

# PREDIKCE PRODLUŽENÍ ŽIVOTNOSTI DETEKTORŮ NEUTRONŮ

## NEUTRON DETECTORS LIFETIME EXTENSION AND PROGNOSSES

Jiří Fleischhans<sup>a)</sup>, Petr Kos<sup>b)</sup> a Jan Švehla<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> OSVČ, odborný konzultant pro neutronová měření

<sup>b)</sup> ČEZ a.s., ETE

### Abstrakt

Metodika výsledky, umožňující predikovat zbytkovou životnost detektorů.

### Abstract

Methods and results of prediction residual lifetime are presented in the paper.

### Úvod

V jaderném reaktoru probíhá současně velký počet štěpení jader uranu, vyvolaných zachytem neutronu. Vznikají 2 produkty štěpení s vysokou energií, a 2 až 3 neutrony (v průměru cca 2,4). Neutrony procházejí celou řadu „nástrah“, snižuje se jejich energie, mohou být absorbovány v konstrukčních a absorpčních materiálech a uniknout ze soustavy. Únikem ze soustavy rozumíme to, že neutrony **mohou vylétnout z aktivní zóny (AZ) překonat bariéru tlakové nádob a dostat se do biologické ochrany** – stínění. Počet unikajících neutronů je přímo úměrný celkovému počtu neutronů v aktivní zóně, to znamená výkonu reaktoru. Počet neutronů v aktivní zóně se pohybuje v rozsahu cca jedenácti řádů. V tomto rozsahu se pohybuje a musí být detekovatelný i výkon reaktoru.

Informace o průběhu štěpení musí být už aktivní od zavezení prvního palivového souboru, musí existovat systém, který je schopen detekovat neutrony v požadovaném rozsahu. Neutron je elektricky neutrální a poměrně snadno prochází hmotou. Je třeba ho nějak „zviditelnit“ a převést na něco dále zpracovatelného, nejlépe na elektrický signál. K tomu se využívají jaderné reakce, ze kterých se po zachytu neutronu okamžitě generují nabitě částice. Nejčastěji se používá reakce na bór  ${}^5\text{B}^{10}$ , ve které vzniká kladně nabitá částice alfa a štěpná reakce na  ${}^{92}\text{U}^{235}$ , kde vznikají 2 štěpné produkty.

### Stanovení výkonu reaktoru

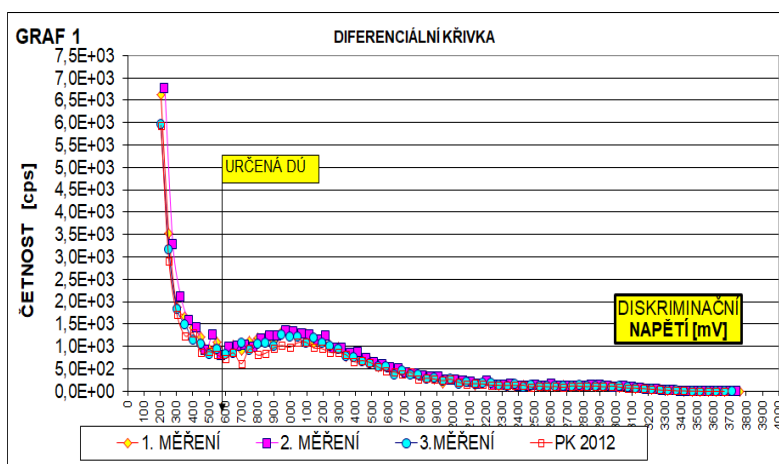
Základním parametrem bezpečného provozu každého reaktoru je znalost jeho výkonu a okamžité změny výkonu. Nelze použít teplotní měření, která vyžadují měřitelné  $\Delta T$ , - je měřitelné od cca 3 % nominálního výkonu ( $N_{\text{NOM}}$ ), a která mají zpoždění dané dobou oběhu média v primárním a sekundárním cyklu. Nepoužitelný je i elektrický výkon turbogenerátoru (TG), který se fází na 40 % nominálního výkonu. Klasickými metodami tedy nelze splnit zejména základní požadavek na měření výkonu na nejnižších úrovních. K měření výkonu je možné použít neutronů, které vylétají do okolí reaktoru prakticky okamžitě. Fyzikálním problémem je jak tyto neutrony detekovat, protože jejich základní vlastností je, že jsou eklekticky neutrální a relativně volně procházejí hmotou. Neutrony mohou vyvolávat při srážce s některými atomy jaderné reakce, jejichž výsledkem je uvolnění částice  $\alpha$  nebo dvou štěpných produktů, které jsou rovněž elektricky aktivní. Na tomto fyzikálním procesu jsou založeny detektory neutronů.

### Detektory neutronů

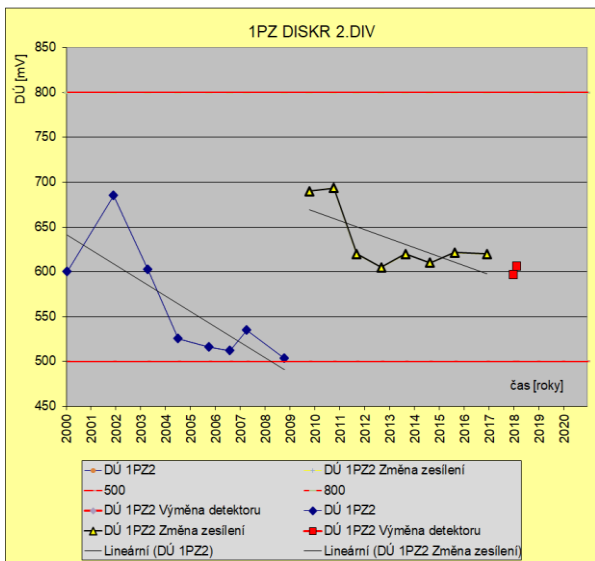
Detektory neutronů jsou vstupními čidly 3 kanálů pro měření neutronového výkonu v bezpečnostním systému reaktoru PRPS (Primary Reactor Protection System), identické v každé ze tří divizí. Rozsah měření víc než 11 řádů, nelze pokrýt jedním měřicím kanálem. Jsou použity 3 kanály, které se navzájem překrývají. Kanál pásma zdroje (PZ) pro nejnižší výkony, kanál širokého pásma (ŠP) od cca  $1\text{E}-9$  do 200 % ( $N_{\text{NOM}}$ ) a kanál výkonového pásma (VP) pro výkony

nad 1 %, ( $N_{NOM}$ ). Dodavatel v dokumentaci uvádí doby použitelnosti detektorů 5 let pro kanály PZ, 10 let pro kanály VP a 40 let pro kanály ŠP. Dále uvádí parametry, které je nutno sledovat a možnosti úprav, kterými lze parametr vrátit do předepsaných mezí. Od začátku provozu na obou blocích jsme archivovali předepsaná měření a sledovali časové trendy. Extrapolace průběhů ukazovala, že limitních hodnot by bylo dosaženo dlouho po dosažení projektové životnosti. Z našich zkušeností z provozu reaktorů ŠR-0 ve ŠKODA JS a na reaktoru Vrabec na FJFI ČVUT vycházelo, že životnost detektorů by měla být podstatně vyšší. Formulovali jsme hypotézu, že z měření a vyhodnocování trendů můžeme predikovat rok dosažení limitní hodnoty kanálů PZ a VP. Hypotézy pro kanály PZ a VP byly kladně posouzeny na katedře jaderných reaktorů FJFI ČVUT [1, 2]. U ŠP jsme se omezili pouze na sledování průběhu předepsaných parametrů, abychom vyloučili odchylky od normálu. Detektory, použité v PZ, VP i ŠP jsou ionizační, tvořené dvěma elektrodami v uzavřeném prostoru, na které je přivedeno vysoké napětí. Primární nabitá částice při pohybu v elektrickém poli ionizuje plynovou náplň, a vytváří další ionty, které se rovněž pohybují k elektrodám. Kromě neutronů reaguje se stěnami detektoru i záření gama s produkcí elektronu, to je parazitní efekt. Podle způsobu zapojení je možné registrovat jednotlivé impulzy-kanály PZ, nebo procházející proud-kanály VP. Kanál ŠP pracuje na nejnižších úrovních v impulzním režimu a dále pak ve speciálním režimu eliminujícím vliv parazitních efektů. Kanály VP mají válcové elektrody pokryté karbidem bóru, jsou proudové, měří proud od cca  $1E-10$  A. Měřený proud je součtem proudů z neutronů i ze záření gama. Obojí je však v rozsahu měření úměrné výkonu reaktoru. Není tedy nutná kompenzace. Jako parametr stárnutí bylo vyhodnoceno vyhořívání bóru, kvantitativně posouzené v [2]. Vliv vyhoření je predikován až po cca 50 letech provozu. Sledovaným a limitovaným parametrem je sklon plata, který nesmí přesáhnout 4 % (obr. 4). Dosavadní měření ukazují, že limitní hodnoty by byly dosaženy za více než 40 roků, což je horizont předpokládaného provozu bloku.

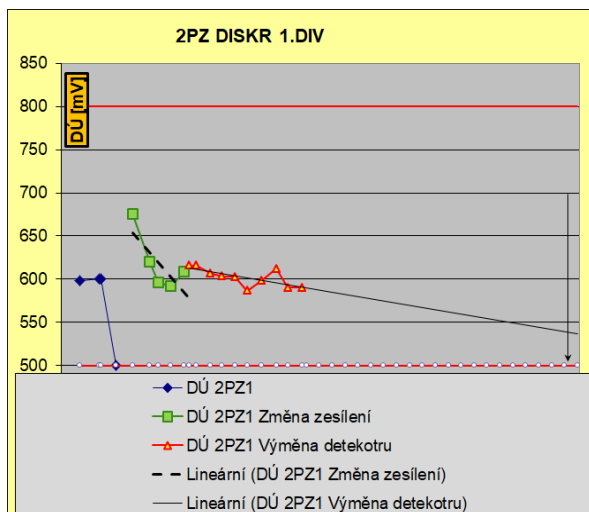
Detektory PZ jsou výrazně složitější, pracují v impulzním režimu, měří od četnosti 0,1 až do  $1E6$  impulzů za sekundu. Pro detekci neutronů se používá reakce na bóru. Ten je ve formě trifluoridu bóru ( $BF_3$ ). PZ má válcovou vnější elektrodu, druhou elektrodu tvoří centrální velmi tenký drátek. Pro kanály PZ je rozhodujícím faktorem hodnota diskriminační úrovně, která se stárnutím detektoru klesá (obr. 1 až obr. 3) z důvodu degradace plynové náplně.



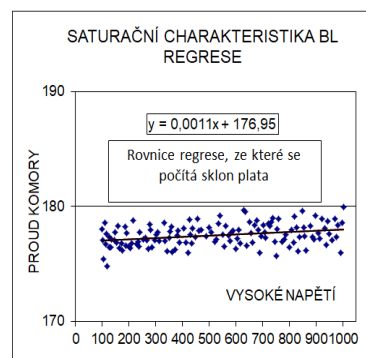
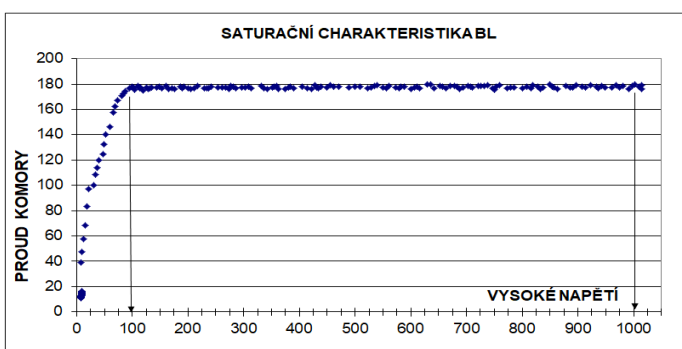
Obr. 1: Impulzy PZ se zobrazují podle velikosti, křivka je počet nad diskriminační úrovní. „Levá křivka“ jsou pulzy od gama a šumů, kopeček vpravo od neutronů. Hledá se taková hodnota, aby bylo zaznamenáno co nejméně pulzů parazitních a co nejvíc neutronových. Optimum je sedlo. Jeho poloha se se stárnutím detektoru posouvá vlevo a je limitována 500 mV.



Obr. 2: Standardní průběh. Po 8 letech změna zesílení, po dalších letech výměna detektoru (trojnásobek projektové hodnoty). Měření v roce 2018. První hodnota při předinstalační kontrole s neutronovým zdrojem, druhá hodnota při spouštění reaktoru.



Obr. 3: Detektor se v prvních 5 letech choval nestandardně, pak správně zareagoval na změnu. Po změně zesílení se objevovaly na nízkých výkonech falešné pulzy, v roce 2009 byl detektor po sedmi letech provozu vyměněn.



Obr. 4: Vyhodnocení sklonu plata. Vpravo na detailu je vidět sklon plata.

Na obou blocích je instalováno celkem	
6 detektorů PZ	X detektorů bylo vyměněno na základě poruchy nezpůsobené stárnutím. V roce 2018 byla dokončena výměna všech detektorů.
6 detektorů ŠP	Všechny v provozu bez výměny.
12 detektorů VP	Vyměněny 2 detektory, jeden s přerušením bodového sváru mezi průchodkou a přívodním kabelem, druhý pro podezření z cizího předmětu uvnitř pracovního objemu. Uznaná reklamační u WEC.

## Závěry

Byla navržena metodika predikce zbytkové životnosti detektorů neutronů kladně posouzena expertními posudky. Metodika byla prakticky aplikována a plně se osvědčila.

Aplikací metodiky došlo k úspoře cca 69 milionů Kč v nákladech na pořízení nových detektorů a nákladech na výměnu detektorů.

Jako vedlejší produkt byla dodavatelem upravená dokumentace respektující vlastnosti BF<sub>3</sub> (klasifikován jako korozivní a vysoce toxický plyn, takže není možná likvidace detektoru PZ jak RA odpadu). Následně byla ve spolupráci s UJV vyzkoušena neutralizace plynu a v ETE navržena možnost likvidovat obohacený bór (položka dvojího určení podle Atomového zákona).

Dalším přínosem bylo, že jsme vyzkoušeli výměnu detektoru PZ na 100 % nominálního výkonu reaktoru, práce byla provedena s přijatelnou radiační zátěží.

## Literatura

- [1] Kolros, A., FJFI ČVUT v Praze: *Expertní posudek zdůvodňovací zprávy – Postupu k provedení časově omezeného zjednodušeného odhadu životnosti IK, Pásmo zdroje vypracované Ústavem jařeného výzkumu Řez, a.s.*
- [2] Kolros, A., FJFI ČVUT v Praze: *Expertní posudek na Metodiku odhadu životnosti IK výkonové pásmo* vypracovanou Ing. Jiřím Fleischhansem, odborným konzultantem PRPS a Ing. Jan Švehlou, příprávkem I&C ENERGO.