

# Využití zpožděných neutronů ke stanovení množství štěpného materiálu

L. Gavlová\*, J. Kožnar\*\*, V. Zukalová\*\*\*

\*PORG Ostrava, \*\*Střední průmyslová škola Třebíč, \*\*\*Gymnázium  
dr. A. Hrdličky v Humpolci

\*gavlovalucie@porg.cz, \*\*koznarj.04@spst.eu,  
\*\*\*vzkalova1@gmail.com

## Abstrakt:

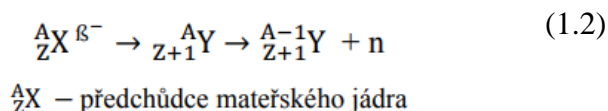
Provoz stávajících jaderných elektráren je neoddělitelně spojen s obohacovacím procesem, jelikož stávající bloky vyžadují obohacení paliva alespoň 2,5 %, ale Uran vyskytující se v přírodě má zastoupení štěpného prvku pouze 0,7 %. Vzhledem k nutnosti transportu a skladování těchto materiálů bylo historicky potřeba vyvinout nedestruktivní metody stanovení koncentrace a hmotnosti štěpného prvku v neznámém vzorku. K tomuto stanovení neznámého vzorku je možné využít zpožděné neutrony. Zpožděné neutrony se uvolní při rozpadu jader vzniklých štěpením. Měření proběhlo na školním reaktoru VR-1. Výsledek měření neznámého obsahu uranu byl zpřesněn výpočtem na 3,02 %.

## 1. Vznik a význam zpožděných neutronů

Štěpení spočívá v rozdělení jádra. V prvním stádiu štěpné reakce dochází k pohlcení neutronu, přičemž vznikne jádro ve vzbuzeném stavu (1.1) (složené jádro). Takové jádro emituje gama záření a může přejít do základního stavu nebo dojít k jeho rozštěpení .



Produkty štěpení jsou díky velkému nepoměru protonů a neutronů nestabilní, proto jsou radioaktivní a dochází k  $\beta^-$  rozpadu s doprovodným zářením gama. Pokud  $\beta^-$  rozpad vede na jádro ve vzbuzeném stavu a je-li energie vzbuzeného jádra vyšší, než vazbová energie neutronu v jádře dojde k emisi neutronu a vzniká tak stabilní jádro. Takto emitovaný neutron nazýváme zpožděným neutronem (1.2).



${}^A_ZX$  – předchůdce mateřského jádra

$\beta^-$  – záření beta mínus

${}^A_{Z+1}Y$  – mateřské jádro

${}^{A-1}_{Z+1}Y$  – výsledné jádro

Zpožděné neutrony a jejich efekt na chování jaderného reaktoru nejvíce prostudoval G. R. Keepin v 50. a 60. letech. Rozdělil zpožděné neutrony do šesti skupin, podle poločasu rozpadu  $\tau_i = \frac{1}{\lambda}$  a počtu zpožděných neutronů na jeden neutron vyvolávající štěpení  $\beta_i = \frac{v_d^i}{v_d + v_p}$ . Důležitou charakteristikou je energie. Energie zpožděných neutronů se pohybuje v rozmezí 200 keV – 700 keV, střední energie okamžitých neutronů, dosahuje 2,2 MeV. Musí tedy v rámci zpomalovacího procesu projít menším rozsahem energií.

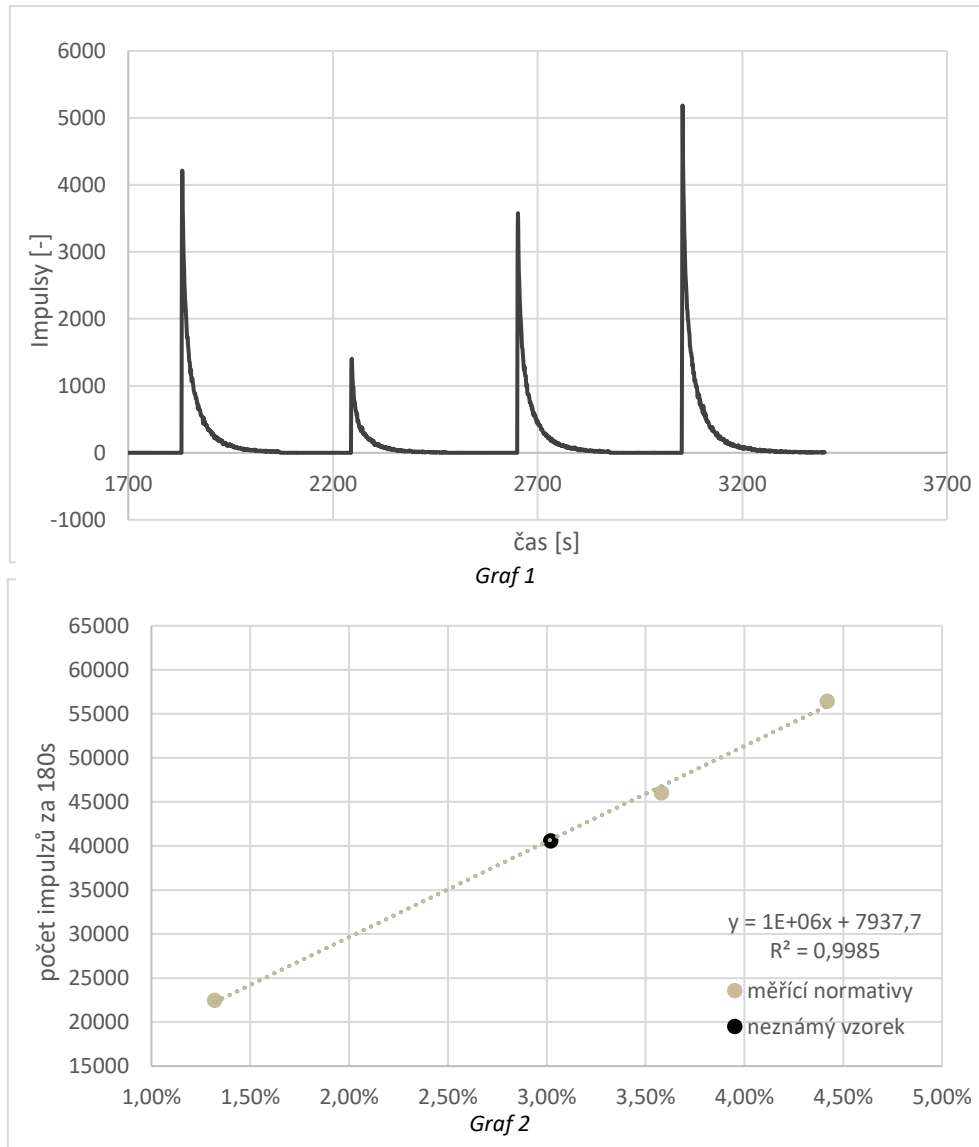
## 2. Praktická část

Pro naměření procentního obsahu uranu jsme nejprve uvedli školní reaktor VR-1 do kritického stavu na výkon 2E6. Následně byl operátorem zvolen režim automatického provozu. Po uvedení reaktoru do požadovaného režimu byl první vzorek transportován potrubní poštou do centra aktivní zóny, kde byl ozařován po dobu pěti minut neutrony z probíhající štěpné řetězové reakce. Poté byl první vzorek ES-03 o hmotnosti 1,5 g a o obohacení 1,32 %  ${}^{235}\text{U}$  transportován do polyetylového boxu, kde byla měřena emise zpožděných neutronů a následovně byl na analyzátorech EMK-310 pozorován časový průběh četnosti emise zpožděných neutronů ze vzorku. Stejný postup byl zopakován u vzorku ES-04 – neznámého vzorku, ES-05 a ES-06. Výsledky měření byly zaznamenány do Tabulky č. 1.

Vzorek	Hmotnost vzorku [g]	Obsah ${}^{238}\text{U}$
ES - 03	1,5	1,32 %
<b>ES - 04</b>	<b>1,5</b>	<b>neznámý</b>
ES - 05	1,5	3,58 %
ES - 06	1,5	4,42 %

Tabulka č. 1

Pomocí metody detekce zpožděných neutronů bylo díky vztahu (viz Graf č. 2) z hodnot Grafu č. 1 určeno množství  $^{235}\text{U}$  obsažené ve vzorku ES-04 na 3,02 %.



### 3. Závěr

Byl změřen časový průběh emise zpožděných neutronů ze štěpného materiálu ozářeného ve školním reaktoru VR-1. Díky získaným parametrům z analýzy bylo vypočítáno obohacení neznámého vzorku. Byla využita metoda detekce zpožděných neutronů k určení obohacení štěpného materiálu vzorku ES-04.

## Reference

BAŠTÁŘOVÁ, B. a F. SOLAŘ. *Využití zpožděných neutronů ke stanovení množství štěpného materiálu* [online]. Praha, 2019 [cit. 2023-06-20]. Dostupné z: <https://tydenvedy.fjfi.cvut.cz/2019/output/sbornik/proceeds.pdf>

## Poděkování

Chtěli bychom poděkovat panu Ing. Ondřejovi Novákovi za vedení projektu a jeho cenné rady. Dále bychom chtěli poděkovat panu Ing. Tomášovi Bílému, Ph.D., který nás provázel měřeními, Ing. Pavlu Sukovi a Katedře jaderných reaktorů Českého vysokého učení technického v Praze za možnost zrealizovat tento projekt v rámci projektu Týden vědy na Jaderce 2023.