

Příloha V
Nastavení detekčních systémů

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 2 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

Obsah

ZKRATKY A SYMBOLY	3
1. Úvod.....	4
2. Základní vlastnosti polovodičových detektorů.....	4
2.1 HPGe detektor	4
2.1.1 Energetická kalibrace	6
2.1.2 Účinnostní kalibrace HPGe detektoru	8
2.2 CdZnTe detektor.....	10
2.2.1 Energetická kalibrace	11
2.2.2 Účinnostní kalibrace CdZnTe detektoru	13
3. Základní vlastnosti scintilačních detektorů	14
3.1 Scintilační detektor LaBr(Ce).....	14
3.1.1 Energetická kalibrace	15
3.1.2 Účinnostní kalibrace scintilačního detektoru LaBr	16
4. Reuter Stokes.....	16
5. Bezdrátové sondy dávkových příkonů	17
6. Softwarové vybavení	18
Literatura.....	21

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 3 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

ZKRATKY A SYMBOLY

CdZnTe – polovodičový detektor

ČMI – Český metrologický institut

FWHM – pološířka píku

GENIE2000 – spektrometrická software

HPGe – High Purity Germanium detector

IZ – ionizující záření

LaBr – scintilační detektor

LYNX – analyzátor

MFF UK – Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy

NaI(Tl) – scintilační detektor

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 4 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

1. Úvod

V oblasti detekčních systémů existuje celá řada principů a provedení pro měření v polích záření gama. Zástupci těch nejčastěji používaných detekčních systémů vč. krátkého popisu jejich principu je uveden v následujících kapitolách

2. Základní vlastnosti polovodičových detektorů

Historie polovodičových detektorů sahá do padesátých let minulého století, kdy začaly první testy polovodičových materiálů. Poměrně rychle se polovodičové detektory dostaly do popředí spektrometrických měření. Na rozdíl od scintilačních detektorů popsanych níže mají polovodičové detektory výrazně lepší energetické rozlišení. To je dáno lepší statistikou náboje vytvořeného při interakci záření. U polovodičových detektorů [1] je zapotřebí na vytvoření elektron-děrového páru přibližně 3 – 5 eV, zatímco u scintilačních detektorů se tato hodnota pohybuje mezi 100eV až 1keV pro produkci jednoho fotoelektronu z fotokatody fotonásobiče. Z tohoto je patrné, že polovodičové detektory produkují výrazně více náboje nesoucího informaci o ionizaci a mají pozitivní vliv na statistickou fluktuaci v energetickém rozlišení, které je tak výrazně lepší. Energetické rozlišení je vyjádřeno jako šířka píku totální absorpce v polovině výšky píku. Šířka každé energetické linky (píku) není nikdy nulová, ale při optimálním nastavení má tvar Gaussovy křivky. Je to zapříčiněno tím, že elektron vzniklý z fotoefektu s danou energií nikdy nevytvoří stejný počet nosičů náboje (elektron-děrových párů) a také je zde patrný vliv elektroniky. Mezi testovanými polovodičovými detektory byl dusíkem chlazený polovodičový HPGe detektor a polovodičový CdZnTe detektor. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1 Základní vlastnosti HPGe a CdZnTe polovodičových detektorů [8,9]

Materiál	Ge (77 K)	CdZnTe
Protonové číslo	32	48, 30, 52
Zakázaný pás (eV)	0,74	1,57
Energie potřebná na tvorbu páru e-d (eV)	2,97	4,6
Fano faktor	0,08	0,09
μ_e (cm ² /Vs)	40,000	1000
μ_d (cm ² /Vs)	40,000	10
τ_e (s)	10 ⁻³	10 ⁻⁵
τ_d (s)	10 ⁻³	10 ⁻⁶

2.1 HPGe detektor

Pro měření v radiačním poli štěpných produktů byl vybrán polovodičový HPGe detektor od firmy Canberra s relativní účinností 35 %. Ta se standardně uvádí pro bodový zářič vzdálený od čela detektoru ve vzdálenosti 25 cm, speciálně pro ⁶⁰Co a jeho jednu linku s energií 1132,5 keV podle vztahu [2]:

$$R_{eff} \sim \frac{100 \cdot P}{1.2 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot A} \quad (6.1)$$

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 5 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

kde: **P** je čistá plocha píku pro energii 1332,5 keV

t je čas měření v sekundách

A je aktivita radionuklidu ^{60}Co k datu měření

$1,2 \cdot 10^{-3}$ je převodní koeficient (vzhledem k referenčnímu detektoru NaI(Tl) 3 x 3 palce)

Objem krystalu je $165,1 \text{ cm}^3$, kde průměr krystalu je 61 mm a výška 56,5 mm. Protože se jednalo o nově zakoupený detektor, bylo nutné provést nastavení analyzátoru Lynx [3], vč. energetických a účinnostních kalibrací. Cílem bylo najít co neoptimálnější parametry z hlediska rozlišení, které je v případě tak složitého pole jako je pole štěpných produktů s velkým množstvím píku zcela zásadní. Hodnoty rozlišení germaniových detektorů se pro ^{60}Co (konkrétně energie 1332,5 keV) pohybuje v rozmezí 1,8-2,7 keV v závislosti na velikosti krystalu. Pod samotným germaniovým krystalem bývá umístěn předzesilovač nutný pro tvarování a vytváření výstupního signálu. Pro eliminaci pohybu elektronů při pokojových teplotách a následně vznikajícího šumu je nutno germaniové detektory chladit na co nejnižší teplotu - používá se kapalný dusík o teplotě $-196 \text{ }^\circ\text{C}$. Spektrometrická trasa byla nastavena na rozsah energií detekovaných fotonů od 0 – 3000 keV. Optimální se jevílo nastavit tento energetický rozsah pro 8192 kanálů. Přehled základních parametrů použitých při měřeních je uveden v Tab. 2. Nastavování parametrů, nabírání spekter a kalibrace byly prováděny v spektrometrickém programu GENIE 2000.



Obr. 1 HPGe detektor Canberra

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 6 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

Tab. 2 Vybrané parametry analyzátoru LYNX

Vysoké napětí	+3500 V
Hrubé zesílení	2,38
Jemné zesílení	0,95876
Polarita signálu	+
Tvarovací konstanta	5,6 uS
Flat Top Time	0.8
Typ předzesilovače	RC

2.1.1 Energetická kalibrace

Aby bylo možné jednotlivým energetickým linkám zobrazených v nabraném spektru detektorem přiřadit konkrétní radionuklidy (kvalitativní analýza) je nutné provést energetickou kalibraci. Ta byla provedena v prostředí programu GENIE2000 [4] pomocí několika bodových zdrojů záření pokrývajících co největší rozsah energií. Tvar energetické kalibrace v programu GENIE2000 je dán vztahem:

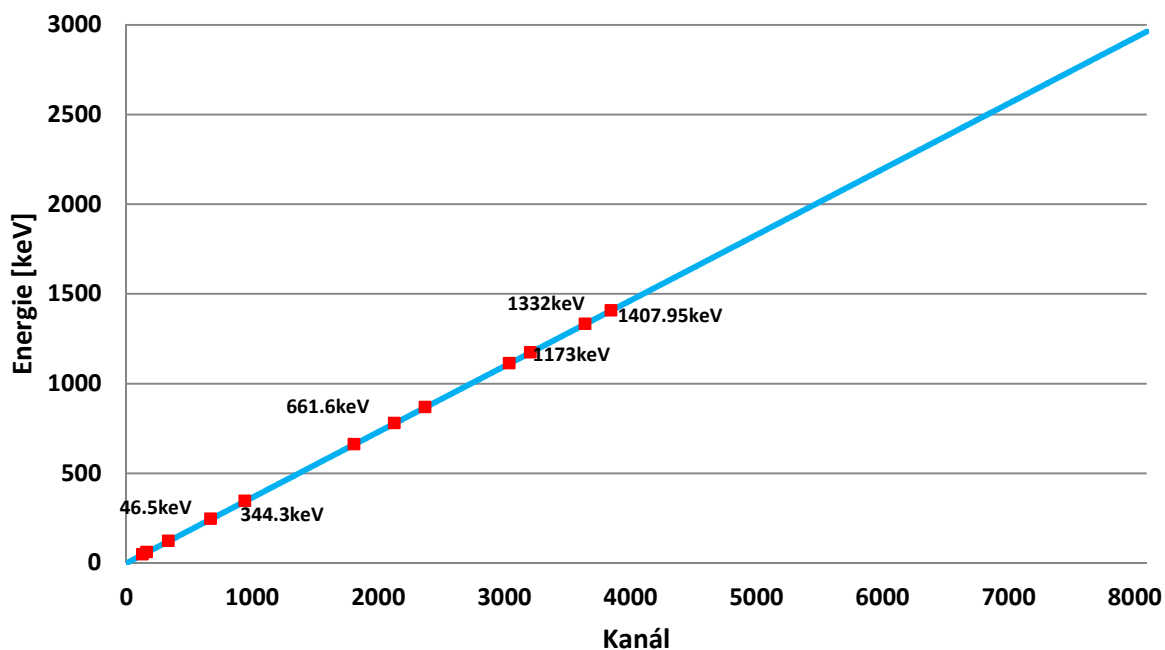
$$E = C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 \quad (4.2)$$

kde „E“ je energie v keV a „x“ je číslo kanálu. GENIE 2000 provádí automatický výpočet pouze prvních dvou koeficientů C_0 a C_1 . Standardně se využívá lineární závislost a tvar přímky ve tvaru $E = C_0 + C_1x$. Rozlišení FWHM je dáno vztahem:

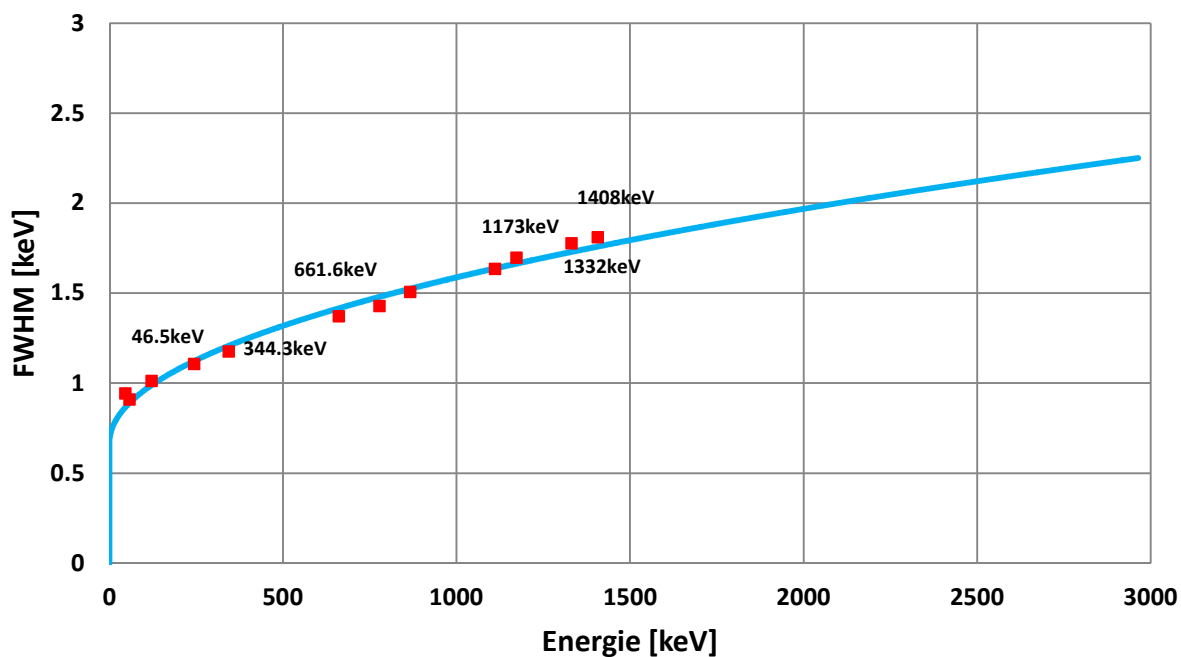
$$FWHM = \frac{F_0 + F_1\sqrt{E}}{C_1} \quad (4.3)$$

Kalibrační sada obsahovala ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{210}Pb a ^{241}Am . Energetická kalibrace a závislost pološířky jsou postupně na Obr. 2 a na Obr. 3. S nastavenými parametry bylo dosaženo rozlišení FWHM=1,37 keV pro pík ^{137}Cs (661,66 keV) a FWHM=1,78 keV pro pík ^{60}Co (1332,5 keV).

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 7 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015



Obr. 2 Energetické kalibrace HPGe detektoru



Obr. 3 Závislost pološířky FWHM na energii pro HPGe detektor

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 8 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

2.1.2 Účinnostní kalibrace HPGe detektoru

Pro kvalitativní analýzu je nezbytné provést účinnostní kalibraci detektoru pro geometrie vzorků, z nichž chceme na základě analýzy zjistit informace o aktivitách radionuklidů. Účinnost detektoru pro daný pík je podle [4] definována vztahem:

$$\varepsilon(E) = \frac{S}{A \cdot t \cdot Y \cdot K_w \cdot U_f} \quad (4.4)$$

kde: $\varepsilon(E)$ je účinnost pro energii E [12]

S je čistá plocha píku (po odečtu pozadí)

A je aktivita kalibračního zdroje

t je čas měření (Live Time)

Y je výtěžek (zastoupení energie E na jeden rozpad)

U_f je konverzní konstanta pro případ zadání aktivity A v jiných jednotkách než Bq

K_w je korekce na přeměnu během doby mezi referenčním datem a datem měření podle

Vztahu [12]:

$$K_w = e^{-\frac{\ln(2)t_w}{T_{1/2}}} \quad (4.5)$$

Pro vytvoření účinnostní kalibrace je nutné použít několik etalonů radionuklidů o známém složení a aktivitě. Podle výše zmíněného vzorce 4.4 se pro jednotlivé energetické linky použitých radionuklidů spočítá účinnost, vč. případných korekcí na hustotu nebo korekcí na koincidence. Takto získané hodnoty se vyplní do aplikace programu GENIE2000, který spočte koeficienty rovnice 4.6 určující účinnostní křivku pro celý energetický interval [4].

$$\ln(\varepsilon) = \sum_{i=0}^n b_i (\ln(E))^i \quad (4.6)$$

kde: **b_i** jsou koeficienty stanovené výpočtem

E je energie fotopíku

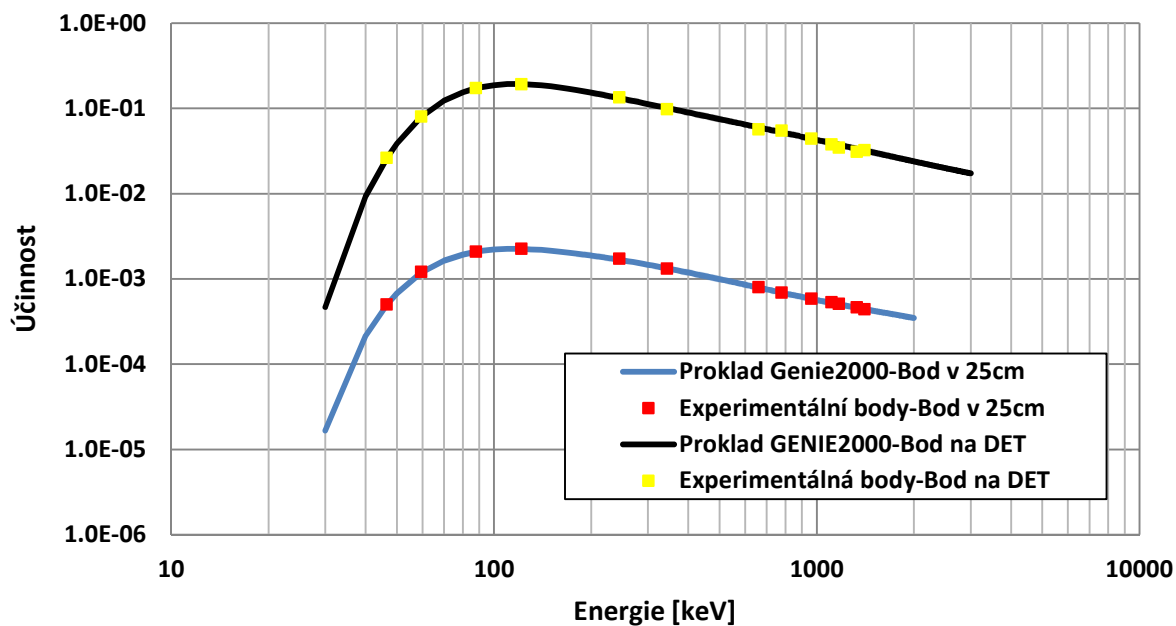
ε je účinnost ve fotopíku o energii E

Účinnostní kalibrace detektoru byla provedena pro bodový zdroj na čele detektoru a v 25 cm nad čelem detektoru. Koeficienty prokladů účinnostní křivky jsou uvedeny v Tab. 3 a účinnostní křivky detektoru pro obě geometrie na Obr. 4.

Tab. 3 Koeficienty prokladu účinnostní kalibrace pro HPGe detektor

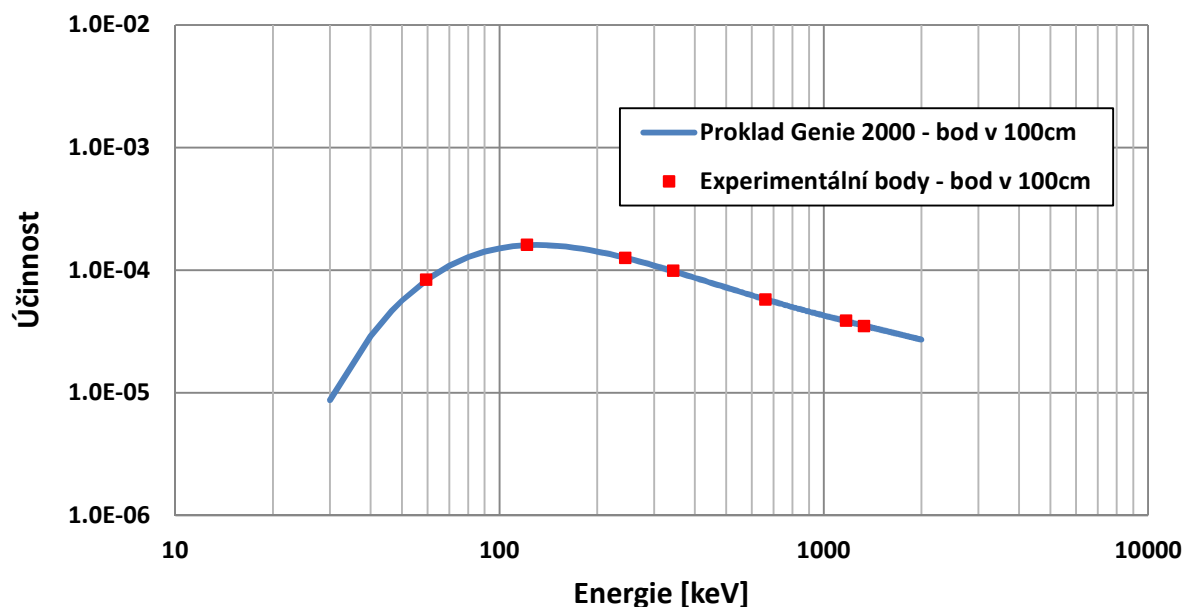
bod v 25cm nad detektorem		bod na detektoru	
koef_G2k(0)	= -706,137878	koef_G2k(0)	= -557,711365
koef_G2k(1)	= 688,299255	koef_G2k(1)	= 501,484955
koef_G2k(2)	= -281,727	koef_G2k(2)	= -186,735947
koef_G2k(3)	= 61,46361	koef_G2k(3)	= 36,825649
koef_G2k(4)	= -7,5334167	koef_G2k(4)	= -4,061597
koef_G2k(5)	= 0,49111563	koef_G2k(5)	= 0,237473
koef_G2k(6)	= -0,01328824	koef_G2k(6)	= -0,005749

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 9 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015



Obr. 4 Závislost účinnosti na energii HPGe detektoru

HPGe detektor byl také ověřen ČMI bodovým zdrojem typu EG-X s radionuklidy ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs a ^{60}Co ve vzdálenosti 100 cm od čela detektoru. Největší relativní odchylka byla u ^{137}Cs a to 3,4 % vzhledem k etalonovým hodnotám.

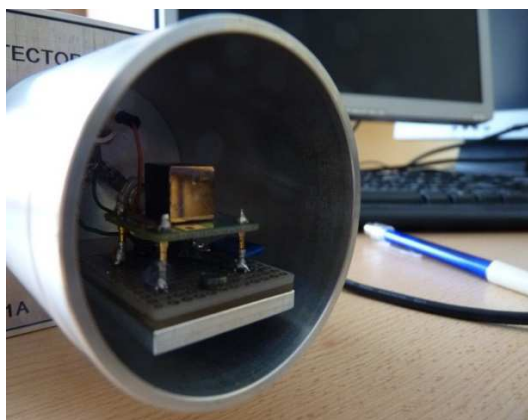


Obr. 5 Závislost účinnosti na energii HPGe detektoru

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 10 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

2.2 CdZnTe detektor

Zařízení pro detekci a spektrometrii ionizujícího záření procházejí neustálým vývojem a zdokonalováním. Mezi méně rozšířené, ale rozšiřující se materiály pro různé aplikace patří polovodičové materiály kadmium zinek telurid (CdZnTe neboli CZT). Vzhledem k vysokému protonovému číslu mají CdZnTe detektory dobrou absorpční účinnost pro záření gama. Šířka zakázaného pásma činí 1,57 eV, což je výhodné zejména z hlediska možnosti použití detektorů za pokojových teplot bez nutnosti chlazení. Zatím jsou tyto detektory dostupné jen o velikostech několika cm^3 a přetrvává zde problém s tzv. Low Tailingem, způsobeným pomalejším sběrem děr v materiálu a s polarizací [5,6]. V rámci projektu MONTE byl zakoupen inovovaný polovodičový CdZnTe detektor s koplanární elektrodou pro rentgenové a gama záření s možností potenciálního využití při měření ve složitých spektrech gama při havarijních situacích. Detektor se skládá z modulu detektoru a modulu zesilovače, který lze připojit k standartnímu zesilovači a mnohokanálovému analyzátoru (v tomto případě MCA527). Modul zesilovače obsahuje dva nízkosumové předzesilovače a zesilovač v sumačním nebo diferenciálním zapojení s možností invertování výstupu. Zařízení je zkonstruováno pro měřicí rozsah energií od 0 – 2000 keV vzhledem k jeho rozměrům krystalu 1cm^3 . Jelikož se jedná o experimentální zařízení, bylo nalezení optimálních parametrů složitější než v případě komerčně dodávaného HPGe detektoru a analyzátoru LYNX.



Obr. 6 Modul CdZnTe detektoru



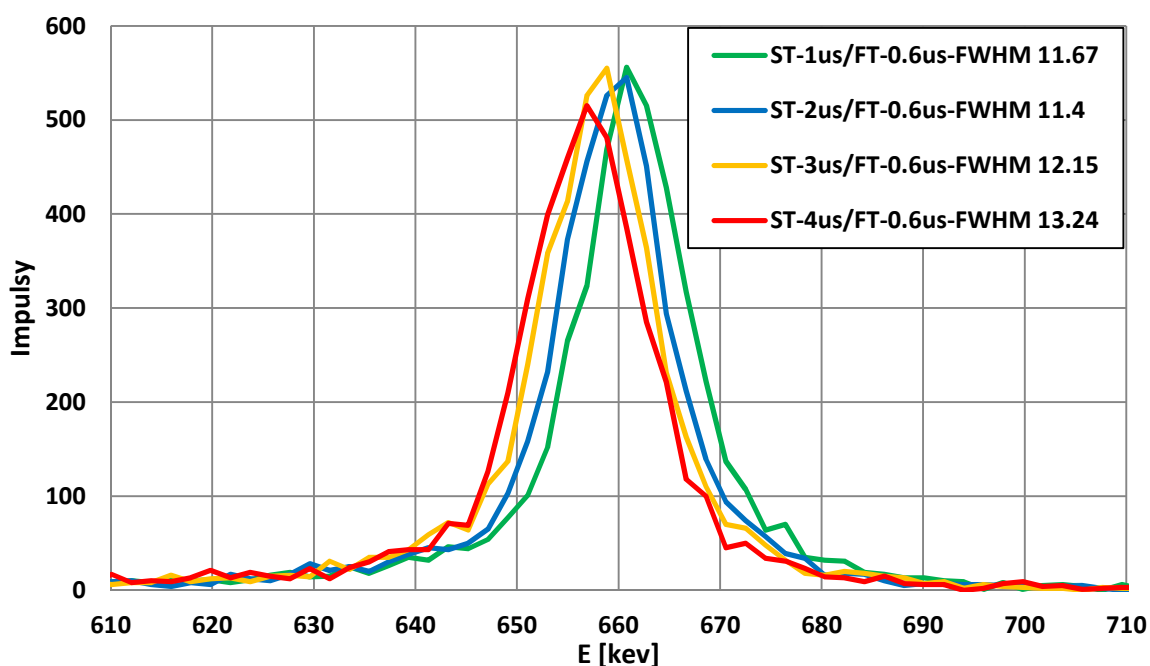
Obr. 7 Modul zesilovače

Vzhledem k objemu CdZnTe krystalu 1cm^3 s rozměry $1 \times 1 \times 1 \text{ cm}$ je vhodný pro měření do 2000keV, u vyšších energií je detektor velmi málo citlivý. Pro optimální sběr vzniklých nábojů po interakci se zářením gama je nutné nastavit hodnotu mezimřížkového napětí na +100V a mezimřížkového zesílení na hodnotu 4. Parametry nalezené pro získání optimálního rozlišení píků v celém energetickém rozsahu jsou uvedeny v Tab. 4. Pro nastavení analyzátorů a nabírání spekter byl použit volně dostupný program WinSpec dodávaný k analyzátoru MCA527 [7]. Účinnostní a energetické kalibrace byly následně po úpravě spekter prováděny v programu GENIE2000. Počet kanálů byl nastaven na 1024. Pro parametry nastavené podle Tab. 5 bylo dosaženo FWHM u ^{137}Cs (661,66 keV) hodnoty 11,4 keV. Ukázka symetričnosti tvaru píku a hodnot FWHM pro různé hodnoty tvarovací konstanty jsou na Obr. 8. Odezvové kalibrační spektrum na sadu zářičů pro nalezení optimálních parametrů je na Obr. 9.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 11 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

Tab. 4 Vybrané parametry analyzátoru MCA527

Vysoké napětí	-1500 V
Hrubé zesílení	10
Jemné zesílení	0,8885
Polarita signálu	+
Tvarovací konstanta	2 μ S
Flat Top Time	0,6 μ S
Typ předzesilovače	RC

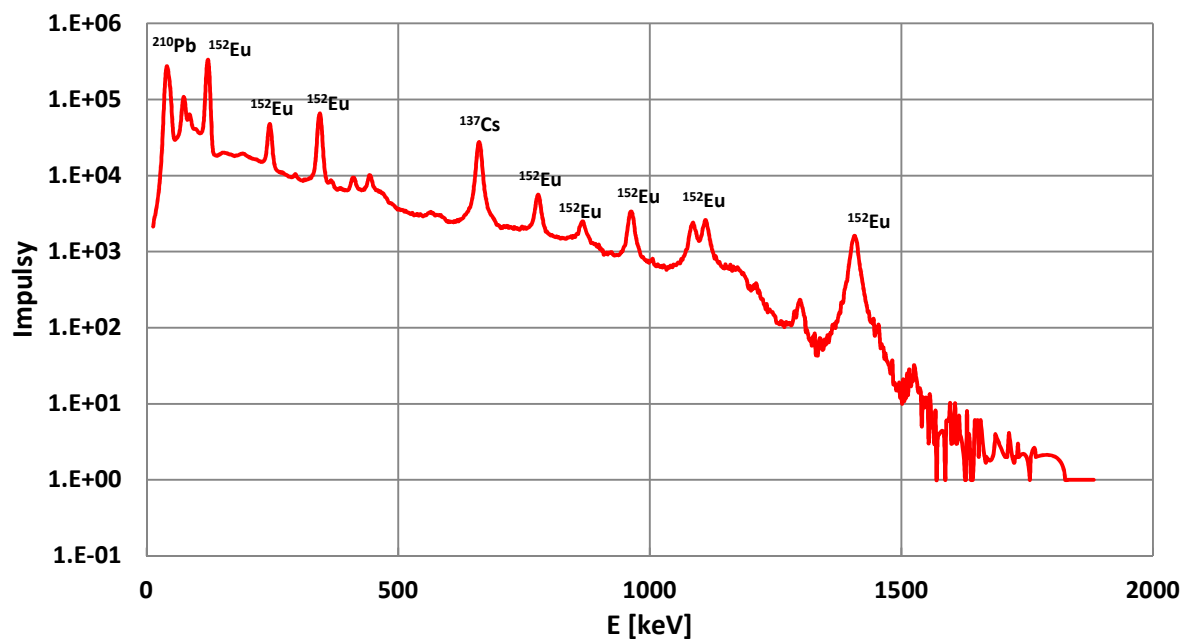


Obr. 8 Tvary píku ^{137}Cs pro různé časové konstanty naměřené CdZnTe detektorem

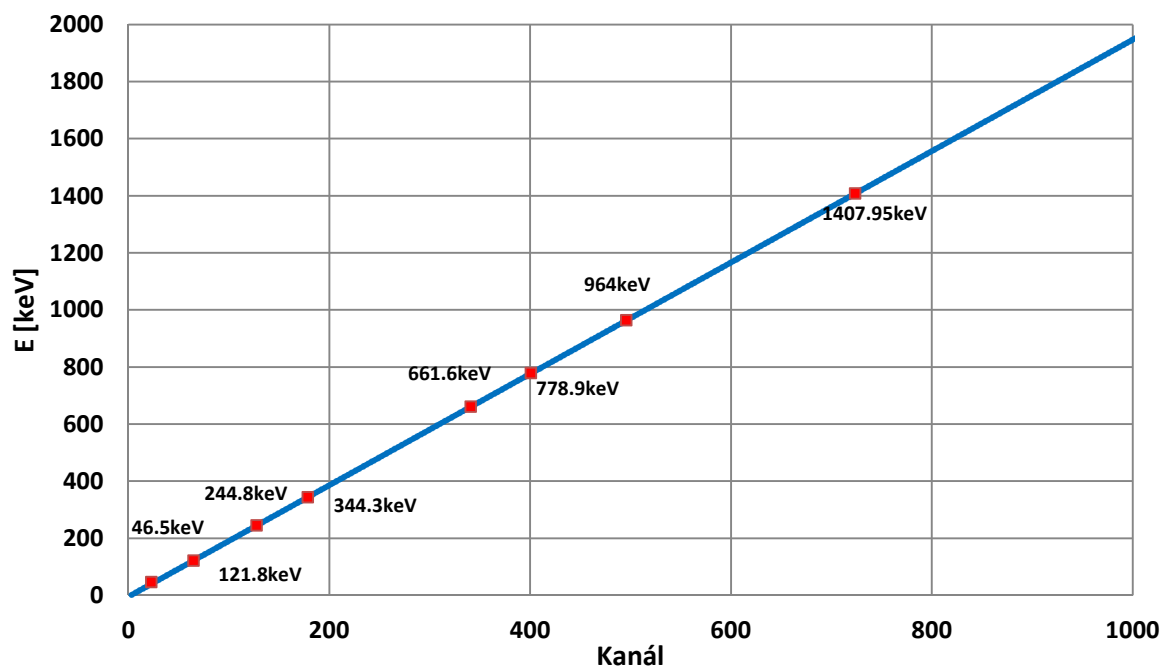
2.2.1 Energetická kalibrace

Pro energetickou kalibraci byly použity etalony typu EG3 - ^{210}Pb , ^{152}Eu a ^{137}Cs , kdy spektrum bylo nabíráno po dobu 3600 s. Pro vytvoření energetické kalibrace byl stejně jako v předchozím případě použit spektrometrický systém GENIE2000.

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 12 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

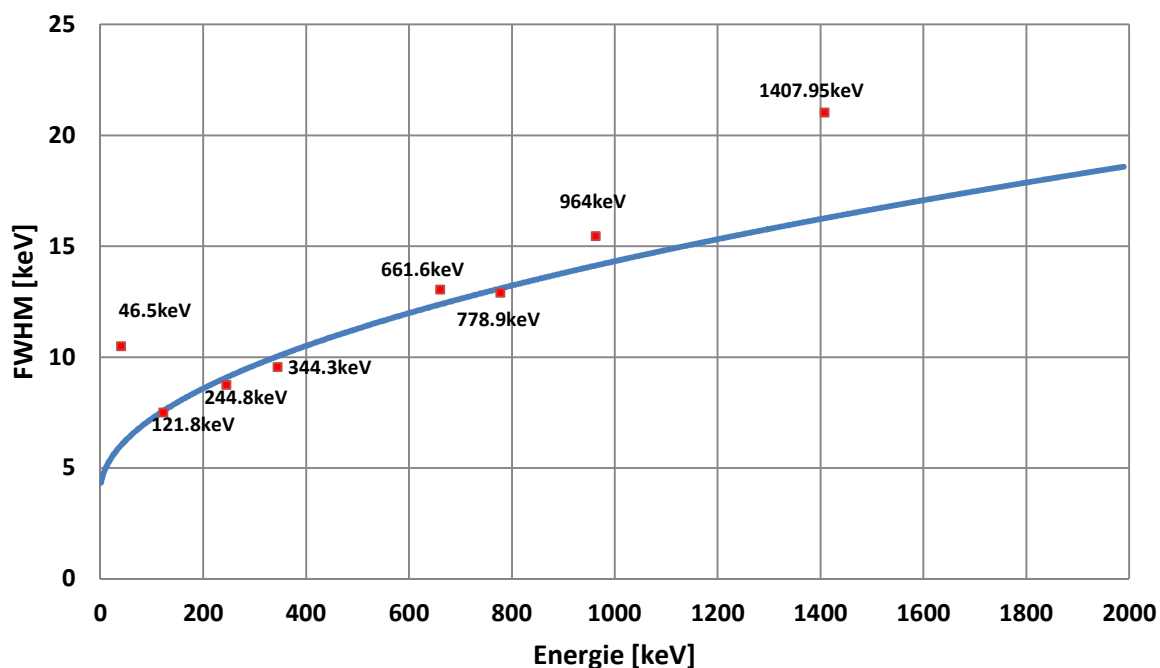


Obr. 9 Kalibrační spektrum pro energetickou kalibraci CdZnTe detektoru



Obr. 10 Energetická kalibrace CdZnTe detektoru

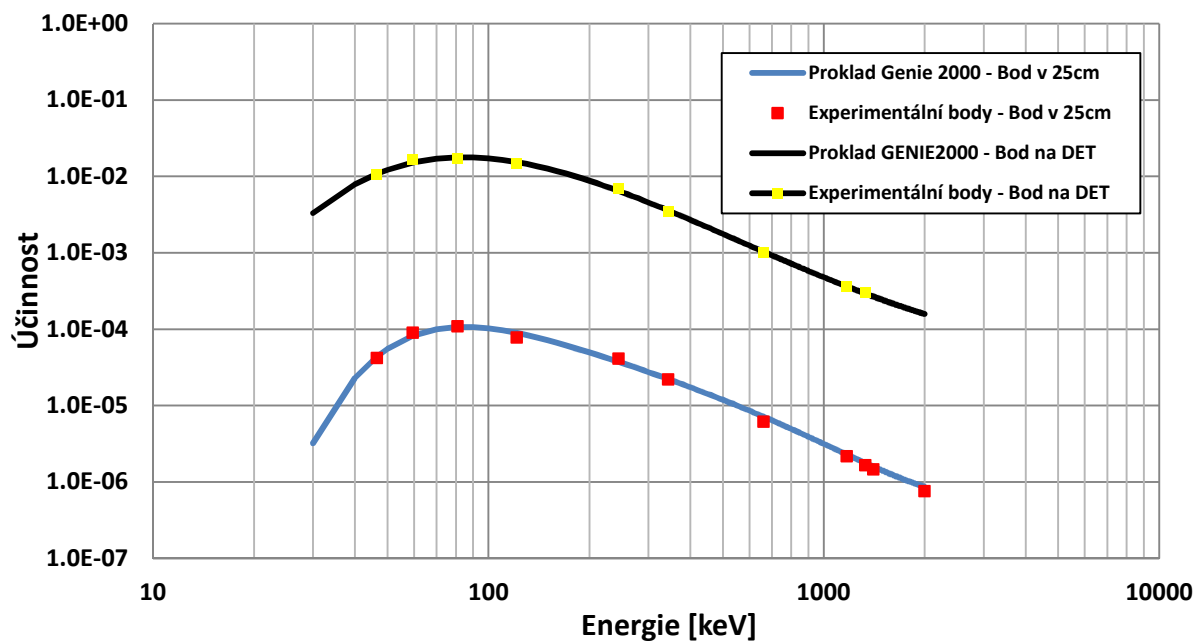
Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 13 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015



Obr. 11 Závislost pološířky FWHM na energii CdZnTe detektoru

2.2.2 Účinnostní kalibrace CdZnTe detektoru

Pro potřeby testování CdZnTe detektoru v případě havarijních situací byly opět provedeny dvě základní kalibrace pro bod na víčku a pro bod ve vzdálenosti 25 cm od víčka.

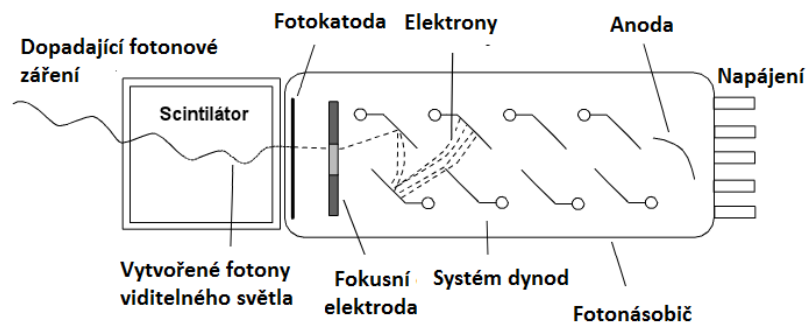


Obr. 12 Závislost účinnosti na energii CdZnTe detektoru

Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 14 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

3. Základní vlastnosti scintilačních detektorů

Scintilační detektory využívají vlastností některých látek schopných generovat světelné záblesky (krystal jodidu sodného aktivovaný lithiem-NaI(Tl), krystal bromidu lanthanového aktivovaného Cérem) [8]. Využívá se toho, že při průchodu záření gama krystalem dochází v důsledku fotoefektu, Comptonova rozptylu nebo tvorby elektron-pozitronového páru k emisi elektronů (popř. pozitronů) nesoucí určitou kinetickou energii. Tyto sekundárně vzniklé elektrony excitují podél své dráhy v scintilátoru elektrony z valenčního do vodivostního (excitace), kde po krátké době za současného vyzáření fotonu přejdou zpět do valenčního pásu (deexcitace). Vyzáření fotonů se v scintilátoru projeví jako záblesk, jehož intenzita je úměrná energii elektronů kterou excitaci způsobil. Energie těchto fotonů je rovna šířce zakázaného pásu mezi valenčním a excitačním pásem, jež spadá do oblasti vlnových délek kratších než viditelné světlo. Jsou-li však do scintilačních krystalů implementovány stopové příměsi (tzv. aktivátory) jež vytvoří další dovolené energetické hladiny, přes které může deexcitace probíhat, jsou již vlnové délky fotonů v oblasti viditelného světla a lze je snadno detekovat fotonásobičem. Při dopadu fotonu na fotokatodu vzniká prostřednictvím fotoefektu elektron, jež je urychlen a nasměrován na první ze soustavy dynod. Z této dynody jsou vyraženy a urychleny další elektrony směrem k druhé dynodě. Tímto postupem získáme na konci soustavy dynod silný svazek elektronů dopadajících na anodu. Na výstupu fotonásobiče jsou pak pulzy, jejichž velikost odpovídá intenzitě záblesku.



Obr. 13 Schéma scintilačního detektoru [16]

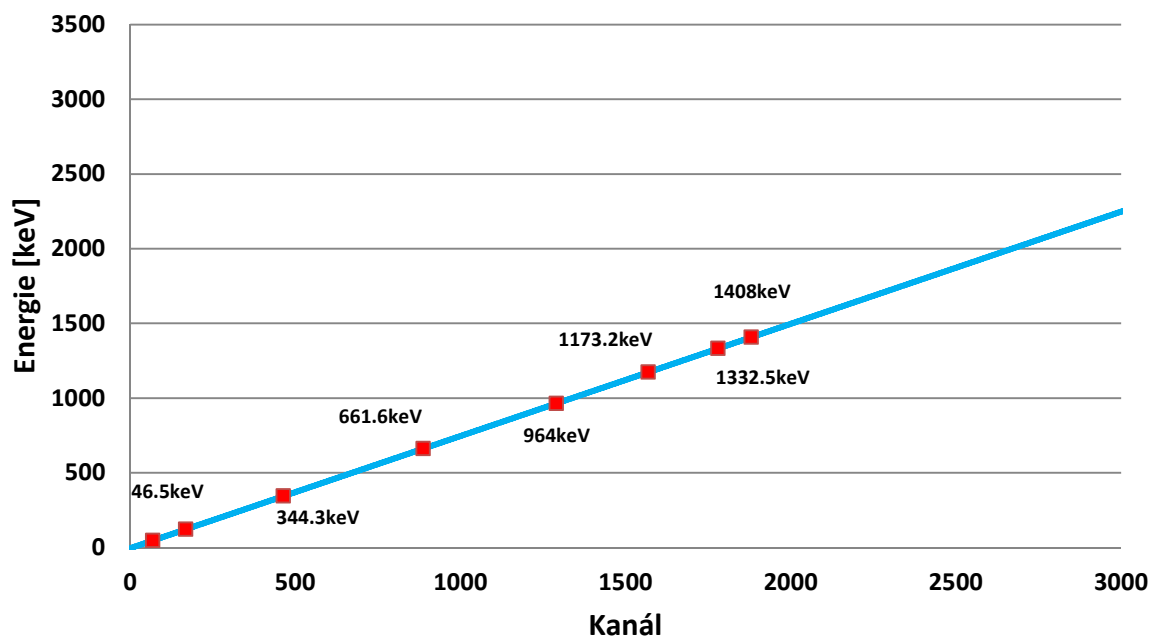
3.1 Scintilační detektor LaBr(Ce)

Pro detekci ionizujícího záření se používá krystal bromidu lanthanitého aktivovaný cérem. Pro použitý typ scintilačního detektoru během měření v poli štěpných produktů výrobce udává rozlišení pro energii 662keV nižší než 3 %. Rozlišení detektoru výrazně nezávisí na velikosti krystalu a přibližně klesá s druhou mocninou energie [9]. Výhodou tohoto typu detektoru je vysoký světelný výstup dosahující přibližně 60 000 fotonů/ MeV s dobou dosvitu 16ns a rychlou odezvou. Detektor není nutné chladit jako v případě germaniových detektorů a jsou tedy schopné pracovat při pokojových teplotách. Oproti germaniovému a CdZnTe detektoru má horší rozlišení.

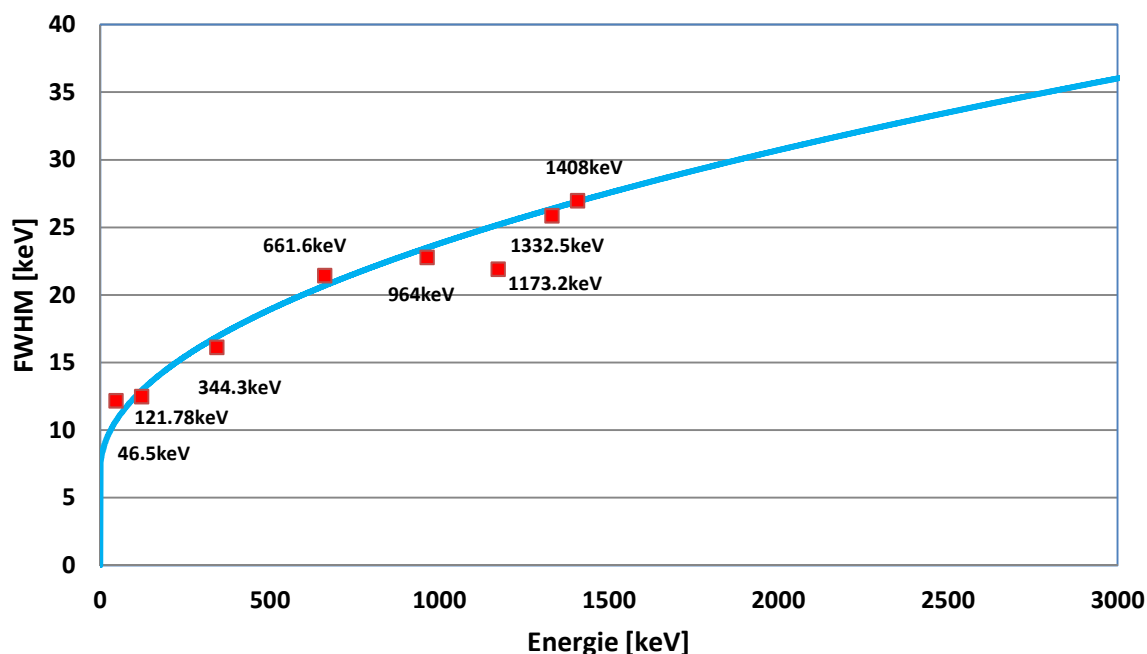
Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 15 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

3.1.1 Energetická kalibrace

Pro energetickou kalibraci byly použity etalony typu EG3 - ^{210}Pb , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}Eu , kdy spektrum bylo nabíráno po dobu 500s programem Maestro [10]. Pro vytvoření energetické kalibrace byl stejně jako v předchozím případě použit spektrometrický systém GENIE2000.



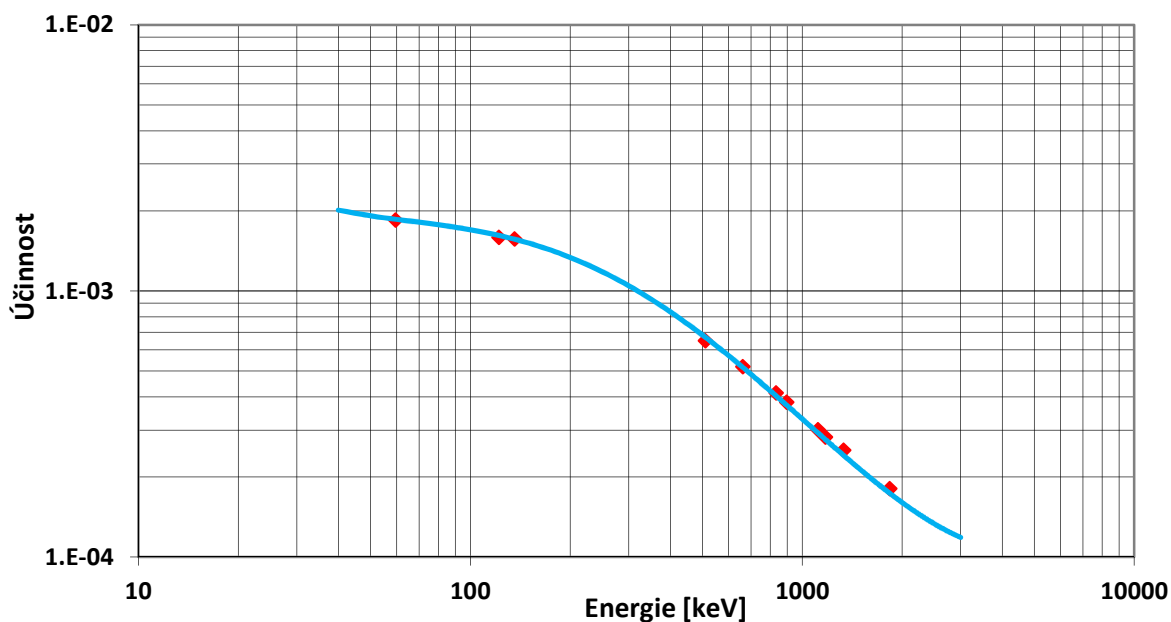
Obr. 14 Energetická kalibrace scintilačního detektoru LaBr



Obr. 15 Závislost FWHM na energii pro scintilační detektor LaBr

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 16 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

3.1.2 Účinnostní kalibrace scintilačního detektoru LaBr



Obr. 16 Účinnostní kalibrace scintilačního detektoru LaBr pro bodový zdroj v 25 cm [16]

4. Reuter Stokes

Reuter Stokes je považován za referenční standart pro měření dávkových příkonů. Typ RS-S131-200-ER0000 je schopný měřit rozsah dávkových příkonů od 0 až 1Sv/h. Detekční oblast je tvořena tlakovou ionizační komorou plněnou argonem, kde vniklé záření gama způsobuje ionizaci a generuje se proud. Napětí na povrchu ionizační komory dosahuje přibližně 400 V. Pro měření je nutné pouze stisknout tlačítko On/Off. Data jsou ukládána do paměti, z které je možné data překopírovat do počítače pomocí přiloženého ovládacího software. Přenos je možný jak pomocí USB kabelu, tak síťovým kabelem LAN. Detaily k tomuto zařízení lze nalézt v [11]

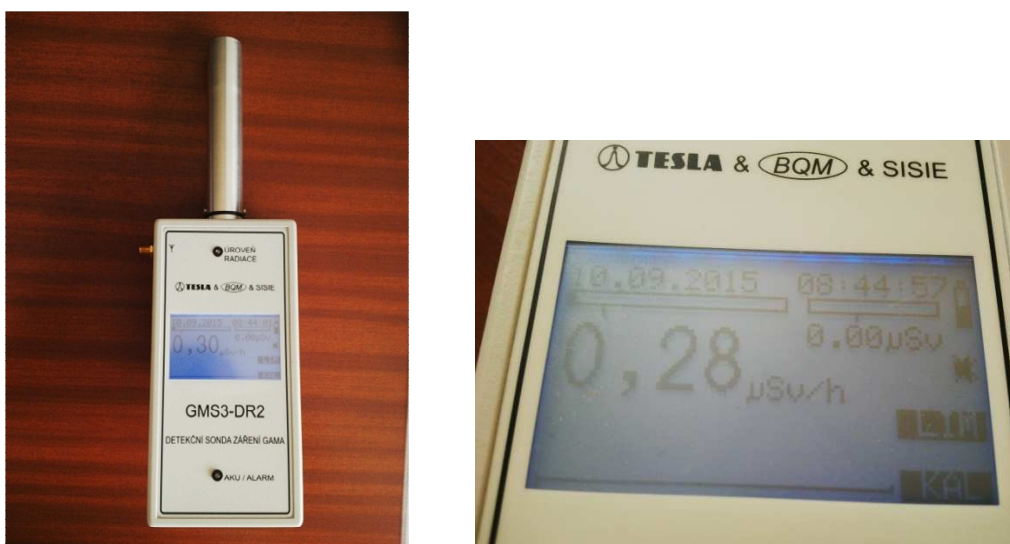


Obr. 17 Reuter-Stokes vč. horního krytu s konektory a spouštěcím tlačítkem

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 17 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

5. Bezdrátové sondy dávkových příkonů

Pro monitorování pole dávkových příkonů během měření bylo pořízeno 20 bezdrátových sond vč. vyhodnocovací jednotky sbírající data a umožňující jejich přenos do počítače. Sondy využívají pro detekci záření G-M trubici a jsou schopné měřit v rozsahu od 0 až 1 Sv/h. Sondy umožňují nastavení doby obnovování hodnot dávkových příkonů. Standardně je tato hodnota nastavena na 5s, tedy každých 5 sekund je zobrazena průměrná hodnota dávkového příkonu za předešlý nastavený časový interval - 5 s. Pro jejich ovládání je možné využít dotykového displeje přímo na sondě, nebo programu, který je k sondám dodán [12]. Hodnoty naměřené sondou jsou ukládány do textového souboru, což umožňuje jejich další zpracování. Data z textového souboru jsou načítány do ovládacího softwaru k zařízení MONTE-1, kde tak jednotliví uživatelé mají přehled o aktuálních hodnotách dávkových příkonů na konkrétních místech.



Obr. 18 Sonda dávkového příkonu vč. detailu zobrazovacího dotykového displeje

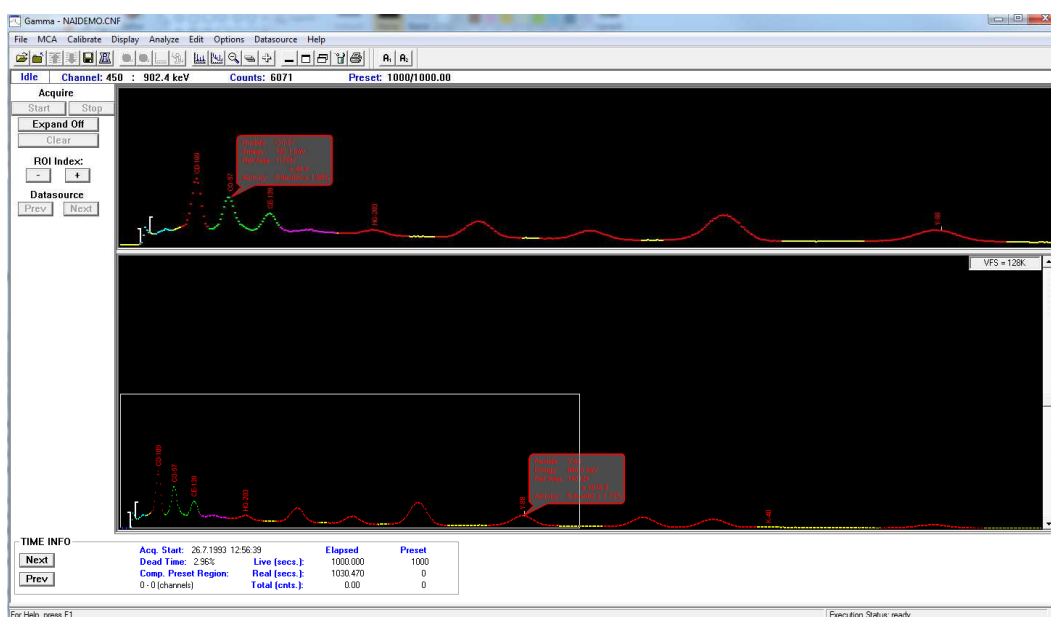


Obr. 19 Bezdrátový modul přenášející data ze sond do počítače

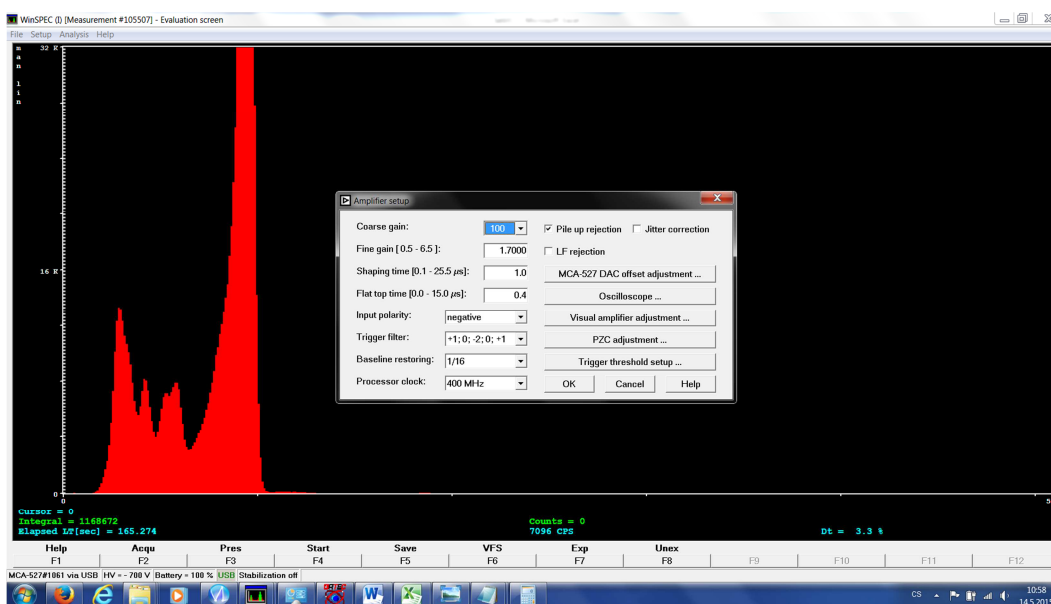
Státní ústav radiální ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 18 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

6. Softwarové vybavení

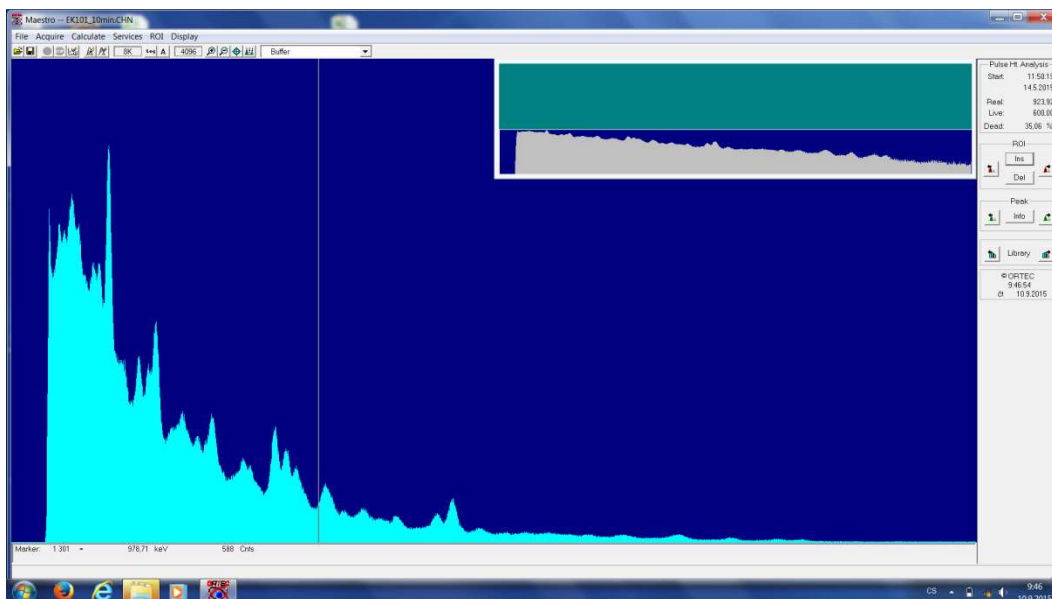
Vzhledem k široké škále použitých detekčních systémů od různých výrobců je nemožné použít jeden typ vyhodnocovacího softwaru. Proto je zde uveden seznam ovládacích programů, které byly použity při měření s výše uvedenými detekčními systémy.



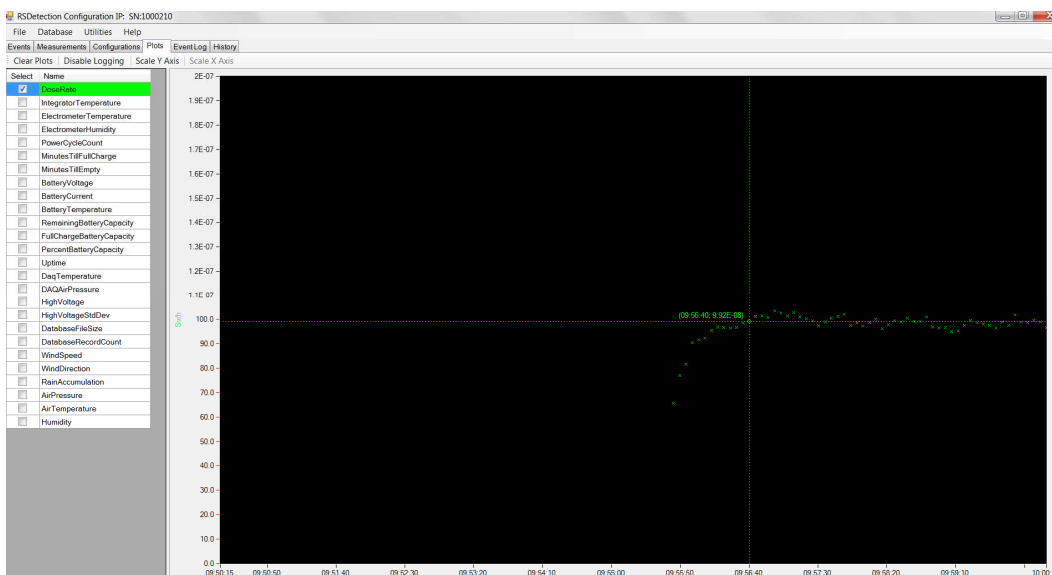
Obr. 20 HPGe polovodičový detektor – program GENIE2000



Obr. 21 CdZnTe polovodičový detektor – program Winspec

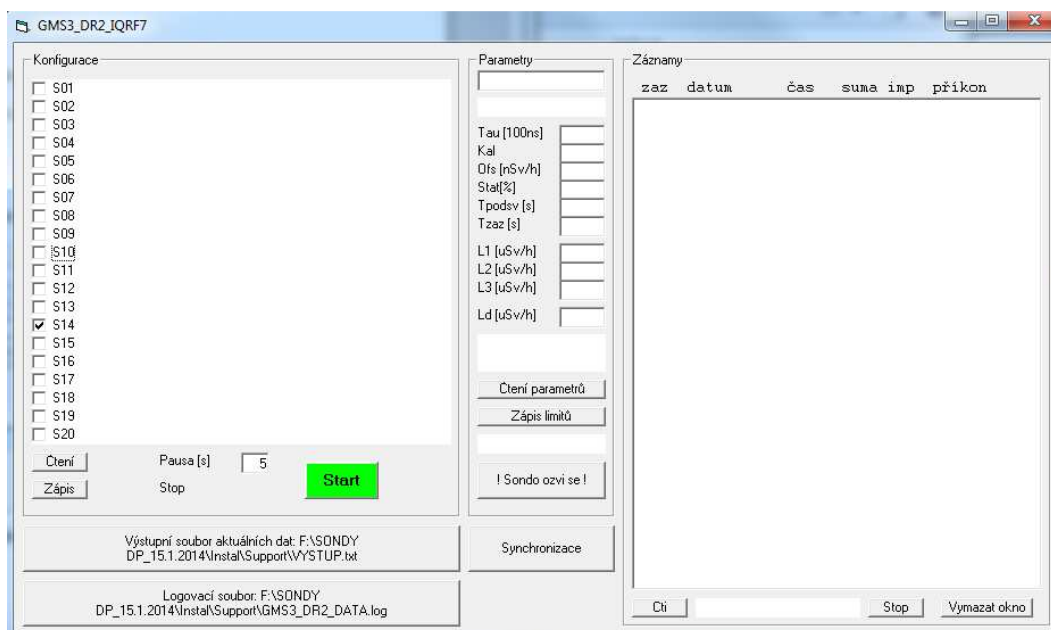


Obr. 22 LaBr scintilační detektor – program Maestro



Obr. 23 Reuter Stokes – program RDS Detection

Státní ústav radiční ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 20 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015



Obr. 24 Sondy dávkových příkonů – program GMS3_DR_IQRF7

U spektrometrických systémů (HPGe, CdZnTe, LaBr) byly energetické a účinnostní kalibrace provedeny v programu GENIE2000. Kalibrační spektra musely být z různých spektrometrických systémů převedeny na jednotný formát – textový soubor s příponou *.TKA. V tomto formátu jsou počty impulsů v jednotlivých kanálech uloženy následovně: první řádek odpovídá času Live Time, druhý řádek odpovídá času Real Time, třetí řádek až n-tý odpovídá počtu impulsů v jednotlivých kanálech (n=počet kanálu daného spektrometrického systému). U HPGe detektoru se doporučuje počet kanálů 8192, u CdZnTe detektoru 1024 a u scintilačního 4096. Pak lze spektra zpracovávat již ve formátech *.CNF., které software GENIE2000 automaticky vytváří po načtení souboru *.TKA.

Státní ústav radiační ochrany, v.v.i. Katedra jaderných reaktorů, FJFI ČVUT	Příloha V	List: 21 z 21
	Nastavení detekčních systémů	Datum účinnosti: 30.9.2015

Literatura

- [1] Gilmore, G. - Hemingway, J.: Practical Gamma Ray Spectrometry, John Wiley & Sons Ltd, 1995, ISBN 0-471-95150-1
- [2] Canberra Industries, Inc.: Germanium Detectors User's Manual, 2013
- [3] Canberra Industries, Inc.: Lynx™ Digital Signal Analyzer User's Manual, 2011
- [4] Canberra Industries, Inc.: Genie 2000™ Customization Tools Manual, Version 3.3, 2013
- [5] Knoll, G. F.: Radiation Detection and Measurements, John Wiley & Sons Ltd, 1989, ISBN 0-471-81504-7
- [6] Tsoulfanidis, N. - Landsberger, S.: Measurement and Detection of Radiation, Taylor & Francis, CRC Press, Boca Raton, 2010, ISBN 10 1420091859
- [7] GBS-Elektronik GmbH: MCA527 User's Manual, 2012
- [8] Dragounová, L. Škrkal, J., Rulík P.: Porovnání spektrometrických systémů detekce záření gama, Zpráva SÚRO 5/2012, Praha, 2012
- [9] Woon-Seng Choong, - Stephen E. Derenzo, - William W.: Moses Evaluation of production samples of the scintillators LaBr₃:Ce and LaCl₃:Ce, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, U.S.A, 2005
- [10] Ortec: MAESTRO® -32 Software User's Manual, Software Version 6.0, 2006
- [11] General Electric Company: RSDetection User's Manual, July 2013
- [12] Návod na přibondování/ odbondování gama sond programem PcRadonTMR, manuál, 2015