Podkritičnost tyče reaktoru VR - 1

Š. Tichý
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1
tichyste@fjfi.cvut.cz

Abstrakt

Ve svém experimentu jsem se zabýval vlivem, respektive zápornou reaktivitou, regulační tyče reaktoru VR - 1 působící na štěpnou reakci v něm probíhající a zjištěním dostatečné doby měření pro zisk potřebných dat. Použil jsem metody Rod-Drop a Source-Jerk, které jsem počítal skokově a pro zisk dat bylo vyžito detektorů SNM-11 a KNK-56. Výsledná data jsem zpracoval do grafu, vyhodnotil a následně určil potřebnou dobu měření i zápornou reaktivitu tyče.

1 Úvod

V dnešní době, kdy lidstvo je zcela závislé na elektřině a zvyšuje se trend používání tzv. čistých zdrojů, je třeba mít zdroj s minimální uhlíkovou stopou, který je zároveň stabilní, nezávislý na rozmarech počasí a schopný dlouhodobě zajišťovat pokrytí konstantní spotřeby, jako jsou průmyslové podniky, nemocnice či výpočetní servery. Vše výše uvedené splňují jaderné zdroje.

Řízení jaderného zdroje musí být velice precizní, a proto se spoléhá na řadu detekčních a řídících systémů. Jedním z nich jsou i regulační tyče, jejichž vlivem na řízenou štěpnou reakci jsem se v tomto experimentu zabýval.

2 Teorie

V jaderném reaktoru VR-1 probíhá štěpení atomů Uranu 235 v aktivní zóně, dále jen AZ, kdy se jádro stane nestabilním po srážce s neutronem. Tyto neutrony pochází buď z jaderného zdroje (v našem případě složený z Am-Be) nebo z předchozí srážky, kdy vznikají 2-3 neutrony, takže reakce exponenciálně roste. Aby se zabránilo nekontrolovatelnému růstu výkonu, používají se takzvané absorbátory (kadmium či bór), které neutron pohltí a zabrání mu jít do další reakce. Tyto prvky jsou obsaženy v regulačních tyčích, jejichž zasouváním a vysouváním lze řídit reakci. Pokud ke štěpení jádra nedojde hned po srážce s neutronem, ale až později, tak neutrony vzniklé tímto způsobem nazýváme zpožděnými.

Důležitou roli hrají také tzv. moderátory - látky zpomalující neutron na nižší energetickou hladinu, při které je pravděpodobnost srážky větší. Účinný průřez reakce (vyjadřující pravděpodobnost interakce) je nízký při energii, kterou má neutron vyletující ze štěpení.

Abychom mohli správně řídit reakci pomocí tyčí, musíme znát jejich vliv na reakci. Vzhledem k tomu, že tyče pohlcují neutrony, přináší do reakce tzv. zápornou reaktivitu. Reaktivita je odchylka od kritického stavu, kdy počet neutronů jdoucích do reakce se nemění s časem - nové nadbytečné neutrony jsou pohlceny absorbátory, takže hustota toku neutronů je konstantní. Pokud je reaktivita kladná, respektive záporná, je reakce nadkritická, respektive podkritická. Reaktivitu, kterou vnese tyč do reakce, lze vyjádřit

následně: $\frac{\rho}{\beta_{ef}} = 1 - \frac{n_o}{n_1}$, kde ρ je reaktivita, β_{ef} je efektivní podíl zpožděných neutronů, v našem případě 1 a n_o, n_1 je relativní odezva detektorů neutronů před vnesením reaktivity, respektive po.

Pro změření těchto veličin lze využít dvou metod, metody Rod-Drop a metody Source-Jerk. Obě lze zrealizovat v jednom měření. Začneme s metodou Rod-Drop, kdy uvedeme reaktor do kritického stavu s jednou plně vysunutou tyčí, kterou budeme měřit. Začneme měřit hustotu neutronů, abychom měli výchozí hladinu během kritického stavu, naše n_o. Následně necháme volným pádem spadnout tyč do AZ, to způsobí skokové vnesení záporné reaktivity, což se nám projeví i skokovým poklesem reaktivity měřené na naše n_1. Dále bude reaktivita klesat exponenciálně, jak se budou postupně pohlcovat i zpožděné neutrony.

V momentě, kdy se nám reaktivita ustálí pouze na přirozenou hodnotu prostředí, jelikož je reaktor v podkritickém stavu a časem nevytváří nové vlastní neutrony, přidáme neutronový zdroj (u reaktoru VR-1 pomocí vakuové trubice), který nám bude do reakce přidávat nové neutrony. Část z nich bude pohlcována tyčí, takže počkáme na ustálení a naměříme novou výchozí hladinu, nové n_o. Následně odstraníme neutronový zdroj a z důvodu podkritičnosti systému nám reaktivita opět skokově klesne o zápornou reaktivitu systému, v našem případě způsobeného tyčí, nové n_1.

Z porovnání obou metod a naměřených hodnot a délky skoku - časový rozdíl mezi nimi, můžeme určit reaktivitu, potřebnou dobu měření a jeho přesnost, jelikož známe parametry na našem reaktoru a tak víme, že by nám měla vyjít hodnota $|\rho| = 1$

3 Praktická část

3.1 Příprava

Reaktor byl uveden do kritického stavu s hustotou neutronů 10^5 a se zcela vyzvednutou tyčí, kterou hodláme měřit. Umístili jsme detektory SNM-11 a KNK-56 do vertikálních kanálů zavedených do AZ. Před spuštěním reaktoru by mělo být ještě změřeno přirozené pozadí a následně odečteno, což jsme bohužel neučinili, proto došlo ke zkreslení výsledků.

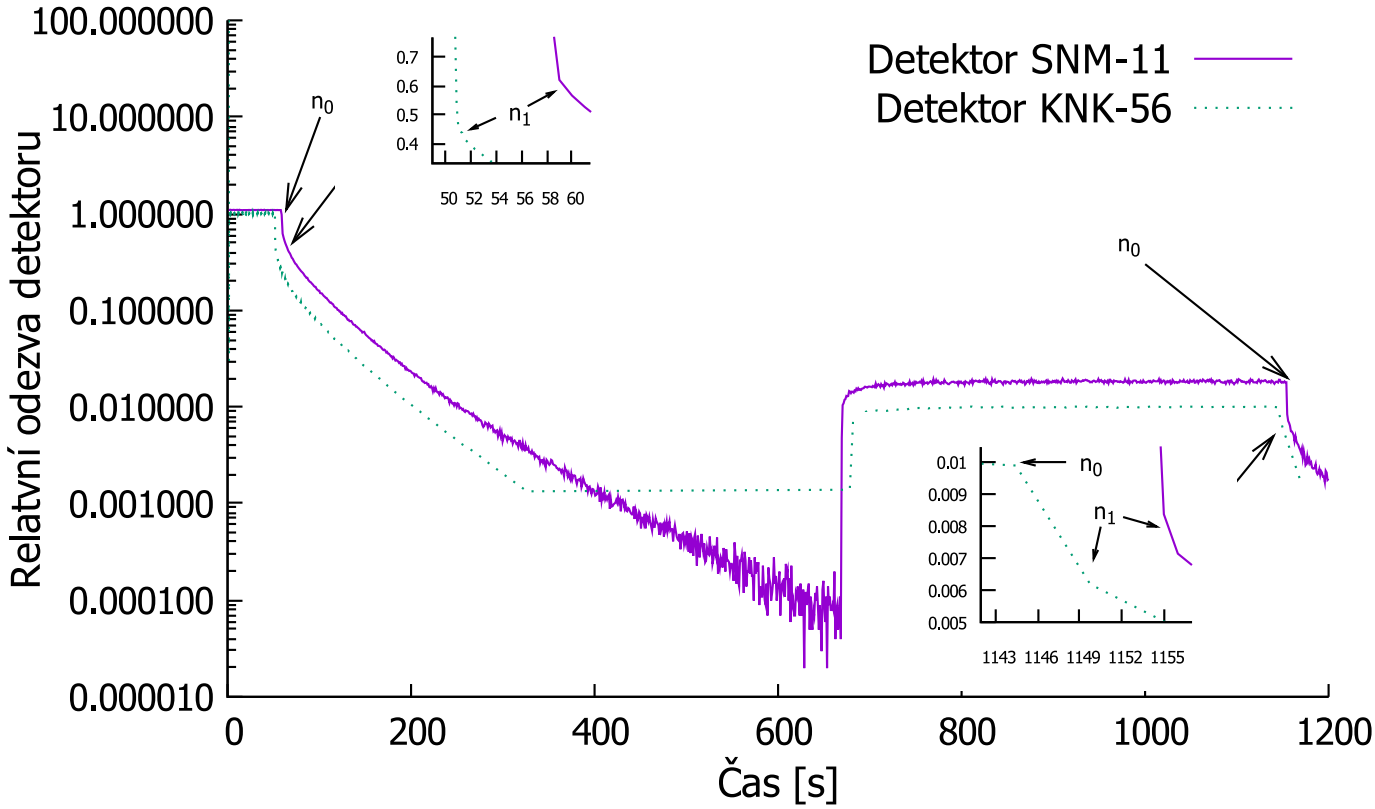
3.2 Měření

Započali jsme měření a po necelou minutu jsme sbírali data během kritického stavu, abychom mohli určit výchozí n_o. Z důvodu konstrukce KNK-56, která je vhodnější pro nižší hodnoty, nejdříve detektor zaznamenal mnohem větší než reálnou hodnotu (porovnáno s řídícím systémem) a jeho čas započal později. Proto jsou jeho data posunuta přibližně o 8 sekund dříve oproti druhému detektoru, který na začátku měřil správně a až ke konci druhé metody přestal měřit, protože hodnoty byly pod jeho mezní hodnotou měření. Detektor KNK-56 měřil jednou za sekundu, zatímco SNM-11 na začátku měření při vyšších hodnotách měřil po 0,1 sekundách a u nižších hodnot začal vynechávat. Po sběru počátečních dat jsme nechali volným pádem spadnout tyč, což skokově vneslo zápornou reaktivitu a soustava se stala podkritickou. Pokračovali jsme v podkritickém stavu reak-

toru přibližně 400 s, abychom se zbavili všech zpožděných neutronů a klesli na přirozenou hodnotu prostředí. Následně byl přidán neutronový zdroj a po dalších přibližně 500 s jsme nechali hodnoty se ustálit, abychom mohli určit hodnotu n_o v metodě Source-Jerk. Nakonec jsme odstranili neutronový zdroj a pokračovali v měření po dalších 200 s.

4 Výsledky

Průběh měření lze vidět v následujícím grafu, kde jsou přiblíženy momenty skoku a změna na exponenciální pokles zpožděných neutronů. Osa y je logaritmická, takže u nižších hodnot je relativní chyba větší. Nejdříve vidíme skok během metody Rod-Drop, poté přidání zdroje následované metodou Source-Jerk. Změřené hodnoty a výsledky jsou přiložené v tabulce níže, kde jsou zobrazeny časy začátku skoku - t_o, konce skoku - t_1, délka skoku - Δt, hodnoty reaktivity/relativní odezvy detektorů n_o, n_1 a spočtená reaktivita ρ.



Obr. 1: Záznam relativní odezvy detektorů vůči kritickému stavu v čase

5 Závěr

Záporná reaktivita vnesené tyče byla určena jako aritmetický průměr jednotlivých hodnot z obou metod a obou detektorů, dostatečná délka měření skoku t byla určena pro každou metodu zvlášť a vynásobena koeficientem 2 a zaokrouhlena nahoru pro zajištění, že celý skok bude zaznamenán.

	Metoda Rod-Drop		Metoda Source-Jerk	
	KNK-56	SNM-11	KNK-56	SNM-11
výchozí n	30.36 ± 0.01	110100	0.302 ± 0.0003	1842.2 ± 2.5
n_0	1.003	1.000	0.010	0.018
t_0	50.547 s	57.000 s	1144.445 s	1154.000 s
n_1	0.448	0.57	0.006	0.008
t_1	51.050 s	59.000 s	1149.750 s	1155.000 s
Δt	0.503 s	2 s	5.305 s	1 s
ρ	-1.238	-0.754	-0.667	-1.250

Výsledná vnesená reaktivita	ρ	-0.977 ± 0.155
Metoda Rod-Drop	t_a	4 s
Metoda Source-Jerk	t_b	11 s

Výsledná reaktivita je $\rho = -0.977 \pm 0.155$ s chybou měření 15,9 %. Chyba je způsobena nezapočítáním přirozené reaktivity prostředí a špatným fungování detektoru KNK-56 při nízkých hodnotách, kdy se prodloužil i interval sběru dat z 0,1 s postupně do řádu sekund, proto je vypočítaná reaktivita při metodě Source-Jerk tak odlišná od ostatních. Pro samostatnou metodu Rod-Drop je vhodnější detektor KNK-56 a pro metodu Source-Jerk při nižších hodnotách detektor SNM-11. Při používání obou detektorů je dostatečná doba měření po pádu tyče 4 s a po odstranění zdroje 11 s. Tyto metody lze počítat i integrálně, ale na to je třeba započítat i prostředí, které jsme my nezměřili.

6 Poděkování

Poděkování patří Katedře jaderných reaktorů ČVUT V Praze za umožnění provedení experimentu a obzvláště panu ing. Ondřeji Novákovi za ochotu a odbornou konzultaci.

Reference

[1] J. Rataj a kol., *Experimentální neutronová a reaktorová fyzika: laboratorní cvičení*, České vysoké učení technické v Praze, Praha 2016, ISBN 978-80-01-05904-3
[2] K. Matějka, *Experimentální úlohy na školním reaktoru VR-1*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2004, ISBN 80-01-03097-0
[3] A. Kolros a kol., *Equipment for neutron measurements at VR–1 Sparrow training reactor*, https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.09.012
[4] kol. autorů http://www.reaktor-vr1.cz/cz/reaktor
[5] O. Novák osobní konzultace (2019)