

Simulace provozu JE typu VVER-440

Autoři (V. Vinkler, V. Špéra)

Instituce, adresy (Wichterlovo gymnázium, Gymnázium Hodonín)

E-mail(vinkva420@wigym.cz, vaclav.spera@student.goah.cz)

Abstrakt:

Příspěvek si klade za účel osvětlit a přiblížit princip fungování jaderných elektráren, zejména pak těch s jadernými reaktory východní koncepce VVER-440 V213. Konkrétně se pak věnuje principům rovnováhy energií v primárním a sekundárním okruhu a důsledkům, které způsobují jednotlivé anomálie. Tyto principy pak i názorně demonstuje podrobnou analýzou dat získaných simulací poruchy hlavních cirkulačních čerpadel.

1 Úvod

Celkový koncept jak samotných jaderných reaktorů, tak i celých jaderných elektráren urazil od prvního spuštění Chicago Pile-1 roku 1942 dlouhou cestu. Postupně vznikla široká škála typů s různými mechanismy a koncepcemi, kdy nám je nejznámější právě typ tlakovodních reaktorů, kterým jsme se proto rozhodli také věnovat, specificky tedy reaktoru VVER-440 V213 (typ s lepšími bezpečnostními prvky) ruského konceptu, jenž se v celkovém počtu 4 kusů v současnosti nachází v Jaderné elektrárně Dukovany. Jedná se o reaktor tlakovodní, tedy voda je zde za vysoké teploty pod vysokým tlakem, a nemění se tak na páru jako je tomu například u reaktorů BWR. Charakteristický je pak tím, že jak moderátorem, tak chladičem je zde právě lehká voda, což je zřejmě i jeden z důvodů, proč se jedná o nejrozšířenější typ reaktoru. Nutno však podotknout, že díky zjednodušení za praktickými účely, kterými si náš teoreticky souhrn prošel, se jedná o práci použitelnou i na jiné modely a typy reaktorů.

2 Teoretický základ

Obecně se JE tlakovodního typu skládá ze třech okruhů. V PO se uvolňuje velké množství energie jadernou reakcí (konkrétně štěpnou) a dochází k ohřevu vody v PO. Ta v parogenerátoru ohřívá vodu z SO, jež se mění na páru. V zjednodušeném schématu je tato pára vedena na turbíny napojené na turbogenerátor (TG), které indukují napětí odváděné z elektrárny. Pára je následně zkondenzována v kondenzátoru za pomoci třetího – chladicího okruhu. Opravdové schéma je samozřejmě mnohem složitější, protože celkový systém je doplněn o zařízení jako ohříváče, čerpadla, kompenzátor objemu, ...

Princip řízení výkonu elektrárny s tlakovodním reaktorem

U reaktoru VVER-440 byly zkonstruovány dva hlavní systémy řízení výkonu, jmenovitě pak řídicí systém výkonu reaktoru (na JED konkrétně RCS) a turbínový výkonový elektronický regulátor (na JED konkrétně TVER). Ty pak společně kooperují a to přes hodnotu tlaku

v SO, přesněji parogenerátoru. Když nám výkon v aktivní zóně (AZ) roste, tak v PO tlak roste, v SO klesá, v případě klesajícího výkonu AZ je tomu pak naopak. Tím nám taktéž umožňují dva způsoby jak řídit elektrárnu, a to buď úpravou výkonu reaktoru v PO, na což reaguje automatickou regulací SO (řízení od reaktoru k turbíně), případně naopak (řízení od turbíny k reaktoru). Celý proces řízení však musí brát v potaz výše zmíněné faktory ovlivňující výkon, což sic dnes je již usnadněno velkou mírou automatizace, kdy například můžeme RCS přepínat do různých režimů, dle toho jakou veličinu chceme fixovat. V případě JED je to konkrétně: N (výkon), T (tlak), či S (snižuje výkon, když tlak překročí zadanou hodnotu).

Faktory ovlivňující výkon reaktoru

Jaderný reaktor obecně funguje na principu jaderného štěpení většinou izotopu uranu U235 neutronem a celý proces pak kombinuje principy jak neutroniky a jaderné fyziky, tak i termodynamiky a termohydrauliky. Důsledkem toho je, že známe hned několik způsobů, jak můžeme ovlivnit výkon reaktoru, tedy počet probíhajících štěpných reakcí, a díky některým právě i dokážeme samotný reaktor řídit.

1. Změna reaktivity

Ta je dána celkovou strukturou a složením izotopů v rámci závazky na začátku kampaně. Tím jak například umístíme jednotlivé palivové tyče, jak distribuujeme a kolika procentní obohacení uranem 235 použijeme, či tím jaké jiné prvky a sloučeniny v zóně máme (např.: oxidy Gd) ovlivňujeme celkový makroskopický účinný průřez Σ . Ten pak definujeme jako: „Míru pravděpodobnosti, že dojde k interakci mezi jádrem, které se nachází v krychli o straně 1 m a částicí, která dopadá kolmo na jednu ze stran této krychle.“ Tímto počátečním parametrem jsme posléze ovlivňováni po celou dobu kampaně.

2. Záměrné změny

Za účelem těchto změn vědomě používáme tzv. absorbátory, tedy prvky a sloučeniny schopné zachytit neutrony uvolněné předchozími generacemi štěpení avšak sami se dále neštěpící. Využití pak právě nachází jako aktivní řídicí prvky v podobě řídicích a havarijních tyčí, které jsou dle potřeby do reaktoru zasouvány pro snížení počtu neutronů a tedy i pokles výkonu, nebo naopak vysouvány pro přesně opačný efekt, či kyselina boritá, která je za stejného efektu dle potřeby vstřikovávána do vody v PO.

3. Samovolné změny

Tato kategorie je pak pro účely naší práce nejdůležitější, protože hovoří o změnách ve výkonu AZ v závislosti na okolních změnách. V zásadě tyto faktory dělíme na zpětnovazební koeficienty, otravy jádra prvky jako Xe či Sm a na proces vyhořívání a zastruskování. Protože však k otravám během provozu v krátkém horizontu nedochází, stejně jako k projevu vyhořívání a zastruskování, klíčovými jsou pro nás právě zpětnovazební koeficienty.

Jsou dány zejména moderační schopností vody, která srážkami s neutrony na atomární úrovni zpomaluje rychlé neutrony na tzv. tepelné neutrony, které právě potřebujeme ke štěpení U235, čímž tedy zvyšuje pravděpodobnost srážek a navazujících štěpení, což vede k růstu výkonu. Opačný efekt mají pak absorpční účinky moderátoru, které naopak neutrony zachycují, jak už je vysvětleno výše. Dále je dobré zmínit i schopnost absorpce a štěpení v palivu či rezonanční záchyt v palivu.

Na základě toho definujeme například Teplotní koeficient reaktivity. Ten pracuje s hlavní příčinou v podobě vlivu teploty AZ, a to se změnou hustoty materiálů, která má vliv na celkovou pravděpodobnost, že dojde k úniku neutronu a ke štěpení.

Obdobně funguje Tlakový koeficient reaktivity, který naopak popisuje vliv změny tlaku chladiva v PO na makroskopický účinný průřez, obdobně jako u toho teplotního jenže s opačnou závislostí.

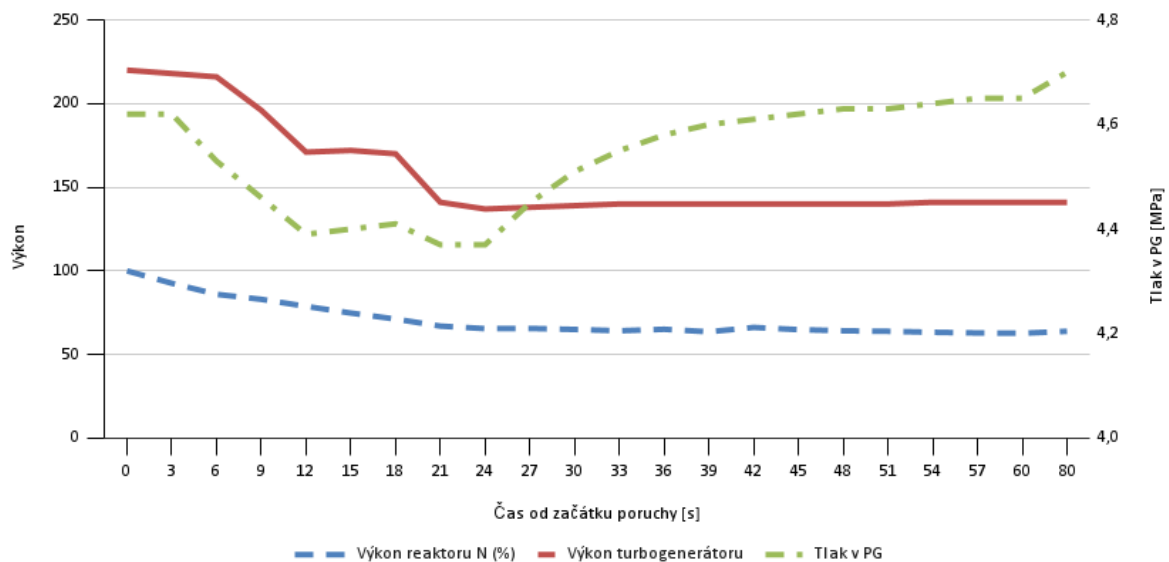
Dále lze zmínit i Výkonový koeficient reaktivity, Dutinový koeficient reaktivity či Koeficient reaktivity od kyseliny borité.

3 Simulace

Pro lepší pochopení a názornou demonstraci jsme posléze i vybrali dva simulované scénáře poruchy hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ), kdy v jednom dojde k závadě pouze na 2 z celkových 6, a v druhém pak dojde k poruše všech. K provedení těchto simulací a porovnání obou scénářů nám posloužil simulátor SPVS-EDU již zmíněného VVER-440 z dílny VÚJE Trnava. Ten je určen k základnímu představení vnitřních chodů jaderné elektrárny. Simulace probíhá na čtyřech počítačích, na dvou primární okruh a na dvou sekundární okruh. V programu je možnost navolit, jak běžný chod elektrárny (změna výkonu elektrárny aj.), tak třeba i simulace různých výpadků zařízení (turbogenerátoru, hlavních cirkulačních čerpadel (HCČ), atd.). Z důvodu nejlepší možnosti demonstrovat výše zmíněnou teorii jsme si vybrali scénář výpadku dvou a poté i všech HCČ.

Výpadek dvou HCČ (HCČ-2 a HCČ-5)

V první simulaci, kdy nám vypadly “pouze“ dvě čerpadla, došlo téměř okamžitě k částečnému zasunutí řídicích tyčí, aby se docílilo nižšího výkonu reaktoru (celistvá čára). Ten způsobuje menší produkci páry (čerchovaná čára), která vede k poklesu tlaku v PG napojeném na poškozené čerpadlo. Při snížení výkonu primárního okruhu, se začal snižovat i výkon turbogenerátorů v sekundárním okruhu v souladu s propojením systémů TVER a RCS,

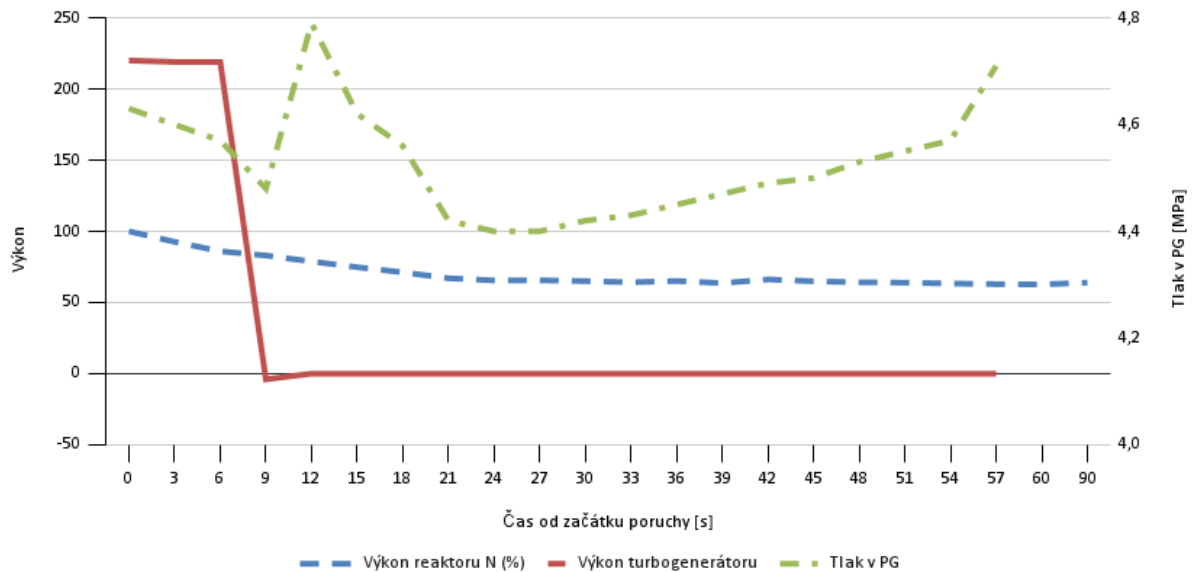


a to díky automatickému přepnutí TG z módu N na TPO (turbínový polohový ovladač) v čase 9 sekund od vypuknutí poruchy. TG tak odebírá méně páry z SO, což ukončuje klesání tlaku v příslušných PG. Hned jak se výkon v primárním okruhu ustálil na 66%, tedy hodnotě úměrné změně v průtoku čerpané vody, tak tlak v parogenerátorech naopak začal narůstat,

aby stabilizoval průměrný tlak na zadané hodnotě. To vše za méně než 90 sekund od poruchy.

Výpadek všech HCC (HCČ-1 až HCČ-6)

V tomto případě došlo k okamžité odstávce reaktoru řídicími a havarijními tyčemi, čímž výkon reaktoru klesl jen na zbytkový tepelný výkon. Obdobně jako v přechodí simulaci na to zareagoval TVER, tentokrát však odstavením turbogenerátoru v čase 7 sekund od nehody. Tlak P v PG reagoval taktéž podobně, kdy první klesal a to asi ještě 25 sekund po nehodě.



4 Shrnutí

Celkově jsme se blíže seznámili s komplexností tématu fungování jaderných elektráren a reaktorů, zejména pak s možnostmi regulace jejich výkonu. Jak teoretická část, tak i posléze ověření jednotlivých principů formou simulace na simulátoru je nám důkazem bezpečnosti těchto zařízení. Ta je mimo jiné dnes již i z velké části plně automatizovaná, což eliminuje chybový lidský faktor, ale i umožňuje přesněji a rychleji reagovat v souladu s faktory popsaných v teoretické části, například pak se zpětnovazebnými koeficienty.

Poděkování

Tímto chceme poděkovat za možnost a zprostředkování práce organizátorům projektu Týden vědy na Jaderce, posléze pak za čas a znalosti, které nám věnoval, Ing. Dušanu Kobylkovi, PhD. jako vedoucímu práce. Díky patří i fakultě FJFI pod záštitou ČVUT, která nám poskytl potřebné pomůcky a software.