

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra fyziky

Neutronová měření na jaderné elektrárně Temelín

Bakalářská práce

Vypracoval: Jan Švehla
Konzultant: Ing. Jiří Fleischhans

Vedoucí práce: RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.

Týn nad Vltavou, 10.10.2006

Neutronového měření na jaderné elektrárně Temelín

V této práci jsem se zaměřil na ionizační detektory, jejich provedení, použití a popis dějů, ke kterým dochází při ionizaci. Ionizační detektory jsou obecně používány na všech JE z důvodu, že zatím není jiný systém, který by dokázal sledovat výkon reaktoru s takovou přesností a rychlostí, který je nutný pro bezpečný provoz jaderného reaktoru.

Na JE Temelín máme několik typů ionizačních detektorů. V této práci jsou popsány pouze ty detektory, které vstupují do ochranných a řídících systémů. Na ETE je ještě použit další typ ionizačního detektoru, tzv. kompenzované komory, které slouží pro potřebu fyzikálních spouštění a měření reaktivity. Protože tyto detektory nepatří do systému, na kterém pracuji, nejsou v této práci zmíněny.

Na závěr jsem na ukázkou uvedl postupy a výsledky vybraných měření, která se periodicky provádějí na JE Temelín.

Neutron measurements in nuclear power plant Temelin

In this dissertation I have focused on ionization detectors, their design, use and process description occurring during ionization. Ionization detectors are generally used in all NPP for the reason that there is not other system able to follow reactor power so precisely and fast as necessary for safe nuclear reactor operation.

There are several types of ionization detector in NPP Temelin. In this work there are described the detectors which interface with protection and control systems. Another type of ionization detector used in NPP Temelin, so called compensated chamber, is not a part of the system I work on and thus it is not included here.

At the end there is demonstration of the procedures and measurement results performed periodically in JE Temelin.

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně a uvedl všechnu použitou literaturu.

V Týně nad Vltavou dne 10.10.2006

Jan Švehla

podpis

Rád bych na tomto místě poděkoval ing. Jiřímu Fleischhansovi za pomoc při vytváření bakalářské práce, ale i za pomoc v rozšíření mých znalostí v profesním životě.

Obsah

1. POPIS BEZPEČNOSTNÍHO A ŘÍDÍČÍHO SYSTÉMU REAKTOROVÉHO BLOKU	1
1.1. ŘÍDÍČÍ A OCHRANNÉ SYSTÉMY JADERNĚ ENERGETICKÉHO ZAŘÍZENÍ MUSÍ:.....	1
1.2. SPOLEHLIVOST BEZPEČNOSTNÍHO SYSTÉMU JE ZAJIŠŤOVÁNA ZEJMÉNA:	1
2. MĚŘENÍ VÝKONU REAKTORU	4
3. PRINCIP DETEKCE NEUTRONŮ	5
3.1. NEUTRON JE ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICE, KTERÁ JE CHARAKTERIZOVÁNA:	5
3.2. NEUTRONY MOHOU S JÁDRY INTERAGOVAT RŮZNÝMI ZPŮSOBY:	6
3.2.1. Pružný rozptyl (n, n).....	6
3.2.2. Nepružný rozptyl (n, n').	6
3.2.3. Zářivé zachycení (n, γ).	6
3.2.4. Zachycení a vyslání nabitě částice (n, p), (n, α).	7
3.2.5. Štěpení (n, f)	8
3.2.6. Reakce ($n, 2n$), (n, np), ($n, 3n$), ($n, 2np$).....	9
3.3. ÚČINNÝ PRŮŘEZ	9
3.4. TŘI ZÁKLADNÍ PRŮBĚHY MAKROSKOPICKÉHO ÚČINNÉHO PRŮŘEZU:	10
3.4.1. Průběh $1/v$	10
3.4.2. Prahový charakter.....	11
3.4.3. Resonanční charakter.....	11
3.5. FYZIKÁLNÍ ZÁKLAD ČINNOSTI IONIZAČNÍCH DETEKTORŮ	13
3.6. CHARAKTERISTIKY DETEKTORŮ	14
3.7. REŽIMY DETEKTORŮ:.....	16
3.7.1. Proudový režim	16
3.7.2. MSV („mean square voltage“) režim nebo také Campbellovský režim.....	16
3.7.3. Impulzní režim.....	16
3.8. AMPLITUDOVÁ SPEKTRA IMPULZŮ.....	18
3.8.1. Diskriminátor.....	18
3.8.2. Diskriminační charakteristiky.....	19
3.9. MRTVÁ DOBA DETEKTORU.....	22
3.10. DRUHY DETEKTORŮ:.....	24
3.10.1. Ionizační komory	24
3.10.2. Proporcionální počítače.....	24
3.10.3. Samonapájecí detektory.....	25
4. POPIS APARATUR PRO MĚŘENÍ NEUTRONŮ NA REAKTORECH ETE (NIS).	26
4.1. PÁSMO ZDROJE PZ.....	27
4.2. VÝKONOVÉ PÁSMO VP	28
4.3. ŠIROKÉ PÁSMO ŠP	28
5. PROVOZNÍ KONTROLY NIS.....	29

6.	VYBRANÁ MĚŘENÍ.....	30
6.1.	DISKRIMINAČNÍ CHARAKTERISTIKY KANÁLŮ PÁSMO ZDROJE A KANÁLŮ ŠIROKÉHO PÁSMO	30
6.1.1.	<i>Široké pásmo</i>	30
6.1.2.	<i>Pásmo zdroje</i>	40
6.2.	SATURAČNÍ CHARAKTERISTIKY KANÁLŮ ŠIROKÉHO PÁSMO A KANÁLŮ VÝKONOVÉHO PÁSMO	45
6.3.	SPLICING.....	46
7.	POUŽITÁ LITERATURA	49
8.	PŘÍLOHY	50

1. POPIS BEZPEČNOSTNÍHO A ŘÍDÍČÍHO SYSTÉMU REAKTOROVÉHO BLOKU

Abychom mohli provozovat JE, musíme je umět řídit a v případě výskytu poruchy, která by mohla ohrozit bezpečný provoz JE, dokázat blok bezpečně odstavit a udržovat v bezpečném stavu. K těmto účelům slouží řídicí a bezpečnostní systémy. Nejen pro JE, ale obecně i pro jaderně energetická zařízení musí řídicí a bezpečnostní systémy splňovat požadavky, které podrobně specifikuje Atomový zákon [7.1] a jeho prováděcí vyhlášky.

1.1. Řídicí a ochranné systémy jaderně energetického zařízení musí:

Poskytovat nepřetržitou informaci o stavu zařízení a parametrech probíhajících procesů.

Umožňovat dálkové ovládání zařízení.

Umožňovat automatické udržování vybraných parametrů technologického procesu.

Trvale zajišťovat autodiagnostiku.

Zajišťovat trvale a spolehlivě bezpečnostní funkce:

- Odstavení technologických zařízení v případě jejich poruchy nebo v případě překročených povolených hodnot. V těchto případech poskytovat informace nezbytné pro zvládnutí procesu a umožnit i ruční dálkové ovládání.
- Spuštění záložních technologických zařízení pro zajištění funkcí, které musí být vykonávány trvale (elektrické napájení, systémy odvodu zbytkového tepla).
- Automatické spuštění procesů, vedoucích k omezení důsledků abnormálních stavů a projektových havárií.
- Vhodným způsobem zaznamenávat a archivovat hodnoty vybraných technologických parametrů.

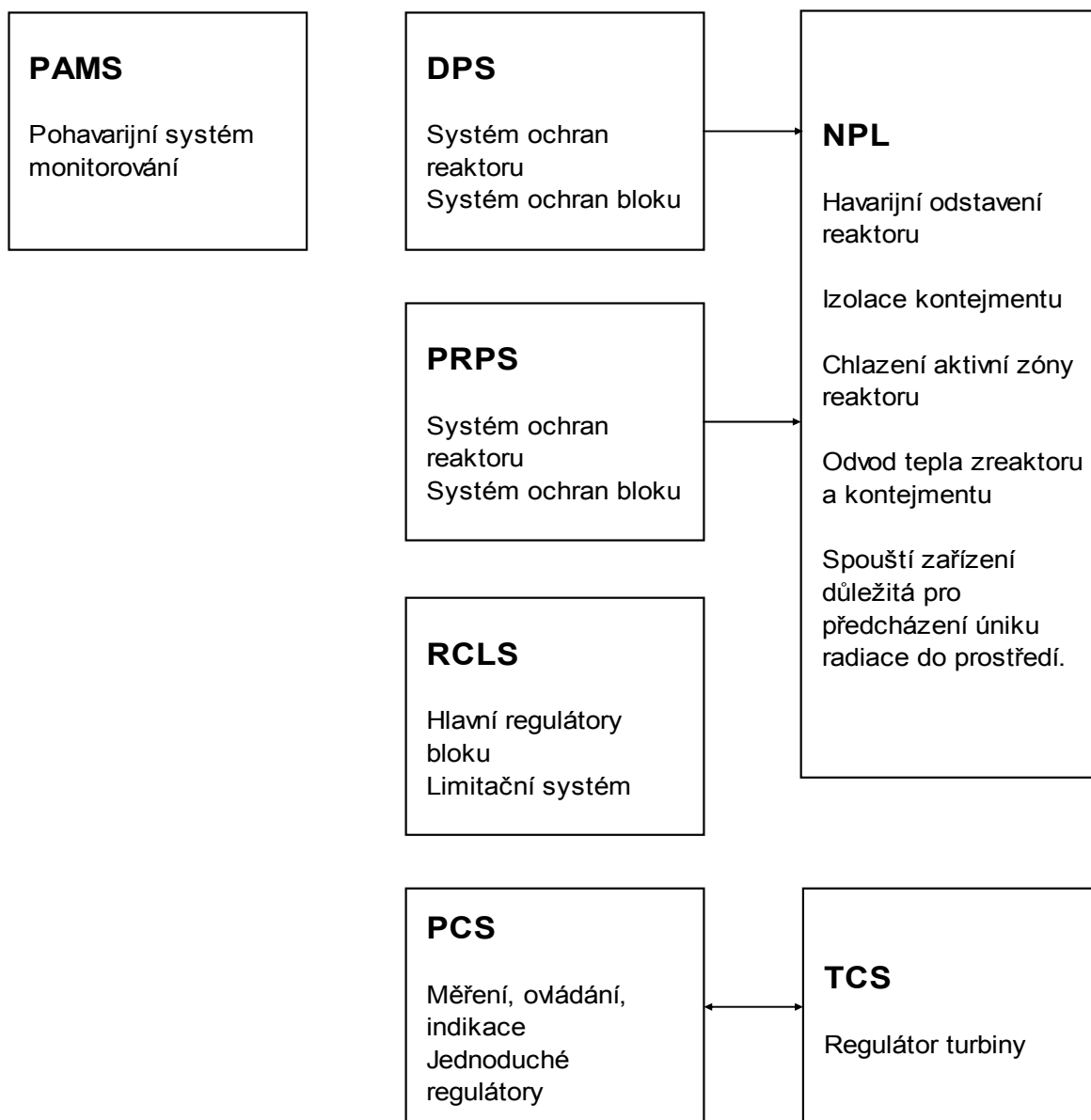
1.2. Spolehlivost bezpečnostního systému je zajišťována zejména:

- **Použitím výběrové logiky.** Bezpečnostní systém je tvořen třemi nezávislými divizemi. Výsledné signály jsou vybírány logikou dva ze tří. Projektové řešení umožňuje pro údržbářské činnosti jednu z divizí zablokovat (přepnout do bypassu). Systém přejde do logiky výběru 1 ze 2.
- **Vyloučením poruch ze společné příčiny.** Porucha ze společné příčiny je stav, kdy několik na sobě nezávislých zařízení je vyřazeno z činnosti z takového důvodu, který zpravidla nebyl očekáván a ovlivnil všechna zařízení. Tyto poruchy jsou jedním z největších problémů projektanta a překvapení pro provozovatele. Vyloučení poruchy ze společné příčiny se věnuje velká pozornost při projektování i při bezpečnostních rozborech. Velmi dobrou ilustrací může být řešení systému havarijní ochrany v ETE. V důsledku použití ochrany do hloubky je použito dvou nezávislých systémů, PRPS a DPS. Aby tyto systémy byly skutečně nezávislé, byly projektovány dvěma odlišnými skupinami projektantů, v důsledně oddělených prostorách. Bylo použito jiných procesorů a jiných operačních systémů, právě proto, aby v případě programové chyby v jednom systému nedošlo ke stejnému důsledku i v systému druhém.
- **Omezením složitosti systému** je řešeno použitím kritéria jednoduché poruchy. Kriterium zní: Vylučují se případy, že v jednom okamžiku dojde v celém systému k výskytu dvou nezávislých poruch. Aplikace kritéria v praxi znamená, že není nutno řešit spekulativní případy ochrany zařízení, kdy je možno si celkem bez omezení

vymýšlet scénáře kombinace různých selhání. Kriterium jednoduché poruchy však nejde uplatňovat v případě, že iniciační porucha vyvolá následně poruchy nebo další selhání.

- **Ochranou do hloubky.** Princip ochrany do hloubky zjednodušuje zásahy ochranných systémů a přizpůsobuje jejich účinnost závažnosti likvidované události.

obr. 1-1 Schéma principu ochrany do hloubky v JE Temelín



Na obr. 1-1 jsou znázorněny zásady principu ochrany do hloubky v JE Temelín. Ve středním sloupci jsou odspoda řazené činnosti řídicího a ochranného systému při normálním provozu elektrárny až po maximální projektovou havárii.

Na nejnižší úrovni se odehrává většina řídicích procesů, ovládání a udržování parametrů v požadovaných mezích. Je to realizováno prostředky systému WDPF (patří tam systémy PCS, TCS a IN-CORE).

Ve druhém patře je systém RCLS (Reactor Control and Limitation System), je to systém, který udržuje důležité parametry bloku v požadovaných, resp. bezpečných mezích. Tvoří jej hlavní regulátory bloku a limitační systém.

Hlavní regulátory bloku jsou regulátory těch parametrů, které mohou významně ovlivnit bezpečný provoz. K hlavním regulátorům bloku patří regulátor výkonu reaktoru, regulátor tlaku a hladiny v kompenzátoru objemu, regulátor napájení parogenerátorů, regulátor napájení napájecí nádrže, regulátor pomocného kondenzátoru a organizátor řízení. Úkolem organizátoru řízení je volit optimální kombinaci režimů regulátoru turbíny a regulátoru reaktoru.

Limitační systém má 2 hlavní úkoly. Prvním je zabezpečovat rovnováhu mezi vyráběným teplem a schopností zařízení toto teplo odvádět. Snižuje výkon reaktoru v případech, kdy dojde k náhlému výpadku některých zařízení na trase odvodu tepla až po turbogenerátor (výpadky hlavních cirkulačních čerpadel primárního okruhu, výpadky napáječek, regeneračních výměníků, kondenzátních čerpadel a turbíny). Druhou funkcí limitačního systému je snižování výkonu reaktoru v případech, že některý z vybraných parametrů překročí povolené provozní meze.

V prvním případě je výkon snížen na předem zadanou hodnotu, ve druhém se výkon snižuje tak dlouho, dokud se parametr nevrátí do povolené tolerance.

V dalším „patře“ je systém ochrany a regulace bloku PRPS (Primary Reactor Protection System), který zasahuje v případech, že standardní regulátory nebo limitační systém nejsou schopny udržet parametry v předepsaných mezích (systém ochrany reaktoru), nebo je vyhodnocen výskyt některé z projektových havárií (systém ochrany bloku).

Pokud by systém PRPS selhal, tj., nespustily by se ochranné funkce, zajišťuje blok tak zvaný diversní systém ochrany DPS (Diverse Protection System). Ten plní v podstatě stejné funkce, jako systém PRPS, ale je aktivován při vyšších hodnotách sledovaných parametrů. Funkce obou posledně jmenovaných systémů musí zaručit, že ani v přechodovém procesu nedojde k porušení bezpečnostních limitů.

Mohou nastat případy, kdy každý ze systémů PRPS a DPS požaduje jinou akci. Systém NPL (Non Programmable Logic) je hardwarově naprogramován tak, aby se systémy PRPS a DPS „nepřetahovaly“.

Další funkcí systému NPL je, že operátor může kdykoliv (tedy i v případě selhání systému UIS) ovládat přímo (drátovým spojením) zařízení důležitá z hlediska jaderné bezpečnosti.

2. MĚŘENÍ VÝKONU REAKTORU

Výkon reaktorového bloku patří mezi důležité parametry bloku. Může být měřen různými způsoby. Nejjednodušším způsobem měření výkonu reaktoru by bylo měřit elektrický výkon generátoru, ale ten vzhledem k poměrně malé vypovídací schopnosti není dostatečný (Reaktor může být provozován až do poměrně vysokého výkonu bez provozu turbíny, na JE Temelín je to až do 60% nominálního výkonu, nebo na velmi malých výkonech, kdy prakticky nevyrábí žádné měřitelné teplo (10^{-7} % N_{NOM} , tj. cca 0,3 kW).

Další možnost měření výkonu reaktoru je odvodit velikost výkonu od průtoku napájecí vody, průtoku páry apod. Tyto metody používají, ale jsou zatíženy poměrně velkou měřicí chybou a nemusí, vzhledem ke ztrátám tepla do okolí, ztrátám v odluzích apod., odpovídat výkonu reaktoru. Přesto se metoda měření tepelného výkonu reaktoru z bilance napájecí vody ukázala jako nejlepší odhad pro tepelný výkon.

Nejlepší by byla metoda měření výkonu z tepelné bilance smyček primárního okruhu, která však má dvě nevýhody:

- konstrukce, resp. dispoziční řešení smyček neumožňuje dostatečně přesné měření průtoku (není k dispozici rovný úsek potrubí, aby byla splněna na podmínka $l/d > 10$ až 20),
- měření rozdílu teplot je zatíženo chybou v důsledku vytváření „jazyků“ chladiva s odlišnou teplotou.

Společnou nevýhodou všech uvedených metod je to, že mají dopravní zpoždění od několika sekund po řádově desítky sekund.

Jediným parametrem, který splňuje požadavek okamžité reakce na změny výkonu reaktoru a je zcela přesný, je počet štěpení za sekundu. Problém je v tom, že počet štěpení nelze přímo měřit. Existuje však veličina, která je v každém okamžiku počtu štěpení úměrná, hustota toku neutronů.

Další výhodou neutronů je, že v důsledku úniku vyletují z aktivní zóny a je možno je detekovat až v biologické ochraně reaktoru. Tedy přesněji mimo tlakovou nádobu reaktoru, tj. v relativně přijatelném prostředí (tlak, teplota, voda).

Problémem je, že neutron se může v hmotném prostředí pohybovat téměř bez interakcí, nemá elektrický náboj. Může však vyvolávat jaderné reakce, jejichž produktem jsou nabitě částice, které je už možno detekovat. Přesto je ale výhodné i tyto detekovatelné částice transformovat na signál, který je v technické praxi obvyklý. Nejlepší, a tedy i nejužívanější v řízení technologických procesů, je signál elektrický (nebylo to vždy, užívaly se i mechanické cesty, hydraulika, pneumatické systémy a optické systémy – telegraf. Je zajímavé, že k optickým přenosům, i když na jiné technické úrovni, jsme se dnes zase vrátili).

Máme tedy náš problém převeden na úlohu detekovat neutrony unikající z aktivní zóny reaktoru a převést je na vhodný elektrický signál.

3. PRINCIP DETEKCE NEUTRONŮ

3.1. Neutron je elementární částice, která je charakterizována:

- hmotností – neutron je těžší než proton. $M(n)=1,00866527u^1$ a $M(p)=1,00727647u$
- nábojem – elektrický náboj neutronu je nulový.
- spinem – neutron má spin $1/2^2$.
- Magnetickým momentem – neutron, přestože je elektricky neutrální částice, má poměrně velký magnetický moment.

$$\bullet \mu_n = -1,913148 \mu_j^3 \quad (3.1)$$

- Střední dobou života – Ve stabilních atomových jádrech jsou neutrony stabilní, volný neutron (ve vakuu) se **rozpadá** s poločasem cca $T=12\pm 1,5$ min β^- -rozpadem na proton, elektron a antineutrino

$$\bullet n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu_e^- \quad (3.2)$$

Další důležitou vlastností je energie neutronů (pohybuje se v několika dekadách, jednotkou jsou eV^4), která dost výrazně mění jejich schopnost interagovat s terčovým jádrem. V reaktorové fyzice se neutrony třídí do skupin podle energie viz tabulka 3-1.

tabulka 3-1 Rozdělení neutronů podle energie

Rozdělení neutronů	Energie neutronů
Pomalé neutrony	
studené	$< 0,025$ eV
tepelné ⁵	(0,025 až 0,5) eV
nadtepelné	(0,5 až 100) eV
Rezonanční neutrony	(100 až 500) eV
Neutrony středních energií	(0,5 až 500) keV
Rychlé neutrony	(0,5 až 20) MeV
Velmi rychlé neutrony	(20 až 300) MeV
Super rychlé neutrony	> 300 MeV

¹ u- je univerzální atomová hmotnostní jednotka $1u=1,66053 \cdot 10^{-27}kg$, energie odpovídající hmotnosti $1u$ $=931,481MeV$ (která je definována jako $1/12$ hmotnosti izotopu uhlíku $^{12}_6C$ a je tedy $u=1,6606 \cdot 10^{-27} kg$)

² Jádra se sudým atomovým číslem Z mají většinou spin celočíselný, jádra s lichým hmotovým číslem mají spin vždy polovinový.

³ Jaderný magneton μ_j je jednotkou magnetického momentu. Jeho velikost je $\mu_j = 5,050\,783 \times 10^{-27} A.m^2$

⁴ Elektronvolt $1eV=1,6021892 \cdot 10^{-19}J$ (energie jednoho elektronvoltage se rovná pohybové energii elektronu, kterou získá při průchodu potenciálním rozdílem $1 V$)

⁵ Tepelné neutrony jsou neutrony malé energie, jež jsou v tepelné rovnováze s atomy nebo molekulami prostředí, v němž se nacházejí. To znamená, že energie je srovnatelná s energií tepelného pohybu atomů (molekul) prostředí.

3.2. Neutrony mohou s jádry interagovat různými způsoby:

- Pružný rozptyl (n, n).
- Nepružný rozptyl (n, n').
- Zářivé zachycení (n, γ).
- Zachycení a vyslání nabitě částice (n, p), (n, α).
- Štěpení (n, f).
- Reakce (n,2n), (n, np), (n,3n), (n,2np).

3.2.1. Pružný rozptyl (n, n).

Při pružném rozptylu zůstává zachována celková kinetická energie soustavy jádro a neutron, dochází jen k předání části energie neutronu terčovému jádru a neutron mění směr svého pohybu.

Pružný rozptyl dále můžeme rozdělit na:

- **Potenciálový rozptyl** (to je jev, kdy dojde ke srážce, ale neutron **není** pohlcen, tedy nevznikne složené jádro).
- **Rezonanční rozptyl (neutron vnikne do jádra a vytvoří složené jádro. Složené jádro vyše znova neutron a tak vzniká původní jádro v základním stavu avšak s kinetickou energií, kterou převzalo od neutronu.)**



3.2.2. Nepružný rozptyl (n, n').

Při nepružném rozptylu neutron vniká do jádra a vytváří složené jádro v excitovaném stavu. Složené jádro vyše opět neutron, avšak s menší energií než před procesem. Část kinetické energie zůstává přeměněna na excitační energii jádra. Jádro přejde do základního stavu emisí záření γ.



3.2.3. Zářivé zachycení (n,γ).

Při zářivém zachycení je neutron zachycen jádrem a vytvoří složené jádro v excitovaném stavu. Excitované jádro přejde do základního stavu vysláním jednoho nebo několika kvant γ. Tento proces zvyšuje poměr neutronů k protonům v jádře, proto vzniklé složené jádro může být radioaktivní a podléhat rozpadu β.

Tímto způsobem vznikají například nové umělé nuklidy ${}_{94}^{239}Pu$ a ${}_{92}^{233}U$, které jsou opět štěpitelné tepelnými neutrony.



Uran 239 vysílá s poločasem 23 min. elektrony a mění se na neptunium



Neptunium je opět zářičem β . Rozpadá se s poločasem 2,3 dne na plutonium 239



Plutonium 239 je zářičem α a má dlouhý poločas rozpadu, 24 000let.

Jiným významným procesem je reakce na thoriu 232



Thorium je β aktivní s poločasem rozpadu 23 min. a mění se na protaktinium 233,



Protaktinium 233 je rovněž zářičem β a přechází s poločasem 27,4 dne na uran 233



Uran 233 je zářičem α s poločasem rozpadu $1,63 \cdot 10^5$ let.

3.2.4. Zachycení a vyslání nabitých částic (n, p), (n, α).

Proces (n, p)



Proces (n, α)



Pro jadernou energetiku mají zásadní význam následující dvě reakce.



Této reakce se využívá v některých typech ionizačních detektorů neutronů (např. ionizační komory a proporcionální detektory).

Druhé, možná ještě významnější uplatnění má reakce na bóru v regulaci reaktoru. Vysoký absorpční účinný průřez bóru umožňuje měnit v aktivní zóně absorpci neutronů a tím ovlivňovat reaktivitu. Bór se používá v absorpčních orgánech pro regulaci nebo rychlé odstavení reaktoru (zde kompenzuje krátkodobé změny reaktivity). Ve formě kyseliny borité rozpuštěné v moderátoru/chladiivu kompenzuje snižování koncentrace bóru změny reaktivity, způsobované vyhoříváním paliva.



Tuto reakcí vznikne tritium, které má poločas 12 let a vysílá záporné částice β . Tritium je možné využít v tzv. vodíkové bombě a také pro termojaderné reaktory.

3.2.5. Štěpení (n, f)

Štěpení je takový typ jaderné reakce, při níž z jádra o hmotnostním čísle A_1 a atomovém čísle Z_1 vzniknou obvykle dvě jádra (nazývají se štěpné produkty, odštěpky, fragmenty), jejichž hmotnostní čísla A_2^1, A_2^2 a atomová čísla Z_2^1, Z_2^2 jsou podstatně odlišná od základních charakteristik jádra terčového.

Štěpné produkty

Štěpením se těžká jádra s hmotnostním číslem cca 240 s vazební energií cca 7,6 MeV/nukleon rozpadají na dva odštěpky. Tento proces může probíhat mnoha způsoby. (Např. ${}^{235}\text{U}$ má více jak 40 různých způsobů, jež vedou na více než 80 druhů odštěpků). Hmotnostní čísla odštěpků leží v rozmezí 72 až 160 s vazebnou energií cca 8,5 MeV/nukleon. Štěpením se tedy uvolní energie

$$E = 8,5 - 7,6 = 0,9 \text{ MeV} / \text{nukleon} \quad (3.16)$$

Vynásobením rozdílu energie počtem nukleonů dostáváme celkovou uvolněnou energii.

$$E = 240 \cdot 0,9 = 200 \text{ MeV} \quad (3.17)$$

což je cca $3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.

tabulka 3-2 Energie uvolněná při štěpení ${}^{235}\text{U}$

Forma uvolněné energie	Uvolněná energie ${}^{235}\text{U}$ [MeV]
Kinetická energie	167 ± 5
Okamžité záření gama	6 ± 1
Kinetická energie štěpných neutronů	5
Beta rozpad štěpných produktů	$8 \pm 1,5$
Gama rozpad štěpných produktů	6 ± 1
Neutrino	$12 \pm 2,5$
Celková energie uvolněná na jedno štěpení	204 ± 7

Největší podíl energie se uvolňuje ve formě kinetické energie štěpných produktů. Jejich maximální doběh ve štěpném materiálu je velmi malý, cca 10e-5m, a proto dochází k předání

jejich kinetické energie okolním atomům nebo molekulám. Dochází k přeměně jaderné energie na tepelnou.

Neutrony uvolněné po štěpení můžeme rozdělit do dvou skupin:

- Okamžité neutrony – jsou vysílány okamžitě po štěpení. Tvoří 99,3% neutronů uvolněných při štěpení. Průměrná hodnota energie okamžitých neutronů je 1-2 MeV.
- Zpožděné neutrony – jsou emitovány s časovým odstupem několika minut s postupně klesající intenzitou. Jejich celkové zastoupení v počtu neutronů uvolňovaných při štěpení je pouze 0,68%. Dále se pak rozdělují do 6 skupin.

3.2.6. Reakce (n,2n), (n, np), (n,3n), (n,2np).

Při interakci neutronů s velmi vysokými energiemi, několika MeV mohou ze složeného jádra vyletovat dva nebo více nukleonů.

3.3. Účinný průřez

Účinný průřez je vyjádřením míry pravděpodobnosti, že dopadající částice bude interagovat s terčovým jádrem.

Koncepce účinného průřezu vychází z názorné představy, že terčová částice se vzhledem k nalétající částici chová jako "absorbující tělísko" o poloměru r , které částice buď zasáhne a dojde k požadované interakci, nebo je nezasáhne (mine je, proletí kolem) a k interakci nedojde. Čím větší je poloměr tohoto tělíska, resp. jeho efektivní ploška $\sigma = \pi \cdot r^2$ - **účinný průřez**, tím větší je pravděpodobnost interakce (pravděpodobnost, že částice se "treffi").

Kromě toho stejná ostřelující částice může na téže terčové částici způsobit **různé** interakce, jejichž různé pravděpodobnosti popíšeme různými účinnými průřezy. Tyto účinné průřezy jsou důsledkem vnitřních mechanismů konkrétních druhů interakcí.

Terčovou plochu jádra nazýváme **mikroskopický účinný průřez** σ . Jednotkou je m^2 . Vzhledem k malým hodnotám mikroskopických účinných průřezů se ještě používá stará jednotka **barn**⁶.

Chceme-li kvantifikovat pravděpodobnost jaderné reakce částice v látce, musíme vzít v úvahu všechna jádra, která se v ní nacházejí. Proto se zavádí další pojem **makroskopický účinný průřez** Σ , který je roven součinu mikroskopického účinného průřezu a počtu jader v jednotkovém objemu (N):

$$\Sigma = \sigma \cdot N \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (3.18)$$

Převrácená hodnota makroskopické účinného průřezu je **střední volná dráha částice** λ , která představuje střední vzdálenost, kterou částice urazí v látce dříve, než interaguje s některým jejím jádrem.

Neutrony můžeme kvantifikovat pomocí tzv. **hustoty počtu neutronů** n , který vyjadřuje počet neutronů v jednotce objemu ($1/m^3$).

Další veličinou je tzv. **hustota neutronového toku** ϕ , je daná součinem hustoty počtu neutronů (n) a jejich rychlosti (v). Vyjadřuje celkovou délku dráhy, kterou neutrony v jednotce objemu urazí za jednotku času.

$$\phi = n \cdot v \text{ [1/m}^3 \times \text{m/s}^1 = \text{1/m}^2\text{s]} \quad (3.19)$$

Počet interakcí ke které dochází v jednotce objemu za jednotku (R) získáme, když celkovou délku dráhy (ϕ) dělíme střední volnou drahou mezi dvěma interakcemi (λ).

⁶ 1barn= $10^{-28}m^2$ která má řádově velikost geometrického průřezu protonu.

$$R = \phi / \lambda = \phi \cdot \Sigma = \phi \cdot \sigma \cdot N \quad [1/\text{m}^2\text{s} \times 1/\text{m} = 1/\text{m}^3\text{s}] \quad (3.20)$$

Potřebujeme-li vyjádřit počet daných jaderných reakcí (počet interakcí), musíme dosadit za λ respektive Σ nebo σ hodnoty pro příslušnou reakci. Ty se označují jednotlivými indexy.

σ_s mikroskopický účinný průřez **pro rozptyl**
 σ_a mikroskopický účinný průřez **pro absorpci**
 σ_f mikroskopický účinný průřez **pro štěpení**
 σ_γ mikroskopický účinný průřez **pro radiační záchyt**

Energetická závislost mikroskopického účinného průřezu velmi silně závisí na energii (změna o hodně řádů).

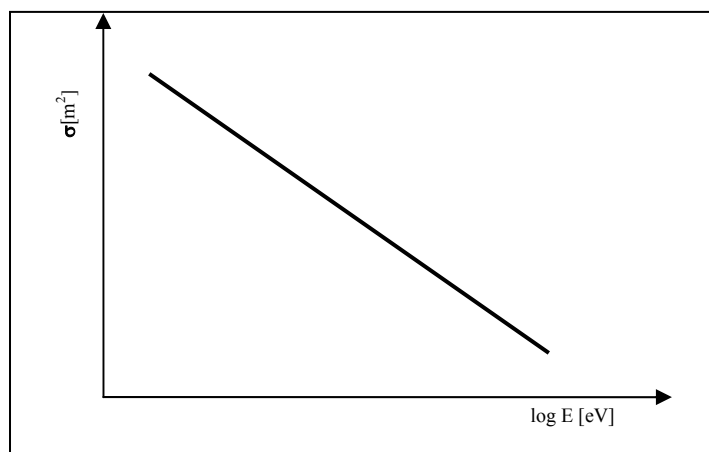
3.4. Tři základní průběhy makroskopického účinného průřezu:

- Průběh $1/v$.
- Prahový charakter.
- Resonanční charakter.

3.4.1. Průběh $1/v$

Velikost mikroskopického účinného průřezu se mění nepřímo úměrně rychlosti částice viz obr.3-1.

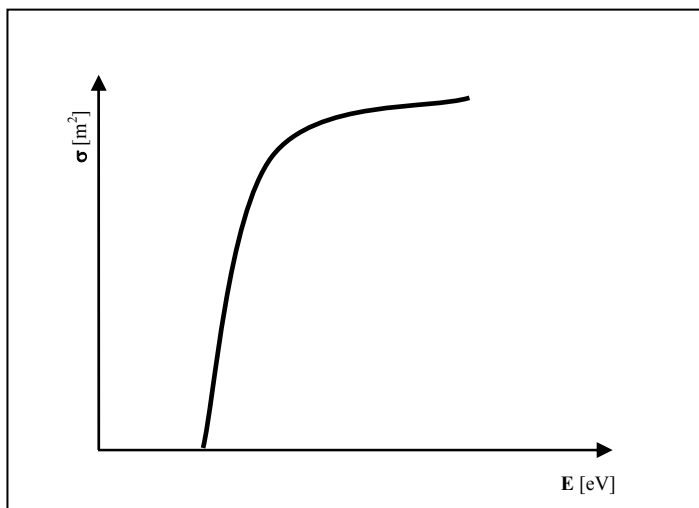
obr.3-1 Průběh $1/v$



3.4.2. Prahový charakter

Makroskopický účinný průřez je nulový až do určité prahové energie, pak poměrně prudce vzroste a dále může i růst. Tento průběh je charakteristický pro reakce se vznikem částice, kdy je potřeba dodat určitou minimální energii, viz obr.3-2

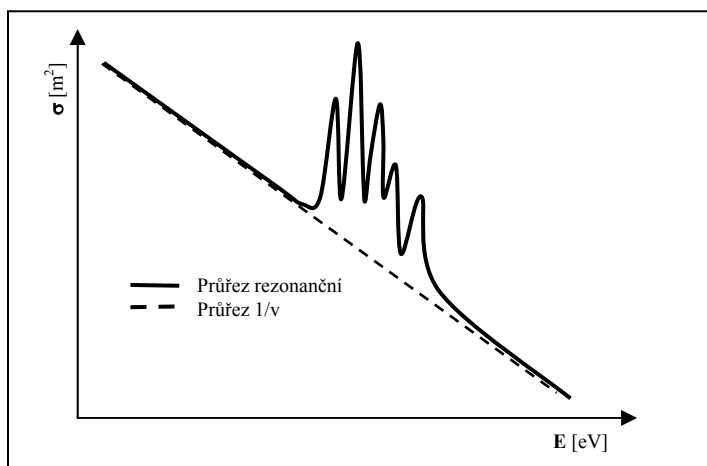
obr.3-2 Prahový charakter



3.4.3. Resonanční charakter

V okolí určité energie mikroskopický účinný průřez silně vzrůstá. Tento průběh se může v určité oblasti energií několikrát opakovat. Zpravidla je superponován na makroskopické účinné průřezy $1/v$ nebo prahové, viz obr.3-3.

obr.3-3 Resonanční charakter



Protože neutrony nemají žádný elektrický náboj interagují s látkou velice málo, je tedy jejich přímá registrace obtížná. K detekci neutronů proto musíme přeměnit neutrální částici na částici elektricky nabitou. Využívá se několika jaderných reakcí, převážně reakcí tepelných neutronů.

Pro konverzi neutronů se používá bór a uran (další nuklidy jsou z hlediska použití v reaktorech nevýznamné).

Nejčastěji se využívá reakce štěpení ^{235}U neutronem a reakce $^{10}\text{B}(n,\alpha)$. Tyto reakce se od sebe liší **velikostí energie**, která se uvolňuje.

Pro měření **rozložení výkonu uvnitř aktivní zóny** se na ETE používá rhodium u samonapájecích detektorů.

Bór

Pro detekci neutronů je vhodná reakce zachytu neutronu jádrem atomu ^{10}B , po kterém dochází téměř okamžitě k emisi částice alfa



Uvolněná energie se rozdělí na vzniklé částice v obráceném poměru jejich hmotností $E_{\text{Li}}=0,84\text{MeV}$ a $E_{\alpha}=1,47\text{MeV}$ (cca 2,3MeV).

Uran

Pro detekci neutronů se používá štěpení ^{235}U , který je v přírodním uranu obsažen v koncentraci 0,7 %. Pro zvýšení citlivosti se pro detekci používá obohacení na více než 90 %. Rozštěpení ^{235}U je prakticky okamžité. Probíhá následující reakce:



kde P_1 a P_2 jsou produkty štěpení s energiemi $\sim 95 \text{ MeV}$ a $\sim 65 \text{ MeV}$.

Poznámka: Velikost energií vznikajících štěpných produktů umožňuje dosáhnout vyšších amplitud impulsů v detektoru a to zaručuje dobrou diskriminaci od impulsů, vzniklých interakcí gama záření. Štěpné ionizační komory je proto možné používat i v smíšených polích neutronového a gama záření s vysokým podílem gama (až do 10^4 Gy/hod), což je právě případ jaderných reaktorů.

Rhodium

V samonapájecích detektorech se pro konverzi neutronů využívají reakce zachytu neutronu s vytvořením krátkodobého beta radioaktivního nuklidu s poločasem rozpadu 42,8 s a energií elektronů 2,44 MeV



3.5. Fyzikální základ činnosti ionizačních detektorů

Detektory využívají toho, že elektricky nabitá částice, která se pohybuje zpravidla v plynném prostředí⁷ a má dostatečně vysokou energii, ionizuje neutrální atomy prostředí. Po ionizaci neutrálních atomů se vytvoří kladné ionty a volné elektrony, které mají tendenci difundovat v objemu detektoru.

U ionizačních detektorů dochází k dalším typům srážek. Jako první bych zmínil **výměnu náboje** mezi kladným iontem a neutrální molekulou plynu. Při takovéto výměně je elektron předán kladnému iontu a dochází k výměně jejich rolí. K tomuto jevu dochází hlavně u plynů, které obsahují několik různých druhů molekul. Během těchto výměn dochází ke snížení ionizační energie, protože část energie se ztrácí při srážce, která mění neutrální molekuly plynu na kladné ionty.

Volný elektron, na který nepůsobí žádné síly, difunduje chaoticky všemi směry a může procházet mnoha srážkami. V některých druzích plynu může dojít k tvorbě **záporných iontů** a to tak, že elektron je zachycen neutrální molekulou plynu. Tento negativní iont má stejné vlastnosti jako kladný iont, jen má opačné znaménko. Například kyslík je druh plynu, který zachytává elektrony a vytváří záporné ionty. Naopak vodík, dusík jsou druhy plynu, které málo zachycují volné elektrony, a proto elektrony mohou volně migrovat v plynu.

Srážka mezi kladným iontem a volným elektronem může způsobit **rekombinaci** ve které je volný elektron zachycen kladným iontem a vzniká tak neutrální částice. Podobně je tomu při kolizi kladného iontu a záporného iontu. Kladný iont přebere od záporného iontu elektron a oba se stanou neutrálními. V obou případech dochází ke ztrátě elektronu nebo kladného iontu. Pokud se proces odehrává v prostoru mezi dvěma nabitými elektrodami, pak vzniklé kladné ionty se pohybují ve směru elektrického pole, kdežto volné elektrony v opačném směru.

Obecně volné elektrony jsou lehčí, a proto dosáhnou mnohem vyšší rychlosti než kladné ionty. Doba sběru se pohybuje mikrosekundách.

Rychlost iontů v plynu závisí nejen na přiloženém vysokém napětí ale i na tlaku a druhu plynu.

Rychlost s jakou se ionty v plynu pohybují se nechá vypočíst z rovnice:

$$v = \mu \cdot \frac{E}{p} \quad (3.24)$$

viz [7.2, kap 5, str. 134, odstavec Charge Mobility.]

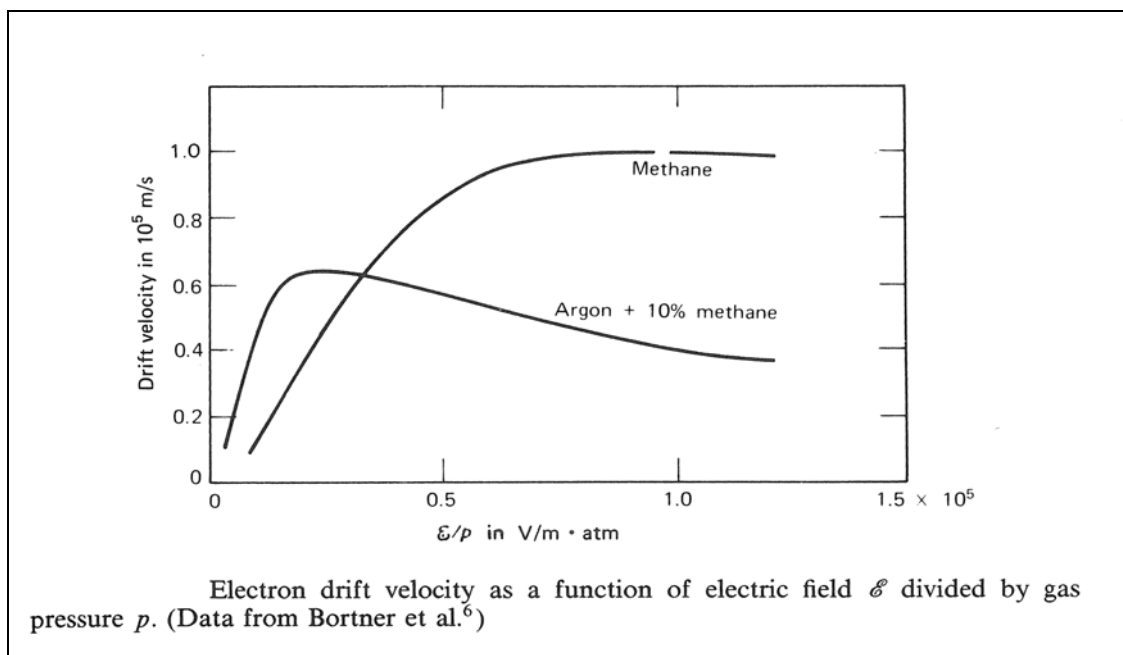
E-intenzita elektrického pole (ϵ)

p-tlak plynu

μ -pohyblivost iontů v různých plynech. Typická hodnota je $1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ atm/V}$

⁷ Plynovou náplní ionizační komory může být v principu i obyčejný vzduch, lepší vlastnosti však vykazují speciální plynové náplně tvořené inertními vzácnými plyny jako je argon, krypton, xenon.

obr.3-4 Pohyblivost elektronu jako funkce intenzity elektrického pole, tlaku plynu

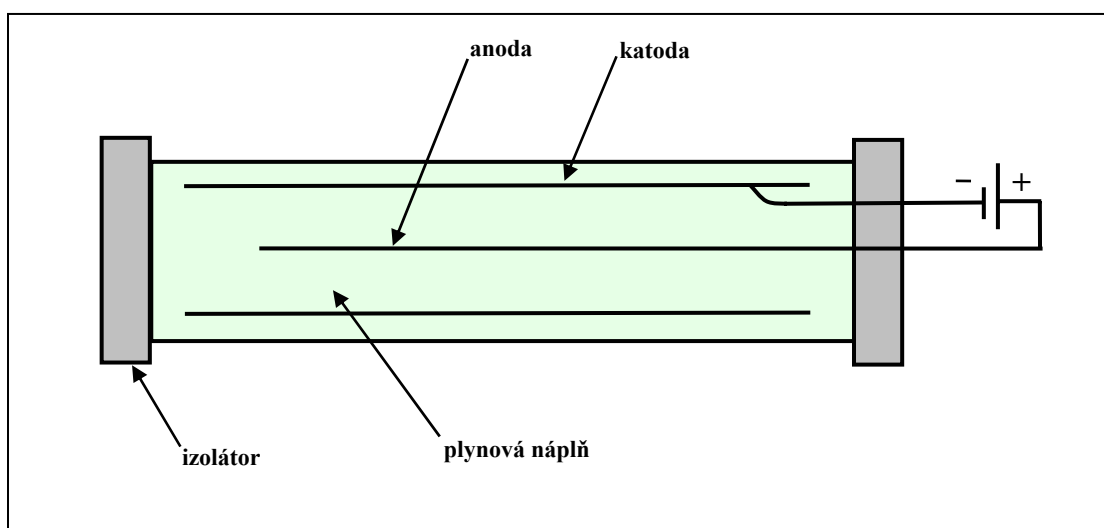


Optimalizací tlaku plynu, druhu plynové náplně, velikosti detektoru a velikosti napětí na detektoru se dosahuje požadované citlivosti a velikosti impulsu, viz obr.3-4.

3.6. Charakteristiky detektorů

Na obr.3-5 je schématický obrázek nejběžnějšího uspořádání detektoru.

obr.3-5 Schéma usprádnání nejběžnějšího detektoru



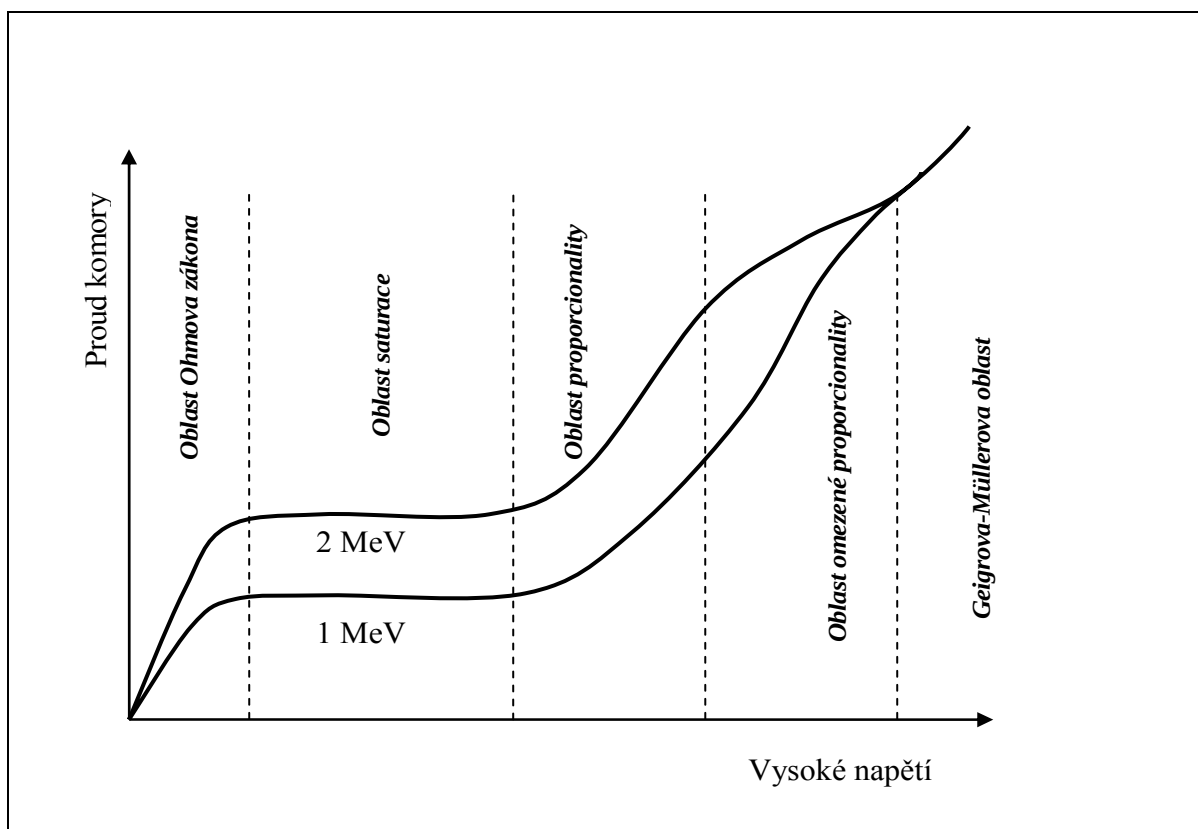
Ionizační detektory mají válcový tvar. Skládají se z katody a anody. Katoda je na vnitřní straně válce a je na ní přivedeno záporné napětí (přitahuje kladné ionty), kdežto anoda je tenký drát umístěný v ose válce a je na ní přivedeno kladné napětí (přitahuje elektrony).

K elektrodám detektoru připojíme zdroj napětí a detektor vložíme do pole neutronů. Postupně zvyšujeme napětí a měříme proud. V oblasti nízkých napětí roste proud s napětím lineárně, tato závislost je formálně shodná s Ohmovým zákonem, a proto se tato oblast charakteristiky nazývá oblastí Ohmova zákona. Fyzikálně je tento proces možno vysvětlit tím, že postupně stále více iontů dospěje (je přitaženo elektrickým polem) až k elektrodám. Při dalším zvyšování napětí se nastaví rovnováha mezi rekombinací a počtem iontů dopadajících na elektrody a proud, v poměrně dlouhém intervalu napětí, dále neroste. Tato oblast se nazývá oblastí nasycení, **saturace**.

Primární ionty i elektrony, vytvořené ionizací částic, vzniklých v reakcích s neutrony, se při pohybu v elektrickém poli urychlují. Je-li napětí na detektoru tak veliké, aby elektrony dosáhly energie vyšší, než je práh ionizace v prostředí detektoru, probíhá proces sekundární ionizace. V důsledku sekundární ionizace dopadá na elektrody více iontů a velikost proudu detektoru dále roste. Tato oblast se nazývá oblastí **proporcionality**. Detektory pracující v této oblasti se nazývají **proporcionální**. Pracovní napětí detektorů je voleno tak, že mezi elektrodami dojde k několikrát se opakující ionizaci a k plynovému zesílení (10^3 až 10^4), avšak zůstává zachována úměrnost mezi velikostí proudu a ionizací způsobenou přímo detekovanou částicí.

Při dalším zvyšování napětí se plynové zesílení stává nelineárním, oblast se nazývá oblastí **omezené proporcionality**. Za touto oblastí dochází při jakékoliv energii počáteční částice k ionizaci celého objemu detektoru v okolí anody. Tato oblast se nazývá **Geigerova oblast**, detektory na tomto principu se pro měření neutronů nepoužívají.

obr.3-6 Pracovní oblasti detektorů



3.7. Režimy detektorů:

- Proudový režim,
- MSV („mean square voltage“) režim nebo také Campbellovský režim,
- Impulzní režim.

3.7.1. Proudový režim

Za přítomnosti elektrického pole a ionizujícího záření dochází k vytváření a pohybu kladných a záporných nábojů k příslušným elektrodám. V obvodu detektoru vzniká elektrický proud. Tento proud je závislý na přiloženém vysokém napětí až do splnění podmínky saturace (oblast saturace). Saturace nastane právě tehdy, když všechny nezrekombinované částice dopadnou na elektrody. Velikost saturačního vysokého napětí není vyšší než několik desítek nebo stovek voltů. Velikost proudů v detektorech, používaných pro měření neutronového výkonu, se pohybuje od 10^{-12} až do 10^{-3} A.

3.7.2. MSV („mean square voltage“) režim nebo také Campbellovský režim

Campbellovské detektory pracují v proudovém režimu, ale v tomto režimu se neměří absolutní velikost proudu, ale spektrální výkonová hustota jeho šumové složky, detektor přechází do režimu MSV. Výstupem je druhá mocnina střední hodnoty fluktuace šumu (MSV), která je úměrná neutronovému toku v detektoru.

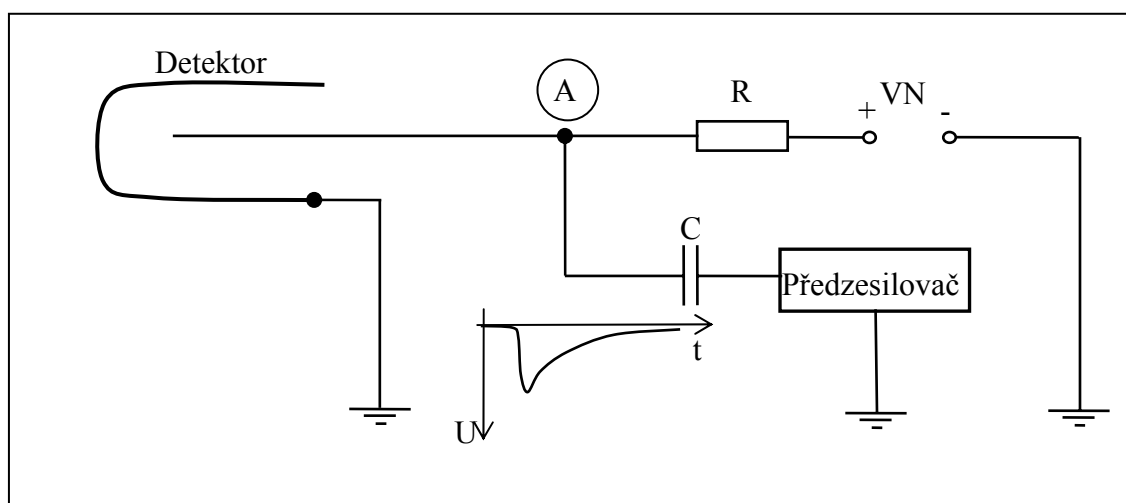
Výhodou výpočtu výkonu z velikosti fluktuace proudu je to, že se účinně odfiltruje složka proudu, vyvolaná gama zářením.

$$N = K^2 * MSV^2 \quad (3.25)$$

kde K^2 je kalibrační konstanta

3.7.3. Impulzní režim

obr.3-7 Schéma principu detektoru v impulzním režimu



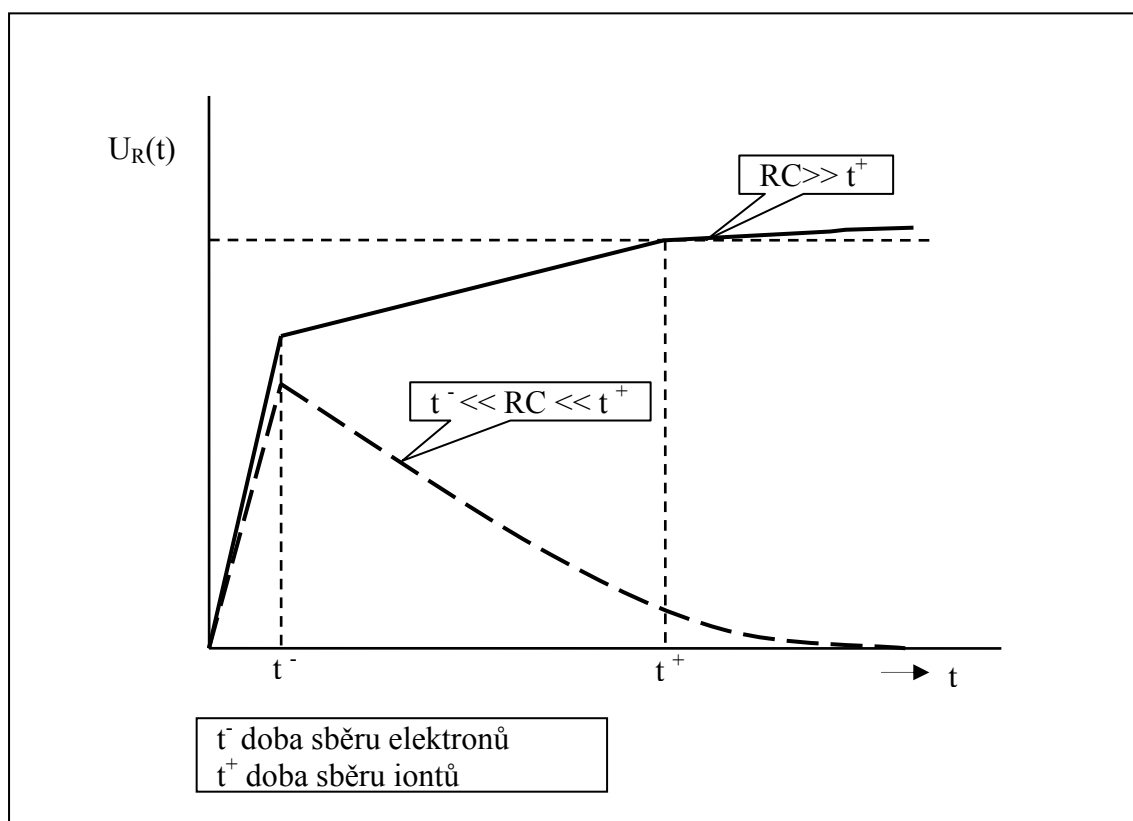
Na obr.3-7 je schématicky znázorněn princip detektoru v impulsním režimu.

Jestliže detektor není ničím ozařován, uvnitř detektoru nedochází k žádné ionizaci, je napětí napájecího zdroje VN na detektoru a na kondenzátoru C.

Pokud detektor začneme ozařovat, dojde k ionizaci uvnitř detektoru a ionty a elektrony, které se vytvořily, jsou urychlovány přiloženým napětím a pohybují se k elektrodám opačné polarity. Detektorem začne procházet proud, jehož velikost je závislá na tom, že nejdříve se k anodě dostanou pohyblivější elektrony a pak se ke katodě dostanou kladné ionty. Tento proud způsobí úbytek napětí odporu R (tzn. pokles napětí v bodu A). Pokles napětí v bodu A trvá po dobu sběru elektronů. Jakmile se ke katodě dostávají pomalejší kladné ionty, začne se proud zmenšovat a napětí v bodu A se obnovuje. Proces je znázorněn na grafu vloženém do obr.3-7. Kondenzátor C derivuje signál, viz obr.3-14. Průběh derivovaného signálu závisí na časové konstantě obvodu. Jestliže časová konstanta obvodu je dostatečně dlouhá v porovnání s časem potřebným na odvod všech nábojů uvnitř detektoru, pak napěťový puls, který vznikne, má amplitudu úměrnou velikosti původního náboje, který vznikl uvnitř ionizační komory.

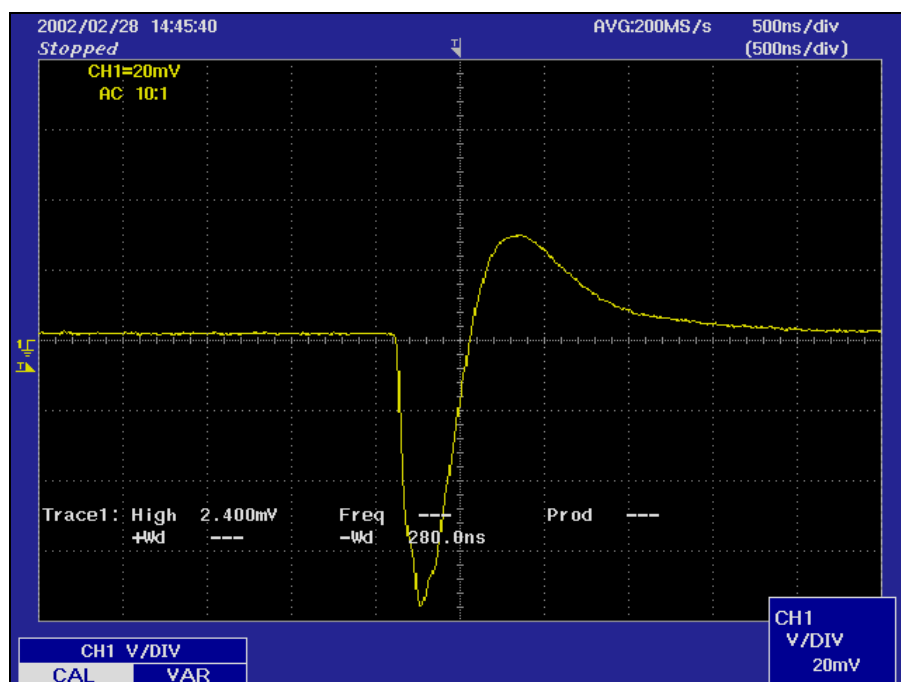
Čas potřebný pro sběr elektronů (t^-) je několik mikrosekund, kdežto čas pro sběr kladných (t^+) a záporných iontů je řádově několik milisekund. Proto musí časová konstanta být také v jednotkách milisekund. Další nevýhodou je, že při vyšších četnostech vzhledem dlouhé časové konstantě, dochází ke kupení pulsů, což znamená, že detektor není schopen detekovat další impuls (projevuje se mrtvá doba), z těchto důvodů jsou detektory pracující v impulsním režimu vyráběny s plyny, které mají nízké koeficienty zachytu volných elektronů.

obr.3-8 Závislost časové konstanty obvodu RC v závislosti na času potřebným pro odvod nábojů uvnitř detektoru (elektronů, iontů)



Pro názornost přikládám ukázkou signálu z detektoru pro prvním zesílení v předzesilovači, viz obr.3-9. Tento signál se dále v předzesilovači upravuje a tvaruje.

obr.3-9 Ukázka signálu po prvním zesílení v předzesilovači



3.8. Amplitudová spektra impulzů

Detektory v impulsním režimu detekují jednotlivé impulzy. Amplitudy jednotlivých impulzů odpovídají náboji vytvořenému určitou reakcí detektoru.

Jestliže budeme zkoumat více těchto pulsů, zjistíme, že jejich amplitudy jsou rozdílné.

Graficky se závislosti počtu naměřených impulzů na jejich amplitudě zobrazují na diferenciální nebo integrální křivce. Tyto křivky lze snadno získat použitím mnohonakálového analyzátoru.

V praxi nás moc nezajímá celé spektrum impulzů, ale jen jeho část, která je od neutronů. Z tohoto důvodu je do obvodu zařazen tzv. diskriminátor (je to jednokanálový analyzátor).

3.8.1. Diskriminátor

Zatím jsme předpokládali, že ionizující částice se v prostoru detektoru vytvářejí jenom z reakcí, vyvolaných neutrony, ale v reaktorové praxi jsou však neutrony vždy doprovázeny gama zářením (fotony) s širokým energetickým spektrem a s velmi proměnnou intenzitou. Fotony nemají elektrický náboj a přímo neionizují, ale prostřednictvím fotoefektu a Comptonova efektu (interakce fotonu s elektronem) mohou uvolňovat elektrony. Je to parazitní jev měření.

Parazitním efektem jsou rovněž:

- šum elektrických obvodů. Je však zpravidla u impulsních detektorů oddělen spolu s gama zářením pomocí diskriminace.
- impulzy, generované v detektorech s ^{235}U (a ve zbytku ^{238}U - cca 10 %) α částicemi, vznikajícími při jejich přirozeném rozpadu.

Popsané parazitní efekty jsou dvojího druhu:

- nezávislé na okamžitém výkonu reaktoru. Sem patří α částice z rozpadu uranu, elektronický šum a γ kvanta z rozpadu štěpných produktů s delším poločasem rozpadu, intenzita/počet posledně jmenovaných kvant však závisí na historii provozu reaktoru před odstavením (doba provozu na různých výkonech určuje nasycené aktivity),
- na době po odstavení, která určuje rozpad štěpných produktů.

V diskriminátoru probíhá oddělení „užitečných“ neutronových impulsů od impulsů vzniklých parazitními efekty. Využívá se závislosti velikosti impulsu na energii primární částice a rozdílu energií uvolněných v reakci s neutrony a v ostatních reakcích. Podstata diskriminátoru spočívá v tom, že k dalšímu zpracování propouští jen impulsy větší než nastavená diskriminační úroveň (DÚ).

Nastavuje se tak, aby bylo registrováno maximum impulsů od neutronů a minimum od parazitních efektů.

U štěpných komor lze určit pracovní hodnotu diskriminačního napětí i na detektoru bez neutronů, např. na odstaveném reaktoru a to proto, že u štěpných komor dochází k samovolnému štěpení (α částice).

Pracovní velikost diskriminačního napětí se vždy musí určit experimentálně.

3.8.2. Diskriminační charakteristiky

Při měření diskriminačních charakteristik se mění postupně v diskrétních krocích velikost diskriminačního napětí (označíme indexem i) a zaznamenává počet impulsů (N_i) nad diskriminační úrovní (DU_i). Při konstantní době čítání impulsů (t) a samozřejmě při konstantní velikosti zdroje neutronů (výkonu reaktoru) spočteme četnost jako podíl naměřeného počtu impulsů a doby čítání.

$$n_i = N_i / t \quad (3.26)$$

Vynesemím závislosti četnosti na diskriminačním napětí získáme **integrální diskriminační křivku**.

Diferenciální křivka představuje závislost počtu impulsů registrovaných mezi dvěma hodnotami diskriminačního napětí na velikosti diskriminačního napětí. Body diferenciální křivky (n_{Di}) získáme z naměřené integrální jako rozdíl dvou sousedních četností,

$$n_{Di} = n_i - n_{i-1} \quad (3.27)$$

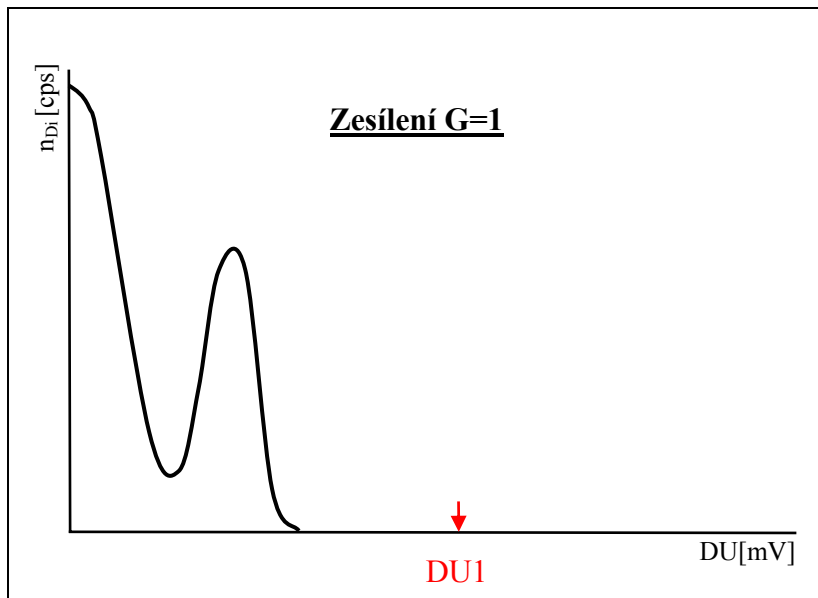
Na obrázcích, obr.3-10, obr.3-11, obr.3-12 je znázorněna závislost tvaru diferenciální charakteristiky na přiloženém vysokém napětí a zesílení při stále konstantním zdroji impulsů. V praxi se zesílení mění nejenom vysokým napětím (plynové zesílení v proporcionálních počítačích), ale i přístrojovým zesílením.

U proporcionálních počítačů plněných BF_3 dochází během provozování detektoru k degradaci molekul BF_3 ke snížení plynového zesílení, impulsy se zmenšují a dochází k deformaci diferenciální křivky. Je to podobný jev, jako kdybychom snížili vysoké napětí o několik desítek voltů nebo snížili přístrojové zesílení.

Když už je diferenciální křivka natolik zúžená a diskriminační úroveň se dostane mimo interval povolených hodnot, není nutno okamžitě detektor měnit, ale stačí zvýšit přístrojové zesílení nebo zvýšit vysoké napětí, pokud to ještě lze. Pokud už nemůžeme zvýšit napětí ani přístrojové zesílení, musí se detektor vyměnit.

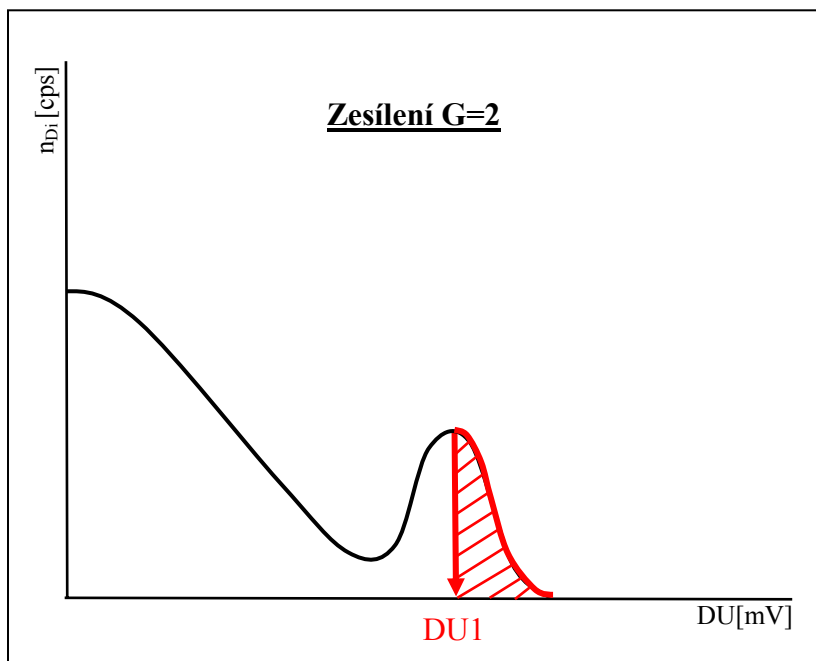
Pozn. U detektorů kanálů PZ v Temelíně přidáním 50V se zvětší zesílení 1,4 krát. Dále je možné zesílení provést na zesilovači, kde přepnutí o jednu polohu má stejný efekt, jako zvětšení vysokého napětí o 50V.

obr.3-10 Změna tvaru diferenciální křivky při zesílení $G=1$



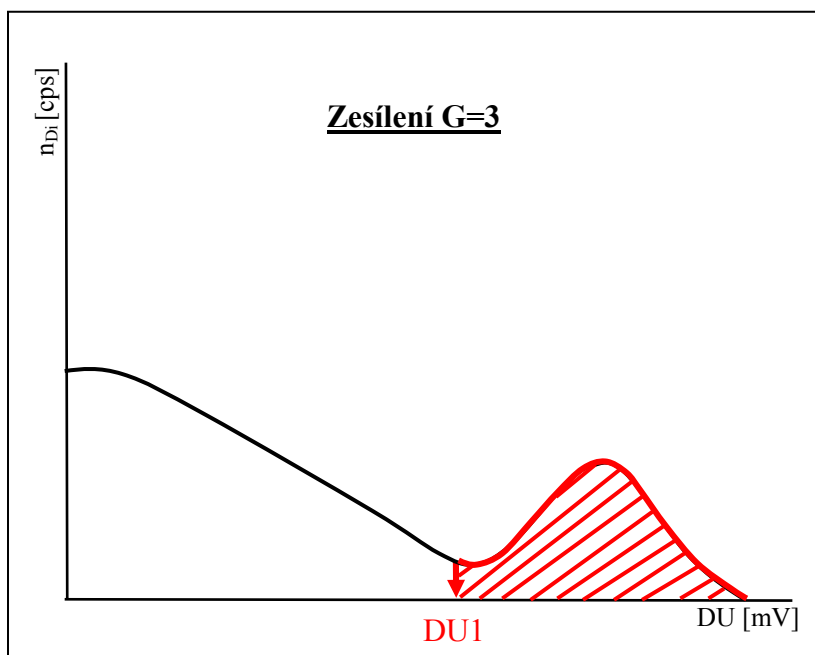
Z obr.3-10 je patrné, že při zesílení $G=1$ (hodnota $G=1$ je jen informační) nebude zaznamenán žádný impuls, protože všechny impulsy budou menší než nastavený diskriminátor $DU1$.

obr.3-11 Změna tvaru diferenciální křivky při zesílení $G=2$



Na obr.3-11 je znázorněna diferenciální charakteristika při zesílení $G=2$. Některé impulsy překročí diskriminátor $DU1$ a budou zaznamenány. Toto nastavení není ještě správné, protože diskriminátorem neprojdou všechny impulsy od neutronů.

obr.3-12 Změna tvaru diferenciální křivky při zesílení $G=3$

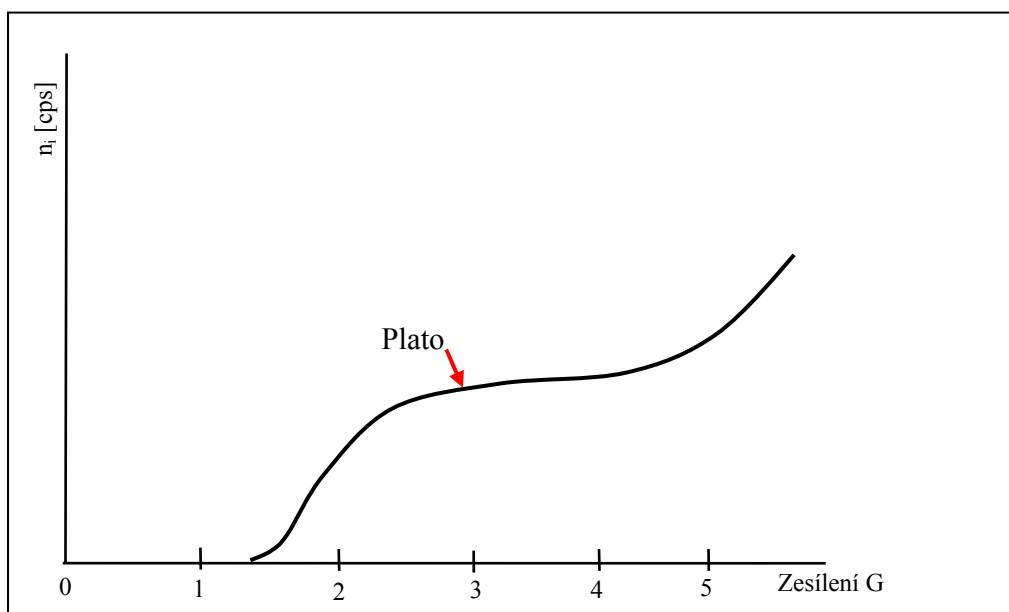


Teprve až při zesílení $G=3$ projdou všechny impulzy od neutronů, viz obr.3-12

Na obr.3-13 je znázorněna charakteristika, která zobrazuje závislost četnosti na zesílení. Při nízkém zesílení nebudou zaznamenány žádné impulzy. Tato charakteristika je vlastně zrcadlový obraz integrální křivky, kterou získáme při měření diskriminačních charakteristik.

Plato vznikne v místě křivky s nejmenším poklesem. Z našeho obrázku je to kolem zesílení $G=3$. Při nastavení zesílení $G=3$ bude diskriminátor DU1 blízko minima diferenciální křivky. Je to hrubé nastavení. Diskriminátor se nastaví do správné pracovní polohy až po změření diskriminační charakteristiky.

obr.3-13 Závislost četnosti na zesílení G



V příloze na obr.8-1 je ukázka diferenciální a integrální křivky změřené na 1. bloku JETE dne 5.10.2005

3.9. Mrtvá doba detektoru

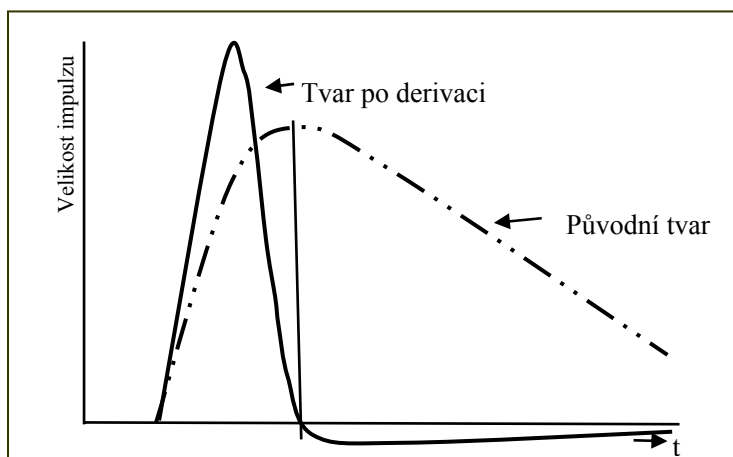
Mrtvá doba detektoru způsobuje zkreslení údaje o výkonu (měřené četnosti). Proto se měřené hodnoty četností detektorů v impulsním režimu korigují na mrtvou dobu (τ). Je to minimum času, který musí být mezi dvěma událostmi, aby tyto dvě události mohly být zaznamenány jako dva samostatné impulzy. V některých případech je mrtvá doba (τ) určena detektorem a někdy elektronikou, která impulzy zpracovává.

Elektrický impuls z detektoru má velmi strmý náběh (daný dobou sběru rychlých elektronů) a pozvolný pokles (pomale kladné ionty).

Z toho důvodu se impulzy tvarují – derivují a integrují.

Derivace zkrátí dobu trvání poklesu velikosti impulsu, vlastně impuls zkracuje a zmenšuje tím velikost mrtvé doby.

obr.3-14 Tvar signálu

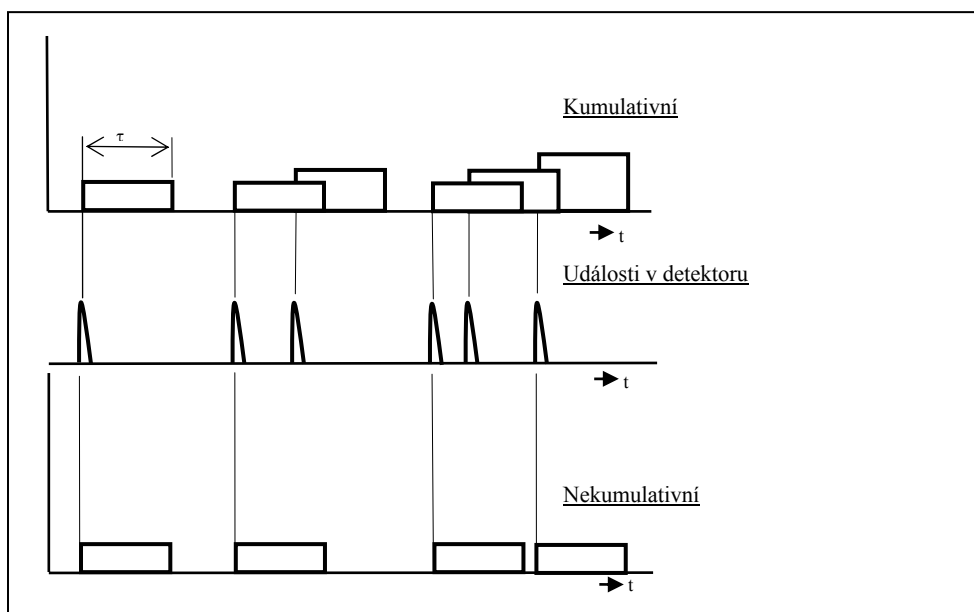


Při zvyšující se četnosti se jednotlivé impulzy přibližují a při dalším růstu se mohou začít překrývat.

Podle typu detektoru, předzesilovačů, máme dvě základní rozdělení (odezvy):

- „paralyzable“ - kumulativní
- „nonparalyzable“ - nekumulativní

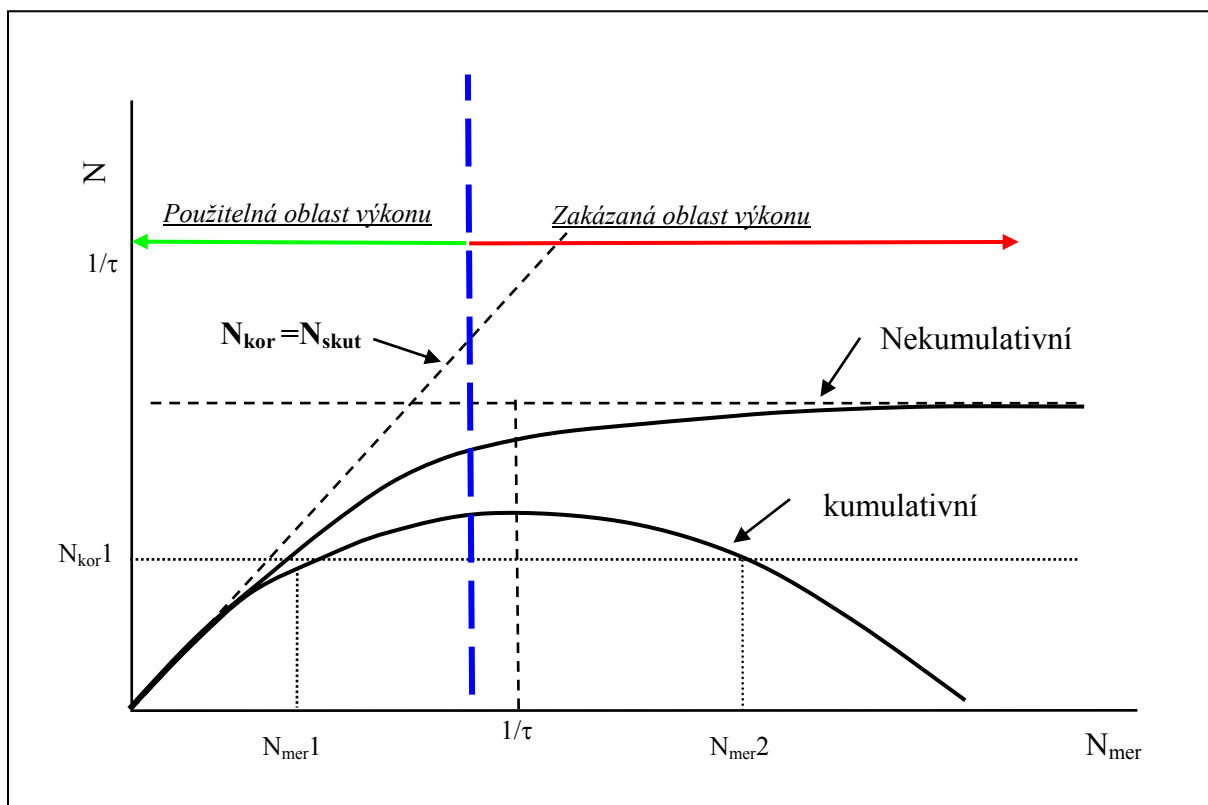
obr.3-15 Mrtvá doba - kumulativní a nekumulativní



τ je hodnota mrtvé doby. Udává se v mikrosekundách a její hodnota se pohybuje v řádu zlomků až jednotek μs .

Při zvyšování výkonu reaktoru a nesprávné hodnotě mrtvé doby není závislost měřeného výkonu lineární. Zvyšování měřeného výkonu se zpomaluje a v některých případech může dojít i ke snižování měřeného výkonu při růstu výkonu skutečného. Proto se zavádí zmíněná korekce a použitelnost kanálů se v impulsním režimu omezuje do dosažení určitého výkonu.

obr.3-16 Vliv kumulativní a nekumulativní mrtvé doby na měření výkon reaktoru



Při nízkých výkonech mají oba dva druhy mrtvé doby podobné průběhy, ale při dalším zvyšování výkonu se začínají znatelně rozcházet.

Pro „nekumulativní“ mrtvou dobu měřicího kanálu je maximální četnost periodicky se opakujících impulsů $\frac{1}{\tau}$. Tato hodnota reprezentuje situaci, kdy elektronika ještě stačí zpracovat impuls (konec jedné mrtvé doby) předtím, než přijde další impuls (před tím než začne druhá mrtvá doba).

Pro „kumulativní“ mrtvou dobu, je $\frac{1}{\tau}$ místo, kde má své maximum a potom se měřená četnost snižuje. Na obrázku si můžeme všimnout, že hodnotě N_{kor1} odpovídá jak N_{mer1} , tak i N_{mer2} .

Pro nízkou četnost ($N_{kor} \ll 1/\tau$) platí :

Nekumulativní

$$N_{KOR} = \frac{N_{MER}}{1 + N_{MER} \cdot \tau} \cong N_{MER} \cdot (1 - N_{MER} \cdot \tau) \quad (3.28)$$

Kumulativní

$$N_{KOR} = N_{MER} \cdot e^{-N_{MER} \cdot \tau} \cong N_{MER} \cdot (1 - N_{MER} \cdot \tau) \quad (3.29)$$

3.10. Druhy detektorů:

- Ionizační komory,
- Proporcionální počítače,
- Samonapájecí detektory.

3.10.1. Ionizační komory

Jsou to detektory, které pracují v oblasti saturace, plynové zesílení je rovno jedné, a nedochází k sekundární ionizaci. Ionizační komory s bórem jako aktivním materiálem se používají převážně pro vyšší výkony/hustoty toku neutronů, vzhledem k poměrně malé energii uvolněné při konverzi neutronu.

Při reakce neutronu s bórem viz 4.21 dojde k uvolnění energie $E_{Li}=0,84\text{MeV}$ a $E_{\alpha}=1,47\text{MeV}$, celkem cca $2,3\text{MeV}$. Pokud je bór v pevné formě na stěně detektoru, energie $E_{Li}=0,84\text{MeV}$ se absorbuje v pokrytí a proto bereme jako využitou energii jen $E_{\alpha}=1,47\text{MeV}$.

$$\frac{1,47 \cdot 10^6}{30} = 4,9 \cdot 10^4 \text{ e / puls}^8 \quad (3.30)$$

Ionizační komory s ^{235}U umožňují využití jednak jako impulsní, jako proudové a jako Campbellovské. Jsou použitelné v celém rozsahu měřených výkonů.

Průměrná využitelná energie od štěpných produktů je 80MeV .

$$\frac{80 \cdot 10^6}{30} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ e / puls} . \quad (3.31)$$

3.10.2. Proporcionální počítače

Proporcionální počítače pracují zpravidla s bórem, v oblasti proporcionálního zesílení, které kompenzuje malou energii, uvolněnou při konverzi neutronů. Pracují zpravidla jako impulsní a využívají se v oblasti spouštění a nejnižších výkonů reaktoru.

Uvolněná energie u proporcionálního počítače při reakci s ^{10}B je cca $2,3\text{MeV}$, plynové zesílení nového detektoru, užitého v Temelíně je 250.

$$\frac{2,3 \cdot 10^6 \cdot 250}{30} = 1,9 \cdot 10^7 \text{ e / puls} \quad (3.32)$$

⁸ Velikost impulsu je úměrná velikosti náboje vytvořeného ionizací. Pro vytvoření iontového páru je potřeba energie cca 30eV .

3.10.3. Samonapájecí detektory

Tento druh detektorů je hodně využíván při měření neutronového toku uvnitř reaktoru. Tyto detektory jsou vyráběny z materiálů, které mají velký účinný průřez pro zachyt neutronů, a které se následně rozpadají beta nebo gama rozpadem. Proud vzniklý beta rozpadem je měřen mezi emitorem a venkovním obalem, nazývaným kolektor. Prostor mezi emitorem a kolektorem je vyplněn izolací, která musí odolávat teplotám chladiva a radioaktivnímu prostředí, které je typické pro jaderné reaktory. Kolektor je vyroben z nerezavějící oceli nebo Inconelu.

Veškerý materiál použitý při výrobě detektorů musí splňovat přísná kritéria na čistotu materiálu, aby nedocházelo ke kontaminaci a následné aktivaci, což by mohlo vést k vytvoření proudu, který by nebyl od neutronů.

Emitor je vyráběn z materiálu, který má velký účinný průřez pro zachyt neutronů. Účinný průřez nesmí být ale příliš velký ani příliš malý, protože kdyby byl příliš malý vedlo by to ke snížení citlivosti a kdyby byl naopak příliš velký, tak by rapidně vzrostlo vyhořívání materiálu, ze kterého je emitor vyroben. Nejpoužívanější materiály pro výrobu emitorů jsou vanad a rhodium. Poločas rozpadu rhodia je cca 40s a vanadu cca 265s.

Samonapájecí detektory reagují i na gama záření, dochází k fotoefektu (uvolňují se elektrony). Pro odstranění vzniklého parazitního proudu z gama reakce se používá speciální samonapájecí detektor, který reaguje pouze na gama (je to drát, který je po celé délce SPD detektorů). Proud měřený tímto detektorem se pak odečte od proudu detektorů, které reagují jak na gama tak i na neutrony.

Detektory jsou montovány do soupravy, která je v hermeticky uzavřené trubce o průměru několika milimetrů. Tyto soupravy jsou rozmístěny po průřezu aktivní zóny. V reaktoru ETE je v soupravě 7 detektorů.

Výhodou těchto detektorů je, že nepotřebují externí napájení. Z toho důvodu jsou detektory nazývány samonapájecí detektory.

Další výhodou je, že jsou malé, relativně levné a nepotřebují náročnou elektroniku na vyhodnocování.

4. POPIS APARATUR PRO MĚŘENÍ NEUTRONŮ NA REAKTORECH ETE (NIS).

Základní funkce systému NIS (Nuclear Instrumentation System)

Základní funkcí systému NIS je kontrola stavu aktivní zóny v podkritickém stavu, během dosahování kritičnosti a za provozu k měření okamžitého výkonu AZ prostřednictvím detekce neutronového toku v okolí tlakové nádoby reaktoru

K tomu používá tři kanály,

- pásma zdroje (PZ) [Source Range (SR)],
- širokého pásma (ŠP) [(Wide Range (WR)],
- výkonového pásma (VP) [Power Range (PR)],

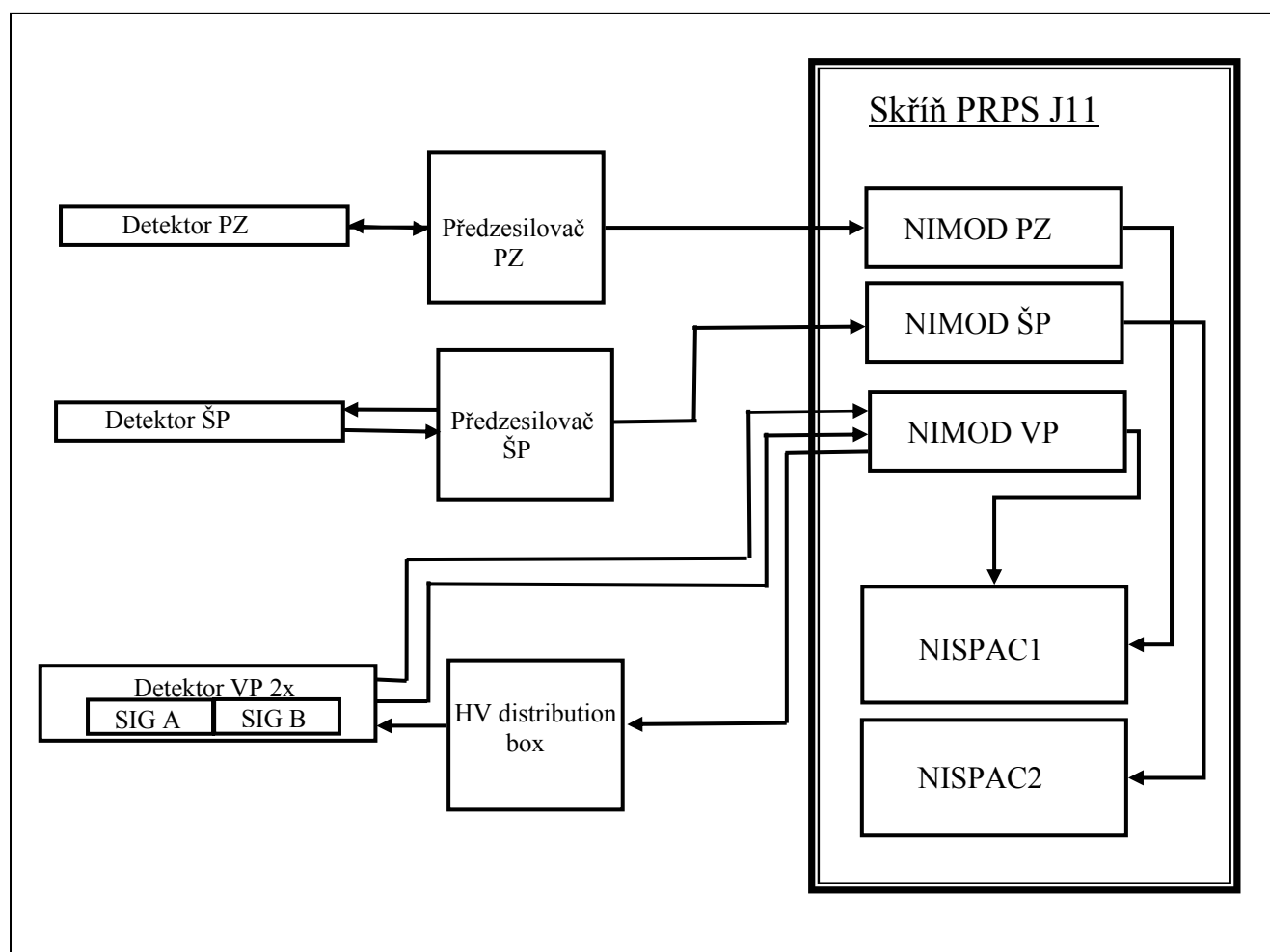
kterými pokryje projektem požadovaný rozsah měření výkonu reaktoru a zároveň je zajištěno vzájemné překrytí při změně rozsahů.

Předtím, než je signál zpracován NISPACem (Nuclear Instrumentation System Processing and Control), signál prochází zařízením nazývaným NIMOD (Nuclear Instrumentation System Amplifier Modules).

Pásmo zdroje PZ a široké pásmo ŠP má předzesilovače mezi detektorem a NIMODEm, z důvodu malého signálu, který se musí přenést na poměrně dlouho vzdálenost.

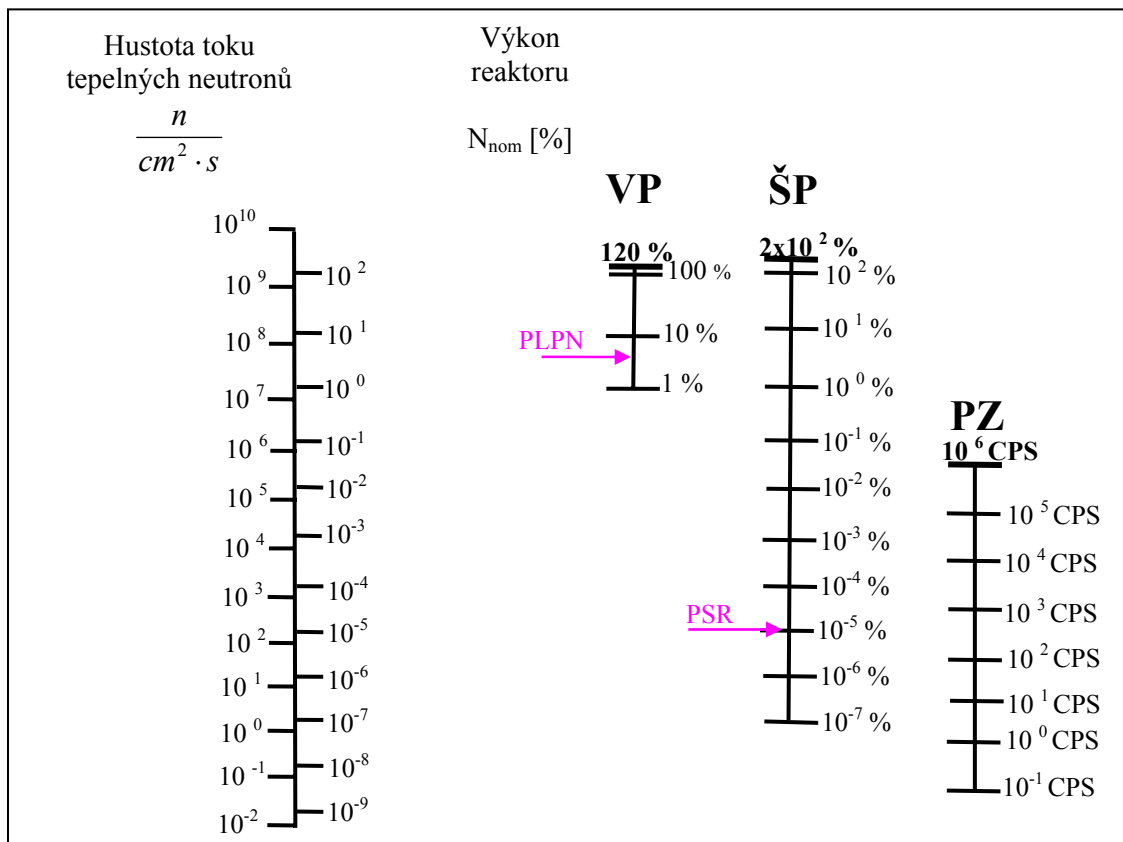
NISPAC1 zpracovává signály z PZ a VP, NISPAC2 zpracovává signály z ŠP.

obr.4-1Blokové schéma systému NIS



Na obr.4-2 je znázorněno, jak je výkon reaktoru pokryt jednotlivými detektory.

obr.4-2 Pokrytí výkonu reaktoru jednotlivými detektory



Pozn. V obr.4-2 jsou znázorněny signály PSR a PLPN. Signál PSR dává povolení operátorovi k vypnutí měření pásma zdroje a automaticky při poklesu pod PSR, zapíná pásmo zdroje. Signál PLPN je blokáce proti zapnutí pásma zdroji na výkonu vyšším než 5% N_{nom} .

4.1. Pásmo zdroje PZ

Pokrývá stavy reaktoru s nejnižší úrovní neutronového toku, tzn. v podkritickém stavu nebo při dosahování kritičnosti. Rozsah měření je od $0,1 s^{-1}$ do $10^6 s^{-1}$.

Detektor PZ (NY-10356)

Pásmo zdroje má jeden detektor na jednu divizi. Detektorem je proporcionální počítač s náplní plynného BF_3 obohaceného ^{10}B a s přidáním moderátorem. Životnost tohoto detektoru je 5 let.

4.2. Výkonové pásmo VP

Poskytuje velmi přesnou ($\pm 1\%$) lineární odezvu/indikaci výkonu reaktoru v rozsahu od 1% do 120% nominálního výkonu.

Detektor VP (NY-10355)

Každá divize má dva nekompenzované detektory VP. Jsou označeny A a B a jsou umístěné proti sobě (posunuty o 180°). Každý detektor je složen ze dvou částí, horní a spodní sekce. Horní sekce monitoruje výkon v horní části reaktoru a spodní sekce monitoruje výkon ve spodní části. Každá sekce převede neutronový tok do proudového signálu.

Detektor pracuje v režimu ionizačních komor. Detektor je uvnitř pokryt slabou vrstvičkou ^{10}B .

4.3. Široké pásmo ŠP

Pokrývá 9 dekad výkonu reaktoru, plně překrývá rozsah výkonového pásma (VP) a část rozsahu pásma zdroje (PZ). Slouží k indikaci výkonu reaktoru v oblasti od PZ až po VP, a dále až do 200 % N_{NOM} .

Detektor ŠP NY-10357

Každá divize má jeden detektor. Detektor ŠP je tvořen štěpnou komorou s obsahem cca 1g U^{235} pracující v oblasti saturace. Detektor ŠP pracuje ve dvou režimech, při nízkých výkonech pracuje v impulzním režimu, při vyšších četnostech, vyšší výkon pracuje v režimu MSV.

Projektová životnost detektoru je 40 let.

5. PROVOZNÍ KONTROLY NIS

Detektory neutronů jsou poměrně složitá čidla. Nedílnou součástí detektoru je i nezbytné elektronické vybavení. Konečný údaj detektoru závisí na řadě parametrů, řada z nich se za provozu mění vlivem okolních podmínek (elektronika) nebo vlivem degradačních procesů vyvolávaných v detektoru působením gama záření, neutronů, teploty apod. Je tedy nutné umět tyto změny identifikovat a kompenzovat.

Kompenzace se provádí na:

- přerozdělování neutronového toku v aktivní zóně vlivem vyhořívání paliva, kdy se neutronový tok přemisťuje ze středu aktivní zóny ke stranám.
- změnu polohy regulačních orgánů (klastřů), které při vytahování a zasunování podstatně ovlivňují, deformují rozložení neutronového toku a tím dochází k nerovnoměrnému vyhořívání paliva (AFD axial offset difference)
- změnu teploty chladiva v prostoru mezi tlakovou nádobou a pláštěm aktivní zóny (při vyšší teplotě vody prochází více neutronů, které detektor detekuje a tím ukazuje vyšší výkon, přesto že výkon v reaktoru je stále tentýž). Tato kompenzace se provádí kalibrační konstantou a_6 u detektorů výkonového pásma.

Na JE Temelín jsou dva druhy požadavků na provozní kontrolu NIS. Vycházejí buď z LaP (Limit a podmínek) nebo z doporučení výrobce.

tabulka 5-1 Doporučení výrobce

Název činnosti	Perioda
Měření mrtvé doby kanálů pásma zdroje	18 měsíců
Měření V-A charakteristiky PZ komor a vyhodnocení stárnutí	18 měsíců
Měření saturační charakteristiky komor širokého pásma	18 měsíců
Měření a nastavení MSV offsetů širokého pásma	18 měsíců
Měření překrytí CPS a MSV širokého pásma (Splicing)	18 měsíců
Měření saturační charakteristiky komor výkonového pásma	18 měsíců
Nastavení a nastavení offsetů výkonového pásma	18 měsíců

tabulka 5-2 Požadavek LaP

Název činnosti	Perioda
Měření diskriminační charakteristiky kanálů pásma zdroje	18 měsíců
Měření diskriminační charakteristiky kanálů širokého pásma	18 měsíců
Kontrola odchylky od tepelného výkonu VP, ŠP	24 hod.
Kalibrace odchylky od tepelného výkonu VP, ŠP	na požadavek

6. VYBRANÁ MĚŘENÍ

„Dodavatelské“ metodiky měření měly víceméně formu laboratorních měření. Vycházely z technické úrovně, která byla v průběhu dodávky překonána. Nepředpokládaly automatizované zpracování výsledků. Důsledkem byly nepříjemně dlouhé doby pro realizaci měření. Bylo tedy nutné tyto postupy upravit.

Základními hledisky při úpravách metodik měření bylo:

- V maximální možné míře omezit „ruční“ práci při záznamu hodnot. Tím jsme sledovali dva cíle:
 - Omezit možnost vzniku chyb při přepisování hodnot.
 - Výrazně zkrátit dobu, potřebnou pro měření.
- V maximální možné míře omezit „ruční“ práci při vyhodnocování výsledků. Tím jsme sledovali následující cíle:
 - Omezit možnost chyb při výpočtech.
 - Výrazně zkrátit dobu vyhodnocení.
 - Omezit vliv individuálního posuzování naměřených výsledků.
 - Získat výsledky ve formě, vhodné pro SW archivaci.

Z celého souboru prováděných měření vybírám ta, kde byly podstatně upraveny a modernizovány metodiky měření, obsažené v technické dokumentaci dodavatele.

6.1. Diskriminační charakteristiky kanálů pásma zdroje a kanálů širokého pásma

6.1.1. Široké pásmo

Popis HW části

Při původním měření se používal výhradně standardní HW.

Měření podle metodiky WEC.

Diskriminační úroveň se nastavovaly ručně v předzesilovači v kontrolovaném pásmu v místnosti A336.

Při každé změně diskriminačního napětí DU se nejdříve muselo sundat víko z předzesilovače, připojit voltmetr na testovací body, nastavit diskriminační úroveň (DU) pomocí potenciometru (trimru). Po nastavení požadované DU se předzesilovač musel opět zavřít, jinak docházelo k rušení signálu z detektoru. Standardně měřené četnosti impulsů se odečítaly v místnosti AE 609 pomocí HHT (hand held terminal) a ručně zapisovaly do protokolu. Potom bylo nutno zaznamenaná data z protokolu překreslovat do grafů pro vyhodnocení.

HHT je speciální jednoúčelový přípravek, kterým se mohou nastavovat některé výpočetní koeficienty a odečítat kontrolní hodnoty, měřené systémem NIS a komunikované dále do bezpečnostních řídicích systémů elektrárny. HHT se používá pro kanály pásma zdroje, širokého a výkonového pásma.

HW A SW úpravy měření.

Úprava víka

K urychlení nastavování jsme vyrobili testovací víko, které mělo dva otvory. Jeden otvor pro přívodní kablíky voltmetru a druhý otvor pro nastavování potenciometru.

Předzesilovač zpracovává extrémně nízký signál a i přívodní kablíky (stíněné i nestíněné) ovlivňovaly měření. Po nastavení DU bylo stále nutno voltmetr odpojovat a předzesilovač opět zakrýt víkem. Ale přesto měření s novým testovacím víkem bylo rychlejší. Nebyla odstraněna časově náročná ruční práce a obtížné nastavování nízkých diskriminačních napětí, kdy skutečná hodnota je ovlivňována velikostí zpětné vazby v obvodu diskriminátoru a i pouhým dotekem nastavovacího potenciometru.

AWR

Firma CANBERRA PACKARD podle našeho zadání vyrobila jednoúčelový měřicí přípravek AWR (Automat Wide Range). Ve skutečnosti se jedná o dva přípravky AWR-M a AWR-S, viz obr. 6-1.

Přípravek AWR-S (slave) je fyzicky umístěný přímo v předzesilovači širokého pásma a je zakryt testovacím víkem. Tento přípravek generuje tzv. stahovací proud, který se sčítá s proudem procházejícím děličem R41, R42. Změnou stahovacího proudu se nastavuje DU na vstupu č. 2 operačního zesilovače U3. Skutečná velikost diskriminačního napětí se měří kalibrovaným voltmetrem METRIX v testovacím bodu TP3 nebo na R41.

Přípravek AWR-S je napájen +15V a -15V přímo z předzesilovače a velikost stahovacího proudu je řízena přes optočlen vnější přípravkem AWR-M.

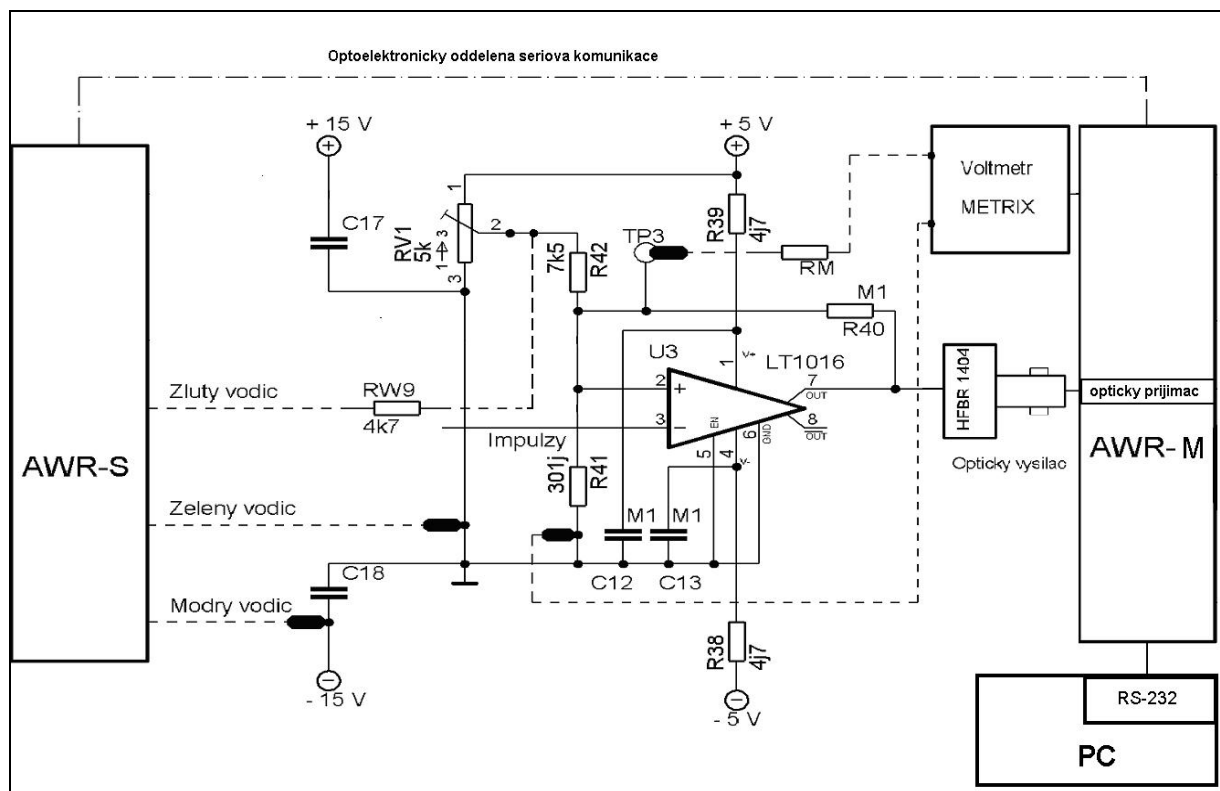
AWR-M (master), řídí jednotku AWR-S a zároveň řídí pracovní cyklus měření na jedné (počáteční) diskriminační úrovni. Zadá velikost diskriminačního napětí, vyhodnotí jeho ustálení z údajů voltmetru METRIX, spustí čítání impulzů a hodiny s nastaveným intervalem čítání. Po ukončení intervalu zaznamená počet naměřených impulzů, skutečnou dobu měření a velikost diskriminačního napětí. Měřicí cyklus je ukončen zadáním další hodnoty diskriminačního napětí. Měření je ukončeno po doběhnutí měřicího cyklu na konečném diskriminačním napětí. Voltmetr METRIX měří diskriminační napětí na odporu R41.

Osobní počítač (PC) předává požadované parametry měření (počáteční, konečnou hodnotu diskriminačního napětí, velikost „kroku“ diskriminačního napětí a délku intervalu počítání impulzů) a přijímá zaznamenaná data přes sériový port RS232 galvanicky odděleným spojem. Pomocí přípravku AWR dostáváme měřené údaje ve formě datového souboru. Datový soubor se obsahuje trojici hodnot:

- diskriminační napětí,
- skutečná délka intervalu měření,
- zaznamenaný počet impulzů.

Tyto údaje se ukládají v PC do textového souboru.

obr. 6-1 Schéma připojení přípravku AWR k předzesilovači ŠP



Vyhodnocení

Popis obecného postupu určení diskriminační úrovně DÚ.

V Technickém manuálu PRPS [7.3] bylo předepsáno provádět měření diskriminačních charakteristik při umístění detektoru v neutronovém poli a nebo jen na přirozeném alfa rozpadu U235 v detektoru. Neutrony mohou být vytvářeny aktivní zónou reaktoru, nebo při předinstalačních zkouškách externími zdroji.

Na obrázcích jsou charakteristiky měřené při předinstalačních zkouškách (ruční měření) s neutronovým zdrojem (bleděmodrý kosočtverec), viz obr.6-3, a na alfa impulzech (fialový čtverec), viz obr.6-2. Na obr.6-6 je obdobné měření na s reaktorem jako zdrojem neutronů. Toto měření bylo provedeno pomocí přípravku AWR.

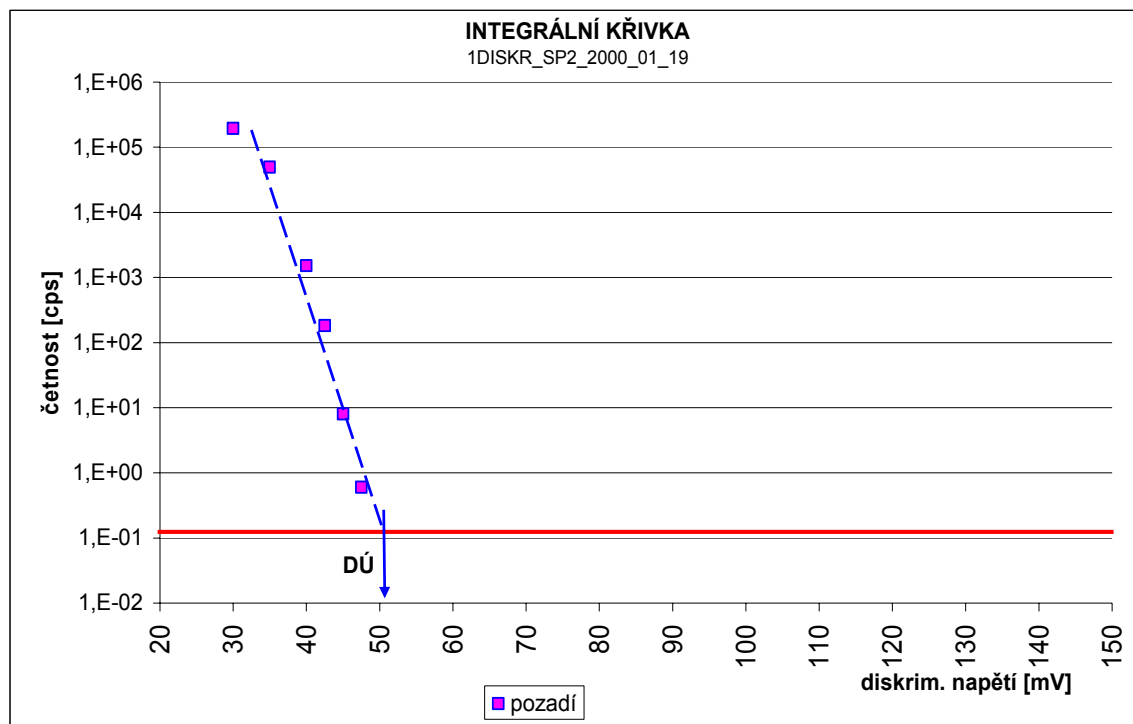
Určování DÚ:

- na alfa impulzech
- pomocí neutronového zdroje

Určování DÚ na alfa impulzech.

První způsob určení diskriminační úrovně je na alfa rozpadu U235 viz obr.6-2. Tato metoda je nejpřesnější, protože měřená četnost klesne dost nízkou (0,1CPS), aby mohla být DÚ přesně nastavena. Takto nastavená DÚ oddiskriminuje všechny impulzy způsobené alfa rozpadem.

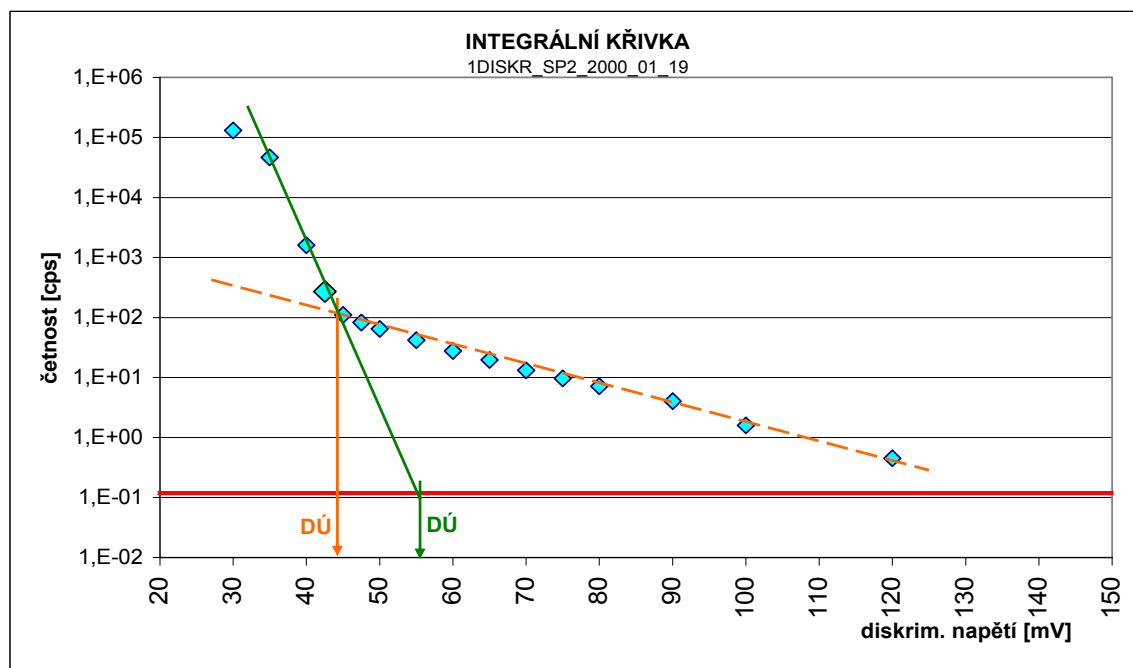
obr.6-2 Integrální křivka – alfa rozpad



Určování DÚ pomocí neutronového zdroje.

Další možnost jak určit DÚ je použití neutronového zdroje s vhodnou emisí neutronů (zpravidla je to AmBe zdroj s emisí 1×10^6 až 1×10^7 neutronů/sekundu), který se přiloží k detektoru v určité vzdálenosti. Protože detektor nemá vlastní moderátor musí se mezi zdroj a detektor vložit moderátor. (Jako moderátor se používá polyethylen, který neutrony zpomaluje a vznikají neutrony pomalé (tepelné), které zvyšují pravděpodobnost že neutron bude detektorem změřený.), viz obr.6-3.

obr.6-3 Integrální křivka – neutronový zdroj



Na obr.6-3 je vidět, že integrální křivka měřená s neutronovým zdrojem na počátku sleduje tvar integrální křivky měřené na alfa rozpadech viz obr.6-2. Na úrovni DÚ cca 40 mV se integrální křivka měřená na neutronech odchyluje a pomalu klesá.

Vyhodnocení DÚ z této integrální křivky se může provádět dvěma způsoby:

- proložíme přímkou tu část, kde mírně klesá (obr.6-3, je to od 50 mV do 120 mV) a bod který se odchýlí od proložené přímky je nová hodnota DÚ (bod v obr.6-3 je pro názornost zvětšen), ke které se přičte 5 mV (tato hodnota je empirická a zaručuje, že přidáním této hodnoty k DÚ, budou impulzy vzniklé od alfa rozpadu bezpečně oddiskriminovány) nebo,
- proložíme přímkou přední část strmě klesající křivky (tmavě zelená přímka), kterou extrapolujeme na hodnotu 0,1CPS. V místě, kde extrapolovaná přímka protne hodnotu 0,1CPS (červená přímka v obr.6-3) je nově určená DÚ.

Pozn. Z obr.6-3 je vidět, že oběma způsoby dostaneme trochu jiné DÚ. Pro správné určení diskriminace nejde použít přesné metodiky, ale musí se vycházet z vlastní zkušenosti a vlastního odhadu.

Takto provedená měření se mohla provádět pouze při předinstalačních měřeních, kdy detektor nebyl ještě umístěn v šachtě kolem aktivní zóny.

Po spuštění reaktoru se měření provádí na neutronech z reaktoru.

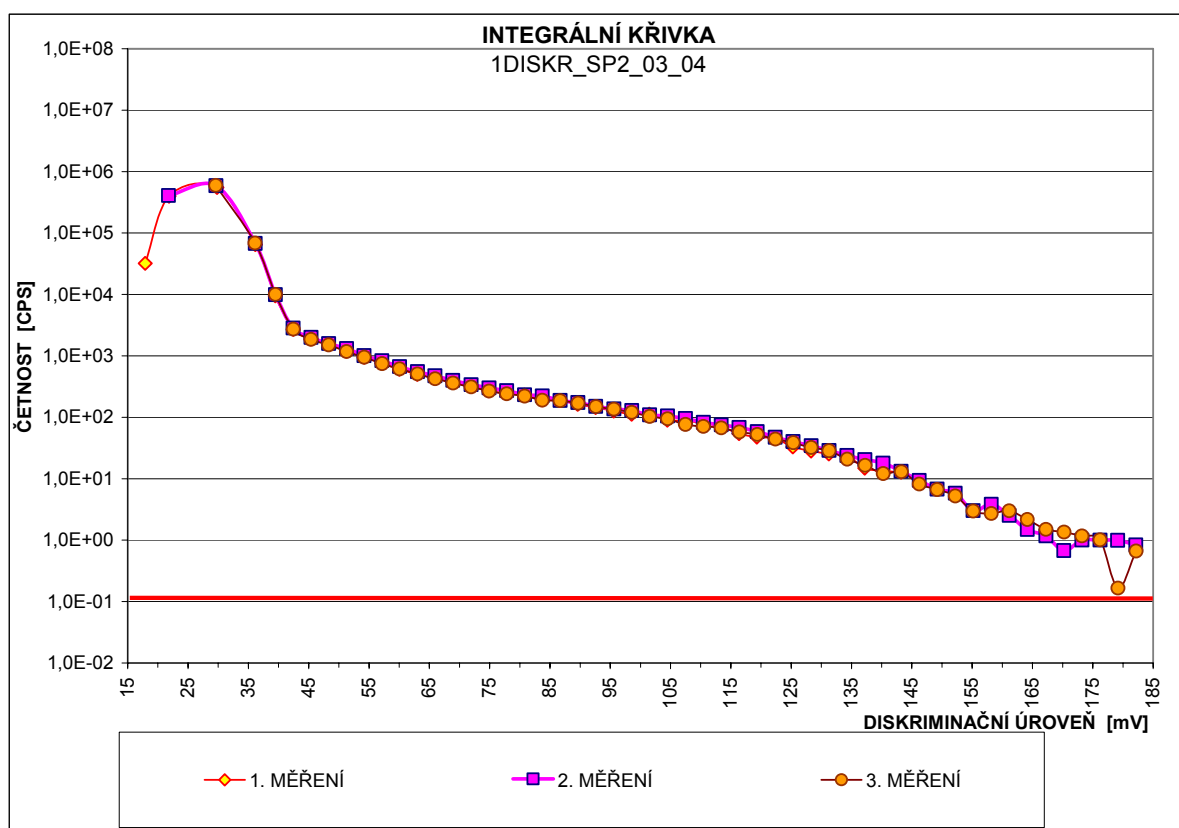
Měření na reaktoru:

- s minimálním výkonem,
- na odstaveném reaktoru

Měření na reaktoru s minimálním výkonem.

Aby mohla být diskriminační charakteristika změřena, musíme mít konstantní neutronový tok. Tato měření se provádí po dosažení kritického reaktoru na minimálním kontrolovaném výkonu. Po dobu měření musí být neutronový výkon konstantní.

obr.6-4 Měření na reaktoru s minimálním výkonem



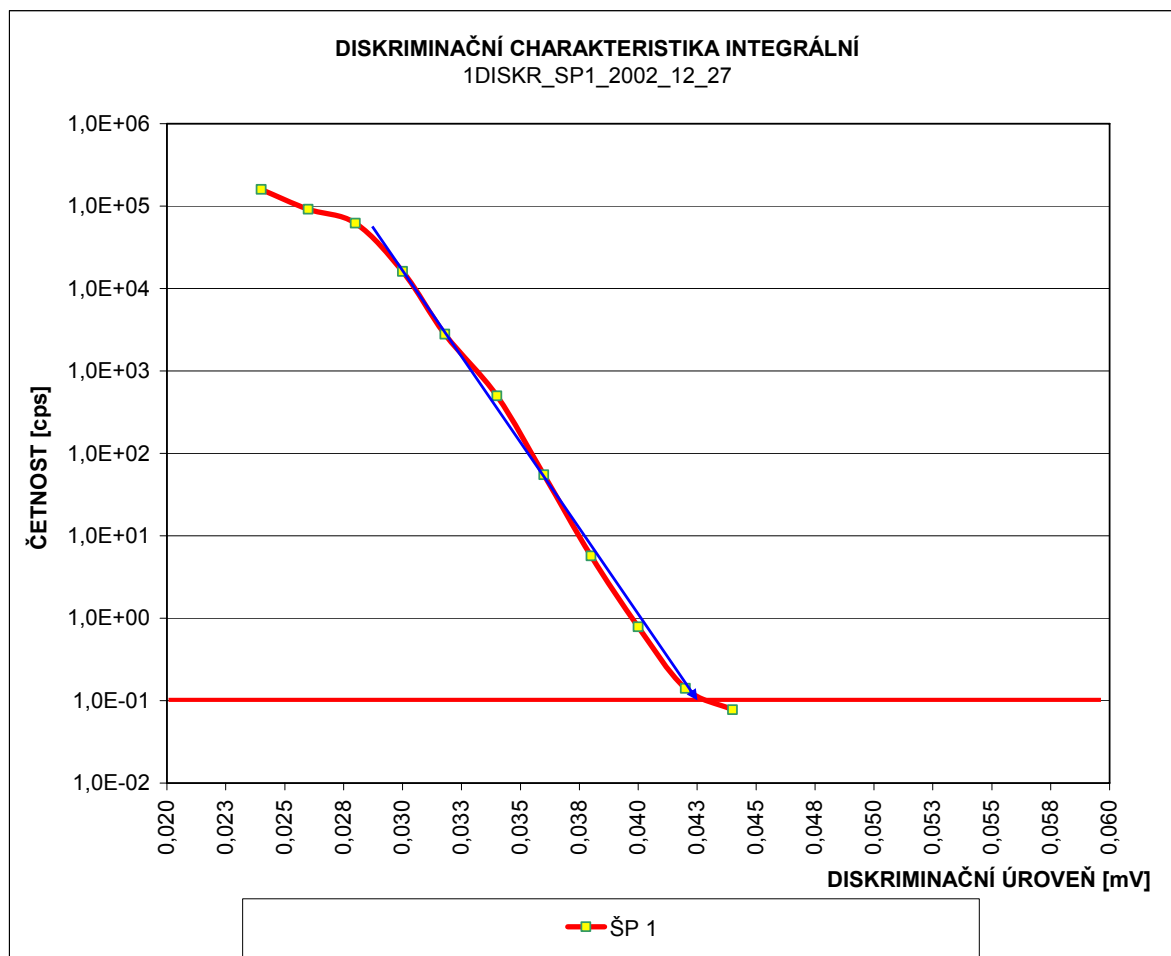
K určení DÚ jsme dříve používali „druhou metodu“ tzn., že jsme proložili přední částí integrální charakteristiky. Extrapolace se prováděla z cca 3 až 4 měřených bodů v oblasti malých hodnot diskriminačního napětí (cca 25 mV), kde je velmi obtížné vůbec hodnotu diskriminačního napětí nastavit (důvodem je zpětná vazba realizovaná odporem R40 v obvodu diskriminátoru). Provedená extrapolace byla zatížena velikou chybou, závisící na zkušenosti a odhadu experimentátora. S WEC bylo dohodnuto a v našich měřeních ověřeno, že měření pracovní hodnoty diskriminační úrovně je výhodnější dělat na odstaveném reaktoru (z měření alfa částic z rozpadu uranu). WEC vydal návrh doplňku pro další revizi TM PRPS TEM-I&C-PRPS-594.

Měření na odstaveném reaktoru

Má dvě zásadní přednosti. Umožňuje poměrně vysokou spolehlivostí určit pracovní hodnotu diskriminačního napětí prakticky bez extrapolace měřených bodů. Druhou předností je, že relativně dlouhodobé měření bylo přeneseno do období odstávky bloku.

Na obr.6-5 je diskriminační křivka změřená ruční změnou diskriminačního napětí na odstaveném reaktoru s postupem určování pracovní hodnoty diskriminačního napětí. Je vidět dosažitelný rozdíl v kvalitě extrapolace.

obr.6-5 Graf integrální křivky na odstaveném reaktoru, ruční měření



Dnes se provádí obě měření, jak na nízkém výkonu reaktoru tak i na odstaveném reaktoru. Jen se to už neprovádí ručním odečítáním, ale přípravkem AWR. Měření n nízkém výkonu se ale nepoužívá pro určování pracovní úrovně diskriminačního napětí, ale pro vyhodnocování stárnutí detektoru, které se projevuje na změně tvaru diskriminační křivky.

Vyhodnocovací soubor.

Je to excelovský soubor, který se skládá z :

list „IDENTIFIKACE“ - Obsahuje údaje potřebné pro archivaci záznamů.

list „DATA“ – do tohoto listu se importují data v podobě textového souboru a zároveň se provádí výpočty hodnot pro grafy.

List „DIFERENCIÁLNÍ“ a List „INTEGRÁLNÍ“ - na těchto listech se sestavují příslušné charakteristiky, diferenciální a integrální charakteristika aktuálních měření číslo 1, 2 a 3 a tyto křivky analyzují a určují se pracovní hodnoty diskriminačního napětí a také se porovnávají s charakteristikami změřených dříve.

„DATA HIST.“ - na tento list se ukládají datové informace z předchozích měření. Z uložených dat se konstruují na listech „INT. HIST.“ a „DIF. HIST.“ integrální a diferenciální křivky ze všech měření. Umožňuje se tím porovnávat vývoj křivek v čase a posouzení stárnutí detektoru.

List „INT. HIST.“ a DIF. HIST.“ - Na těchto listech jsou zobrazeny všechny dosud naměřené křivky.

Do vyhodnocovacího souboru se data původně zapisovala ručně, později byl ruční záznam nahrazen automatickým přenosem.(data z maintenance Terminal, dnes data z přípravku AWR).

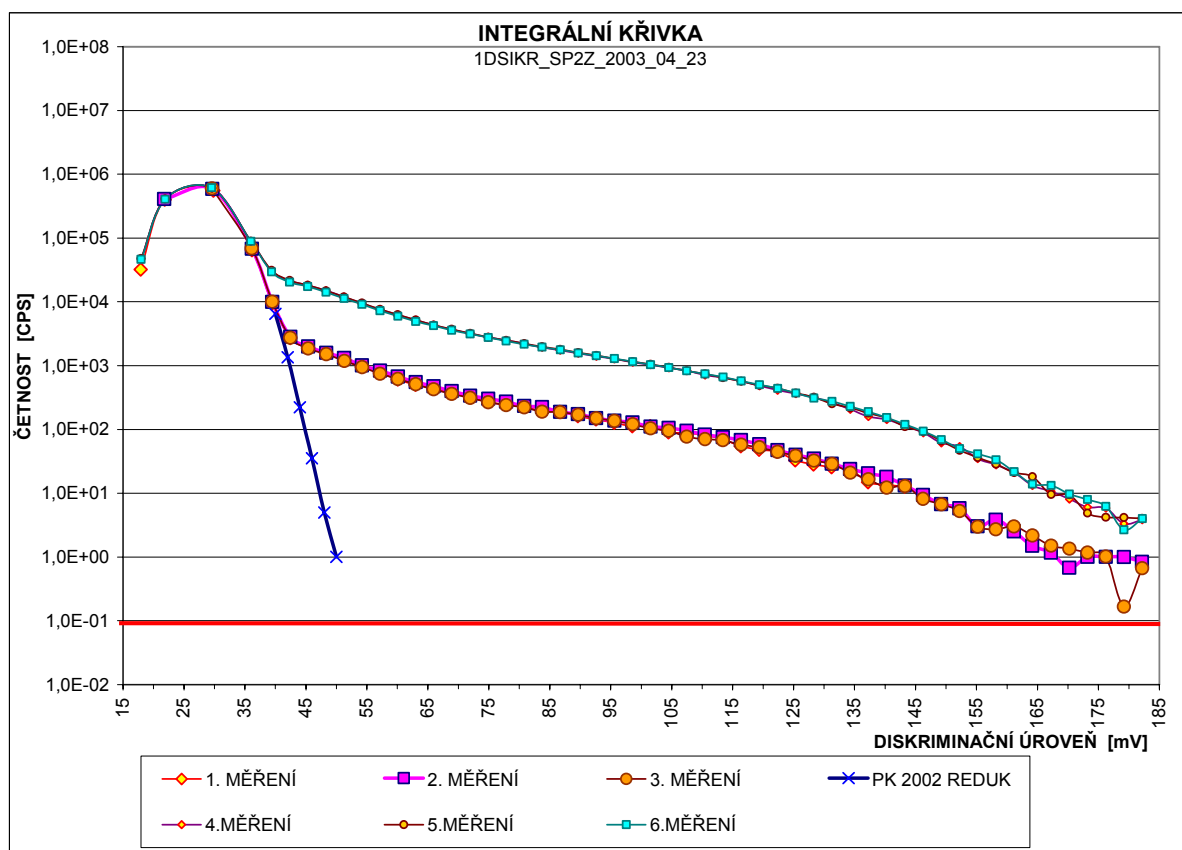
Na ukázkou přikládám výsledky z dat změřených přípravkem AWR.

Na obr.6-6, obr.6-7, obr.6-8 jsou diskriminační charakteristiky měřené pomocí přípravků AWR.

obr.6-6 znázorňuje integrální křivku měřenou na minimálním (cca 10^{-4} % nominálního výkonu). Křivka se používá pro sledování životnosti komory. Na obr.6-7 a obr.6-8 jsou křivky změřené na odstaveném reaktoru a naznačen způsob určení pracovní hodnoty diskriminačního napětí.

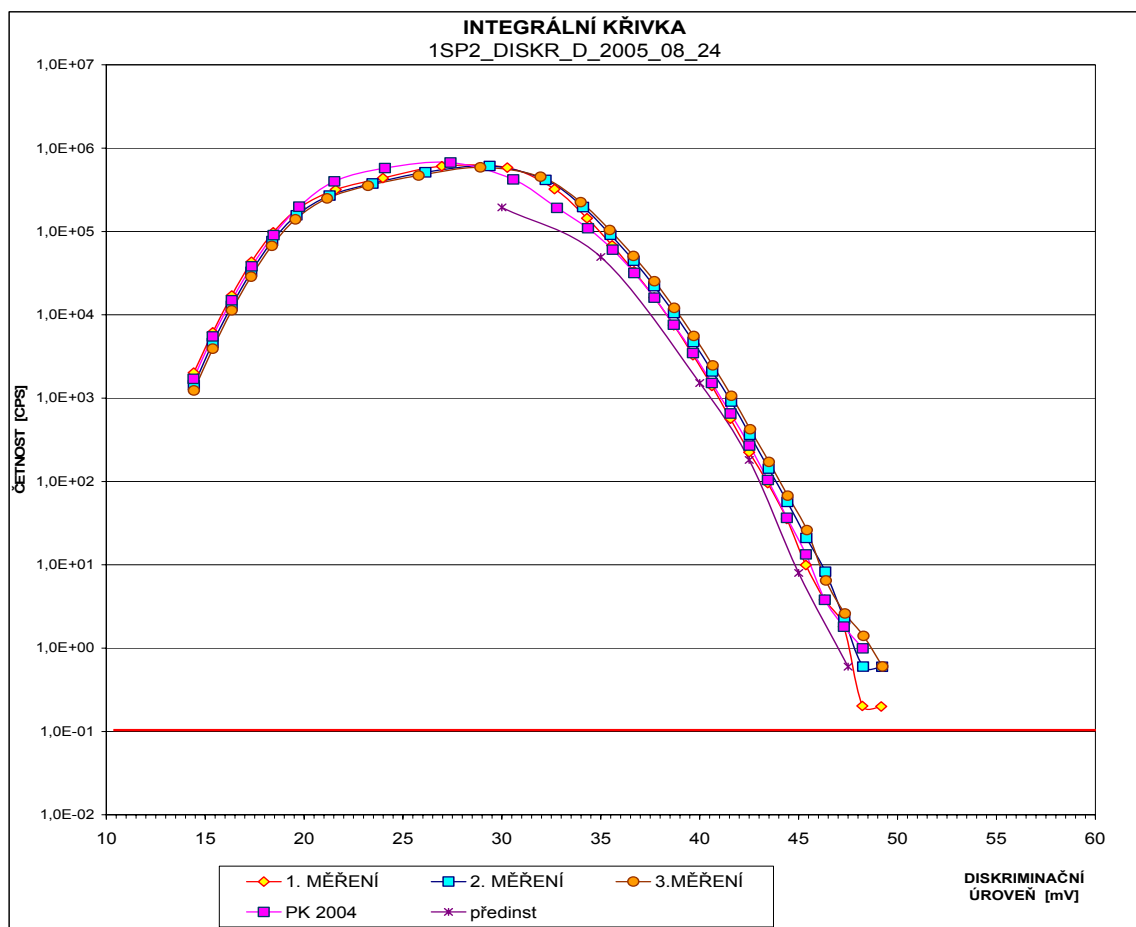
Křivka na počátku má kopcovitý tvar, protože při nízkých DÚ je četnost už tak vysoká, že dochází k zahlcení vyhodnocovacích obvodů. Tento jev lze pozorovat na obr.6-6, kde na počátku křivky je měřená nízká četnost, přestože ve skutečnosti je hodně vysoká. Četnost se postupně zvětšuje a to do doby, kdy je vyhodnocovací elektronika je schopna rozpoznávat jednotlivé impulzy.

obr.6-6 Graf integrální křivky na kritickém reaktoru a nízkém výkonu, AWR



Na obr.6-6 dále můžeme pozorovat, že měření č.1,2,3 se odklání od křivky alfa rozpadu dříve než měření č.4,5,6. Je to dáno tím, že měření se prováděla na rozdílných výkonech.

obr.6-7 Graf integrální křivky na odstaveném reaktoru, AWR



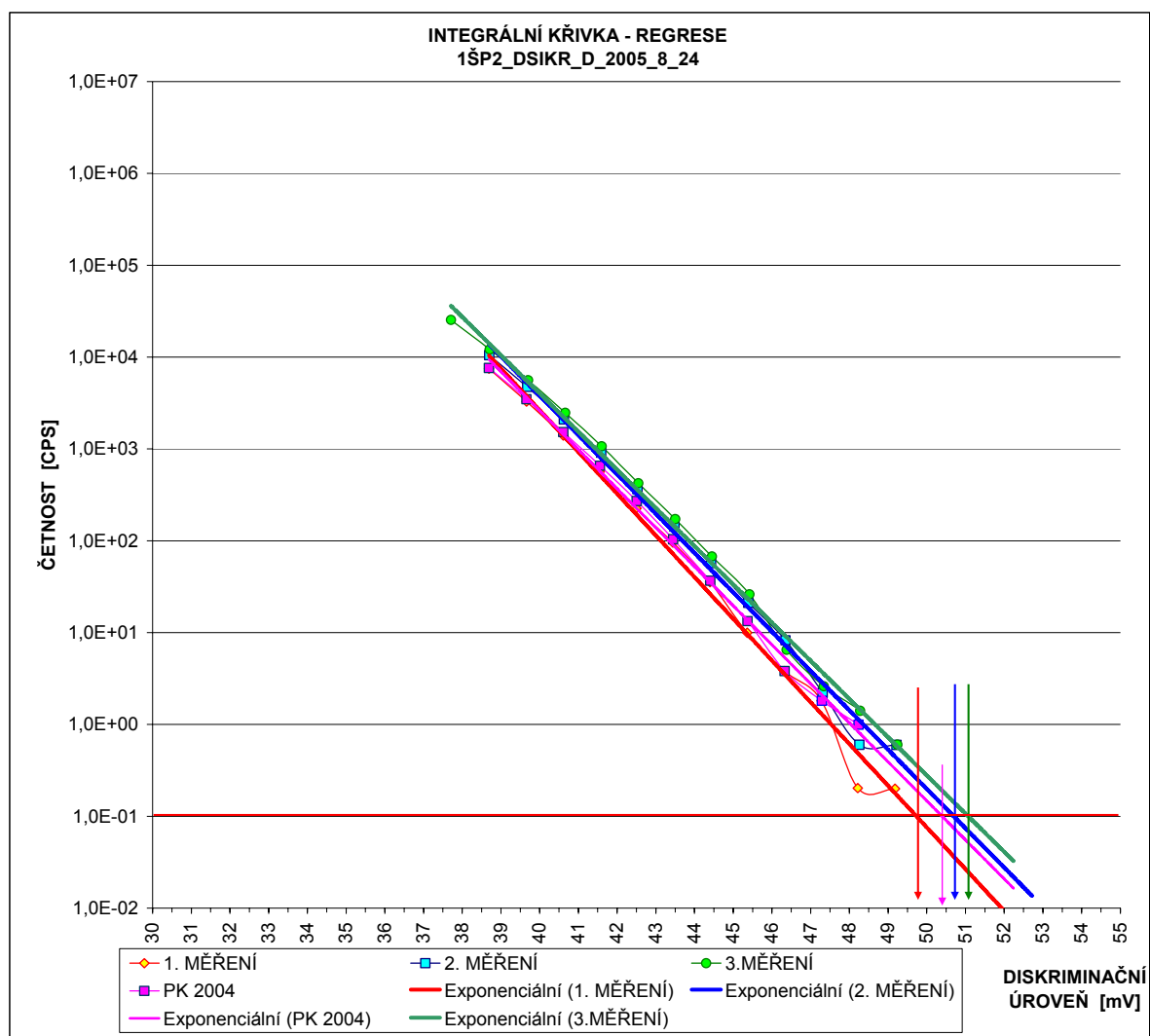
Celá diskriminační charakteristika na odstaveném reaktoru se měří v rozsahu cca 15 mV až 55mV. Protože jedno měření pomocí přípravku AWR trvá necelých 5 minut (ve srovnání s cca 4 hodinami při ručním měření), můžeme si dovolit pro potvrzení správnosti výsledku měření opakovat. Zpravidla děláme tři měření. Na obr.6-7 je kromě tří provedených měření i křivka, vybraná jako reprezentativní z měření v roce 2004 (PK 2004) a křivka z předinstalačního měření. To nám dovoluje posoudit stabilitu měření a případné odchylky signalizují možnou degradaci komory.

Vlastní vyhodnocení děláme na grafu na obr.6-8.

Vybereme na integrální křivce úsek, kde je charakteristika přímková a automaticky proložíme regresní přímkou. Pracovní bod určuje průsečík regresní přímky s hodnotou 0,1cps.

Základní myšlenkou je omezit individuální posuzování extrapolace na četnost 0,1 cps. Extrapolace na 0,1 cps zaručuje, že v celém rozsahu měření bude kanál ŠP registrovat pouze neutrony.

obr.6-8 Určování pracovní hodnoty diskriminačního napětí pomocí regresních přímek



6.1.2. Pásmo zdroje

Popis HW části

Podobně jako u měření diskriminační charakteristiky ŠP, tak i pro PZ byl předaný postup na měření zpracován pro ruční nastavování a zapisování.

Rozdíl PZ od ŠP je v tom, že nastavování DU se neprovádí už v předzesilovači, ale přímo ve skříní JV(W,X)11 na kartě XNA v Ae 609/1,2,3 a že PZ má dva diskriminátory, horní diskriminátor a spodní diskriminátor. Spodní diskriminátor slouží k odříznutí impulsů od gama a elektrického šumu, horní je tam podle informace techniků WEC spíše z historického důvodu. Když předzesilovač byl před léty navrhován, neměly kabely takové stínící vlastnosti jako dnes. Tento diskriminátor odřezával impulsy, které vynikly působením elektromagnetického rušení. Tyto impulsy měly mnohem větší amplitudu než impulsy od neutronů.

ASR

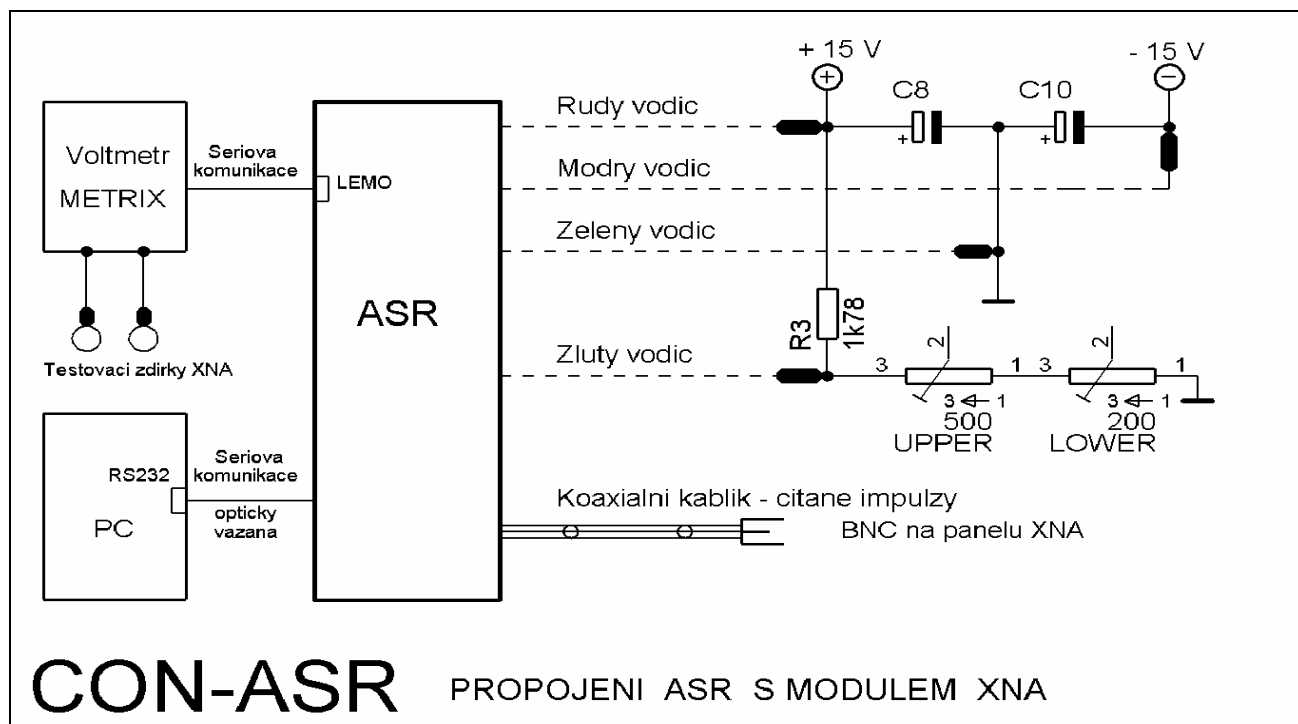
Firma CANBERRA PACKARD podle našeho zadání vyrobila další jednoúčelový měřicí přípravek ASR (Automat Source Range).

Přípravek **ASR** se připojuje přímo na kartu XNA. Horní diskriminátor (potenciometr UPPER) je vytočen na horní doraz. Diskriminační napětí je generováno modulem ASR a vnucováno do spoje potenciometru horního diskriminátoru (UPPER) a rezistoru R3. Přesné hodnoty diskriminačního napětí jsou měřeny externím voltmetrem METRIX, který předává naměřené hodnoty do ASR modulu prostřednictvím infračerveného portu. ASR je napájen přímo z karty XNA, +15V a -15V. Koaxiálním kablíkem přivádíme diskriminované impulsy do čítače. Počítač komunikuje s modulem přes sériové rozhraní RS232. Linka je galvanicky oddělena optočleny.

Schéma zapojení přípravku ASR s kartou XNA je na obr.6-9.

Stejně jako u přípravku AWR je velikost pomocného napětí řízena po volitelných krocích (parametr ws), v každém kroku se automaticky po nastavenou dobu (volitelná, parametr wt) počítají výstupní impulsy. Při měření se zadává počáteční a konečná velikost diskriminačního napětí (parametr wi pro počáteční wx pro konečnou hodnotu), systém si vypočte počet kroků. Přípravek ASR se připojuje na obvody horního diskriminátoru a umožní změnu diskriminačního napětí v celém rozsahu (od cca 200 mV do 4000mV), takže není nutné přepínání výstupních impulsů na čítač z výstupů dolního a horního diskriminátoru. Měření probíhá automaticky, výstupem je série trojic údajů: diskriminační napětí, doba měření, počet naměřených impulsů v datovém souboru, které se ukládají do PC do textového souboru.

obr.6-9 Schéma zapojení přípravku ASR s kartou XNA



Vyhodnocení

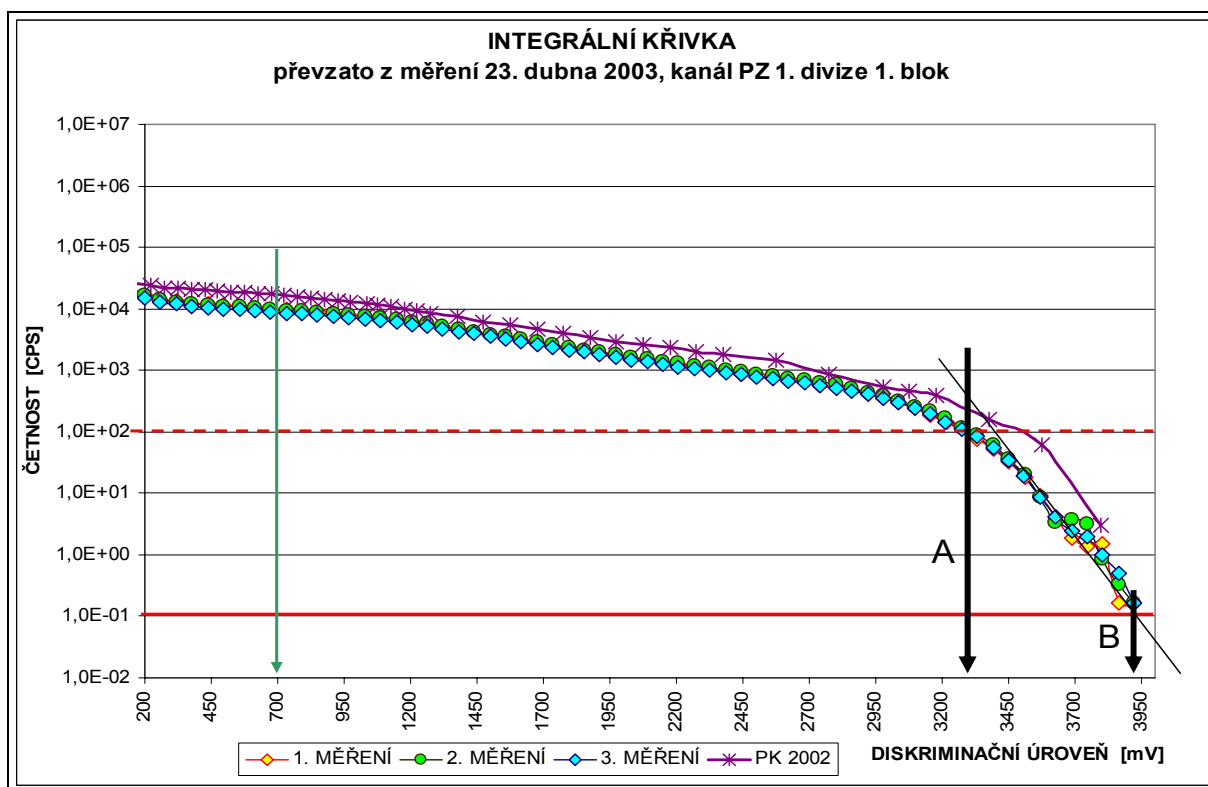
Obecný postup předaný firmou WEC na měření diskriminační charakteristiky pásma zdroje je uveden v Technickém manuálu PRPS [7.3].

Při měření diskriminační charakteristiky se mění postupně v diskrétních krocích velikost diskriminačního napětí a zaznamenává počet impulzů nad diskriminační úrovní DÚ.

Vynesením závislosti četnosti na diskriminačním napětí získáme **integrální diskriminační křivku** (viz obr. 6-10).

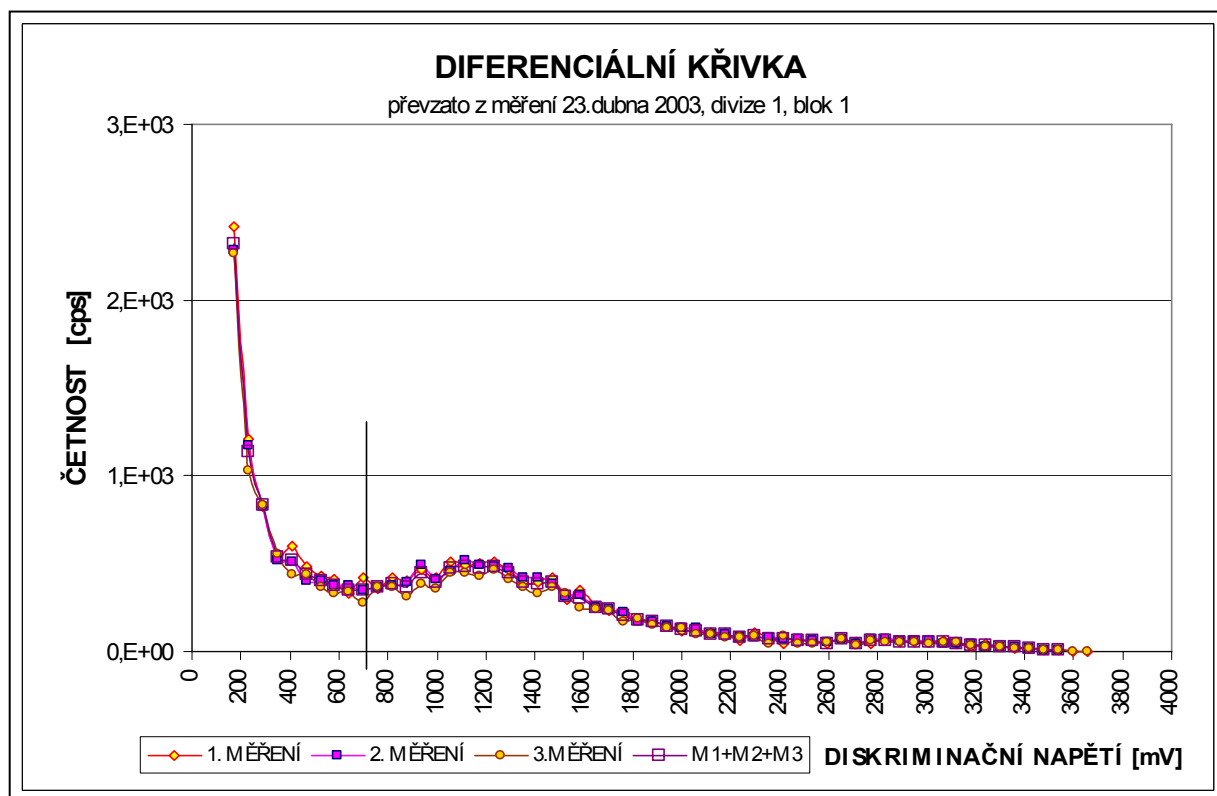
Integrální křivka se používá pro určení pracovní hodnoty diskriminačního napětí horního diskriminátoru.

obr. 6-10 Integrální křivka PZ



Pro kanály pásma zdroje je výhodné znát i **diferenciální křivku** (viz obr.6-11), která představuje závislost počtu impulzů registrovaných mezi dvěma hodnotami diskriminačního napětí na velikosti diskriminačního napětí.

obr.6-11 Diferenciální charakteristika PZ



Na změřených diferenciálních diskriminačních charakteristikách se kontrolují a určují hodnoty nastavení dolního a horního diskriminačního napětí diskriminátoru.

Dolní diskriminátor: nastavuje se zhruba do poloviny sedla diferenciální charakteristiky mezi šumem a píkem od neutronů. Je to znázorněno svislou čarou na obr.6-11.

Tento způsob nastavení je odlišný od doporučení v Technickém manuálu PRPS [7.3], kde se doporučuje nastavovat horní diskriminátor na úroveň diskriminačního napětí, při které četnost klesne na 1 % četnosti měřené při diskriminaci 0,5V.

V nové revizi Technického manuálu PRPS [7.3] WEC přijal námi navrženou metodu určování pracovní hodnoty dolního diskriminačního napětí ze sedla diferenciální křivky.

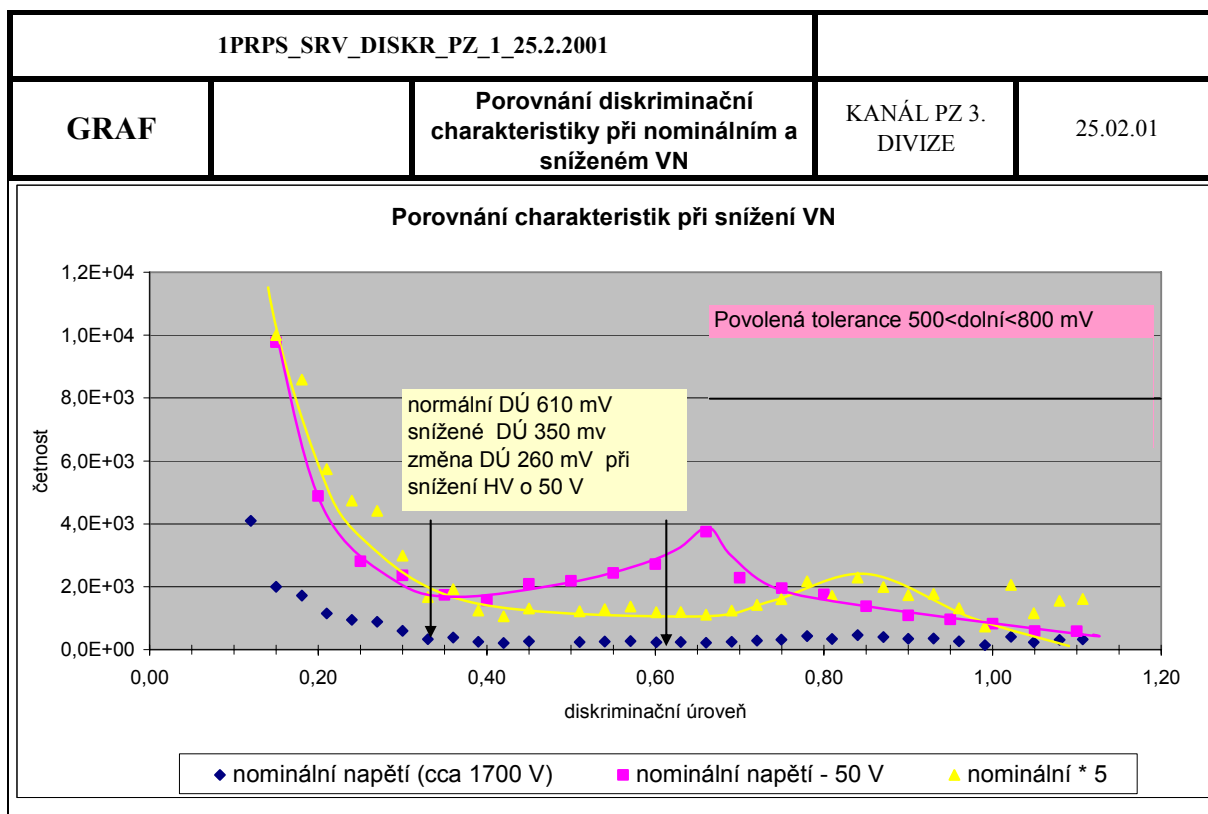
Horní diskriminátor: nastavuje se tam, kde integrální charakteristika klesne pod 0,1 cps. Je to znázorněno svislou čarou **A** na obr.6-8. Technický manuál PRPS [7.3] připouští i určení znázorněné svislou čarou **B**, která je vedena průsečíkem diskriminační křivky s četností o dva řády menší, než je nastavená dolní diskriminační úroveň, na obr.6-8 zelená svislá čára na úrovni 700 mV. Ve skutečnosti na poloze horního diskriminátoru příliš nezáleží, sloužil pro odfiltrování extrémně velkých impulzů, zřejmě vyvolávaných vnějším rušením. Nastavujeme proto horní diskriminátor na úroveň 3800 až 4000 mV.

Při měření diskriminační charakteristiky se posuzuje rovněž tvar a změna tvaru křivky. Její degradace, která se obvykle projevuje zploštěním křivky a snižováním píku od neutronů vypovídá o zhoršování vlastností detektoru. Když tento stav nastane je nutno zahájit akce k výměně detektoru. Může se projevit i celkový posun, smrštění křivky směrem k nižším hodnotám diskriminačního napětí. To je způsobeno snižováním plynového zesílení detektoru (impulzy jsou menší).

V Technickém manuálu PRPS [7.3] jsou uvedeny tolerance, ve kterých se mají pohybovat pracovní hodnoty diskriminačních úrovní. Pokud jsou tyto tolerance překročeny, je nutné postupem podle Technického manuálu vhodnou změnou zesílení kanálu a nebo změnou velikosti vysokého napětí vrátit hodnoty diskriminačního napětí do požadovaných mezí. Pokud to už není možné, je nutno vyměnit detektor.

Pro názornost je přiložen obr.6-12.

obr.6-12 Změny diferenciální charakteristiky při snížení napětí VN



Vyhodnocovací soubory.

Vyhodnocovací jsou podobné vyhodnocovacím souborům pro ŠP. Rozdíl je v tom, že navíc u PZ máme možnost měnit zesílení detektoru. Z toho důvodu je ve vyhodnocovacím excolovském souboru jeden list navíc, kde se pracuje ze zesílením.

Tento list se nazývá „Měření po změně zesílení“.

6.2. Saturační charakteristiky kanálů širokého pásma a kanálů výkonového pásma

Měření saturačních charakteristik VP a ŠP se provádí tak, že postupně zvyšujeme vysoké napětí na detektoru a snímáme velikost proud z detektoru.

V oblasti ionizační komory, tj. konstantního proudu se rovná část charakteristiky nazývá plato komory. Pro správnou činnost komory je potřeba, aby pracovní velikost vysokého napětí ležela přibližně ve středu plata (znázorněné fialovou čarou, obr.6-13).

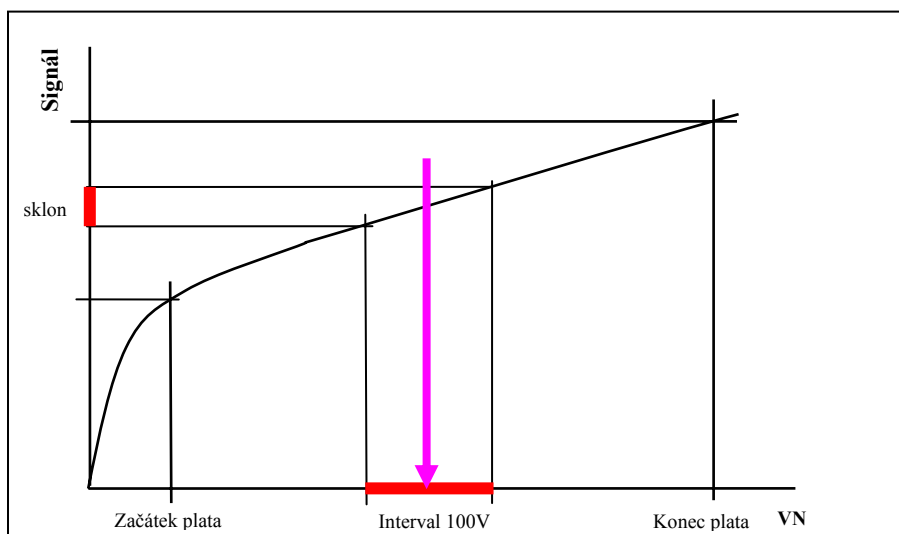
Je nutné, aby charakteristika v oblasti plata byla co nejvíce rovnoběžná s osou x (vysokého napětí). Je to proto, aby při kolísání VN se proud komory měnil jen minimálně. Vyhodnocuje se proto **SKLON PLATA**, který se udává v % změny proudu na 100 V vysokého napětí. Číselným kriteriem pro posuzování sklonu plata je velikost plata v % změny proudu na 100 V (viz obr.6-13). Pro komory VP i ŠP je požadován sklon plata menší než 4%/100 V. Délka plata je zpravidla několik set voltů, komory VP mají plato od cca 100 do 1000 V. Nedodržení sklonu plata nebo jeho výrazné zkrácení je důvodem pro výměnu komory

Měření saturační charakteristiky se provádí modifikovaným postupem.

Ruční odečítání hodnoty vysokého napětí a odpovídajícího proudu komory (výkonu reaktoru) je nahrazeno automatickým záznamem hodnot pomocí „Maintenance terminálu“ (notebook, na kterém je nainstalován program, kterým můžeme zaznamenávat hodnoty přímo ze systému Na změřené saturační charakteristice se kontroluje sklon a délka plata a vhodná volba pracovního napětí komory

Vstupními daty jsou textové soubory zaznamenané na MT (Maintenance terminal).

obr.6-13 Plato detektoru



Vyhodnocovací soubor se skládá:

list „IDENTIFIKACE“ - Obsahuje údaje potřebné pro archivaci záznamů.

List „VÝKON“ – na tomto listu se na grafu automaticky zobrazuje časový průběh výkonu

List „DATA“ - do tohoto listu se přenášejí data z MT a provádějí se výpočty hodnot pro grafy

List „GRAFY“ - na tomto listě jsou grafy saturačních charakteristik

V příloze na obr.8-2 je ukázka změřené saturační charakteristiky výkonového pásma a na obr.8-3 saturační charakteristika širokého pásma.

6.3. Splicing

Toto měření se provádí na širokopásmovém detektoru ŠP, který dokáže pracovat ve dvou režimech, v impulzním režimu a v režimu MSV (Camblovském režimu).

V oblasti výkonů, kde se četnost pohybuje od 30 000 cps do 300 000 cps přechází měření výkonu z režimu četnosti do režimu MSV. V této oblasti je nutné, aby tento přechod byl hladký. Tato oblast se nazývá splicingová oblast.

Měření v impulzním režimu

Při malých výkonech, do 30 000CPS detektor pracuje výhradně v impulzním režimu. Počet registrovaných impulsů je úměrný neutronovému toku (hustotě toku tepelných neutronů), kterému je komora vystavena. Při zvyšování výkonu reaktoru (zvyšování neutronového toku nad 30 000CPS) je linearita narušena mrtvou dobou detektoru (to je doba, po kterou detektor není schopen po příchodu jednoho impulsu registrovat impuls další). Velikost mrtvé doby (dead time, τ) se pro štěpné komory pohybuje v řádu 10^{-7} až 10^{-6} s. Zavedením korekce na mrtvou dobu lze v určitém rozsahu četností průběh počtu impulsů linearizovat. Korekční faktor má tvar:

$$CPS^{corr} = \frac{CPS^{filtered}}{1 - \tau * CPS^{filtered}} \quad (6.1)$$

CPS^{corr} – korigovaná četnost

$CPS^{filtered}$ – měřená četnost

τ – mrtvá doba detektoru

Výkon reaktoru CPSP v % nominálního výkonu v režimu impulsního měření se určuje jako

$$CPSP = K1.K2.CPS^{corr} \quad (6.2)$$

kde K1 je kalibrační splicingová konstanta, která převádí korigovanou četnost na hodnotu MSV a K2 je kalibrační konstanta, převádějící MSV na výkon v % nominálního výkonu. Z uvedeného odvození je vyplývá, že výkon CPSP je ovlivňován velikostí mrtvé doby v oblasti vysokých četností.

Měření v režimu MSV.

Čistě v tomto režimu pracuje komora na výkonech vyšších než 300 000CPS.

Výkon reaktoru MSVP v režimu měření MSV v % nominálního výkonu určuje jako:

$$MSVP = K2 * [(Root_MSV)^2 - (MSV_Background)^2] \quad (6.3)$$

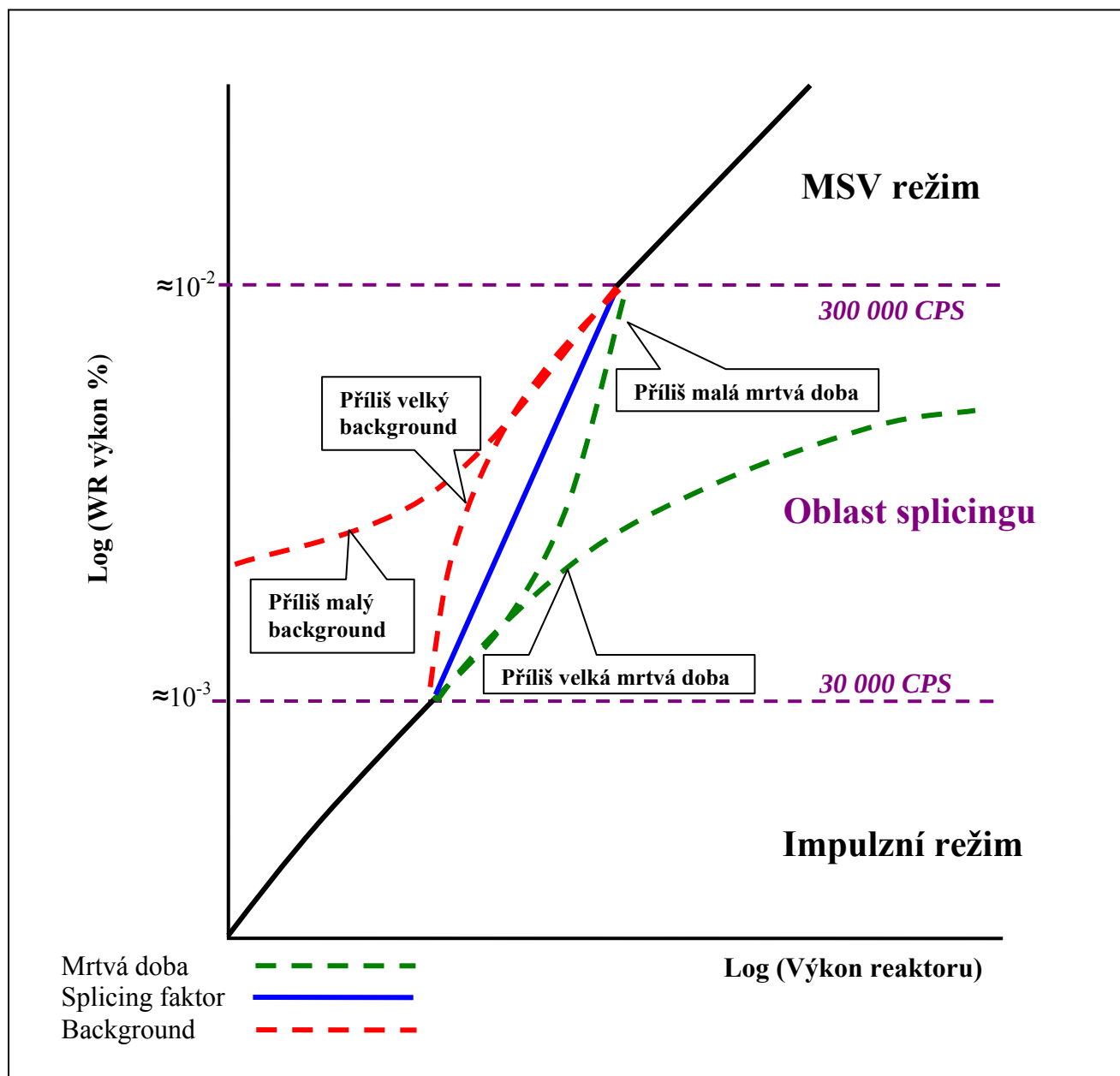
K2 – je kalibrační konstanta.

Root_MSVP – napětí, které odchází z předzesilovače.

MSVP_Background – konstanta, která reprezentuje elektrický šum předzesilovače a alfa rozpadů v detektoru.

Z uvedeného vztahu plyne, že výkon MSVP je ovlivňován velikostí backgroundu a to zejména v oblasti malých výkonů.

obr.6-14 Splicing



Výkon reaktoru kanálu širokého pásma se obecně určuje jako lineární kombinace výkonu CPSP a MSVP:

$$N_{\text{šP}} = (1 - \text{Splicing_faktor}) * \text{CPSP} + \text{Splicing_faktor} * \text{MSVP} \quad (6.4)$$

$$\text{Splicing_faktor} = \frac{\text{CPS}^{\text{corr}} - 30000}{300000 - 30000} \quad (6.5)$$

Vhodné nastavení splicingu lze dosáhnout vhodnou volbou parametrů backgroundu a mrtvé doby.

V příloze jsou přiloženy dva obrázky (obr. 8-4, obr. 8-5) změřené splicingu ze dne 5.10.2005.

Vyhodnocovací soubor se skládá:

List „IDENTIFIKACE“ - Obsahuje údaje potřebné pro archivaci záznamů.

List „VÝCHOZÍ STAV“ - na tomto listu se kontrolují odečtené konstanty ze systému s hodnotami z archivu a vypočítává výkon oblasti splicingu.

List „1(2,3)-PRPS-VYHOD.“ – do tohoto listu se importují data odečtená ze systému PRPS. Tyto data se automaticky přenesou do grafu. My pak vhodnou volbou nové hodnoty mrtvé doby a backgroundu a se snažíme, aby oblast splicingu byla co nejhladší a nejrovnější.

List „DPS TEXT“ - do tohoto listu se přenáší data z MT a provádějí se úpravy formátů datových souborů, předtím než se přenesou na list „1-DPS-VYHOD.“

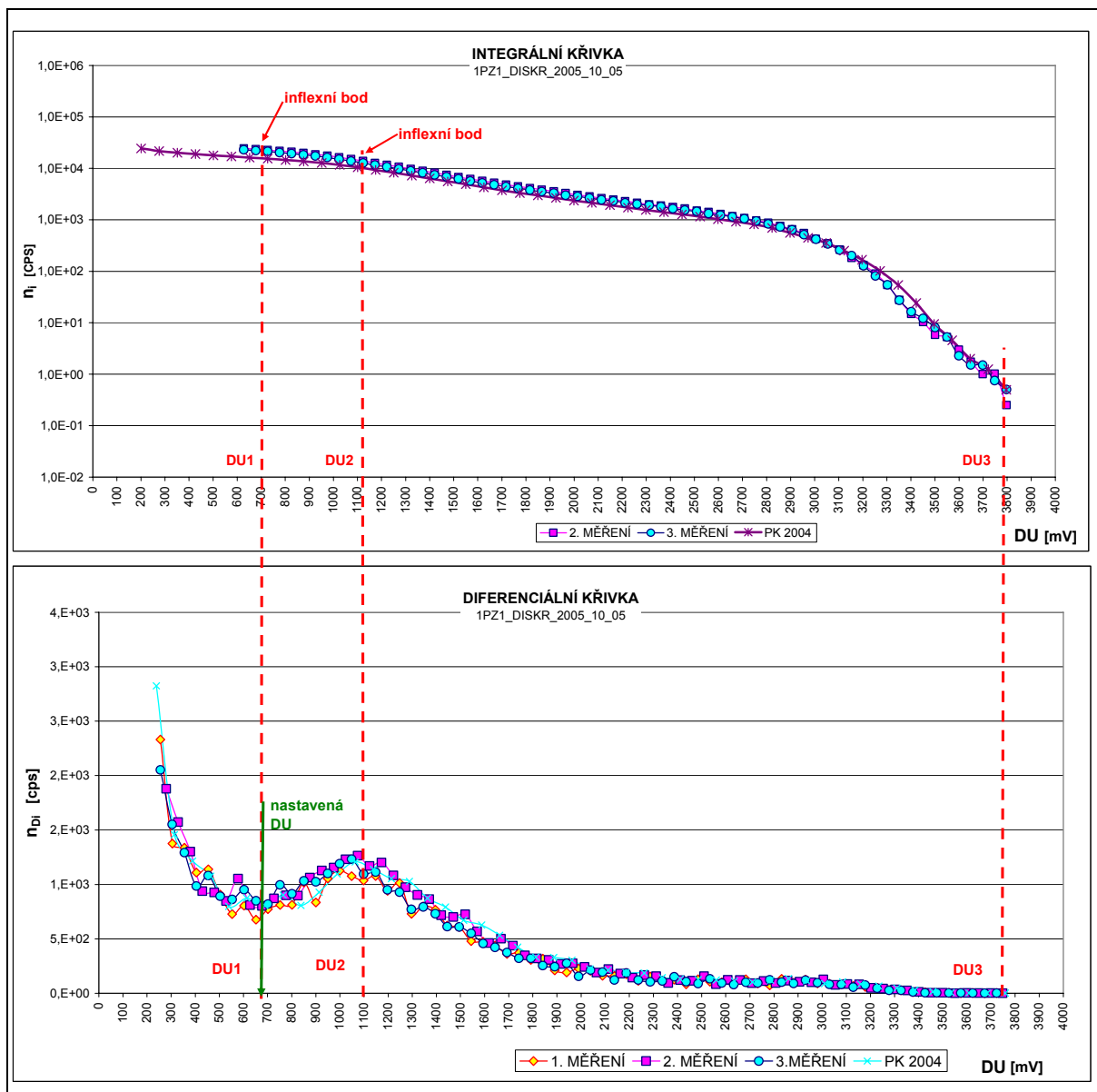
List „1DPS-VYHOD.“ – do tohoto listu se importují data odečtená ze systému DPS. Tyto data se automaticky přenesou do grafu. My pak vhodnou volbou nové hodnoty mrtvé doby a backgroundu a se snažíme, aby oblast splicingu byla co nejhladší a nejrovnější.

7. POUŽITÁ LITERATURA

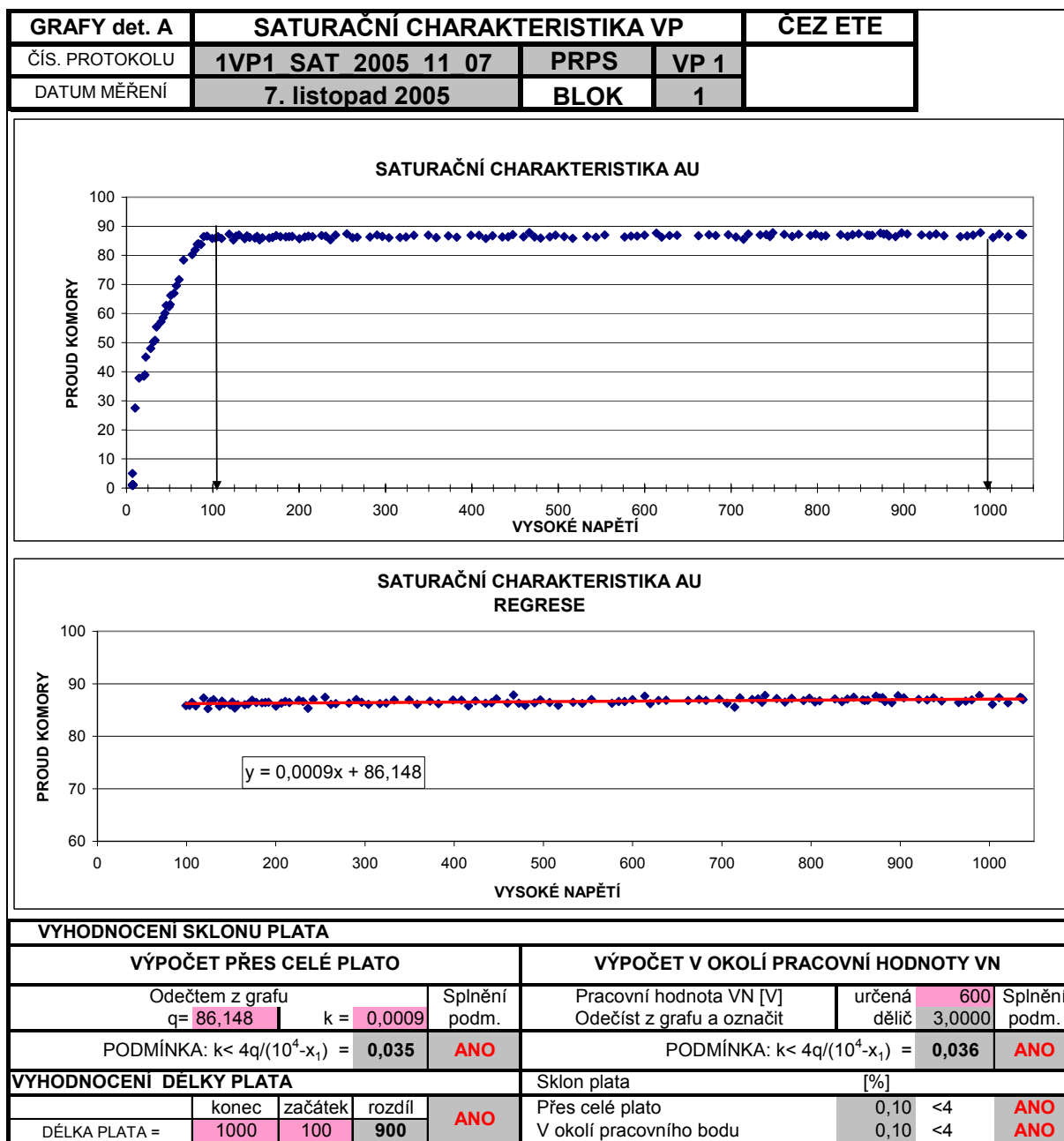
- 7.1. ZÁKON č. 18/1997 Sb. ze dne 24. ledna 1997 o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů ve znění pozdějších předpisů, www.sujb.cz.
- 7.2. Glenn F.Knoll – Radiation detection and measurement. (second edition), ISBN0-471-81504-7, USA (1989).
- 7.3. Technický manuál PRPS TEM-I&C-PRPS-594.
- 7.4. Prof. Ing. František Klik, CSc., Ing. Jaroslav Daliba - Jaderná energetika, ISBN 80-01-02550-0, vydavatelství ČVUT (2002).
- 7.5. L.Drška, B.Klimeš, J.B. Slavík – Základy atomové fyziky, nakladatelství československé akademie věd, Praha 1958.
- 7.6. S. Glasstone, M. C. Edlund – Základy teorie jaderných reaktorů, státní nakladatelství technické literatury, Praha 1958.

8. PŘÍLOHY

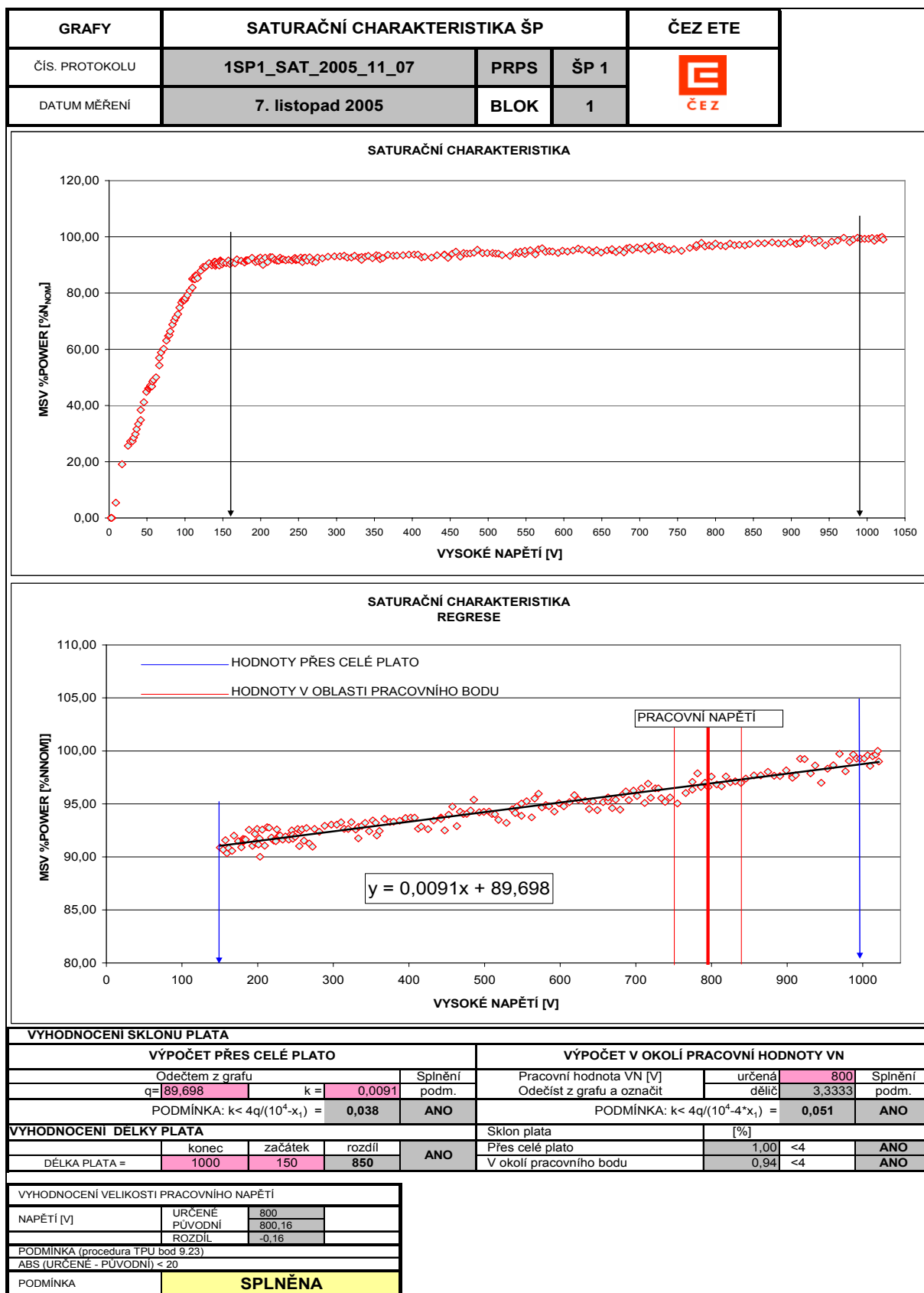
obr.8-1 Integrální a diferenciální křivka



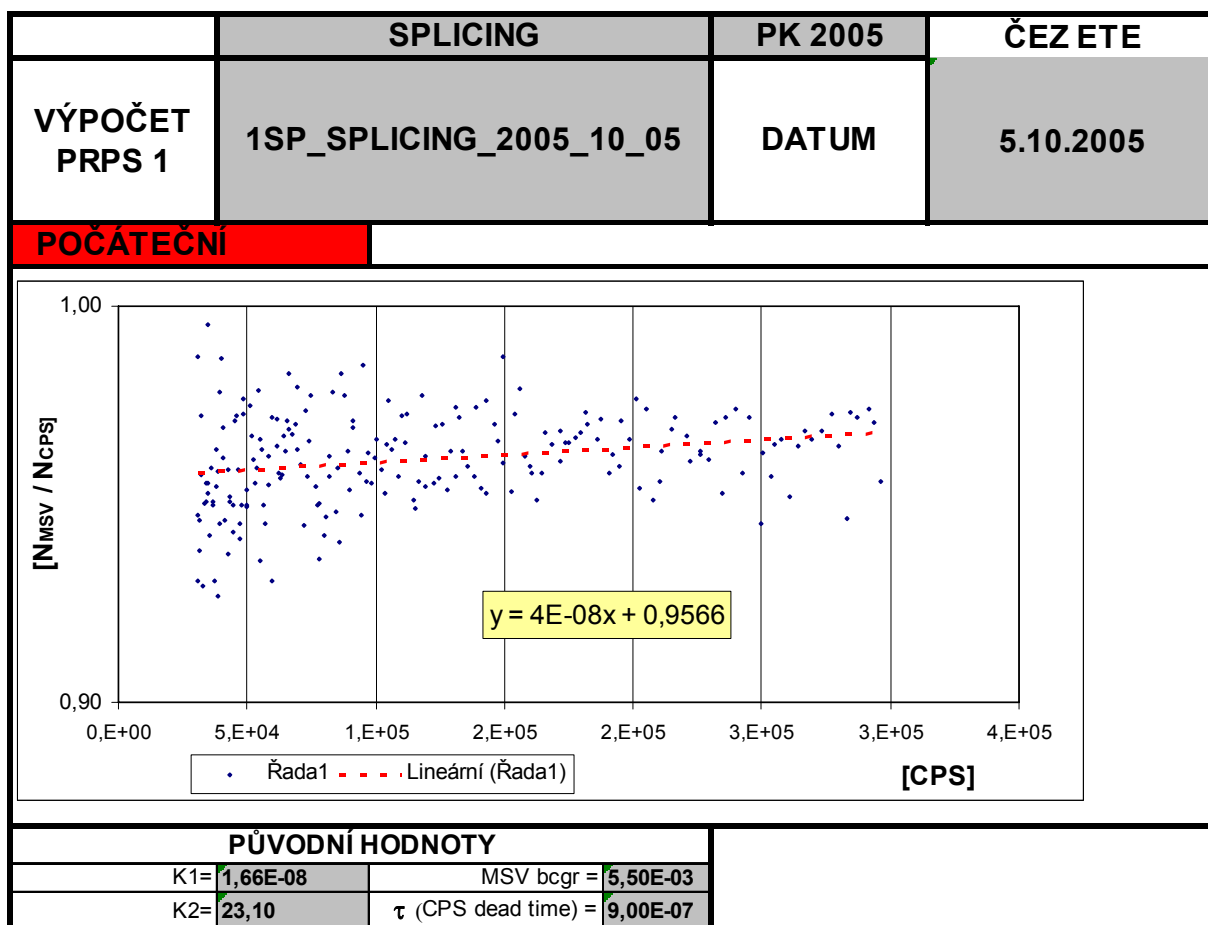
obr.8-2 Saturační charakteristika výkonového pásma ze dne 7.11.2005



obr.8-3 Saturační charakteristika širokého pásma ze dne 7.11.2005



obr. 8-4 Splicing s původními konstantami



obr. 8-5 Splicing s nově určenými konstantami

