

Uporaba grafičnega uporabniškega vmesnika za varnostno analizo poskusa ROSA/LSTF z zlomom v vroči veji

Andrej Prošek

*Institut »Jožef Stefan«, Jamova cesta 39, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: Andrej.Prosek@ijs.si*

Povzetek. Danes je večina programskih orodij, tudi na jedrskem področju, opremljena z grafičnim uporabniškim vmesnikom. Pred kratkim so razvili programsko orodje SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package), da bi olajšalo varnostne analize. Namen študije je bil razviti animacijski model SNAP za izračune z računalniškim programom RELAP5 na jedrski napravi. Izbrana naprava je bila ROSA/LSTF (Rig of Safety Assessment/Large Scale Test Facility), ki ponazarja štirizančni tlačnovodni reaktor. Podatki za animacijo so bili dobljeni z računalniškim programom RELAP5/MOD3.3 Patch 04. Simuliran je bil scenarij hipotetične male izlivne nezgode z zlomom v vroči veji reaktorskega hladilnega sistema. Animacijski model naprave ROSA/LSTF je bil uporabljen za prikaz fizikalnih pojavov in procesov. Povzamemo lahko, da razviti animacijski model znatno pomaga pri varnostni analizi in da so rezultati analize predstavljeni širši javnosti na preprost in razumljiv način.

Ključne besede: grafični uporabniški vmesnik, animacijski model, SNAP, varnostne analize

Implementation of graphical user interface for safety analysis of ROSA/LSTF hot leg break experiment

Today most software applications, also in the nuclear field, come with a graphical user interface. Recently, the Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP) was designed to simplify the process of performing safety analysis. The purpose of the present study was to develop SNAP animation model for RELAP5 calculations of nuclear installation. The facility selected was Rig of Safety Assessment/Large Scale Test Facility (ROSA/LSTF), which is a simulator of four loop pressurized water reactor. The source data needed for animation were obtained by RELAP5/MOD3.3 Patch 04 computer code. A scenario of hypothetical small-break loss-of-coolant accident in hot-leg of reactor coolant system was simulated. The SNAP animation of ROSA/LSTF facility was used for presentation of physical phenomena and processes. It can be concluded that the developed animation model significantly helps in the safety analysis and the analysis results can be presented to wider public in easy and understandable way.

1 UVOD

Danes je večina programskih orodij opremljena z grafičnim uporabniškim vmesnikom. Grafični uporabniški vmesnik uporabniku zagotavlja dragoceno sredstvo za učenje, razumevanje in uporabo programskega orodja. Grafični uporabniški vmesniki za prikaz rezultatov na področju varnostnih analiz jedrskih naprav so bili razviti za programe za računalniško dinamiko tekočin, za sistemske termohidravlične računalniške programe, računalniške programe za težke nesreče itd. V zgodnjih 90. letih 20. stoletja so se pri

Ameriški zvezni jedrski upravni komisiji (NRC) odločili, da bodo vsi njihovi računalniški programi, vključno z RELAP5, opremljeni z uporabniškim grafičnim vmesnikom. Prvi tak uporabniški grafični vmesnik je bil NPA (Nuclear Plant Analyzer) [1]. Program je bil namenjen za vizualizacijo obnašanja reaktorskega hladila med simuliranimi nezgodami. Razvoj SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package) se je začel leta 1996 [2] in še vedno traja. SNAP trenutno podpira računalniške programe CONTAIN [3], COBRA, FRAPCON-3, MELCOR, PARCS, RELAP5 [4] in TRACE [5]. V zadnjih dvajsetih letih je bilo kar nekaj študij jedrske elektrarne Krško z uporabo grafičnega uporabniškega vmesnika. Prva vizualizacija jedrske elektrarne Krško je bila na Institutu »Jožef Stefan« narejena z NPA za izračune RELAP5/MOD3.1 leta 1995 [6]. Z računalniškim programom NPA sta bili razviti splošna maska elektrarne in maska uparjalnikov. Z grafičnim uporabniškim vmesnikom NPA je bil razvit tudi model jedrske elektrarne Krško [7] za računalniški program MELCOR. Za animacijo z NPA je bil izbran scenarij hipotetične težke nesreče v jedrski elektrarni Krško. Razvite so bile številne maske, vključno z masko za termohidravlične pojave, ki je prikazovala primarni in sekundarni sistem elektrarne skupaj z zadrževalnim hramom, maska za sredico, ki je prikazovala materialno sestavo sredice, masko reaktorske votline, ki je prikazovala obliko (npr. interakcijo sredice in betona), maska z grafi itd. Naslednji primer vizualizacije rezultatov je študija [8], [9], v kateri je bila ocenjena ranljivost struktur reaktorske votline v tipični tlačnovodni jedrski elektrarni.

Glede na to, da je SNAP računalniška aplikacija na podlagi Jave, ki teče na različnih računalniških

platformah vključno z Windows 7 in Windows XP, operacijskih sistemih na podlagi Linux in Mac Os X, je bil v letu 2010 razvit nov animacijski model jedrske elektrarne Krško za prehodne pojave in nezgode [10]. Glavni motiv za razvoj animacijskega modela je bil pripraviti orodja za čim bolj gladek prehod z računalniškega programa RELAP5 na TRACE, boljša predstavitev simuliranih fizikalnih pojavov in procesov, uporabniku prijazno orodje za razumevanje razčlenitve vhodnega modela in kako podrobno je kaj modelirano, boljša predstavitev izračunanih rezultatov, orodje za učenje novih uporabnikov programa in ne nazadnje, z modernimi računalniškimi orodji pridobiti nove uporabnike sistemskih programov. Nova orodja bodo tako dopolnila obstoječa, ki se uporabljajo za varnostne analize [11], [12], **Napaka! Vira sklicevanja ni bilo mogoče najti.**

V naslednjih odstavkih je predstavljen razviti ROSA/LSTF (Rig of Safety Assessment/Large Scale Test Facility) animacijski model in RELAP5 izračun, potreben za preveritev delovanja animacijskega modela med prehodnimi pojavi. Izračuni so bili narejeni z zadnjo verzijo računalniškega programa RELAP5/MOD3.3 Patch 04. Na koncu so dani še primeri animacij.

2 OPIS ORODIJ

Jedrska naprava ima veliko vidikov, ki jih je mogoče vizualno predstaviti. Grafični uporabniški vmesnik se lahko uporabi za vizualno predstavitev termohidravlike, prenosa toplote, obnašanja gorivnih palic, regulacij, logike za zaustavitev itd. Grafični uporabniški vmesnik uporabniku pomaga pri pripravi vodnega modela, zaganjanju izračunov in prikazu rezultatov izračunov. Je veliko različnih načinov za obdelavo izračunanih rezultatov. Najprej bo opisano programsko orodje za vizualizacijo SNAP. Sledi opis uporabljenega računalniškega programa RELAP5, naprave ROSA/LSTF, scenarija nezgode in na koncu RELAP5 vhodnega modela za napravo ROSA/LSTF.

2.1 Grafični uporabniški vmesnik SNAP

SNAP [14] je bil razvit za lažje izvajanje varnostnih analiz. Namenjen je ustvarjanju in urejanju vhodnih modelov za računalniške programe, ima možnost zaganjanja, nadzora in interakcije z računalniškim programom. SNAP trenutno podpira računalniške programe CONTAIN, COBRA, FRAPCON-3, MELCOR, PARCS, RELAP5 in TRACE. Vsak računalniški program podpira svoj vtič (plug-in). Zmožnost SNAP za interaktivno delo in poznejšo obdelavo rezultatov je narejena večinoma prek animacijskih prikazov. Animacijski prikaz zajema podatke s strežnika in jih vizualno prikaže v določeni obliki. Podatki so lahko iz aktivno tekočega izračuna, zaključenega izračuna, zunanjih podatkov itd.

2.2 Računalniški program RELAP5/MOD3.3 Patch 04

Osnovni termohidravlični model v računalniškem programu RELAP5 sestavlja šest enačb: dve enačbi za ohranitev mase, dve enačbi za ohranitev gibalne količine in dve enačbi za ohranitev energije. Zapiralne enačbe so zagotovljene z uporabo osnovnih zvez in korelacij. Od izida računalniškega programa RELAP5/MOD2, leta 1985, se je računalniški program RELAP5 neprenehoma izpopolnjeval in dopolnjeval. Izdaji RELAP5/MOD3.3 so bili dodani številni novi modeli, narejene so bile izboljšave obstoječih modelov ter prikladnejši računalniški program z vidika uporabnikov. Zadnja verzija RELAP5/MOD3.3 Patch 04 je bila izdana leta 2010 [4].

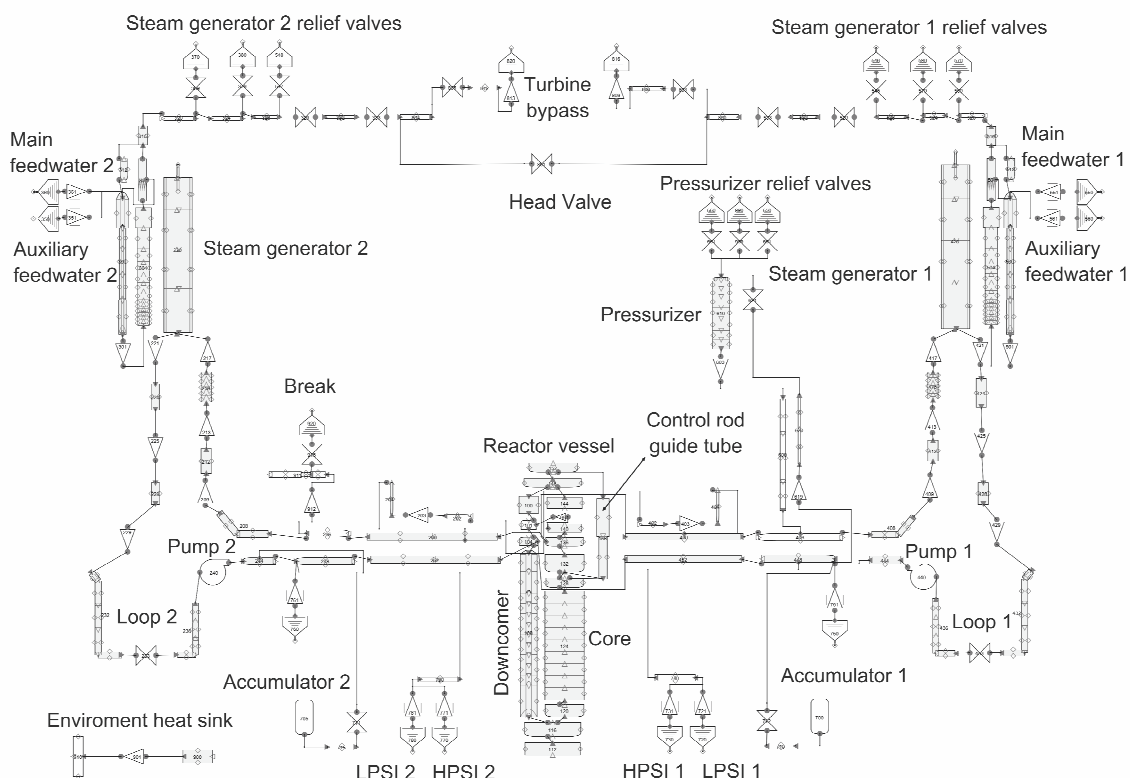
2.3 Eksperimentalna naprava ROSA/LSTF

Eksperimentalna naprava ROSA/LSTF [15] je bila projektirana za simulacijo termohidravličnih pojavov, značilnih za malo izlivno nezgodo in obratovalnih prehodnih pojavov, s tem da so bile razlike višin med komponentami, preseki glavnih cevovodov in tlaki v primarnem sistemu prototipni. Simulirali so glavne regulacijske sisteme. Naprava ROSA/LSTF ima prostornine pomanjšane na 1:48 v primerjavi s štirizančno tlačnovodne jedrske elektrarne toplotne moči 3423 MW. Štiri zanke v referenčni jedrski elektrarni so predstavljene z dvema simetričnima zankama v ROSA/LSTF, s tem da ima vsaka en aktiven uparjalnik in eno aktivno reaktorsko črpalko. Višinske razlike med komponentami so ohranjene, da bi lahko simulirali pojave naravnega obtoka med malimi izlivnimi nezgodami in obratovalnimi prehodnimi pojavi. Poleg glavnih komponent so vključeni še reaktorski varovalni sistemi, regulacija opreme, sistemi na sekundarni strani in različni pomožni sistemi. To so sistemi za zasilno hlajenje središče, napajalna voda, kondenzatni sistem in sistem pare s pomožnimi sistemi kot sistem hladilne vode, instrumentacijskega zraka, čiščenja vode itd.

2.4 Opis scenarija nezgode

Poskus SB-HL-02, ki so ga na eksperimentalni napravi ROSA/LSTF izvedli 30. junija 1987, kaže 10-odstotni zlom vroče veje [16]. Predstavlja vodoravni zlom v vroči veji z velikostjo 10 % preseka, po sočasni odpovedi zunanjšega električnega napajanja in zaustavitvi reaktorja na signal nizkega tlaka v tlačniku. Tako visokotlačno varnostno vbrizgavanje (HPSI) kot sistem pomožne napajalne vode (AFW) po predpostavki nista bila razpoložljiva.

Tlak v primarnem sistemu je po nastopu zloma hitro upadel in dosegel vrednost 12,97 MPa v 6 s. Signal za zaustavitev reaktorja je v 11 s sprožil zaprtje ventilov parovoda, v 13 s je zaustavil glavno napajalno vodo in v 42 s je sprožil zaostalo toploto središče. Izguba



Slika 1: Urejevalnik SNAP, ki prikazuje hidravlične komponente vhodnega modela za RELAP5

električne moči je bila predpostavljena sočasno z zaustavitvijo reaktorja. Tako je signal za zaustavitev reaktorja sprožil zaustavljanje reaktorske črpalke. Primarni tlak je dosegel nastavitveno točko za vbrizgavanje akumulatorjev (4,51 MPa) v 310 s. Ko se je končalo vbrizgavanje akumulatorjev, je nizkotlačno varnostno vbrizgavanje začelo samodejno vbrizgavati v 856 s, ko je primarni tlak dosegel 1,29 MPa. Poskus je bil končan v 1941 s.

2.5 Vhodni model za program RELAP5

Vhodni model za program RELAP5 je sestavljen iz 212 vozlišč, 221 spojev in 213 toplotnih teles. Vhodni model za RELAP5 hidrodinamske komponente, ustvarjen s SNAP, je prikazan na sliki 1. Modelirane so vse pomembne komponente primarne in sekundarne strani (do turbine) naprave ROSA/LSTF. Vhodni model za RELAP5 vsebuje tudi reaktorski varovalni sistem.

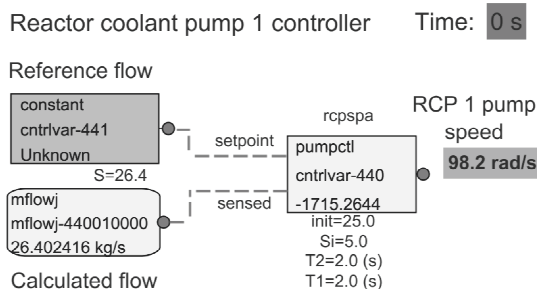
3 REZULTATI, PREDSTAVLJENI Z GRAFIČNIM VMESNIKOM SNAP

Prvi primer rezultatov, predstavljenih z grafičnim vmesnikom SNAP, je regulator za reaktorsko črpalke za doseganje zelenega pretoka reaktorskega hladila med ustaljenim stanjem (normalno obratovanje pri 100-odstotni moči). Iz slike 2 se lahko vidi doseženo stanje po 1000 s izračuna, ki se začne v času -1000 s in konča

ob času 0 s. Taki regulatorji so vgrajeni v računalniški program RELAP5.

Signal napake pretoka vodimo v proporcionalno-integralni regulator PUMPCTL. Začetna vrednost je enaka 25 ('init'). Si je faktor ojačitve in mora biti različen od nič, saj z njim delimo signal napake. T1 je časovna konstanta za proporcionalni del in T2 je časovna konstanta za integralni del. Med prehodnim pojavom regulator izključimo, ker je zaustavljanje reaktorske črpalke podano kot časovno odvisna funkcija.

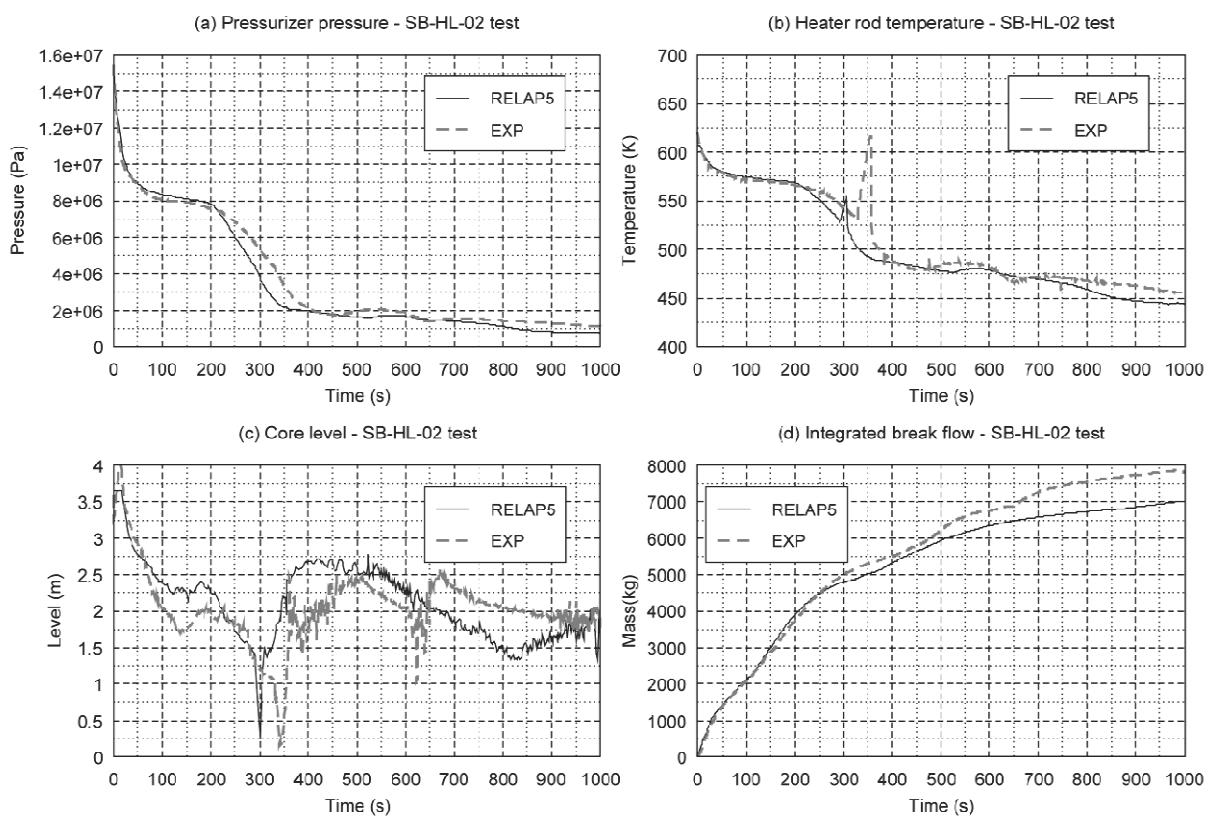
Drugi primer uporabe grafičnega uporabniškega vmesnika so grafi pomembnih spremenljivk med simuliranim poskusom male izlivne nezgode, ki so prikazani na sliki 3. Grafi so bili izrisani neposredno iz SNAP z uporabo skriptov za risanje, ki jih lahko napišemo za hitro risanje s pomočjo računalniškega programa AptPlot, namenjenega za risanje grafov.



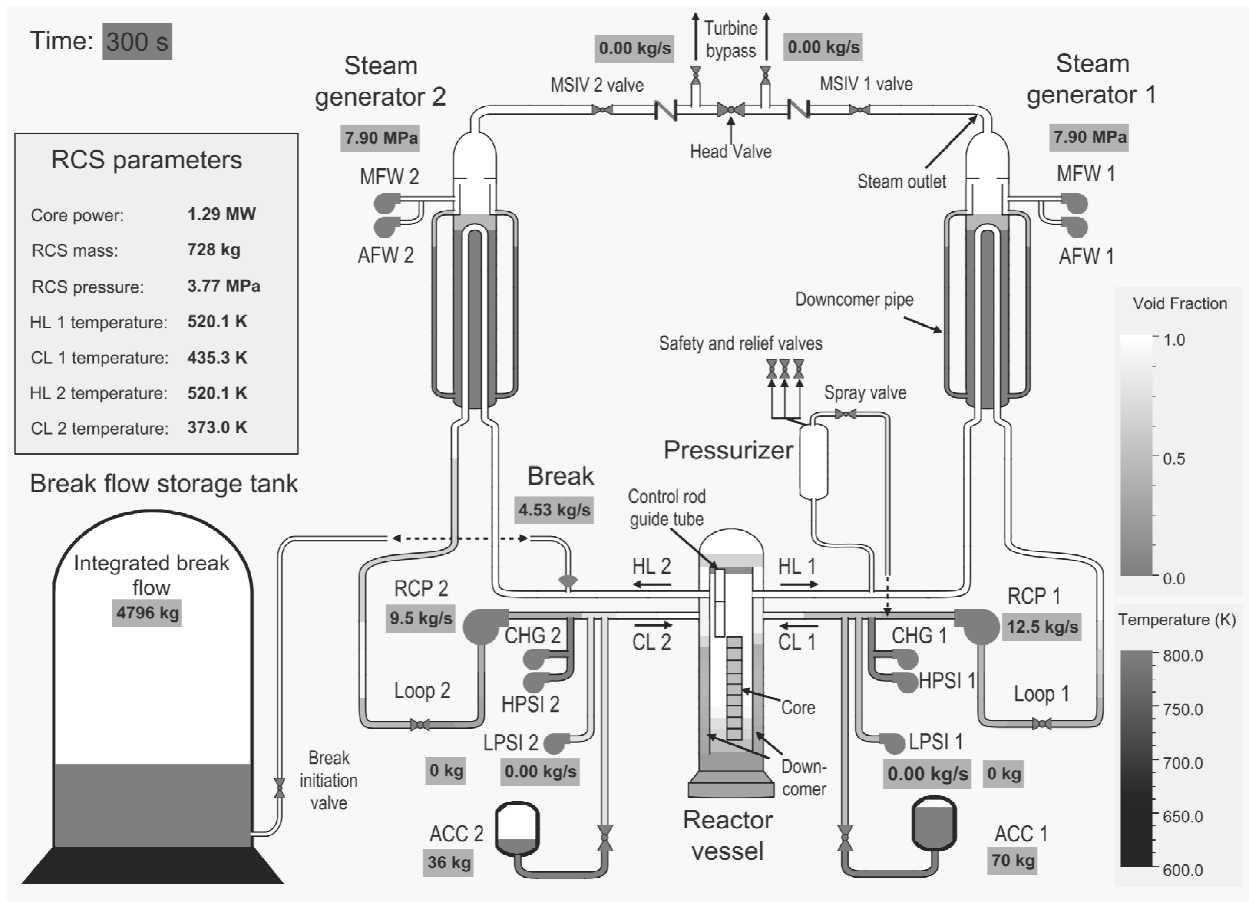
Slika 2: Regulator reaktorske črpalke za ustaljeno stanje

Slika 3 kaže tlak v tlačniku, ki narekuje potek prehodnega pojava. Do začetka varnostnega vbrizgavanja je tlak odvisen od iztoka skozi zlom. Zlom povzroči odkritje sredice (glej sliko 3(c)) in segrevanje sredice (glej sliko 3(b)). Integrirana masa pretoka skozi zlom je prikazana na sliki 3(d). Iz teh grafov analitik lahko dobi splošno sliko o prehodnem pojavu. Predstavitev fizikalnih pojavov in procesov se lahko izboljša z uporabo animacijskih mask in filmov (zaporedje animacijskih mask). Na sliki 4 je prikazana splošna maska eksperimentalne naprave ROSA/LSTF ob času 300 s. Sta dve barvni lestvici, ena za delež praznin in druga za temperaturo goriva. Pri barvni lestvici za delež praznin modra barva pomeni kapljevino in bela pomeni plin. Glede na sliko 3 je sredica ob času 300 s najbolj odkrita. Glede na barvno lestvico deleža praznin se lahko vidi, da se v primarnem sistemu ob času 300 s kapljevina nahaja pretežno v sredici in en del v sifonu. Več kot 80 % mase reaktorskega hladilnega

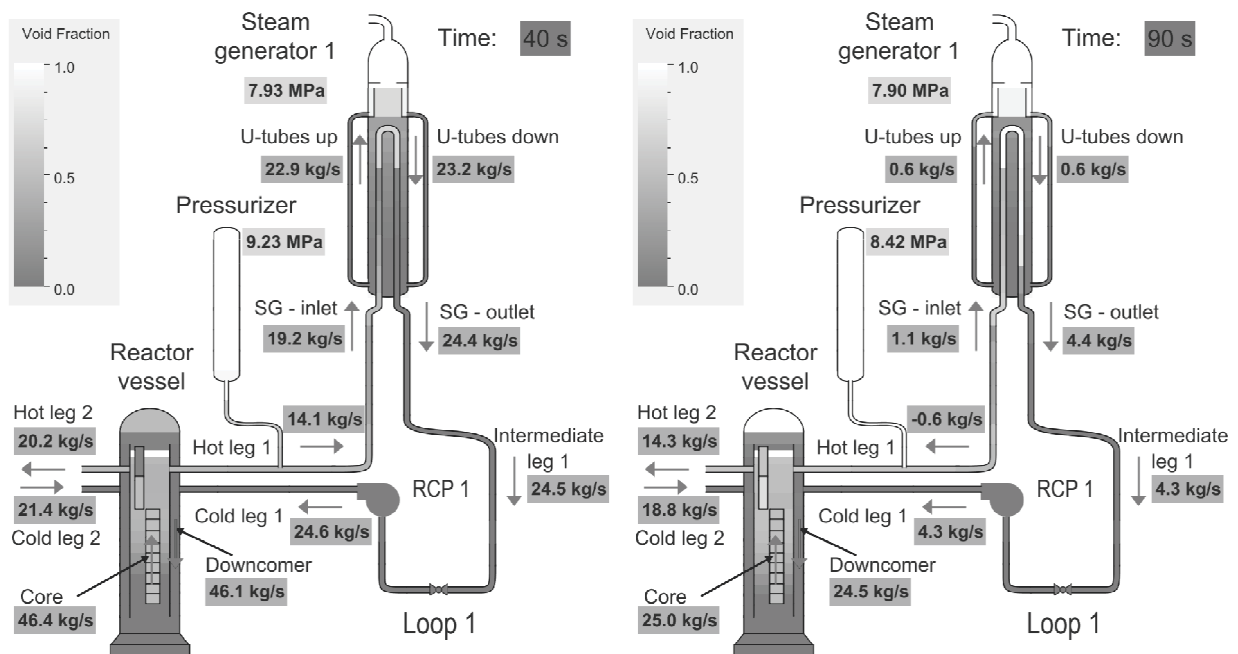
sistema (začetna masa 5418 kg) je izteklo skozi zlom, medtem ko so akumulatorji komaj začeli vbrizgavati (106 kg hladila vbrizgano; skupaj akumulatorja vsebujeta 1944 kg hladila). Tlak v reaktorskem hladilnem sistemu je za zdaj še tako visok, da sistem za nizkotlačno varnostno vbrizgavanje (LPSI) še ne more vbrizgavati. Vidi se tudi, da so vse črpalke zaustavljene, da se je ustvaril sifon (pojav vodnega čepa) na obeh sifonih hkrati, kar povzroči veliko odkritje sredice. Ko se sifon sprazni, voda, ki se nahaja v povratnem kanalu reaktorske posode, hitro poplavi sredico. Čeprav je skozi zlom izteklo veliko hladila, je prišlo le do manjšega segrevanja goriva, kot se lahko vidi iz slike 3(b). Iz slike 4 se tudi vidi, da je bila iz akumulatorja št. 1 vbrizgana večja količina hladila. Vzrok je v tem, da je po specifikacijah poskusa vbrizgavanje iz akumulatorja št. 1 približno trikrat večje od vbrizgavanja iz akumulatorja št. 2.



Slika 3: Pomembne spremenljivke med simuliranim poskusom male izlivne nezdode



Slika 4: Splošna animacijska maska naprave ROSA/LSTF ob času 300 s



Slika 5: (a) Enofazni naravni obtok (levo) in (b) povratna kondenzacija (desno)

Končno slika 5 prikazuje enofazni naravni obtok in povratno kondenzacijo v zanki št. 1. Enofazni naravni obtok povzroči prenos toplote iz sredice na uparjalnike.

Ko tlak reaktorskega hladilnega sistema pade na vrednost, ki je le nekoliko višja od sekundarnega tlaka, se začne tekočina na vrhu U-cevi uparjalnika hitro

uparjati. To hitro uparjanje na vrhu U-cevi uparjalnika prekine enofazni naravni obtok in povzroči padec nivoja vode na hladni strani uparjalnika (glej sliko 5(b)), da bi se ohranilo tlačno ravnovesje. Para, ki se tvori v sredici, se dviga prek vroče veje v U-cevi uparjalnika, kjer kondenzira in pada prek vročih vej nazaj v reaktorsko posodo.

Smer puščice v vroči veji na sliki 5(b) kaže, da je skupni masni tok negativen in da je tok pare skozi U-cevi majhen. Nekoliko večji je masni tok na izhodu iz uparjalnika, kar pomeni, da se uparjalnik počasi prazni. V poznejši fazi, ko tlak upade tako, da se iztok skozi zlom in varnostno vbrizgavanje izenačita in če zlom ni prevelik, se začne reaktorski hladilni sistem ponovno polniti. V nasprotnem primeru je reaktorski hladilni sistem napolnjen do višine zloma, pri tem pa je sredica popolnoma pokrita z vodo.

Poleg prikazanih mask se za animacijo lahko uporabi tudi osnovna diskretizacija, prikazana na sliki 1. Animiramo lahko tudi vso logiko in regulacijske sisteme, ki so v vhodnem modelu. Regulator za črpalko, prikazan na sliki 2, je že tak primer. Vse te maske lahko uporabimo med samim izračunom, lahko predvajamo shranjene podatke in ustvarimo posebne filme. Tako lahko zelo učinkovito pokažemo fizikalno obnašanje med izračunom. Tako prikazani rezultati so zelo uporabni za širšo javnost, ki ji ni povsem poznana tehnologija jedrskih naprav, in se lahko uporabi kot učno orodje za ljudi, ki delajo na jedrskem področju. Navsezadnje je tak grafični uporabniški vmesnik zelo prikladno orodje za učenje novih uporabnikov računalniških programov za varnostne analize.

4 SKLEPI

Razvit je bil animacijski model SNAP eksperimentalne naprave ROSA/LSTF za prikaz fizikalnih pojavov in procesov. Izvorni podatki, potrebni za animacijo, so bili dobljeni z računalniškim programom RELAP5/MOD3.3 Patch 04. Simuliran je bil scenarij hipotetične male izlivne nezgode v vroči veji na integralni eksperimentalni napravi ROSA/LSTF. Razvite so bile različne animacijske maske, vključno s splošno masko naprave. Te maske so bile uporabljene dodatno k grafom, da bi popisali dogajanje med izračunanim scenarijem. Povzamemo lahko, da razvite animacijske maske znatno pomagajo pri analizi in da se rezultati analiz lahko predstavijo širši javnosti na preprost in razumljiv način. Širjenje rezultatov v taki obliki lahko pripomore k izobraževanju splošne javnosti o hipotetičnih jedrskih nezgodah in njihovih blažilnih ukrepih.

ZAHVALE

Avtor se za financiranje zahvaljuje Jedrski elektrarni Krško in Upravi Republike Slovenije za jedrsko varnost (za financiranje v okviru raziskovalnega programa CAMP, številka projekta POG-3473) in Javni agenciji

za raziskovalno dejavnost Slovenije (programska skupina P2-0026).

5 LITERATURA

- [1] D. M. Snider, K. L. Wagner, W. H. Grush, K. R. Jones, Nuclear Plant Analyzer, U.S. NRC report, NUREG/CR-6291, 1997, Idaho National Engineering Laboratory, INEL-94/0123.
- [2] F. Eltawila, Thermal-Hydraulics Research Plan, Proceedings of The Code Applications and Maintenance Program, Santa Fe, NM, USA, 1996.
- [3] K.K. Murata et al., Code Manual for CONTAIN 2.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Containment Analysis, NUREG/CR-65, SAND97-1735, Sandia National Laboratories, USA, 1997.
- [4] U.S. NRC, RELAP5/MOD3.3 code manual, Vols. 1 to 8, U.S. NRC report, NUREG/CR-5535/Rev P4, 2010.
- [5] U. S. Nuclear Regulatory Commission, TRACE V5.0p2 User's Manual, Division of Risk Assessment and Special Projects, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC, 2010.
- [6] B. Mavko, A. Prošek, Users Guide and Description of Demo version of NEK Analyzer, IJS Report IJS-DP-7130, Jožef Stefan Institute, 1995.
- [7] I. Parzer, Possibilities for animation of severe accident phenomena by NPA, Proc. of 4th Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe, Bled, Slovenia, 7–10 September 1997, pp. 37–42.
- [8] L. Cizelj, B. Končar, B. and M. Leskovar, Vulnerability of a partially flooded PWR reactor cavity to a steam explosion, *Nucl. Eng. Des.*, 2006, Vol. 236, pp. 1617–1627.
- [9] Leskovar, M. and Uršič, M., Estimation of ex-vessel steam explosion pressure loads, *Nucl. Eng. Des.*, 2009, Vol. 239(11), pp. 2444–2458.
- [10] A. Prošek, B. Mavko, Animation model of Krško nuclear power plant for RELAP5 calculations, *Nucl. Eng. Des.*, 2011, Vol. 241, pp. 1034–1046.
- [11] M. Čepin, A. Prošek, Contribution of human reliability analysis to the results of probabilistic safety assessment of the nuclear power plant, *Electrotechnical Review*, 2009, Vol. 76(3), pp. 139–144. Available: <http://ev.fe.uni-lj.si/3-2009/Cepin.pdf>.
- [12] A. Prošek, M. Leskovar, Extensions of the fast Fourier transform based method for quantitative assessment of code calculations, *Electrotechnical Review*, 2009, Vol. 76(5), pp. 251–256. Available: <http://ev.fe.uni-lj.si/5-2009/Prosek.pdf>.
- [13] I. Kljenak, B. Mavko, Simulation of containment thermal-hydraulics in the Marviken Blowdown 16 experiment with ASTEC and CONTAIN codes, *Nucl. Eng. Des.*, 2011, Vol. 241(4), pp. 1063–1070.
- [14] APT, Symbolic Nuclear Analysis Package (SNAP), User's Manual, Applied Programming Technology (APT), Inc., 2007.
- [15] ROSA-IV group, ROSA-IV Large Scale Test Facility (LSTF) System Description, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) report 84–237, January 1985.
- [16] Y. Kukita et al. (22 co-authors), Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI): Data Report for ROSA-IV LSTF 10% Hot Leg Break Experiment Run SB-HL-02, Report JAERI-M 90-039, 1990.

Andrej Prošek je leta 1987 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Istega leta se je zaposlil na Institutu »Jožef Stefan« (IJS), Odsek za reaktorsko tehniko in začel podiplomsko izobraževanje. Na Fakulteti za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani je magistriral in doktoriral s področja jedrske tehnike leta 1992 oz. leta 1999. Trenutno je višji znanstveni sodelavec na IJS. Njegove raziskave vključujejo jedrsko varnost, termohidravlične varnostne analize, ocenjevanje negotovosti in ocenjevanje natančnosti termohidravličnih računalniških programov.