development* [online]. Praha, 2013 [cit. 2016-03-28].
Dostupné z: <http://ftp.vver2013.com/VVER%202013%20-%20Day%20II.,%20Parallel%20Section%20II.,PDF/Ugryumov%20A..pdf>
- [34] WWER-1000 Reactor Simulator: Material for Training Courses and Workshops. In: *WWER-1000 Reactor Simulator: Material for Training Courses and Workshops* [online]. Vídeň, 2005 [cit. 2016-03-29]. 2.
Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/tcs-21_2nd_web.pdf
- [35] HEŘMANSKÝ, Bedřich. *Termomechanika jaderných reaktorů: vysokoškolská učebnice pro vysoké školy technické, studijní obor 39-39-8 Jaderné inženýrství*. 1. vyd. Praha: Academia, 1986.
- [36] Písemná komunikace s Dr. Li-chiem Cliffem Poem (Prezident společnosti Micro-Simulation Technology) dne 4. dubna 2016.
- [37] *Uncertainty Analysis of LB-LOCA in VVER-1000 Geometry* [online]. Portorož, Slovinsko, 2003 [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/36/115/36115770.pdf
- [38] Obudowa bezpieczeństwa. In: *Nuclear.pl* [online]. Polsko: WILD, 2014 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.nuclear.pl/energetyka,obudowa,0.html>
- [39] *PCTTRAN/VVER-1000: Personal Computer Transient Analyzer Of VVER-1000*. Verze 1.1. Montville, New Jersey 07045, USA, 2012.