

# Simulace provozu JE s reaktory VVER 440 a CANDU 6

J. Chroust - SPŠ SE České Budějovice  
V. Bereščák - Gymnázium Nový Bydžov  
M. Kovář - Gymnázium Karla Sladkovského, Praha 3

## Abstrakt:

Cílem našeho projektu bylo se seznámit s principy a vlastnostmi reaktorů VVER 440, CANDU 6 a simulovat jejich provoz v JE. Simulace provozu JE s uvedenými reaktory probíhala ve speciálních programech. Provedli jsme si simulaci jak běžného provozu tak i havarijních stavů.

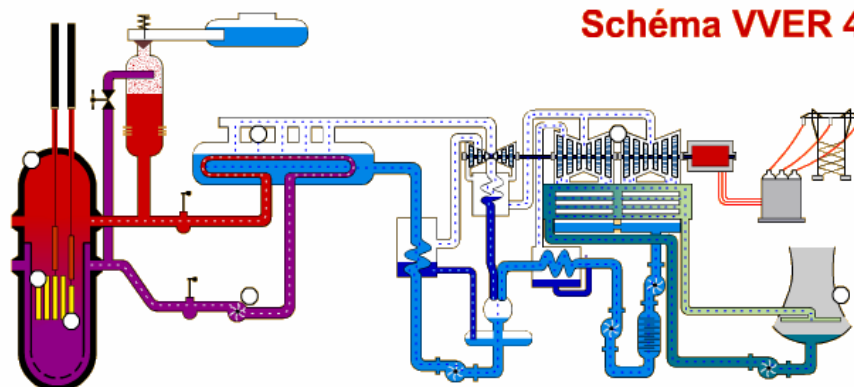
## 1 Úvod

Náš projekt jsme si vybrali z důvodu nynějšího velkého odporu rakouských aktivistů, kteří usilují o zavření JE Temelín pod záminkou případného jaderného nebezpečí pro jejich stát. A proto jsme se chtěli dovědět více informací o principech a konstrukci jaderných elektráren, především ze strany bezpečnosti provozu. Reaktory VVER patří v nynější době k nejpoužívanějším (tímto typem jsou u nás vybaveny obě JE Temelín a Dukovany).

## 2 Teoretická část a simulace

### Základní informace o VVER 440

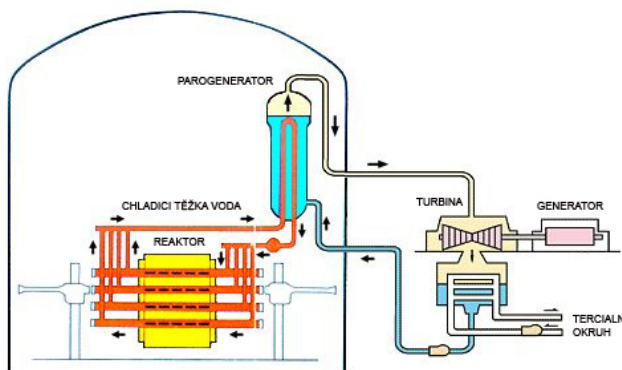
- Ruské zkratce VVER (Водо-водяной энергетический реактор = Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor) odpovídá anglický ekvivalent PWR (Pressurized light-Water cooled and moderated Reactor). Tento reaktor je chlazen a moderován lehkou vodou.



Jedná se o tlakovodní reaktor, který má tlak v primárním okruhu 12,26MPa a teplotu chladiva v rozmezí 267°C - 297°C. Do tohoto reaktoru se vkládá jako palivo obohacený uran (2 % - 4%  $^{235}\text{U}$ ) ve formě oxidu uraničitého. Reaktor má 349 palivových kazet o celkové hmotnosti paliva 41,88t (hmotnost paliva jedné kazety 120kg). Již název nám říká, že tento reaktor má elektrický výkon 440MW, ale tepelný výkon reaktoru je 1375MW, z čehož nám vyplývá, že účinnost není zrovna nejvyšší. Pohybuje se kolem 32,7%. K regulaci reaktoru se využívají regulační kazety obsahující bórovou ocel a moderátor obsahuje kyselinu boritou (max. 12g na litr vody). K dosažení ještě větší bezpečnosti přispívá záporná teplotní zpětná vazba. Při zvýšení střední teploty v aktivní zóně dochází k poklesu hustoty všech obsažených materiálů, což způsobí snížení neutronového toku a tím i generovaného tepelného výkonu. To vede ke stabilizaci provozu. Celý primární okruh je zaplněn vodou. Je v něm umístěn tzv. kompenzátor objemu pro kompenzaci objemových změn chladiva a k udržování konstantního tlaku, který pomocí sprch a ohříváků, které způsobí kondenzaci respektive vznik páry nad hladinou. Sekundární okruh jaderné elektrárny je konstruován v paralelním provedení se dvěma turbogenerátory o výkonu 220MWe, nízkotlakou a vysokotlakou regenerací, napájecími nádržemi a napájecími čerpadly.

- V současnosti je tento typ reaktoru v České Republice využit v JE Dukovany, která má celkově 4 bloky.

## Základní informace o CANDU 6



- Na těžkovodním reaktoru typu CANDU (CANada Deuterium Uranium) je založená jaderná energetika Kanady. Jedná se o energetický reaktor, který jako jaderné palivo využívá přírodní uran a jako chladivo a moderátor slouží těžká voda. Aktivní zóna reaktoru

CANDU je umístěna v horizontálně položené nádrži (válci), která je zaplněná těžkou vodou. Nádrž je umístěna v betonové kobce, ve které se nachází voda mající funkci tepelného a biologického stínění. Horizontálně vedené palivové kanály obsahují palivové soubory obtékané chladivem. Výměna paliva je realizována za provozu reaktoru tak, že se z jedné strany kanálu vkládá čerstvá kazeta a vyhořelá kazeta je tím z druhé strany vytlačována. Chladivo protéká kanály aktivní zóny, v parogenerátoru předává svoje teplo pracovní látce sekundárního okruhu (obyčejné vodě), a vrací se zpět do reaktoru. Moderátor se nachází v mezikanálovém prostoru. Tento reaktor dodává do sítě výkon 508MW a tepelný výkon poskytuje hodnotu 1744MW, z čehož nám vyplývá účinnost 29,13%. Sekundární okruh je podobný jiným typům tlakovodních reaktorů.

- V České republice není tento typ reaktoru v žádné JE využíván.

## Simulace provozu JE s blokem VVER 440

- Při práci jsme používali simulátor, který přibližně odpovídá ovládání skutečné JE s reaktorem VVER 440. Tento program, napsaný pro PC, využívá numerického jádra k simulování všech základních fyzikálních dějů v jaderné elektrárně. V našich podmínkách byl ovládán dvěma „operátory“, přičemž jeden kontroloval okruh primární a druhý okruh sekundární. Každý měl k dispozici 2 PC. Jedno s ovládáním daného okruhu a druhé s jeho schémata. V tomto programu jsme měli možnost ovládat všechny hlavní systémy nutné pro řízení elektrárny, mezi které patřilo i ovládání výkonu reaktoru, výkonu turbín, výšky regulačních tyčí a sledovat následky naší interakce na množství ukazatelů tlaku a teploty.

### a) Úloha: Snižování výkonu reaktoru podle turbíny

- V tomto úkolu jsme snižovali výkon bloku ve směru od turbíny k reaktoru což je metoda, kdy je zadáván výkon turbíny a je mu podřizován výkon reaktoru.. Z nominální hodnoty 220MW na jednu turbínu jsme snížili výkon na 175MW. Nejprve jsme přepnuli řízení reaktoru na automatický režim sledující tlak v hlavním kolektoru, poté nastavili požadovanou hodnotu výsledného výkonu a procentuální trend klesání na automatických regulátorech turbín. Po spuštění simulace začal výkon turbín klesat o 1% nominálního výkonu za minutu. Následně začal regulátor reaktoru na základě vzrůstu tlaku sám upravovat výkon zpomalováním štěpení, které je způsobeno zasouváním regulačních tyčí, a dorovnávat tlak pomocí kompenzátoru objemu. Při výkonu generátoru 175MW se útlum zastavil a my jsme přešli do druhé části pokusu a to vrácení výkonu na původní nominální hodnoty.
- Průběh základních veličin JE po dobu cvičení ukazuje tabulka:

Výkon turbín (MW)	Výkon reaktoru (%)	Tlak v primáru (MPa)	Výška reg. kazet (cm)	Ohřívač nebo sprecha v kompenzátoru objemu	Výška vody v kompenzátoru objemu (cm)	Tlak v sekundáru (MPa)
220	100,0	12,3	175	nic	372	4,61
205	95,0	12,6	163	nic	362	4,54
205	90,1	12,2	163	nic	367	4,65
190	85,6	12,2	151	ohřívač	356	4,64
175	79,8	12,2	142	ohřívač	348	4,61
190	87,1	12,3	151	ohřívač	350	4,52
205	94,0	12,6	163	nic	361	4,54
220	100,0	12,3	175	nic	372	4,61

### b) Úloha: Simulace poruchy na porubí PO

- Zde jsme nastavili simulaci středně velkého úniku vody z primárního okruhu reaktoru. Následkem úniku moderátoru je rychlé snižování tlaku v primárním okruhu. Tento pokles se snaží okamžitě vyrovnat kompenzátor objemu. Zapojováním ohřívačů se vytváří tlak v KO a vytlačuje odtud vodu. Po snížení hladiny pod kritickou mez se zapojí havarijní ochrana 3 která začne zasouvat 6. skupinu řídicích tyčí. Výkon aktivní zóny poklesne při současném snižování tlaku a hladiny v KO. Proto se aktivuje havarijní ochrana. Ta způsobí pád řídicích tyčí do reaktoru. Dále se odpojí čerpadla vedoucí od parogenerátorů a dojde k odstavení turbín. V PO bude dobíhat jaderná reakce a v SO se zvýší tlak následkem zastavených turbín.

## Simulace odstavení JE CANDU 6

- Při nutnosti okamžitě zastavit reakci, se do reaktoru začnou zasouvat čtyři absorpční tyče. Dále je do nádrží v aktivní zóně napouštěna lehká voda, která slouží jako další absorbátor neutronů. Uvedené jevy rychle utlumí štěpení a sníží během několika sekund neutronový tok na minimální hodnoty. Výkon na turbíně klesá pomaleji v důsledku setrvačnosti turbíny.

## 3 Shrnutí

- Při práci na miniprojektu jsme si vyzkoušeli ovládání dvou odlišných typů JE. Oba reaktory jsou velice složitá zařízení, avšak automatické regulátory nám významným způsobem usnadňují systém řídit. Automatické ochrany nám při simulaci v simulačním programu nedovolily, abychom provedli úmyslný zásah za účelem přetížit reaktor, nebo udělali nějakou vážnější chybu, která by ohrozila bezpečný chod elektrárny. Vždy nás program omezil v naší činnosti, nebo úplně odstavil blok s reaktorem. Také jsme se přesvědčili, že se při jakékoli závažnější poruše, která by mohla ohrozit bezpečnost, nebo způsobit nějakou škodu, automatický systém v dosti krátkém čase zajistí vypnutí reaktoru. Z toho vyplývá, že JE jsou dnes na velmi vysoké úrovni zabezpečení, které nedovoluje v krizových situacích připustit chybu v lidském faktoru.

## Poděkování

Chtěli bychom velice poděkovat Fakultě jaderné a fyzikální inženýrské ČVUT, jejím zaměstnancům za organizaci Fyzikálního týdne 2007 a za vedení miniprojektu především supervizoru Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D.

## Reference:

- [1] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD\\_reaktor#CANDU](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_reaktor#CANDU) 19.6.2007
- [2] [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD\\_reaktor#VVER.2FPWR](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%BD_reaktor#VVER.2FPWR) 19.6.2007
- [3] <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrany/index.php?akce=reaktor&idtypbloku=1> 19.6.2007
- [4] <http://www.simopt.cz/energyweb/web/schemata/jaderna/> 19.6.2007
- [5] BEREZNAI, G. *Introduction to CANDU systems and operation* Wortshop on nuclear power plants, 2003
- [6] GIECI, A. *Simtest EMO Inženirsky simulátor pre vyhodnovovanie testov energetickeho spušťania 1. časť* VÚJE a.s. Trnava, 1998