

PSJR: 7. přednáška

Ondřej Huml

13. 4. 2020

1 Zpětné vazby v jaderném reaktoru - Dynamika reaktoru

Doposud se přednášky zabývaly *kinetikou* reaktoru, tedy analýzou odezvy výstupních veličin reaktoru (nejčastěji výkon N) na změny vstupních veličin (konkrétně reaktivity ρ). Ve skutečném reaktoru dochází k řadě fyzikálních procesů, které způsobují, že výstupní veličina (N) může zpětně ovlivnit vstupní veličinu (ρ). Tyto procesy se souhrnně nazývají *zpětné vazby*. Při zahrnutí zpětných vazeb do analýz pak mluvíme o *dynamice* reaktoru.

Schematicky lze působení zpětné vazby naznačit na Obr. 1. Opět platí, že $G_0(t)$ je *přenosovou funkcí nulového linearizovaného reaktoru*, $W_{\rho N}(t)$ je *přenosovou funkcí linearizované zpětné vazby*¹ a reaktivita $\rho(t)$, na základě které se mění násobení neutronů v reaktoru, je složena z *externí reaktivity* $\rho_{ex}(t)$ ² a ze *zpětnovazební reaktivity* $\rho_{ZV}(t)$. Při použití předpokladu linearizovaného modelu a Laplaceovy transformace lze napsat sadu rovnic, ze kterých lze následně odvodit přenosovou funkci reaktoru (včetně zpětných vazeb) $\tilde{G}(s)$. Z linearizovaného modelu vyplývá:

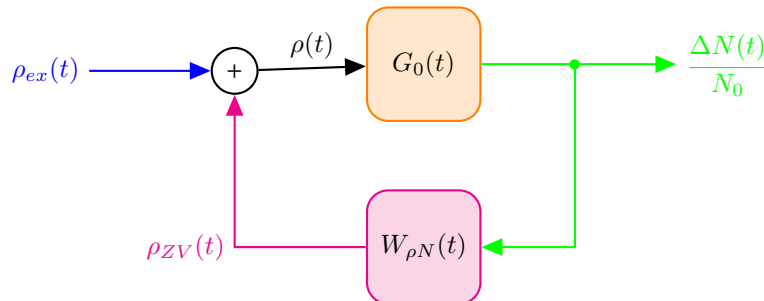
$$\frac{\widetilde{\Delta N}(s)}{N_0} = \widetilde{G}_0(s) \cdot \tilde{\rho}(s) = \widetilde{G}_0(s) \cdot [\widetilde{\rho_{ex}}(s) + \widetilde{\rho_{ZV}}(s)] \quad (1)$$

Zpětnovazební reaktivita se dá pomocí své přenosové funkce vyjádřit jako:

$$\widetilde{\rho_{ZV}}(s) = \widetilde{W_{\rho N}}(s) \cdot \frac{\widetilde{\Delta N}(s)}{N_0} \quad (2)$$

Rovnici 2 lze pak dosadit do rovnice 1 a po drobných úpravách lze vyjádřit celkovou přenosovou funkci reaktoru (včetně zpětných vazeb) $\tilde{G}(s)$:

$$\tilde{G}(s) = \frac{\widetilde{\Delta N}(s)}{N_0 \cdot \widetilde{\rho_{ex}}(s)} = \frac{\widetilde{G}_0(s)}{1 - \widetilde{G}_0(s) \cdot \widetilde{W_{\rho N}}(s)} \quad (3)$$



Obrázek 1: Schéma reaktoru se zpětnou vazbou

Přenosová funkce $W_{\rho N}(t)$ představuje matematické vyjádření fyzikálních procesů, díky nimž změny výkonu reaktoru ovlivňují reaktivitu. Stanovení této funkce může být značně komplikované a v dalším textu nebude prováděno.

¹Index ρN značí, že výkon N prostřednictvím zpětné vazby ovlivňuje reaktivitu ρ

²např. reaktivita způsobená změnou polohy regulační tyče nebo změnou koncentrace kyseliny borité

1.1 Rozdělení zpětných vazeb z hlediska bezpečnosti

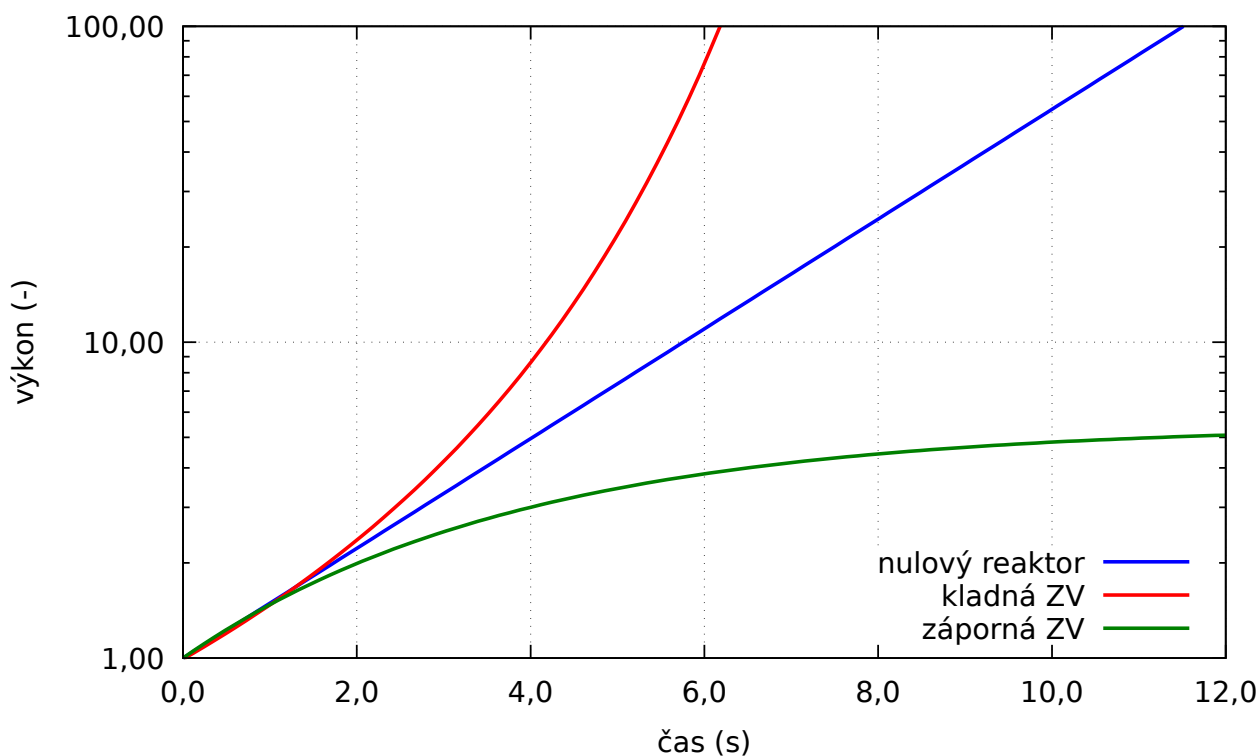
V téměř všech dějích ovlivňuje výkon reaktivitu zprostředkovaně přes změny teplot jednotlivých složek aktivní zóny reaktoru. Všechny zpětné vazby lze z hlediska vlivu na reaktivitu a z hlediska bezpečnosti rozdělit na dva typy:

- kladná zpětná vazba
- záporná zpětná vazba

Při kladné zpětné vazbě způsobí nárůst výkonu zvyšování reaktivity (zavádění kladné zpětnovazební reaktivity), což způsobí zrychlení zvyšování výkonu a ten opět prostřednictvím kladné zpětné vazby uvolní více kladné zpětnovazební reaktivity. To se děje stále dokola. Drobná kladná odchylka výkonu tak může díky kladné zpětné vazbě způsobit zrychlující se nárůst výkonu. Pokud toto nebude vnějším zásahem (např. regulačními tyčemi) potlačeno, začne výkon nekontrolovaně růst. Kladná zpětná vazba tedy zvyšuje nestabilitu reaktoru a je potencionálně nebezpečná. Naopak při poklesu výkonu, způsobí kladná zpětná vazba další snižování výkonu.

Při záporné zpětné vazbě způsobí nárůst výkonu snižování reaktivity (zavádění záporné zpětnovazební reaktivity), což způsobí zpomalení nárůstu výkonu. Pokud je záporná zpětná vazba dostatečně silná, může dokonce způsobit pokles výkonu. Naopak při počátečním snižování výkonu způsobí záporná zpětná vazba zvyšování reaktivity (zavádění kladné zpětnovazební reaktivity) a tím se pokles výkonu zpomaluje. Lze tedy říci, že záporná zpětná vazba vždy působí proti počáteční změně a tím tedy reaktor stabilizuje.

Jak vypadá odezva reaktoru na kladnou konstantní změnu externí reaktivity pro případ bez zpětné vazby (nulový reaktor), s kladnou a se zápornou zpětnou vazbou demonstruje Obr. 2. Z něj je patrné, že v nulovém reaktoru asymptotické chování odpovídá přechodové charakteristice - tedy exponenciální³ nárůst výkonu. V případě kladné zpětné vazby rostoucí výkon zvyšuje reaktivitu a ta urychluje nárůst výkonu. Ten pak roste výrazně strměji než exponenciálně (exponenciálně při logaritmickém měřítku osy Y). Záporná zpětná vazba způsobuje, že rostoucí výkon snižuje reaktivitu a to způsobí zpomalování nárůstu výkonu až do doby kdy se nárůst zastaví a výkon se stabilizuje. Stabilizace nastane v momentě, kdy záporná zpětnovazební reaktivita ρ_{zv} dosáhne v absolutní hodnotě stejné velikosti jako kladná externí reaktivita ρ_{ex} . Výsledná reaktivita ρ pak bude nulová. Z grafu je dále patrné, že při nízkých výkonech všechny křivky splývají, protože vliv zpětných vazeb se ještě neuplatňuje. Lze tedy konstatovat, že každý reaktor se částečně chová jako nulový (při nízkých výkonech) a každý reaktor má zpětné vazby, ale záleží od jakého výkonu se začnou projevovat.



Obrázek 2: Vliv zpětných vazeb na zavedení konstantní kladné reaktivity

³Osa Y má logaritmické měřítko

1.2 Rozdělení zpětných vazeb na základě fyzikálních dějů

Na základě fyzikálních dějů, které způsobují zpětné vazby, lze zavést dvě kategorie zpětných vazeb:

1. jaderné - změna reaktivity je způsobena změnou jaderných vlastností - mikroskopických účinných průřezů σ a tedy změnou reakčních rychlostí neutronů s materiály aktivní zóny. Tyto změny mohou probíhat dvěma způsoby:
 - Změna teploty materiálů aktivní zóny způsobí změnu Maxwell-Boltzmannova rozdělení jejich energií a tím i změnu energetického spektra neutronů. Díky závislosti mikroskopických účinných průřezů σ na energii neutronů dojde ke změně reakčních rychlostí.
 - Změna teploty materiálů aktivní zóny přímo ovlivní tvar závislosti mikroskopických účinných průřezů σ na energii neutronů. Způsobí tzv. rozšiřování rezonancí (Dopplerův efekt), které bude popsáno dále v textu.
2. hustotní - změna reaktivity je způsobena změnou hustot jednotlivých složek aktivní zóny. Změna hustot materiálů způsobí dva efekty:
 - Změna koncentrace jader v materiálech způsobí změnu makroskopických účinných průřezů Σ a tím i změnu reakčních rychlostí.
 - Změna hustoty materiálů způsobí v důsledku teplotní roztažnosti změnu rozměrů složek aktivní zóny (např. prodloužení palivových proutků) a tím změnu geometrického parametru B_G a tím změnu reaktivity.

1.3 Teplotní koeficienty reaktivity

Aby bylo možné působení zpětných vazeb kvantifikovat, byly zavedeny tzv. teplotní koeficienty reaktivity. Ty vyjadřují jak výrazně mění zpětná vazba reaktivitu v závislosti na teplotě. Teplotní koeficienty reaktivity jsou označovány a_i , kde index i značí složku aktivní zóny (palivo, moderátor, chladivo apod.). Obecná definice koeficientů je:

$$a_i = \frac{\partial \rho}{\partial T_i} \quad (4)$$

Celkovou zpětnovazební reaktivitu ρ_{ZV} lze pak obecně vyjádřit:

$$\rho_{ZV}(t) = \sum_i \frac{1}{V_i} \cdot \int_{V_i} a_i(\vec{r}) \cdot \Delta T_i(\vec{r}, t) \cdot \Omega_i(\vec{r}) d\vec{r} \quad (5)$$

kde V_i představuje objem i -té složky aktivní zóny, \vec{r} je polohový vektor⁴, $\Delta T_i(\vec{r}, t)$ je změna teploty i -té složky na pozici \vec{r} v čase t od ustálené počáteční teploty a $\Omega_i(\vec{r})$ představuje váhovou funkci⁵, která určuje závislost vlivu na změnu reaktivity na poloze \vec{r} .

Při použití jednobodové kinetiky lze zanedbat prostorovou závislost a výpočet zpětnovazební reaktivity se zjednoduší:

$$\rho_{ZV}(t) = \sum_i a_i \cdot \Delta T_i(t) \quad (6)$$

V této kapitole je uvažováno zjednodušení - tzv. *lineární model zpětné vazby*, kdy se předpokládá, že zpětnovazební koeficienty a_i nezávisí na teplotě T_i . Ve skutečnosti jsou však koeficienty teplotně závislé.

Ukázku odvození konkrétních koeficientů a_i lze nalézt ve skriptech *Dynamika reaktorů* prof. Heřmanského v kapitole 2 na str. 67.

1.4 Dopplerův efekt a teplotní zpětná vazba paliva

Mikroskopické účinné průřezy $\sigma(E_n)$ jsou závislé na energii nalétávajícího neutronu E_n . V epitermální oblasti energií se nachází tzv. rezonanční oblast, ve které mikroskopické účinné průřezy vykazují rezonance (Obr. 3).

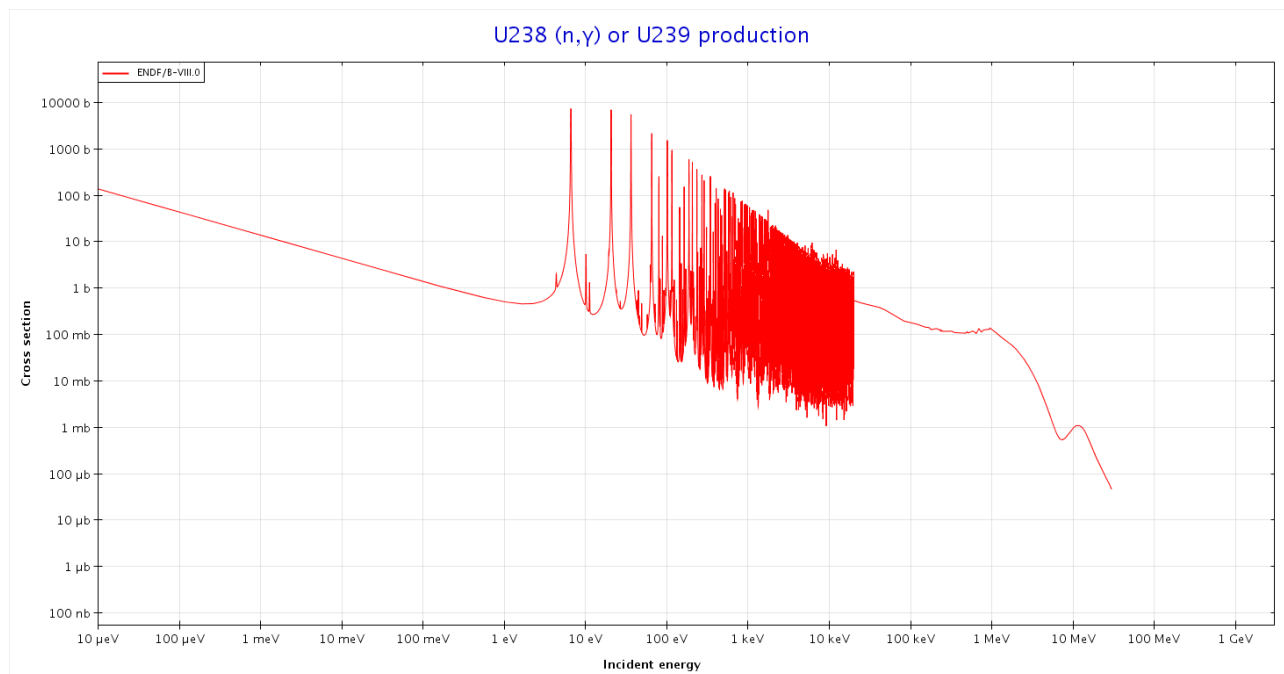
⁴je uvažována prostorová závislost

⁵Při použití zjednodušení jednogrupové poruchové teorie vyplývá, že váhová funkce má tvar kvadrátu hustoty toku neutronů $\phi^2(\vec{r})$.

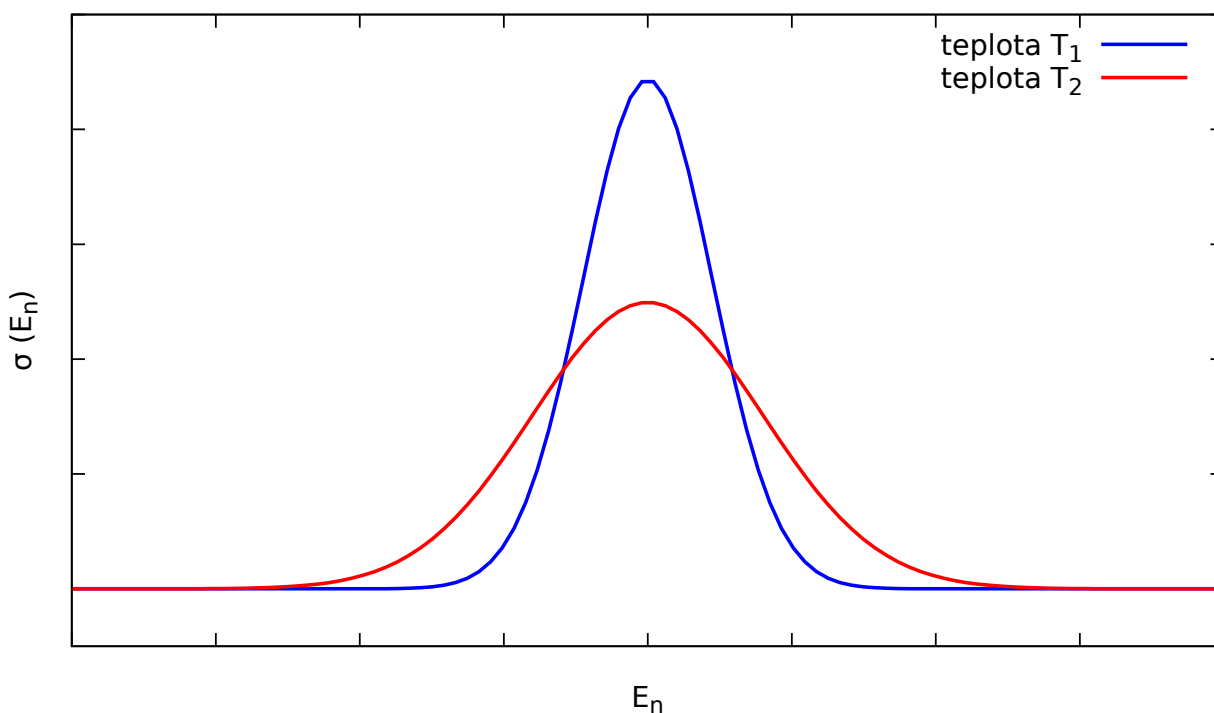
Při zvyšování teploty paliva způsobuje Dopplerův efekt rozšiřování rezonancí. To je schematicky naznačeno na Obr. 4. Celková plocha pod rezonancí zůstává nezměněna. Avšak díky tomu, že neutrony nemění svou energii spojitě, ale skokově (při srážkách s jádry moderátoru), dojde se zvýšením teploty ke zvýšení efektivního mikroskopického účinného průřezu⁶ a tím i ke zvýšení pravděpodobnosti dané reakce.

Nejvýznamněji se Dopplerův efekt uplatňuje při rezonančním záchytu na ^{238}U , kdy vlivem nárůstu teploty paliva dojde ke zvýšení intenzity rezonančního záchytu a tím ke snížení reaktivity. Dopplerův efekt tedy na

⁶ten vyjadřuje průměrný účinný průřez přes celé spektrum



Obrázek 3: Mikroskopický účinný průřez pro radiační záchyt na ^{238}U (převzato z <http://www.oecd-neutron.org/janisweb>)



Obrázek 4: Rozšiřování rezonancí vlivem Dopplerova efektu ($T_2 > T_1$)

^{238}U způsobuje zápornou zpětnou vazbu. Dopplerův efekt ovlivňuje rezonance všech typů reakcí, které mají rezonanční oblast. To platí i pro štěpnou reakci na ^{235}U . Zde Dopplerův efekt způsobí navýšení intenzity štěpení vlivem nárůstu teploty. Dopplerův efekt by tedy mohl na ^{235}U vyvolávat kladnou zpětnou vazbu. Na ^{235}U může také nastat radiální záchyt, který vyvolá zápornou zpětnou vazbu. Obecně lze tedy shrnout, že všechny absorpční neštěpné reakce způsobují díky Dopplerově efektu zápornou zpětnou vazbu, zatímco všechny štěpné reakce způsobují kladnou zpětnou vazbu.

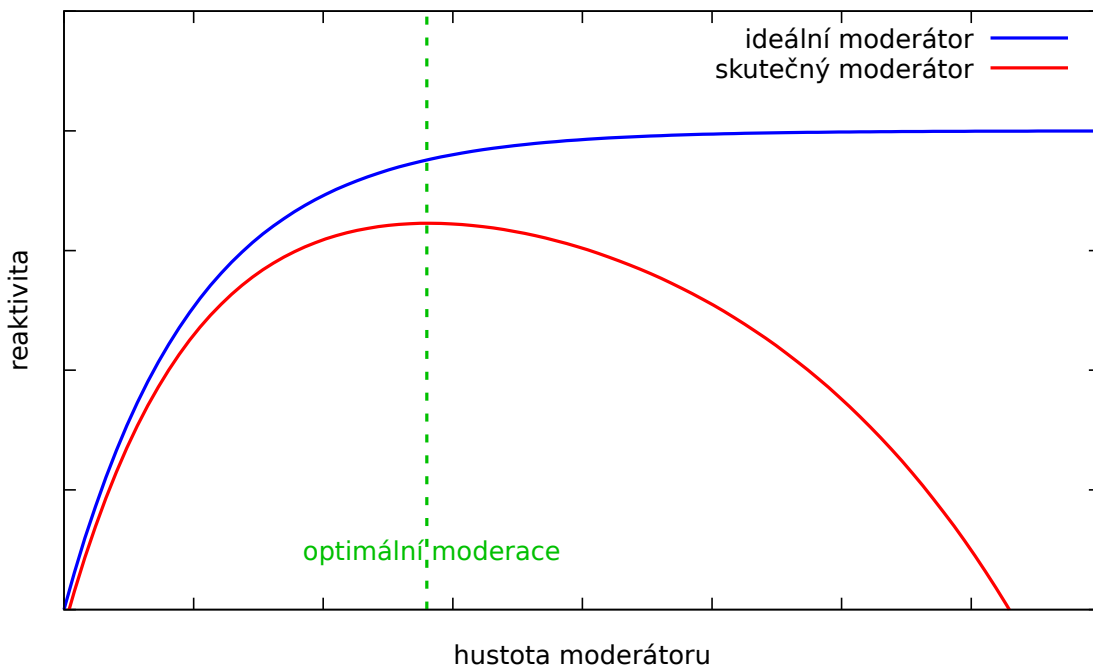
Výsledné znaménko zpětné vazby od změny teploty paliva pak závisí na zastoupení jednotlivých nuklidů (obohacení paliva) a také na energetickém spektru neutronů v reaktoru. U tepelných reaktorů pak má teplotní zpětná vazba paliva prakticky vždy záporné znaménko (intenzita vazby ale klesá s rostoucím obohacením). U rychlých reaktorů s vyšším obohacením (řádově nad 35 %) se může stát, že zpětná vazba vlivem teploty paliva bude kladná.

1.5 Teplotní zpětná vazba moderátoru

Tepelné jaderné reaktory potřebují k udržení štěpné řetězové reakce tepelné neutrony, které vznikají zpomalováním rychlých štěpných neutronů v moderátoru. Při změně teploty moderátoru dochází rovněž ke změně jeho hustoty a tím i makroskopických účinných průřezů Σ reakcí odehrávajících se v moderátoru (rozptyl, absorpce apod.). Při změně teploty moderátoru tak nutně dochází ke změně moderačních vlastností a tím i ke změně reaktivity.

Aby bylo možné analyzovat jak se změna hustoty moderátoru projeví na změně reaktivity (zpětná vazba), je třeba určit průběh závislosti reaktivity na hustotě moderátoru⁷. Tato závislost je patrná z Obr. 5, kde modrou křivkou je naznačen průběh pro „ideální moderátor“. To je takový moderátor, na kterém neprobíhá žádná parazitní absorpce neutronů. Je zřejmé, že s rostoucí hustotou moderátoru přibývá neutronů zpomalených na tepelnou energii a reaktivita roste až do okamžiku, kdy všechny neutrony ztermalizují a další zvyšování hustoty moderátoru už nepřináší navýšení reaktivity.

Ve skutečném moderátoru (červená křivka) však dochází také k parazitní absorpci neutronů a při určité hustotě moderátoru začnou převládat jeho absorpční vlastnosti a křivka začne klesat. Výsledný tvar připomíná kopec, jehož vrchol nastává při tzv. *optimální moderaci*. Ta nastává právě při takové hustotě (množství) moderátoru, kdy reaktivita dosahuje maximální možné hodnoty. Část grafu vlevo od optimální moderace se nazývá *podmoderovaná* (méně moderátoru než optimum), část vpravo je *přemoderovaná* (více moderátoru než optimum). Tvar křivky, hodnota optimální moderace a maximum reaktivity závisí na konkrétním typu moderátoru a jeho moderačně-absorpčních vlastnostech. Jiný tvar bude pro lehkou vodu, jiný pro těžkou vodu či grafit.



Obrázek 5: Závislost reaktivity na hustotě moderátoru

⁷V literatuře lze často nalézt závislost reaktivity na tzv. vodo-uranovém poměru. Ten vyjadřuje poměr množství jader moderátoru a paliva v elementární buňce. Bez újm na obecnosti lze vodo-uranový poměr nahradit pouze hustotou moderátoru.

Nyní lze analyzovat, co se bude odehrávat při změně výkonu reaktoru a tedy jaká zpětná vazba bude působit. Pokud vzroste výkon reaktoru, začne růst teplota paliva, která se postupem času dostane až do chladiwa a moderátoru. Při zvýšení teploty moderátoru dojde k poklesu jeho hustoty a na červené křivce na Obr. 5 se bude bod reprezentující aktuální stav reaktoru posouvat směrem doleva. Pokud se bod nachází v přemoderované oblasti, bude reaktivita s klesající hustotou narůstat. Výsledná zpětná vazba bude tedy kladná. Pokud se bod nachází v podmoderované oblasti, bude reaktivita s klesající hustotou moderátoru klesat a výsledná zpětná vazba bude záporná.

Z hlediska jaderné bezpečnosti je žádoucí, aby zpětná vazba byla záporná a reaktor byl tedy podmoderovaný. To jestli bude reaktor přemoderovaný nebo podmoderovaný lze ovlivnit celou řadou parametrů, z nichž některé se budou během provozu měnit (např. množství paliva vlivem vyhořívání bude měnit vodo-uranový poměr) a některé jsou dané konstrukčním návrhem palivových souborů (např. průměr palivových proutků či jejich rozteč).

Může se stát, že reaktor, který byl navržen jako podmoderovaný se může v určitých provozních stavech stát přemoderovým. Příkladem může být změna koncentrace kyseliny borité v primárním okruhu. Ta výrazným způsobem mění absorpční vlastnosti a tím i tvar křivky na Obr. 5. Při zvyšování koncentrace dochází k posunu hustoty optimální moderace doleva a tak se může stát, že hustota moderátoru, při které byl reaktor původně podmoderovaný se vlivem zvýšení koncentrace kys. borité dostane vpravo od optima a reaktor se stane přemoderovým. To je třeba brát v úvahu např. při stanovování některých provozních limitů.

U některých výrazných heterogenit aktivních zón či přímo palivových souborů se může stát, že některá místa aktivní zóny budou lokálně přemoderovaná. To nemusí nutně z bezpečnostního hlediska vadit, pokud bude zajištěno, že reaktor jako celek je podmoderovaný. Např. u experimentálních reaktorů se běžně stává, že v jejich aktivních zónách jsou výrazně přemoderované oblasti. Reaktor jako celek je však podmoderovaný.