

# **Praktikum IV**

## **Koeficienti reaktivnosti**

Navodila za vajo

prof. dr. Matjaž Ravnik, Luka Snoj

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

Ljubljana, 6.3. 2009



# Kazalo

<b>1</b>	<b>REAKTIVNOSTNI KOEFICIENT PRAZNIN .....</b>	<b>5</b>
1.1	KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE .....	5
1.2	FIZIKALNE OSNOVE .....	5
1.3	IZVEDBA VAJE .....	6
1.4	NALOGA .....	7
<b>2</b>	<b>KOEFICIENTI REAKTIVNOSTI .....</b>	<b>8</b>
2.1	KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE .....	8
2.2	OSNOVE .....	8
2.2.1	<i>Fizikalno ozadje</i> .....	8
2.2.2	<i>Vpliv na reaktivnost v realnih sistemih</i> .....	9
2.2.3	<i>Omejitev pri meritvi z merilnikom reaktivnosti</i> .....	10
2.3	IZVEDBA VAJE .....	10
2.4	NALOGA .....	12
<b>3</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>12</b>



# 1 REAKTIVNOSTNI KOEFICIENT PRAZININ

## 1.1 Kratek opis in namen vaje

Praznina v reaktorju vpliva na reaktivnost in se lahko v rektorskem moderatorju in/ali hladilu pojavi zaradi mehurčkov pare, katere gostota je za več velikostnih redov manjša od gostote kapljevine. Koeficient reaktivnosti praznine nam pove velikost in predznak spremembe reaktivnosti.

Namen vaje je izmeriti radialno odvisnost tega koeficienta in prikazati, da je vpliv praznine na reaktivnost odvisen od položaja praznine v reaktorju.

## 1.2 Fizikalne osnove

Tekoče hladilo se lahko obnaša kot moderator ali absorber in v obeh primerih praznina v hladilu vpliva na reaktivnost.

Pozitivni koeficient praznine pomeni, da reaktivnost in s tem moč reaktorja raste z večanjem praznine. V primeru, da je koeficient praznine dovolj velik in se varnostni sistemi ne odzovejo pravočasno, lahko to sproži pozitivno povratno zanko. Prav to se je zgodilo v primeru nesreče v Černobilu.

Negativni koeficient praznine pa pomeni, da se reaktivnost in s tem moč reaktorja ob večanju praznine zmanjšuje. Zaradi tega morajo reaktorji imeti negativen koeficient reaktivnosti praznine, saj le-ta pripomore k pasivni varnosti takšnega reaktorja. Poznavanje vpliva praznine na reaktivnost je zato pomembno zlasti za varnostne analize, pri vrelnih reaktorjih pa tudi za normalno obratovanje.

Kvantitativno opiše vpliv praznine na reaktivnost reaktorja koeficient reaktivnosti praznine  $\alpha_v$  (void coefficient of reactivity), ki ga definiramo kot:

$$\alpha_v = \frac{\Delta\rho}{\Delta x}$$

kjer je  $\Delta\rho$  sprememba reaktivnosti,  $\Delta x$  pa sprememba deleža praznine v volumnu hladila

$$x_v = \frac{V_v}{V_c} .$$

$V_v$  je volumen praznine,  $V_c$  pa celoten volumen v sredici, ki ga lahko zaseda hladilo.

Vpliv praznine na reaktivnost zavisi od mnogih reaktorskih parametrov, pri čemer je njihov doprinos lahko tudi nasprotnega predznaka. Koeficient  $\alpha_v$  je zelo odvisen od konstrukcije reaktorja in se spreminja glede na položaj, kjer praznina v reaktorju nastopa. Običajno so reaktorji projektirani tako, da je na ta koeficient negativen.

Praznina nam zmanjša efektivno gostoto hladila in s tem zmanjša moderacijo nevtronov. Podoben efekt lahko dosežemo tudi z zvišanjem temperature hladila.

Koeficient praznine je zato povezan z reaktivnostnim koeficientom moderatorja oz. hladila, saj se s spremembo temperature spreminja gostota hladila-moderatorja. To je enako, kot če je praznina homogeno porazdeljena po sredici. Za efektivno gostoto hladila  $\rho_c$  lahko zapišemo:

$$\rho_c = (1 - x)\rho_l$$

kjer je  $\rho_l$  gostota vode pri danih pogojih. Koeficient praznine izrazimo z reaktivnostnim koeficientom gostote hladila:

$$\alpha_v = -\rho_l \frac{\Delta\rho}{\Delta\rho_c} .$$

### 1.3 Izvedba vaje

Za izvedbo vaje je ugodno, če je reaktor nezastrupljen (ni obratoval vsaj 24 ur pred vajo). Vključi merilnik reaktivnosti in rekorder. Izberi ustrezne parametre na instrumentih; npr. celotna skala za reaktivnost 40 pcm,  $\rho = 0$  na sredini, hitrost papirja 3 cm/min. Bistvene podatke zabeleži na papir. Zaženi reaktor na moč 150 W. Reaktor naj obratuje na "ROČNO". Operater naj vstavi "vzorec praznine" v pozicijo MP 20. "Vzorec praznine" je aluminijasta paličica-sonda. Za nevtrone je to praznina, saj jih aluminij (skoraj) ne absorbira, izpodriva pa vodo-moderator. Po skoku reaktivnosti počakaj, da se reaktivnost ustali na novi vrednosti. Po tem naj operater izvleče vzorec. Zabeleži skok reaktivnosti. Vajo ponoviš še za pozicije MP 21, MP 22 in MP 23. Zadnjo meritev opravimo tako, da sondo spustimo v odprtino obroča F, v katerem ni gorivnih elementov. Na ta način lahko izmerimo spremembo reaktivnosti zaradi vstavitve sonde na pozicijo, ki je od centra sredice oddaljena še bolj od kot vse predhodne pozicije. Spremembe reaktivnosti izmeri, ko je vzorec izvlečen iz posameznih pozicij.

Vzorec vstavljajo oz. izvlačijo operaterji ob upoštevanju vseh varnostnih predpisov. Po končani vaji naj pred izvlekom vzorca iz bazena mine vsaj pol ure. Pri izvlačenju je potrebno meriti jakost doze in se držati ostalih varnostnih predpisov.

Iz rekorderskih zapisov merilnika reaktivnosti določi ustrezne spremembe reaktivnosti za tri pozicije praznine v sredici! Izračunaj delež praznine  $x$  ( $V_v = 13.3 \text{ cm}^3$ ,  $V_c = 2.03 \cdot 10^4 \text{ cm}^3$ ) v hladilu (enote %). Koefficient reaktivnosti praznine izračunaš iz enačbe:

$$\alpha_v = \frac{\Delta\rho}{\Delta x}$$

## 1.4 Naloga

- naredi tabelo; koefficient reaktivnosti praznin v odvisnosti od položaja praznine
- oceni povprečni koefficient praznine reaktorja kot celote
- za koliko bi se spremenil k reaktorja, če bi izparela vsa voda ?

## 2 TEMPERATURNI KOEFICIENT REAKTIVNOSTI

### 2.1 Kratek opis in namen vaje

Namen vaje je opazovati odziv moči, temperature in reaktivnosti reaktorja po hitri spremembi reaktivnosti, povzročeni s premikom regulacijske palice ter spoznati in preveriti povratni vpliv temperature goriva na reaktivnost in moč reaktorja, kar je pogoj za razumevanje pojmov temperaturni reaktivnostni koeficient goriva in koeficient moči.

### 2.2 Osnove

Temperaturni koeficient reaktivnosti goriva je v reaktorju TRIGA najmočnejši in najpomembnejši povratni vpliv na reaktivnost.

Definiran je kot:

$$\alpha_g = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_g}$$

kjer je  $\alpha_g$  temperaturni koeficient reaktivnosti,  $\Delta\rho$  sprememba reaktivnosti reaktorja in  $\Delta T_g$  sprememba povprečne temperature goriva v celem reaktorju.

Reaktorji TRIGA so znani po velikem, negativnem in promptnem koeficientu reaktivnosti goriva, zaradi česar je upravljanje in obratovanje teh reaktorjev izredno varno. Vsaka sprememba moči in s tem temperature goriva namreč takoj vpliva na obratno spremembo reaktivnosti, zaradi česar se v reaktorju hitro in učinkovito vzpostavi novo ravnovesno stanje.

Razlog za tako učinkovit temperaturni povratni mehanizem je posebna sestava goriva. Gorivo v TRIGA reaktorju je homogena mešanica obogatene urana in cirkonijevega hidrida ZrH. Vodik v ZrH služi kot moderator, zato v TRIGI večina moderacije poteka kar v gorivnem elementu samem in le manjši del v vodi, ki obdaja gorivne elemente. Zaradi tega se vsaka sprememba moči in s tem temperature goriva takoj odraza tudi na moderatorju v gorivnem elementu, in oba, tako gorivo kot moderator, takoj vplivata nazaj na reaktivnost sredice.

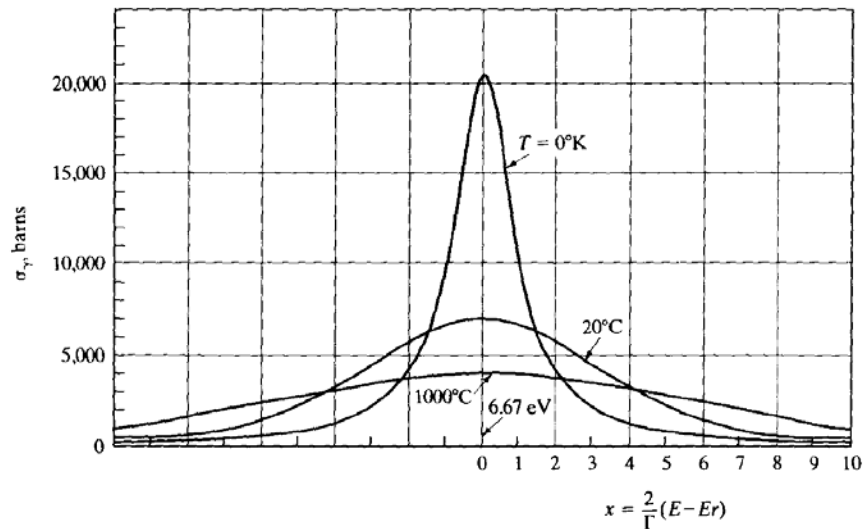
#### 2.2.1 Fizikalno ozadje

Sprememba temperature goriva na različne načine vpliva na reaktivnost, zato je tudi temperaturni koeficient seštevek več prispevkov. Nekateri delujejo takoj, nekateri pa z določeno časovno zakasnitvijo. K promptnemu negativnemu koeficientu reaktivnosti v reaktorju TRIGA največ prispevata naslednja procesa:

- Dopplerjev efekt v gorivu in
- pomik termičnega dela spektra nevtronov k večjim energijam.



Sprememba reaktivnosti ob spremembi temperature zaradi Dopplerjevega pojava je zapleten skupek različnih fizikalnih dejavnikov, njihova osnova pa je Dopplerjeva razširitev resonance za zajetje nevtrona v  $^{238}\text{U}$ , kot je prikazano na sliki 2.1.



**Slika 2.1: Oblika preseka resonance s srednjo energijo 6.67eV v  $^{238}\text{U}$  v odvisnosti od energije pri treh različnih temperaturah.**

Kot je razvidno s slike 2.1 se ob povečanju temperature, zaradi povečanega termičnega gibanja U jeder, resonanca zniža in razširi. Nevtronski fluks, ki je funkcija tako energije kot kraja, se v okolici resonance ob tej spremembi temperature spremeni. Sprememba fluksa nato vpliva na absorpcijo nevtronov v resonanci in s tem na verjetnost, da se bo nevtron upočasnil mimo resonančne energije, ne da bi se pri tem absorbiral.

Natančen preračun efekta je zapleten in presega obseg pričujočih vaj, približne izračune pa lahko najdemo v literaturi [1,2]. Izkaže pa se, da je Dopplerjev efekt v pomnoževalnem mediju načeloma negativen ali pa majhen.

### 2.2.2 Vpliv na reaktivnost v realnih sistemih

Dopplerjev efekt je značilen za vse reaktorje, ki kot gorivo vsebujejo tudi  $^{238}\text{U}$ . Številne ostre resonance se s segrevanjem razširijo, zaradi česar se poveča absorpcija nevtronov in s tem zmanjša reaktivnost. Ker je v gorivnem elementu, ki je homogena mešanica goriva in moderatorja, samoščitenje precej manjše kot v heterogenem reaktorju, je to povečanje absorpcije relativno veliko, tako da Dopplerjeva razširitev resonanc na  $^{238}\text{U}$  prispeva k celotnemu temperaturnemu koeficientu reaktivnosti približno četrtno.

Najmočnejši prispevek k temperaturnemu koeficientu reaktivnosti, dobrih 50 %, je zaradi pomika nevtronskega spektra v gorivu. Z dvigom moči naraste tudi

temperatura goriva, temperatura vode okrog gorivnega elementa pa se skoraj ne spremeni. Spekter nevtronov v gorivu se močno deformira, spekter nevtronov v vodi pa ostane približno isti. Gostota reakcij v gorivu se zato zmanjša, v vodi pa ne. Razmerje med fisijskimi in nefisijskimi reakcijami zato v celem reaktorju pade, zaradi česar se zmanjša pomnoževalni faktor in s tem reaktivnost.

Na temperaturni koeficient reaktivnosti vpliva tudi zmanjšanje gostote moderatorja in s tem manj učinkovito upočasnjevanje nevtronov in večji pobeg iz sredice, vendar je ta prispevek precej manjši kot prva dva.

Ker se vsi ti povratni mehanizmi spreminjajo s temperaturo, je tudi temperaturni povratni koeficient reaktivnosti funkcija temperature goriva. Izmerimo ga lahko, če neposredno merimo ob vsakokratni spremembi reaktivnosti tudi spremembo temperature goriva. Te spremembe niso enake po vsej sredici. V TRIGI normalno merimo temperaturo goriva na enem mestu, le v izjemnih primerih na dveh mestih. Izmerjena temperatura  $T$  v splošnem zato ni enaka povprečni temperaturi goriva v sredici  $T_g$ , s katero definiramo  $\alpha_g$ . Na tak način izmerjen koeficient  $\alpha_g$  je zato različen od pravega za toliko, kolikor se merjena temperatura razlikuje od povprečne. Zato je smiselno, da temperaturo v sredici merimo tako, da je čim bližja povprečni. Vendar pa v praksi to ni vedno izvedljivo, saj zaradi razumljivih razlogov merimo temperaturo vedno na sredi reaktorja, kjer pričakujemo, da je najvišja.

### **2.2.3 Omejitev pri meritvi z merilnikom reaktivnosti**

V idealnem primeru bi se moral merilnik reaktivnosti na nenadno spremembo reaktivnosti, ki jo v sistem vnesemo s spremembo položaja kontrolne palice, v trenutku odzvati s skokom reaktivnosti za vneseno spremembo. A v realnosti vnos reaktivnosti ni trenuten, saj ima kontrolna palica končno hitrost. Fluks se tako začne dvigovati, in s tem gorivo greti, še preden palica doseže svojo končno pozicijo. Zaradi tega na merilniku odčitani maksimum reaktivnosti v resnici ni dejanski vnos reaktivnosti ob spremembi moči.

Natančneje kot z odčitavanjem z merilnika reaktivnosti tako določimo vnos reaktivnosti pri posameznem koraku preko umeritvene krivulje ustrezne kontrolne palice.

## **2.3 Izvedba vaje**

Istočasno bomo merili dva koeficienta: temperaturni koeficient reaktivnosti goriva  $\alpha_g = \Delta\rho/\Delta T$  in koeficient moči  $\alpha_P = \Delta\rho/\Delta P$ . Meritev poteka tako, da z dviganjem kontrolnih palic postopoma dvigujemo moč reaktorja od  $\sim 2$  kW do polne moči 250 kW. Pri posameznem koraku ocenimo dvig izbrane kontrolne palice (število korakov), za katerega naj operater premakne palico, na podlagi meritve koeficienta moči za eno izmed prejšnjih sredic (sredica 134 iz leta 1991) – slika 8.1, ki se nekoliko razlikuje od merjenega koeficienta moči v trenutni sredici, in

aktualne umeritvene krivulje za ustrezno kontrolno palico (priloga k vaji stopničasta sprememba reaktivnosti). Na vsakem koraku izmerimo temperaturo goriva, moč in spremembo reaktivnosti.

Za meritev temperature goriva potrebujemo poseben gorivni element z vgrajenimi termočleni. V sredici TRIGA reaktorja je vedno vsaj en tak instrumentiran element. Ponavadi ga postavimo na mesto, kjer pričakujemo največjo temperaturo goriva v sredici. Signal s tega elementa je speljan direktno na komandno mizo na poseben prikazovalnik, da lahko operater ves čas nadzira temperaturo goriva. Prikazovalnik temperature goriva na komandni mizi pa za našo meritev ni najbolj ustrezen. Zaradi velike skale (polna skala  $1200^{\circ}\text{C}$ ) pri temperaturah goriva do  $\sim 200^{\circ}\text{C}$ , kolikor doseže temperatura goriva pri polni moči, odčitki niso zelo zanesljivi. Demonstrator naj zato poskrbi, da se bo temperatura goriva risala tudi na rekorderski papir, kjer lahko območje bolj ustrezno nastavimo. Najlažje pa natančno vrednost temperature odčitamo z merilnika reaktivnosti – DMR.

Moč lahko odčitavamo z linearnega kanala, vendar je tudi tu zanesljivost meritev bistveno boljša, če uporabimo digitalni merilnik reaktivnosti. Moč oziroma fluks, ki ga preko DMR rišemo na rekorderski papir, je v relativnih enotah, ki jih hitro lahko pretvorimo v fizikalne enote, če umerimo vsaj eno točko. Najmanjšo napako bomo naredili, če bomo umerili zadnjo točko pri 250 kW. Ker med dviganjem moči signal fluksa naraste za več redov velikosti, sled fluksa na rekorderskem papirju večkrat popiše celotno skalo in preskoči ponovno na začetek. Vsakokrat, ko fluks preskoči območje, se njegova vrednost poveča za desetkrat (glej tudi praktični primer, priložen vaji), kar moraš upoštevati pri odčitavanju rezultatov.

Spremembo reaktivnosti ob vsakokratnem dvigu moči odčitaj iz umeritvenih krivulj kontrolnih palic. Demonstrator bo sicer poskrbel, da se bo reaktivnost preko DMR zapisovala tudi na rekorderski papir, vendar zaradi takojšnjega delovanja temperaturnih povratnih efektov odčitki niso vedno dobri, kot je omenjeno v podpoglavju 2.4. Zato si na vsakem koraku zapiši položaj kontrolnih palic, da boš kasneje lahko iz umeritvenih krivulj odčital spremembo reaktivnosti. Meritve lahko vpisuješ tudi v tabelo 8.1.

Meritev bomo izvedli z izključenim sistemom za hlajenje vode v reaktorskem tanku, da bomo zmanjšali fluktuacije med meritvami. Zato pa moramo meritev pri višjih močeh opraviti hitro, da se voda v reaktorski posodi ne bo preveč segrela. V začetku so zato lahko koraki, s katerimi dvigamo moč, manjši, nekaj kW, pri večjih močeh pa nekaj 10 kW.

Vse merjene količine lahko zapisuješ kar na rekorderski papir, če želiš, pa tudi v tabelo. Pred začetkom meritve si zapiši vse potrebne podatke (merilno območje za temperaturo goriva in reaktivnost). Pred in po meritvi kontroliraj tudi temperaturo vode v reaktorski posodi.

Meritev začni pri  $\sim 2$  kW. Operater naj stabilizira moč reaktorja in sicer tako, da so varnostna, tranzientna in kompenzacijska palica popolnoma izvlečene. Zapiši si trenutno območje fluksa (s pomočjo napotkov demonstratorja ga odčitajš kar s tokovnega ojačevalnika). Ko je moč stabilna, si zapiši položaj kontrolnih palic. Določi nov nivo moči in odčitaj iz priložene starejše meritve koeficienta moči (slika 8.1) ter umeritvene krivulje za regulacijsko palico nov položaj palice. Operater naj moč povečuje le z izvlačenjem regulacijske palice. Po vsaki spremembi si potem, ko je doseženo stacionarno stanje, zapiši nov položaj regulacijske palice.

Ko je po zadnjem povečanju moči dosežena maksimalna moč reaktorja, 250 kW, ponovi vajo tako, da v enakih korakih regulacijsko palico spet vstavljaš in s tem na merilniku reaktivnosti lahko odčituješ negativne skoke reaktivnosti.

Po končani meritvi analiziraj rezultate. Na vsakem koraku poišči za dani položaj regulacijske palice pripadajočo reaktivnost hladne sredice. Oceniš jo lahko iz umeritvene krivulje regulacijske palice. Iz razlike reaktivnosti in spremembe temperature goriva med dvema korakoma lahko izračunaš temperaturni koeficient v odvisnosti od temperature. Rezultate nariši na diagram. Nariši še graf  $\rho$  v odvisnosti od temperature goriva in iz naklonskega kota izračunaj še povprečni temperaturni koeficient reaktivnosti goriva.

Iz diagrama  $\rho$  v odvisnosti od moči izračunaj še koeficient moči. Nariši še odvisnost temperature goriva od moči in si oglej, kakšna je njuna zveza.

## 2.4 Naloga

- naredi diagram  $\rho$  v odvisnosti od moči
- izračunaj povprečni  $\alpha_g$  in  $\alpha_p$
- Koliko reaktivnosti moramo vstaviti v reaktor z izvlečenjem kontrolnih palic, da povečamo moč v reaktorju od 0 na 250 kW

## 3 LITERATURA

1. J. R. Lamarsh, A. J. Baratta Introduction to Nuclear Engineering, Prentice Hall, 2001.
2. J. J. Duderstadt, L. J. Hamilton, Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons, New York, 1976
3. Varnostno poročilo za reaktor TRIGA Mark II v Podgorici (Revizija 3), Institut "Jožef Stefan", IJS-DP-5823, Ljubljana, junij 1992.
4. <http://www.rcp.ijs.si/ric/>