

N.Zavaljevski, Lj.Kostić, M.Milošević, M.Pešić

INSTITUT "BORIS KIDRIČ", VINČA

OOOR Institut za nuklearnu energetiku i tehničku fiziku NET

ODREDJIVANJE KINETIČKIH PARAMETARA REAKTORA RB STATISTIČKIM METODAMA

THE DETERMINATION OF RB REACTOR KINETIC PARAMETERS BY STATISTICAL METHODS

SADRŽAJ Prikazani su rezultati merenja kinetičkih parametara reaktora RB statističkim metodama. Cilj je osavremenjivanje metoda statističke obrade fluktuacija neutronske populacije u nuklearnom reaktoru radi daljeg razvoja metoda pogodnih za statistička merenja na energetskim nuklearnim reaktorima.

ABSTRACT The results of RB kinetic parameters measurements by statistical methods are presented. The purpose is the updating of statistical analysis methods of neutron population in nuclear reactor having in mind further development of methods convenient for power reactor statistical measurements.

1. UVOD

Potencijalne mogućnosti primene u dijagnostici energetskih nuklearnih reaktora uslovljavaju stalni razvoj i primenu statističkih metoda (videti SMORN V [1]). Imajući to u vidu, rešili smo da obnovimo statističke metode u reaktorskim merenjima, radjene intenzivno na reaktoru RB sedamdesetih godina[2]. Metode su osavremenjene zahvaljujući nabavci nove opreme za reaktorska merenja, a posebno je usavršena obrada podataka, pošto je eksperimentalna oprema povezana sa računarnom VAX 8250.

Merenje statističkih fluktuacija u nuklearnom reaktoru vrši se pomoću impulsnog detektora ili jonizacione komore[3]. Ranija merenja na reaktoru RB vršena su pomoću jonizacione komore[2], čija niska osetljivost je dovela do znatnijeg odstupanja merenih od proračunatih vrednosti na kritičnom nivou i onemogućila potkritična merenja. Pošto sada raspolazemo vrlo efikasnim impulsnim detektorima, realizovali smo merenja statističkih

fluktuacija njihovog odziva. Kinetičke parametre reaktora odredili smo iz autokorelacione funkcije i odnosa varijanse i srednje vrednosti merenog broja impulsa (Fejnmanna metoda). Osnovni kinetički parametar koji se direktno određuje ovim metodama je konstanta slabljenja promptnih neutrona (4), a zatim se jednostavnim linearnim relacijama nalaze i ostali kinetički parametri.

2. TEORIJSKE OSNOVE

2.1. Autokorelaciona funkcija

Autokorelaciona funkcija neutronskeg šuma $R(\tau)$ je za merenu sekvencu broja impulsa neutronskeg detektora $\{x_n\}$, $n=1,2,\dots,N$ u vremenu Δt definisana relacijom

$$R(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{n=1}^N x_n x_{n+k} \quad k=0,1,2,\dots,m \quad (2.1)$$

gde je Δt -širina kanala analizatora, x_n - broj detektovanih neutrona u n -tom kanalu, m - maksimalni pomak određivanja autokorelacione funkcije, N -broj kanala analizatora.

Autokorelaciona funkcija $R(\tau)$ i funkcija spektralne gustine snage povezane su Wiener-Khintchine-ovom formulom [3]

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} P(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad (2.2)$$

Za reaktor na niskoj snazi Bennet [5] je pokazao da važi

$$P(\omega) = \frac{2}{C} B(\omega) [r - s D_v A^2(\omega)] \quad (2.3)$$

gde je C -srednja brzina detekcije, $B(\omega)$ -frekventni odziv sistema detekcije (normalizovan na 1 na niskim učestanostima), $A^2(\omega) = |G(i\omega)|^2$ -kvadrat amplitude prenosne funkcije reaktora nulte snage, $r = q^2 / (q^2)$ pri čemu je q -naelektrisanje koje proizvede apsorpcija jednog neutrona u detektoru, c -efikasnost detektora, D_v -Divenov faktor [3].

Ako se usvoji prostorno nezavisni kinetički model reaktora (opravdan za reaktor RB), prenosna funkcija ima oblik

$$G(s) = \frac{1 - s \sum_j \frac{\beta_j}{\lambda_j + s}}{s \left(\Lambda + \sum_j \frac{\beta_j}{\lambda_j + s} \right) - \rho} = \sum_j \frac{A_j}{\alpha_j + s} \quad (2.4)$$

gde je Λ - vreme trajanja promptnih neutrona, ρ -reaktivnost, β_j i λ_j - frakcije i konstante raspada zakasnelih neutrona, A_j i α_j su reziduumi i polovi prenosne funkcije reaktora nulte snage.

Tako autokorelaciona funkcija koja se dobija merenjem u sistemu detekcije sa idealno ravnim frekventnim odzivom ima oblik:

$$R(\tau) = \frac{r}{c} \delta(\tau) + \sum_{j=1}^{n+1} A_j G(\alpha_j) \exp(-\alpha_j \tau) \quad (2.5)$$

Prvi član je sum detekcije, a suma predstavlja ukupan uticaj promptnih ($j=1$) i zakasnelih neutrona (n grupa).

2.2. Odnos varijanse i srednje vrednosti

Albrecht [6] je pokazao da za odnos varijanse i srednje vrednosti merenog broja impulsa neutronske detektora u vremenu τ važi relacija

$$\frac{\bar{v}}{m} = \frac{c^2 - \bar{c}^2}{\bar{c}} (\tau) = 1 + 2\epsilon D_1 \sum_{i=1}^{n+1} \frac{A_i B_i}{\alpha_i} \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_i \tau}}{\alpha_i \tau}\right) \quad (2.6)$$

gde je B_i izraženo u funkciji reziduuma A_i i polova α_i prenosne funkcije (2.3)

$$B_i = \sum_{j=1}^{n+1} \frac{A_j}{\alpha_j + \alpha_i} \quad (2.7)$$

Ostale oznake su definisane prethodno, a $i=1$ odgovara promptnim neutronima. Ovu relaciju je, bez uračunavanja zakasnelih neutrona, prvi dobio Fejzman, te otuda ime metodi za određivanje konstante α iz relacije (2.6).

2.3. Određjivanje kinetičkih parametara

Određjivanjem autokorelacione funkcije iz eksperimentalnih rezultata može se, fitovanjem na oblik (2.4) odrediti konstanta slabljenja promptnih neutrona, ukoliko se autokorelaciona funkcija računa za vremena u kojima su promptni neutroni dominantni (do 100msec). Relacija (2.6) za odnos varijanse i srednje vrednosti može se upotrebiti u istom cilju, ako se meri do 100msec. Za duža vremena merenja može se uračunati uticaj zakasnelih neutrona fitovanjem na više članova iz sume (2.6).

Merenja se vrše na više potkritičnih nivoa i ekstrapolacijom se određuje α_c , konstanta slabljenja promptnih neutrona na kritičnom nivou. Odatle je vreme trajanja promptnih neutrona

$$\Lambda = \frac{\beta_{eff}}{\alpha_c} \quad (2.8)$$

a potkritična reaktivnost se određuje iz relacije

$$\alpha = \alpha_c \left(1 - \frac{\rho}{\beta_{eff}}\right) \quad (2.9)$$

Za goli homogeni reaktor važi relacija

$$\rho = 1 - \frac{1}{k} = 1 - \frac{1 + M^2 B_r^2 + M^2 \frac{\pi^2}{h^2}}{k_\omega} \quad (2.10)$$

te je ρ linearna funkcija od $1/h^2$, a kako je oko kritičnosti $\delta h_c - h \ll h_c$, relacija je približno linearna i po Δh .

3. POSTUPAK MERENJA

Konfiguracija reaktora RB sa 52 gorivna elementa od 2% obogaćenog urana koraka rešetke 8.2 cm izabrana je za merenje da bi se izbegli prostorno zavisni efekti fluktuacija neutronske populacije.

Efikasnost prikazanih statističkih metoda zavisi najviše od osetljivosti detektora (posebno u slučaju Fejnmanove metode) te smo izabrali najefikasniji detektor kojim raspolazemo i postavili ga u područje visokog neutronskeg fluksa. Za postizanje stacionarnog stanja na potkritičnom nivou korišćen je Am- α -Be neutronskeg izvora, zbog malog γ -fona. Merna instrumentacija prikazana je na slici 1. Snimanje statističkih fluktuacija se vrši višekanalnim analizatorom sa 8K kanala memorije i podaci se prebacuju u VAX 8250. Širina kanala analizatora je 5 msec i izabrana je kao kompromis između potreba za tačnošću određivanja autokorelacione funkcije i dovoljnog broja impulsa za smanjenje statističke greške merenja (srednji broj impulsa je mali zbog slabog intenziteta Am- α -Be izvora). Zadovoljavajuća statistička tačnost postignuta je ponavljanjem merenja na svakom nivou teške vode 15-20 puta. Merenja su vršena na nivoima teške vode od 115-121 cm sa korakom od 1cm. Kritičan nivo je 122.17cm. Merenja na kritičnom nivou nisu vršena zbog zagušnja proporcionalnog brojača usled velikog broja impulsa. Inače, Fejnmanova metoda teorijski divergira na kritičnim nivou [3].

4. OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

4.1 Autokorelaciona funkcija

Određivanje autokorelacione funkcije i iz nje konstante slabljenja promptnih neutrona vrši se programskim paketom AUTOCOR. Autokorelaciona funkcija se određuje bilo direktno, bilo pomoću brze Furijeove transformacije (FFT) [7]. Logaritam autokorelacione funkcije se fituje na pravu liniju i odatle se dobija konstanta slabljenja promptnih neutrona. Fitovanje se vrši za vremena do

0.1sec. Uticaj zakasnelih neutrona računski je korigovan pomoću relacije (2.5), ali je on u ovim intervalima mali (do 3%). Primeri autokorelacionih funkcija za nekoliko nivoa teške vode prikazani su na slici 2. Konstante slabljenja promptnih neutrona određene eksperimentalno (iz autokorelacione funkcije) i računski (programi VESNA [8] i GALER [9]) date su na slici 3. Ekstrapolisana vrednost konstante slabljenja na kritičnom nivou je $12.50 \pm 1.5 \text{ sec}^{-1}$.

4.2. Fitovanje metoda

Isti osnovni eksperimentalni podaci korišćeni su i za proračun odnosa varijanse i srednje vrednosti. Merenje je vršeno za $\tau = 5 \text{ msec}$, a sabiranjem impulsa u k sukcesivnih kanala dobijaju su podaci za $\tau_k = k\tau$. Na taj način se vreme merenja znatno smanjuje u odnosu na klasičan postupak u kome se merenja za nova vremena ponavljaju. Zavisnost V/m za tri karakteristične visine teške vode data je na slici 4. Za svaki potkritičan nivo vrši se nelinearno fitovanje (metoda Levenberg-Marquardt [10]) na oblik (2.6). Sa približavanjem kritičnosti uticaj zakasnelih neutrona raste, te se pri fitovanju mora uzeti u obzir. Ovde su svi zakasneli neutroni tretirani kao jedna ekvivalentna grupa, pošto iz numeričkih razloga nije moguće odrediti konstante slabljenja zakasnelih neutrona koje su mnogo manje od promptnih. U sledećoj tabeli su prikazane razlike u konstantama slabljenja promptnih neutrona sa i bez uračunavanja zakasnelih neutrona.

Tabela 1: Eksperimentalne i teorijske vrednosti konstante slabljenja promptnih neutrona

h_{D_2O} (cm)	f i t o v a n j e		proračun
	samo promptni	promptni + 1 gr zakasn.	
115	$35.77 \pm 1.07^*$	38.22 ± 0.79	41.89
116	30.53 ± 0.89	31.45 ± 0.66	37.75
117	29.27 ± 0.86	30.01 ± 0.64	33.62
118	24.01 ± 0.76	25.19 ± 0.44	29.57
119	21.02 ± 0.57	23.49 ± 0.43	25.63
120	17.29 ± 0.50	18.33 ± 0.38	21.78
121	14.53 ± 0.45	15.74 ± 0.29	18.02

* Ovo nisu greške merenja, već samo procene standardne devijacije fitovanih parametara koje daje nelinearni metod najmanjih kvadrata.

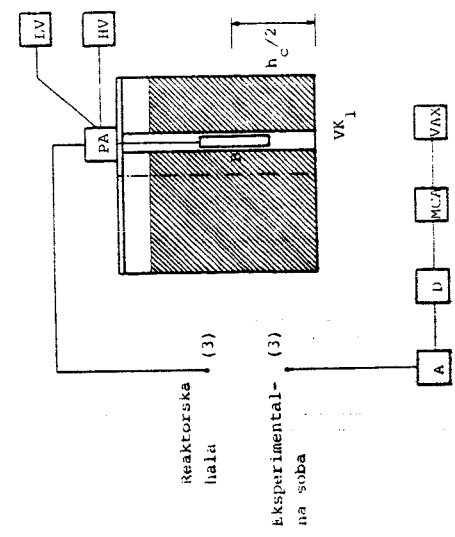
Vrednosti sa uračunavanjem promptnih neutrona su bliže teorijskim, a razlike između eksperimenta i proračuna su manje od 15%. Zavisnost konstante slabljenja promptnih neutrona od $1/h^2$ prikazana je na slici 5. Ekstrapolacijom na kritičan nivo dobija se $\alpha_c = 11.85 + 0.46 \text{ sec}^{-1}$.

5. ZAKLJUČAK

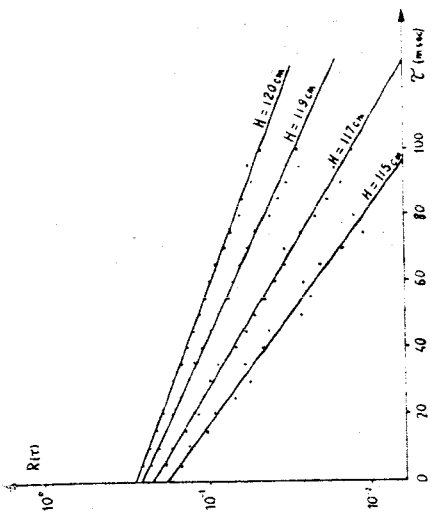
Prikazani rezultati pokazuju da je dobijeno zadovoljavajuće slaganje merenih i proračunatih kinetičkih parametara reaktora RB. Uticaj zakasnelih neutrona je uspešno eliminisan računskim korekcijama. Tako je pokazano da su ove metode pogodne za rutinsko određivanje kinetičkih parametara različitih konfiguracija reaktora RB, pod pretpostavkom važenja prostorno nezavisnog kinetičkog modela. Takodje je na ovom primeru verifikovan postupak proračuna kinetičkih parametara nuklearnog reaktora. U daljem radu planiramo razvoj metoda merenja za prostorno zavisan model kinetike nuklearnih reaktora i implementaciju novijih metoda statističke obrade podataka, pogodnih za primenu u energetske nuklearnim reaktorima. Iskustvo stečeno ovim merenjima poslužiće kao osnova za rešavanje složenijih problema.

REFERENCE

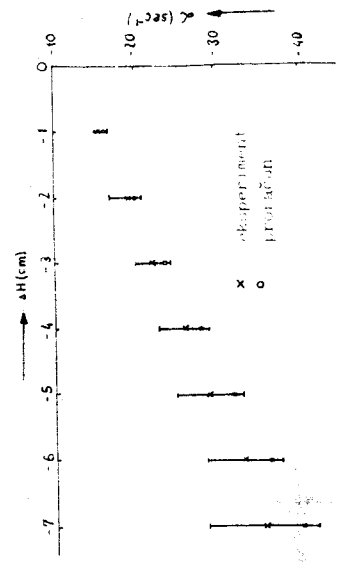
- [1] Proceedings of SMORN V, München, 1987
- [2] "Kinetics and Noise Analysis of Zero Power Reactors: An NPY Project Report", Tech. Rep. Series No 138, IAEA, Vienna, 1972
- [3] R. Uhrig: "Statistical Methods in Nuclear Reactor Physics" (prevod na ruski), Moskva, Atomizdat, 1974
- [4] R.G. Keepin: "Physics of Nuclear Reactor Kinetics", Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1965
- [5] E.F. Bennet: "The Rice Formulation of Pile Noise", Nucl. Sci. Engng, 8, 53, 1960
- [6] R.W. Albrecht: "The Measurement of Dynamic Nuclear Reactor Parameters Using the Variance of Number of Neutrons Detected", Nucl. Sci. Engng, 14, 153, 1962
- [7] J.S. Bendat, A.G. Piersol: "Random Data Analysis and Measurements Procedures", John Wiley, New York, 1971
- [8] M. Milošević: "VESNA-program za proračun grupnih konstanti termičkih nuklearnih reaktora", Biblioteka programa OOUR NET
- [9] M. Milošević: "GALER-program za dvodimenzioni difuzioni proračun nuklearnih reaktora", Biblioteka programa OOUR NET
- [10] W.H. Press et al: "Numerical Recipes", Cambridge University Press, 1986



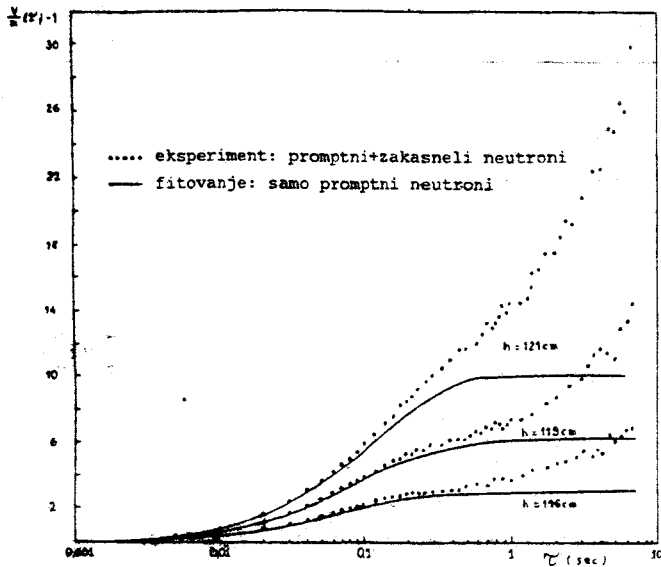
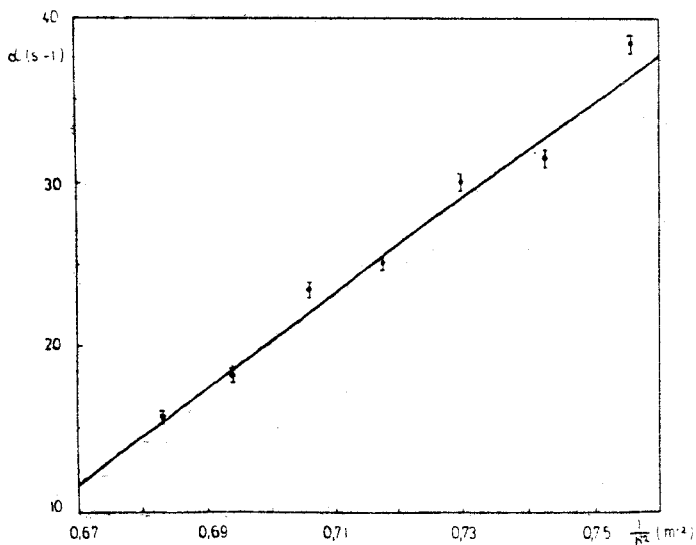
- S1.1. Merna instrumentacija
- B - detektor BF₃ LND 2026, L_{eff}=2,5 cm.
 - LV - izvor niskog napona Canberra 2000, LV 12 V
 - HV - izvor visokog napona Canberra 3002, HV=1500 kV
 - PA - prepojačavač Canberra 2006, pojačanje 5x
 - A - pojačavač Canberra 2022, pojačanje 0.3x1k
 - D - diskriminator Canberra 2032, V_D = 0.4 V
 - MCA - multikanalni analizator Canberra Series 90, MCS 8082 VAX 8250



S1.2 Autokorelaciona funkcija za različite energije neutrona u poz. 1 (T=30 sek, t=10-5 sek)



S1.3 Zastupni konstante slabljenja i optičkih neutrona od nivoa teške vode (ADJ) koristeći funkciju (1)

Sl.4. Zavisnost V/m od vremena merenja

Sl.5. Zavisnost konstante slabljenja promptnih neutrona od visine teške vode (Fejnmnova metoda)