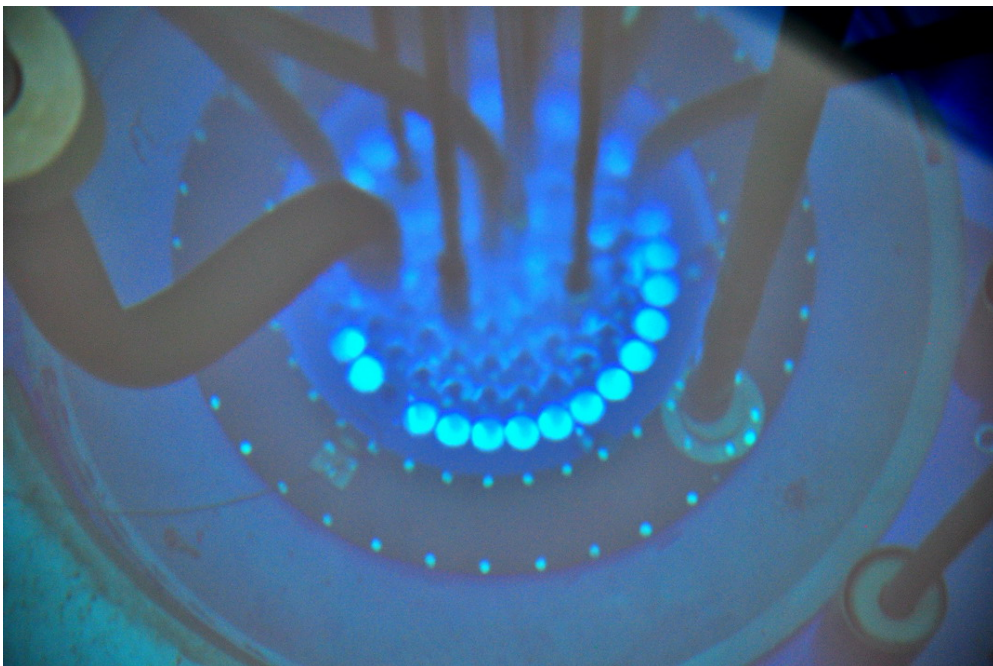

Luka Snoj
Andrej Trkov

TEMPERATURNI KOEFICIENT REAKTIVNOSTI



Ljubljana, oktober 2012

revizija 0

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko
Jedrska tehnika
Tehnika jedrskega reaktorja

Prejšnje izdaje:

1. izdaja 1986, avtorji: *Milan Čopič, Viktor Dimic, Ludvik Lipič, Guido Pregl, Jože Rant*
2. izdaja januar 2007, avtorji: Matjaž Ravnik, Igor Lengar

Revizija: 0

1. izdaja, oktober 2012

Avtorji: *Luka Snoj, Andrej Trkov*

Shranjeno v datoteki: *04_temperaturni_koeficient_reaktivnosti.doc*
zadnjič shranjen 2.11.2012 23:01:00

Tiskano: 2.11.2012 23:22:00

KAZALO

1	KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE	4
2	TEORETIČNE OSNOVE	4
3	IZVEDBA VAJE	6
3.1	SPLOŠNI NAPOTKI.....	6
3.2	OPREMA PRI VAJI.....	6
3.3	MERITEV	7
4	NALOGA	8
5	LITERATURA	8
6	PRILOGE	9
6.1	PRIMER MERITEV.....	9
6.2	UMERITVENE TABELE KONTROLNIH PALIC	10

1 KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE

Negativni temperaturni koeficient reaktivnosti je osnovna varnostna zahteva vsakega jedrskega reaktorja, saj je le tako lahko reaktor stabilen.

Namen vaje je opazovati, kako se z izvlačenjem kontrolnih palic povečuje moč reaktorja ter viša temperatura goriva. Slušatelj:

1. Opazuje odziv moči, temperature in reaktivnosti reaktorja po hitri spremembi reaktivnosti, povzročeni s premikom regulacijske palice
2. Spozna in preveri povratni vpliv temperature goriva na reaktivnost in moč reaktorja, kar je pogoj za razumevanje pojmov temperaturni reaktivnostni koeficient goriva in koeficient moči ter defekt temperature in moči.

2 TEORETIČNE OSNOVE

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

Definiran je kot:

$$\alpha_g = \frac{\Delta\rho}{\Delta T_g} \quad (1.1)$$

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

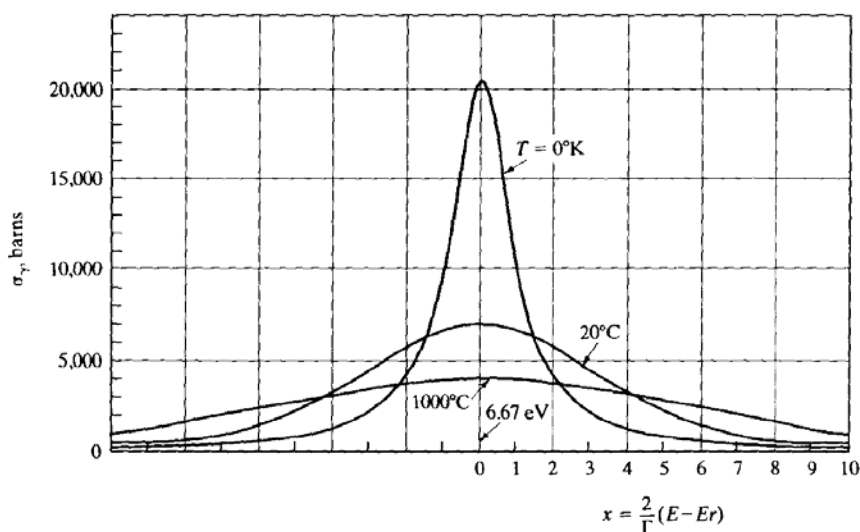
Reaktorji TRIGA so znani po velikem, negativnem in promptnem koeficientu reaktivnosti goriva, zaradi česar je upravljanje in obratovanje teh reaktorjev izredno varno. Vsaka sprememba moči in s tem temperature goriva namreč takoj vpliva na obratno spremembo reaktivnosti, zaradi česar se v reaktorju hitro 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 odrazi tudi na moderatorju v gorivnem elementu, in oba, tako gorivo kot moderator, takoj vplivata nazaj na reaktivnost sredice.

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}U , kot je prikazano na sliki 2.1.



Slika 1: Oblika preseka resonance s srednjo energijo 6.67eV v ^{238}U v odvisnosti od energije pri treh različnih temperaturah.

Kot je razvidno s slike 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 intenziteto absorpcije 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. Izkaže pa se, da je v homogenem pomnoževalnem mediju temperaturni reaktivnostni koeficient načeloma negativen ali pa se približa ničli.

Dopplerjev efekt je značilen za vse reaktorje, ki kot gorivo vsebujejo tudi ^{238}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}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 α_g . Na tak način izmerjen koeficient α_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 moramo poznati porazdelitev temperature po sredici.

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.

3 IZVEDBA VAJE

3.1 Splošni napotki

Reaktor naj bo hladen in nezastrupljen, da ne moti meritev počasi spreminjajoča se negativna reaktivnost zaradi cepitvenega produkta ^{135}Xe . Z reaktorjem upravlja operater. Navodila operaterju daje vodja vaj oziroma demonstrator. Za vstop v halo reaktorja in na ploščad je potrebno dobiti dovoljenje operaterja.

Vse meritve si najprej zapiši in šele nato opravi preračune. Zraven meritev piši tudi komentarje, kaj si spremenil, kaj si izmeril in podobno.

Pred začetkom vaje naj demonstrator pripravi digitalni merilnik reaktivnosti in rekorder za meritev. Ker je rekorder vezan na DMR, so merilna območja na rekorderju ista kot na merilniku reaktivnosti. Na zaslonu DMR bomo spremljali spreminjanje reaktivnosti, temperature in potek fluksa. Istočasno bomo vse signale, reaktivnost, temperaturo in fluks, zapisovali tudi na rekorder za kasnejšo obdelavo. Pred meritvijo si zato na rekordski papir zapiši vse potrebne podatke (hitrost papirja, merilno območje za reaktivnost, ničlo reaktivnosti). Moč reaktorja bomo odčitavali iz prikazovalnika na komandni plošči.

3.2 Oprema pri vaji

- Gorivni element z vgrajenim termočlenom,
- digitalni merilnik reaktivnosti (DMR) z rekorderjem,
- instrumentacija za komandnim pultom,
- umeritvena krivulja regulacijske palice,

Vrednost določene kontrolne palice pri določenem položaju vstavitve je negativna reaktivnost, ki jo ima reaktor, če v kritičen reaktor vstavimo to kontrolno palico do tega položaja. Umeritvena krivulja je diagram (ali tabela), ki popisuje vrednost kontrolne palice v odvisnosti od položaja (globine) vstavitve (glej prilogo).

3.3 Meritev

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 ~ 2 kW do polne moči 250 kW. Pri posameznem koraku ocenimo dvig izbrane kontrolne palice (število korakov koračnega motorja kontrolne palice), 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°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 red velikosti (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 ~ 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 odčitaš 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 6.1) 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 ρ v odvisnosti od temperature goriva in iz naklonskega kota izračunaj še povprečni temperaturni koeficient reaktivnosti goriva.

Iz diagrama ρ v odvisnosti od moči izračunaj še koeficient moči. Izračunaj tudi defekt moči $\sum_0^P \alpha_p \cdot \Delta P$ in temperaturni defekt $\sum_{T_0}^T \alpha_T \cdot \Delta T$. Na koncu nariši še odvisnost temperature goriva od moči in si oglej, kakšna je njuna zveza.

4 NALOGA

- predstavi rezultate meritev v obliki tabel in diagramov, temperaturni koeficient goriva, temperaturni koeficient moči ter defekt temperature in moči
- nariši diagram odvisnosti temperature od moči
- oceno natančnosti rezultatov,
- oceni negotovosti rezultatov

5 LITERATURA

1. RAVNIK, Matjaž, SNOJ, Luka. Reaktorska in radiacijska fizika : vaje. Ljubljana: Fakulteta za matematiko in fiziko, 2007. 71 str
2. Duderstadt-Hamilton, Nuclear reactor analysis, John Wiley & Sons, NY, 1976
3. Lamarsh-Baratta, Introduction to nuclear engineering, Prentice Hall, NY, 2001

6.2 Umeritvene tabele kontrolnih palic

Tabela 6-2: Umeritvena tabela regulacijske palice

SREDICA 191

Ljubljana, 12.12.2011

VREDNOSTI REGULACIJSKE PALICE NA POSAMEZNIH POZICIJAH

Korak	Vred./pcm
181	0.0
186	0.3
191	1.1
196	2.4
201	4.2
206	6.6
211	9.5
216	13.0
221	17.0
226	21.5
231	26.6
236	32.1
241	38.3
246	44.9
251	52.1
256	59.9
261	68.3
266	77.0
271	86.4
276	96.3
281	106.8
286	117.8
291	129.4
296	141.5
301	154.1
306	167.3
311	181.0
316	195.3
321	210.1
326	225.4
331	241.3
336	257.7
341	274.6
346	292.0
351	310.0
356	328.4
361	347.4
366	366.8
371	386.7
376	407.1
381	428.0
386	449.3
391	471.1
396	493.4
401	516.0
406	539.1
411	562.6
416	586.5

Korak	Vred./pcm
421	610.7
426	635.4
431	660.4
436	685.7
441	711.4
446	737.4
451	763.8
456	790.4
461	817.2
466	844.4
471	871.8
476	899.5
481	927.3
486	955.4
491	983.7
496	1012.1
501	1040.8
506	1069.6
511	1098.5
516	1127.6
521	1156.8
526	1186.0
531	1215.4
536	1244.9
541	1274.4
546	1304.0
551	1333.7
556	1363.3
561	1393.0
566	1422.8
571	1452.5
576	1482.2
580	1511.9
585	1541.6
590	1571.2
595	1600.8
600	1630.3
605	1659.7
610	1689.1
615	1718.4
620	1747.6
625	1776.7
630	1805.6
635	1834.5
640	1863.2
645	1891.7
650	1920.1
655	1948.3

Korak	Vred./pcm
660	1976.3
665	2004.1
670	2031.7
675	2059.1
680	2086.3
685	2113.2
690	2139.8
695	2166.1
700	2192.2
705	2217.9
710	2243.4
715	2268.4
720	2293.1
725	2317.5
730	2341.4
735	2364.9
740	2388.0
745	2410.7
750	2432.8
755	2454.5
760	2475.7
765	2496.4
770	2516.5
775	2536.1
780	2555.0
785	2573.4
790	2591.2
795	2608.3
800	2624.7
805	2640.5
810	2655.6
815	2670.0
820	2683.7
825	2696.6
830	2708.8
835	2720.1
840	2730.8
845	2740.6
850	2749.6
855	2757.7
860	2765.1
865	2771.6
870	2777.3
875	2782.1
880	2786.0
885	2789.0
890	2791.2
895	2792.6
900	2793.0

Izmeril: