

---

Luka Snoj  
Andrej Trkov  
Darko Kavšek

## POGON REAKTORJA



Ljubljana, november 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, Gvido Pregl, Jože Rant*
2. izdaja februar 2007, avtorji: Matjaž Ravnik, Luka Snoj, Darko Kavšek

Revizija: 0

3. izdaja, november 2012

Avtorji: *Luka Snoj, Andrej Trkov, Darko Kavšek*

Shranjeno v datoteki: *11\_pogon\_reaktorja.doc*,  
zadnjič shranjen *20.11.2012 9:56:00*

Tiskano: *22.11.2012 10:35:00*

# KAZALO

<b>1</b>	<b>KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>TEORETIČNE OSNOVE .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>IZVEDBA VAJE .....</b>	<b>5</b>
3.1	SPLOŠNI NAPOTKI.....	5
3.2	OPREMA PRI VAJI.....	5
3.3	NAPOTKI.....	5
<b>4</b>	<b>NALOGA .....</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>PRILOGE.....</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
6.1	SLIKE REAKTORJA TRIGA.....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>

# 1 KRATEK OPIS IN NAMEN VAJE

Med vajo bo študent upravljal z reaktorjem pod nadzorom operaterja.

Namen vaje je da študent:

1. Spozna postopke pri zagonu reaktorja.
2. Praktično opravi zagon reaktorja.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

### 2.1 Zagon reaktorja

Teoretične osnove za razumevanje poteka zagona reaktorja so dane v literaturi (1-2). Pred pričetkom vaje je treba obvladati snov v skripti "Opis reaktorja TRIGA" (Priloga). Osnovni pogoji za varen zagon reaktorja pa so:

- v reaktorju mora biti neodvisen izvir nevtronov, da nevtronski merilnik (Startni kanal) daje dovolj močen signal tudi pri ugasnjem reaktorju. Če v reaktorju ni izvira nevtronov, bi z naglim povečevanjem reaktivnosti (hitrim dvigom regulacijskih palic) lahko dovedli reaktor v močno nadkritično stanje s takojšnjimi nevtroni, ker zaradi statističnih fluktuacij ne bi opazili prekomernega naraščanja nevtronske gostote. Isto se lahko zgodi pri prešibkem izvoru.
- pred zagonom reaktorja je treba vključiti in preveriti delovanje instrumentacije reaktorja.
- vključiti in preveriti je treba instrumentacijo radiološke zaščite.
- preveriti je treba zaščito eksperimentalnih kanalov.
- vključiti in preveriti je treba delovanje pomožnih naprav kot so: prezračevalni sistem, argonski sistem, komunikacijski sistem ...
- preveriti stanje v obsevalnih kanalih.
- iz zapisa v dnevniku pogona reaktorja in predhodnega kontrolnega lista "Test ob zaustavitvi" preveriti ali obstajajo kakršnekoli omejitve obratovanja.
- opraviti je treba "Test pred zagonom reaktorja" in izpolniti kontrolni list "Test pred zagonom".

### 2.2 Sprememba moči reaktorja

Spremembo moči reaktorja praviloma izvajamo s kompenzacijsko palico tako, da je lega regulacijske palice približno v sredini. V reaktorju TRIGA lahko moč spremenimo ročno in avtomatsko.

#### 2.2.1 Ročni način

V ročnem načinu se za spremembo moči reaktorja najprej spremeni reaktivnost sredice reaktorja s spremembo lege ene izmed kontrolnih palic (praviloma regulacijske ali pa kompenzacijske). Pri spremembi lege katerekoli izmed kontrolnih palic je treba paziti, da se reaktivnost sredice ne poveča preveč, kar lahko opazujemo na merilniku periode (avtomatska ugasnitev pri periodi krajši od 7 sekund). S spremembami lege kontrolne palice vzdržujemo periodo reaktorja čimbolj konstantno (običajno okoli 30 sekund). Tik preden moč

reaktorja doseže želeni nivo pa z ustreznimi spremembami lege kontrolne palice povečujemo periodo reaktorja tako, da se moč reaktorja stabilizira na želenem nivoju brez prenihaja moči. Med spreminjanjem moči reaktorja pazimo, da je preklopnik merilnega območja linearne kanala vedno na območju na katerem je možno natančno spremljanje moči reaktorja.

### **2.2.2 Avtomatski način**

V avtomatskem načinu se za menjanje moči reaktorja uporablja regulator, ki krmili samo regulacijsko palico. Ker pa je vrednost reaktivnosti regulacijske palice dokaj velika in običajno pokriva celotno presežno reaktivnost sredice reaktorja je možno z uporabo regulatorja moč spreminjati v zelo širokem obsegu. Obseg moči je omejen le z merilnim območjem linearne kanala, katerega izhodni signal se v regulatorju primerja z želenim nivojem moči. Nastavljeni želeni nivo moči je vedno izražen v odstotkih izbranega merilnega območja linearne kanala. To pomeni, da je potrebno med spreminjanjem moči reaktorja v avtomatskem načinu dovolj zgodaj ročno preklopiti območje linearne kanala, če območje linearne kanala še ne ustreza želeni moči reaktorja. Zaradi tega se avtomatski način menjanja moči praviloma uporablja le pri manjših spremembah moči znotraj enega merilnega območja linearne kanala.

## **2.3 Obratovanje z avtomatsko regulacijo moči**

Avtomatsko regulacijo moči reaktorja omogoča servosistem za premikanje regulacijske palice, ki skrbi za vzdrževanje želenega nivoja moči reaktorja in zato, da perioda reaktorja pri tem ni krajša od 30 sekund. Praviloma se uporablja avtomatska regulacija moči pri daljšem obratovanju reaktorja na isti moči. Če je vrednost reaktivnosti regulacijske palice relativno majhna, je pri dolgotrajnem obratovanju reaktorja na veliki moči potrebno kompenzirati zmanjšanje presežne reaktivnosti reaktorja (predvsem zaradi zastrupljanja sredice s  $^{135}\text{Xe}$ ). To opravimo s primernim dvigom kompenzacijske palice, da ohranimo optimalno višino regulacijske palice.

# **3 IZVEDBA VAJE**

## **3.1 Splošni napotki**

Vajo iz pogona reaktorja lahko opravljaš samo pod vodstvom kvalificiranega operaterja reaktorja TRIGA.

## **3.2 Oprema pri vaji**

- Reaktor TRIGA z vsemi sistemi, strukturami in komponentami
- ura

## **3.3 Napotki**

Izvedi ročni zagon reaktorja TRIGA na moč 150 W. Ročno stabiliziraj moč reaktorja z regulacijsko palico. Na moči 150 W naj reaktor obratuje nekaj minut. Povečaj moč reaktorja na 20 kW, pri čemer skušaj čim bolje vzdrževati konstantno periodo reaktorja na vrednosti 30 sekund. Ročno stabiliziraj moč reaktorja in zatem vključi sistem za avtomatsko regulacijo moči, ki ga moraš predhodno nastaviti na 20 kW. Po nekaj minutah obratovanja izključi sistem za avtomatsko regulacijo moči in ročno dvigni moč reaktorja na 250 kW. Na moči 250

kW ponovno vključi avtomatsko regulacijo moči reaktorja. Z ročnim upravljanjem znižaj moč reaktorja na 100 kW in jo na tem nivoju ročno stabiliziraj. Znižaj moč reaktorja še na nivo kjer ne delujejo več temperaturni povratni vplivi. Tudi na tem nivoju moči stabiliziraj moč reaktorja ročno. Po nekaj minutah obratovanja na nizki moči zaustavi reaktor.

Med opravljanjem vaje vodi "Dnevnik obratovanja reaktorja TRIGA", v skladu z navodilom za vodenje dnevnika.

## 4 IZVEBDA VAJE

Pred zagonom reaktorja je potrebno izvesti "Test pred zagonom reaktorja". Ta test se izvaja po predpisanem postopku, katerega namen je:

- zagotoviti vklop vseh naprav, potrebnih za varno obratovanje reaktorja ter s predpisanim zaporedjem vklopa posameznih naprav zagotovi kontrolo signalizacije, ki javlja izpad iz obratovanja le-teh.
- ugotoviti funkcionalnost posameznih naprav.
- izmeriti najvažnejše parametre pri reaktorju in jih primerjati z obratovalnimi omejitvami ter ugotovitve dokumentirati.

Rezultate testiranja dokumentiramo na posebnem kontrolnem listu "Test pred zagonom". Na ta kontrolni list, po končanem testiranju, vpišemo morebitne omejitve obratovanja reaktorja.

Opomba: Test pred zagonom reaktorja se ne izvaja med posameznimi zaustavitvami reaktorja, če oprema reaktorja ni bila izklopljena.

Po končanem testu pred zagonom, oziroma po končanem preverjanju reaktorske instrumentacije in stanja reaktorja, objavi po ozvočenju, da se prične zagon reaktorja na moč 150 W.

Pred zagonom reaktorja morajo biti vsi mehanizmi za dviganje kontrolnih palic v spodnji mejni legi, stikalo za izbiro načina obratovanja mora biti v položaju "MANUAL", pretikalo območij linearnega kanala mora biti na območju med 1 W do 100 W. Vključeno mora biti napajanje elektromagnetov varnostne, kompenzacijske in regulacijske palice.

Najprej vključi dovod zraka v cilindar pulzne palice, ko je cilindar pulzne palice v spodnji mejni legi. Nato prični z dviganjem kontrolnih palic in pri tem vseskozi opazuj merilnik nevtronske gostote startnega kanala, merilnik periode in linearni merilnik moči. Popolnoma dvigni pulzno palico. Pri tem reaktor še ni kritičen. Naslednji korak je popoln dvig varnostne palice. Tudi pri tem reaktor še ni kritičen. Izvleci še regulacijsko palico približno do sredine. Ker je presežna reaktivnost sredice reaktorja manjša od 4 \$, kolikor znaša skupna negativna reaktivnost polovice regulacijske palice in cele kompenzacijske palice, reaktor še ne bo kritičen. Sedaj prični s pazljivim postopnim dviganjem kompenzacijske palice. Po vsakem dvigu za nekaj centimetrov iz sredice počakaj, da se nevtronska gostota stabilizira. Če ugotoviš, da se po delnem dvigu kontrolne palice nevtronska gostota v startnem kanalu stabilizira na novem, višjem nivoju, reaktor še ni kritičen in lahko opraviš naslednji delni dvig kompenzacijske palice. Če pa ugotoviš, da se nevtronska gostota v startnem kanalu na višjem nivoju ne stabilizira več tako hitro, pomeni, da je reaktor že zelo blizu kritičnosti. Pazljivo opazuj tudi merilnik periode in signal linearnega merilnika moči reaktorja. Ko se približuješ kritičnosti reaktorja, dvigaj kompenzacijsko palico v vse manjših korakih. Ko opaziš, da se nevtronska gostota v startnem kanalu po dvigu kontrolne palice ne stabilizira, temveč eksponentialno narašča (linearno povečevanje odklona kazalca na merilniku nevtronske gostote v startnem kanalu!), pomeni, da je reaktor že nadkritičen. Od tu naprej moraš

kompensacijsko palico dvigati še v manjših korakih ali pa sploh ne več, če je reaktor že dovolj nadkritičen. Ko opazuješ merilnik periode, upoštevaj, da je prekrivanje merilnega območja med startnim kanalom in logaritmičnim kanalom majhno (1 dekada), z linearnim merilnikom moči pa malce večje, zato merilnik periode izven merilnega območja logaritmičnega kanala kaže veliko daljše periode od dejanskih. Deklarirana spodnja meja logaritmičnega kanala in s tem tudi merilnika periode je na začetku zadnje dekade merilnika nevtronske gostote startnega kanala.

Po doseženi kritičnosti dvigaj moč reaktorja do 150 W. Pri tem pazi na pravočasen preklop merilnega območja linearnega merilnika moči ter opazuj merilnik periode, ki ne sme biti krajša od 7 sekund. Ko dosežeš zeleno moč, jo ročno stabiliziraj s kompensacijsko palico. Za manjše korekcije moči uporabi regulacijsko palico, ki ima manjšo hitrost pomika.

Za obratovanje reaktorja z avtomatsko kontrolo moči nastavi zeleni nivo z gumbom "MOČ" in preklopi pretikalo za izbiro načina obratovanja "MODE" v položaj " AUTO". Po ozvočenju objavi: "Moč reaktorja 150 W !".

Za spremembo moči reaktorja izključi avtomatsko kontrolo moči in ročno spreminjaj moč reaktorja. Za spreminjanje moči reaktorja uporabljaj kompensacijsko palico, regulacijska palica pa naj bo izvlečena približno do polovice. Pri relativno nizki vrednosti presežne reaktivnosti sredice reaktorja in veliki vrednosti regulacijske palice je lahko reaktor kritičen že, ko je regulacijska palica izvlečena približno do polovice, ostale tri kontrolne palice pa popolnoma izvlečene. V takem primeru pa lahko vse spremembe moči opravljamo le z regulacijsko palico.

Na posameznih nivojih moči, kot jih zahteva naloga, naj reaktor obratuje nekaj minut. Ko reaktor obratuje na višji moči (nekaj 10 kW), vključi hlajenje reaktorja. Preko instrumentacije spremljaj delovanje reaktorja, pomožnih sistemov in sistema radiološke zaščite.

Med dviganjem in spuščanjem moči reaktorja ne pozabi preklapljati območij moči! Pazi na pravo vrednost periode reaktorja!

Ročno hitro ugasnitev reaktorja lahko izvedemo s pritiskom na gumb "SCRAM". Pri tem vse kontrolne palice hkrati padejo v spodnjo mejno lego. Običajno pa zaustavitev reaktorja opravimo tako, da izključimo dovod zraka v cilindar pulzne palice s pritiskom na gumb "AIR" (s tem bo pulzna palica padla v spodnjo mejno lego), nato ročno spustimo ostale tri kontrolne palice v spodnjo mejno lego in nato še izključimo stikalo za vklop napajanja elektromagnetov kontrolnih palic.

V dnevnik obratovanja reaktorja sproti beleži pričetek zagona reaktorja, pozicije kontrolnih palic in moč reaktorja. Vsake pol ure vpisuj v dnevnik obratovanja reaktorja temperaturo goriva, moč reaktorja, temperaturo in aktivnost primarne vode, prevodnost primarne vode in pozicijo regulacijske palice. V dnevnik beleži tudi vse spremembe v delovanju reaktorja. Beleži tudi podatke o obsevanjih v eksperimentalnih kanalih. Pomembno je tudi, da zapišeš vse nenormalne dogodke kot npr.: nenamerno hitro ugasnitev reaktorja, izpad instrumentacije, izpad pomožnih sistemov, povečanje nivojev radioaktivnosti, itd.

Navodilo za vodenje dnevnika je na prvi strani "Dnevnika obratovanja reaktorja" .

Najbolj pogoste napake operaterjev so:

1. Hitra ugasnitev reaktorja ali "SCRAM" zaradi prekratke periode reaktorja, ki nastane zaradi prehitrega dviganja kompenzacijske palice. Na merilniku periode odčitavamo le kratkotrajno povprečje periode reaktorja, katero dušimo s časovno konstanto okoli sekunde, da zaradi šumov preveč ne niha. Zato merilnik periode po dvigu kompenzacijske palice ne zaznava trenutne periode, ki je določena z odvodom logaritma nevtronske gostote, temveč vrednost periode z majhno časovno zakasnitvijo.
2. "SCRAM" reaktorja, ki ga povzroči signalizator mejne vrednosti v linearnem merilniku moči. Operater je pozabil pravočasno preklopiti pretikalo območij na višje območje oziroma je pri preklopu pomotoma preklopil na nižje območje.
3. "OVERSHOOT" (prenihaj moči) pri stabilizaciji na določeni moči. Operater je prepozno pričel zmanjševati periodo reaktorja ter je pričel s spuščanjem kontrolne palice v sredico šele po doseženi zeleni moči. Ker odziv moči na spuščanje kontrolnih palic ni trenuten, bomo na rekorderju za zapis moči reaktorja opazili prenihaj moči.
4. Zagon s predolgo periodo. Ko dosežemo kritičnost, nekateri operaterji prepočasi dvigujejo moč reaktorja. Zagon ali sprememba moči tako traja mnogo dalj časa, kot je potrebno. Najbolje je povečevati moč reaktorja s periodami okoli 30 sekund, ker pri teh periodah lahko operater še dobro spremlja vrednost periode in moč na linearnem kanalu ter preklaplja pretikalo območij.

## 5 POROČILO O VAJI

Poročilo o vaji naj vsebuje

- izpisa iz dnevnika obratovanja reaktorja za čas, ko študent upravlja z reaktorjem
- opis dela/nalog, ki jih je študent naredil (npr. zagon na 100 W, ustavitve, scram, ipd.
- zapiši vse nenormalne dogodke kot npr.: nenamerno hitro ugasnitev reaktorja, izpad instrumentacije, izpad pomožnih sistemov, povečanje nivojev radioaktivnosti, itd.
- komentar k vaji, kaj bi lahko bilo boljše, katere napake sem naredil, kaj sem naredil prav kaj bi lahko naredil boljše, ipd.

## 6 LITERATURA

1. R. Kladnik, Reaktorska fizika, Ljubljana, 1982
2. Varnostno poročilo za reaktor TRIGA Mark II v Podgorici (Revizija 4), Institut Jožef Stefan, IJS-DP-5823, Ljubljana, marec 2004
3. L. Snoj, A. Trkov, Opis reaktorja TRIGA, oktober 2012