

Andrej Stritar
 Institut "Jožef Stefan"
 Ljubljana, Jamova 39

ANALIZATOR JEDRSKE ELEKTRARNE

NUCLEAR POWER PLANT ANALYZER

POVZETEK - Opisana je razvoj analizatorjev jedrske elektrarne v ZDA. V razvoju sta dva neodvisna tipa analizatorjev, eden v Idaho in Los Alamos National Lab., drugi pa v Brookhaven National Lab. Podrobneje je opisan slednji. Opisana je strojna oprema analizatorja, ter matematični modeli termohidravlike reaktorske posode vrelnega reaktorja, ki predstavljajo najzahtevnejši del celotnega modela.

ABSTRACT - The development of Nuclear Power Plant Analyzers in USA is described. There are two different types of Analyzers under development in USA, the first in Idaho and Los Alamos National Lab, the second in Brookhaven National Lab. That one is described in detail. The computer hardware and the mathematical models of the reactor vessel thermohydraulic are described.

1. UVOD

Nezgodna Otoka treh milj v ZDA leta 1979 je povsod po svetu sprožila celo vrsto raziskav in študij o vprašanju varnosti jedrskih elektrarn. Med drugimi se je pokazala tudi potreba po napravi, ki bi lahko v kratkem času analizirala delovanje jedrskega objekta v vseh situacijah. Napravo so poimenovali Plant Analyzer.

Ker se računalniška tehnologija v zadnjih letih izjemno hitro razvija, je bilo logično pričakovati združitev programov za analizo s simulatorji. Matematične modele programov za analizo je potrebno vgraditi v zmogljiv računalnik, uporabiti strojno opremo podobno simulatorski za komunikacijo med programom in uporabnikom in te imamo napravo, ki nam lahko hitro in na zelo nazoren način analizira delovanje jedrske elektrarne.

Ameriška Nuclear Regulatory Commission je pričela z razvojem dveh analizatorjev elektrarne. Prvega razvijajo skupno v Idaho National Laboratory in Los Alamos National Laboratory, drugega pa neodvisno v Brookhaven National Laboratory.

Prvi projekt sioni na že razvitih programih za analizo nezgod v jedrskih elektrarnah RELAPS in TRAC. Glavna izboljšava je lažja

uporaba programov in povečana hitrost. Uporabnik je povezan z računalnikom preko grafičnega terminala in običajne telefonske linije. Rezultati se mu prikazujejo v grafični obliki na grafičnem terminalu, možno pa jih je tudi shraniti za kasnejše obdelave. Hitrost simulacije je odvisna od simuliranega prehodnega pojava. V povprečju je nekoliko večja od realne. Za doseganje te hitrosti pa je nujno zasesti celotne zmogljivosti velikega CDC računalnika, kar bistveno prispeva k stroškom analize. Prednost tega analizatorja je uporaba preizkušenih programov. Glavna pomanjkljivost je potreba po velikem računalniku in precejšnji stroški za posamezne analize.

2. ANALIZATOR JEDRSKE ELEKTRARNE V RAZVOJU V BROOKHAVEN NATIONAL LABORATORY /1/

V Brookhaven National Laboratory so se razvoja analizatorja elektrarne lotili popolnoma drugače. Matematične modele so zasnovali znova. Uporabili so dva namenska računalnika AD-10 zgrajena prav za simulacijo zveznih sistemov. Krmiljena sta preko vietnamskega računalnika PDP-11/34, ki skrbi za komunikacijo med uporabniki in namenskima strojema. Na PDP je priključena krmilna konzola, s katere je možno upravljati simulacijski tek, ter grafični terminal TEKTRONIX 4016 na katerem je možno spremljati potek simulacije. Poleg tega je možno analizator uporabljati preko telefona s pomočjo namiznega računalnika tipa IBM-PC.

2.1 MATEMATIČNI MODELI TERMOHIDRAVLIKE V REAKTORSKI POSODI

Bistven prispevek k hitrosti simulacije v Brookhavenskem analizatorju so uporabljeni matematični modeli. Tu se bomo omejili na opis termohidravličnih modelov v reaktorski posodi, saj ti predstavljajo najbolj obsežen del celote.

Matematični model termohidravlike dvofazne zmesi v reaktorski posodi vrelnega reaktorja temelji na drift-flux modelu dvofazne zmesi vode z štirimi osnovnimi enačbami. Model simulira nehomogeni, neravnotežni dvofazni tok vode.

Na sliki 1 je prikazan prerez reaktorske posode vrelnega reaktorja tipa BWR/4 ameriške zasnove. Za dobro modeliranje pojavov v taki posodi je očitno potreben dober dvofazni model termohidravlike. Biti mora nehomogen, kajti vsaka faza se lahko giblje o svojo hitrostjo, ter neravnotežen s tem, da je para lahko vedno v nasičenju. Pri večini prehodnih pojavov namreč ne pride do odkrivanja sredice in se zato para nima kje pregrejeti. Če pa ni daljših vodovodnih dosegov devi, ni potrebe po modeliranju vodovodnega razločevanja prostora. Model temelječ na dveh enačbah se kaže kot zelo ustrezen.

Reaktorsko posodo, skicirano na sliki 1, smo razdelili na 55 računskih enot, volunov, po sliki 2. V sredici smo porazdelili tri vzporedne kanale: povprečno sredico, vroči kanal in hladno sredico. Vsak ima po 12 volunov. 4 volunov je med sredico v ločevalnihi vlage, 12 pa v povratnem kanalu in spodnjem delu.

Zadnji, 55-ti volumen je zgornji del posode kjer se zbira para. Trije vzporedni kanali v sredici definirajo tri obtočne zanke za izračun gibalne količine: vsaka zanka gre skozi ločevalnik vlage v povratni kanal in spodnji plenum, tam pa se delijo in gre prva skozi povprečno sredico, druga skozi vroči kanal, tretja pa skozi obtok sredice. Pri modeliranju so upoštevane naslednje predpostavke ali poenostavitve:

- V vsaki prostorski enoti so privzete povprečne vrednosti spremenljivk.
- V celi reaktorski posodi je za izračun lastnosti hladila upoštevan samo en tlak. Tlačne spremembe niso prostorsko modelirane. Tlačne razlike so upoštevane samo v enačbi gibalne količine. Pravtako je predpostavljen en tlak v vsakem pretočnem preseku, saj v vrelni elektrarni ni izrazitejših vodoravnih odsekov v katerih bi lahko prišlo do razslojevanja pretoka.
- Para je vedno v nasičenju, kar pomeni, da ni možno simulirati daljših obdobj z nepoplavljeno sredico.
- Prevod toplote vzdolž vsakega kanala ter gretje tekočine zaradi trenja, kinetične in potencialne energije so zanemarljivi.

Štiri osnovne enačbe nehomogenega, neravnotežnega dvofaznega pretoka so izpeljane iz običajnih formulacij časovno povprečenih enačb posameznih faz in enodimenzionalnih, trenutno površinsko povprečenih enačb zmesi. Štiri osnovne enačbe so:

Enačba ohranitve mase parne faze:

$$\frac{\partial}{\partial t}(d \rho_g) + \frac{\partial}{\partial z}(d \rho_g v_g) = \Gamma \quad (1)$$

Enačba ohranitve mase kapljevinske faze:

$$\frac{\partial}{\partial t}[(1-d) \rho_l] + \frac{\partial}{\partial z}[(1-d) \rho_l v_l] = -\Gamma \quad (2)$$

Enačba ohranitve energije zmesi:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial z} = q''' \quad (3)$$

Enodimenzionalna enačba ohranitve gibalne količine zmesi:

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial z} = \rho_l g [(1-d) \rho_l + d \rho_g] - \frac{\partial F}{\partial z} \quad (4)$$

kjer so:

$$E = (1-d) \rho_l e_l + d \rho_g e_g \quad (5)$$

$$U = (1-d) \rho_l h_l v_l + d \rho_g h_g v_g \quad (6)$$

$$G = (1 - d) \rho_l v_l + d \rho_g v_g \quad (7)$$

$$U = (1 - d) \rho_g v_l |v_l| + d \rho_g v_g |v_g| \quad (8)$$

Tu je d delež praznin, v hitrost, p tlak, e specifična notranja energija, h specifična entalpija, t čas, z prostorska dimenzija, ρ specifična gostota, g težnostni pospešek, q'' toplotni tok v hladilo, Γ generacija pare na enoto prostornine, indeks l je pripisan kapljevinski fazi, indeks g pa parni.

Zgornje štiri enačbe predstavljajo osnovo modela. Da bi v vsakem časovnem koraku imeli popolnoma definirano stanje, moramo reševati naslednje enačbe:

- Enačbe o ohranitvi mase in energije v vsakem volumnu.
- Enačbo o ohranitvi mase in energije v celi posodi za izračun tlaka.
- Enačbe o ohranitvi mase parne faze v vsakem volumnu za izračun masne bilance v zgornjem delu posode.
- Tri enačbe o ohranitvi gibalne količine za vsako obtočno zanko.

Za vsak računski volumen v reaktorski posodi lahko iz osnovnih štirih enačb izpeljemo enačbo za ohranitev parne faze, ki jo rešujemo v vsakem volumnu:

$$\frac{dM_{g,k}}{dt} = \dot{m}_{g,k-1} - \dot{m}_{g,k} + \Psi_k \quad (9)$$

M predstavlja maso, \dot{m} masni tok, simbol Ψ_k pa predstavlja hitrost generacije pare v vsakem volumnu:

$$\Psi_k = \int_{\Delta z_k} \Gamma_k A_k dz = \langle \Gamma_k \rangle A_k \Delta z_k \quad (10)$$

Po enakem postopku kot smo dobili masno bilanco parne faze lahko dobimo enačbo o ohranitvi mase za kapljevinsko fazo izhajajoč iz temeljne enačbe 2:

$$\frac{dm_{l,k}}{dt} = \dot{m}_{l,k-1} - \dot{m}_{l,k} - \Psi_k \quad (11)$$

Enačbo 11 ne rešujemo eksplicitno za vsak volumen, temveč jo uporabimo med analitično izpeljavo volumnskih pretokov. Ena od bistvenih lastnosti tega modela je preračun volumnskih pretokov namesto lokalnih masnih bilanc kapljevinske faze (enačba 11).

V vsakem spoju med volumni lahko dobimo volumnski pretok \dot{V} iz enačb 9 in 11. Upoštevajoč našo predpostavilo o vodni nasičeni pari dobimo izraz:

$$\dot{V}_k = \dot{V}_{k-1} + \Psi_k \Psi_k + d \Phi_k + \int_{\Delta z_k} \dot{V}_{fw} \quad (12)$$

Volumski pretok napajalne vode V_{fw} nastopa v tej enačbi kot robni pogoji. Posamezne spremenljivke predstavljajo:

$$\gamma_k = \frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_{1,k}} \quad (13)$$

$$\Phi_k = m_{1,k} \theta_k + m_{g,k} \xi \quad (14)$$

$$\theta_k = \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\rho_{1,k}} \right) \quad (15)$$

$$\xi = \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\rho_g} \right) \quad (16)$$

$\delta_2(k)$ je 1 za volumen v katerega priteka napajalna voda in 0 za vse ostale. Enačba 12 nam definira volumski pretok v vsakem spoju ob znanem volumskem pretoku v predhodnem spoju. Očitno nam manjka še neka izhodiščna točka. To so volumski pretoki na vstopu v povratni kanal in na vstopih v povprečno sredico, vroči kanal in obtok sredice. Izračunamo jih s pomočjo izrazov za ohranitev gibalne količine v posameznih zankah sistema.

Na podoben način kot smo izpeljali enačbo za masno bilanco parne faze iz enačbe 1 in dobili enačbo 9, lahko izpeljemo iz enačbe 3 enačbo za ohranitev notranje energije zmesi v posameznem volumnu E_k :

$$\frac{dE_k}{dt} = \dot{m}_{e,k-1} - \dot{m}_{e,k} + (Q_k - \Delta Q_k) + \delta_2(k) \dot{m}_{e, fw} \quad (13)$$

Q predstavlja toplotni tok v volumen, \dot{m}_e pa energijski pretok. Specifično notranjo energijo kapljevine lahko izračunamo po integraciji enačbe 13 po času iz celotne notranje energije. Pri tem je notranja energija parne faze znana, saj je določena s tlakom (para je vedno nasičena). Končno lahko izračunamo še temperaturo kapljevine $T_{1,k}$:

$$T_{1,k} = T_s + \frac{e_{1,k}}{c_v} \quad (14)$$

c_v je specifična toplota vode pri konstantnem volumnu. Predpostavili smo, da je c_v enaka c_p , specifični toploti pri konstantnem tlaku.

Uporabimo enačbo volumskega pretoka 12 in jo priredimo za celotno eksitorsko posodo zato, da bi dobili izraz za izračun povprečnega toka v njej. Če prireditvi dobimo izraz:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\dot{V}_{fw} - \dot{V}_{sl} + \gamma_{n0} \Psi_{TOT}}{-M_1 \Theta_1 - M_g \epsilon} \quad (15)$$

V števcu na desni strani je celotna sprememba prostornine v reaktorski posodi, v imenovalcu pa povprečna stisljivost tekočine v njej. Indeks sl pomeni surge line - prelivni vod tlačnika. Ker smo model zasnovali samo z enim sistemskim tlakom, ni potrebe po reševanju lokalnih enačb o ohranitvi gibalne količine med posameznimi volumni. S tem si prihranimo precej računalniškega časa. Namesto tega rešujemo eno samo diferencialno enačbo za vsako zaključeno pretočno zanko znotraj reaktorske posode. V celi posodi imamo tri zanke, eno skozi povprečno sredico, drugo skozi vroči kanal in tretjo skozi obtok sredice. Gibalno količino v zanki definiramo z:

$$I_j = \int_j G dz \quad (16)$$

Kjer je G masni fluks (masni pretok na enoto površine), integrirano pa vzdolž cele zanke j . Diferencialna enačba, ki popisuje časovno obnašanje gibalne količine je naslednja:

$$\frac{dI_j}{dt} = D_j - F_j - L_j \quad (17)$$

D_j je vsota vseh prispevkov črpalk in težnostnega pospeška čez vse volumnne vzdolž zanke, F_j je vsota vseh izgub zaradi trenja v pretočnih kanalih vzdolž cele zanke, L_j pa vsota vseh izgub zaradi spremembe oblike kanalov vzdolž zanke. Model ima tri vzporedne zanke, tj. tri enačbe o ohranitvi gibalne količine: skozi povprečno sredico, skozi vroči kanal in skozi obtok sredice.

Da bi zaključili sistem enačb v našem modelu, nam manjkajo še izrazi, ki bi popisovali medsebojna razmerja med obema fazama. Uporabili smo drift-flux teorijo, ki sta jo vpeljala Zuber in Findlay leta 1965 [2]. Z uporabo njihove formulacije zapišemo izraza za masni tok parne in kapljevinske faze pri danem volumskem toku:

$$\dot{m}_g = \rho_g \dot{V} C_0 \langle d \rangle + \rho_g A \langle d \rangle \langle v_{gj} \rangle \quad (17)$$

$$\dot{m}_l = \rho_l \dot{V} (1 - C_0 \langle d \rangle) - \rho_l A \langle d \rangle \langle v_{gj} \rangle \quad (18)$$

A v pomeni prečni preseki. Izraza A.15 in A.17 nam popisujeta razmere v kanalu z dvofazno zmesjo pod poljubnimi razmerji. Lahko imamo samo kapljevino, lahko samo paro, tako pare in kapljevine sta lahko isto merna ali protokrat. Edo od je seveda, da imamo parametra C_0 in $\langle v_{gj} \rangle$ in jih moramo določiti. Iz izbiri teh dveh parametrov, ki se določijo na določeni lokaciji, ki je bilo obsežno eksperimentalno preučevano, uporabljamo

izrabe za turbulentni tok dvofazne zmesi (churn-turbulent flow regime) in za obročasti tok pri višjih deležih praznin (annular flow regime).

S tem je osnova celega modela zaključena. Seveda so nujne še pomožne korelacije za izračun lastnosti vode, hitrosti uparjanja, ter posebni modeli za preračun razmer v zgornjem plenumu ter za sledenje nivoja kapljevine v povratnem kanalu. Vse skupaj je potrebno še sklopiti z modeli za prenos toplote v sredici ter z modeli ostalih sistemov elektrarne. Opis vsega presega obseg tega referata.

2.3 VERIFIKACIJA MODELA

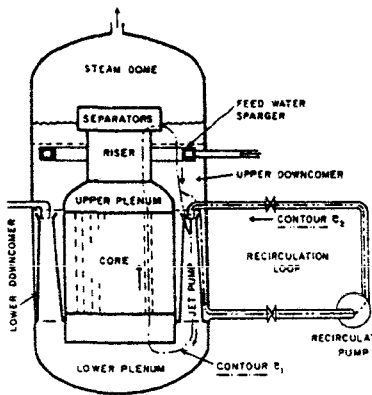
Matematični modeli v opisanem analizatorju so prirejeni elektrarni tipa BWR/4. V potrditev ustreznosti modelov so bile narejene obsežne primerjalne študije med rezultati tega analizatorja ter rezultati preračunov istih prehodnih pojavov s priznanimi programi in z merjenimi vrednostmi. V splošnem se odziv analizatorja dobro ujema z ostalimi. Razlike med rezultati so vsekakor v mejah točnosti teh programov. Na sliki 3 in 4 sta primera rezultatov dobljenih za isti prehodni pojav z različnimi programi/4/. Točnost rezultatov analizatorja je primerljiva točnosti programov za termohidravlične analize.

3. ZAKLJUČEK

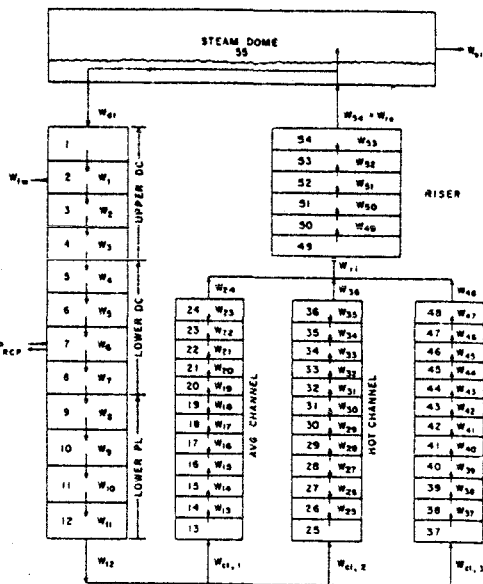
Opisani analizator jedrske elektrarne lahko postane nekega dne zelo uporabno orodje, ki bi si ga lahko privoščila vsaka jedrska elektrarna. Možno bi ga bilo priključiti k procesnemu računalniku objekta ter z modeli stalno slediti dejanskemu stanju na njem. V vsakem trenutku bi imel operater možnost preklopiti na hitro simulacijo iz danega začetnega stanja in dobiti odgovor na nejasnosti v zvezi z njegovimi odločitvami glede upravljanja objekta. Opisani model pa je sodoben prispevek k razvoju cenenih in hitrih orodij za analize prehodnih pojavov v jedrskih elektrarnah, saj bistveno večjo hitrost delovanja ne pridobi na račun točnosti. Seveda pa je omejen samo na pojave, pri katerih hitrost širjenja tlačnega vala ne preseže hitrosti zvoka.

4. LITERATURA

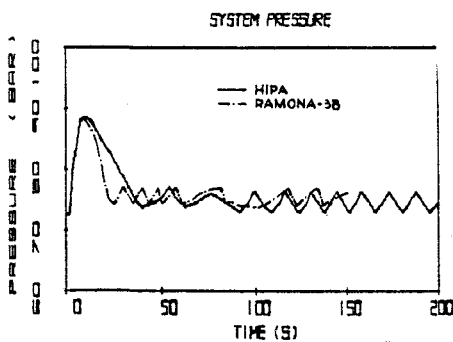
- 1/ W.Wu144, H.S.Cheng, S.V.Lekach, A.Mallen (1984), "The BWR Plant Analyzer", Brookhaven Nat. Lab., BNL-NUREG-51812
- 2/ N.Zuber, A.J.Hindley, (1965), "Average Volumetric Concentrations in Two-Phase Flow Systems", J.Heat Transfer 87
- 3/ M.Ishii (1977), "One-Dimensional Drift-Flux Model and Constitutive Equations for Relative Motion Between Phases in Various Two-Phase Flow Regimes", Argonne Nat. Lab., ANL-77-47
- 4/ W.Wu144, H.S.Cheng, S.V.Lekach, A.N.Mallen, A.Stritar: "High Speed LWR Transient Simulation for Optimizing Emergency Response", Conference on Power Plant Simulation, (1984), Queretaro, Mexico.



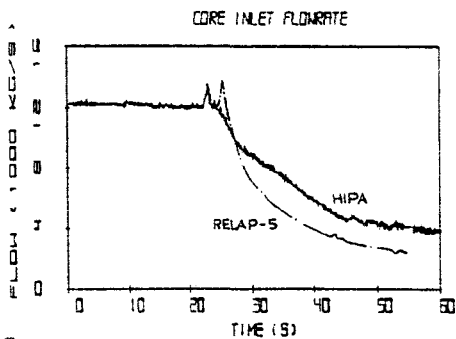
Slika 1: Reaktorska posoda vrelnega reaktorja



Slika 2: Razlenitev reaktorske posode na diskretne volume



Slika 3: Primerjava rezultatov analizatorja (HIPA) in programa RAMONA-3B



Slika 4: Primerjava rezultatov analizatorja (HIPA) in programa RELAP-5