

Simulace provozu JE s blokem VVER 1000

P. Baxant, J. Fumfera, M. Kuna

Katedra jaderných reaktorů FJFI ČVUT

pavel.baxant@seznam.cz, fumfera_jaromir@seznam.cz,
MichalKuna@seznam.cz

Abstrakt:

Práce představuje popis základních částí jaderné elektrárny, jejího provozního i havarijního režimu. Při štěpné reakci se uvolňuje vazebná energie nukleonů (tj. protonů a neutronů) a to ve formě kinetické resp. tepelné energie. Toto teplo lze termodynamickými pochody přeměnit v elektrickou energii. Při simulaci provozu je možné vyzkoušet běžné situace i situace havarijní. Cílem je seznámit se s danou problematikou. K simulaci byl použit program VVER-1000 Reactor Department Simulator.

1 Úvod

Jaderná energetika – dnes již nenahraditelný zdroj energie. Nejenže vyrobení 1 kWh „z jádra“ je mnohem levnější než 1 kWh z uhlí, ale je i mnohem šetrnější k životnímu prostředí – nevypouští skleníkové plyny a produkuje mnohem menší množství pevných odpadů. Tento projekt je určen k popisu základních provozních částí, popisu běžného, ale i havarijního stavu.

2 Jaderná elektrárna s blokem VVER 1000

Jaderná elektrárna je velmi složitě zařízení, sloužící k výrobě elektrické energie přeměnou energie tepelné. Tepelná energie zde vzniká uvolňováním vazebné energie nukleonů. Reaktor VVER 1000 se řadí mezi tlakovodní reaktory (voda zde cirkuluje pod tlakem 15,7 MPa, což zapříčiňuje to, že voda při vyšší teplotě – jež v reaktoru dosahuje až 320°C – nevrže). Jako palivo se zde užívá uran obohacený izotopem ^{235}U na 3 až 5 % . Jádra uranu se štěpí tzv. tepelnými neutrony, které mají energii cca. 0,025 eV. Při rozštěpení vznikají zpravidla 2 až 3 odštěpky s velmi vysokou kinetickou energií a další 2 až 3 neutrony. Odštěpky se srážejí s okolním prostředím a uvolňují tak teplo. Vzhledem k tomu, že neutrony mají velmi vysokou energii (což snižuje pravděpodobnost, že rozštěpí další jádro), musí se zpomalit. Toho se dosahuje pomocí tzv. moderátoru, kterým je obyčejná lehká voda. Výhodou použitého moderátoru je jeho nízká pořizovací cena a vysoká moderační schopnost (na zpomalení

neutronu stačí pouze několik srážek s molekulami vody). Naopak nevýhodou je poměrně vysoká absorpce neutronů (snižování výkonu reaktoru). Pro regulaci výkonu se využívá tzv. absorbátorů – jednak se používají tzv. řídicí a regulační tyče vyrobené z oceli s přídavkem bóru (slouží k okamžité regulaci), jednak kyselina boritá sloužící k dlouhodobější regulaci výkonu. Uvolněná tepelná energie se dále přeměňuje prostřednictvím chladiva (kterým je stejná látka jako moderátor – tedy lehká voda) vodu sekundárního okruhu na sytou páru. Pára pohání turbínu spojenou s generátorem (který již vytváří elektrickou energii). Výrobní blok JE je rozdělen na 3 základní části: primární okruh (zahrnuje reaktor ...), sekundární okruh (turbína a generátor ...) a terciální okruh (chladicí okruh).

Primární okruh

Primární okruh tvoří tlaková nádoba reaktoru, parogenerátory, hlavní cirkulační čerpadla, kompenzátor objemu a mnoho dalších pomocných a bezpečnostních systémů. V reaktoru jsou umístěny palivové proutky vyrobené ze speciální slitiny zirkonia Zircaloy. Uvnitř proutků se nachází samotné palivo – oxid uraničitý. Palivové proutky se sdružují do palivových kazet, které tvoří aktivní zónu reaktoru. Nad aktivní zónou jsou umístěny již zmíněné řídicí a regulační tyče. Z reaktoru díky hlavním cirkulačním čerpadlům (4 ks) proudí ohřátá voda do parogenerátorů (4 ks), jež díky své velké teplosměnné ploše předávají teplo vodě sekundárního okruhu. Voda se pak vrací zpět do reaktoru, kde se opět ohřívá. Pro regulaci nekonstantní hustoty primární vody se užívá tzv. kompenzátoru objemu. Toto zařízení udržuje v primárním okruhu konstantní tlak díky sprchovému systému a systému elektroohříváků.

Sekundární okruh

Sekundární okruh je tvořen parogenerátorem (společná část primárního i sekundárního okruhu), turbínou, elektrickým generátorem, kondenzátorem a množstvím dalších zařízení. Tlak vody v sekundárním okruhu se udržuje okolo hodnoty 6,27 MPa, což již dovoluje vodě při teplotě kolem 220°C vřít. Pára, vznikající v parogenerátoru, je hnána na turbínu, kterou roztáčí. Turbína zároveň roztáčí elektrický generátor, který již generuje elektrický proud. Pára po průchodu turbínou kondenzuje v kondenzátoru zpět na vodu a je hnána přes systém regeneračních ohříváků zvyšujících účinnost opět do parogenerátoru.

Terciální okruh

Tento chladicí okruh odebírá prostřednictvím kondenzátoru zbytkové teplo páře a odvádí ho chladícími věžemi do atmosféry.

Simulátor bloku VVER 1000

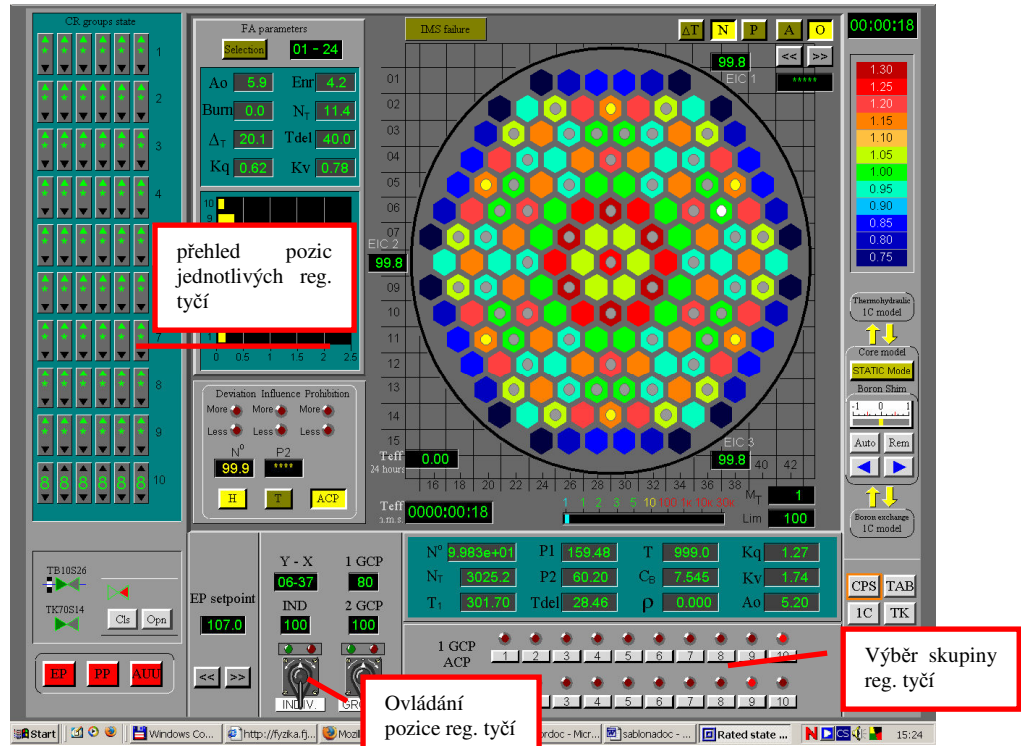
Simulátor jaderné elektrárny je program, který se snaží na základě numerického modelování relativně věrně napodobit chování a potažmo řízení jaderného zařízení. Kromě simulace běžného provozu jsme se mohli seznámit i se scénáři havarijních situací.

V samotném programu je několik přehledových panelů (obrazovek), pomocí kterých se simuluje řízení reaktoru. Úvodní obrazovka (panel řízení reaktivity) umožňuje řídit polohu skupin regulačních tyčí ale i samostatných tyčí. Dále je zde možné sledovat numerické vyjádření hodnot výkonu, tlaku, teploty, reaktivity ... v reaktoru i na primárním a sekundárním okruhu (pouze tlak). Je zde též graficky znázorněn tlak, výkon a teplota v každém palivovém článku.

K dalším používaným funkcím patří nastavení koncentrace kyseliny borité, nastavení limitu pro spuštění havarijní ochrany a zapnutí či vypnutí Automatického kontrolního programu (tyto systémy samozřejmě nelze ovlivňovat při reálném provozu).

Při nestandardní situaci se zapnou některé ochrany a varovná hlášení – jejich stav je možno sledovat na obrazovce Panelu hlášek. Další hojně využívanou obrazovkou je Panel

primárního okruhu. Zde se dá sledovat výška hladiny páry v parogenerátorech, její tlak, velikost tlaku v reaktoru, také stav čerpadel (spuštěno / vypnuto), sprch a elektroohříváků, také zde lze spustit náhradní přívod vody. Na Panelu sekundárního okruhu lze kontrolovat výšku hladiny parního kolektoru a činnost turbogenerátoru. K přehlednému shrnutí simulace slouží obrazovky 2D a 3D grafu. Trojrozměrný graf zobrazuje teplotu a výkon v každé části aktivní zóny, dvojrozměrný ukazuje například výšku hladiny v parogenerátorech, výkon, reaktivitu apod.



Popis některých situací

Plánované odstavení se provádí většinou z těchto důvodů: výměna paliva, revize nebo v případě poruchy některé méně důležité součásti. Pro plánované odstavení existuje přesný postup. Je zde stanovena mezní hranice snížení výkonu za určitý časový úsek. Za jednu minutu lze snížit výkon o 0,5% jeho celkového elektrického výkonu. Toto je ale možné provádět pouhých deset minut, pak se musí snižování výkonu na patnáct minut, během kterých se reaktor stabilizuje, zastavit. Snížení výkonu na 0% tedy trvá něco okolo 8,5 hodiny. I když je elektrický výkon nulový, reaktor stále produkuje teplo a to dobíhajícímu royzpadu štěpných produktů. Proto musí být i během odstávky reaktor chlazen.

Havarijní odstavení probíhá o dost rychleji než plánované. Podnětem k tomuto odstavení je většinou hrozba poškození reaktoru. Vysoký tlak či teplota, ale i var vody (způsobený nízkým tlakem) vede k odstavení, které většinou probíhá automaticky. Systém spustí všechny regulační tyče do aktivní zóny (doba pádu 4 až 6 vteřin) a také vylije zásobníky kyseliny borité. Během jedné simulace, při které bylo vyvinuto úsilí o dosažení co nejvyššího výkonu, byly vypnuty veškeré ochrany. Kromě deaktivace havarijní ochrany bylo nutné zvýšit tlak a snížit koncentraci kyseliny borité. Toto umožnilo zvýšit výkon až na 160% nominálního výkonu. Poté se vypařila veškerá moderátorová voda, čili reaktor ztratil moderační schopnost a neutrony byly příliš rychlé k udržení reakce. Pokud by byly havarijní ochrany aktivní, již při nepatrném zvýšení výkonu nad 100% spustily.

Disfunkce jednoho hlavního cirkulačního čerpadla (i více) způsobí, že do parogenerátoru se přestává dodávat horká voda z reaktoru, což způsobí, že v něm bude klesat tlak. Nyní sepnou havarijní ochrany. Parogenerátor se začne doplňovat studenou vodou ze zásobníků, aby se vyrovnala hladina na 225cm. Také se spustí elektroohříváky a do okruhu reaktoru se začne doplňovat horká voda, což vyrovná tlak. Při této havarijní situaci klesne výkon přibližně na 65% nominální hodnoty. Po stabilizaci situace je nutné opravit čerpadlo.

3 Shrnutí

Výsledkem je jakýsi scénář různých havarijních situací. Potěšující je, že i přes velké úsilí, se nepodařilo dosáhnout maximální projektované havárie (roztržení tlakové nádoby reaktoru), což zcela jistě poukazuje na velmi vysokou bezpečnost těchto reaktorů.

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat předně KJR FJFI ČVUT za poskytnutí prostor a počítačové techniky k naší simulaci, dále Ing. Dušanovi Kobylkovi za teoretickou průpravu v oboru řízení jaderné reakce a vedení při praktické části a v neposlední řadě Vojtěchovi Svobodovi za zorganizování FT.

Reference:

- [1] HEŘMANSKÝ, B.: *Jaderné reaktory* SNTL, 1981
- [2] AUGUSTA, P. – ZEMAN, M.: *Jaderná energie* ČEZ, 2003
- [3] ZEMAN, J. *Reaktorová fyzika* KJR FJFI ČVUT, 1998