

# Simulace provozu JE s reaktory VVER 440 a CANDU

## 6

Jakub Tejchman, Gymnázium Jeseník, jakub.tejchman@seznam.cz

Martin Veselý, SPŠ a VOŠ Příbram, martin.veslo@seznam.cz

### Abstrakt:

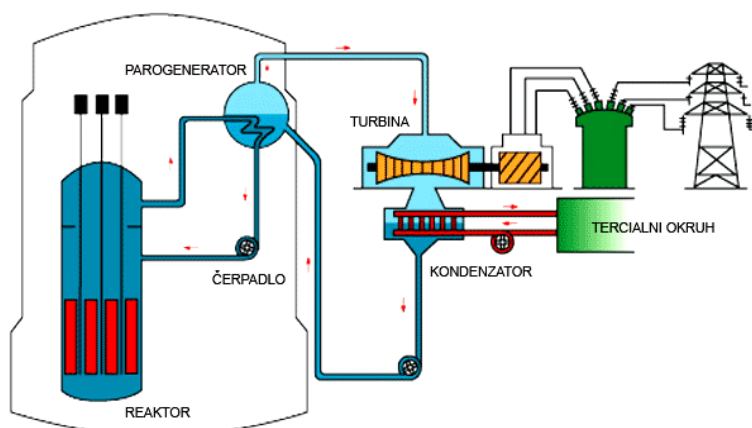
Cílem našeho projektu bylo seznámit se s konstrukčním uspořádáním JE a s jejich provozem. Provoz jsme simulovali na PC ve speciálních programech. Simulovali jsme běžný provoz, ale i havarijní stavy a nouzové odstávky reaktorů.

## 1 Úvod

Tento projekt jsme si vybrali, protože JE jsou často diskutovaný bezpečnostní problém a snažili jsme získat více znalostí jak z oblasti konstrukce JE, tak z oblasti jaderné bezpečnosti. Reaktory VVER patří k nejpoužívanějším, jsou chlazené i moderované lehkou vodou, kdežto CANDU jsou chlazené i moderované těžkou vodou. Záporná teplotní zpětná vazba těchto reaktorů přispívá k jejich bezpečnosti.

## 2 JE teoreticky i „prakticky“

### Popis reaktoru VVER 440



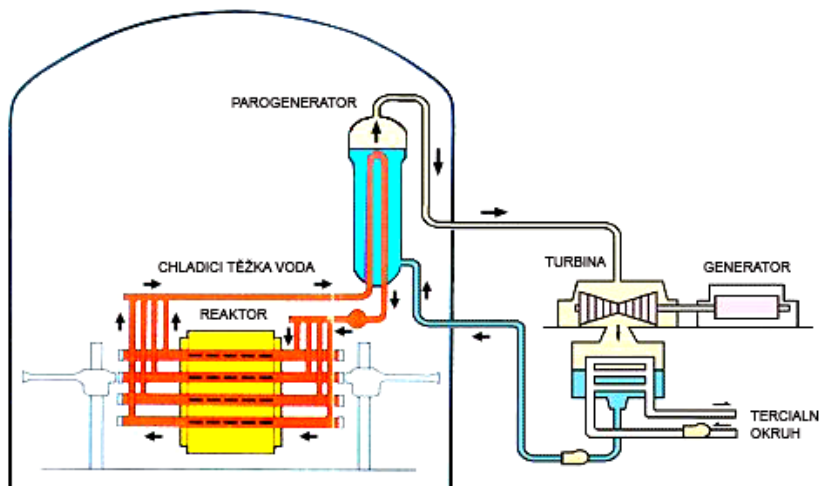
Anglickým ekvivalentem k ruské zkratce VVER (Vodo-Vodjanyj Energetičeskij Reaktor) je zkratka PWR (Pressurized light-Water cooled and moderated Reactor). Jedná se o tlakovodní reaktor, chlazený i moderovaných lehkou vodou. Tlak v primárním okruhu je 12,25 MPa. Teplota chladiva je 267 °C - 297 °C. Jak již napovídá název, je elektrický výkon tohoto

reaktoru 440 MW (tepelný výkon je 1375 MW). Palivem je obohacený uran (2 - 4%  $^{235}\text{U}$ ) ve formě oxidu uraničitého. Hmotnost paliva je 42 t v 312 palivových kazetách. Pro regulaci tohoto reaktoru se používají regulační kazety obsahující bórovou ocel a kyselina boritá, která se přidává do moderátoru (max. 12 g na litr vody). Mimo tuto regulaci má tento reaktor přirozenou zápornou teplotní zpětnou vazbu. Pokud dojde ke zvýšení teploty moderátoru,

začne klesat jeho hustota ztrácí moderační schopnosti, což vede k stabilizaci reakce. Stejně tak při úplném úniku vody z reaktoru dojde k zastavení reakce. Důležitou součástí reaktoru je tzv. kompenzátor objemu, což je tlaková nádoba zapojená do primárního okruhu. V této nádobě jsou umístěny elektrické ohřívačky a sprchy. V případě, že dojde k růstu tlaku, spustí se sprchy, dojde ke kondenzaci par nad hladinou vody, a tím ke snížení tlaku. V opačném případě se spustí elektrické ohřívačky a dojde k růstu tlaku v důsledku většího množství páry nad vodní hladinou. K reaktoru VVER 440 náleží dva turbogenerátory o výkonu 220 MW.

V ČR je tento reaktor instalován v JE Dukovany (4 bloky).

## Popis reaktoru CANDU 6



Základem reaktoru je horizontální válcová nádoba (tzv. Calandria). V ní je umístěno palivo ve formě přírodního kovového uranu (117 t) nádoba je naplněna těžkou vodou, která slouží jako moderátor. Skrz aktivní zónu vede potrubí ze zirkoniové slitiny, kterým proudí chladicí tlaková těžká voda. Stejně jako

v případě reaktoru VVER 440 se i zde uplatňuje záporná zpětná vazba moderátoru. Tlak chladicí vody je 9,3 MPa a teplota chladicí vody na výstupu 305 °C. Elektrický výkon dosahuje 900 MW. Jako v případě předchozího reaktoru, i tento obsahuje kompenzátor objemu. Oproti reaktoru VVER 440 lze CANDU 6 regulovat také tak, že se do oblasti moderátoru (myšleno v nádobě) přidá lehká voda, která začne fungovat jako absorbátor neutronů. Absorpční schopnosti jsou však mnohem menší než v případě kyseliny borité.

Tento reaktor se v ČR nepoužívá.

## Simulátory provozu JE

Simulátorem v tomto případě rozumíme speciální program pro PC, který co nejvěrněji napodobuje chování elektrárny. K tomu využívá metod numerického modelování tepelných a jaderných dějů. Program pro simulaci provozu JE s bloky VVER 440 je určen pro obsluhu dvěma osobami (jedna pro primární a druhá pro sekundární okruh) a provozuje se na čtyřech PC. Simulátor reaktoru CANDU 6 je obsluhován pouze jednou osobou. V obou programech lze kontrolovat tlaky a teploty v jednotlivých částech elektrárny a stav různých zařízení. Samozřejmě umožňuje řízení elektrárny.

## Výsledky práce se simulátory

### a) běžný provoz JE s VVER 440

Prvním úkolem bylo postupně snižovat výkon na 75 % nominálního výkonu a následně jej opět zvýšit. Tento postup se provádí změnou výšky regulačních kazet. Čím více byly zasunuty do reaktoru, tím byl nižší výkon, protože docházelo k větší absorpci neutronů. Regulator primárního okruhu pracoval v manuálním režimu, aby bylo možné měnit polohu regulačních

kazet. V případě sekundárního okruhu pracoval regulátor jednoho turbogenerátoru v režimu N (což znamená, že si udržuje zadaný konstantní výkon, tj. bylo přiváděno stále stejné množství páry). Druhý generátor pracoval v režimu P (udržuje tlak v hlavním přívodu páry z parogenerátoru) a jeho výkon se měnil podle výkonu reaktoru, protože zde se měnilo množství přiváděné páry.

Výkon reaktoru (%)	Tlak v primáru (MPa)	Výška reg. kazet (cm)	Ohřívač nebo sprcha v KO	Výkon TG v režimu P (MW)	Tlak v sekundáru (MPa)	Výška vody v PG (cm)
100	12,2	175	nic	220	4,61	190
95	12,1	166	nic	200	4,59	190
90	12,1	158	ohřívač	181	4,57	191
80	12	141	ohřívač	139	4,54	191
75	12	133	2x ohřívač	114	4,53	191,5
80	12,2	140	ohřívač	131	4,56	191
90	12,5	157	nic	175	4,59	190
100	12,5	175	sprchy	216	4,62	190

*KO – kompenzátor objemu, TG – turbogenerátor, PG - parogenerátor*

#### b) výpadek všech cirkulačních čerpadel v JE s VVER 440

Při výpadku všech čerpadel došlo k automatické odstávce reaktoru a to díky téměř okamžitému zasunutí všech regulačních kazet. Zároveň došlo i k odstavení obou turbín. Sice došlo k zastavení řetězové reakce, ale teplota klesala pozvolněji díky zbytkovému výkonu, který je způsoben rozpadem štěpných produktů a zbytkovým štěpením. Díky poklesu teploty klesl v reaktoru i tlak. V sekundáru se naopak zvýšil, protože pára nepředávala turbíně energii.

#### c) běžný provoz JE s CANDU 6

Podobně jako v případě reaktoru s VVER 440 bylo zkoušeno postupné snížení výkonu reaktoru. Postupně byly zasouvány absorpční tyče. Čím více byly tyče zasunuty, tím absorbovaly více neutronů a klesal ohřev aktivní zóny (viz. tabulka níže). Po určité době neutrony schopné štěpení zmizely úplně a reakce se zastavila. Po vytažení absorpčních tyčí se reakce opět rozeběhla.

Neutronový výkon (%)	Tepelný výkon (%)	Výkon generátoru (%)	Tlak v sekundáru (MPa)	Absorpční tyč 1 (%)	Absorpční tyč 2 (%)
75	75	80	4,066	50	0
41	50	59	3,8	100	0
9	10	0	3,7	100	50

*V případě výkonů se jedná o procenta z nominální hodnoty. V případě tyčí jde o procenta z celkové délky tyče*

#### d) havarijní stavy simulované na reaktoru CANDU 6

Po příkazu na odstavení reaktoru došlo během několika sekund k zasunutí absorpčních tyčí a okamžitému snížení neutronového toku na nulu. Turbína ještě nějakou dobu otáčela setrvačností.

V případě, že dojde k náhlému zastavení turbíny, začne v reaktoru stoupat teplota a tlak. Ten roste díky snížení hustoty chladící vody s rostoucí teplotou. Tento růst je způsoben tím, že reaktoru není odebíráno teplo pro tvorbu páry pro turbínu. Automatický systém začne zasouvat absorpční tyče a stabilizuje tlak na normálních hodnotách.

### **3 Shrnutí**

V miniprojektu jsme si vyzkoušeli práci se simulátory provozu jaderných elektráren. Dozvěděli jsme se také mnoho o konstrukci JE. Simulace nás přesvědčila, že jaderná elektrárna je velmi bezpečné zařízení, protože jakékoliv „destruktivní“ zásahy do důležitých systémů elektrárny vedly k odstavení reaktoru, případně snížení jeho výkonu. V žádném případě nelze dnes používané jaderné elektrárny srovnávat s Černobylskou JE s reaktorem RBMK.

### **Poděkování**

Tímto chceme poděkovat Ing. Dušanu Kobylkovi za umožnění realizace našeho projektu a odborné vedení. Dále děkujeme Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT a jejím partnerům za organizaci Fyzikálního týdne.

### **Reference:**

- [1] <http://proatom.luksoft.cz/jaderneelektrarny/>
- [2] [www.cez.cz](http://www.cez.cz)
- [3] RNDR. AUGUSTA, P.: *Jaderná energie* ČEZ 2003, 12-16