

IBK - 580

NUKLEARNA TEHNIKA

IBK-580

St.Jovanović, Lj. Veličković

ANALIZA ŠUMOVA
U REAKTORSKOJ SIGURNOSTI
- Spektralna analiza (PSD) -

INSTITUT ZA NUKLEARNE NAUKE "BORIS KIDRIČ"

BEOGRAD - VINČA

Novembar 1967.

ABSTRACT

Spektralna gustina snage nultog reaktora je frekventno zavisna i povezana sa prenosnom funkcijom reaktora kao i sa spektralnom gustinom ulaznog poremećaja. Za kritičan reaktor, merenje spektralne gustine snage se koristi za dobijanje odnosa (β/ℓ) gde je β efektivni prinos zakasnelih neutrona, a ℓ efektivni srednji život neutrona. Kod podkritičnog reaktora, određivanjem $\alpha = [1 - k(1 - \beta)]/\ell$, gde je k efektivna multiplikativna konstanta, može se odrediti shutdown margin ako su poznati srednji život neutrona i efektivni prinos zakasnelih neutrona.

Izlazni neutronske spektar reaktora "RB" u Vinči meren je za nekoliko različitih kritičnih konfiguracija goriva, a u slučaju podkritičnog reaktora i za nekoliko različitih nivoa teške vode. Dok su merenja sa kritičnim reaktorom dala zadovoljavajuće rezultate, kod podkritičnog reaktora neutronske šum je bio prekriven belim šumom detektora i šumom elektronike. U radu sa podkritičnim reaktorom neutronske Ra-Be izvor uvek se nalazio ispod reaktorskog tanka. Da bi se došlo do nekih rezultata kod podkritičnog reaktora, potreban bi bio ili efikasniji detektor ili spoljna random pobuda koja bi povećala intenzitet neutronske fluktuacije.

U V O D

Korišćenje reaktorskog šuma kao sredstva za proučavanje ponašanja sistema postalo je popularno i dobili veliki značaj u reaktorskim istraživanjima poslednjih godina.

Razvijen je niz eksperimentalnih metoda koje su primenjivane kako kod nultih tako i kod reaktora snage. Primena metoda analize reaktorskih šumova na nulte reaktore imala je za cilj određivanje osobina kritičnih i podkritičnih nultih skupova, a kod reaktora snage otkrivanje mogućih nestabilnosti i bolje razumevanje dinamičkih procesa u reaktoru.

Poznato je da u reaktoru nulte snage (uključujući i podkritičan) neutronska populacija fluktuirala i da kvantitativno proučavanje ovih fluktuacija daje informaciju o kinetičkim parametrima reaktora. Odnos β/ℓ kritičnog skupa često je određivan bilo iz fluktuacija jonizacione komore bilo brojača. Primena analize reaktorskih šumova na reaktorsku sigurnost počela je kada je Uhrig /1/ istakao da se odnos $(\beta - \rho)/\ell$ može metodama šuma odrediti u podkritičnom skupu, a što omogućava određivanje važnog parametra shutdown margin reactivity.

Primena metoda analize reaktorskih šumova na reaktore snage počela je kada je Moore /2/ sugerirao određivanje

prenosne funkcije reaktora iz merenja u stacionarnom stanju, a ova sugestija uskoro primenjena na analize eksperimentalnih ključajućih reaktora. Do sada su izmereni brojni spektri šuma u reaktorima snage, najčešće u cilju istraživanja mogućih nestabilnosti. Potvrda stabilnosti je nesumnjivo važna stvar reaktorske sigurnosti. Međutim, to nije jedini razlog za analizu šuma u reaktorima snage. Poslednjih godina dobijen je niz drugih kvalitativnih i kvantitativnih informacija o dinamičkom ponašanju reaktora.

ODREDJIVANJE REAKTIVNOSTI REAKTORSKIH SISTEMA METODAMA ANALIZE REAKTORSKIH ŠUMOVA

Poznavanje reaktivnosti reaktorskih sistema ima veliku praktičnu vrednost. Shutdown margin sa uvučenim svim šipkama meren je ili računat za mnoge reaktore. Isto je tako važno i poznavanje shutdown margin sa izvučenom šipkom najveće reaktivnosti.

Jedna od tehnika za beleženje podkritičnih reaktivnosti je korišćenje recipročne vrednosti brzine otkucaja kao kvalitativne indikacije reaktivnosti. Kvantitativna merenja ovom tehnikom su retko vršena zbog osetljivosti rezultata na geometriju, izuzev blizu kritičnosti.

U pokušajima da se razviju bolje metode za merenje podkritičnih reaktivnosti, impulsna neutronska tehnika i metoda Rossi alpha uspešno su korišćene za merenje velikih negativnih reaktivnosti. Impulsna tehnika se sastoji u

meranju vremena slabljenja neutronske impulsa iz spoljnog izvora. Pojavila se u poslednje vreme nova varijanta ove metode kod koje se reaktor pobudjuje pseudo random kvadratnim neutronske impulsima. Rossi alpha metod, s druge strane, koristi zakasnele koineidencije za odredjivanje vremenskog slabljenja u pojedinim fisionim nizovima iz sopstvenog reaktorskog izvora. Ali, sa malim izuzetcima, ova metoda se uglavnom koristi kod brzih reaktora. Obe metode za odredjivanje reaktivnosti koriste vremensku promenu velicine $\exp - \{[(\beta - \rho)/\ell] \cdot t\}$.

Neutronske fluktuacioni šum se isto tako koristi za merenje podkritične reaktivnosti. U tabeli I date su do sada primenjivane stohastičke metode. Iako su sve one sposobne za merenje shutdown margin, neke mogu da imaju eksperimentalne primene jedino za $|\rho| \ll \beta$. U tabeli I date su i stohastičke metode koje koriste spoljnu pobudu reaktora.

Tabela I. Stohastičke metode korišćene za odredjivanje osobina kritične i podkritične skupove nulte snage

Metod	Pobuda
1. slučajni izvor	impulsni neutroni
2. slučajna kontrola	random pomeranje kontrolne šipke
3. variance to mean	bez spoljne pobude
4. p-metod	"
5. spektralna analiza	"

Spektralna analiza zauzima značajno mesto medju metodama šuma. U slučaju reaktora nulte snage, spektar $P(f)$ struje na izlazu iz jonizacione komore koja je postavljena u jezgru reaktora može da se predstavi sa

$$P(f) = A \left[1 + 0,795 \xi | G_0(f) |^2 \right] \quad (1)$$

gde je A konstanta koja ne zavisi od frekvence, ali koja se menja od eksperimenta do eksperimenta, $G_0(f)$ je prenosna funkcija nultog reaktora. Efikasnost detektora, ξ , definisana je kao

$$\xi = \frac{\text{brzina detekcije}}{\text{brzina fisije}} \quad (2)$$

gde je brzina detekcije približno jonizaciona struja u amperima podeljena sa 10^{-14} (pošto se u tipičnoj jonizacionoj komori prikupi po detekciji oko 10^{-14} C).

Merenjem frekventne zavisnosti u jed.(1) može da se odredi reaktivnost podkritičnog sistema, jer je na višim frekvencama

$$G_0(f) \sim \frac{1}{\left(\frac{\beta - \rho}{\ell}\right)^2 + (2\pi f)^2} \quad (3)$$

Iz merenog spektra, $P(f)$, prenosna funkcija, $G_0(f)$, može da se dobije jedino uz uslov da je

$$\xi > \frac{1}{0,795 |G_0(f)|^2} \approx 10^{-4} \quad (4)$$

Detektor smešten suviše daleko od jezgra ima malu efikasnost za korišćenje u analizi šuma. Mnogo je efikasniji detektor postavljen u jezgru, jer je povećana verovatnoća detektovanja događaja iz istog fisionog lanca. Iz činjenice da usko razdvojeni događaji nisu potpuno slučajni, može da se dobije informacija o dinamici dikeja fisionog niza, a takodje i o stepenu podkritičnosti.

Koncepcija efikasnosti je važna kod eksperimenata na nultom reaktoru. Iz jed.(2) se vidi da samo deo fisije u jezgru izaziva detektorske impulse. Jed.(4) pokazuje da dokle god $1/10^4$ ili više ovih fisija ne bude detektovano, ne može se dobiti nikakva informacija o reaktorskoj kinetici. Sve se ovo odnosi samo na nulte reaktore bez spoljne pobe.

Praktične primene jed.(1) su u odredjivanju vrednosti koje su potrebne za fitovanje merenog spektra $P(f)$. Kada su uslovi blizu kritičnosti, odnos β/ℓ se može odrediti, a kod podkritičnog reaktora $(\beta-\rho)/\ell^2$. Na ovom sistemu napravljen je i Milletron-ov /5/ reactivity meter. Kalibrisani izlaz ovog uređaja koristi princip da odnos $P\{f = 600 \text{ Hz}\}/P\{f = 4 \text{ Hz}\}$ raste kada $|\xi|$ raste.

Variance-to-mean odnos, $\{\overline{c^2(\tau)} - \overline{c(\tau)}^2\}/\overline{c(\tau)}$, isto tako se koristi za merenje $(\beta - \rho)/\ell$ preko relacije

$$\frac{\overline{c^2(\bar{t})} - \overline{c(\bar{t})}^2}{\overline{c(\bar{t})}} = 1 + 0,795 \xi \frac{(1-\beta)^2}{(\beta-\rho)^2} \left[1 - \frac{1 - \exp\left(-\frac{\beta-\rho}{\ell}\right)}{\frac{\beta-\rho}{\ell} \cdot \bar{t}} \right] \dots \quad (5)$$

Značaj jednačine (5) leži u činjenici da funkcija na desnoj strani može da bude fitovana sa merenim vrednostima na levoj strani.

NUKLEARNI ŠUM U PROUČAVANJU PROSTORNIH EFEKATA

Sa povećanjem dimenzija reaktora povećava se interes za proučavanjem povezanosti parametara između različitih zona reaktora. Metode šuma predstavljaju korisno sredstvo za proučavanje takvih fenomena. Najveći razvoj primena metoda šuma na proučavanje prostornih efekata doživela je na Univerzitetu u Floridi. Tu je podkritičan skup pobudjivan slučajnim fluktuacijama izvora da bi se merile prenosne funkcije između izvora i detektora za razne položaje u jezgru. Na nižim učestanostima nije primećen nikakav fazni pomeraj. Međutim, na višim frekvencama jasno su uočeni značajni fazni pomeraji. Uhrig je ovo teorijski objasnio kao posledicu vremena koje je potrebno neutronskom talasu da se prostre od jednog do drugog detektora.

Značaj tehnike šuma koja je korišćena u proučavanju prostornih efekata na Univerzitetu u Floridi /5/ je da je pronađena metoda za proučavanje visokofrekventnih fenomena. Vrlo je verovatno da će buduća istraživanja kod nultih reaktora biti pomerena ka višim frekvencama (iznad 1000 Hz)

kao u slučaju Randall-ovog /5/ rada gde je istraživano frekventno područje sve do 8000 Hz.

ANALIZA ŠUMOVA KOD REAKTORA SNAGE

Reaktori snage pružaju mnogo veće mogućnosti za analizu šuma od nultih reaktora. Dodatne kompleksnosti uslova pri višim snagama dovode do novih tipova šuma i zahtevaju više eksperimentalnih istraživanja. Ako bi trebalo izdvojiti jedan aspekt analize šuma kao dominantan, to bi svakako bila studija stabilnosti. Međutim, mogućnosti povećanja sigurnosti preko boljeg razumevanja dinamičkog ponašanja reaktora predstavljaju drugu važnu primenu metoda šuma u reaktorskoj sigurnosti.

Neke od stohastičkih metoda koje se primenjuju kod nultih reaktora primenjuju se i kod reaktora snage. To su spektralna analiza i random pomeranje kontrolne šipke. U poslednje vreme sve se više i više usavršavaju kros korelaciona merenja, koja dobijaju vrlo značajno mesto u istraživanjima reaktora snage. Obično se proučava kroskorelisanost neutronskog fluksa sa perturbacijama temperature, fluktuacijama gustine moderatora... Intenzitet fluktuacija fluksa u reaktoru snage je takav da uveliko prevazilazi statističke efekte detektora. Ova situacija je suprotna od nultih reaktora, gde su izvori šuma slučajni događaji u fisionim nizovima. Zato u većini eksperimentalnih proučavanja šuma u reaktorima snage se ne koriste detektori visoke efikasnosti.

U tabeli II dat je najveći deo primena analize šuma na reaktore snage. Tu su zastupljeni različiti tipovi reaktora i naglašene informacije do kojih se došlo.

U poslednje vreme sve se više teži da se dodje do informacija proučavanjem fluktuacije drugih merljivih veličina osim neutronskog fluksa. Iz tabele II se vidi da su fluktuacije temperature i protoka isto kao i pritisaka intenzivno istraživani, iako one nisu tako direktno povezani sa nestabilnošću jezgra kao parametri dobijeni iz fluksa. Jasno je da je za bolje poznavanje dinamike jezgra nužno poznavanje svih veličina koje utiču na reaktivnost, a koje su izazvane snagom.

Do sada analiza šuma raznih procesa vršena je najviše za vreme puštanja reaktora u rad i drugih specijalnih probnih faza. Još nije dobija status stalnog praćenja procesa, mada je to kod nekih reaktora u planu. Često je odstupanje srednje vrednosti temperature primarnog sistema ili protoka korišćeno kao indikacija operatorima o mogućim anormalnim ponašanjima. Zato je veoma važno i praćenje ukupne srednje kvadratne vrednosti.

Tabela II. Primena analize šuma na reaktore snage

Tip reaktora	Reaktor	Rezultati*	Ref.
boiling water	BORAX-I,II,III	karakteristike rezonantnog spektra dobijene uprošćenim digitalnim metodama	6
	BORAX-IV	rezonanca na 0,8 Hz	7

Tab.II - nastavak

	EBWR	rezonanca na $(1 \pm 1,8)$ Hz	8,9
	BORAX-V	nestabilna snaga predviđena odredjivanjem srednje kvadratne vrednosti šuma	4
	DRESDEN	detektovana oscilacija 0,2 Hz u protoku koji ulazi u reaktor	10
	HBWR	korelacije između protoka i pritiska sa jedne i fluksa sa druge strane	5
	TIR	detektovano ključanje sa povećanjem šuma; do 80 Hz	11
	VBWR	rezonanca na 0,7 Hz; korelacija protoka i flukseva	5
pressurized water	N.S.Savannah	rezonance na 0,1 Hz	5
	Yankee	gladak spektar oslabljen za $f > 0,5$ Hz	5
	Indian Point	gladak spektar oslabljen za $f > 0,5$ Hz	5
	Saxton	detektovano nukleidno ključanje sa rezonancom na 15 Hz	5
Swimming pool	HTR	rezonanca na 1,5 Hz	5
Water boiler	JRR-1	očekivana rezonanca na 0,01 Hz i neočekivana na 0,06 Hz	5
D ₂ O research	PLUTO	visoko ne Gausovska raspodela fluktuacija	5
homogeneous gas cooled	HRE-2	rezonanca $(0,08 \pm 0,13)$ Hz	12
	KIWI-A3	stabilnost kontrolnog sistema potvrđjena slučajnom pobudom	13
Compact	SNAP	kroskorelacija temperature, protoka i flukseva radi merenja heat-transfer osobina	5
Fast	DFR	kroskorelacija temperature i fluksa radi boljeg razumevanja dinamike jezgra	

* Dobijeni Furijeovom analizom struje jonizacione komore, ako nije naznačen drugi metod.

EKSPERIMENTALNO PROUČAVANJE

Eksperimenti su vršeni na nultom teškovodnom reaktoru. Gorivo je obogaćeno sa 2% U^{235} . Cilj eksperimenata je bila provera mogućnosti metode merenja spektralne gustine snage. Potrebno je bilo ispitati koliko je postojećom opremom, uključujući i jonizacionu komoru KHT-53, i datom metodom moguće eksperimentalno proučavati fizičke performanse nultog teškovodnog sistema.

Naročito se težilo da se odredi najniži podkritični nivo koji bi mogao da se izmeri ovom metodom, čime bi se omogućilo i merenje tzv. shutdown margin.

Tok eksperimenta

Korišćenjem metode PSD izvršena su merenja na reaktoru RB sa koracima rešetke 8, $8\sqrt{2}$ i 14 cm.

Reaktor je dovodjen u kritično stanje za sva tri koraka rešetke. Sa podkritičnim reaktorom merene su rešetke sa korakom 8 i 14 cm. Podkritično stanje reaktora je postizano spuštanjem nivoa teške vode sa stepenima promene reaktivnosti od oko 100 pcm do max 1000 pcm. Za vreme merenja na podkritičnom reaktoru Ra-Be neutronske izvor je uvek bio u gornjem položaju.

Za detekciju je korišćena jonizaciona komora KHT-53 sa osetljivošću $2 \cdot 10^{-14}$ A/nV. Komora se nalazila u centralnom vertikalnom kanalu tako da se sredina efektivnog dela nalazila u maksimalnom fluksu.

Sa kritičnim reaktorom merenja su vršena na snagama od 1 W, 5 W, 10 W i 20 W.

Po dostizanju reaktora u željeno stanje i čekanja stabilizacije od najmanje 15 min šum reaktora je snimljen na magnetofonu. Snimanje svakog sempla je trajalo oko 30 min.

Na magnetofonu se snimalo najmanjom brzinom magnetofona od 15/8 in/sec, dok je reprodukcija izvodjena sa 8 puta većom brzinom, tj. 15 in/sec. To znači da je jedan snimak reaktorskog šuma koji traje 24 min mogao da se reprodukuje za samo 3 min. Ovim se nesumnjivo povećava statistika merenja kao i brzina rada na eksperimentu. Kod ovog načina rada pri reprodukciji treba filter podesiti na 8 puta veću učestanost.

Eksperimentalni uređjaji

Blok šema kompletnog uređjaja data je na sl.1. Svi uređjaji su specificirani.

Frekventna karakteristika DYMEC-ovih DY 2460 jednosmernih pojačavača je ravna za frekvencije 5 kc/s.

Frekventna karakteristika KROHN-HITE filtra data je na dij.2. Iz dijagrama se vidi da je oblik karakteristike sličan u svim dekadama. Ukupna devijacija karakteristike (peak to peak) je oko 1,5 dB. Peak se javlja u svakoj dekadu kod frekvencija: $0.25 \div 0.6$ c/s, $2.5 \div 6$ c/s odnosno $25 \div 60$ c/s. Ova frekventna karakteristika merena je na taj način što je za svaku tačku filter bio tako podešen da su skale

za donju i gornju učestanost postavljane na istu vrednost ($f_L = f_H$). (Na isti način se meri kod eksperimenta na reaktoru). Merenje je izvršeno na dva načina:

a) Merenjem krivih selektivnosti na frekvencijama od $2 \cdot 10^{-2}$ do 10^2 c/s kvadriranjem i integraljenjem ulaznog signala.

b) Nalaženjem peak-a krive selektivnosti niskofrekventnim cevnom voltmetrom za frekvencije od 20 do 2000 c/s.

Korišćeni magnetofon je firme AMPEX SP-300 sa četiri brzine (od $15/8 \div 15$ in/sec).

(Karakteristike ostalih uređaja date su u referenci /14/).

REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Na sl.3. date su krive spektralne gustine za jednu rešetku merene u dva maha na snazi reaktora od 5 W i jednom na snazi od 1 W. Puno izvučena linija predstavlja srednju vrednost funkcije gustine spektra nultog reaktora.

Iz merenja na kritičnom reaktoru najbolje dobiveni rezultati odgovaraju radu reaktora na snazi od 5 W. Dobivene krive merenjem na snazi ispod 1 W (recimo 0,5 W) bile su manje pouzdane.

Izmerene krive spektralne gustine kritičnog sistema za tri konfiguracije rešetke u funkciji koraka rešetke date su na sl.4. Pošto su krive dovedene normiranjem na

zajednički plato, vide se očigledne razlike za pojedine rešetke.

Ako bi se vremenski pratilo stanje reaktora, iz ovih krivih bi se moglo da dodje do brojnih podataka o zatrovanju reaktora ma koje vrste, promeni stanja teške vode i dr. Kod kritičnog reaktora ovo se određuje nalaženjem odnosa β / ℓ , jer će kod raznih tipova reaktora ili promjenjenog stanja u reaktoru i ovaj odnos da se menja. Odnos β / ℓ se nalazi na polovini vrednosti platoa spektralne gustine.

Na sl.5. predstavljene su dve krive sa dva radna otpora $20 M\Omega$ i $100 M\Omega$. Merene za istu snagu reaktora od 1 W. Vidi se da je kriva spektralne gustine merena sa radnim otporom od $20 M\Omega$ nedefinisana, naročito što se tiče platoa krive. S druge strane merenje radnim otporom od $100 M\Omega$ smanjuje frekventni spektar za posmatranje. Iz ovoga se zaključuje da bi svakako trebalo snimati sa manjim radnim otporom ali znatno duže - recimo bar 2^h jedan sempl, kako bi se poboljšala statistika merenja.

Izmerene spektralne krive podkritičnog i kritičnog reaktora date su na sl.6. Podkritična stanja odgovaraju nivoima teške vode od $\Delta H = -1$ cm i $\Delta H = -3$ cm za rešetku sa korakom od 8 cm.

Na sl.7. date su dve krive spektralne gustine za rešetke sa korakom 8 i 14 cm, za isto $\Delta H = -1$ cm.

Krive podkritičnog reaktora očigledno ne daju sliku spektralne gustine reaktora niti mogu da se dobiju ma kakvi rezultati iz njih u tom smeru. I pored podignutog radioaktivnog izvora osetljivost komore od $2 \cdot 10^{-14}$ A/nV je tako

mala da je i kod 100 pcm podkritičnog stanja reaktora preovladavao šum detektora i elektronike.

Merenjem karakteristike šuma kompletnog elektronskog sistema bez rada reaktora dobijena je kriva istog oblika kao i karakteristika koja je dobijena merenjem podkritičnog reaktora.

ZAKLJUČCI

Eksperimenti izvedeni na reaktoru RB metodom PSD potvrđuju mogućnost efikasnijeg merenja jonizacionom komorom KHT-53 na kritičnom reaktoru sa snagom reaktora od 1 W i većom, a korišćenjem radnog otpora od 100 M Ω . Rezultati dobiveni merenjem tri konfiguracije rešetke zadovoljavaju i slažu se sa prethodnim merenjima drugim metodama za određivanje odnosa β / ρ .

Lošije dobiveni podaci kod merenja sa manjim radnim otporom (20 M Ω) navode na to da bi trebalo meriti duže vreme (sempel reda 2 sata) radi bolje statistike kao i proširenja frekventne karakteristike ulaznog mernog kola.

Merenja na podkritičnom reaktoru u potpunosti ne zadovoljavaju. Razlog ovome je mala osetljivost jonizacione komore KHT-53, tako da je reaktorski šum pokriven šumom detektora. Svakako da će kroskorelaciona merenja PSD doprineti kod merenja sa vrlo malim snagama reaktora, a možda i sa podkritičnim reaktorom, jer se u tom slučaju poništava nekorelisani deo spektra koji potiče od jonizacione komore /15/, /16/.

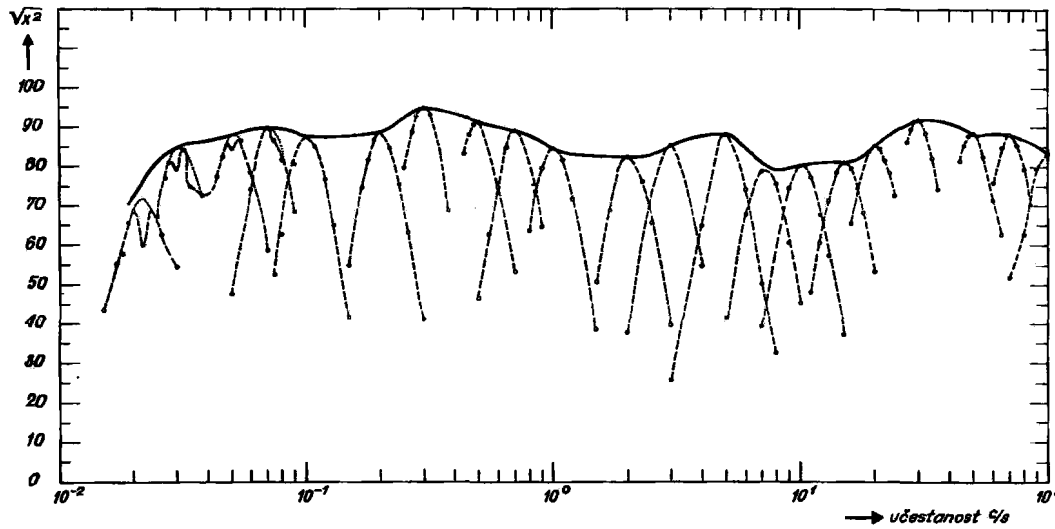
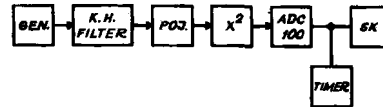
Perturbacijom fluksa podkritičnog reaktora random ili pseudorandom oscilacijama i korišćenjem komore veće osetljivosti (reda 10^{-13} A/nV) /17/ svakako da bi doprinelo merenju velikih negativnih reaktivnosti, pa i shutdown margin u nekom opsegu.

LITERATURA

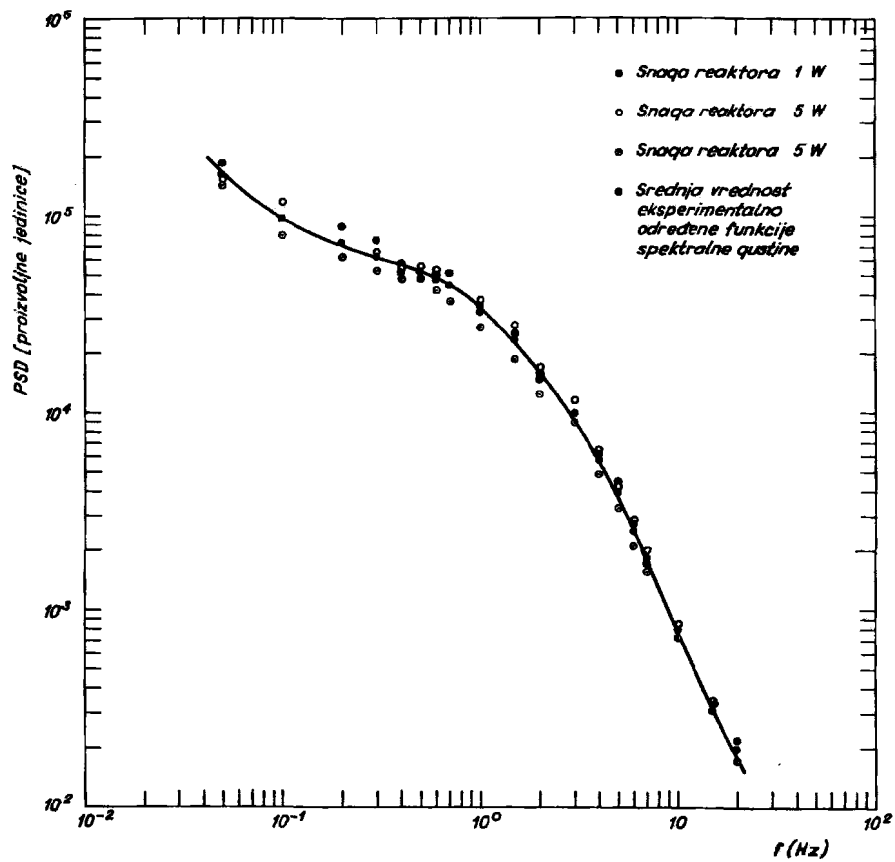
1. R.E.Uhrig, Random Variations of Neutron Density in a Subcritical Assembly, Trans.Am.Nucl.Soc., 4(1):85-86 (1961).
2. M.N.Moore, The Determination of Reactor Transfer Functions from Measurements at Steady Operation, USAEC Report.
3. J.A.Thie, Reactor Noise, Rowman and Littlefield, Inc., New York, 1963.
4. L.E.Weaver, Reactor Kinetics and Control, AEC Symposium Series, TID-7662, 1964.
5. R.E.Uhrig, Noise Analysis in Nuclear Systems, AEC Symposium Series, TID-7679.
6. J.A.Thie, Elementary Methods of Reactor Noise Analysis, Nucl.Sci.Eng., 15: 109-114 (1963).
7. B.S.Maxon, O.A.Schulze, J.A.Thie, Reactivity Transients and Steady State Operation of a Thoria-Urania-Fueled Direct-Cycle Light-Water Boiling Reactor (BORAX-IV), USAEC Report ANL-5733, February 1959.
8. J.A.Thie, Statistical Analysis of Power-Reactor Noise, Nucleonics, 17(10):102 (1959).
9. J.A.Thie, Dynamic Behaviour of Boiling Reactors, USAEC Report ANL-5849.
10. E.S.Beckjord: Dresden Reactor Stability Tests, Trans.Am. Nucl.Soc., 3(2):433(1960).
11. L.R.Boyd, Ion Chamber Can Detect Nucleate Boiling, Nucleonics, 17(3):96-102(1959).
12. J.Hirata, Statistical Analysis of Small Power Oscillations in the HTR, USAEC Report CF-60-1-107, ORNL, Jan.29, 1960.

13. J.D.Balcomb, H.B.Demuth, E.P.Gyftopoulos, A Cross-correlation Method for Measuring the Impulse Response of Reactor Systems, Nucl.Sci.Eng., 11:159-166 (1961).
14. M.Petrović at al., Merenje šumova reaktora RA, IBK-489 (1966).
15. W.Seifritz at al., Two-detector Cross-correlation Experiments in the Fast-Thermal Argonaut Reactor (STARK)*
16. T.Nomura at al., Reactivity Measurements by the Two-detector Cross-correlation Method and Supercritical Reactor Noise Analysis*
17. St.Jovanović i Stormark, Merenje reaktorskih parametara reaktora "NORA" - Power Spectral Density, IBK- 508, 1967.

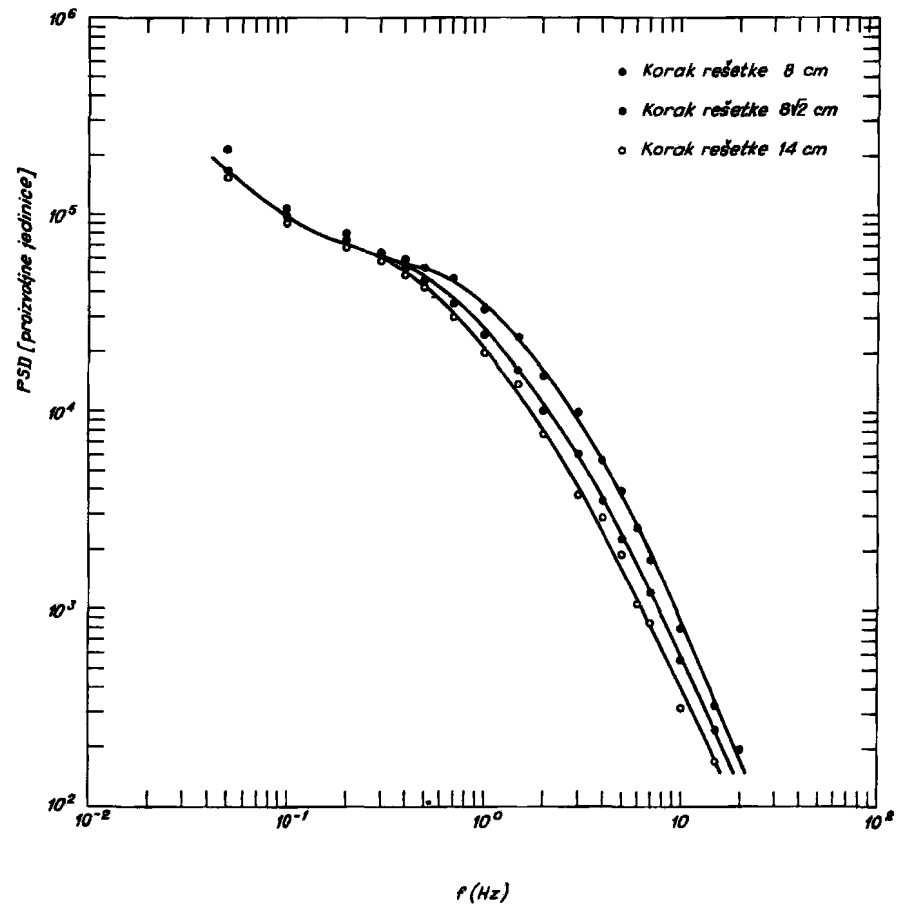
* Neutron Noise, Waves, and Pulse Propagation, Konferencija održana u Floridi, februara 14-16, 1966.



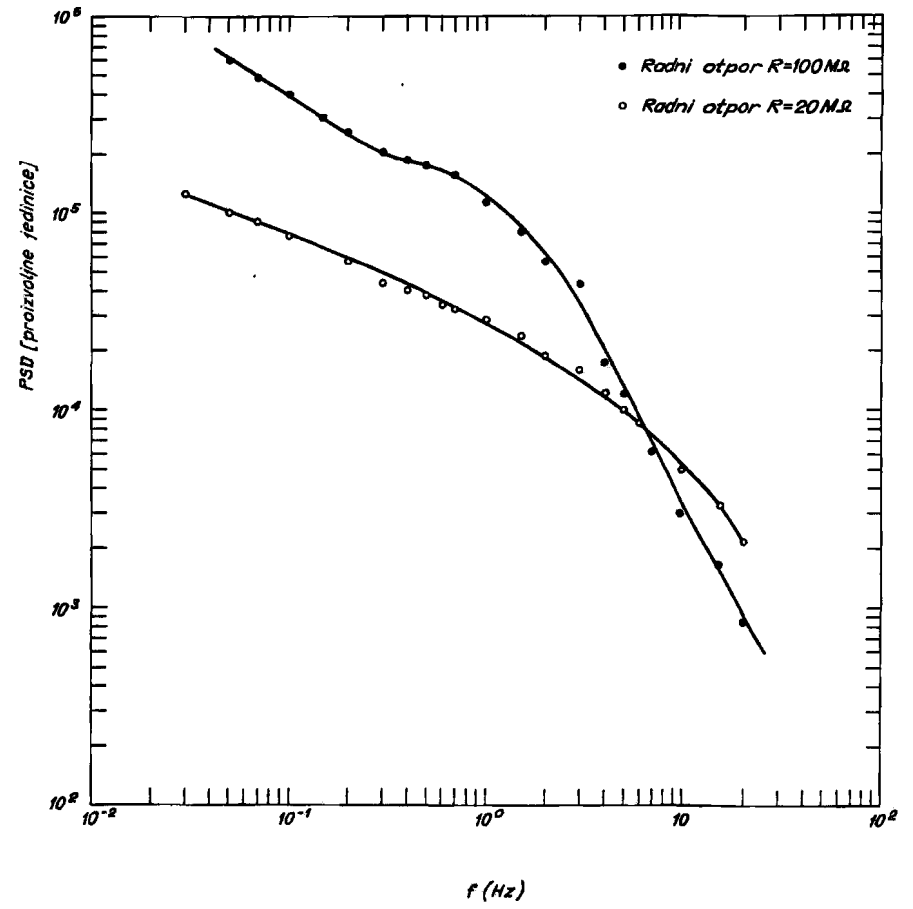
SL.2 Frekventna karakteristika KROHN-HITE filtra snimljena postavljanjem skale za nisku i visoku učestanost na istu vrednost ($f_L = f_H$).



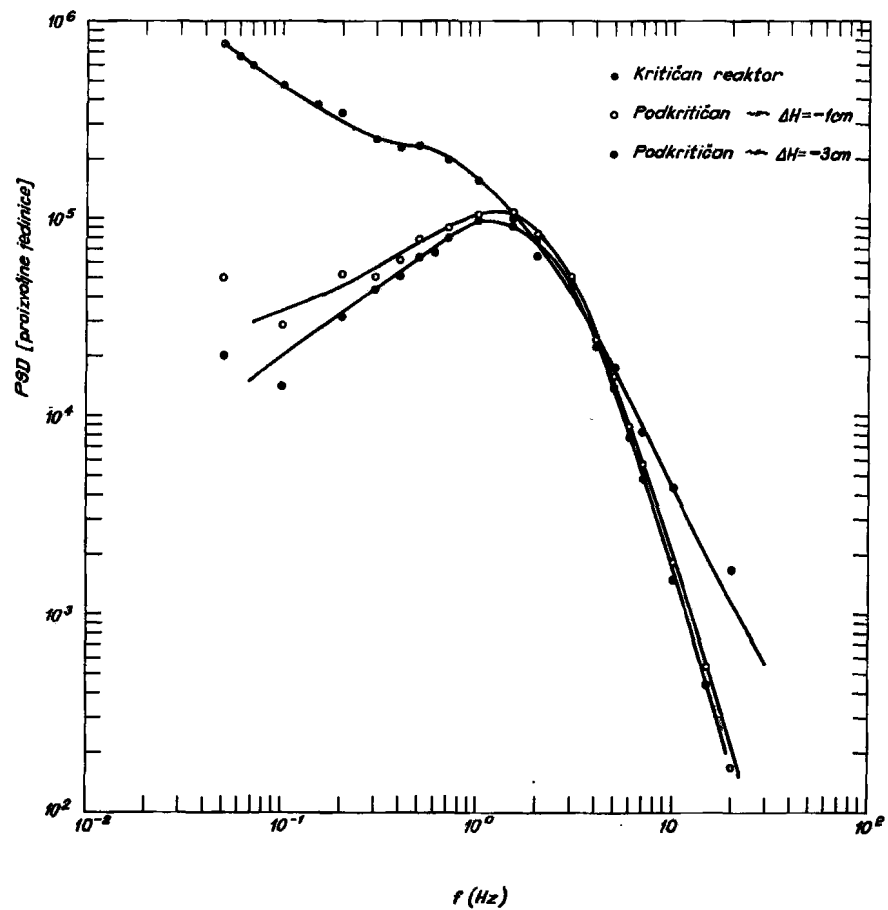
SL3- Funkcija spektralne gustine kritičnog reaktora "RB" (korak rešetke 8 cm, radni otpor 100 M Ω)



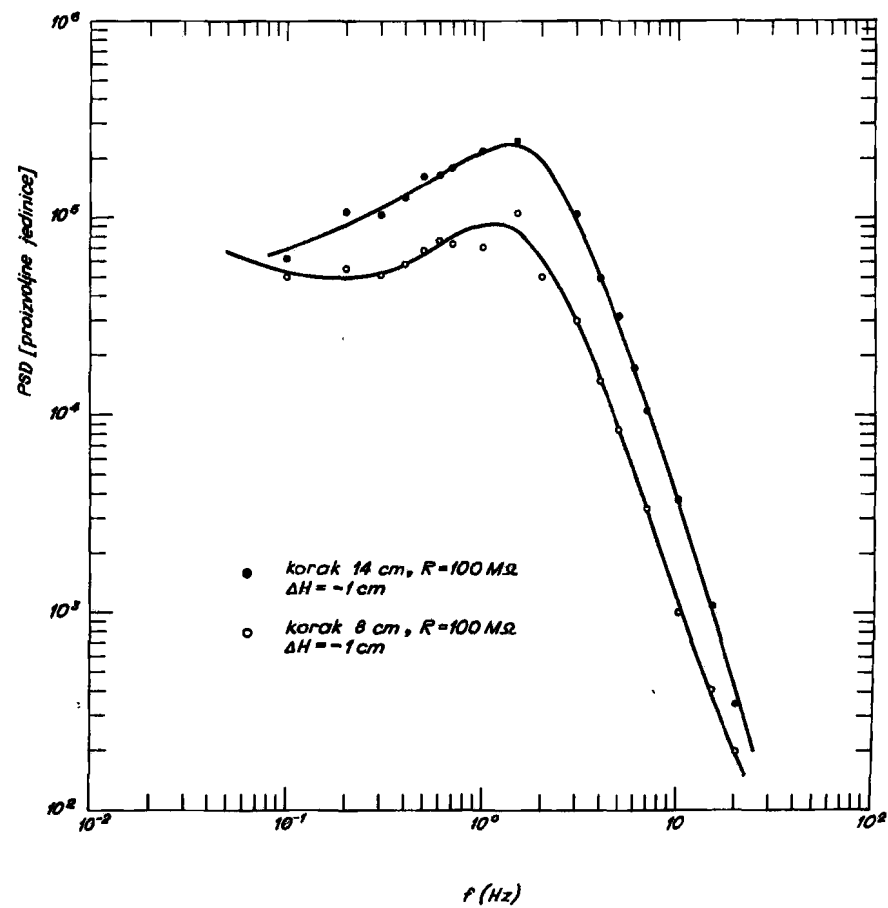
Sl.4 - Spektralna gustina kritičnog sistema u funkciji koraka rešetke (reaktor »RB«)



Sl.5 - Spektralna gustina u funkciji radnog otpora (reaktor »RB«, snaga reaktora 1W, korak rešetke 14 cm)



Sl. 6 - Spektralne gustine kritičnih i podkritičnih sistema
(reaktor »RB«, korak rešetke 8 cm, radni otpor 20 M Ω)



Sl. 7 - Funkcije spektralnih gustina podkritičnih reaktora »RB«