

# Simulace provozu JE typu ABWR

M. Holler\*, O. Michálek\*\*

\*Gymnázium Jakuba Škody, Přerov

\*\*Gymnázium Olgy Havlové, Ostrava-Poruba

\*maxmilian.holler@gmail.com, \*\*ota.michalek@gmail.com

## Abstrakt:

Práce popisuje simulaci provozu JE typu ABWR využívanou pro výuku budoucích jaderných inženýrů. Pochopení průběhů parametrů během simulace běžného provozu, poruchových i havarijních stavů jsou fundamentální pro správný provoz bloku. Cílem práce bylo vyzkoušet si práci operátora a řešení nepředvídatelných situací za provozu.

## 1 Úvod

Simulátory JE se používají jak pro detailní představení chování elektrárny pro studenty, tak pro průběžné školení profesionálů. Umožňují simulovat jak běžný provoz, tak havárie, které by na reálné elektrárně mohly ohrozit bezpečnost celého komplexu a okolí. Většina havarijních simulací tak dnes probíhá právě na takových simulátorech.

## 2 Provoz jaderné elektrárny

### Termodynamika v elektrárnách

Většina elektráren využívá ve svém provozu zákonitostí termodynamiky. Nejčastěji se jedná o přeměnu určitého druhu energie na energii elektrickou, někdy také dochází k využití vyrobeného tepla pro ohřev vody – teplárny. Nejúčinnějším cyklem z hlediska termodynamiky je Carnotův cyklus. Této účinnosti se snaží každý koncept elektrárny (i spalovacích motorů) co nejvíce přiblížit.

Pro potřeby popisu elektráren z hlediska termodynamiky jsou nejdůležitější dva termodynamické zákony: „1. energii (teplo) nelze vyrobit, ale pouze přeměnit“ a „2. těleso o nižší teplotě nemůže předávat energii tělesu o vyšší teplotě“ Jaderné elektrárny získávají energii z vazebné energie jádra atomu pomocí štěpné jaderné reakce.

### Jaderná reakce

Při štěpných jaderných reakcích jsou v reaktoru štěpeny atomy jaderného paliva na 2 produkty s nižším protonovým číslem při uvolnění 2 až 3 neutronů, které dále pokračují v řetězové reakci, a dalších částic. Reaktory nejčastěji užívají tzv. tepelných neutronů, které díky své nízké kinetické energii (tj. rychlosti) lépe reagují s atomy prostředí. Z hlediska palivového cyklu jsou však efektivnější reaktory využívající tzv. rychlé neutrony, jejichž vysoké energetické hodnoty umožňují využívat izotop uran-238 namísto mnohem vzácnějšího uranu-235. Provoz a konstrukce těchto reaktorů je však náročný na bezpečnost, materiály a technologii, a proto v dnešní době existují převážně v experimentální podobě.

## Reaktor typu ABWR

Reaktor typu ABWR (Advanced Boiling Water Reactor), nebo také pokročilý varný reaktor, je jeden z reaktorů III. generace. Funguje na principu ohřevu vody do bodu varu při daném tlaku a dalším chlazením paliva parovodní směsí. V aktivní zóně tvořená pára je od vody separována a přímo pohání turbíny napojené na generátor, který z mechanické energie tvoří elektrickou. Tato koncepce má několik výhod i nevýhod na rozdíl od běžných koncepcí tlakovodních reaktorů. Dnes se elektrárny typu ABWR používají například v Japonsku a ve výstavbě jsou i v dalších zemích.

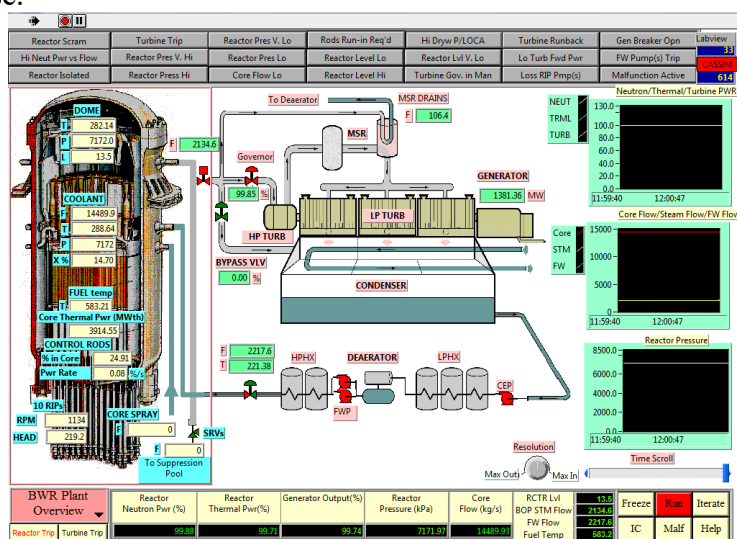
## Řízení bloku JE

Základním principem řízení bloku jaderné elektrárny je rovnováha či změny v rovnováze mezi tepelnou energií produkovanou v aktivní zóně a energií odváděnou v chladícím okruhu v součtu s energií uvolňovanou na turbíně, resp. elektrickém generátoru. V případě bloku s varným reaktorem je pak řízen neutronový, resp. tepelný, výkon reaktoru. Výkon ABWR je možno regulovat průtokem moderátoru, zasouváním regulačních tyčí a obsahem kyseliny borité rozpuštěné v moderátoru (ta se však v případě koncepce ABWR používá pouze při odstavení reaktoru). Vliv na výkon reaktoru mají také efekty plynoucí z principů fyzikálních dějů – například koncentrace xenonu, který snižuje reaktivitu, teplota paliva apod. Důležitým parametrem je suchost parovodní směsi, jedná se o podíl páry a vody proudící aktivní zónou. Zpětné vazby, které se projevují při provozu reaktoru musí mít záporný efekt pro splnění bezpečnostních požadavků.

## 3 Praktická část – simulace

### Rozhraní simulačního softwaru

Rozhraní simulátoru IAEA bloku ABWR zobrazuje množství panelů, které dohromady popisují stav celého bloku z různých pohledů. Na obrázku (Obr. 1) můžeme vidět schéma celého bloku. V dolní liště se zobrazují aktuální hodnoty několika důležitých parametrů – neutronový výkon reaktoru, tepelný výkon reaktoru, výkon generátoru, tlak v reaktoru a průtok chladiva reaktorem, výšku hladiny a střední teplotu paliva. V levé části je vidět schéma reaktoru, kde se z námi sledovaných parametrů nachází suchost – X – která má vliv na výkon reaktoru. V horní části panelu se nachází kontrolky, které se v případě konkrétní poruchy rozsvítí žlutou nebo červenou barvou. V pravé části obrazovky se nachází tři černé panely, kam se pro přehled operátora během simulace průběžně vykreslují křivky veličin v závislosti na čase.

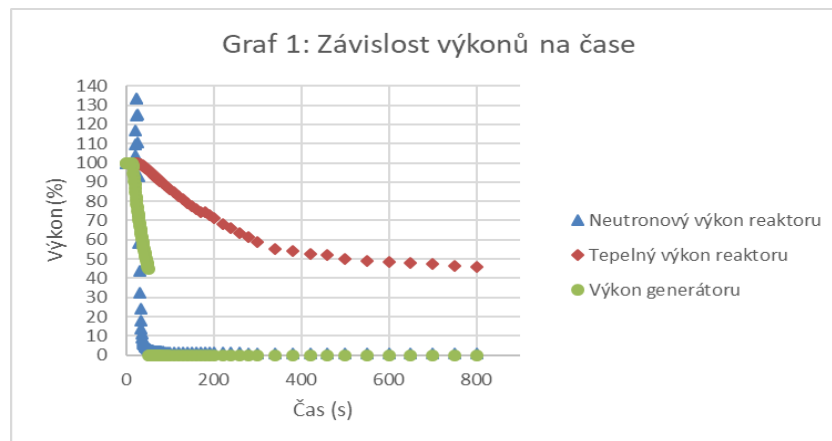


Obr. 1: Simulátor IAEA bloku ABWR – BWR Plant Overview

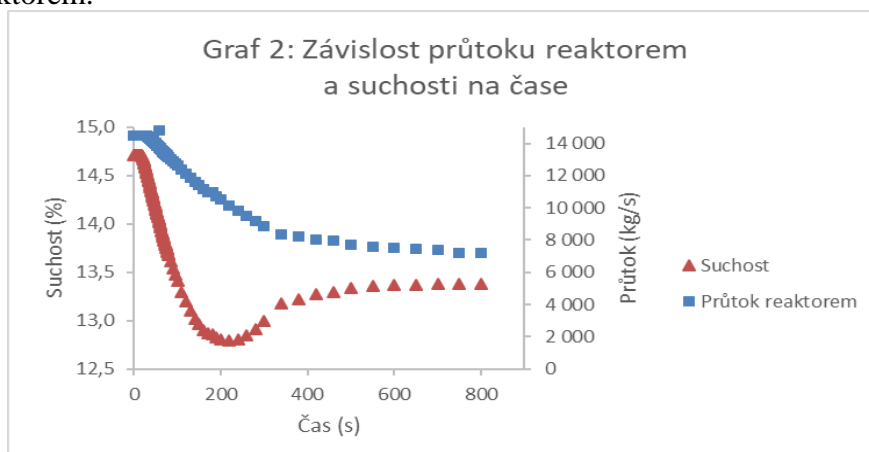
## Simulace výpadku turbogenerátoru

Jedním z nejdůležitějších komponentů jaderné elektrárny po reaktoru je turbogenerátor. Jedná se o několik těles turbín, spojených na společné hřídeli rotoru, která otáčí rotorem alternátoru a přeměňuje tak tlakovou a tepelnou energii páry proudící lopatkováním turbíny na elektrickou energii – střídavý proud. Při výpadku turbogenerátoru je potřeba páru, vznikající kvůli zbytkovému tepelnému výkonu v palivu, odvést pomocí bypassu, jelikož by jinak docházelo ke vzrůstu tlaku v reaktoru. Provedli jsme tedy simulaci výpadku turbogenerátoru (dále TG) při nominálním výkonu reaktoru.

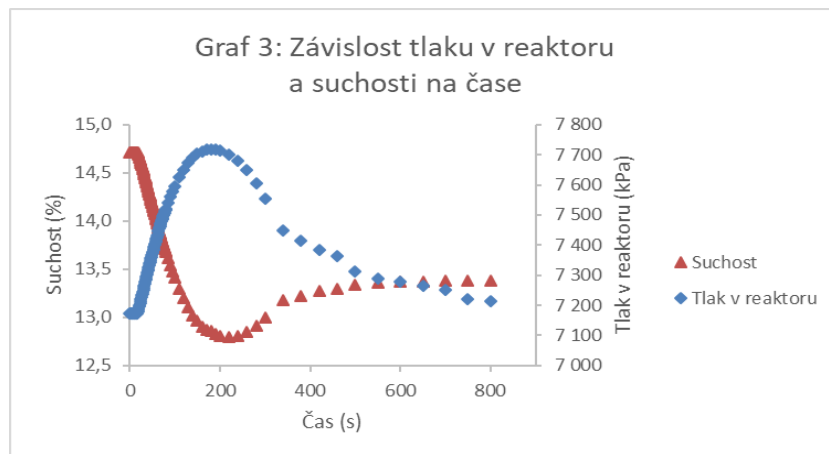
Graf 1 zobrazuje časový průběh neutronového a tepelného výkonu reaktoru společně s výkonem generátoru. Můžeme vidět, že v 10. sekundě, kdy došlo k výpadku TG (výkon generátoru kles rychle na nulu), došlo k razantnímu vzrůstu hodnoty neutronového výkonu reaktoru. Po nárůstu nad 113 % začal být bezpečnostním systémem reaktor odstaven, avšak vlivem rychlosti dějů stoupl výkon reaktoru chvilkově až na 140 %. Tepelný výkon klesal nejdéle. Zbytkové teplo bylo postupně odváděno stále vznikající parou pomocí přepouštěcího ventilu do kondenzátoru a do chladicího okruhu.



V Grafu 2 můžeme vidět závislost suchosti – množství páry v aktivní zóně reaktoru – společně s průtokem chladiva reaktorem v závislosti na čase. Při výpadku TG došlo ke zvýšení tlaku a tím rychlému snížení suchosti – to zvýšilo výkon reaktoru až k jeho odstavení. Kvůli odstavení reaktoru, a tedy snížení jeho výkonu pak byl snižován průtok chladiva reaktorem.



Při výpadku TG začal prudce stoupat tlak v reaktoru, vznikající parovodní směs totiž neměla kam odcházet. Zvyšující se tlak tak zvýšil teplotu varu moderátoru, který se tak přeměňoval na páru v menším množství – začala klesat suchost (viz Graf 3). Ve chvíli, kdy se vliv tlaku a bypassu vyrovnal, došlo k postupnému snižování tlaku v reaktoru.



## 4 Shrnutí

Vyzkoušeli jsme si práci operátora, kromě výpadku TG jsme si vyzkoušeli i běžný provoz a havarijní situace. Mezi další havárie, které jsme si vyzkoušeli například – chybné vysunutí regulačních tyčí, úplná ztráta napájení bloku, havarijní odstavení reaktoru aj. Velkou výhodou dnešní doby je možnost simulace, která snižuje pravděpodobnost potenciálních havárií, jelikož jsou operátoři schopni se zaškolit mimo ostrý provoz. Další výhodou je velká automatizace bezpečnostních systémů, které zajišťují uvedení reaktoru do stabilního a bezpečného stavu bez zásahu člověka v případě sebemenší chyby a zabránění havárii.

## Poděkování

Děkujeme Ing. Dušanu Kobylkovi, Ph.D. za pomoc, podnětné připomínky a nápady, které nám během práce poskytoval.

## Reference:

- [1] KOBYLKA, Dušan. *Technická termodynamika s řešenými příklady*. České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-05902-9.
- [2] IAEA: *Boiling Water Reactor Simulator with Active Safety Systems – User Manual*, IAEA, 2011