

# Simulace provozu JE typu VVER - 440

**B. Dudová\*, Š. Tichý\*\***

\*Gymnázium Děčín Komenského náměstí 4  
ve spolupráci s

\*\*Gymnázium Jateční 22, Ústí nad Labem  
[steptich@seznam.cz](mailto:steptich@seznam.cz)

18. června 2019

## **Abstrakt:**

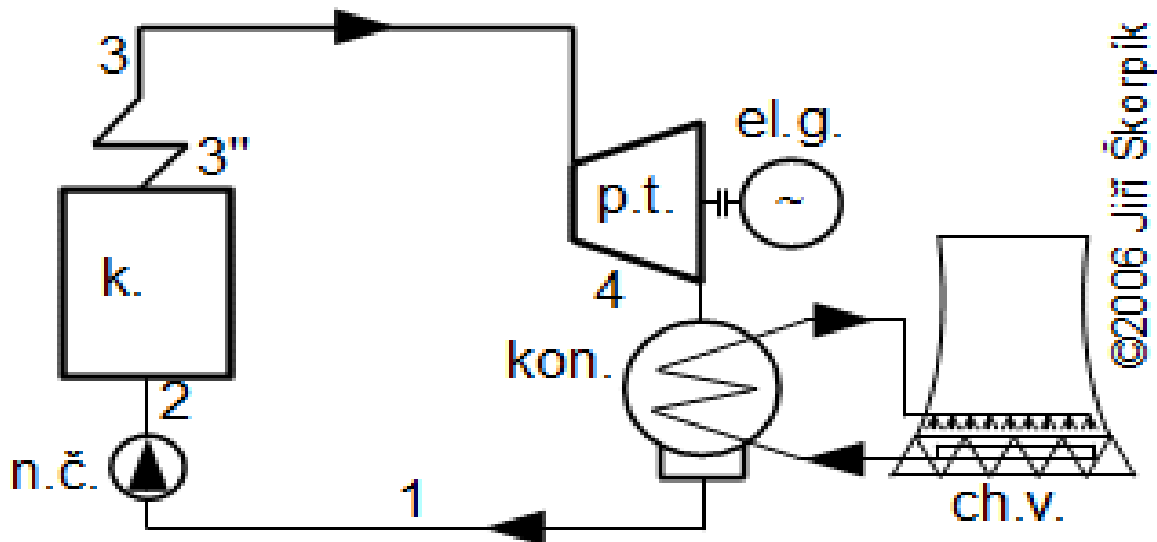
Článek popisuje principy konstrukce a provoz bloku JE s reaktorem typu VVER – 440 a simulaci jejího fungování pomocí programu SPVS EDU, kde jsme pozorovali automatickou odezvu systému na únik skrz ventily kompenzátoru objemu a zaznamenávali hodnoty jednotlivých veličin popisující stav reaktoru společně s primárním, sekundárním a chladícím okruhem a činnost jednotlivých systémů.

## **1 Úvod**

Výstavba a provoz JE je investice na dlouhou dobu a u tak složitých projektů se vždy vyplatí cenově i časově nejdříve provést simulaci jednotlivých částí k zajištění maximální bezpečnosti a efektivity. Během provozu probíhá řada fyzikálních jevů, které mají bezprostřední vliv na provoz a stav celé soustavy. Tyto děje lze popsat a následně předpovídat pomocí matematicko–fyzikálních výpočtů. Jsou však tak složité, že je potřeba využít výpočetní techniky. Simulátory můžeme použít ke zkoumání chování systému během situací, které jsou buď moc nebezpečné nebo náročné navozovat v reálném provozu. Také přispívají k výcviku zaměstnanců dohlížejících na provoz. Náš tým zkoušel jak běžný provoz tak různé havarijní situace a odezvy systému na ně. V průběhu simulací jsme sledovali jednotlivé veličiny (teploty, výšky hladin, tlaky, výkony atd.) a vysvětlovali si jednotlivé vazby mezi nimi.

## **2 Princip tepelných elektráren**

Všechny typy tepelných elektráren včetně těch jaderných fungují na stejném principu. Díky zdroji tepla se ohřívá podchlazená voda až k teplotě sytosti a následně vzniká pára, kterou je možné i přehřívát. (od bodu 2 k 3). Para proudí na turbínu, kde v lopatkování expanduje a roztáčí tím rotor spojený s el. generátorem. Ten pak díky elektromagnetické indukci vytváří střídavý proud. (od bodu 3 k 4). Expanzí páry na turbíně se snižuje její tlak i teplota a po následném odebrání tepla v kondenzátoru kapalina zkondenzuje. (od bodu 4 k 1) Pak je pomocí čerpadel vháněna do tepelného výměníku a Rankin-Clausinův cyklus se opakuje. (od bodu 1 k 2). Takto jednoduchý cyklus se však v praxi nepoužívá a bývá pro zlepšení termické účinnosti modifikován a optimalizován. Možné cesty jsou: snížení tlaku v kondenzátoru, mezipřehřívání páry či regenerace páry.



Obrázek 1: Schéma základního Rankin-Clausova cyklu

## Reaktor typu VVER-440

V jaderných elektrárnách je zdrojem tepla štěpná reakce, jenž probíhá v aktivní zóně reaktoru. Reaktor typu VVER-440 (Vodou chlazený a Vodou moderovaný Energetický Reaktor) má tlakovou nádobu válcovitého tvaru. Palivo ve formě malých tablet je sduřováno do palivových proutků a následně do souborů. Neutrony jsou cestou z proutku zpomaleny moderátorem-vodou. Ta musí být demineralizovaná a zbavena všech možných iontů. Neutron je zpomalován z toho důvodu, že účinný průřez pro reakci s izotopem uranu 235, který chceme v reakci štěpit, je za nižích energií větší. Při srážce neutronu s jádrem dochází k rozpadu na dva odštěpky a uvolňují se 2 až 3 neutrony (statisticky 2,4). Dále se uvolňují všechny druhy záření společně. Vzniklé částice pak odlétávají s určitou kinetickou energií, kterou předávají srážkami atomům prostředí a vzniká tak teplo. Reakci je třeba regulovat, jinak by rostla exponenciálně, k zabránění toho slouží absorbatory neutronů (bezpečností tyče např. s obsahem bóru či rozpuštěná kyselina boritá v ve vodě).

## Primární okruh VVER-440

Voda za teploty přes 265°C a tlaku 12,26 MPa je cirkulačními čerpadly vháněna studenou smyčkou do reaktoru, kde je v aktivní zóně ohřívána, následně vystupuje teplou smyčkou ven s teplotou cca 295°C a putuje do parogenerátoru, zde se předáváním svého tepla vodě ze sekundárního okruhu, která se mění na páru, ochlazuje. Na okruh je napojen i kompenzátor objemu, který vyrovnává změny teploty a tlaku.

## Sekundární okruh

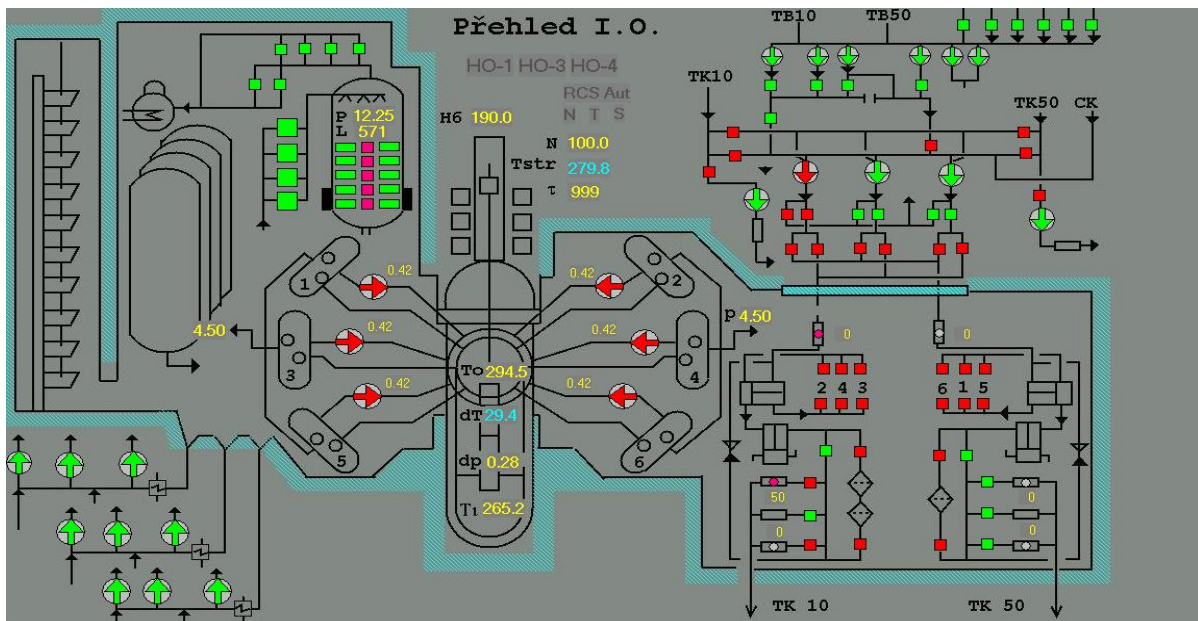
Pára po separaci vlhkosti putuje z parogenerátoru na vysokotlaký díl turbíny, kterou pára roztáčí, zatímco se sama expanduje a zchlazuje, dále pak pokračuje na nízkotlaké díly turbíny, kde probíhá stejný proces. Mezi turbínami dochází k separaci vlhkosti mezipřehřívání a část páry je rovněž při expansi odebírána pro regenerační ohřev. Následně vstupuje pára do kondenzátoru, kde zkondenzuje. Kondenzát je kondenzátními čerpadly hnán na nízkotlakou regeneraci a dále do napájecí nádrže. Za ní se nachází napájecí čerpadla, které zvýší tlak napájecí vody, a se dostává přes vysokotlakou regeneraci opět do parogenerátoru.

## Chladicí okruh

V tomto okruhu přijme voda teplo od páry v kondenzátoru a následně ohřátá putuje do chladících věží, kde je ochlazená a navrácí se zpět do kondenzátoru.

### 3 Simulátor

Simulační program SPVS EDU, který byl vyvinut pro JE Dukovany za účelem výcviku, pracuje paralelně na čtyřech počítačích, z nichž dva slouží pro sledování primárního okruhu a dva další pro kontrolu sekundárního. Ve dvojici jsme zkoušeli úlohy s běžným provozem bloku i různé havarijní scénáře, někdy jsme nechali systém sám, ať problém vyřeší a sami jsme jen zaznamenávali hodnoty a fyzikálně vysvětlovali, co se děje, jindy jsme řídili jednotlivé komponenty ručně. Na schématech jsou vypsány jednotlivé údaje. Červenou barvou pracující komponenty, zelenou vypnuté.

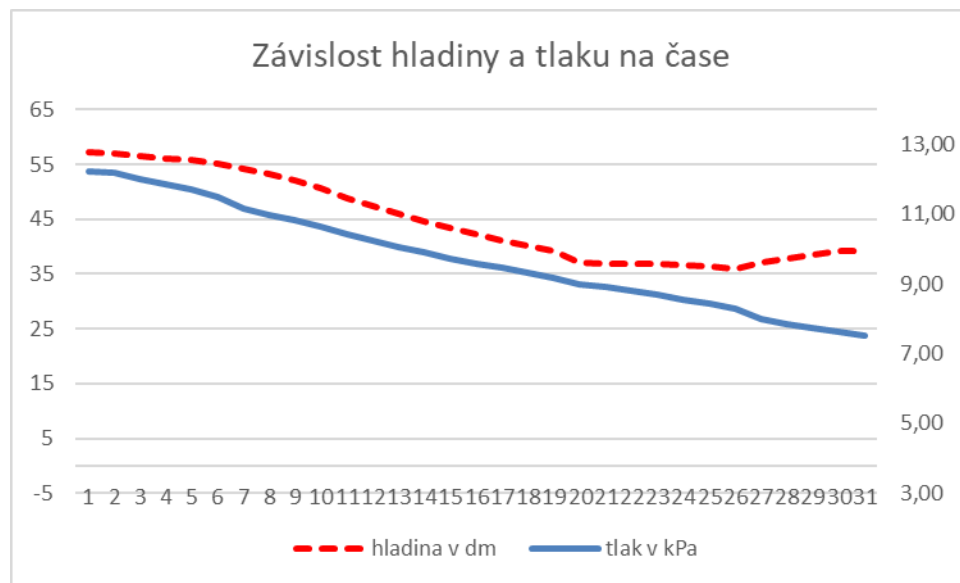


Obrázek 2: Schéma primárního okruhu v programu SPVS EDU

### Simulace havárie na Three Mile Island

Dne 28. března 1979 došlo v USA k havárii na druhém bloku JE Three Mile Island ležící na stejnojmenném ostrově. Vlivem poruchy napájecích čerpadel se odstavil reaktor, přepouštěcí ventil kompenzátoru objemu, který dočasně odpouštěl páru se nedověřel, i když ukazoval v systému, že je. Tlak v okruhu začal klesat. Náš tým si zadal scénář havárie, kdy se u kompenzátoru objemu otevrou ventily a začne nevratně klesat tlak v primárním okruhu. Do systému jsme nezasahovali a nechali simulaci bez zásahů obsluhy. Současně jsme zaznamenávali v pravidelných intervalech hodnoty teploty, tlaku a výkonu na zařízeních v primárním i sekundárním okruhu. Systém řízení tlaku KO při poklesu tlaku zapnul elektroohříváky vody, aby se tlak dorovnal vytvořením další páry. Stále však tlak klesal a s ním i hladina, kvůli tvorbě páry, když systémy zaznamenaly změnu tlaku převyšujících 40 kPa, začaly se zasouvat regulační kazety a výkon reaktoru se začal snižovat, tím pádem se musel snížit výkon i na turbínách, jinak by začal klesat tlak i v sekundárním okruhu. Toto pokračovalo, dokud kompletně nezajely regulační kazety a výkon reaktoru neklesl na 8,9% nominálního výkonu, pak byly vyputy turbíny a točily se už jen setrvačně. Výkon reaktoru postupně klesl na méně než procento nominálního, ale neklesl na nulu, kvůli zbytkovému výkonu štěpných produktů z reakce, které se dále rozpadají. Kvůli snížení tlaku, začala vnikat v reaktoru pára, která vytlačuje vodu zpátky do kompenzátoru objemu, kde hladina začala

stoupat. Hlavní cirkulační čerpadla v primárním okruhu se v tuto chvíli z bezpečnostních důvodů vyplá.



## 4 Shrnutí

Mimo výše zmíněnou havárii jsme si vyzkoušeli další situace. Dospěli jsme k závěru, že bezpečnostní a řídicí systémy jsou schopny většinu závad samostatně vyřešit, či reaktor bezpečně odstavit. Operátor by měl zasahovat jen ve výjimečných případech. Programová simulace nemůže nikdy plně nahradit zkušenost z reálného provozu, ale je to dobrá počáteční zkušenost pro studenty.

## Poděkování

Chtěli bychom poděkovat Panu Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. a ostatním zaměstnancům KDJR za ochotu, trpělivost a předání mnoho bohatých zkušeností a rad, týkajících se simulací jaderných elektráren. Dále organizátorům Týdne vědy na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze.

## Reference:

1 KOBYLKA, Dušan. *Technická termodynamika s řešenými příklady*. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05902-9.

Obrázek 1 zdroj: <http://www.transformacni-technologie.cz/06.html>

Obrázek 2 ze simulátoru

VUJE Trnava: *Návody ke cvičením na SPVS+EDU - Provozní stavy*, Trnava, 2007

VUJE Trnava: *Návody ke cvičením na SPVS+EDU, Likvidace abnormálních a havarijních stavů*, Trnava, 2008