

Bojan Petrović, Dubravko Pevec^{*}, Tomislav Šmuc i Natko Urli
 Institut "Ruder Bošković", Zagreb
^{*}Elektrotehnički fakultet, Zagreb

PROBLEMI GOSPODARENJA GORIVOM U PRIJELAZNIM CIKLUSIMA NE KRŠKO

TRANSITION CYCLE FUEL MANAGEMENT PROBLEMS OF NPP KRŠKO

SADRŽAJ - Opisani su problemi gospodarenja gorivom u prijelaznim ciklusima. Prikazani su rezultati i iskustva u radu na izradi shema zamjene goriva za NE Krško. Poboljšan je model proračuna paketa programa PSU-LEOPARD/MCRAC i uspješno primjenjen za projektiranje preliminarne sheme zamjene goriva 8. ciklusa NE Krško.

ABSTRACT - Transition cycle fuel management problems are described and illustrated using results and experience attained during core reload designs of NPP Krško. Improved version of computer code package PSU-LEOPARD/MCRAC is successfully applied to NPP Krško loading pattern design.

1. UVOD

Ekonomske i tehničke pogodnosti gospodarenja gorivom uz primjenu shema zamjene goriva sa smanjenim bijegom neutrona ("low leakage loading pattern", L3P) iscrpno su opisane u literaturi [1,2]. U ovom radu istaknuti su problemi vezani za gospodarenje gorivom u jezgri reaktora NE Krško. Na osnovu vlastitih proračuna i rezultata, te usporedbom sa projektnim vrijednostima i pogonskim podacima stečena su iskustva potrebna prilikom izrade preliminaranih i konačnih shema zamjene goriva [3,4,5].

U prvom dijelu referata dan je kratki prikaz dosadašnjih ciklusa izgaranja goriva u NE Krško. Drugi dio bavi se faktorima koji utječu na proces gospodarenja gorivom u prijelaznim ciklusima, uz konkretne primjere na gospodarenju gorivom u NE Krško. Treći dio prikazuje poboljšanja našeg kompjuterskog modela i postupaka za izradu sheme zamjene goriva, te rezultate i usporedbu sa projektnim proračunima.

2. DOSADAŠNJI CIKLUSI IZGARANJA GORIVA U NE KRŠKO

Projekt prve jezgre NE Krško simulira "out-in" shemu zamjene goriva korištenjem tri različita obogaćenja svježeg goriva [6]. Drugi, treći i četvrti

ciklus predstavljali su prijelaz ka ravnotežnoj "out-in" shemi zamjene goriva. Međutim, nakon 4. ciklusa donesena je odluka o prelasku na naprednije L3P sheme zamjene goriva, radi bolje ekonomike.

Peti ciklus prvi je u nizu prijelaznih ciklusa prema ravnotežnim ciklusima koji koriste L3P sheme zamjene goriva. Smanjen je broj svježih gorivnih elemenata, uz povećano obogaćenje, a za kontrolu raspodjele snage korišteni su štapovi sa sagorivim apsorberom standardnog dizajna (BPR). U 7. ciklusu počinje se koristiti novi dizajn gorivnih elemenata (VANTAGE-5) [7,8], sa aksijalnim zonama prirodnog urana ("axial blankets"), povećanim dopustivim maksimalnim odgorom, i povećanim obogaćenjem, dok se u 8. ciklusu predviđa korištenje integralnih sagorivih apsorbera (IFBA), tj. tankog sloja cirkonijevog diborida nanesenog direktno na tablete s gorivom. Iz tablice se vidi da se još uvijek ne može govoriti o približavanju ravnotežnom ciklusu, prvenstveno zbog prijelaza na novi dizajn goriva. Kratak pregled osnovnih podataka o ciklusima izgaranja za NE Krško dan je u Tablici 1.

TABLICA 1. Osnovni podaci o dosadašnjim ciklusima izgaranja goriva u NE Krško

Ciklus	Broj svj. gorivnih elemenata	Broj i obogaćenje [w/o]	Korišteni sagorivi apsorberi	Duljina ciklusa [MWD/tU]	Primjedbe i komentari
1	121	41x2.11 40x2.64 40x3.10	512 BPR	13366	out-in
2	40	40x3.20	---	9553	out-in
3	40	40x3.40	---	10076	out-in
4	40	40x3.35	---	11745	out-in (shema IRB)
5	32	4x3.20 24x3.40 4x3.80	112 BPR	10693	L3P
6	40	20x3.80 20x3.40	112 BPR	11329	L3P
7	32	16x3.80 16x4.30	48 BPR	10650	# L3P
* 8	32	32x4.30	384 IFBA	11450	# L3P (shema IRB)

- predviđene duljine ciklusa
* - podaci se odnose na preliminarnu shemu zamjene goriva za 8. ciklus

3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA GOSPODARENJE GORIVOM U PRIJELAZNIM CIKLUSIMA

Gospodarenje gorivom u jezgri reaktora možemo podijeliti u nekoliko osnovnih faza:

- a) Preliminarno određivanje potrebnog broja svježih gorivnih elemenata i njihovog obogaćenja, za jedan ili više ciklusa unaprijed.
- b) Određivanje preliminarne sheme zamjene goriva.
- c) Provjera zadovoljavanja osnovnih sigurnosnih parametara jezgre, prijedlog konačne sheme zamjene goriva.
- d) Konačna sigurnosna evaluacija i prihvaćanje sheme zamjene goriva.

Kod projektiranja L3P shema zamjene goriva, na svaku od navedenih faza postavljaju se daleko oštriji zahtjevi nego u slučaju standardnih "out-in" shema zamjene goriva. Ovo je naročito izraženo u prijelaznim ciklusima. Budući da ova grupa autora intenzivno radi na prve tri faze, to ćemo razmotriti faktore koji utječu na projektiranje preliminarnih shema zamjene goriva.

Faktori koji određuju mogući projekt sheme zamjene goriva mijenjaju se u praksi od ciklusa do ciklusa i trebaju biti definirani prije nego započne proces određivanja sheme zamjene goriva. Na temelju naših rezultata i iskustava stečenih tokom projektiranja shema zamjene goriva za prijelazne cikluse NE Krško, analizirat ćemo osnovne faktore koji utječu na izradu sheme zamjene goriva:

- 1) Duljina ciklusa i terminski plan izrade shema zamjene goriva.
- 2) Utjecaj prethodnih i narednih ciklusa.
- 3) Utjecaj dizajna gorivnih elemenata.
- 4) Tehničke specifikacije.

3.1. Duljina ciklusa i terminski plan izrade shema zamjene goriva

Duljina ciklusa određuje se prema planiranom trajanju remonta i očekivanoj raspoloživosti elektrane. Važno je poznavati duljine nekoliko narednih ciklusa radi što bolje višeciklusne optimizacije.

NE Krško je do sada radilo u režimu jednogodišnjih ciklusa. Dugoročnim planom remonta predviđeno je trogodišnje izmjenjivanje dva duga (11450 MWD/tU) i jednog kratkog ciklusa (10650 MWD/tU). Na osnovu tog plana, preliminarno je određen broj svježih gorivnih elemenata i njihovo obogaćenje za takove ravnotežne cikluse, a isto tako i za prijelazne cikluse.

Značajna promjena duljine ciklusa u vrijeme kada je već izrađena preliminarne shema zamjene goriva i gorivo naručeno može izazvati velike poteškoće u projektiranju sheme za isti ciklus sa istim inventarom goriva. Isto tako značajna promjena duljine prethodnog ciklusa može stvoriti probleme u kontroli raspodjele snage sa postojećim inventarom goriva. Povoljno je što kasnije započinjati s projektiranjem sheme zamjene goriva, jer su tada bolje definirani početni uvjeti (točnije određeni odgori gorivnih elemenata na kraju

prethodnog ciklusa, te točnije procijenjena potrebna duljina ciklusa za koji se shema projektira).

Novi dizajn gorivnih elemenata (VANTAGE-5) sa integralnim sagorivim apsorberima, uvjetovao je potrebu za što ranijim poznavanjem shema zamjene goriva, jer se prilikom naručivanja goriva novog dizajna mora istovremeno specificirati točan broj štapova sa sagorivim apsorberom za pojedine gorivne elemente. To je u suprotnosti sa tendencijom što kasnijeg početka projektiranja sheme radi boljeg poznavanja početnih uvjeta.

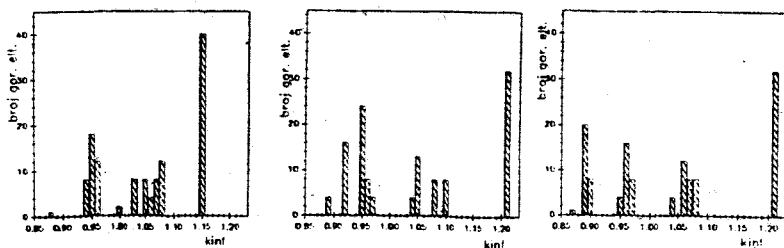
Zbog ove dvije suprotne tendencije potrebno je u prijelaznim ciklusima iterativno provjeravati i po potrebi modificirati shemu zamjene goriva koristeći uvijek nove polazne podatke, odnosno pretpostavke.

3.2. Utjecaj prethodnih i narednih ciklusa

U prijelaznim ciklusima nužno je voditi računa o efektima prethodnih ciklusa na shemu zamjene goriva, kao i o utjecaju na naredne cikluse. Spektar reaktivnosti gorivnih elemenata ovisi o tipu sheme zamjene goriva, pri čemu određenom tipu ravnotežnog ciklusa odgovara neki spektar reaktivnosti.

U prijelaznim ciklusima spektar reaktivnosti gorivnih elemenata se značajno mijenja i prelazi iz jednog ravnotežnog stanja u drugo. U slučaju NE Krško, razlozi za to su postepeno uvođenje gorivnih elemenata novog dizajna (VANTAGE-5), tj. višeg obogaćenja, višeg dozvoljenog otpusnog odgora (45000 MWd/tU u odnosu na 35000 MWd/tU za gorivo standardnog dizajna) i manji broj svježih gorivnih elemenata pri izmjeni. Zbog tako perturbiranog stanja potrebno je pažljivije analizirati efekt sheme zamjene goriva na slijedeće cikluse.

Za ilustraciju ovog problema poslužit će nam Slike 1.a do 1.c, koje prikazuju spektre reaktivnosti gorivnih elemenata na početku 4., 8., te ravnotežnog L3P ciklusa.



a) 4. ciklus

b) 8. ciklus

c) ravnotežni L3P ciklus

SLIKA 1. Spektar reaktivnosti gorivnih elemenata na početku ciklusa

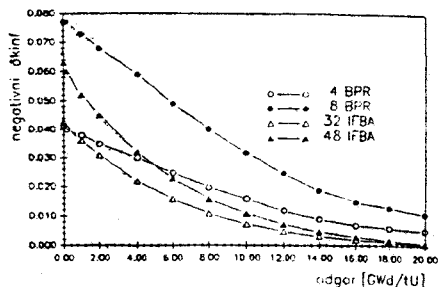
Razmotriimo spektar reaktivnosti na početku 8. ciklusa. Zbog većeg broja gorivnih elemenata standardnog dizajna žija je reaktivnost niska, a odgor visok, i zbog većih praznina u spektru, teško je izbalansirati raspodjelu snage u jezgri, tako da istovremeno odgor gorivnih elemenata krajem ciklusa ne prijede granične vrijednosti, i da raspodjela snage tokom ciklusa zadovoljava tehničke specifikacije.

Potrebno je, dakle, sheme zamjene goriva projektirati tako da spektar reaktivnosti goriva koje nakon ciklusa ostaje u reaktoru ostavlja što više slobodnog prostora za izradu sheme zamjene za idući ciklus.

3.3. Utjecaj dizajna gorivnih elemenata

Novi dizajn gorivnih elemenata u NE Krško (VANTAGE-5) ima prije svega osnovnu ekonomsku prednost pred standardnim dizajnom zbog značajno povećanog maksimalno dopustivog otpusnog odgora. No, u prijelaznim ciklusima, znatno više obogaćenje tih gorivnih elemenata od elemenata standardnog dizajna izaziva probleme zbog visokih vrijednosti vršnih faktora snage.

U 5., 6. i 7. ciklusu za kontrolu raspodjele snage korišteni su štapovi sa sagorivim apsorberima standardnog dizajna (BPR). Na Slici 2. prikazana je negativna reaktivnost koju unose sagorivi apsorberi standardnog (BPR) i novog dizajna (IFBA), u ovisnosti o odgoru gorivnog elementa. Uočava se da integralni sagorivi apsorberi (IFBA), zbog svoje karakteristike brzog izgaranja, nisu pogodni kada je potrebno lokalno održati smanjeni neutronske tok i gustoću snage tokom čitavog ciklusa.



SLIKA 2. Negativna reaktivnost sagorivih apsorbera (BPR i IFBA) u ovisnosti o izgaranju

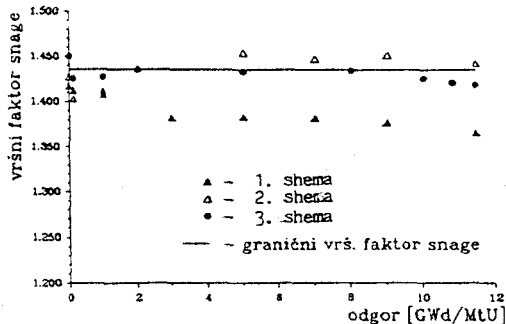
Pri izradi sheme zamjene za 8. ciklus, zbog većeg broja gorivnih elemenata višeg obogaćenja, te nepovoljnog spektra reaktivnosti inventara goriva, zahtjevi na kontrolu raspodjele snage u jezgri još su poštreni. Zbog toga, i pored uvođenja novog dizajna gorivnih elemenata potrebno je koristiti sagorive

apsorbere standardnog dizajna, ili kontrolu raspodjele snage riješiti premještanjem nekih svježih gorivnih elemenata na periferiju jezgre, ili primijeniti neko drugo nestandardno rješenje (npr., "displacer rods").

Kao primjer, prezentiramo neke karakteristike tri različite preliminarne sheme zamjene goriva za 8. ciklus NE Krško [9]. Sve tri koriste 32 svježa gorivna elementa, a razlike među shemama su sljedeće:

- kod prve sheme je radi smanjivanja vršnog faktora gustoće snage grupa od 4 svježa gorivna elementa smještena na periferiji jezgre i time je ujedno bijeg neutrona nešto povećan;
- druga shema je L3P shema, kod koje su korišteni samo IFBA sagorivi apsorberi;
- treća shema je L3P shema koja koristi i IFBA i BPR.

Na Slici 3. usporedene su vrijednosti vršnih faktora snage za svako od tih rješenja.



SLIKA 3. Vrijednost vršnih faktora gustoće snage u ovisnosti o izgaranju za tri preliminarne sheme zamjene goriva, 8. ciklus NE Krško

3.4. Tehničke specifikacije

Sheme zamjene goriva moraju biti projektirane u skladu s tehničkim specifikacijama. Prilikom izrade preliminarne sheme zamjene goriva, potrebno je da vršni faktor snage, sigurnosna margina ("shutdown margin") i moderatorski temperaturni koeficijent (MTC), budu tokom ciklusa unutar intervala vrijednosti određenih tehničkim specifikacijama.

Zbog relativno visoke prosječne linearne snage reaktora NE Krško, dozvoljeni vršni faktor snage određen tehničkim specifikacijama je relativno nizak, te je određivanje L3P shema zamjene goriva znatno otežano. Ostale veličine ograničene tehničkim specifikacijama ne predstavljaju problem koji bi bio posebno izražen u projektiranju L3P shema zamjene goriva za jednogodišnje cikluse.

4. POBOLJŠANJA PROCESA PROJEKTIRANJA SCHEME ZAMJENE GORIVA PAKETOM PROGRAMA PSU-LEOPARD/MCRAC

Analiza faktora koji utječu na proces gospodarenja gorivom u jezgri reaktora, ukazuje na potrebu za povećanom efikasnošću paketa programa kojim se određuju sheme zamjene goriva. Stoga su u paketu programa PSU-LEOPARD/MCRAC [3,5] napravljena slijedeća poboljšanja koja su povećala njegovu efikasnost i točnost.

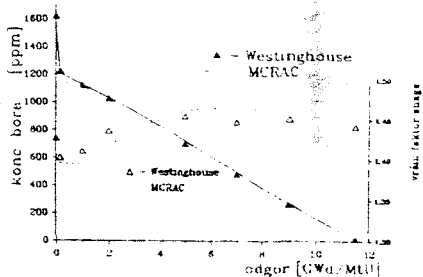
- 1) Automatizacija procesa generiranja grupnih konstanti [9].
- 2) Predikcija vršnog faktora snage praćenjem odgora na nivou četvrtine gorivnog elementa, te uvođenjem superpozicionog faktora heterogenosti strukture gorivnog elementa [9,10].
- 3) Modeliranje novog dizajna gorivnih elemenata (VANTAGE-5) i sagorivih apsorbera [11,12,13].

Ova poboljšanja korištena su pri projektiranju preliminarne sheme zamjene goriva za 8. ciklus NE Krško [9]. Usporedbe naših i Westinghouse-ovih rezultata prikazane su na Slikama 4. i 5.

-0.3	+4.4	-0.1	+2.6	-1.9	-0.9	-7.5
-0.7	+6.7	0.0	-1.2	+0.8	-1.8	-2.6
-2.3	+0.2	-0.4	+3.8	-0.1	+0.8	-1.9
+4.6	+1.8	+2.7	-1.3	-2.2	-0.9	-0.9
+6.7	0.0	+1.8	-0.8	-0.5	-1.3	-0.5
+0.2	-0.3	+0.1	-0.2	-0.4	+0.5	-0.2
-0.2	+4.8	-0.5	+0.9	-2.2	+0.9	
-0.4	+1.7	-2.1	-2.1	-0.5	-1.7	
-0.4	+0.1	-0.1	-0.6	-0.4	+2.6	
+2.6	-1.3	+0.8	-2.2	-0.7	+2.5	
-1.3	-1.0	+2.3	-2.9	-1.2	+4.3	
+3.9	-0.3	-0.6	-0.9	-0.1	+0.3	
-1.9	-2.1	-2.4	-0.8	+2.7		
+0.1	+0.1	-0.8	-1.4	+5.0		
0.0	-0.4	-0.4	+0.1	+1.9		
-0.9	-0.9	+0.9	+2.5			
-1.8	-1.1	-1.7	+4.2			
+0.7	+0.5	+2.5	+0.2			
-7.3	-0.7					
-2.5	-0.4					
-1.9	-0.2					

NP(%)	BOC
NPm(%)	BOC
BU(%)	EOC

SLIKA 4. Usporedba prosječnih i vršnih gustoća snaga na početku i odgora na kraju 8. ciklusa NE Krško



SLIKA 5. Usporedba kritičnih koncentracija bora i vršnih faktora snage, 8. ciklus NE Krško

5. ZAKLJUČAK

Zbog smanjenog slobodnog prostora pri određivanju L3P shema zamjene goriva, gospodarenje gorivom u prijelaznim ciklusima otežano je u usporedbi sa

standardnim "out-in" shemama zamjene. Smanjeni slobodni prostor posljedica je pomaka vršnog faktora snage prema graničnoj vrijednosti određenoj tehničkim specifikacijama, nepovoljnog spektra reaktivnosti gorivnih elemenata i nužnosti sagledavanja efekata na naredne cikluse. Analiza faktora koji utječu na projektiranje shema zamjene prijelaznih ciklusa i vlastito iskustvo u projektiranju shema za NE Krško ukazalo je na potrebu za poboljšanjem modela proračuna paketa programa PSU-LEOPARD/MCRAC. Paket programa je poboljšani i verificiran, te se uspješno primjenjuje pri projektiranju L3P shema zamjene goriva NE Krško.

LITERATURA.

- [1] R. L. Crowther and A. P. Reese, "LWR Innovative Core Loading Strategies", Proc. Topical Meeting on Advances in Fuel Management, Pinehurst, NC, USA, 45, (1985).
- [2] M. Jurčević, B. Petrović, D. Pevec, T. Šmuc i N. Urli, "Poboljšanje iskorištenja goriva u jezgri lakovodnog reaktora", Zbornik radova simpozija Tehnologija, ekonomika i ekologija nuklearnih elektrana, Opatija, 235, (1987).
- [3] B. Petrović, D. Pevec i N. Urli, "Određivanje razmještaja goriva u jezgri PWR-a minimizacijom vršne snage", Zbornik XXIX jugoslovenske konferencije ETAN-a, Niš, Svezak IV, 83, (1985).
- [4] B. Petrović, D. Pevec, T. Šmuc i N. Urli, "Adaptiranje kompjuterskih programa, određivanje shema zamjene i dugoročno gospodarenje gorivom u jezgri NE Krško", Elaborat IRB-LP-8/87, Institut "Ruder Bošković", Zagreb (1987).
- [5] N. Urli, B. Petrović, T. Šmuc i D. Pevec, "Adaptiranje kompjuterskih programa za proračun L3P shema zamjene goriva", IRB-LP-N-1/88, Institut "Ruder Bošković", Zagreb (1988).
- [6] Final Safety Analysis Report of NPP Krško, Westinghouse Elect. Corp., (1978).
- [7] D. C. Warner and W. L. Orr, "VANTAGE-5 PWR Fuel Assembly Demonstration Program at Virgil C. Summer Nuclear Station", Proc. Am. Power Conf., 47, (1985).
- [8] R. L. Simmons, N. D. Jones, F. D. Popa, D. E. Mueller and J. E. Pritchett, "Integral Fuel Burnable Absorbers with ZrB₂ in PWR", Nucl. Technol., Vol. 80, 343, (1988).
- [9] B. Petrović, D. Pevec, T. Šmuc i N. Urli, "Shema zamjene goriva za 8. ciklus NE Krško", Elaborat IRB-LP-N-1/89, Institut "Ruder Bošković", Zagreb (1989).
- [10] B. Petrović, D. Pevec, T. Šmuc i N. Urli, "Poboljšanje modela kompjuterskih programa za proračun L3P shema zamjene goriva", Elaborat IRB-LP-N-2/89, Institut "Ruder Bošković", Zagreb (1989).
- [11] B. Petrović, T. Šmuc, N. Urli and D. Pevec, "Recent Improvements in PSU-LEOPARD/MCRAC Code Package," IAEA Technical Committee Meeting on Improvements of In-Core Fuel Management Codes, Madrid (1988).
- [12] D. Pevec and S. H. Levine, "Modification of LEOPARD to Calculate IFBA Depletion Cross Sections", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol. 56, 551, (1988).
- [13] B. Petrović, D. Pevec, N. Urli i T. Šmuc, "Proračun grupnih konstanti gorivnih elemenata koji sadrže sagorive apsorbere", Zbornik XXXII jugoslovenske konferencije ETAN-a, Sarajevo 1988, Svezak IX, 177 (1988).