

UDK 621.039.5

Določanje mej varnosti sredice tlačnovodnega reaktorja

VENCESLAV KOSTADINOV – BORUT MAVKO

0. UVOD

Zaradi varnosti obratovanja je moč sredice reaktorja vsakega jedrskega objekta bolj omejena s toplotnimi kakor z jedrskimi lastnostmi. Toplotne omejitve moči sredice hkrati pomembno vplivajo na ekonomiko pridobivanja energije iz reaktorja. Z vidika varnega obratovanja je zato treba oceniti razpoložljivo toplotno rezervo elektrarne. Da bi določili dovoljeno področje varnega obratovanja in s tem tudi obratovalno rezervo elektrarne ob projektu, je treba izračunati meje varnosti izbrane sredice.

V članku so predstavljene raziskave določanja mej varnosti sredice tlačnovodnega reaktorja. Raziskave so bile opravljene za jedrsko elektrarno Krško (JEK) s svetovno prizanim računalniškim programom COBRA-IV-1 [1] in doma razvitim programom LIMITS. Izračunane meje varnosti sredice so temelj za določanje mejnih nastavitvev ključnih parametrov, pri katerih se aktivirajo varovalni sistemi, ki s svojim posredovanjem zagotavljajo varnost elektrarne.

1. OZNAČBE

A	— površina pretočnega prereza,
F	— padec tlaka zaradi prečnega toka,
F_{dH}	— radialni konični faktor moči,
h	— entalpija tekočine,
h^*	— entalpija, prenesena s prečnim tokom,
h_n	— entalpija nasičenja,
h_v	— vstopna entalpija,
$h_{1, HC}$	— entalpija na izstopu vročega kanala,
l	— širina podkanala,
\dot{m}	— hitrost masnega pretoka hladiva,
p	— tlak,
Q	— toplotna moč reaktorja,
\bar{q}	— dodana toplota na enoto dolžine kanala,
s	— razdalja med gorivnimi palicami,
t	— vremenska koordinata,
T_{OUT}	— izstopna temperatura hladiva,
T_{SAT}	— temperatura nasičenja hladiva,
u^*	— dejanska hitrost prečnega toka
W	— odklonjeni prečni tok med podkanali,
W'	— turbulentni prečni tok med podkanali,
x	— osna koordinata,
ρ	— gostota hladiva,
ψ	— Tongova korekcijska funkcija prenosa energije.

1.1 Kratice

KVP	— končno varnostno poročilo,
DNB	— kriza vrenja (kritični toplotni tok),
DNBR	— minimalno razmerje krize vrenja,
NEK	— jedrska elektrarna Krško,
OP	— delež obvodnega pretoka,
$OP\Delta T$	— nastavitvena vrednost zasilne zaustavitve, reaktorja glede na prekoračitev moči,
$OT\Delta T$	— nastavitvena vrednost zasilne zaustavitve reaktorja glede na prekoračitev temperature,
<u>W</u>	— Westinghouse.

1.2 Indeksi

f, g	— stanje nasičenja vode in pare,
i, j	— označbe podkanalov,
HC	— vroči podkanal.

2. MEJE VARNOSTI SREDICE TLAČNOVODNEGA REAKTORJA

Celovitost goriva je ena od najpomembnejših osnovnih varnostnih in ekonomskih predpostavk. Da je ta zahteva lahko z veliko verjetnostjo izpolnjena, mora projekt sredice upoštevati in zadovoljiti vse fizikalne in zakonske omejitve, ki jih lahko poimenujemo kar »projektne osnove«.

Splošna načela, ki zagotavljajo varnost sredice v obratovalnih stanjih elektrarne, je mogoče združiti in povzeti z naslednjimi zahtevami:

1. Najvišja temperatura goriva v osi gorivnega elementa mora biti manjša od predpisane vrednosti (2590 °C).

2. Razmerje do krize vrenja nikjer v sredici ne sme biti manjše od 1,3.

3. Zagotovljen mora biti vnaprej določen pretok hladiva skozi sredico.

4. Razmere v primarnem krogu morajo biti hidrodinamsko stabilne.

Ker je naš cilj določiti meje varnosti s toplotnega vidika, se s hidravličnimi zahtevami ne bomo posebej ukvarjali, privzeli bomo rezultate drugih analiz.

Z odvajanjem toplote, ki se sprošča v sredici, sta neposredno povezani prvi dve zahtevi. S toplotnega vidika varujeta celovitost goriva ter s tem prve od treh pregrad, ki preprečujejo, da bi se radioaktivne snovi sproščale v okolje.

Najvišjo dovoljeno temperaturo goriva, med obratovanjem na moči ali med obratovalnimi prehodnimi pojavi, v osnovi definira temperatura tališča UO_2 . S statistično obdelavo eksperimentalnih rezultatov in z upoštevanjem sprememb zaradi izgorelosti goriva je bila konzervativno izbrana temperatura tališča 4700 F (2590 °C) kot projektna osnova za gorivni element. Pod to temperaturo v gorivu ne pride do taljenja, ki bi povzročilo večje spremembe gostote ali fazne prehode. Ohranjena je geometrična oblika in s tem preprečen oz. onemogočen negativen mehanski vpliv goriva na srajčko.

Projektna osnova, s katero je definirano najmanjše razmerje do krize vrenja (DNBR – Departure from Nucleate Boiling Ratio) ob upoštevanju različnih negotovosti, zagotavlja, da med normalnim obratovanjem in obratovalnimi prehodnimi pojavi, z veliko verjetnostjo lahko napovemo, da bo režim odvajanja toplote tak, da ne bo prišlo do prežiga srajčke gorivnega elementa.

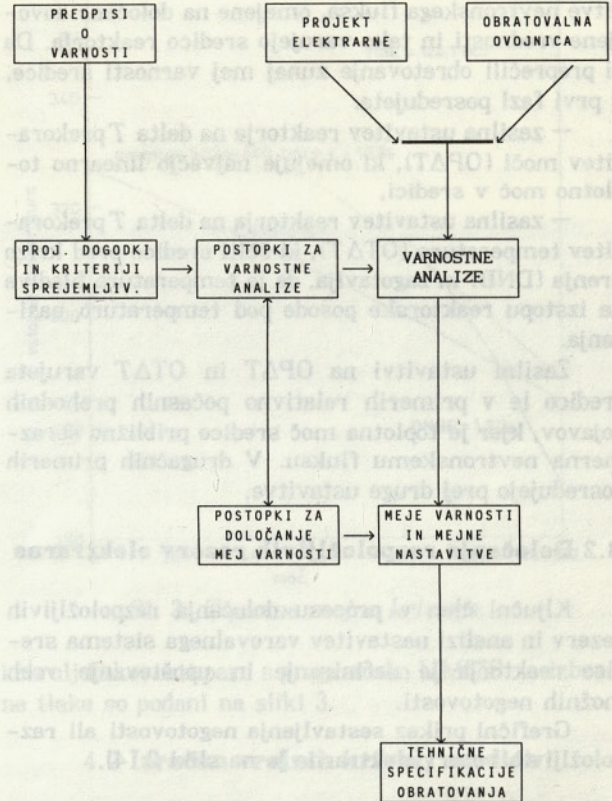
Pri preverjanju izpolnjevanja pogoja: $DNBR > 1,3$ je treba analizirati razmere v sredici med normalnim obratovanjem, obratovalnimi prehodnimi pojavi (zagon, ustavitev, spreminjanje moči) in med prehodnimi pojavi, ki jih lahko povzročijo zmerno pogoste okvare [3]. Tako določimo področje z definiranimi mejami varnega obratovanja v prostoru: toplotna moč, temperatura hladilne vode in tlak v sistemu, pri čemer privzamemo referenčno razporeditev moči v sredici. Veljavnost korelacije, ki jo za popis prestopa toplote uporablja program, je treba potrditi z analizo razmer v reaktorju, ko temperatura hladiva na izstopu iz sredice doseže temperaturo nasičenja. Vrenje hladiva na izstopu iz reaktorja je omejitvev, pomembna in potrebna pri določanju nastavitve varovalnega sistema.

3. MEJNE NASTAVITVE VAROVALNIH SISTEMOV

Mejne nastavitve varovalnih sistemov so vrednosti izbranih ključnih merjenih procesnih spremenljivk, pri katerih varovalni sistem avtomatično ali operater ročno sproži hitro ustavitev reaktorja in delovanje ustreznih varnostnih sistemov. Tako mejne nastavitve varovalnega sistema zagotavljajo, da bo reaktor zanesljivo obratoval le v področju, ki ga omejujejo in dovoljujejo varnostne meje sredice.

V jedrskih elektrarnah, kakršna je obravnavana, varovalni sistem nadzoruje najpogosteje okrog deset procesnih spremenljivk, ki so omejene navzgor ali navzdol z mejnimi vrednostmi, določenimi po opravljenih varnostnih analizah. Večina mejnih vrednosti so konstante, izjema sta dva parametra, ker ju ni mogoče neposredno meriti. To sta tako imenovani: zasilna ustavitev na delta T prekoračitve moči in zasilna ustavitev na delta T prekoračitve temperature.

Postopek določanja mej varnosti sredice in mejnih nastavitve varovalnega sistema shematično prikazuje slika 1.



Sl. 1. Poenostavljen diagram preverjanja in zagotavljanja varnosti elektrarne.

Osnovni predpisi o jedrski varnosti definirajo splošna načela za projektiranje in kriterije sprejemljivosti predlaganih projektnih rešitev. Določajo tudi vrsto stanj ali dogodkov, razdeljenih po verjetnosti pojava in resnosti možnih posledic, za katere je treba z varnostno analizo pokazati, da v takih stanjih elektrarna ne bo ogrožala varnosti okolja. Spekter pokriva vsa normalna obratovalna stanja ter sega do hipotetičnih nezgod z zelo majhno teoretično verjetnostjo, da bi do njih prišlo.

Tako preverjanje projekta in določanje ovojnice procesnih parametrov hkrati definira meje oz. področje varnega obratovanja. Zagotovilo za to, da bodo vsi ključni parametri ostali v mejah dovoljenega, pa dajejo varovalni sistemi z ustreznimi mejnimi nastavitvami.

Meje varnosti in mejne nastavitve varovalnega sistema, po predpisih, postanejo sestavni del dokumenta: Tehnične specifikacije, ki z vidika jedrske varnosti administrativno ureja dovoljene načine obratovanja.

3.1 Mejni nastavitvi delta T prekoračitve moči in temperature

Projektne osnove terjajo, da so bistvene procesne spremenljivke, med katerimi so: toplotna moč sredice, temperatura in tlak hladiva, pretok ter razpore-

ditve nevtronskega fluksa, omejene na določene dovoljene vrednosti in tako varujejo sredico reaktorja. Da bi preprečili obratovanje zunaj mej varnosti sredice, v prvi fazi posredujejo:

– zasilna ustavitev reaktorja na delta T prekoračitev moči (OPΔT), ki omejuje največjo linearno toplotno moč v sredici,

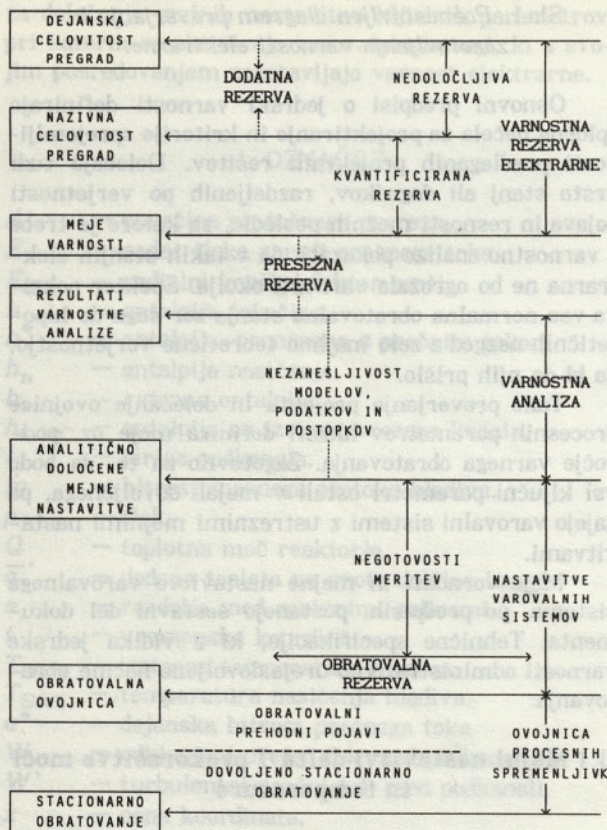
– zasilna ustavitev reaktorja na delta T prekoračitev temperature (OTΔT), ki ščiti sredico pred krizo vrenja (DNB) in zagotavlja, da je temperatura hladiva na izstopu reaktorske posode pod temperaturo nasičenja.

Zasilni ustavitvi na OPΔT in OTΔT varujeta sredico le v primerih relativno počasnih prehodnih pojavov, kjer je toplotna moč sredice približno sorazmerna nevtronskemu fluksu. V drugačnih primerih posredujejo prej druge ustavitve.

3.2 Določanje razpoložljivih rezerv elektrarne

Ključni člen v procesu določanja razpoložljivih rezerv in analizi nastavitve varovalnega sistema sredice reaktorja je definiranje in upoštevanje vseh možnih negotovosti.

Grafični prikaz sestavljanja negotovosti ali razpoložljivih rezerv elektrarne je na sliki 2 [4].



Sl. 2. Tipični prikaz sestavljanja rezerv in mejnih nastavitve varovalnega sistema elektrarne.

4. IZRAČUN PROJEKTHNIH TOPLLOTNIH OMEJITEV SREDICE

Področje varnega obratovanja sredice, ki leži v okviru mej varnosti, definirajo v odvisnosti od moči naslednje krivulje:

– krivulja razmerja do krize vrenja: DNBR = 1,3,

– vrelna krivulja: $T_{OUT} = T_{SAT}$,

– krivulja kakovosti pare vročega kanala = +15%.

Omejitve so odvisne od sistemskega tlaka in temperature hladiva ter toplotne moči sredice.

4.1 Osnovne vhodne predpostavke in izračun mejnih krivulj krize vrenja

Krivulje dovoljenega razmerja do krize vrenja smo izračunali z računalniškim programom COBRA-IV-1 v skladu s splošnimi priporočili. COBRA-IV-1 je program za podkanalno termohidravlično analizo reaktorjev. Temelji na ohranitvenih enačbah mase, energije in gibalne količine za vsak posamezni podkanal. V postavljenem modelu dveh sosednjih podkanalov i in j veljajo tri osnovne enačbe.

Enačba o ohranitvi mase:

$$A_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i}{\partial x} = -W_{ij} \quad (1),$$

kjer desna stran enačbe podaja hitrost spremembe podkanalnega pretoka zaradi odklonjenega prečnega toka na enoto dolžine. Časovni odvod gostote podaja komponento spremembe pretoka zaradi širjenja ali krčenja tekočine.

Enačba o ohranitvi energije

$$A_i \left[\rho_i - h_{fg} \frac{\partial \psi}{\partial h} \right] \frac{\partial h_i}{\partial t} + m_i \frac{\partial h_i}{\partial x} = \bar{q}_i' - (h_i - h_j) W_{ij}' + [h_i - h^*] W_{ij} \quad (2),$$

kjer izrazi na levi strani enačbe pomenijo celotno spremembo toplotnega toka na enoto dolžine podkanala i . Prvi člen na desni strani enačbe podaja hitrost prenosa toplote s površine srajčke na enoto višine hladiva v podkanalu. Drugi člen upošteva hitrost prenosa toplote med sosednjima podkanaloma s turbulentnim mešanjem, tretji člen pa pomeni toplotni tok, prenesen z odklonjenim prečnim tokom med podkanali.

Enačba prečne gibalne količine:

$$\frac{\partial W_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial [u^* W_{ij}]}{\partial x} = \frac{s}{J} (p_i - p_j) - F_{ij} \quad (3),$$

kjer izraza na levi strani podajata časovni in prostorni pospešek odklonjenega prečnega toka, členu na desni strani pa tlačne izgube zaradi odklonjenega prečnega toka.

Osnovne predpostavke, uporabljene pri določanju vstopnih podatkov za izračun krivulj krize vrenja sredice, so:

- referenčna osna porazdelitev moči brez osnega zmika z največjo normalizirano vrednostjo 1,55,
- od moči odvisen radialni konični faktor s projektno vrednostjo 1,55,
- projektna vrednost pretoka,
- največji predpostavljene obvodni pretok,
- konzervativno zmanjšan pretok v gorivnem elementu, ki vsebuje vroči podkanal.

Z upoštevanjem referenčne osne porazdelitve moči ločimo vpliv temperature, tlaka in toplotne moči od vpliva porazdelitve nevtronske moči. Pri teh analizah je bil uporabljen že z drugimi raziskavami preverjen geometrijski model sredice [6].

Izračuni pokrivajo tlačno področje od 124 do 165 bar. Za izbrane tlake v tem področju je treba, v odvisnosti od moči, za področje od 80 do 120 odstotkov imenske moči izračunati:

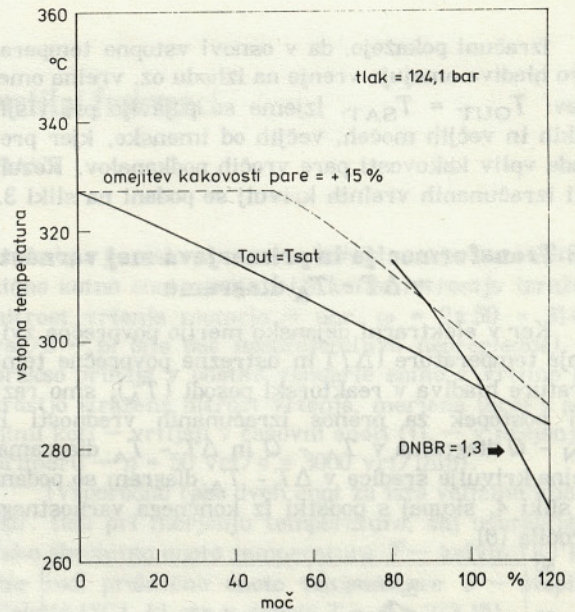
1. najvišjo vstopno temperaturo hladiva, pri kateri nikjer v sredici ni preseženo dovoljeno razmerje krize vrenja,

2. najvišjo vstopno temperaturo hladiva, pri kateri je še zagotovljena dovoljena kakovost pare na izstopu vročih podkanalov.

Temeljna pogoja za določanje dovoljenih vstopnih temperatur sta DNBR = 1,3 ali kakovost pare = + 15 odstotkov. Omejitev vstopne temperature s kakovostjo pare v vročih podkanalih je potrebna zaradi omejene veljavnosti empirične W-3, R-Grid korelacije, ki da natančne vrednosti kritičnega toplotnega toka le v področju od - 15 do + 15 odstotkov kakovosti pare kjerkoli po višini podkanala.

Raziskave so pokazale, da je v bližini imenske moči osnovna omejitev: dovoljeno razmerje krize vrenja. Le v področju, kjer je moč manjša od imenske in pri tlakih, nižjih od imenskega, lahko postane omejujoč faktor kakovost pare. Primer izračunane krivulje krize vrenja, za tlak 124 bar, je podan na sliki 3.

Rezultati programa LIMITS so pokazali zelo dobro ujemanje z rezultati programa COBRA-IV-I v primeru, da je kakovost na izstopu vročega podkanala + 15 odstotkov. Dobljene vrednosti so rahlo konzervativne, ker je LIMITS program za analizo samo enega, najbolj vročega podkanala. Ne upošteva zmanjšanja prirastka entalpije v vročem podkanalu zaradi ugodnega vpliva prečnega toka zavoljo mešanja med podkanali. Ne glede na to, primerjave med izračuni vstopnih temperatur z LIMITS in COBRA kažejo relativno razliko pod 1 odstotkom. S tem smo ovrednotili razviti program, ki ga lahko uporabljamo za preliminarno oceno vstopnih temperatur pri izračunu omejitvenih krivulj sredice. Rezultati posameznih izračunanih



Sl. 3. Toplotne mejne krivulje.

krivulj kakovosti pare s programom LIMITS za izbrane tlake so podani na sliki 3.

4.2 Izračun vrelnih krivulj sredice

Za izračun vrelnih krivulj in krivulj kakovosti pare varnostnih mej sredice smo razvili samostojen fortranski program LIMITS. Temelji na enačbah globalnega toplotnega ravnotežja v reaktorski posodi. Pri sestavljanju vhodnega modela smo upoštevali še zmanjšanje pretoka v vročem podkanalu in ustreznih faktor zvečanja entalpije. Uporabili smo ga za termohidravlično analizo razmer v sredici in razmer v najbolj vročem kanalu. Osnovni enačbi matematičnega modela v programu LIMITS sta:

Enačba toplotnega ravnovesja v reaktorski posodi:

$$h_n = h_v + \frac{Q}{\dot{m}} \quad (4)$$

Enačba prirastka entalpije v vročem podkanalu:

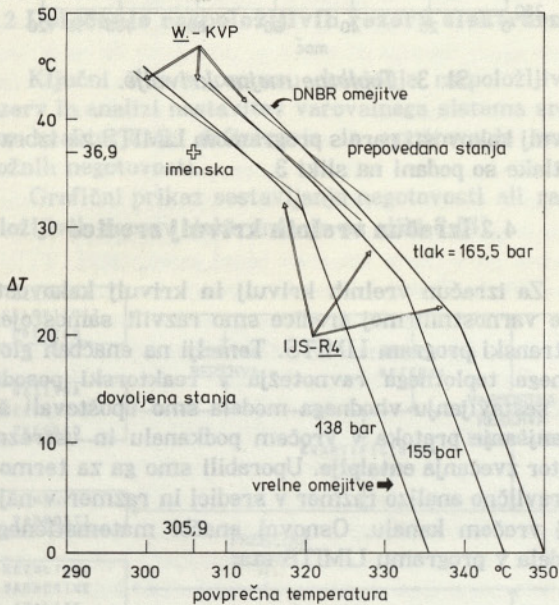
$$h_{i,HC} = h_v + \frac{Q F_{dH}}{\dot{m}(1-OP)} \quad (5)$$

S programom LIMITS smo vzporedno računali dovoljene temperature hladiva na vstopu v sredico, ob vrelni omejitvi $T_{OUT} = T_{SAT}$ in ob pogoju, da je kakovost pare na izstopu vročega podkanala enaka + 15 odstotkov. Podobno kakor pri izračunu krivulj krize vrenja smo vrelni krivulje računali za toplotne moči od 0 do 120 odstotkov imenske moči ter za izbrane tlake od 124,1 do 165,5 bar. Osnovni pogoj pri izračunu vrelnih krivulj je, da je entalpija na izstopu iz reaktorske posode enaka entalpiji nasičenja ob ustreznem tlaku.

Izračuni pokažejo, da v osnovi vstopno temperaturo hladiiva omejuje vrenje na izhodu oz. vrelna omejitev: $T_{OUT} = T_{SAT}$. Izjeme se pojavijo pri višjih tlakih in večjih močeh, večjih od imenske, kjer prevlada vpliv kakovosti pare vročih podkanalov. Rezultati izračunanih vrelnih krivulj so podani na sliki 3.

4.3 Transformacija in primerjava mej varnosti v $\Delta T - T_A$ diagramu

Ker v elektrarni dejansko merijo povprečna zvišanja temperature (ΔT) in ustrezne povprečne temperature hladiiva v reaktorski posodi (T_A), smo razvili postopek za prenos izračunanih vrednosti iz $T_{IN} - Q$ diagrama v $T_A - Q$ in $\Delta T - T_A$ diagrama. Mejne krivulje sredice v $\Delta T - T_A$ diagram so podane na sliki 4, skupaj s podatki iz končnega varnostnega poročila [8].

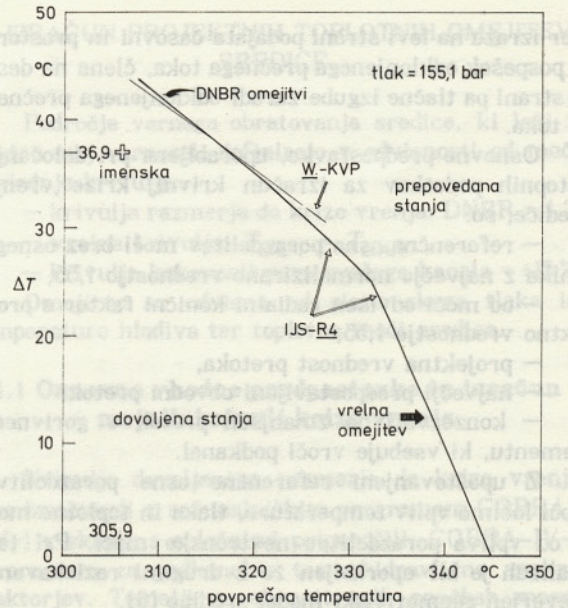


Sl. 4. Primerjava mejnih krivulj.

Primerjava rezultatov kaže dobro ujemanje v mejah pogreška 1 do 2 %, kar je pripisati različnemu programskemu orodju. Na sl. 5 je podana primerjava dobaviteljevih in naših referenčnih toplotnih omejitvenih krivulj pri obratovalnem tlaku elektrarne. S slike lahko določimo razpoložljivo rezervo do krize vrenja pri imenskem obratovanju. To je razdalja od imenske obratovalne točke do premice DNBR = 1,3. Brez upoštevanja različnih negotovosti in merilnih pogreškov je to dovoljeno področje za varno obratovanje elektrarne. Tako smo dobili izhodišče, da lahko, z upoštevanjem nenatančnosti in nezanesljivosti, v naslednjem koraku določimo nastvitve varovalnih sistemov.

5. SKLEP

Rezultati novejših raziskav in sodobni razvoj analitičnih orodij ponujajo možnosti za povečevanje obratovalne učinkovitosti jedrskih elektrarn. Da bi v



Sl. 5. Primerjava referenčnih krivulj.

prihodnje lahko samostojno izrabljali te možnosti, smo raziskali metode za natančno ocenjevanje razpoložljive rezerve. Samostojno smo določili meje varnosti, ki omejujejo področje, v katerem se smejo gibati najpomembnejši toplotni parametri sredice tlačnovodnega reaktroja, da so izpolnjene temeljne zahteve in kriteriji za varno obratovanje.

Meje varnosti sredice smo določili po splošni metodologiji [4] in jih utemeljili z ameriški varnostni načeli projektiranja. Za izračun sta bila uprabljena svetovno priznan program za analizo toplotnih razmer v sredici COBRA-IV-1 in lastni program LIMITS, ki omogoča analizo kakovosti pare na izstopu iz sredice.

LITERATURA

- [1] Wheeler, C.L. et al.: COBRA-IV-1: An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores. BNWL-1962, March 1976.
- [2] Rowe, D.S.: COBRA-III-C: A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermalhydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements. Battelle, Pacific Northwest Laboratories, March 1973.
- [3] Nuclear Safety Criteria for the Design of Stationary Pressurized Water Reactors. ANSI, N18.2, 1973.
- [4] The Reactor Analysis Support Package (RASP), Vol. 7: PWR Set Point Methodology. EPRI NP-4498, Sept. 1986.
- [5] The Reactor Analysis Support Package (RASP), Vol. 1: Introduction and Overview. EPRI NP-4498, April 1986.
- [6] Kostadinov, V.-Šarler, B.-Janežič, K.-Parzer, I.: Termohidravlični projektni model sredice NE Krško z računalskim programom COBRA-IV-1. IJS-DP-5081, Maj 1988.
- [7] Šarler, B.-Gregorič, M.-Kostadinov, V.: Izračun toplotnih omejitvenih krivulj sredice, temperatur in tlačne limite goriva za NE Krško. IJS-DP-5440, Maj 1989.
- [8], [9] Final Safety Analysis Report of Nuclear Power Plant Krško, Vol. 15, Vol. 4.

Naslov avtorjev: Venceslav Kostadinov, dipl. inž.
prof. dr. Borut Mavko, dipl. inž.
Institut Jožef Stefan,
Odsek za reaktorsko tehniko,
Jamova 39, Ljubljana