

# **Praktikum IV**

## **Kritični eksperiment in odziv na spremembe 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>KRITIČNI EKSPERIMENT .....</b>	<b>5</b>
1.1	KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE .....	5
1.2	OSNOVE .....	5
1.3	IZVEDBA VAJE .....	8
1.3.1	<i>Splošni napotki .....</i>	8
1.3.2	<i>Oprema pri vaji .....</i>	8
1.3.3	<i>Izvor nevtronov.....</i>	9
1.3.4	<i>Približevanje kritičnosti.....</i>	9
1.3.5	<i>Podkritično pomnoževanje.....</i>	10
1.4	NALOGA.....	10
<b>2</b>	<b>ODZIV REAKTORJA NA SPREMEMBO REAKTIVNOSTI.....</b>	<b>11</b>
2.1	KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE .....	11
2.2	OSNOVE .....	11
2.2.1	<i>Spremembe moči pri nizkih močeh reaktorja.....</i>	11
2.2.2	<i>Spremembe moči reaktorja v območju obratovalnih moči .....</i>	13
2.3	IZVEDBA VAJE .....	14
2.3.1	<i>Področje majhnih moči.....</i>	14
2.3.2	<i>Določitev točke jedrskega gretja (point of adding heat).....</i>	14
2.3.3	<i>Obratovalna moč .....</i>	15
2.4	NALOGA.....	15
<b>3</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>PRILOGE.....</b>	<b>15</b>
4.1	UMERITVENE TABELE KONTROLNIH PALIC .....	15



# 1 KRITIČNI EKSPERIMENT

## 1.1 Kratek opis in namen vaje

Približevanje kritičnosti je eden od osnovnih eksperimentov v reaktorski fiziki. Uporablja se za določanje kritičnega števila gorivnih elementov in kritičnega položaja kontrolnih palic. Poleg tega, da je eksperiment poučen, saj študent praktično spozna in meri količine kot so presežna reaktivnost, pomnoževalni faktor, podkritično pomnoževanje, ki jih sicer sreča samo v teoriji, ima kritični eksperiment tudi uporabno vrednost. Redno se namreč izvaja tako na eksperimentalnih kot tudi energijskih reaktorjih po menjavi goriva ali premeščanju goriva.

Namen vaje je opazovati, kako se z izvlečenjem kontrolnih palic povečuje pomnoževalni faktor sistema in doseže kritični položaj kontrolnih palic, pri katerem poteka samovzdrževana verižna reakcija.

## 1.2 Osnove

Najpomembnejši parameter, ki popisuje stanje reaktorja, je pomnoževalni faktor  $k$ .

- $k < 1$  – reaktor je podkritičen, vsaka generacija nevtronov je manj številna od prejšnje, število nevtronov in moč pada. Če je v reaktorju neodvisen izvor nevtronov, se število nevtronov ustali in postane sorazmerno neodvisnemu izvoru nevtronov. Če tega umaknemo, nevtronska populacija izumre.
- $k = 1$  – reaktor je kritičen, vsaka generacija nevtronov je enako številna kot prejšnja, moč je poljubna in ni odvisna od zunanjega izvora nevtronov.
- $k > 1$  – reaktor je nadkritičen, vsaka generacija nevtronov je bolj številna od prejšnje, število nevtronov in s tem moč narašča.

Ob normalnem obratovanju je  $k \approx 1$  - blizu kritičnosti.

Reaktivnost ( $\rho$ ) je definirana kot  $\rho = \frac{k-1}{k}$

$\rho < 0$  - podkritičen sistem

$\rho = 0$  - kritičen sistem

$\rho > 0$  - nadkritičen sistem

Enote:

Reaktivnost v pcm (per cent mile) :  $\rho[\text{pcm}] = \frac{k-1}{k} \times 10^5$

Reaktivnost v \$:  $\rho[\$] = \frac{k-1}{k\beta}$

$\beta$  je delež zakasnelih nevtronov.

V reaktorju TRIGA je  $\beta = 0.00700$

Za reaktor TRIGA velja:  $\rho[\$] = \frac{\rho[\text{pcm}]}{700} \times k \approx \frac{\rho[\text{pcm}]}{700}$  (za reaktor blizu kritičnosti)

oziroma:  $1 \$ = 1 \beta = 0,007 = 0,7 \% = 700 \text{ pcm}$

V kritičnem reaktorju se produkcija nevtronov v fisijskem materialu ravno pokriva z izgubami nevtronov, to je z absorpcijo nevtronov v gorivu in konstrukcijskem materialu ter pobegom nevtronov iz reaktorja. Če v kritičen reaktor vstavimo kontrolne palice, postane reaktor podkritičen, ker se absorpcija nevtronov poveča. Stacionarna samovzdrževana verižna reakcija v podkritičnem sistemu ni možna. Pomnoževalni faktor takšnega sistema je manjši od 1, kar pomeni, da ima vsak nevtron v reaktorju v povprečju manj kot enega potomca. Če z zunanjim neodvisnim izvorom (npr. Ra-Be izvor) vnesemo v reaktor neko populacijo nevtronov, se bo ta v reaktorju pomnožila, a bo takoj izumrla, če izvor nevtronov umaknemo iz reaktorja. Število nevtronov v reaktorju je sorazmerno številu nevtronov, ki jih seva izvor.

Za podkritičen reaktor v stacionarnem stanju, v katerem je neodvisen izvor nevtronov, lahko izpeljemo preprosto zvezo med številom nevtronov v reaktorju  $N$  in pomnoževalnim faktorjem  $k$ . Zveza je uporabna, ker spreminjanje števila nevtronov lahko merimo z nevtronskimi detektorji in določimo, kako se spreminja  $k$ .

Predpostavimo, da imamo v reaktorju neodvisen, necepitveni izvor nevtronov, ki emitira  $S$  nevtronov na sekundo. Predpostavimo, da je reaktor podkritičen in ima pomnoževalni faktor  $k$ . Predpostavimo tudi, da je število nevtronov v reaktorju  $N$  časovno ustaljeno in da merimo signal  $I$ , ki je temu številu sorazmeren.

Nevtroni iz izvora (v našem primeru palica z mešanico Ra-Be, radij seva delce  $\alpha$ , ki iz berilija izbijajo nevtrone z  $(\alpha, n)$  reakcijo) zaidejo v gorivo (uran) in se  $k$ -krat pomnožijo. Prav tako se pomnožijo njihovi potomci in tako naprej. Celotno število nevtronov, ki nastanejo v časovni enoti, je vsota tistih, ki jih seva izvir ( $S$ ) njihovih potomcev ( $kS$ ), potomcev njihovih potomcev ( $k^2S$ ) in tako naprej, kar lahko zapišemo v sledeči obliki:

$$\begin{aligned} I &\propto N \propto S + kS + k^2S + k^3S + \dots \\ &= S(1 + k + k^2 + k^3 + \dots) = \frac{S}{(1-k)} \Rightarrow I \propto \frac{S}{(1-k)} \end{aligned} \quad (1.1)$$

Vrsta se da sešteti, ker je  $k < 1$ . Zato ta zveza velja samo za podkritični reaktor. Vidimo, da se v podkritičnem reaktorju v povprečju vsak nevtron, ki ga emitira izvor, pomnoži za faktor

$$M = \frac{1}{1-k} \quad (1.2)$$

M imenujemo 'faktor podkritičnega pomnoževanja'. Vidimo, da je obratno sorazmerno  $1-k$ . Bliže, kot je reaktor kritičnosti, večje je pomnoževanje in pri  $k=1$  faktor  $M$  divergira oziroma postane nedoločen. Praktično to pomeni, da število nevtronov pri kritičnosti močno naraste in da nastopi samovzdrževana verižna reakcija (število nevtronov-fluks- in moč reaktorja pa sta še vedno mnogo manjša kot pri obratovanju na moči). Če umaknemo neodvisni izvor iz reaktorja, nevtronska populacija ne izumre.

Zaključimo lahko, da:

- je število nevtronov v podkritičnem reaktorju obratno sorazmerno  $(1-k)$ ,
- število nevtronov v reaktorju divergira kot  $1/(1-k)$ , ko se približujemo kritičnosti,
- je celotno število nevtronov v podkritičnem reaktorju sorazmerno jakosti izvora  $S$ . Če izvor umaknemo ( $S=0$ ), populacija nevtronov izumre ( $N \rightarrow 0$ )
- število nevtronov pri kritičnosti ( $k=1$ ) ni določeno in ni odvisno od  $S$ . Tudi če izvor umaknemo, populacija nevtronov ne izumre

Formula (1.1) nam daje preprosto zvezo med številom nevtronov  $I$ , ki jih detektiramo v podkritičnem reaktorju in pomnoževalnim faktorjem sistema  $k$ . Formulo (1.2) lahko uporabimo za določanje pozicije kontrolnih palic, pri kateri bo reaktor postal kritičen. Če predpostavimo, da pomnoževalni faktor,  $k$ , narašča sorazmerno z izvlekom kontrolne palice, in če merimo  $I$  po več zaporednih izvlekih kontrolnih palic, lahko z ekstrapolacijo ocenimo, pri kateri poziciji kontrolnih palic bo reaktor postal kritičen.

Formulo lahko uporabimo tudi za določevanje kritičnega števila gorivnih elementov ob predpostavki, da je  $k$  sorazmeren številu gorivnih elementov. Vsakič, ko dodamo gorivni element v reaktor, izmerimo nevtronski signal. Rišemo diagram:  $1/M$  v odvisnosti od števila gorivnih elementov. V skladu s formulo (2) bi moral biti ta graf premica, ki seka absciso pri kritičnem številu gorivnih elementov. Z linearno ekstrapolacijo lahko pri vsakem koraku vnaprej določimo kritično število elementov in presodimo, ali v naslednje koraku še lahko dodamo gorivi element, ne da bi presegli kritično število. Namesto števila gorivnih elementov lahko na absciso nanašamo maso urana (npr. če gorivni elementi vsebujejo različno količino urana). S tem določimo kritično maso reaktorja.

Ko reaktor postane kritičen, je moč običajno še zelo nizka (tipično  $10^{-4}$  polne moči), čeprav se je glede na podkritično stanje število nevtronov in cepitev že močno povečalo (tipično za faktor  $10^5$ ). Neodvisni izvor postane nepomemben, saj je cepitveno pomnoženih nevtronov mnogo več kot tistih, ki jih seva izvor. Samovzdrževana verižna reakcija poteka, vendar je število cepitev (in s tem moč) še premajhno, da bi se temperaturi goriva in hladilne vode v sredici zaradi tega znatno povišali. Povzemimo nekatere značilnosti, ki so pomembne za

razumevanje prehoda iz podkritičnega pomnoževanja v samovzdrževano cepitveno verižno reakcijo v reaktorju, oziroma pri prehodu na kritičnost reaktorja: Populacija nevtronov je stacionarna, če je reaktivnost reaktorja enaka nič, torej, če je reaktor kritičen.

Če je reaktivnost različna od nič, populacija nevtronov reaktorja narašča pri pozitivni reaktivnosti in pada pri negativni reaktivnosti.

Število nevtronov in moč nista odvisni od neodvisnega izvora. Če ga umaknemo iz reaktorja, se ne spremenita.

Pri konstantni reaktivnosti populacija nevtronov v reaktorju asimptotsko narašča ali pada eksponencialno s časom:

$$N(t) = N(t=0)e^{\frac{t}{T}} \quad (1.3)$$

kjer je T asimptotska perioda reaktorja. Bolj podrobno so značilnosti obratovanja reaktorja v področju nizkih moči obdelane v vaji "Odziv na spremembo reaktivnosti".

## **1.3 Izvedba vaje**

### **1.3.1 Splošni napotki**

Reaktor naj bo hladen in nezastrupljen, da ne moti meritev počasi spreminjajoča se negativna reaktivnost zaradi cepitvenega produkta  $^{135}\text{Xe}$ . 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.

### **1.3.2 Oprema pri vaji**

- fisijska celica (startni kanal), ki je del standardne instrumentacije reaktorja
- linearni in logaritemski kanal, ki je del standardne instrumentacije reaktorja
- umeritvene krivulje kontrolnih palic (priloga)
- kalkulator
- štoparica
- papir in svinčnik

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).

### 1.3.3 Izvor nevtronov

Izvor nevtronov v reaktorju TRIGA je homogena mešanica radija in berilija. Radij je radioaktiven element, ki pretežno seva delce alfa. Le-ti se absorbirajo v jedrih berilija, ki zato razpadejo ter oddajo nevtrone. Izvor daje približno  $10^6$  nevtronov na sekundo. Vstavljen je v aluminijasto palico, ki ima podobne dimenzije kot gorivni element.

### 1.3.4 Približevanje kritičnosti

Vajo pričnemo z vstavljenim izvorom in z vstavljenimi vsemi kontrolnimi palicami (regulacijska, kompenzacijska, pulzna in varnostna, oznake R, K, P, V). Zaradi tega je reaktor podkritičen. Postopoma bomo iz sredice izvlačili kontrolne palice. S tem bomo dodajali reaktivnost, dokler ne bo reaktor postal kritičen.

Število nevtronov v reaktorju merimo s fisisko celico, signal iz nje pa odčitavamo na indikatorju startnega kanala v komandni sobi. Z meritvijo števila nevtronov v odvisnosti od vstavljenosti kontrolnih palic lahko določimo, za koliko korakov moramo še izvleči kontrolne palice, da bo reaktor kritičen.

Ko so vse kontrolne palice vstavljene v sredico, izmeri začetni signal na startnem kanalu,  $I_0$ . S postopnim izvlečenjem kontrolnih palic (po vrsti: P, V, K, R) se v več korakih približaj kritičnosti. V prvem koraku izvleci pulzno palico v celoti. Pred izvlečenjem posamezne kontrolne palice iz umeritvene tabele ali krivulje razberi, kolikšno reaktivnost bomo z izvlečenjem palice dodali ter si jo zapiši. Operaterju sporoči, na katero pozicijo naj izvleče izbrano kontrolno palico, s katero bomo vstavili želeno reaktivnost. Ko izvleče kontrolno palico, najprej počakaj, da se vrednost na startnem kanalu ustali, nato pa izmeri signal na startnem kanalu,  $I_i$ . Nato izračunaj kvocient  $I_0/I_i$ . Vse meritve in izračune vnašaj v tabelo ter riši 1/M diagram: kvocient  $I_0/I_i$  v odvisnosti od vstavljene reaktivnosti (na absciso nanašaj vstavljeno reaktivnost razbrano z umeritvenih krivulj ali tabel, na ordinato pa nanašaj kvocient  $I_0/I_i$ ). Iz enačbe (1) lahko razberemo, da bo pri kritični sredici ( $k=1$ ) kvocient  $I_0/I_i$  imel vrednost nič. Na vsakem koraku z linearno ekstrapolacijo iz zadnjih dveh korakov oceni, koliko reaktivnosti še manjka do kritičnosti. Presečišče ekstrapolacijske premice in abscisne osi določa celotno vstavljeno reaktivnost, pri kateri bo reaktor kritičen. Ker je takšna ocena zelo groba, se pred neželenim povečanjem pomnoževalnega faktorja zavarujemo tako, da v naslednjem koraku vstavimo največ polovico reaktivnosti, ki je po izračunu še potrebujemo do kritičnosti.

Na ta način dosežemo kritičnost reaktorja z izvlečenjem kontrolnih palic v več korakih. Pri vsakem koraku je postopek naslednji:

- Določimo, kolikšno reaktivnost vstavimo v sredico ter vrednost zapišemo v tabelo.

- Iz umeritvenih krivulj ali tabel razberemo, na katero pozicijo moramo izvleči izbrano kontrolno palico.
- Operaterju sporočimo, na katero pozicijo naj izvleče kontrolno palico.
- Počakamo, da se vzpostavi stacionarno stanje, to je, da se vrednost na startnem kanalu približno ustali.
- Izmerimo signal na startnem kanalu,  $I_i$  ter vrednost zapišemo. Časovni interval štetja določimo tako, da se v njem prešteje vsaj 100 sunkov (tipično: 100s). Meri vsaj tri časovne intervale in rezultat povpreči.
- Izračunamo kvocient  $I_0/I_i$ , ga zapišemo ter vrednost narišemo na diagram.
- Z ekstrapolacijo določimo koliko reaktivnosti še manjka do kritičnosti .

Postopek ponavljamo toliko časa, dokler ne dosežemo kritičnosti. Kako vemo, kdaj je dosežena kritičnost? Kvalitativni pokazatelj, da se približujemo kritičnosti, je dolžina trajanja naraščanja signala. Čas, ki je potreben, da se vzpostavi približno stacionarno stanje, potem ko izvlečemo kontrolno palico, je tem večji, čim bliže je reaktor kritičnosti. Nedvomno pa se prepričamo, da je reaktor kritičen tako, da izvlečemo nevtronski izvor. Če se signal na startnem kanalu in s tem število nevtronov v reaktorju ustali na neki določeni vrednosti, je reaktor ravno kritičen. Če po prenehanju prehodnega pojava, ki nastane zaradi izvlečenja izvora, število nevtronov oziroma signal na startnem kanalu pada, je reaktor še vedno podkritičen, če pa po izvlečenju število nevtronov narašča, smo kritično točko že presegli.

### 1.3.5 Podkritično pomnoževanje

Preden reaktor postane kritičen (ko sta popolnoma izvlečeni dve kontrolni palici; V in P) naj operater izvleče izvor nevtronov. Opazuj kako se spreminja signal na startnem kanalu ter izračunaj s kakšno periodo se zmanjšuje. Isto napravi, ko je dosežena kritičnost.

## 1.4 Naloga

- Nariši diagram  $I_0/I_i$  v odvisnosti od vstavljenе reaktivnosti in točno določi kritični položaj kontrolnih palic
- Oceni, kolikšen bi bil teoretično pomnoževalni faktor reaktorja, če bi vse kontrolne palice v celoti izvlekli iz reaktorja
- Oceni, kolikšen je bil  $k$  na začetku eksperimenta, ko so bile vstavljenе vse kontrolne palice

## 2 ODZIV REAKTORJA NA SPREMEMBO REAKTIVNOSTI

### 2.1 Kratek opis in namen vaje

Namen vaje je opazovati odziv moči in periode reaktorja na nenadno namerno povzročeno spremembo reaktivnosti pri majhnih močeh in pri obratovalni moči ter praktično preveriti fizikalne modele za popis kinetike reaktorja z opazovanjem odziva spremembe moči reaktorja na spremembe reaktivnosti v področju nizke moči (brez temperaturnih efektov) ter v področju obratovalne moči.

### 2.2 Osnove

Glede na toplotno moč reaktorja TRIGA delimo obratovalna stanja na naslednja:

- območje moči nevtronskega izvora ( $P < 10 \text{ mW}$ ),
- nizke moči ( $10 \text{ mW} < P < 1 \text{ kW}$ ),
- obratovalne moči ( $1 \text{ kW} < P < 250 \text{ kW}$ ).

Med seboj se ločijo po različnih temperaturnih efektih, ki prevladujejo v posameznih območjih moči. Ta tri območja so tipična za vse vrste termičnih reaktorjev, meje med njimi pa so odvisne od tipa reaktorja. Ker je odziv reaktorja na spremembo reaktivnosti odvisen od temperaturnih povratnih efektov, je odvisen tudi od tega, v katerem območju moči se sprememba izvrši. Znotraj istega območja moči se odziv kvalitativno ne spreminja.

Med vajo se bomo spoznali z odzivi na spremembo reaktivnosti pri majhnih močeh in v območju obratovalnih moči.

#### 2.2.1 Spremembe moči pri nizkih močeh reaktorja

Na nizkih močeh lahko zanemarimo doprinose zaradi nevtronskega izvora, gostote toplotne moči pa še niso tako visoke, da bi se temperaturi goriva in hladilne vode v sredici zaradi tega povišali. Zato veljajo za obnašanje moči reaktorja naslednje značilnosti:

- Moč reaktorja je stacionarna, če je reaktivnost reaktorja enaka nič, torej, če je reaktor kritičen.
- Če je reaktivnost različna od nič, moč reaktorja narašča pri pozitivni reaktivnosti in pada pri negativni reaktivnosti.
- Pri konstantni reaktivnosti moč reaktorja asimptotsko narašča ali pada eksponencialno s časom

Časovno obnašanje števila nevtronov v pomnoževalnem sistemu, ki je sorazmerno moči reaktorja  $P$ , lahko opišemo z enačbami točkovne kinetike (glej referenco 2):

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \frac{\rho - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t), \\ \frac{dC_i}{dt} &= \beta_i \frac{1}{\Lambda} P(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (2.1)$$

kjer je

$P$  - moč reaktorja

$\rho$  - reaktivnost  $\rho = \rho(t)$

$\beta$  - delež zakasnelih nevtronov (za reaktor TRIGA 0.007)

$\Lambda$  - življenski čas takojšnjih (promptnih) nevtronov ( $\sim 40\mu\text{s}$ )

$C_i$  - število prednikov zakasnelih nevtronov  $i$ -te grupe

$\lambda_i$  - razpadna konstanta prednikov zakasnelih nevtronov  $i$ -te grupe

Kinetični parametri nevtronov v reaktorju TRIGA so podani v tabeli 2.1

**Tabela 2.1: Kinetični parametri nevtronov v reaktorju TRIGA**

Skupina	$\beta_i$	$\lambda_i [\text{s}^{-1}]$
1	0,00023	0,0124
2	0,00153	0,0305
3	0,00137	0,1115
4	0,00276	0,3010
5	0,00080	1,2380
6	0,00029	3,0100
vsota	0,00700	-

Splošna rešitev sistema enačb (2.1) je v asimptoti  $t \rightarrow \infty$

$$P(t) \propto e^{\frac{t}{T}} \quad (2.2)$$

„Po vstavitvi nastavka (2.2) v (2.1), dobimo zvezo med reaktivnostjo  $\rho$  in časovno konstanto  $T$ , ki jo imenujemo "asimptotska perioda reaktorja“:

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (2.3)$$

Če vseh šest grup zakasnelih nevtronov združimo,

$$\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta \quad \text{in} \quad \lambda_i = \lambda,$$

kjer je  $\lambda$  povprečna razpadna konstanta prednikov (za reaktor TRIGA  $0.08 \text{ s}^{-1}$ ), dobimo približno linearno zvezo med  $\rho$  in  $T$ :

$$\rho \approx \frac{\beta}{1 + \lambda T} \Rightarrow T \approx \frac{\beta - \rho}{\rho \lambda} \approx \frac{\beta}{\rho \lambda} \text{ če } \rho \ll \beta \quad (2.4)$$

Za majhne spremembe reaktivnosti  $\rho \ll \beta$  velja torej:

$$T \propto \frac{1}{\rho} \quad (2.5)$$

Hitro spremembo reaktivnosti spremlja takojšen skok moči reaktorja, ki je tudi sorazmeren spremembi reaktivnosti. Po prenehanju prehodnega pojava, ki traja do nekaj deset sekund, se moč reaktorja ujame na asimptotski potek, dan z enačbo, ki velja, vse dokler ostane reaktivnost reaktorja nespremenjena.

### 2.2.2 Spremembe moči reaktorja v območju obratovalnih moči

Spremembe temperature goriva in moderatorja ter hladila v reaktorju vplivajo na njegovo reaktivnost. Zato se s spreminjanjem moči spreminja tudi reaktivnost reaktorja. Zaradi stabilnosti pa mora biti reaktor konstruiran tako, da se s povečanjem moči reaktivnost reaktorja manjša.

Sedaj je reaktivnost reaktorja sestavljena iz dveh doprinosov:

- vstavljene reaktivnosti, ki jo spreminjamo z dviganjem ali spuščanjem kontrolnih palic, in
- lastne reaktivnosti zaradi temperaturnih povratnih vplivov na reaktivnost, ki jih povzročajo spremembe temperature goriva, hladila in moderatorja v odvisnosti od sprememb moči reaktorja.

Naj velja sledeči dogovor za lastno reaktivnost in za vstavljeno reaktivnost: lastna reaktivnost je nič na območju nizkih moči reaktorja, vstavljeno reaktivnost pa merimo od obeh referenčnih položajev, ki ju imata kompenzacijska in regulacijska palica v stacionarnem stanju pri nizki moči reaktorja. Potem velja naslednje:

- reaktivnost reaktorja je enaka nič, če je vsota vstavljene in lastne reaktivnosti enaka nič. Reaktor obratuje na stalni moči, če je njegova reaktivnost ves čas enaka nič,
- na območju obratovalnih moči je toplotna moč reaktorja enolično določena z vstavljeno reaktivnostjo.

Hitra sprememba reaktivnosti z ene konstantne vrednosti na drugo konstantno vrednost sproži prehodni pojav, ki po preteku nekaj minut pripelje moč reaktorja v novo stacionarno stanje. Pri srednjih močeh do kakih 30 kW je prehodni pojav

dušen, tako da se moč reaktorja približuje novi stacionarni vrednosti asimptotsko. Pri večjih močeh in vstavljenih reaktivnostih pa se zaradi močnejših povratnih vplivov lahko pojavi prenihanje moči preden se ta ustali na novi stacionarni vrednosti.

Pri dovolj počasni spremembi vstavljene reaktivnosti sledi moč reaktorja z rahlo zakasnitvijo spreminjanju reaktivnosti. Razmerje med spremembo vstavljene reaktivnosti in spremembo moči reaktorja je koeficient reaktivnosti moči.

## **2.3 Izvedba vaje**

### **2.3.1 Področje majhnih moči**

Operater naj požene reaktor in stabilizira moč na  $\sim 100$  W in sicer tako, da moč uravnava samo z regulacijsko palico. Ko je reaktivnost nič in je moč stabilna, zapiši na rekorderski papir moč ter položaj regulacijske palice. Ob vsaki spremembi si na papir zapisuj nove podatke.

Z dvigom regulacijske palice naj operater poveča reaktivnost za  $\sim 40$  pcm ( $1 \text{ pcm} = 10^{-5}$ ). Za koliko korakov mora dvigniti regulacijsko palico, oceni iz umeritvene krivulje. Opazuj dvig reaktivnosti in naraščanje moči oziroma fluksa, vendar ne predolgo, da ne prideš v področje, kjer že delujejo temperaturni povratni efekti. Po prenehanju prehodnega pojava ( $\sim 10$  s) s štoparico izmeri čas, v katerem se moč podvoji, in izračunaj periodo, s katero moč narašča. Za kontrolo lahko čas odčitaš tudi kar iz rekorderskega papirja, če poznaš hitrost zapisa. Dobro je, če vas meri več hkrati (vsaj trije) ter nato rezultat povprečite. Po končani meritvi naj operater vrne regulacijsko palico na začetni položaj. Opazuj, kje se uravnesita reaktivnost in moč. Operater naj nato vrne moč na začetno vrednost ( $\sim 100$  W). Ko je ponovno doseženo ravnovesno stanje, naj operater s ponovnim dvigom regulacijske palice (za koliko, oceni iz umeritvene krivulje) poveča reaktivnost za  $\sim 80$  pcm. Izmeri periodo. Preveri, ali velja približna recipročna zveza (enačba 3) med periodo in spremembo reaktivnosti. Ko končaš meritev, naj operater prestavi regulacijsko palico na izhodiščno lego. Spet opazuj reaktivnost in fluks.

Kot primer je priložen rekorderski zapis stopničaste spremembe reaktivnosti na nizki moči.

### **2.3.2 Določitev točke jedrskega gretja (point of adding heat)**

Operater ustali moč reaktorja na nekaj 100 W. Regulacijsko palico izvleče za približno 80 pcm. Moč začne naraščati, najprej eksponencialno, nato pa se postopoma stabilizira na določeni vrednosti (tipično nekaj 10 kW). Reaktivnost je najprej konstantna (dokler temperatura ne naraste), potem pa pada od začetne

vrednosti (8 pcm) proti nič zaradi temperaturnih povratnih efektov. Točka jedrskega gretja (point of adding heat) je pri tisti moči, ko se začne začetna vstavljena reaktivnost zmanjševati zaradi temperaturnih povratnih efektov (tipično 1 kW).

### **2.3.3 Obratovalna moč**

Operater naj z dvigom regulacijske palice poveča moč reaktorja na ~ 40 kW, prisilno hlajenje naj bo izključeno. Demonstrator naj preveri, če je merilno območje za reaktivnost na digitalnem merilniku reaktivnosti ustrezno.

Ko so razmere v sredici uravnovešene, zapiši moč in položaj regulacijske palice. Iz umeritvene krivulje oceni, za koliko korakov mora operater dvigniti regulacijsko palico, da se bo reaktivnost povečala za ~ 100 pcm. Na rekorderskem zapisu opazuj vpliv temperaturnih povratnih efektov na reaktivnost in na moč.

Ko reaktivnost pade na nič in ko se moč stabilizira na novem nivoju, vrni regulacijsko palico na prejšnji položaj. Spet opazuj reaktivnost in moč in preveri, če se je moč vrnila na začetno stanje.

## **2.4 Naloga**

- Nariši diagram inverzna vrednost reaktorske periode v odvisnosti od vstavljene reaktivnosti ter preveri, če velja linearna odvisnost inverzne periode od reaktivnosti.
- primerjaj rezultate meritev asimptotske periode reaktorja, izračunano reaktivnost po enačbah (2.2) in (2.3) ter odčitek iz merilnika reaktivnosti,
- določi točko jedrskega gretja (point of adding heat).

## **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/>

## **4 PRILOGE**

### **4.1 Umeritvene tabele kontrolnih palic**

**Tabela 5.1: Umeritvena tabela regulacijske palice**  
**SREDICA 189**

Ljubljana, 22.12.2008

VREDNOSTI **REGULACIJSKE** PALICE NA POSAMEZNIH POZICIJAH

Korak	Vred./pcm
181	0.0
186	0.3
191	1.0
196	2.3
201	4.2
206	6.5
211	9.4
216	12.7
221	16.6
226	21.0
231	26.0
236	31.4
241	37.4
246	43.8
251	50.8
256	58.3
261	66.3
266	74.9
271	83.9
276	93.4
281	103.4
286	114.0
291	125.0
296	136.5
301	148.5
306	161.1
311	174.1
316	187.6
321	201.5
326	216.0
331	230.9
336	246.3
341	262.2
346	278.5
351	295.3
356	312.6
361	330.3
366	348.4
371	367.0
376	386.0
381	405.5
386	425.4
391	445.7
396	466.4
401	487.5
406	509.0
411	530.9
416	553.2

Korak	Vred./pcm
421	575.9
426	598.9
431	622.3
436	646.1
441	670.2
446	694.6
451	719.4
456	744.5
461	769.9
466	795.6
471	821.6
476	847.8
481	874.3
486	901.1
491	928.1
496	955.4
501	982.9
506	1010.6
511	1038.5
516	1066.5
521	1094.8
526	1123.2
531	1151.7
536	1180.4
541	1209.2
546	1238.1
551	1267.1
556	1296.2
561	1325.3
566	1354.5
571	1383.7
576	1412.9
580	1442.2
585	1471.4
590	1500.6
595	1529.7
600	1558.8
605	1587.8
610	1616.8
615	1645.6
620	1674.3
625	1702.9
630	1731.3
635	1759.5
640	1787.6
645	1815.4
650	1843.1
655	1870.5

Korak	Vred./pcm
660	1897.7
665	1924.6
670	1951.2
675	1977.5
680	2003.5
685	2029.2
690	2054.5
695	2079.5
700	2104.1
705	2128.3
710	2152.1
715	2175.5
720	2198.4
725	2220.9
730	2243.0
735	2264.6
740	2285.7
745	2306.3
750	2326.3
755	2345.9
760	2364.9
765	2383.3
770	2401.2
775	2418.6
780	2435.3
785	2451.4
790	2467.0
795	2481.9
800	2496.2
805	2509.8
810	2522.8
815	2535.2
820	2546.8
825	2557.9
830	2568.2
835	2577.9
840	2586.8
845	2595.1
850	2602.7
855	2609.6
860	2615.7
865	2621.1
870	2625.9
875	2629.9
880	2633.2
885	2635.7
890	2637.5
895	2638.6
900	2639.0



**Tabela 5.2: Umeritvena tabela pulzne palice**  
**SREDICA 189**

Ljubljana, 22.12.2008

VREDNOSTI **PULZNE** PALICE NA POSAMEZNIH POZICIJAH

Korak	Vred./pcm
0	0.0
5	0.0
10	0.2
15	0.5
20	0.8
25	1.3
30	1.9
35	2.6
40	3.4
45	4.3
50	5.3
55	6.5
60	7.7
65	9.1
70	10.7
75	12.3
80	14.2
85	16.1
90	18.2
95	20.5
100	22.9
105	25.5
110	28.3
115	31.2
120	34.4
125	37.7
130	41.2
135	45.0
140	48.9
145	53.0
150	57.4
155	62.0
160	66.9
165	72.0
170	77.3
175	82.9
180	88.8
185	94.9
190	101.5
195	108.2
200	114.9
205	122.2
210	129.8
215	137.6
220	145.8
225	154.3
230	163.1
235	172.2
240	181.7
245	191.5
250	201.6
255	212.0
260	222.8
265	233.9
270	245.4
275	257.2
280	269.4
285	281.9
290	294.7
295	307.9

Korak	Vred./pcm
300	321.5
305	335.4
310	349.6
315	364.2
320	379.2
325	394.5
330	410.1
335	426.1
340	442.5
345	459.1
350	476.1
355	493.4
360	511.1
365	529.0
370	547.3
375	566.0
380	584.9
385	604.1
390	623.6
395	643.5
400	663.6
405	683.9
410	704.6
415	725.6
420	746.7
425	768.2
430	789.9
435	811.9
440	834.0
445	856.4
450	879.1
455	901.9
460	924.9
465	948.1
470	971.5
475	995.1
480	1018.8
485	1042.8
490	1066.8
495	1091.0
500	1115.3
505	1139.8
510	1164.3
515	1188.9
520	1213.7
525	1238.5
530	1263.4
535	1288.3
540	1313.3
545	1338.3
550	1363.4
555	1388.4
560	1413.5
565	1438.6
570	1463.6
575	1488.6
580	1513.6
585	1538.6
590	1563.5
595	1588.3

Korak	Vred./pcm
600	1613.0
605	1637.6
610	1662.1
615	1686.5
620	1710.8
625	1735.0
630	1758.9
635	1782.7
640	1806.4
645	1829.8
650	1853.1
655	1876.1
660	1898.9
665	1921.5
670	1943.8
675	1965.9
680	1987.7
685	2009.2
690	2030.4
695	2051.3
700	2072.0
705	2092.2
710	2112.1
715	2131.7
720	2150.9
725	2169.7
730	2188.2
735	2206.3
740	2223.9
745	2241.1
750	2258.0
755	2274.4
760	2290.2
765	2305.6
770	2320.6
775	2335.1
780	2349.1
785	2362.6
790	2375.7
795	2388.1
800	2400.0
805	2411.5
810	2422.5
815	2432.7
820	2442.5
825	2451.9
830	2460.6
835	2468.5
840	2476.1
845	2483.1
850	2489.4
855	2495.1
860	2500.3
865	2504.9
870	2508.9
875	2512.2
880	2515.0
885	2517.1
890	2518.6
895	2519.6
900	2520.0

**Tabela 5.3: Umeritvena tabela varnostne palice**

**SREDICA 189**

Ljubljana, 22.12.2008

VREDNOSTI **VARNOSTNE** PALICE NA POSAMEZNIH POZICIJAH

Korak	Vred./pcm
200	0.0
205	0.4
210	1.4
215	3.2
220	5.6
225	8.7
230	12.5
235	17.0
240	22.3
245	28.1
250	34.7
255	42.0
260	50.1
265	58.7
270	68.1
275	78.2
280	89.0
285	100.6
290	112.6
295	125.4
300	139.0
305	153.3
310	168.2
315	183.8
320	200.1
325	217.1
330	234.9
335	253.3
340	272.3
345	292.1
350	312.6
355	333.7
360	355.5
365	378.0
370	401.2
375	425.0
380	449.6
385	474.7
390	500.5
395	527.0
400	554.2
405	582.0
410	610.4
415	639.4
420	669.1
425	699.5
430	730.4

Korak	Vred./pcm
435	761.9
440	794.0
445	826.7
450	860.0
455	893.8
460	928.2
465	963.1
470	998.6
475	1034.5
480	1071.0
485	1107.9
490	1145.3
495	1183.2
500	1221.6
505	1260.3
510	1299.4
515	1339.0
520	1378.9
525	1419.1
530	1459.7
535	1500.5
540	1541.7
545	1583.1
550	1624.8
555	1666.7
560	1708.7
565	1750.9
570	1793.3
575	1835.8
580	1878.4
585	1921.0
590	1963.7
595	2006.4
600	2049.1
605	2091.8
610	2134.4
615	2176.9
620	2219.2
625	2261.4
630	2303.5
635	2345.3
640	2386.9
645	2428.2
650	2469.3
655	2510.0
660	2550.4
665	2590.4

Korak	Vred./pcm
670	2630.0
675	2669.2
680	2707.9
685	2746.2
690	2783.9
695	2821.1
700	2857.8
705	2893.9
710	2929.4
715	2964.2
720	2998.4
725	3032.0
730	3064.8
735	3096.9
740	3128.3
745	3158.9
750	3188.7
755	3217.8
760	3246.0
765	3273.4
770	3299.9
775	3325.7
780	3350.5
785	3374.3
790	3397.3
795	3419.4
800	3440.5
805	3460.7
810	3479.8
815	3498.1
820	3515.3
825	3531.6
830	3546.8
835	3561.0
840	3574.2
845	3586.4
850	3597.6
855	3607.7
860	3616.7
865	3624.7
870	3631.7
875	3637.6
880	3642.3
885	3646.1
890	3648.7
895	3650.4
900	3651.0

**Tabela 5.4: Umeritvena tabela kompenzacijske palice**  
**SREDICA 189**

Ljubljana, 22.12.2008

VREDNOSTI **KOMPENZACIJSKE** PALICE NA POSAMEZNIH POZICIJAH

Korak	Vred./pcm
200	0.0
205	0.3
210	1.1
215	2.5
220	4.5
225	7.0
230	10.2
235	13.8
240	18.0
245	22.8
250	28.1
255	34.0
260	40.4
265	47.4
270	55.0
275	63.0
280	71.6
285	80.8
290	90.5
295	100.8
300	111.5
305	123.0
310	134.7
315	147.0
320	159.8
325	173.2
330	187.1
335	201.5
340	216.3
345	231.7
350	247.6
355	263.9
360	280.7
365	298.0
370	315.7
375	333.8
380	352.4
385	371.5
390	391.0
395	410.8
400	431.1
405	451.8
410	472.9
415	494.3
420	516.2
425	538.4
430	560.9

Korak	Vred./pcm
435	583.7
440	606.9
445	630.4
450	654.2
455	678.3
460	702.7
465	727.3
470	752.2
475	777.3
480	802.7
485	828.2
490	854.0
495	879.9
500	906.0
505	932.3
510	958.7
515	985.2
520	1011.8
525	1038.5
530	1065.3
535	1092.2
540	1119.1
545	1146.0
550	1173.0
555	1200.0
560	1226.9
565	1253.8
570	1280.7
575	1307.6
580	1334.3
585	1361.0
590	1387.5
595	1414.0
600	1440.3
605	1466.4
610	1492.4
615	1518.3
620	1543.9
625	1569.3
630	1594.5
635	1619.5
640	1644.2
645	1668.7
650	1692.9
655	1716.8
660	1740.4
665	1763.7

Korak	Vred./pcm
670	1786.7
675	1809.3
680	1831.6
685	1853.6
690	1875.2
695	1896.4
700	1917.2
705	1937.6
710	1957.6
715	1977.2
720	1996.4
725	2015.1
730	2033.4
735	2051.3
740	2068.7
745	2085.6
750	2102.1
755	2118.0
760	2133.6
765	2148.5
770	2163.0
775	2177.0
780	2190.5
785	2203.5
790	2215.9
795	2227.9
800	2239.3
805	2250.2
810	2260.5
815	2270.3
820	2279.6
825	2288.3
830	2296.4
835	2304.1
840	2311.1
845	2317.6
850	2323.5
855	2329.0
860	2333.8
865	2338.0
870	2341.7
875	2344.8
880	2347.4
885	2349.4
890	2350.8
895	2351.7
900	2352.0