

Vaja za praktikum 4:

Pulzni eksperiment

opravljena pri dr. Matjažu Ravniku

Rok Rudolf

6. 5. 2004, Ljubljana

Povzetek:

Namen vaje je bil preveriti zvezo med pulzno reaktivnostjo in osnovnimi parametri v reaktorju, ki nam jo podajo Fuchs-Hansenov model. Merili smo fluks in reaktivnost ob nenadnem, »pulznem« povečanju reaktivnosti, nato pa iz tega določili efektivne koeficiente reaktivnosti in življenjski čas promptnih nevtronov v okviru tega modela. Eksperiment je bil izveden na reaktorju TRIGA v Podgorici.

Kazalo

1. Uvod	3
2. Reaktor	3
3. Reaktivnost, pomnoževalni faktor in fluks	4
4. Fuchs-Hansenov model	5
5. Meritev in rezultati	9
6. Vprašanja	13
7. Zaključek	14
8. Literatura	14

1. Uvod

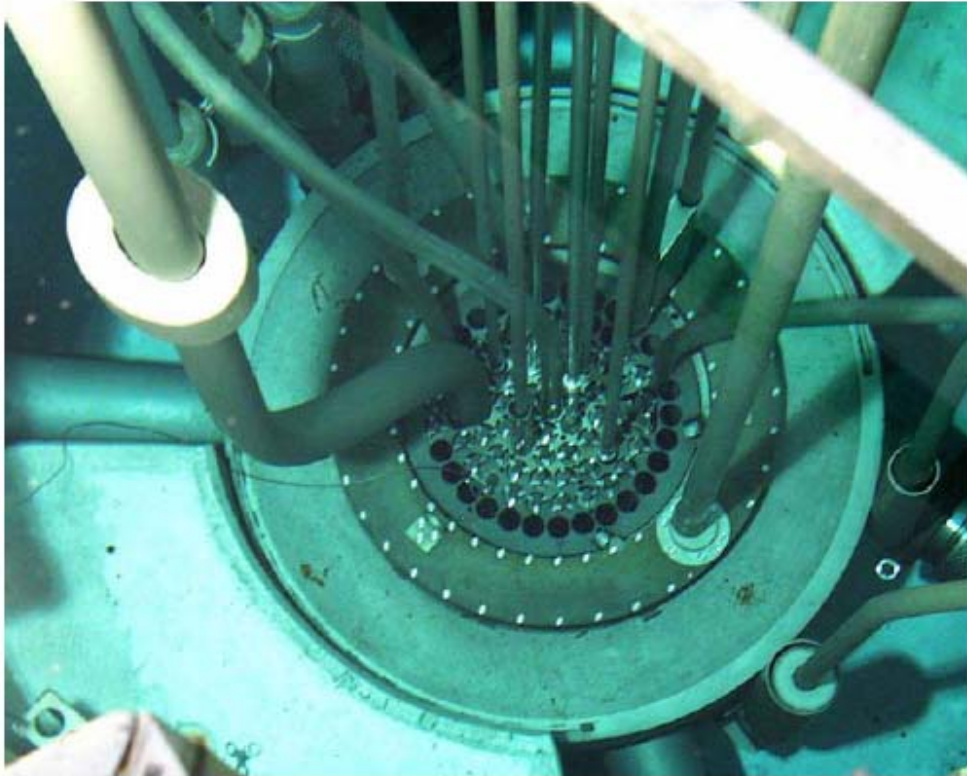
Pulzni eksperimenti se izvajajo za analize možnih nesreč in sevanja, do katerih lahko pride v običajnih jedrskih reaktorjih, ali pa kot način pridobivanja visokih doz nevtronov, ki se uporabljajo bodisi za nadaljnje eksperimente, ali pa kot osnova za pridobivanje določenih koristnih izotopov. Zato, da na reaktorju lahko izvajamo ta tip eksperimenta, mora biti le-ta ustrezen, da ne pride do težav ob nenadnem zvečanju reaktivnosti in posledično moči reaktorja. Reaktorji, na katerih se izvajajo taki eksperimenti so tipa: GODIVA, TREAT in TRIGA. V našem primeru, gre za reaktor tipa TRIGA, ki se nahaja v Podgorici in je bil za izvajanje pulznih eksperimentov predelan leta 1991. Vsem tem tipom reaktorjem je skupen velik negativni temperaturni koeficient reaktivnosti, kar omogoča visoko stopnjo varnosti pri pulziranju.

Ob času pulziranja je v reaktorju po navadi okoli 50 gorivnih elementov ki vsebujejo 12 masnih procentov urana z 20 % obogatitvijo ^{235}U (ostalo je ^{238}U in zanemarljivo malo drugih izotopov). Namen vaje je bil potrditi Fuchs-Hansenov model, oziroma napoved pulzne reaktivnosti v reaktorju. V okviru tega modela nato napovemo efektivni koeficient reaktivnosti in pa življenjski čas nevtronov v reaktorju.

2. Reaktor

Reaktor TRIGA, ki stoji v Podgorici je eksperimentalni reaktor. Ni namenjen proizvodnji električne energije, ampak se uporablja za raziskovalne namene, bodisi kot izvor nevtronov (ali drugih vrst sevanja) ali pa kot »preizkusni zajec« pri spreminjanju parametrov obratovanja in spremljanju sprememb, ki se pri tem pojavijo. Na komercialnem reaktorju bi bili tako eksperimenti pač nesprejemljivo nevarni.

Zasnova eksperimentalnih reaktorjev je zato drugačna. Na splošno so manjši in dosegajo precej manjšo moč kot njihovi veliki bratje. V našem primeru je šlo za reaktor tipa TRIGA, ki ima obliko valja s premerom in višino 40cm. Največja moč, ki jo lahko proizvede je okoli 250 kW. Zaradi sorazmerno nizke gostote moči, je za obratovanje dovolj že hlajenje z vodo pri normalnem tlaku in temperaturi. Najvišja obratovalna temperatura je tako omejene s temperaturo 100°C na površini gorivnih elementov (notri je temperatura seveda lahko večja). Elementi so sestavljeni iz mešanice osiromašenega urana in cirkonijevega hidrida, kar pomaga pri zadrževanju cepitvenih produktov, ki nastajajo med obratovanjem. Kot gorivo služi 20% obogatena mešanica ^{235}U in uranovega oksida (UO_2). Kot moderator je uporabljen bor, ki je raztopljen v vodi in pa cirkonijev hidrid, ki je sestavni material gorivnih elementov. Reakcijski presek slednjega je za termične nevtrone močno temperaturno odvisen. Okoli sredice reaktorja je še nevtronski ščit iz grafita, ki poskrbi za čim manjše uhajanje nevtronov. V reaktor je vgrajenih še več detekcijskih in opazovalnih sistemov, s katerimi lahko spremljamo osnovne parametre in tako delovanje reaktorja.



Slika 1, reaktorska posoda reaktorja TRIGA v Podgorici

3. Reaktivnost, pomnoževalni faktor in fluks

Nevtroni v reaktorju nastajajo na dva načina. Takojšnji ali promptni nevtroni nastanejo kot eni izmed produktov pri cepitvi v času 10^{-14} s. Zakasneli nevtroni pa nastajajo pri verigah beta (β^-) razpadov nekaterih cepitvenih produktov. Tako jih imenujemo, ker ima razpad β^- na splošno dokaj dolgo razpadno konstanto (okrog 10 s), torej nastanejo ti nevtroni precej za promptnimi, poleg tega jih je tudi zelo malo (0,65 %). Njihov delež označimo z β . Ta je odvisen od cepitvenega elementa. Različni elementi imajo namreč različne razpadne konstante in posledično različne deleže posameznih skupin nevtronov. Nevtrone v reaktorju imenujemo nevtronski fluks (označimo z Φ).

Pomnoževalni faktor (k) je razmerje med številom nevtronov v dveh zaporednih generacijah. Iz tega parametra lahko vidimo kako se z zaporednimi generacijami in s tem tudi s časom spreminja število nevtronov v reaktorju (n_i). Če indeks i označuje generacijo, potem lahko zapišemo:

$$k = \frac{n_{i+1}}{n_i} \approx \frac{\text{cepitev}}{\text{absorbicija} + \text{izgube}} \quad (1)$$

Če je $k = 1$, je reaktor kritičen, če je $k < 1$, je podkritičen in če je $k > 1$, nadkritičen. Med obratovanjem reaktorja (če ne izvajamo ravno pulznih eksperimentov) je $k = 1,001$. Odstopanje tega faktorja pomnoževanja od kritične vrednosti pri $k = 1$ imenujemo reaktivnost, ki je tako definirana kot:

$$\rho(t) = \frac{k(t) - 1}{k(t)} \quad (2)$$

Enota za reaktivnost je tradicionalno dolar (\$), lahko pa uporabimo tudi bolj običajne enote, pri katerih ustreza $\$ = 700 pcm = 700 \cdot 10^{-5}$. Ena gorivna palica ima reaktivno vrednost okoli 3 \$. Pri pulznem eksperimentu je dobro navesti še promptno reaktivnost, ki ni nič drugega kot reaktivnost brez upoštevanja zakasnelih nevtronov (ki ob pulzu igrajo še manj vloge kot običajno, saj se pojavijo šele, ko je pulza že konec):

$$\rho' = \rho - \beta \quad (3)$$

4. Fuchs-Hansenov model

Za računanje poteka pulza moramo reševati enačbo točkovne kinetike. Kot že rečeno, lahko zanemarimo prispevek zakasnelih nevtronov, tako da moremo uporabiti za račun promptno in ne celotno reaktivnost. Osnovna predpostavka je, da se med pulzom reaktivnost zmanjšuje sorazmerno s sproščeno močjo. Če temu ne bi bilo tako, bi energija naraščala v nedogled, kar pa vemo da ne drži v primeru TRIGA reaktorja. Za spremembo števila nevtronov po času tako lahko zapišemo:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k(1 - \beta) - 1}{l} n \quad (4)$$

kjer je l življenjski čas nevtronov ene generacije. Račun se še izboljša če upoštevamo spremembe reakcijskih presekov z naraščanjem temperature. V termičnem območju (do 1eV) se da to spremembo enostavno opisati z uporabo Westcottovih g-factorjev, v resonančnem pa ima največji vpliv Dopplerjev efekt, saj se s povečanjem temperature resonance absorpcije razširijo, a hkrati znižajo. Upoštevati je treba še spremembo gostote goriva in nekatere druge efekte (če želimo še izboljšati natančnost). Skupno vsemu pa je, da sprememba učinkovitih reakcijskih sipalnih presekov pripelje do padanja reaktivnosti s temperaturo. Hitrost padanja in natančna odvisnost le-tega od temperature sta v praksi pogojena od fizičnih lastnosti reaktorja (oblika, velikost, stopnja naraščanja moči in populacije nevtronov...). Ti so seveda različni za različne reaktorje in v našem primeru se ne bomo tako poglobili v modeliranje, ki temelji na enačbi točkovne kinetike.

Predpostavki, da se reaktivnost zmanjša v odvisnosti od sproščene energije ($P \propto n$) rečemo tudi adiabatna, saj jo fizikalno razložimo tako, da zaradi kratkosti pulza ne pride do prenosa toplote iz goriva in se vsa porabi za segrevanje le-tega. Tako moč, kot število nevtronov

(velikost nevtronskega fluksa) sta odvisne od števila cepitev. Če to sorazmernost vnesemo v enačbo (4) dobimo:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} P(t) \quad (5)$$

kjer je Λ generacijski čas nevtronov, definiran kot $\Lambda = 1/k$ in v našem primeru, saj je $k \approx 1$. Če upoštevamo še, da se promptna reaktivnost zmanjšuje sorazmerno s sproščeno močjo, dobimo:

$$\rho(t) - \beta = \rho' - \gamma E(t) = \rho' - \gamma \int_0^t P(t') dt' \quad (6)$$

kjer smo uvedli γ kot povratni energijski koeficient reaktivnosti, ki je kot že rečeno, odvisen od temperaturnega koeficienta goriva (oziroma odvisnosti njegovih reakcijskih presekov od temperature). Vstavimo enačbo (6) v (5), definirajmo koeficienta $\alpha_0 = \frac{\rho'}{\Lambda}$ in $b = \frac{\gamma}{\Lambda}$ pa dobimo:

$$\frac{dP}{dt} = P(t) \left[\alpha_0 - b \int_0^t P(t') dt' \right] \quad (7)$$

Upoštevali smo še, da je $\rho' = 0$ za čas $t \leq 0$. Pri $t = 0$ pa velja:

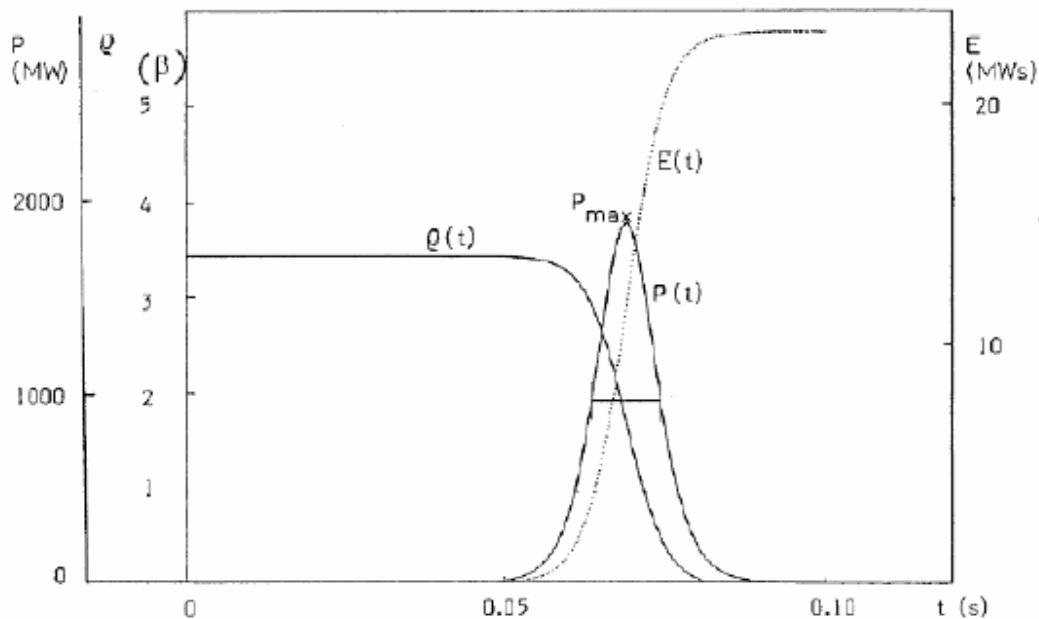
$$\frac{dP}{dt} = \alpha_0 P(t) \quad (8)$$

zaradi česar α_0 imenujemo tudi začetna pomnoževalna konstanta. Končna rešitev diferencialno-integralne enačbi za moč in za skupno energijo, sproščeno med pulzom ($E(t)$) se glasita:

$$P(t) = \frac{2Ac^2 e^{-ct}}{b(1 + Ae^{-ct})^2} \quad (9)$$

$$E(t) = \frac{\alpha_0 + c}{b} \left[\frac{1 - e^{-ct}}{1 + Ae^{-ct}} \right] \quad (10)$$

kjer smo na novo vpeljali parametre $c = \sqrt{\alpha_0^2 + 2bP_0}$ in $A = \frac{c + \alpha_0}{c - \alpha_0}$. Grafično si lahko ogledamo odvisnost na naslednji sliki:



Slika 2, Odvisnost moči, reaktivnosti in celotne sproščene energije med pulzom po času, po Fuchs-Hansenovem modelu

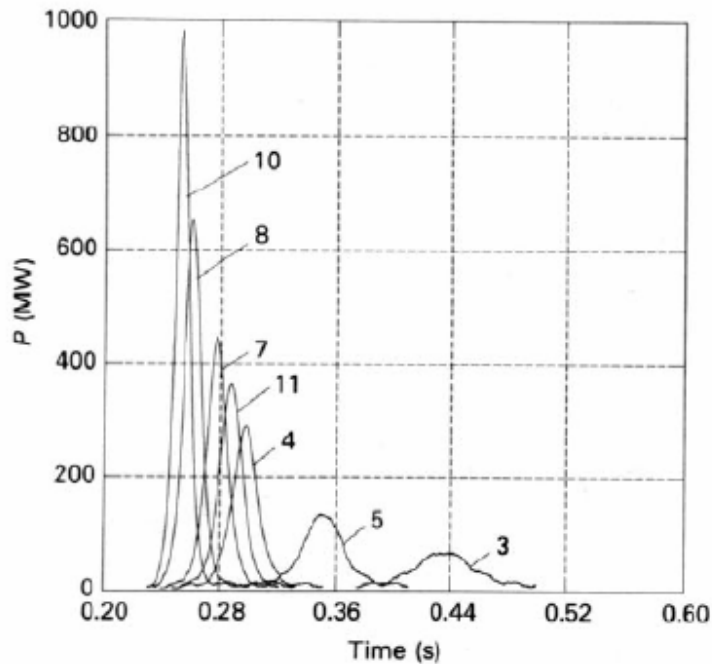
Da se gorivo ne segreje preveč in da je povratni temperaturni učinek čim večji, pulzni eksperiment začnemo pri majhnih temperaturah. Pri modelu lahko torej predpostavimo, da bo začetna moč pred pulzom sorazmerno majhna, torej velja $c \approx \alpha_0$ in pa $A \approx \frac{2\alpha_0}{bP_0} \gg 1$. Moč na začetku eksponento narašča. Maksimum moči lahko poiščemo z enostavnim odvajanjem enačbe (9) po času:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{2Ac^3}{b} \frac{c^{-ct}(Ae^{-ct} - 1)}{(Ae^{-ct} + 1)^3} = 0 \quad (11)$$

Pri maksimumu torej velja $Ae^{-ct} = 1$, doseže pa ga v času $t_{P_{\max}} = \frac{\ln A}{c} \approx \frac{\ln A}{\alpha_0}$. Za maksimalno moč dobimo:

$$P_{\max} \approx \frac{\alpha_0^2}{2b} = \frac{\rho'^2}{2\Lambda\gamma} \quad (12)$$

Nato pa moč zopet eksponento pada proti nič. V praksi ne pade na nič, saj so v reaktorju še vedno zakasneli nevtroni, ki jih tu nismo upoštevali. Fuchs-Hansenov model velja le pri reaktivnostih, ki so mnogo večje od β in le takrat, ko po koncu pulza energija in moč padeta na nič.



Slika 3, Izmerjena moč v odvisnosti od časa, za različne začetne vrednosti reaktivnosti

Če vemo da dobimo do dosega maksimuma $E(t_{p_{\max}}) \approx \frac{\alpha_0}{b}$ energije, in da je funkcija simetrična tudi po maksimumu (razen dela, ki ga prispevajo zakasneli nevtroni, kar pa zanemarimo), je za račun celotne sproščene energije dovolj, da zadevo le limitiramo, ko teče čas proti neskončnosti.

$$E(t \rightarrow \infty) \rightarrow \frac{2\alpha_0}{b} = \frac{2\rho'}{\gamma} \quad (13)$$

Iz enačbe (13) lahko vidimo, da sproščena energija ni odvisna od generacijskega časa promptnih nevtronov. Zapišimo še enačbo za širino sunka na polovični višini:

$$\Delta t = \frac{3,5}{c} = \frac{3,5\Lambda}{\rho'} \quad (14)$$

Vidimo torej, da je širina pulza obratno sorazmerna z promptno reaktivnostjo. Med modelom in eksperimentalnimi podatki pride do razhajanja. Vseeno pa lahko iz modela napovemo nekaj pričakovanih odvisnosti, s katerimi lahko pri vaji tudi »preverimo« Fuchs-Hansenov model:

- Perioda naraščanje moči na začetku pulza je sorazmerno s promptno reaktivnostjo (8)
- Višina pulza je sorazmerna kvadratu promptne reaktivnosti (12)
- Sproščena energija je linearno odvisna od promptne reaktivnosti (13)
- Širina pulza je obratno sorazmerna s promptno reaktivnostjo (14)

5. Meritev in rezultati

Meritev je bila izvedena na raziskovalnem reaktorju TRIGA Mark II v Podgorici. Pri eksperimentu smo »izstrelili« eno izmed štirih kontrolnih palic s pomočjo pnevmatskega mehanizma. Pulzna palica, ki jo na hitro odstranimo iz reaktorja ob tem ne absorbira več nevtronskega fluksa in posledično reaktivnost in moč reaktorja nenadoma narasteta. Reaktor postane močno nadkritičen in dobimo naš želeni pulz. Skupaj z močjo namreč naraste tudi temperatura, saj hladilni sistem ne uspe odvajati toplote tako hitro. Zaradi že omenjenih efektov pri spremembi temperature se močno poveča tudi absorpcija nevtronov v reaktorju (in moderatorju). Pride do izpada nevtronskega fluksa in reaktor pri dovolj veliki temperaturi odsekano postane podkritičen in se ustavi (ali vsaj upočasni). Dobimo visok pulz, pri katerem moč doseže ob maksimumu tudi 2 GW, a zaradi kratkosti ne poškoduje reaktorja. Skupna energija ki se sprosti v pulzu je namreč le nekaj 10 MWs.

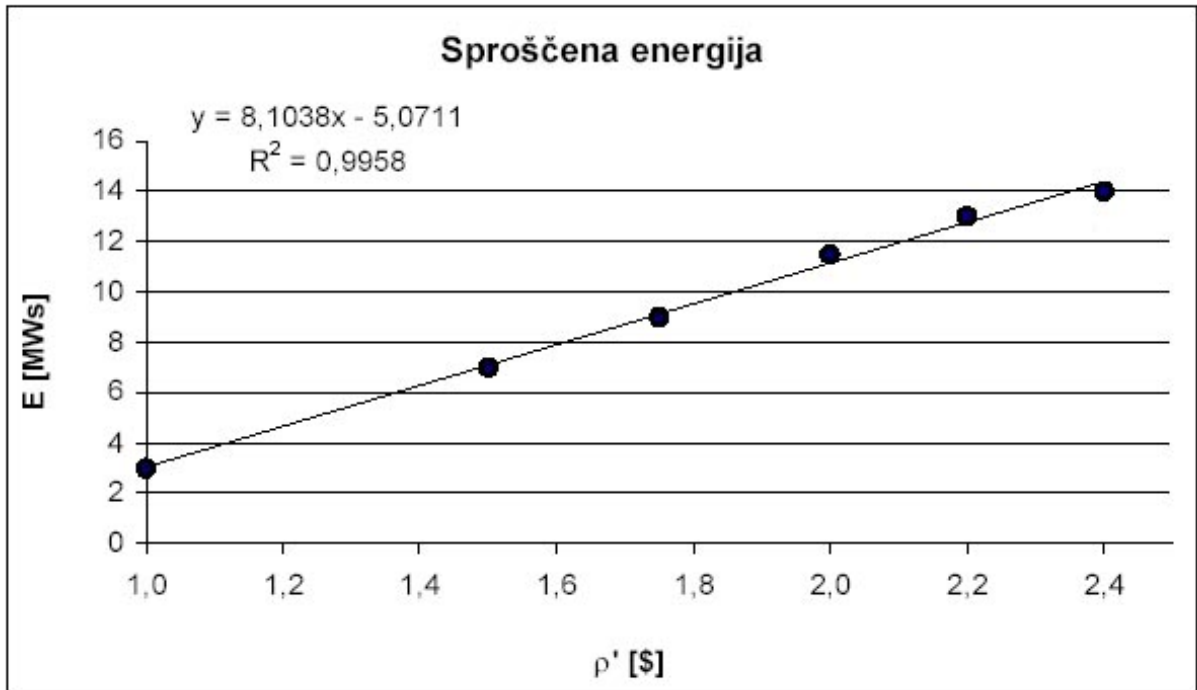
Da bi preizkusili model, smo izvedli sedem pulznih eksperimentov, ob katerih smo pulzno palico izstrelili do različnih vrednosti. Reaktor namreč omogoča, da palico umaknemo do različnih leg, kar velja tudi za ostale 3 palice, ki so v reaktorju (kompenzacijsko, varnostno in regulacijsko). Lege palic so označene s številkami, pri 900 je palica povsem v reaktorju, pri 200 pa je povsem izvlečena. S tem smo na začetku dobili različne vrednosti spremembe skupne absorpcije nevtronov, različne začetne reaktivnosti in posledično različne pulze. Beležili smo položaj palice ob izstrelitvi, sproščeno energijo, maksimalno moč, maksimalno temperaturo in pa širino pulza na polovični višini. Moč pred pulzom je bila majhna (okoli 100 W). Ob eksperimentu sta bili varnostna in kompenzacijska palica povsem izvlečeni, regulacijska pa je bila na položaju 340. Iz umeritvene krivulje za pulzno palico lahko razberemo, koliko je bila pri izstrelitvi do posamezne lege vredna vstavljena reaktivnost. Podatke iz eksperimenta si lahko ogledamo na naslednji tabeli:

Tabela 1, rezultati opravljene meritve.

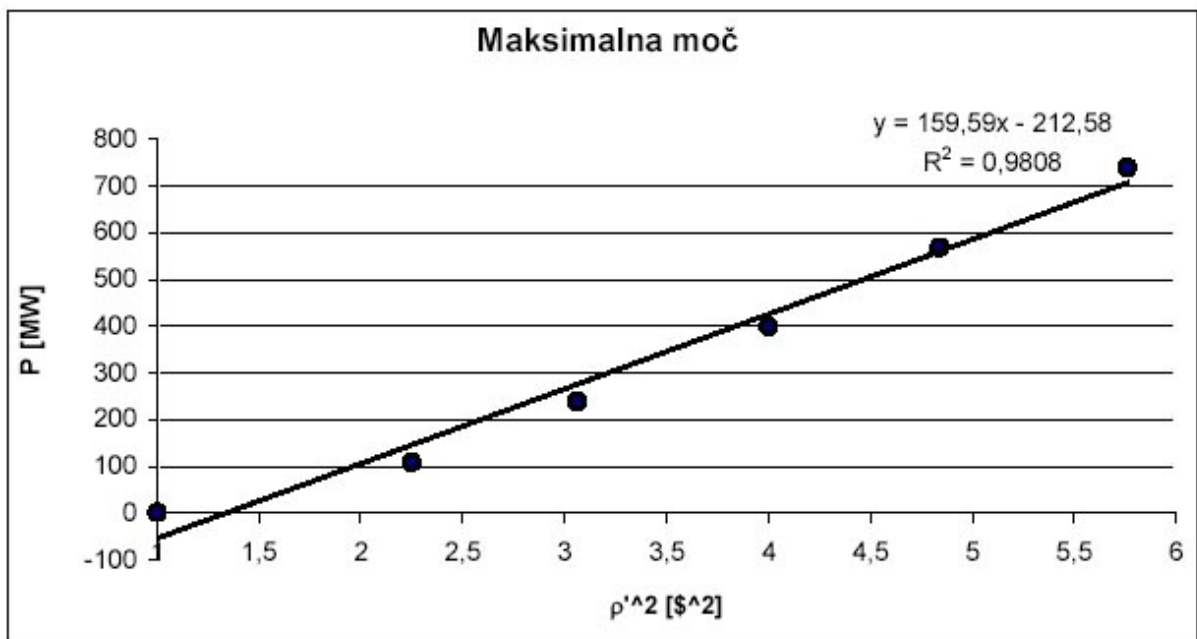
št. pulza	končni položaj	ρ [\$]	P [MW]	E [MWs]	T1 [°C]	T2 [°C]	Δt [ms]
1	637	1,0	2	3	165	170	97,2
2	568	1,5	110	7	240	260	34,6
3	497	2,0	400	11,5	280	310	18,0
4	435	2,4	740	14	360	360	13,2
5	435	2,4	560	13	320	320	15,1
6	468	2,2	570	13	330	330	15,1
7	531	1,75	240	9	270	270	23,5

Iz dobljenih podatkov lahko narišemo grafe, iz katerih lahko preberemo odvisnosti, ki se bodo upajmo, skladale z napovedmi uporabljenega Fuchs-Hansenovega modela. Pri vseh grafih sem zanemaril meritve, ki je odstopala od pričakovanih vrednosti. To upravičim s tem, da je šlo za ponovljeno meritev pri isti reaktivnosti. Pri ponovitvi je bilo reaktorsko gorivo še vroče in zato rezultati niso merodajni. Pri meritvi številka 5 tako temperaturni efekti, ki nam ustavijo pulz delujejo (do neke mere) že preden sploh sprožimo pulz. Zato ni presenetljivo, da se pulz ustavi prej, kot bi bilo to res ob sproženju iz neke nižje, začetne temperature (ki je bila navzoča pri ostalih primerih). Skupna sproščena energija in maksimalna moč sta pri tem primeru pričakovan precej manjša in se ne ujemata z ostalimi rezultati. Omeniti je še treba, da

sta stolpca v tabeli 1, T1 in T2, meritvi »iste« maksimalne temperature, ki jo doseže gorivo ob pulzu, le da je meritev opravljena na dveh različnih termočlenih. Ko sem kasneje risal graf odvisnosti maksimalne temperature od vstavljenе promptne reaktivnosti, sem za vrednost vzel povprečno vrednost obeh meritev. Oglejmo si grafe pričakovanih odvisnosti.



Slika 4, sproščena energija v odvisnosti od promptne reaktivnosti



Slika 5, maksimalna moč v odvisnosti od kvadrata promptne reaktivnosti
 Kot vidimo se grafi odvisnosti lepo prilegajo napovedim Fluchs-Hansenovega modela. Od tu že lahko izračunamo nekatere parametre obratovanja reaktorja v primeru pulznega eksperimenta. Za začetek lahko ocenimo efektivni koeficient reaktivnosti temperature goriva (γ). Iz enačbe (13) in naklona premice linearne odvisnosti sproščene energije od promptne reaktivnosti (slika 4), lahko izračunamo:

$$E_0 = E(t \rightarrow \infty) \rightarrow \frac{2\alpha_0}{b} = \frac{2\rho'}{\gamma} \Rightarrow \gamma = \frac{2\rho'}{E_0}$$

Pa dobimo:

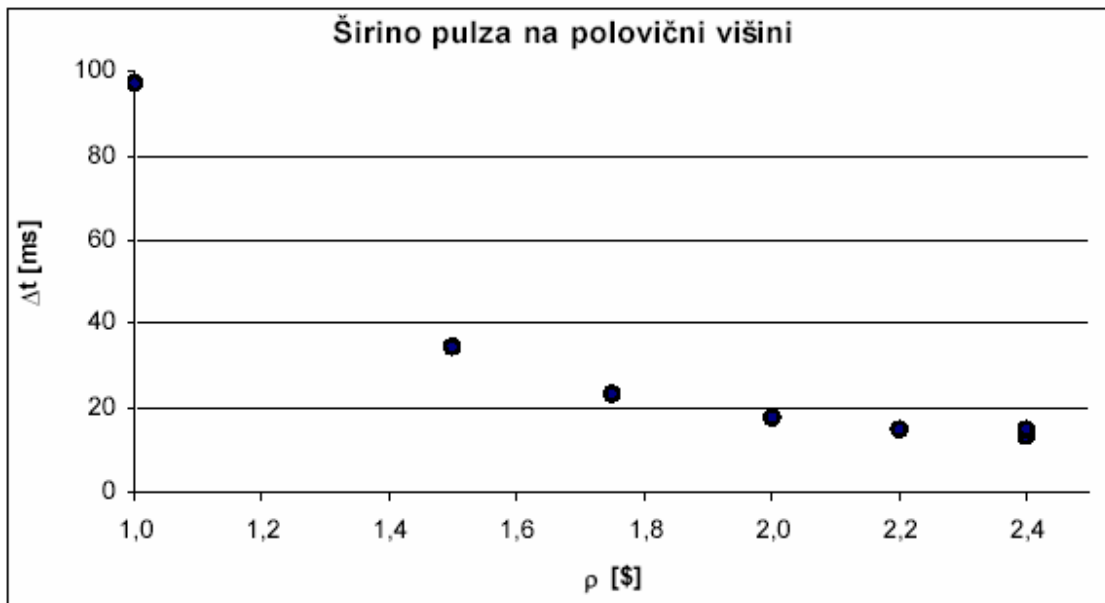
$$\gamma = 0,245(1 \pm 0,02) \text{ } \$ / MWs = (1,72 \pm 0,07) / GWs$$

Drug tak parameter, ki ga lahko dobimo je življenjski čas promptnih nevtronov, s pomočjo enačbe (12) in odvisnosti med kvadratom reaktivnosti ter maksimalno sproščeno močjo:

$$P_{\max} \approx \frac{\rho'^2}{2\Lambda\gamma} \Rightarrow \Lambda = \frac{\rho'^2}{2\gamma P_{\max}}$$

$$\Lambda = (8,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ s}$$

Tu zraven moramo dodati še komentar. V našem reaktorju pričakujemo življenjski čas promptnih nevtronov $4 \cdot 10^{-4}$ s. Vrednost se od izračunane razlikuje za skoraj 80%, kar je precej več kot naša ocenjena napaka, ki znaša le slabe 4%. Potolažimo se, da naše meritve niso bile dovolj natančne in da smo vseeno zadeli vsaj pravi velikostni red (kar v reaktorski fiziki niti ni tako slabo). Iz tega izhodišča lahko Fuchs-Hansenov model razglasimo za zadovoljiv. Življenjski čas promptnih nevtronov pa lahko ocenimo še drugače. Lahko se opremo na enačbo (14) in graf odvisnosti širine pulza na polovični višini v odvisnosti od promptne reaktivnosti.



Slika 6, graf odvisnosti širine pulza na polovični višini od promptne reaktivnosti

Tako lahko dobimo:

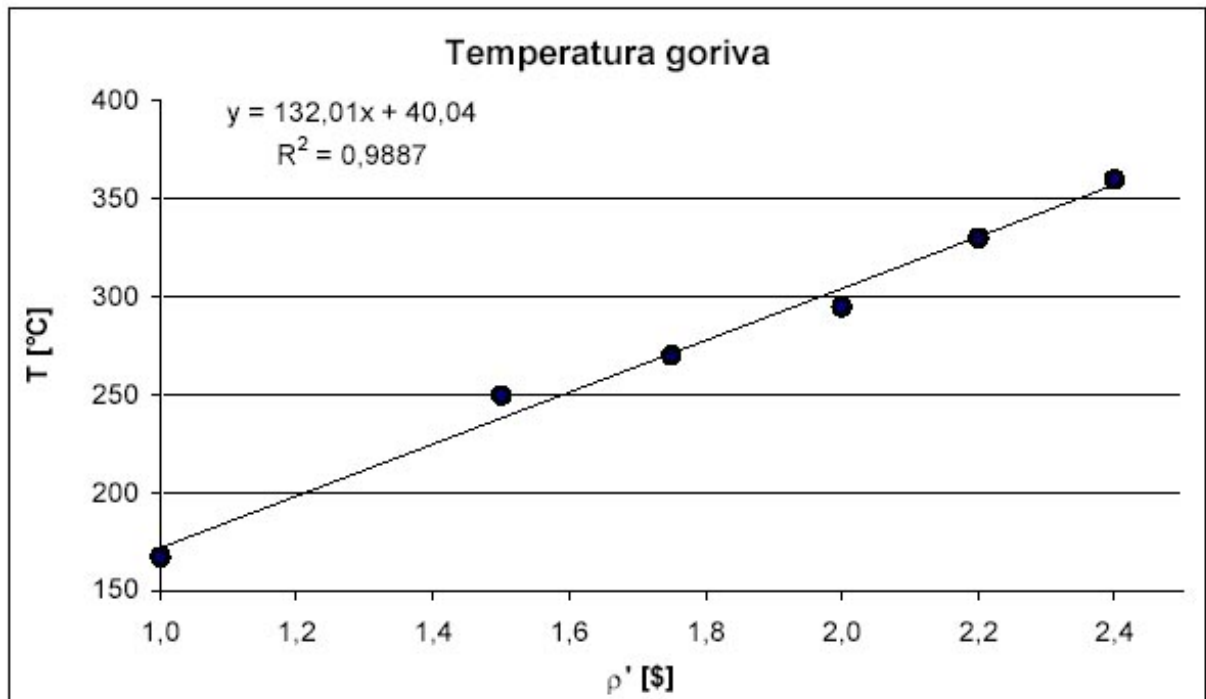
$$\Delta t = \frac{3,5\Lambda}{\rho'} \Rightarrow \Lambda = \frac{\rho'}{3,5\Delta t}$$

$$\Lambda = (2,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-4} s$$

kar je že dosti bližje naši pričakovani vrednosti. Ocenimo lahko še začetno pomnoževalno konstanto (α_0). Uporabimo definicijo $\alpha_0 = \frac{\rho'}{\Lambda}$, zadnji rezultat za življenjski čas (Λ) in pa reaktivnost pri posamezni vrednosti, pa dobimo:

$$\alpha_0 = (1,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-2} s$$

kar niti ni tako slabo, saj je prava vrednost $\alpha_0 = 5,7 \cdot 10^{-2} s$. Za konec še narišimo graf maksimalne temperature goriva (oziroma povprečje meritve te temperature na dveh termočlenih) od promptne reaktivnosti.



Slika 7, maksimalna temperatura goriva ob pulzu v odvisnosti od promptne reaktivnosti

6. Vprašanja

1. Preveri, ali veljajo zveze, kot jih napoveduje model, tudi, ko merjene točke ekstrapoliraš do reaktivnosti nič!

Fuchs-Hansenov model velja samo, če je reaktivnost mnogo večja od 1 \$. Če ne bi upoštevali meritev pri reaktivnostih, manjših od 2 \$, bi dobili manjša odstopanja od modela, kot pri obdelavi vseh meritev.

7. Zaključek

Pri pulznem eksperimentu smo opazovali odziv TRIGA reaktorja pri nenadnem povečanju reaktivnosti in moči. Iz dobljenih meritev smo lahko ocenili veljavnost Fuchs-Hansenov modela in ugotovili, da nam model da dokaj dober približek tega, kar se dogaja v reaktorju. Ima seveda svoje omejitve, ki so bile v našem primeru pred vsem posledica sorazmerno enostavnih predpostavk, na katerih smog a gradili. Za izboljšanje rezultatov bi bilo v okviru modela še upoštevati zakasnele nevtrone, specifične dimenzije in geometrijsko obliko reaktorja. Iz tega bi lahko dobili krajevno porazdelitev in verjetno boljše rezultate, bi pa vse te izboljšave zahtevale tudi reševanje enačbe točkovne kinetike za primer našega reaktorja, kar bi bilo v času, ki smo ga imeli na voljo za meritev in obdelavo podatkov neizvedljivo. Vseeno pa smo iz odvisnosti parametrov v reaktorju lahko videli, da je Fuchs-Hansenov model dober približek in uporabno orodje pri napovedovanju dogajanja v reaktorju pri nenadnem povečanju aktivnosti. Pri izvedbi poskusa tudi nismo naleteli na noben indikacijo, da istega modela in ugotovitev na njegovi podlagi ne bi bilo moč aplicirati na primeru komercialnega reaktorja (npr. jedrskega reaktorja v Krškem). Pogoji delovanja so sicer drugačni, osnovna fizika v ozadju pa je brez dvoma ista. Glede na to, da si v NE Krško ne moremo privoščiti »pulziranje«, saj bi nenadni in za razliko od pulza v TRIGA reaktorju, precej večji porast moči in reaktivnosti v komercialnem reaktorju letga poškodoval. Kot smo videli, lahko z izvedbo eksperimenta na raziskovalnem reaktorju, kot je reaktor TRIGA v Podgorici, lahko tako z uporabo sorazmerno preprostega modela napovemo obnašanje komercialnega reaktorja pri nenadnem porastu napetosti, kjer ne moremo izvesti podobnih poskusov.

8. Literatura

- [1] Bell, Gladstone. *Nuclear Reactor Theory*. New York: Van Nostrand Co, 1970.
- [2] Dr. Ravnik, M. *Navodila za vajo Pulzni eksperiment*; Praktikum 4.
- [3] Pregl. *Varnostno poročilo za reaktor TRIGA Mark 2 v Podgorici*. Junij 1992.