



Zdravotně
sociální fakulta
Faculty of Health
and Social Sciences

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

**Použití přenosného spektrometru pro detekci
radionuklidů v přepravovaných materiálech**

Diplomová práce

Studijní program: **OCHRANA OBYVATELSTVA**

Autor: Bc. Jiří Plaňanský

Vedoucí práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.

České Budějovice 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci s názvem „*Použití přenosného spektrometru pro detekci radionuklidů v přepravovaných materiálech*“ jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím pramenů v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby diplomové práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé diplomové práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 13. května 2018

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí práce Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D. a Ing. Radimu Figallovi expertu radiační ochrany za metodické vedení a cenné rady poskytované v průběhu tvorby mé práce.

Použití přenosného spektrometru pro detekci radionuklidů v přepravovaných materiálech

Abstrakt

Cílem mé diplomové práce bylo posoudit možnosti dohledání a následné identifikace radionuklidů v přepravovaných materiálech zachycených detekčními rámy na hranici střeženého prostoru Jaderné elektrárny Temelín použitím přenosného spektrometru Inspector 1000.

K dosažení výše uvedeného cíle jsem navrhl sérii měření založených na simulovaném průjezdu motorového vozidla osazeného zářiči ionizujícího záření o různých aktivitách v navržených měřících bodech tak, aby tato měření co nejlépe odpovídala skutečnému průjezdu vozidel s rozměrnými náklady. Rozborem naměřených hodnot byly stanoveny hraniční aktivity pro jednotlivé měřící body a správnost výpočtů byla prověřena dalším praktickým průjezdem vozidla stabilním měřícím zařízením. Upřesněné hodnoty hraničních aktivit v jednotlivých měřících bodech byly poté následně měřeny pro srovnání přenosným spektrometrem Inspector 1000.

Výsledky měření prokázaly, že přenosný spektrometr Inspektor 1000 je schopen účinně detekovat, identifikovat, ale i lokalizovat zdroje ionizujícího záření, které způsobí překročení alarmové úrovně na stabilním měřícím zařízení v určených měřících bodech s vyšší citlivostí než stabilní měřící zařízení.

Výstup z této diplomové práce bude poskytnut útvaru radiační ochrany Jaderné elektrárny Temelín jako podklad pro upřesnění, případně i rozšíření metod měření zdrojů ionizujícího záření při transportu rozměrných nákladů v provozu jaderné elektrárny a jejich zavedení do programu monitorování.

Klíčová slova

Přenosný spektrometr; radionuklid; detekce; identifikace; lokalizace; ionizující záření

Radionuclide detection in transported materials by a portable spectrometer.

Abstract

The aim of my diploma thesis was to assess possibilities of tracing and, consequently, identifying radionuclides in transported materials detected by detection frames on the protected area border of the nuclear power plant of Temelín, by means of the portable spectrometer Inspector 1000.

To achieve this, I designed a series of measurements based on a simulated passage of a motor vehicle fitted with ionizing radiation sources of various activities at the designed points of measurement so that these measurements corresponded as close as possible to the actual passage of vehicles with large-sized loads. Recorded values were analysed and marginal activities for the particular measuring points were fixed. Computation correctness was then verified by another passage of the vehicle through the measuring device. Specified values of the marginal activities at the particular measuring points were, for comparison, consequently measured by the portable spectrometer Inspector 1000.

Measurement results proved that the portable spectrometer Inspector 1000 can efficiently detect, identify and locate the sources of ionizing radiation causing the alarm level to be exceeded on a stable measuring device at the fixed measuring points, with a higher sensitivity than a stable measuring device.

Conclusions of this diploma thesis will be given to the radiation protection unit of the nuclear power plant of Temelín as a basis for specification or even expansion of the methods of measuring ionizing radiation sources when transporting large-sized loads in the nuclear power plant, and their introduction into the monitoring programme.

Key words

Portable spectrometer; radionuclide; detection; identification; location; ionizing radiation

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 9 |
| 1 Teoretická část | 10 |
| 1.1 Ionizující záření | 10 |
| 1.2 Druhy ionizujícího záření | 11 |
| 1.2.1 Záření alfa | 11 |
| 1.2.2 Záření beta | 12 |
| 1.2.3 Záření gama | 13 |
| 1.2.4 Neutronové záření..... | 16 |
| 1.3 Radionuklidy | 18 |
| 1.3.1 Nejvýznamnější radionuklidy vznikající při provozu jaderné elektrárny. 18 | |
| 1.3.2 Radionuklid ¹³⁷ Cs..... | 20 |
| 1.3.3 Kontaminace radionuklidy..... | 22 |
| 1.4 Detekce ionizujícího záření | 25 |
| 1.4.1 Přístroje používané k detekci ionizujícího záření..... | 25 |
| 1.4.2 Detektory ionizujícího záření | 26 |
| 1.4.3 Geiger-Müllerovy počítače | 28 |
| 1.4.4 Proporcionální počítače | 29 |
| 1.4.5 Ionizační komory | 29 |
| 1.4.6 Scintilační detektory | 31 |
| 1.4.7 Polovodičové detektory | 34 |
| 1.5 Spektrometrie gama | 36 |
| 1.6 Základní rozdíl polovodičové a scintilační spektrometrie..... | 37 |
| 1.7 Transporty materiálu v střeženém pásmu Jaderné elektrárny Temelín | 38 |
| 1.7.1 Podmínky transportu materiálu do střeženého prostoru | 38 |
| 1.7.2 Podmínky transportu materiálu ze STP | 39 |

| | | |
|-------|---|----|
| 1.7.3 | Program monitorování | 41 |
| 1.7.4 | Program monitorování pracoviště..... | 42 |
| 1.7.5 | Monitorování radiační situace vozidel na vjezdu/výjezdu do/z střeženého prostoru | 43 |
| 1.7.6 | Signalizace vozidla na vjezdu/výjezdu do/z střeženého prostoru..... | 44 |
| 2 | Cíl práce a výzkumná otázka | 46 |
| 2.1 | Cíl práce..... | 46 |
| 2.2 | Výzkumná otázka | 46 |
| 3 | Metodika výzkumu | 47 |
| 3.1 | Výběr radionuklidu ^{137}Cs | 47 |
| 3.2 | Popis a technická specifikace přístroje Inspector 1000 | 48 |
| 3.3 | První ověřovací měření na účinnost stabilních detekčních rámců na výjezdu z ETE | 50 |
| 3.4 | Druhé měření | 53 |
| 3.5 | Stanovení měřicího bodu pro přenosný spektrometr k následnému dohledávání a identifikaci radionuklidů | 54 |
| 3.6 | Dopočítání vzdálenosti jednotlivých měřících bodů od přenosného spektrometru a stanovení relativní citlivosti přístroje Inspector 1000..... | 56 |
| 3.7 | Měření přenosným spektrometrem..... | 56 |
| 4 | Výsledky..... | 58 |
| 4.1 | První ověřovací měření na účinnost stabilních detekčních rámců na výjezdu z ETE | 58 |
| 4.2 | Druhé měření | 60 |
| 4.3 | Dopočítání vzdálenosti jednotlivých měřících bodů od přenosného spektrometru a stanovení relativní citlivosti přístroje Inspector 1000..... | 64 |
| 4.4 | Výsledky měření přenosným spektrometrem | 64 |
| 5 | Diskuse | 69 |
| 6 | Závěr | 72 |

| | | |
|----|-------------------------|----|
| 7 | Seznam literatury | 73 |
| 8 | Seznam zkratek..... | 78 |
| 9 | Seznam obrázků..... | 79 |
| 10 | Seznam tabulek..... | 80 |

Úvod

Při běžném provozu jaderné elektrárny se denně transportují různé materiály k zajištění všech potřebných činností. Tyto materiály, které překračují střežené pásmo elektrárny, jsou kontrolovány fyzickou kontrolou ale i kontrolou na případnou kontaminaci nákladů radioaktivními látkami. Tuto kontrolu provádí stabilní měřící zařízení. Toto zařízení má nastavenou standardní hodnotu přírodního radiačního pozadí a porovnává hodnotu aktivity nákladu vůči hodnotě přírodního pozadí. Protože hodnota přírodního pozadí není konstantní dle měření Státního úřadu radiační ochrany (SÚRO) a Státního úřadu jaderné bezpečnosti (SÚJB) se pohybuje v rozmezí 70–270 nSv/h, z tohoto důvodu stabilní měřící zařízení úroveň přírodního pozadí automaticky vyhodnocuje a přestavuje. Stabilní měřící zařízení má v praxi nastavenou alarmovou úroveň na 7 % nad přírodní pozadí. To znamená, že pokud aktivita nákladu procházejícího tímto zařízením dosáhne nebo překročí alarmovou úroveň, dojde k vyhlášení alarmu akustickou signalizací a dále pak automatickým tiskem protokolu o překročení alarmové úrovně. I když je stabilní měřící zařízení vysoce citlivé, není schopno lokalizovat a určit původ zdroje ionizujícího záření. Proto jsem zvolil téma mé diplomové práce jak lépe a účinněji detekovat, identifikovat a případně lokalizovat zdroj ionizujícího záření. K dosažení tohoto cíle jsem zvolil praktické využití přenosného spektrometru Inspector 1000 se stanovením jeho limitních možností v detekci, identifikaci a lokalizaci zdroje ionizujícího záření. Dále jsem navrhl sérii měření, která simulovala průjezd vozidla s nákladem, ve kterém byly umístěny v navržených měřících bodech zářiče ionizujícího záření o různých aktivitách. Měřící body byly navrženy tak, aby co nejvěrohodněji odpovídaly rozměrným nákladům. Všechna provedená měření směřovala ke zjištění hraničních možností přenosného spektrometru Inspector 1000, to znamená, na jakou maximální vzdálenost dokáže tento spektrometr danou aktivitu detekovat.

1 Teoretická část

Provoz jaderně energetického zařízení vyžaduje transport různých druhů materiálů. Pro zajištění radiační ochrany je střežené pásmo jaderné elektrárny vybaveno stabilními prostředky pro detekci zdrojů ionizujícího záření. Tímto způsobem jsou monitorovány všechny osoby, předměty, vozidla a materiál překračující hranici střeženého pásma. Stabilní měřící prostředky jsou sice vysoce citlivé, ale nejsou schopny lokalizovat a určit původ zdroje ionizujícího záření. V některých případech při pravidelném monitoringu rozměrných nákladů zachytí detekční vjezdové rámy do střeženého pásma jaderné elektrárny překročení monitorovací úrovně ionizujícího záření. V těchto situacích je nutno identifikovat druh a lokaci zdroje ionizujícího záření. Jednou z možností je využití přenosného spektrometru.

1.1 Ionizující záření

Ionizující záření (dále jen IZ) zahrnuje korpuskulární (částicové) záření, rentgenové záření a záření gama. Svůj název dostalo podle schopnosti ionizovat prostředí, kterým prochází. (Brounková a kol., 2007)

Ionizační účinky jsou tedy společnou vlastností veškerých druhů ionizujícího záření. Konkrétní mechanismy interakce záření s hmotou jsou však pro každý jednotlivý druh záření specifické. Z tohoto hlediska můžeme ionizující záření rozdělit na dvě skupiny (Ullmann, 2008):

- Záření **přímo ionizující** – je to záření, jehož kvanta nesou elektrický náboj, a proto přímo vyrážejí či vytrhávají Coulombickými elektrickými silami elektrony z atomů. Patří sem záření alfa, beta mínus a beta plus, protonové záření p^+ atd.
- Záření **nepřímo ionizující** – jeho kvanta nejsou elektricky nabitá; svou kinetickou energii předávají v látce nejprve nabitým částicím, což bývají většinou elektrony a ty teprve přímými účinky na atomy látku ionizují. Do této skupiny můžeme zařadit především záření rentgenové a záření gama, ale také záření neutronové.

Z hlediska fyzikálních, chemických a zvláště biologických účinků ionizujícího záření na ozařovanou látku se záření někdy ještě může dělit podle **hustoty ionizace**, kterou v látce při svém průchodu vyvolá na (Ullmann, 2008):

- Záření **řídce ionizující** – záření X, gama, beta.
- Záření **hustě ionizující** – záření alfa, neutronové záření, protonové záření.

Pro účely radiobiologie a radiační ochrany se pro každý druh záření zavádí tzv. **jakostní faktor** Q, který udává, kolikrát je dané záření biologicky účinnější než záření fotonové (X nebo gama). Pro záření X, gama a beta je jakostní faktor $Q = 1$, pro pomalé neutrony $Q = 2-3$, pro rychlé neutrony a pro protony $Q = 10$, pro záření alfa je $Q = 20$. (Ullmann, 2008)

1.2 Druhy ionizujícího záření

1.2.1 Záření alfa

Záření alfa je tvořeno jádry helia (heliony). Částice mají klidovou hmotnost $6,656 \cdot 10^{-27}$ kg, nesou dva elementární kladné náboje. Dosahují rychlosti řádově 10^7 m.s⁻¹ a jejich energie leží v rozmezí 4 MeV až 9 MeV. Při průchodu těchto částic hmotným prostředím dochází k ionizaci. Částice vytváří při srážkách s atomy kladné a záporné ionty (tím, že vyrazí z elektronového obalu elektron). Při vytvoření jednoho páru iontů ve vzduchu ztratí alfa částice energii 32,5 eV, to znamená, že na celé své dráze vytvoří řádově 10^5 párů iontů. (Kolektiv autorů, 2003)

Dráha, na které ztratí alfa částice veškerou svou energii, se nazývá dolet. Vzhledem k tomu, že částice alfa rychle ztrácejí ionizační energii, je dolet alfa záření velmi malý. V plynech je to řádově několik centimetrů, v kapalinách a pevných látkách zlomky milimetrů. Z praxe víme, že záření alfa je schopen odstínit i list papíru. Ochrana před zevním ozářením alfa zářením nepředstavuje tedy větší problém. (Kolektiv autorů, 2003)

K neznámějším zdrojům záření alfa patří rádium, které objevila v už roce 1898 Marie Curie-Sklodovská. (ČEZ, a.s., 2004)

Mezi další alfa zářiče patří také např. ²³⁹Pu a ²⁴¹Am.

1.2.2 Záření beta

Záření beta je tvořeno rychlými elektrony nebo pozitrony se značným rozsahem energií (až 16,6 MeV pro ^{12}N). Elektrony jsou z jádra emitovány při samovolné přeměně jaderného neutronu na proton, elektron a antineutrino. Záření beta má spojité energetické spektrum, to znamená, že obsahuje částice s energiemi od nuly až po určitou maximální energii, která je pro daný nuklid charakteristická. Hodnoty maximální energie u běžně používaných beta zářičů činí desítky keV až jednotky MeV. (Kolektiv autorů, 2003)

Jak už je uvedeno výše, záření beta jsou částice (elektrony nebo pozitrony), které jsou vysílány radioaktivními jádry prvků při přeměně beta. Tyto částice nesou kladný nebo záporný elektrický náboj a jejich pohyb může být ovlivňován elektrickým polem. Pronikavost je větší než u alfa částic (dosah ve vzduchu okolo 1 metru). (SÚRO, 2018)

Beta mínus je proud elektronů. Částice jsou relativně velmi malé a lehké ve srovnání s částicemi alfa, proto jsou při průchodu hmotným prostředím velmi často rozptylovány jenom s malými ztrátami energie, a proto jejich dráha může tedy být značně klikatá. Pokud je absorbující prostředí složeno z lehkých prvků, nezávisí dolet záření beta prakticky vůbec na konkrétním chemickém složení prostředí. Pro ilustraci lze uvést, že beta záření s maximální energií 2 MeV má dolet ve vzduchu přibližně 8 m, ve vodě 1 cm a v hliníku 4 mm. (Kolektiv autorů, 2003)

Beta plus je proud pozitronů. Při průchodu beta plus záření prostředím se pozitron po ztrátě energie spojí s elektronem a dochází k tzv. anihilaci. Výsledkem jsou dva fotony gama záření o energii 511 keV (anihilační záření). Každý pozitronový zářič i jeho obal okolní materiál jsou tedy současně zdrojem pronikavého fotonového anihilačního záření. (Kolektiv autorů, 2003)

Při průchodu beta částic hmotným prostředím mohou nastat tyto jevy (Kolektiv autorů, 2003):

- **Elastický rozptyl** – vzniká jak na elektronech v obalu, tak na atomových jádrech, uplatňuje se hlavně u pomalých (nízkoenergetických) elektronů. Kdy dochází ke změně směru pohybu beta částic.
- **Ionizace** – je hlavní příčinnou ztrát energie beta částic při průchodu hmotným

prostředím. Ionizační schopnost beta záření je o mnoho nižší než ionizační schopnost alfa záření.

- **Brzdné záření** – brzdění rychle letících elektronů (beta záření) při průchodu elektrickým polem jádra je spojeno se vznikem brzdného rentgenova záření. Tímto způsobem vzniká elektromagnetické záření s pronikavostí podstatně větší než původní beta záření. Výtěžek i energie brzdného záření závisí vedle energie beta záření na atomovém čísle absorbující látky (u těžkých látek je výrazně vyšší než u látek lehkých). S touto skutečností je třeba počítat při výběru stínících materiálů použitých pro zářiče beta. Vhodné jsou látky obsahující lehké prvky, což je např. plexisklo.

1.2.3 Záření gama

Záření gama je elektromagnetické záření (fotony) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu 10^{-11} až 10^{-13} m. Vzniká při jaderných reakcích nebo při radioaktivním rozpadu přechodem jádra z vyššího do nižšího energetického stavu, přičemž se jádro zbavuje své excitační energie. Čistých gama zářičů je velmi málo, záření gama obvykle doprovází alfa nebo beta záření. (Kolektiv autorů, 2003)

Proud fotonů má spíše charakter vlnění s podobnými vlastnostmi jako světlo nebo rentgenové záření. Fotony se pohybují rychlostí světla, nemají žádný elektrický náboj, proto mají velmi vysokou pronikavost. (Fyzmatik, 2009)

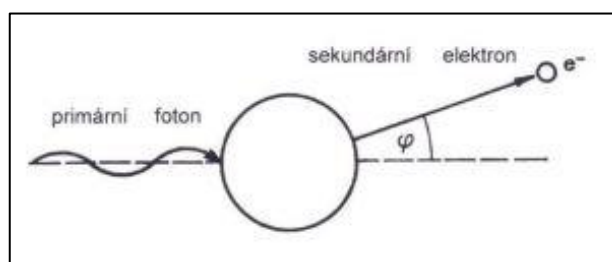
Uvedené gama záření proniká veškerými látkami, je jimi pouze zeslabováno v závislosti na hustotě látky, její tloušťce a energii výchozího gama záření. (Koláček, 1998)

Záření gama má čárové spektrum, to znamená, že daný radionuklid emituje pouze foton s určitými energiemi, které jsou pro jeho přeměnu charakteristické. U prakticky používaných zdrojů záření gama činí jeho energie desítky keV až jednotky MeV. K nejčastěji používaným zdrojům gama záření patří ^{60}Co a ^{137}Cs . (Kolektiv autorů, 2003)

Interakce gama záření s hmotným prostředím se výrazně odlišuje od interakce elektricky nabitých částic. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabitě

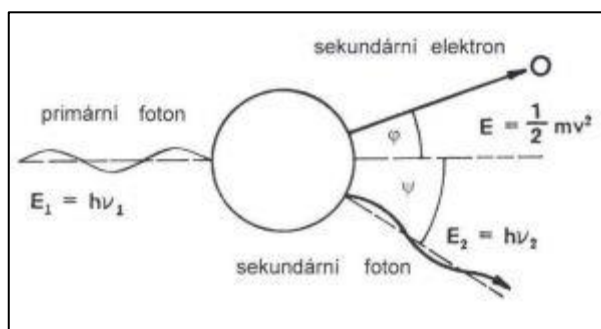
částice a předávají jim energii dodatečnou k tomu, aby byly schopné prostředí ionizovat a excitovat. Gama záření nazýváme tedy nepřímo ionizující, a bylo prokázáno, že gama záření vyvolává následující tři interakce (Kolektiv autorů, 2003):

- **Fotoefekt** – foton záření gama se "srazí" s elektronem e^- vázaným v atomovém obalu, předá mu veškerou svou energii a zanikne. Energie fotonu při tomto absorpčním ději se spotřebuje na uvolnění elektronu z atomového obalu a na kinetickou energii vyraženého fotoelektronu. Elektron, který získal tuto energii, se uvolní z vazby v atomu a vyletí s kinetickou energií $E_e = E_\gamma - E_v$, danou rozdílem energie záření E_γ a vazbové energie E_v elektronu v atomu. Další chování tohoto fotoelektronu e^- je stejné jako u záření β : bude se "cik-cak" pohybovat a odrážet mezi atomy, ionizovat je až se nakonec zabrzdí (a příp. zrekombinuje s některým atomem). Na místo "uprázdněné" po elektronu, který vyletěl fotoefektem, okamžitě přeskočí z vyšší slupky v atomovém obalu elektron, přičemž energetický rozdíl vazbové energie na vyšší a nižší slupce se vyzáří ve formě kvanta (fotonu) elektromagnetického záření - pokud je to slupka K nebo L u těžších prvků, vyzáří se *charakteristické rentgenové záření*. Při tomto pochodu však nemusí dojít k vyzáření charakteristického elektromagnetického záření, ale jako alternativní jev může nastat předání energie některému elektronu na vyšší slupce, který se pak uvolní a vyzáří jako tzv. Augerův elektron. Tento jev bývá někdy vykládán jako proces *vnitřní konverze* rentgenova záření, i když podobně jako u vnitřní konverze záření gama jde o *alternativní jev*, při němž se energie předává elektromagnetickou interakcí *přímo*, bez faktického vyzáření vln. Fotoefekt nastává nejčastěji u záření gama s nižšími energiemi a v látkách s velkým protonovým číslem. (Ullmann, 2008)



Obrázek 1: Fotoefekt (Navrátil a Rosina, 2005)

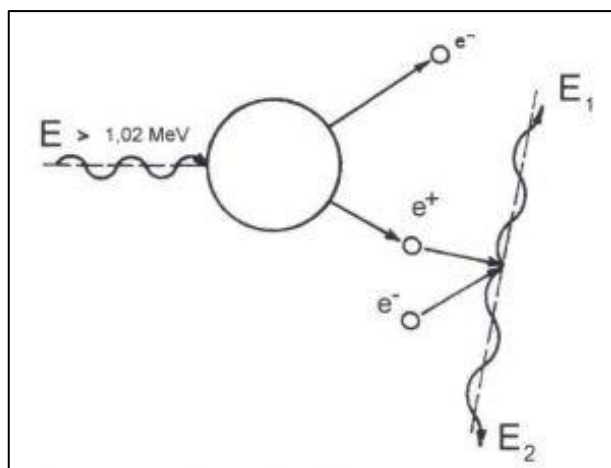
- **Comptonův rozptyl** – je to interakce fotonů gama záření s volnými nebo jen velmi slabě vázanými elektrony (na rozdíl od fotoefektu, kde se jedná o interakci fotonu s pevně vázaným elektronem). Foton gama záření předá část své energie volnému elektronu a posune ho. Rozptýlený foton pak s nižší energií (tj. větší vlnovou délkou) pokračuje v pohybu v odlišném směru. Comptonův rozptyl je převládajícím typem interakce gama záření středních energií s látkami s malým atomovým číslem. (Kolektiv autorů, 2003)



Obrázek 2: Comptonův rozptyl (Navrátil a Rosina, 2005)

- **Tvorba párů elektron – pozitron**, má-li foton gama záření větší energii než 1,02 MeV (což je energetický ekvivalent dvou klidových hmotností elektronu) může být zcela pohlcen v elektrickém poli atomového jádra a přitom vzniká dvojice elektronů – elektron a pozitron. Případný přebytek energie pohlceného fotonu se projeví ve formě kinetické energie vytvořeného elektronového páru.

Z předchozího výkladu je zřejmé, že při průchodu určitého záření hmotným prostředím může dojít k různým typům interakcí. Veličina, která charakterizuje pravděpodobnost vzniku určité interakce v daném případě, se nazýváme účinný průřez. Tak např. při ozařování látek s vysokým atomovým číslem gama zářením o energii řádově v kiloelektronvoltech, má vysoký účinný průřez fotoefekt a nízký účinný průřez Comptonův rozptyl a tvorba párů. Účinný průřez závisí na atomovém čísle ozařované látky a velmi výrazně na energii záření (často rezonančně). (Kolektiv autorů, 2003)



Obrázek 3: Tvorba elektron pozitronových párů (Navrátil a Rosina, 2005)

1.2.4 Neutronové záření

Neutrony jsou elementární částice, které nemají elektrický náboj (o zhruba stejné hmotnosti jako protony), vznikají při jaderných reakcích a spontánním štěpením atomů. Velmi důležitou charakteristikou neutronů, která určuje jak se chovají, je energie. (Navrátil a kol., 2010)

Pod neutronovým zářením se rozumí proud pohybujících se neutronů. Ve vakuu se neutrony pohybují sice volně a bez odporu, avšak jejich "dolet jakožto neutronů" není neomezený, jak by se dalo čekat. Volné neutrony se spontánně rozpadají radioaktivitou beta mínus s poločasem asi 12 minut na protony, elektrony a (anti)neutrino. Jelikož neutrony nemají elektrický náboj, při průchodu látkou samy neionizují (jedná se o záření nepřímo ionizující). Ionizaci prostředí způsobují až sekundární částice, jež vznikají při interakci neutronů s jádry atomů (odražená lehká jádra, záření gama, protony, částice alfa apod.). Neutrony po vstupu do látky reagují téměř výhradně s atomovými jádry, a to čtyřmi způsoby (Ullmann, 2008):

- **Pružný rozptyl neutronů** na jádrech je nejčastějším způsobem interakce rychlých neutronů při jejich průchodu látkovým prostředím, zvláště s lehkými jádry. Letící neutron narazí na jádro, předá mu část své kinetické energie, odrazí se od něj (podobně jako kulečnicková koule) a pokračuje v pohybu se změněným směrem a sníženou energií. Odražené jádro díky svému kladnému náboji při svém pohybu vyvolává ionizaci a excitaci okolních atomů, čímž ztrácí svou energii. Předaná

energie při pružném rozptylu neutronu je největší pro jádra vodíku (zde je při jedné srážce předána téměř polovina energie) a s rostoucí hmotností (nukleonovým číslem) jader klesá. Proto jsou rychlé neutrony nejvíce zpomalovány látkami obsahujícími lehké prvky (vodík, berylium, uhlík apod.).

- **Nepružný rozptyl**, při němž neutron opět předá část své energie jádru, avšak tato energie se spíše než na mechanický pohyb jádra spotřebuje na zvýšení vnitřní energie jádra – nastane excitace jádra. Při návratu jádra do původního stavu (deexcitaci vzbuzených jaderných hladin) se vyzáří foton záření gama, který již vyvolává ionizaci.
- **Radiační záchyt**, při němž je neutron jádrem pohlcen a následně je emitován jeden nebo více fotonů záření gama (při deexcitaci jaderných hladin vzbuzených při absorpci neutronu). Záření gama pak již vyvolává ionizaci. Další ionizace pak může nastat i následně a dlouhodobě: jádra, jež pohltila neutron, jsou často radioaktivní a rozpadají se za vyzáření dalšího ionizujícího záření, především beta. Radiační záchyt neutronů je nejúčinnější pro pomalé neutrony s nízkou energií, zvláště pro "tepelné" neutrony s energií pouze cca 0,025 eV (což odpovídá tepelnému pohybu atomů) a je velice odlišný pro různá jádra. K látkám, které nejúčinněji zachycují neutrony, patří zvláště bor a kadmium, které se proto používají jako stínící materiál pro neutronové záření a pro regulaci neutronového toku v jaderných reaktorech.
- **Jaderné reakce**, kdy po vniknutí neutronu do jádra je emitována jiná částice, např. proton nebo částice alfa (do této kategorie fakticky patří i předchozí způsob), které ionizují. V praxi se jednotlivé mechanismy interakce neutronového záření s látkou kombinují. Např. rychlé neutrony snadno vnikají do látky, rychle ztrácejí svou energii při srážkách hlavně s lehkými jádry, které pak ionizují a excitují okolní atomy. Po zpomalení na "tepelnou" energii vnikají neutrony do jader a způsobují tam jaderné reakce za vzniku radioizotopů – neutronovou aktivaci, která se může stát i dlouhodobějším zdrojem ionizujícího záření.

1.3 Radionuklidy

Vzhledem k zaměření této diplomové práce se v kapitole radionuklidy budu zabývat pouze umělými radionuklidy.

První umělé radionuklidy byly pozorovány manželi Joliot-Curiiovými při ostřelování izotopů ^{10}B , ^{24}Mg a ^{27}Al částicemi alfa. Vznikající jádra vykazují beta plus aktivitu a studium jevu prokázalo, že radioaktivní jádra vznikají jako konečná jádra v reakci (α, n) . Aktivita takto připravených jader je označována jako umělá radioaktivita. V současnosti je známo několik tisíc umělých radionuklidů, které se široce používají v průmyslu, medicíně atd. (Kolektiv autorů, 2017)

1.3.1 Nejvýznamnější radionuklidy vznikající při provozu jaderné elektrárny

Mezi nejvýznamnější radionuklidy vznikající provozem jaderné elektrárny patří štěpné produkty, tj. vzácné plyny ^{85}Kr a ^{133}Xe , izotopy jódu ^{131}I a ^{133}I , ^{90}Sr , ^{134}Cs a ^{137}Cs , aktivační korozní produkty, tj. ^{51}Cr , ^{55}Fe , ^{57}Mn , ^{60}Co , ^{59}Ni , ^{65}Zn , aktivační produkty chladiva, tj. ^3H , ^{14}C , transurany, a to zejména ^{239}Pu . Radionuklidy, které se nacházejí v chladivu a v technologických systémech jaderné elektrárny, je nutno z technologických, ale zejména z bezpečnostních důvodů během provozu průběžně a nebo periodicky odstraňovat pomocí speciální čisticí stanice vod. Při různých technologických, regeneračních a dekontaminačních procesech, kterými se čistí kontaminované předměty, vznikají radioaktivní odpady. (ČEZ, a.s., 2018)

Při normálním provozu vznikají v jaderné elektrárně převážně nízkoaktivní, příp. středně aktivní odpady a vyhořelé jaderné palivo. Pro orientaci uvádíme, že vyhořelé palivo představuje cca 95 % všech zdrojů aktivity v jaderné elektrárně. Protože vyhořelé jaderné palivo lze po přepracování (což je proces odstranění štěpných produktů) znovu použít jako jaderné palivo, není považováno za radioaktivní odpad. Zbytek po přepracování vyhořelého jaderného paliva tvoří vysoce aktivní odpad, který je nutno bezpečně uložit. (ČEZ, a.s., 2018)

Vyhořelé palivo může být prohlášeno za vysoce aktivní odpad jen příslušným právním úkonem. Dle zákona č. 263/2016 Sb., Atomový zákon pro nakládání s vyhořelým jaderným palivem platí, kromě dalších specifických předpisů, také předpisy jako pro

nakládání s radioaktivními odpady. Protože vyhořelé jaderné palivo a radioaktivní odpady představují potenciální nebezpečí ozáření pracovníků jaderné elektrárny, popř. obyvatelstva a životního prostředí v okolí jaderné elektrárny, je nakládání s nimi přesně stanoveno a kontrolováno provozovatelem jaderné elektrárny i státním dozorem. (ČEZ, a.s., 2018)

Inventářem reaktoru je nazýván obsah radionuklidů v reaktoru. Obsah radionuklidů se odvíjí od typu reaktoru, použitého paliva a na jeho stupni vyhoření. Ve vyhořelém palivu, které se chladí v bazénu vyhořelého paliva, dominují dlouhodobé radionuklidy. K inventáři aktivity radionuklidů také přispívají i aktivační produkty, jejichž aktivita i složení je závislá na skladbě konstrukčního materiálu a použitého chladicího média v primárním okruhu jaderné elektrárny. Množství obsažených štěpných produktů je vyšší než obsah aktivačních produktů. Jmenované produkty v kapalných i vzdušných výpustech obvykle převažují. V důsledku netěsnosti se do aerosolových výpustí dostávají z primárního okruhu nebo při mechanických údržbářských a opravářských pracích. (Navrátil a kol., 2010)

Do ovzduší jsou vypouštěny štěpné produkty ve formě vzácných plynů (izotopy kryptonu a xenonu), a také některé aktivační produkty ve formě vzácných plynů (uhlík ^{14}C , dusík ^{16}N , síra ^{35}S , argon ^{41}Ar , selen ^{75}Se , astat ^{76}As), tritium, radioizotopy jódu v plynných formách a ve formě aerosolu, v aerosolových formách štěpné a aktivační produkty a ve velmi malých aktivitách i transurany. V rámci dělení vypouštěných radionuklidů na aktivační a štěpné je třeba se zaměřit i na takové radionuklidy, které jsou produktem obou procesů jako například cesium ^{134}Cs , které vzniká aktivací ^{133}Cs , které je konečným produktem řady india ^{133}In vzniklé štěpením (v této řadě se vyskytuje také jód ^{133}I a xenon ^{133}Xe). (Navrátil a kol., 2010)

Do hydrosféry se vypouští převážně tritium, ale také aktivační popřípadě i štěpné produkty. (Navrátil a kol., 2010)

V primárním okruhu jaderné elektrárny štěpením jaderného paliva a neutronovou aktivací boru vzniká tritium. V některých typech jaderných elektráren také aktivací lithia. U reaktorů, které používají jako moderátoru i chladiva těžkou vodu označované jako HWR, vzniká tritium aktivací deuteria. U těchto typů reaktorů jsou výpusti tritia do životního prostředí vysoce problematické. (Navrátil a kol., 2010)

Neméně důležitými radioizotopy, které vznikají procesem štěpení, jsou radioizotopy jódu např. ^{129}I s dlouhým poločasem přeměny $1,6 \cdot 10^7$ let. A další ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I s nepoměrně kratšími poločasy rozpadu. Tyto izotopy se vypouští v plynných formách nebo také ve formě aerosolu. Kromě jódu ^{129}I mají všechny radioizotopy relativně krátké poločasy přeměny. Aktivita těchto radioizotopů ve výpustích jaderných elektráren je závislá na počtu a velikostech netěsností v palivových článcích i na velikosti ztrát chladiva z primárního okruhu. Proto jsou velice významné z hlediska ozáření personálu jaderné elektrárny. V rámci ozáření obyvatelstva v okolí je významný radioizotop zejména jód ^{131}I , jelikož při úniku se může dostat do potravinového řetězce. Radioizotop jód ^{129}I je kontinuálně ve velmi malých množstvích vypouštěn do životního prostředí, kde přispívá do tzv. globální kolektivní dávky. (Navrátil a kol., 2010)

V aerosolové formě se vyskytují radionuklidy, které vznikly přímo jako produkt štěpení, nebo rozpadem vzácných plynů. Aerosoly vznikají při únicích netěsnostmi v primárním okruhu, ale také mohou vniknout při údržbě nebo opravách aktivovaných částí primárního okruhu. Vzdušina odváděná ventilačními systémy z míst, kde se vytváří radioaktivní aerosoly, je průběžně čistěna výkonnými filtračními systémy, kde se velká část aerosolů zachytí. Množství vypouštěných aerosolů je ve standardním provozu jaderné elektrárny velmi nízké a pro každou jadernou elektrárnu je radionuklidové složení vypouštěné vzdušiny unikátní pro každou elektrárnu. (Navrátil a kol., 2010)

Radionuklidy uměle vyrobené s pomocí urychlovačů nebo reaktorů se staly poměrně snadno dostupným prostředkem prakticky využitelným, jak ve vědeckém výzkumu, tak ve výrobě a v mnoha dalších oblastech lidské činnosti. (Úlehla, 1990)

1.3.2 Radionuklid ^{137}Cs

Tento radionuklid je v následujícím textu popisován záměrně, jelikož je to jeden z nejběžnějších prvků vnikajících při provozu jaderné elektrárny a zároveň je používán jako referenční radionuklid pro kalibraci většiny radiometrických přístrojů. Proto jsem zvolil tento radionuklid pro praktickou část diplomové práce.

^{137}Cs je radioaktivní prvek s relativně dlouhým poločasem rozpadu 30,15 let. Tento konkrétní izotop cesia je jak beta, tak gama emitör. (Radioactivity.eu.com, 2018).

Jedná se o stříbřitě bílý, měkký, alkalický kov patřící do skupiny tří prvků, které při pokojové teplotě dosahují kapalného skupenství. Svými chemickými vlastnostmi je velmi podobný jednomu z makroprvků – draslíku. Je přijímán rostlinami z půdy ve formě roztoků tj. v iontové formě nebo vázané na organické molekuly, a tím se stává součástí potravních řetězců. Ze zjištění z posledních několika let vyplývá, že příjem radiocesia z půdy kořenovým systémem závisí zejména na množství organických látek (čím jich je v půdě více, tím je ^{137}Cs rostlinou více přijímán), jílových minerálů (fixují ho a snižují jeho mobilitu) a již zmiňovaném draslíku. (Hálová, 2012)

Z hlediska radiační ochrany patří izotopy cesia mezi významné zdroje radiačního rizika. V přírodě se vyskytuje jediný stabilní izotop cesia a to je ^{133}Cs . Jeho nejznámější radioizotopy vzniklé při štěpení těžkých jader jsou ^{137}Cs , ^{134}Cs a ^{135}Cs . (Starý, 1987)

Bylo prokázáno, že v 93,5 % případů emituje při svém rozpadu částice beta mínus s energií pouze $E_{\beta\text{max}} = 514 \text{ keV}$ a přeměňuje se na metastabilní $^{137\text{m}}\text{Ba}$, to dále deexcituje s poločasem radioaktivní přeměny 2,55 minuty emisí fotonu s energií 662 keV rovněž na stabilní ^{137}Ba . ^{134}Cs , beta mínus zářič s poločasem radioaktivní přeměny 2,06 roku, se pomocí emise částice beta mínus s energií $E_{\beta\text{max}} = 662 \text{ keV}$ přeměňuje na stabilní ^{134}Ba . Jeho význam je v rámci kratšího poločasu radioaktivní přeměny nižší, ale jeho vyšší hmotnostní aktivita výrazně limituje možnost použití měření záření beta mínus pro stanovení ^{137}Cs . (Starý, 1987)

Jak už bylo výše uvedeno, ^{137}Cs vzniká jaderným štěpením. Malé množství ^{137}Cs lze nalézt v životním prostředí také z testů jaderných zbraní, k nimž došlo v padesátých a šedesátých letech 20. století, popřípadě nehod jaderných reaktorů, jako například havárie elektrárny v Černobylu v roce 1986, která distribuovala ^{137}Cs do mnoha evropských zemí. (Emergency Preparedness and Response, 2014)

Zdravotní rizika

Externí expozice velkému množství ^{137}Cs může způsobit popáleniny, zákal oční čočky a dokonce i smrt. Vystavení tak velkému množství může pocházet ze špatného zacházení se silným průmyslovým zdrojem ^{137}Cs , z jaderné detonace nebo hlavně z jaderné havárie. (United States Environmental Protection Agency, 2017)

Vystavení ^{137}Cs může zvýšit riziko rakoviny kvůli přítomnosti vysokoenergetického gama záření. Vnitřní expozice ^{137}Cs při požití nebo vdechnutí umožňuje distribuci radioaktivního materiálu do měkkých tkání, zejména do svalové tkáně, což zvyšuje riziko rakoviny. (United States Environmental Protection Agency, 2017)



Obrázek 4: Zářič ^{137}Cs (Flicker)

1.3.3 Kontaminace radionuklidy

Kontaminací radionuklidy se rozumí znečištění jakéhokoliv materiálu či jeho povrchu, prostředí nebo osoby radioaktivní látkou. (Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření, 2018)

Kontaminace radionuklidy je vedle zevního ozáření další expoziční cestou. Zevní kontaminací rozumíme přítomnost radionuklidů na kůži. (Österreicher, 2003)

V případě, že radioaktivní látky ulpěly na povrchu (osob, zařízení), mluvíme o povrchové kontaminaci, která se následně dá klasifikovat jako stíratelná (radioaktivní látky lze odstranit) a nestíratelná (radioaktivní látky nelze odstranit). (Koláček a kol., 2017)

Vnitřní kontaminací rozumíme ozáření osoby ionizujícím zářením z radionuklidů vyskytujících se v těle této osoby, zpravidla jako důsledek příjmu radionuklidů. Vnitřní kontaminace je samozřejmě nebezpečnější, protože při ní je organismus zářením zatěžován dlouhodobě a zevnitř. V tomto případě radionuklid vstoupí do metabolismu a podle toho, jakou má chemickou povahu, se může hromadit v určitých cílových orgánech, které jsou pak bezprostředně vystaveny účinkům záření. Z hlediska vnitřní kontaminace je nejnebezpečnější záření alfa, protože tyto jmenované částice mají vysoké energie, ale krátké dolety. (Koláček a kol., 2017)

Při vnitřní kontaminaci se radionuklidy proniklé do těla vylučují nebo může nastat druhá varianta a to, že se radionuklidy mohou ukládat. (Koláček, 2007)

K vnitřní kontaminaci může docházet nejen zaživačím ústrojím či dýchacím ústrojím, ale také průnikem přes pokožku. Abychom předešli kontaminaci, je nutno dodržovat pravidla hygieny, v kontrolovaném pásmu nejíst, používat ochranné rukavice, s těkavými radioaktivními látkami pracovat v digestoři atd. Po vniknutí do organismu přechází radionuklid z plic nebo žaludku krevními tekutinami do celého těla. Tyto radionuklidy nazýváme biogenní radionuklidy a orgány, ve kterých se kumulují biogenní radionuklidy, se nazývají kritické orgány. Kritické orgány mohou zadržovat značnou část daného radionuklidu, takže výsledná koncentrace konkrétního radionuklidu v daném orgánu může například tisíckrát přesahovat koncentraci v sousedním orgánu. (Koláček a kol., 2017)

Na pracovištích, kde může dojít k vnitřnímu ozáření pracovníků, se příjmy radionuklidů zjišťují zpravidla měřením jejich aktivity v těle nebo v exkretech pracovníka. Vnitřní kontaminaci lze monitorovat přímo měřením aktivity radionuklidu v těle nebo orgánu. Toto se provádí celotělovým počítačem. Případně jednodušším zařízením. Nepřímo můžeme měřit aktivity radionuklidů vyloučených v exkretech eventuálně měřením pracovního prostředí. (Koláček a kol., 2017)

Přímými metodami se rozumí stanovení aktivity radionuklidu měřením celého těla nebo orgánu, či tkáně celotělovým počítačem nebo obdobným zařízením, například zařízení pro stanovení radioizotopů jódu ve štítné žláze. Celotělové počítače jsou většinou spektrometry záření gama se scintilačními nebo polovodičovými detektory, jimiž se měří záření gama nebo charakteristické rentgenové záření, které emitují radionuklidy, přítomné v těle. (Koláček a kol., 2017)

Na Jaderné elektrárně Temelín se používá monitor rychlého měření vnitřní kontaminace, který se nazývá Fastscan. (Koláček a kol., 2017)

Měření na tomto přístroji prochází všichni pracovníci vykonávající činnosti v kontrolovaném pásmu vždy při žádosti o povolení vstupu do kontrolovaného pásma a poté minimálně jedenkrát za rok. (Brounková, 2007)

Podrobnější určení vnitřní kontaminace je možno zjistit pomocí celotělového počítače a monitoru měření jódu ve štítné žláze. (Koláček a kol., 2017)

Vnitřní ozáření od radionuklidů s doprovodným zářením gama je možno určit na celotělovém počítači, kde je změřeno rozložení a aktivita jednotlivých radionuklidů v těle. Aktivita radioaktivního jódu ve štítné žláze se měří detektorem přiloženým ke štítné žláze. Aktivita tritia se sleduje ve vzorku moči. (Koláček a kol., 2017)

V provozu ETE probíhá několikanásobná kontrola kontaminace povrchu těla, oděvů předmětů a materiálů, která začíná už při vstupu do areálu jaderné elektrárny a na tom samém místě také končí. Tyto kontroly jsou velmi důležité a slouží především pro včasné zjištění kontaminace, tzn. ve fázi, kdy lze nebezpečí kontaminace těla relativně snadno odstranit – buď pouhým sejmutím kontaminovaného oděvu, nebo umytím v havarijní hygienické smyčce. Mělo by být proto v zájmu všech tyto kontroly neobcházet a vždy je provádět správným a předepsaným způsobem.

Při průchodu bránou ETE musí osoby při vstupu u i při výstupu projít portálovými monitory, které mají označení PM-7. Při vstupu tyto monitory slouží jako zábrana proti vnesení kontaminace zvenčí – v praxi se již několikrát stalo, že např. byly zachyceny osoby s kontaminací na obuvi, přinesenou z nějaké jiné jaderné elektrárny. Dále tyto monitory signalizují, pokud měřená osoba má v těle aktivitu po vyšetření na nukleární medicíně – po takovém vyšetření se musíte při vstupu do ETE prokázat potvrzením od lékaře a navíc nesmíte vstupovat do kontrolovaného pásma, smíte se pohybovat pouze v areálu. Při výstupu slouží monitory, jako zábrana proti vynesení kontaminace ven zpravidla odhalí, že dotčená osoba neprovedla kontrolu kontaminace předmětů vynášených z kontrolovaného pásma – výsledkem je v takovém případě dlouhá vyšetřovací procedura a také kázeňský a finanční postih. (Koláček a kol., 2009)

1.4 Detekce ionizujícího záření

Při všech aplikacích ionizujícího záření je informace o měřené veličině uložena ve změně toku částic svazku záření, které je nutno detekovat detektorem ionizujícího záření. Ve většině případech je použito detektorů, jež poskytují elektrický výstupní signál. Veškeré způsoby detekce ionizujícího záření jsou založeny na jednotlivých jevech interakce ionizujícího záření s hmotou. Záření alfa a záření beta je korpuskulární záření nabitých částic, které mohou samy ionizovat. Záření gama ionizuje nepřímo a to prostřednictvím fotoelektronů, Comptonových elektronů, případně párů elektron – pozitron. Neutrony detekují pomocí vhodné jaderné reakce. (Šimek, 2002)

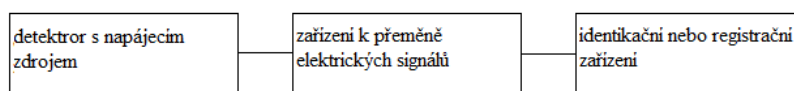
Detekce jednotlivých druhů ionizujícího záření je založena na jejich interakcích s látkou vhodného čidla, detektoru. Detektor slouží k přeměně zářivé energie na jinou formu energie, kterou můžeme registrovat používanými čidly i v jiných oborech. Podle druhu interakce se používají různé typy detektorů. (Beneš, 2005)

1.4.1 Přístroje používané k detekci ionizujícího záření

Radiometrické přístroje slouží pro měření radioaktivity. Okamžitou hodnotu radioaktivního pole stanovují měřiče střední hodnoty impulsů, hodnotu radioaktivity v daném čase dozimetry. (Leporelo, 2018)

Podle účelu měření lze přístroje rozdělit na (Navrátil a kol., 2010):

- **Průmyslová radiometrická zařízení** – jsou určena k nejrůznějším, zpravidla k průmyslovým aplikacím radionuklidů, zařízení obsahuje vhodný zdroj záření a detekční (měřicí) aparaturu (vlhkoměry, popeloměry, tloušťkoměry, ...).
- **Radiometry** – slouží k odhadu dávkových příkonů, dávky, povrchové kontaminace v daném místě, prostoru zpravidla bez informace o energetické distribuci pole záření.
- **Spektrometry** – měří energetickou distribuci dané veličiny (aktivitu, fluenci) ionizujícího záření.



Obrázek 5: Blokové schéma radiometrické aparatury (Kolektiv autorů, 2003)

1.4.2 Detektory ionizujícího záření

Ionizační detektory využívají ionizačních účinků záření v plynech nebo pevných látkách. Tyto detektory se široce uplatňují při měření dávek záření, počtu a energie částic apod. Jde o jednu z nejpoužívanějších metod detekce elektricky nabitých částic, používal ji už Ernst Rutherford při objevu radioaktivity. Jsou to v podstatě dvě vodivé elektrody, na které se přivádí napětí. Při průchodu nabité částice skrz prostředí, ionizuje částice toto prostředí, tj. rozbíjí neutrální molekuly na elektrony a kladné ionty; vytváří tzv. iontové páry. Úlohou napětí na elektrodách je oddělit tyto dva druhy nabitých částic. Ionizační schopnost jednotlivých druhů částic je rozdílná a závisí i na energii částice. Například částice beta může na dráze 1 cm při normálním tlaku ve vzduchu vytvořit od 30 do několika set iontových párů, proton až 10 000 a alfa částice od 20 000 do 60 000. (Techmania science center, 2018)

Základním parametrem detektorů je jejich účinnost. Rozlišujeme dva druhy, vnitřní účinnost a absolutní detekční účinnost. U první jmenované je to poměr mezi počtem zaznamenaných kvant a počtem všech kvant, která do detektoru vstupují. Tato účinnost obvykle bývá vyjadřována v procentech. Je závislá především na účinném průřezu interakce daného záření s materiálem detektoru a velikosti citlivého objemu. U absolutní účinnosti je to poměr mezi počtem zaznamenaných kvant a počtem kvant, která emituje měřený zářič. Je zřejmé, že závisí na vnitřní účinnosti detektoru, ale mimo to také velice záleží na jeho geometrickém uspořádání a absorpci mezi zdrojem a detektorem. Největší možné účinnosti, která by se rovnala 100 %, nelze v praxi dosáhnout. Dalším zásadním parametrem je časové rozlišení detektoru. Mezi interakcí kvanta a signálem na výstupu je vždy určité časové zpoždění, které je dáno konečnou rychlostí dějů, které v detekčním řetězci probíhají. Délku tohoto intervalu popisuje právě časové rozlišení. Skládá se ze dvou složek, z fyzikálních procesů v samotném detektoru a z rychlosti elektronických vyhodnocovacích obvodů radiometru. S časovým

rozlišením úzce souvisí pojem mrtvá doba. Jedná se o interval následující po detekci jednoho kvanta, během kterého není detektor schopen detekovat žádné jiné kvantum, resp. jeho účinky přičte k právě registrovanému kvantu. Důsledkem mrtvé doby je, že detektory s delší mrtvou dobou nejsou schopné korektně měřit záření vyšších intenzit, dramaticky klesá detekční účinnost. To vede k nelinearitě odezvy a potažmo i k možným chybám měření. K užitečnému signálu z detektoru se superponuje radiační pozadí, které je trojího původu – vnější záření, vnitřní radioaktivita detektoru a elektrický šum. Vnější záření pochází ze zdrojů vyskytujících se běžně v prostředí, lze jej účinně potlačit stíněním. Vnitřní radioaktivita detektoru je způsobena buď přítomností přírodních radionuklidů, nebo aktivací materiálu působením měřeného ionizujícího záření. Elektrický šum detektoru lze potlačit chlazením na velmi nízké teploty, kdy je minimální tepelný pohyb nosičů náboje. Pokud chceme provádět správné měření, je nutné radiační pozadí od měřených hodnot odečíst. (Lázna, 2015)

Detektory můžeme rozdělit na dva základní druhy (Navrátil a kol., 2010):

- **kontinuální** – podávají průběžnou informaci o okamžité hodnotě detekovaného záření, po ukončení ozařování detektoru klesne výstupní signál na nulovou hodnotu.
- **integrální** – hodnota signálu se zvětšuje s dobou, po kterou je detektor ozařován (tj. úměrně dávce, expozici), po ukončení ozařování zůstává informace v detektoru uchována za celou dobu, po kterou byl detektor vystaven, uplatňují se hlavně v osobní dozimetrii, dozimetrii pracovního a životního prostředí.

Dle principu detekce ionizujícího záření můžeme detektory rozdělit dále do tří hlavních skupin a to elektrické detektory, samostatné detektory a poslední skupinou jsou scintilační detektory. U elektrických detektorů je princip detekce ionizujícího záření založen na látkách, které působením ionizujícího záření mění některé elektrické vlastnosti např. vodivost. Samostatné detektory jsou založeny na látkách, které dlouhodobě mění své vlastnosti např. barvu. Poslední skupinou detektorů jsou scintilační detektory, v nichž působením ionizujícího záření vzniká luminiscenční záření. Dále je tento světelný signál převáděn na elektrický, který se dále zpracovává. (Navrátil a kol., 2010)

1.4.3 Geiger-Müllerovy počítáče

Geiger-Müllerovy počítáče (viz obrázek 6) jsou založeny na principu využití ionizačních účinků záření. Jsou tvořeny válcovou katodou, v jejíž ose je uložena tenká anoda, tvořená zpravidla wolframovým drátkem. Celý systém elektrod je uzavřen v baňce s inertní plynovou náplní (argon, neon). Geiger-Müllerovy počítáče pracují v režimu, kdy elektrony vzniklé primární částicí v počítáči se mezi dvěma srážkami urychlí elektrickým polem natolik, že jsou schopny ionizovat další neutrální atomy. Takto vzniklé sekundární elektrony ionizují další atomy, takže na anodu dopadne celá lavina elektronů. Tím vzniká tzv. zesílení v plynu (koeficient zesílení je až 1010). Náboj na elektrodách pak nezávisí na primární ionizaci, ale je dán pouze vlastnostmi počítáče. (Navrátil a kol., 2010)

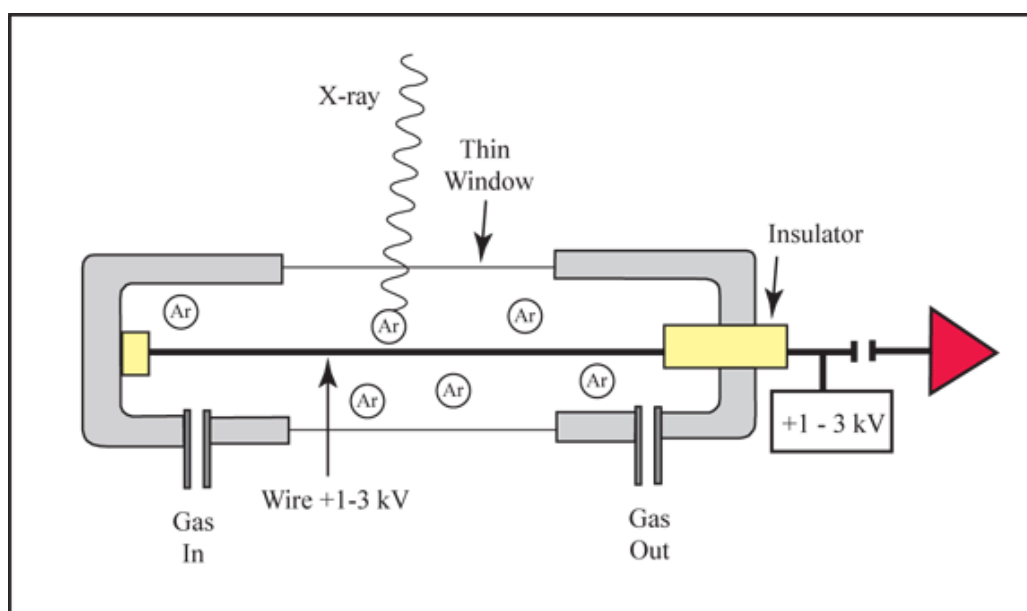
Průchod každé částice je tedy doprovázen samovolným výbojem v celém objemu počítáče, který vyvolá na připojeném zatěžovacím odporu napěťový impuls, a ten se zpracovává v dalších částech radiometrické aparatury. Výboj, který vznikne v počítáči, je nutné co nejdříve přerušit, neboť po dobu výboje (vzhledem k poklesu napětí pod Geiger-Müllerův práh) neregistruje počítáč další částice. Přerušování výboje se nejnázve dosahuje vhodnou plynovou náplní počítáče (samozhášecí počítáče). Časový interval, za který se obnoví pracovní napětí na počítáči (obnoví se schopnost registrovat další částice), se nazývá mrtvá doba (bývá řádově v milisekundách). (Navrátil a kol., 2010)



Obrázek 6: Geiger-Müller počítáč (Gaiger counter radiation detector)

1.4.4 Proporcionální počítače

Proporcionální počítače pracují v oboru úplné proporcionality, kde využívají sekundární ionizaci. Zapojení, konstrukční provedení a charakteristiky jsou velice podobné jako u Geiger-Müllerových počítačů. Koeficient zesílení je 10^4 až 10^5 , mrtvá doba bývá řádově 10^{-6} s. Detektor proporcionálního počítače je vyobrazen na obrázku 7. Výstupní napěťové impulsy jsou úměrné energii, proto jsou tyto počítače velmi často použity ve spektrometrech. (Kolektiv autorů, 2003)



Obrázek 7: Proporcionální detektor (X Ray Proportional Counter)

1.4.5 Ionizační komory

Ionizační komory (viz obrázek 8), nacházejí hlavní využití v dozimetrii při stanovení veličin expozice, kerry ve vzduchu a dávky. (Gerndt, 1994).

Ionizační komora je tvořena dvěma kovovými destičkami – elektrodami (anodou a katodou), umístěnými v plynném prostředí. Provozní napětí se volí tak, aby ionizační komora pracovala v oblasti nasyceného proudu (asi 150 až 200 V). Za normálních okolností (bez přítomnosti záření) systémem neprochází žádný proud – plyn mezi elektrodami je nevodivý, obvod není uzavřen. Vnikne-li však do prostoru mezi elektrodami ionizující záření, vyráží z původně neutrálních atomů plynu elektrony

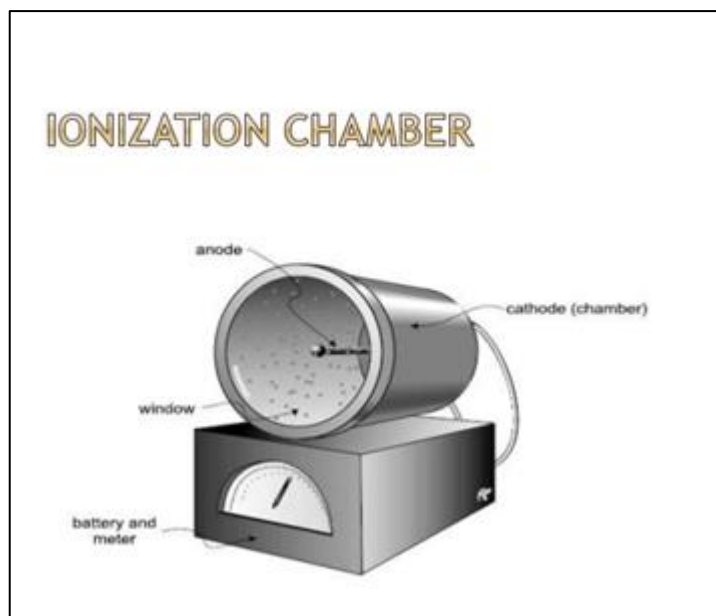
a mění je na kladné ionty. Záporné elektrony putují v elektrickém poli okamžitě ke kladné anodě, kladné ionty se dají do pohybu k záporné katodě – obvodem začne protékat slabý elektrický proud způsobený iontovou vodivostí ionizovaného plynu mezi elektrodami. Proud je přímo úměrný intenzitě ionizujícího záření. (Navrátil a kol., 2010)

Při měření alfa zářičů se vzorek umísťuje přímo do ionizační komory. Vzorky musí být velmi tenké, vzhledem k silné samoabsorpci alfa záření. Zářiče beta se vkládají buď dovnitř ionizační komory, nebo je komora opatřena vstupním okénkem z materiálu o nízkém absorpčním koeficientu. Ionizační proud závisí na tvaru a konstrukci komory a na energetickém spektru zářiče. V plynové náplni komory je absorbována pouze část energie beta záření (dolet beta částic bývá většinou větší, než jsou rozměry komory), zbývající část je pohlcena stěnami komory a k ionizačnímu proudu nepřispívá. (Navrátil a kol., 2010)

U zářičů, které mají velkou aktivitu, jsou k měření ionizačního proudu použity citlivé galvanometry, více se však používají elektrometry. Při provádění měření často zaregistrujeme ionizační proud a to i tehdy, není-li ionizační komora vystavena účinkům ionizujícího záření. Tento proud se nazývá pozadí ionizační komory a je způsoben (Švec, 2005):

- **kosmickým zářením;**
- **radioaktivitou materiálu ionizační komory;**
- **kontaminací komory;**
- **nečistotami, vlhkostí.**

Pozadí se potlačuje stíněním, výběrem vhodného materiálu pro výrobu ionizačních komor, čištěním atd. Velké zastoupení mají v provozech s vysokými teplotami, kde ostatní známé detektory pracovat nemohou. (Švec, 2005)



Obrázek 8: Ionizační komora (Ionization chamber)

1.4.6 Scintilační detektory

Scintilační detektory převádějí absorbovanou energii ionizujícího záření na energii fotonů náležejících zpravidla do viditelné krátkovlnné nebo blízké ultrafialové oblasti spektra. Scintilační detektory patří mezi nejpoužívanější detektory ionizujícího záření. Jejich výhoda spočívá vedle dobrých spektrometrických vlastností také v tom, že detekční médium, scintilátor, může mít různé rozměry a téměř libovolný tvar. Přitom hmotnost scintilačních látek je dostatečně velká, takže lze dosáhnout poměrně velké detekční účinnosti, zejména pro záření gama. Scintilační detektor dává rovněž výstupní signál, jehož další zpracování obvykle nevyžaduje použití citlivých zesilovačů. Vzhledem k rychlé odezvě uplatňují se scintilační detektory tam, kde je rozhodujícím činitelem zpracování velkých četností nebo kde potřebujeme získat informace o časových relacích emise částic, popř. jejich interakcí s hmotou. (Navrátil a kol., 2010)

Jak už bylo uvedeno výše, scintilační detektory mají vysokou detekční účinnost (citlivost), která se často blíží ke 100 %. Další nezanedbatelnou výhodou je to, že mají krátkou mrtvou dobu, což znamená, časový interval od detekce jednoho kvanta, po kterou detektor není schopen detekovat další kvantum. Doba trvání scintilace v krystalu je krátká 10^{-9} sekundy. Doba, po kterou procházejí elektrony a násobí se ve fotonásobiči, je cca 10^{-9} sekundy. Doba formování a zpracování elektrického impulsu

(časová konstanta) v zesilovači a analyzátoru je u cca 10^{-6} sekundy, právě tato (nejpomalejší) doba je v celém spektrometrickém řetězci určující. Mrtvá doba scintilačního detektoru je tedy asi 1 milisekunda, což je téměř 100krát kratší, než u Geiger-Müllerových detektorů. Intenzita světelného záblesku ve scintilátoru je přímo úměrná energii kvanta, která se tam pohltila. Amplitudovou analýzou výstupních impulsů ze scintilačního detektoru můžeme tedy provádět energetickou analýzu detekovaného záření – jeho spektrometrii. (Číhalová, 2018)

Jedním z nejdéle používaných scintilačních materiálů je NaI:Tl⁺. Prvek za dvojtečkou ve vzorci značí aktivátor, v tomto případě thalium. Největší výhodou je technologická dostupnost pro produkci libovolných tvarů a objemů takového krystalu. To umožňuje použití v řadě běžných aplikací. Nevýhodou těchto krystalů je křehkost a hygroskopičnost. Proto tyto krystaly musí být hermeticky uzavřeny, většinou v hliníkovém pouzdře. (Scintilátory kolem nás, 2017)

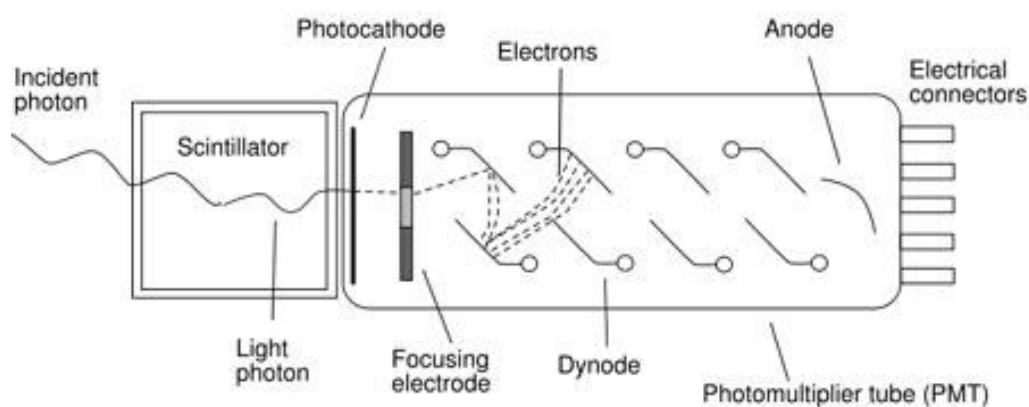
Pro detekci a spektrometrii záření gama se nejvíce používá anorganických scintilátorů. U nich je uváděna relativní energetická rozlišovací schopnost (FWHM %) pro pík ¹³⁷Cs (661,6 keV). Její závislost na energii je úměrná, protože impuls scintilační detekční jednotky je výsledkem řady čistě statistických a vzájemně nezávislých procesů (scintilace, emise fotonů z fotokatody a násobícího procesu v dynodovém systému). Ze široké nabídky různých druhů scintilátorů se v praxi nejvíce užívá (Krejčí, 2002):

- NaI(Tl) – jodid sodný aktivovaný thaliem, který dosahuje nejlepší energetické rozlišovací schopnosti ze všech známých anorganických scintilátorů. Díky malé časové konstantě dosvitu může NaI(Tl) pracovat při vysokých četnostech impulsů. Nevýhoda spočívá v tom, že je hygroskopický a vyžaduje vzduchotěsné pouzdro.
- Méně často se užívá CsI(Tl), hlavně jako bezokénkového detektoru záření X (není hygroskopický). Nevýhodami CsI(Tl) jsou maximum luminiscenčního spektra posunuté do oblasti delších vlnových délek, vhodné pro fotosenzitivní diody, ale nevhodné pro běžně používané fotonásobiče. Relativní luminiscenční účinnost vůči NaI(Tl) a velmi vysoká cena Cs suroviny.
- BGO (Bi₄Ge₃O₁₂) – krátká časová konstanta dosvitu umožňuje provoz při vysokých četnostech impulsů a dosažení dobrého časového rozlišení. Z těchto důvodů jsou krystaly BGO vhodné tam, kde je třeba zmenšit rozměry detekčního

systému. Příkladem jsou antikoincidenční stínění nebo detektory pro karotáž ve vrtech malého průměru v geologii.

Dále mohou být ve spektrometrii použity plastové detektory. U plastového detektoru se jedná o organický scintilační detektor. Plastové detektory mají široké možnosti uplatnění. Pokud jsou provedeny v tenkých vrstvách tak detekují protony, elektrony a beta částice. V případě provedení ve větším objemu jsou vhodné pro měření gama záření. Plastové detektory jsou vhodné nejen v laboratořích, ale i na měření v terénu nebo při výzkumu kosmického záření, popřípadě v radiační ochraně. (Vávra, 2014)

Charakteristikou plastových detektorů je krátká doba dosvitu a vysokou odolnost proti vysoké intenzitě dávky. Mezi výhody plastových scintilátorů patří jejich dobrá propustnost světla v rámci širokého spektra fotonů. Prakticky jsou plastové scintilátory tuhé roztoky aktivátorů v polymeru. Vzhledem k snadnému tvarování se plasty staly velmi používanou formou scintilačních detektorů. Plastové detektory můžeme pořídit v různých velikostech deskových, popřípadě válcových typů. Díky tomu, že plast je relativně velmi levný, jsou často jedinou rozumnou volbou a to v případech, že je zapotřebí velkoobjemové pevné scintilátory. (Vávra, 2014)



Obrázek 9: Scintilační detektor (Stanford: Advanced Optical Ceramics Laboratory)

1.4.7 Polovodičové detektory

Polovodičové detektory jsou založeny na ionizačních účincích v pevných látkách. Vnikne-li ionizující částice do vhodného polovodiče, vytváří v něm ionizační páry elektron – díra, přičemž většina primárních elektronů má tak velkou energii, že způsobuje další nárazovou ionizaci prostředí. Dochází k lavinovitému uvolňování elektronů do vodivostního pásu a tvorbě děr ve valenčním páse, počet uvolněných nosičů náboje tedy závisí na energii primární částice. Přiložíme-li na tento polovodič napětí, pak vlivem elektrického pole se volné nosiče nábojů (elektrony a díry) dají do pohybu v příslušném směru a v připojeném obvodu vznikne proudový impuls, jehož velikost závisí na energii dopadající částice ionizujícího záření. To umožňuje využít polovodičové detektory, jak pro detekci ionizujícího záření, tak pro spektrometrická měření. (Navrátil a kol., 2010)

Energie potřebná k tvorbě jednoho páru elektron – díra je asi 10krát nižší než energie potřebná k tvorbě iontového páru v plynu a asi 50krát nižší než energie nutná k uvolnění jednoho elektronu z fotokatody fotonásobiče. Energetická rozlišovací schopnost polovodičových detektorů je proto značně lepší než rozlišovací schopnost detektorů plynových (ionizační komory, proporcionální detektory, Geiger-Müllerovy počítače) a scintilačních. Nevýhodou polovodičových detektorů je nutnost nepřetržité udržování nízké teploty (kapalný dusík $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$), omezení dosažitelných rozměrů a tedy i menší geometrická účinnost. (Navrátil a kol., 2010)

V současné době známe více druhů polovodičových detektorů jejich velkou výhodou je, že se nechají snadno integrovat s další měřicí elektronikou. Mezi známé polovodičové detektory patří (Štěpánek, 2013):

- Křemíkové detektory – jejich princip objevili už v roce 1984 E. Gatti a Slovák P. Řehák. Nicméně funkční prototypy se začaly používat až o rok později. U základního druhu je dioda bez napájení. Po průletu částice se vytvoří nábojový impuls. Tento impuls se projeví v závislosti na zapojení diody. Pokud je obvod s diodou otevřený, tak na jejich vývodech vzniká napětíový impuls. Bez přiloženého vnějšího napětí vzniká v oblasti přechodu tenká vyprázdňená oblast. Její tloušťku lze ovlivnit dotováním. Citlivý objem takové diody je velmi malý, proto je nízká i účinnost detekce. Toho můžeme však využít při měření záření s vysokou intenzitou. Při tomto měření lze diodu provozovat i v proudovém režimu

a měřit proud protékající obvodem. Velikost proudu nám ukazuje okamžitou hodnotu radiace.

- Germaniové detektory se používaly převážně v 60.–70. letech 20. století. V současnosti jsou vytlačovány HPGe detektory. Díky vyspělosti dnešních technologií lze dosáhnout vysoké čistoty HPGe materiálů. Naprostá většina těchto detektorů se používá v režimu plného vyprázdnění. Díky tomuto velkému vyprázdnění se tento typ detektoru hodí pro měření záření gama. Pokud chceme zvýšit objem vyprázdněné oblasti, musíme zvýšit napětí. Toto zvyšování napětí ovšem nejde neomezeně, protože by mohlo dojít k proražení diody.
- Pixelové detektory jsou schopny podat dvourozměrné informace o ionizujícím záření. Tento detektor nám poskytuje informace, v jakém místě nabitá částice proletěla. Prvním druhem detektorů, který toto umožňoval, byl Ploškový detektor (pad detectors).
- Stripové detektory nám umožňují zlepšení prostorového rozlišení tím, že rozdělíme elektrodu na proužky. Každý jednotlivý proužek tzv. strip musí mít ovšem vlastní elektroniku, což je hlavní limitující faktor jejich rozestupů. Následné prostorové rozlišení závisí na velikosti rozestupů proužků a na typu informace, které z detektorů dostáváme.
- Driftové detektory jsou založeny na principu vytvoření dvou diod na jednom substrátu. Pokud je malé napětí, jsou obě vyprázdněné oblasti oddělené, ale po zvýšení napětí se spojí v jednu. Tím se uprostřed vytvoří tzv. údolí potenciálu. V případě, že přidáme ještě na jednu stranu n-elektrodu, dostáváme driftový detektor.



Obrázek 10: Proporcionální detektor (Semiconductor detectors)

1.5 Spektrometrie gama

Spektrometrie gama je velmi hojně využívána při analýze radioaktivních materiálů, ale také pro identifikaci přítomných izotopů a charakterizaci pole záření. V současné době se ve světě používají statisíce spektrometrů (gamma záření), ať už v akademických či průmyslových laboratořích. (Kolektiv autorů, 2017)

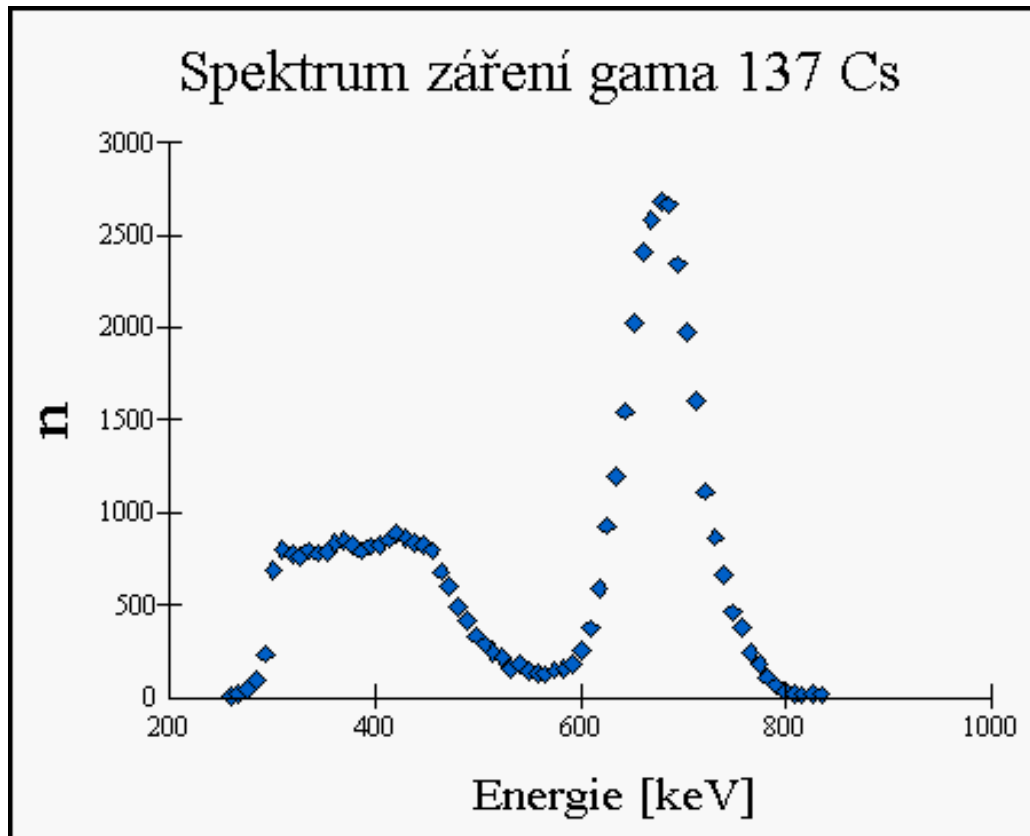
Spektrometrie gama se provádí pomocí spektrometrů ionizujícího záření. Jsou to přístroje, které mají nejen schopnost klasických dozimetřů měřit intenzitu expozice, ale také energii jednotlivých kvant, a ty poté skládat do tzv. energetických spekter, která jsou pro každý radionuklid charakteristická. (Kuna a Navrátil, 2005)

Celý spektrometr pracuje tím způsobem, že ionizační částice například foton gama vletne do scintilátoru, kde interaguje s prostředím třemi způsoby (fotoefekt, Comptonův rozptyl, tvorba elektron-pozitronového páru) a způsobí změnu elektrického potenciálu, která je detekována, zesílena a ve formě elektrického signálu dále zapisována. (Novotný, 2018)

Základní úlohou spektrometrie záření gama je stanovení energie a intenzity jednotlivých diskrétních skupin fotonů záření gama emitovaných zkoumaným radionuklidem či směsí radionuklidů nebo fotonů charakteristického, nebo brzdného X-záření vznikajícího v elektronovém obalu atomů v důsledku jaderných či elektrických procesů. Ve většině spektrometrů se energie a tok fotonů gama nestanovuje přímo, ale

prostřednictvím měření energie a intenzity proudu sekundárních nabitých částic, především elektronů, které jsou produkovány při interakci primárního záření s látkou – citlivým materiálem detektoru. (Ullmann, 2008)

Mezi další úkoly gama spektrometrie patří získávání informací o vnitřní struktuře atomových jader. (Kroupa, 2018)



Obrázek 11: Energetické spektrum záření gama (Spektrum záření gama, 2018)

1.6 Základní rozdíl polovodičové a scintilační spektrometrie

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 mají polovodičové detektory výrazně lepší energetické rozlišení. To je dáno lepší statistikou náboje vytvořeného při interakci záření. U polovodičových detektorů je zapotřebí na

vytvoření elektron-děrového páru přibližně 3–5 eV, oproti tomu u scintilačních detektorů se tato hodnota pohybuje mezi 100 eV až 1 keV 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. Z výše uvedeného textu je zřejmé, že polovodičový spektrometr má mnohem vyšší energetické rozlišení než scintilační spektrometr. Ovšem zásadní nevýhodou polovodičového spektrometrického detektoru je jeho nutnost chlazení. V praxi se často pro chlazení používá například tekutý dusík, kapalné helium a jiná média. (Nastavení detekčních systémů, 2015)

1.7 Transporty materiálu v střeženém pásmu Jaderné elektrárny Temelín

1.7.1 Podmínky transportu materiálu do střeženého prostoru

Do střeženého prostoru (dále jen STP), Jaderné elektrárny Temelín (dále jen ETE), není povoleno transportovat nepovolené předměty a zvířata, případnou výjimku může udělit pouze vedoucí útvaru fyzické ochrany ETE. V případě nejasností o přípustnosti transportu konkrétního předmětu nebo zvířete do jaderného zařízení rozhodne oprávněný zaměstnanec útvaru fyzické ochrany ETE, mimo běžnou pracovní dobu vedoucí směny řídicího centra. Předměty a materiály menších rozměrů nesouvisející s pracovní činností, které nemohou ohrozit osoby nebo životní prostředí, lze odložit do úložných skříněk ve vstupním vestibulu. V celé lokalitě ETE je zákaz odkládání zavazadel nebo jiných předmětů mimo k tomu účelu určená místa. Pokus o vnesení/dovoz nepovolených předmětů nebo pokus o vstup pod vlivem alkoholu nebo jiných návykových látek bude řešen podle platných předpisů s případnou restrikcí podle vnitřních metodik. (Zelenka, 2013)

U vozidel vjíždějících do střeženého prostoru musí být monitorována úroveň kontaminace radioaktivními látkami. Při překročení monitorovacích úrovní jsou řidiči

povinni podřídit se pokynům bezpečnostních pracovníků a vyčkat na rozhodnutí zaměstnance z útvaru radiační ochrany, který stanoví další postup. Před jednorázovým transportem radioaktivních odpadů, radioaktivních materiálů nebo jaderných materiálů do střeženého prostoru musí přepravce předložit správně vyplněné a schválené Povolení k jednorázové přepravě materiálu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení ETE a Průvodní list radioaktivního materiálu. Při opakovaném transportu je přípustné použít formulář Povolení pro průběžnou přepravu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení ETE. (Zelenka, 2013)

1.7.2 Podmínky transportu materiálu ze STP

Osoby odcházející/vyjíždějící ze střeženého prostoru se musí podrobit kontrole vynášených nebo vyvážených zavazadel, předmětů a materiálů. Kontrolou transportu předmětů a materiálů jsou pověřeni bezpečnostní pracovníci na stanovištích vstupů a vjezdů. Vlastnictví nebo oprávnění k vynášení nebo vyvážení předmětů a materiálu musí být doloženo příslušným průvodním dokladem.

Tímto dokladem může být podle lokality:

- Povolení k jednorázové přepravě materiálu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení ETE.
- Povolení pro průběžnou přepravu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení ETE.
- Plastická identifikační karta pro opakované vnášení a vynášení vybraných předmětů vystavená útvarem fyzické ochrany ETE.
- Bezpečnostní nálepka fyzické ochrany pro opakované vnášení a vynášení vybraných předmětů vystavená útvarem fyzické ochrany ETE.

Povolení pro jednorázovou přepravu přes kontrolní stanoviště střeženého prostoru musí být opatřeno autorizací přepravce a souhlasem garanta pro fyzickou ochranu, nebo majitele přepravovaného materiálu/předmětu. Povolení pro průběžnou přepravu musí být navíc opatřeno souhlasem útvaru fyzické ochrany ETE. (Zelenka, 2013)

V případě jednorázového transportu materiálu/předmětu může být v Povolení k jednorázové přepravě materiálu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení při

vstupu/vjezdu do střeženého prostoru nahrazen souhlas garanta pro fyzickou ochranu ověřením bezpečnostním pracovníkem, že byl materiál vnesen a může být tedy i vynesena.

Povolení k jednorázové přepravě materiálu po kontrole odebere bezpečnostní pracovník a předá zástupci fyzické ochrany ETE k archivaci za účelem zpětného dohledávání. Povolení pro průběžnou přepravu musí být vystaveno s jednou kopií, kopie se archivuje v útvaru fyzické ochrany ETE za účelem zpětného dohledávání. (Zelenka, 2013)

Před jednorázovým transportem radioaktivního odpadu, radioaktivního materiálu nebo jaderného materiálu ze střeženého prostoru musí přepravce předložit správně vyplněné a schválené Povolení k jednorázové přepravě materiálu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení ETE podle příslušné lokality a Průvodní list radioaktivního materiálu (aktivního předmětu). Při opakovaném transportu je přípustné použít formulář Povolení pro průběžnou přepravu přes kontrolní stanoviště jaderného zařízení ETE.

Pokud bude u osoby zjištěn zcizený majetek (předmět nebo materiál), nebo majetek bez dokladu, nebude jí umožněno tento majetek transportovat mimo střežený prostor. O zjištěném materiálu sepíše bezpečnostní pracovník záznam do Protokolu o zjištění pronášeného/prováženého materiálu a na základě tohoto protokolu bude neshoda oznámena nadřízenému zaměstnanci dotčené osoby.

Mimořádný pohyb materiálu musí být konzultován s pověřeným zaměstnancem z útvaru fyzické ochrany ETE a musí být dohodnut operativní postup kontroly materiálu.

Silniční i kolejová vozidla vyjíždějící ze střeženého prostoru musí být fyzicky zkontrolována bezpečnostním pracovníkem. Řidič je povinen zastavit ve vymezeném prostoru pro kontrolu vozidla, provést identifikaci osoby a vozidla prostřednictvím osobní i vozidlové identifikační karty a předložit průvodní doklady na vývoz předmětů nebo materiálu. Pokud řidič nepředloží příslušné doklady, není mu umožněno s těmito předměty nebo materiálem opustit střežený prostor. (Zelenka, 2013)

U silničních a kolejových vozidel vyjíždějících ze střeženého prostoru musí být monitorována úroveň kontaminace radioaktivními látkami. Měření se provádí automaticky stacionárním měřicím zařízením při průjezdu vozidla nízkou rychlostí, v případě jeho nefunkčnosti provedou měření zaměstnanci útvaru radiační ochrany,

nebo se vjezd uzavře. Při překročení monitorovacích úrovní jsou řidiči povinni podřídit se pokynům bezpečnostního pracovníka a vyčkat na rozhodnutí zaměstnance útvaru radiační ochrana, který stanoví další postup. (Zelenka, 2013)

Monitorování je cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a zaznamenávání a interpretace výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření. (Koláček, 2015)

1.7.3 Program monitorování

Monitorování je cílené měření veličin charakterizujících ozáření, pole záření nebo radionuklidy a zaznamenávání a interpretace výsledků těchto měření pro účely usměrňování ozáření. (Koláček, 2015)

Naplnění daných požadavků limitování ozáření osob, prokazování optimalizace radiační ochrany, ale i zajištění bezpečnosti pracovišť se zdroji ionizujícího záření, zejména včasného zjištění odchylek od normálního provozu, se provádí pomocí radiačního monitorování. Do monitorovacího procesu nespadá pouze měření veličin, které charakterizují radiační pole a dozimetrických veličin, ale i interpretace a hodnocení ozáření pracovníků a dalších osob. Rozsah v rámci monitorování, hodnocení a ověřování příslušných veličin, parametrů a dalších skutečností důležitých z hlediska radiační ochrany, musí odpovídat rozsahu a způsobu dané praxe, tj. nakládání se zdroji ionizujícího záření či činností vedoucích k ozáření.

Program monitorování obsahuje zpravidla tyto části:

- monitorování pracoviště,
- osobní monitorování,
- monitorování výpustí,
- monitorování okolí.

Program monitorování musí zahrnovat jak monitorování pro běžný provoz (činnost), tak i pro předvídatelné odchylky od běžného provozu, radiační nehody a havárie. (Klener, 2000)

Monitorovací úroveň – hodnota, popř. kritérium, rozhodná pro určité předem stanovené postupy nebo opatření. Překročením monitorovací úrovně se rozumí neplánovaně (neočekávaně) zvýšené hodnoty příslušných měřených veličin nad tuto úroveň. (Kibus, 2018)

Mezi monitorovací úrovně patří (Kibus, 2018):

- **záznamová úroveň** – monitorovací úroveň, při jejímž překročení je údaj zaznamenáván, evidován; odděluje hodnoty zasluhující pozornost od hodnot bezvýznamných.
- **vyšetřovací úroveň** – monitorovací úroveň, jejíž překročení je podnětem k následnému šetření o příčinách a důsledcích zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany.
- **zásahová úroveň** – monitorovací úroveň, jejíž překročení je podnětem k zahájení určité činnosti nebo zavedení opatření ke změně zjištěného výkyvu sledované veličiny radiační ochrany.

1.7.4 Program monitorování pracoviště

Jednou z podmínek, které vyplývají ze zákona č. 263/2016 Sb., Atomový zákon je monitorování radiační situace při provozování jaderného zařízení. Pro splnění této podmínky týkající se pracoviště se zdroji ionizujícího záření, je na jaderné elektrárně Temelín zaveden program monitorování pracoviště, který stanovuje rozsah, frekvenci a metody monitorování radiační situace na pracovištích se zdroji ionizujícího záření. (Kibus, 2018)

Monitorování radioaktivní kontaminace se uskutečňuje na pracovištích s otevřenými zářiči, kdy pracoviště v kontrolovaných pásmech českých jaderných elektráren jsou pracovišti s otevřenými zářiči. Monitorování radioaktivní kontaminace je organizačně a technicky zajištěno tak, aby umožnilo signalizovat provozní odchylky od běžného provozu, nedostatečnou funkci nebo selhání bariér bránících nedovolenému úniku radioaktivních látek nebo ionizujícího záření mimo projektem určená zařízení nebo prostory nebo do životního prostředí. Dále se na českých jaderných elektrárnách provádí pravidelné monitorování ovzduší soustavným měřením objemových aktivit

radionuklidů. Rozsah a obsah provozního monitorování pracovišť českých jaderných elektráren je součástí předprovozních bezpečnostních zpráv. (Urbančík, 2015)

Podrobné požadavky kladené na Program monitorování jsou uvedeny ve vyhlášce č. 422/2016 Sb., o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje. Pro silniční a kolejová vozidla jsou na ETE stanoveny monitorovací úrovně, viz tabulka 1.

Tabulka 1: Kontrola vozidel na hranici střeženého prostoru ETE (Klímek, 2016)

| | | |
|-----|-----------------------------|--|
| 1 | oblast měření | silniční vozidla, kolejová vozidla |
| 2 | cíl měření | Zabránění uvolnění kontaminovaných vozidel nebo předmětů z areálu ETE. |
| 3 | metoda | a) signalizace celkové aktivity gama pevným měřicím zařízením b) měření povrchové kontaminace beta + gama (náhradní měření), ČSN ISO 7503-1 |
| 4 | měřené místo | na hlavním a záložním vjezdu a výjezdu ze STP ETE na vlečkové vrátnici na záložním vjezdu a výjezdu ze STP ETE |
| 5 | měřená veličina | a) celková aktivita gama b) plošná aktivita beta + gama |
| 5a | rozsah měření | a) signalizátor 3,0E+5 Bq b) 1,0E-1 – 1,5E+4 Bq/cm ² |
| 6 | perioda měření | při každém vjezdu/výjezdu ze STP ETE |
| 7 | referenční úrovně | |
| 7a | záznamová | Nestanovena |
| 7a2 | záznam | |
| 7b | vyšetřovací | Nestanovena |
| 7b2 | šetření | - |
| 7c | zásahová | a) 3E+5 Bq při průjezdu vozidla b) 3E-1 Bq/cm ² |
| 7c2 | opatření | zákaz vjezdu/výjezdu vozidla, vyšetření příčiny převýšení |
| 8 | odběr vzorku: | - |
| 9 | použité měřicí zařízení | a) stacionární měřiče aktivity b) přenosné měřiče plošné aktivity |
| 9a | geometrie měření | vozidlo při výjezdu projíždí mezi rámy s detekčním zařízením |
| 10 | náhradní způsob měření | přenosným přístrojem |
| 11 | odpovědný útvar | útvar radiační ochrany provozu v ETE |
| 12 | doplňující údaje - poznámky | Pokud je překročení zásahové úrovně 7c způsobeno přírodními radionuklidy, nevyžaduje se postup dle ČEZ_PP_0205 a ČEZ_ME_0723 a nevystavuje se HOP. |

1.7.5 Monitorování radiační situace vozidel na vjezdu/výjezdu do/z střeženého prostoru

U vozidel vjíždějících popř. vyjíždějících do/z střeženého prostoru elektrárny musí být monitorována úroveň kontaminace radioaktivními látkami. Tento monitoring je zajišťován zařízením, které se skládá ze dvou základních dílů: dvojice detekčních

jednotek a řídicího počítače. Detekční jednotky jsou umístěny podél místa průjezdu sledovaného vozidla, ostatní díly v prostoru obsluhy. Každá detekční jednotka obsahuje plastový scintilační detektor SPD 32 (25 litrů) s fotonásobičem a elektronické díly pro napájení fotonásobiče, a také inteligentní předzesilovač FHT 671A (zpracovává impulsy detektoru a převádí do digitální formy). Řídicí počítač má dvě formy: typ FHT 8000A obsahuje i jednotky alarmu, typ PC – Box je průmyslový počítač a může být doplněn jednotkou alarmu typu SGSII – PCA. Vyhodnocení dat se provádí vlastním programovým vybavením SGS2. exe v řídicí jednotce. Výsledky zpracování případně aktivují zvukový i světelný signál alarmu. Součástí detekčních jednotek jsou IR senzory přítomnosti pro identifikaci průjezdu měřeného vozidla. Obslužný program má název „, SGS2“, v. 2.9.0, revize C. (Klenovský, 2013)

Tabulka 2: Základní metrologické a technické charakteristiky portálového radiometrického systému FHT 1388 S (Klenovský, 2013)

| | | |
|--|-------------------------------------|---------------|
| Plastový detektor SPD 32: Objem detektoru Počet detektorů | 1000x500x50 25 2 | mm l ks |
| Rozměry: detekční jednotka řídicí jednotka | 1920x850x170 270x190x100 | mm |
| Hmotnost: detekční jednotka pouzdro řídicí jednotka | 30 70 (olověné stínění: 60) 7 | kg |
| Napájení | 230 (50Hz) | V |
| Rozsah měřených energií gama záření | nad 40 | keV |
| Okolní prostředí: Detekční jednotka Řídicí jednotka Relativní vlhkost vzduchu | -40 až +60 0 až +40 < 90 | °C % |

1.7.6 Signalizace vozidla na vjezdu/výjezdu do/z střeženého prostoru

V případě signalizace překročení monitorovací úrovně na vjezdu nebo výjezdu ze sledovaného pásma elektrárny jsou vnitřními metodikami podniku popsány činnosti, mezi které patří u řidiče vozidla zejména (Makrlík, 2017):

- řídit se pokyny fyzické ochrany;

- povinnost vyčkat příchodu zaměstnance radiační ochrany provozu ETE a nechat provést dozimetrickou kontrolu a řídit se jejich pokyny.

Zaměstnanec radiační ochrany provozu v ETE se po oznámení pracovníka řídicího centra fyzické ochrany dostaví na vrátnici ETE, kde provede dozimetrickou kontrolu vozidla včetně analýzy přenosným spektrometrem. Dále pak provede šetření (odkud vozidlo přijelo, zda převáží radioaktivní materiály apod.). V případě potvrzení přírodních radionuklidů bude o výsledku monitorování informován směnový mistr radiační kontroly a vozidlo bude moci opustit vymezený prostor. V případě potvrzení kontaminace vozidla, přepravy zdrojů ionizujícího záření případně aktivních předmětů informuje o případu vedoucího útvaru řízení radiačních rizik a vedoucího útvaru radiační ochrany provozu v ETE a dále postupuje podle jejich rozhodnutí. O případu provede záznam do provozního deníku směny. (Makrlík, 2017)

2 Cíl práce a výzkumná otázka

2.1 Cíl práce

Posoudit možnost dohledání a následné identifikace radionuklidu v přepravovaných materiálech zachycených detekčními rámy na hranici střeženého prostoru Jaderné elektrárny Temelín.

2.2 Výzkumná otázka

Dokáže přenosný spektrometr Inspector 1000 detekovat, identifikovat a následně i lokalizovat radionuklidy v přepravovaných materiálech?

3 Metodika výzkumu

Teoretická část práce byla zpracována na základě příslušných právních předpisů, odborné literatury a vnitřní řídicí dokumentace Jaderné elektrárny Temelín. Z analýzy teoretické části práce byla navržena a následně provedena série měření, která simulovala transport aktivních materiálů přes hranice střeženého pásma Jaderné elektrárny Temelín.

Tak abych co nejméně napodobil průjezd rozměrného aktivního nákladu přes stabilní měřicí zařízení střeženého pásma, navrhl jsem soustavu měřících bodů, do kterých byly umístěny zářiče ionizujícího záření. Zvýšená aktivita záření zachycená detekčními rámy stabilního měřícího zařízení byla protokolárně zaznamenána. Z výsledků protokolárních měření byly vypočítány hraniční hodnoty aktivity pro jednotlivé body měření, které způsobí překročení alarmové úrovně. V dalším následném měření jsem tyto vypočtené hodnoty ověřoval tím, že jsem do jednotlivých měřících bodů umísťoval zářiče o různých aktivitách a porovnával s nastavenou alarmovou úrovní. Rozborem výsledků těchto měření jsem stanovil hraniční hodnoty aktivity zdroje ionizujícího záření pro jednotlivé měřicí body, které způsobí překročení alarmové úrovně na stabilním měřícím zařízení. Následně jsem tyto stanovené hraniční hodnoty doměřoval přenosným spektrometrem Inspector 1000, který kromě samotné detekce, dokázal zdroj i identifikovat. Bylo provedeno zhodnocení a porovnání zjištěných výsledků.

3.1 Výběr radionuklidu ^{137}Cs

K realizaci mé diplomové práce byl vybrán radionuklid ^{137}Cs a to z důvodu, že tento radionuklid je jedním z nejběžnějších prvků, které vznikají v primární části jaderné elektrárny a dále je používán jako referenční zářič pro kalibraci většiny radiometrických přístrojů.

3.2 Popis a technická specifikace přístroje Inspector 1000

Jak už bylo uvedeno výše, pro diagnostiku zvýšené aktivity, která způsobí překročení alarmové úrovně na stabilním měřicím zařízení (detekční rámy), byl použit přenosný spektrometr Inspector 1000 (viz obrázek 12).



Obrázek 12: Inspector 1000 (Cannbera, 2017)

Přístroj InSpector 1000 je digitální, mnohokanálový, přenosný analyzátor s jednoduchým ovládáním vhodný pro (Inspector 1000 digitální přenosný MCA, 2003):

- civilní ochranu;
- celní a hraniční kontroly;
- práce s odpadem (se šrotem);
- dozimetrické aplikace, které vyžadují výsledky s uedením specifických izotopů;
- rychlá a rozsáhlá šetření v prostředí (In Situ měření);
- léčebné a proti proliferaci zaměřené postupy;
- sledování jaderných transportů;

InInspector 1000 může být použit pro všechny všechny aplikace v terénu, vyžadující měření dávky a četností, ale také vyhledávání zdrojů ionizujícího záření identifikaci nuklidů měřením jejich aktivity, nabírání a analýzu spekter. Všechny tyto režimy jsou jednoduše volitelné jediným dotekem. (Figalla, 2009)

InInspector 1000 nepřetržitě provádí aktualizaci informací o radiačním riziku: identifikované nuklidy, jejich aktivitu, ale také dávkový příkon. Přístroj InInspector 1000 poskytuje pružnou, pro aplikaci specifickou odpověď s možností pracovat se sondami/detektory různých velikostí a technologií. Technické parametry přístroje jsou uvedeny v následující tabulce 3. Zdroj vysokého napětí a předzesilovač jsou vestavěny do každé sondy. Přístroj automaticky rozpoznává připojení každé inteligentní sondy a vybírá pro tuto sondu správné kalibrace a další parametry. (Inspector 1000 digitální přenosný MCA, 2003)

Jasný barevný a přehledný displej, k tomu dobře uspořádaných šest tlačítek dovoluje uživateli rychlý přístup ke všem režimům a přepnutí z jednoho režimu do druhého pomocí stisku jediného tlačítka. Intuitivní uživatelské rozhraní (navádění uživatele při práci) zajišťuje pružnost v terénních aplikacích. InInspector 1000 je jednoduše použitelný, i bez rozsáhlého zácvičku a zároveň nabízí vysokou úroveň schopností spektrometrické analýzy pro speciální využití. (Inspector 1000 digitální přenosný MCA, 2003)

Podsvětlení displeje se automaticky vypíná po nastaveném intervalu. Aktivace podsvětlení se provede dotekem na libovolné místo displeje. (Figalla, 2018)

Jednoduché použití jediného kliknutí není na závadu výkonosti zpracování spekter zabudované do tohoto přístroje. Tento přístroj poskytuje úroveň výkonosti, který byl dříve dostupný pouze s vysoce sofistikovanými laboratorními systémy na bázi počítačů. Minimalizuje indikace falešně pozitivních výsledků, přičemž zvyšuje citlivost pro nízkoaktivní stíněné zdroje ze směsí zářičů, nebo přirozeně či úmyslně ukryté zdroje radioaktivního záření. (Inspector 1000 digitální přenosný MCA, 2003)

Tabulka 3: Technická specifikace Inspector 1000 (Inspector 1000 digitální přenosný MCA, 2003)

| | |
|-----------------------|---|
| Detektor | NaI(Tl, GM GM TRUBICE – Integrální Gaiger – Müllerova trubice pro vysoké dávkové příkony (četnosti). Předzesilovač NaI – integrovaný v sondě. |
| Měřicí rozsah | 10 nSv/h - 10 mSv/h (GM) |
| Energetický rozsah | 50 keV - 3 MeV |
| Citlivost (1 μSv/h) | 1300 imp/s |
| Rozměry (mm) | 190x165x64 |
| Hmotnost | 2,4 kg |
| Baterie | Typ – Li baterie ze dvou kusů; s možností opakovaného nabíjení. Kapacita – 2,3 Amp.hod |
| Životnost baterií (h) | 12 |
| Provozní teplota | Rozsah: -10 až +55 °C |
| Vlhkost | Až do 80 % nekondenzující |
| Ráz (úder) | Konstrukce odolná proti rázu (nevztahuje se na detektor). Může odolat pádu z výšky 1 m na beton |
| Stupeň ochrany | Splňuje specifikace IP 54 (ochrana proti prachu a stříkající vodě) |
| SS Napájení/nabíjení | 12V, 2A stejnosměrný výstup; universální adaptér |
| Displej | Barevný LCD panel se zadním osvětlením |

3.3 První ověřovací měření na účinnost stabilních detekčních rámu na výjezdu z ETE

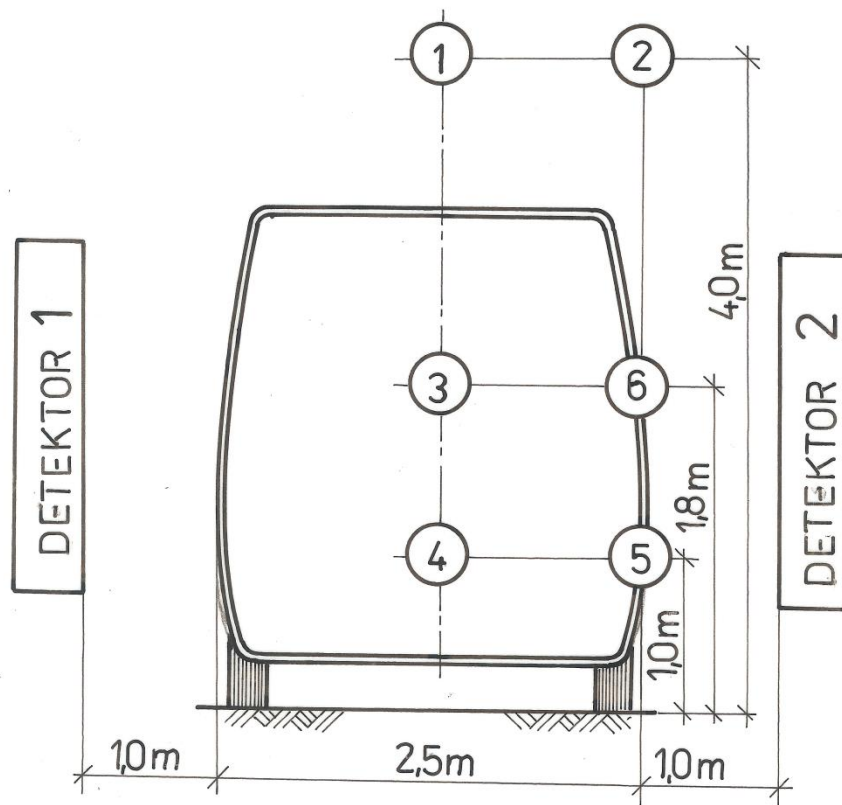
Ve své práci jsem se zaměřil výlučně na výjezd silničních vozidel, které překračují hranice střeženého pásma elektrárny. Prvním měřením, kterým jsem zahájil práci, bylo měření účinnosti a úhlové závislosti stabilních měřících detektorů umístěných na

výjezdu ze střeženého prostoru ETE. Pro toto měření jsem použil vozidlo Mercedes Vito (obrázek 13), které svými rozměry můžeme zařadit do kategorie malých nákladních vozů.



Obrázek 13: Použitý vůz Mercedes Vito s přípravkem na střeše (zdroj vlastní)

Pokus probíhal tím způsobem, že jsem bodový zářič ^{137}Cs o aktivitě ke dni měření 3 982 kBq umísťoval do referenčních bodů uvnitř a vně automobilu, tak jak znázorňuje obrázek 14.



Obrázek 14: Rozmístění měřících bodů (zdroj vlastní)

Bod 1 je střed automobilu ve výšce 4 m, bod 2 bok automobilu ve výšce 4 m, bod 3 je střed automobilu ve výšce 180 cm, bod 4 střed automobilu ve výšce 100 cm, bod 5 bok automobilu ve výšce 100 cm a bod 6 bok automobilu ve výšce 180 cm. Všechny výšky bodů měřeny od úrovně terénu (silnice).

Zvolením těchto výšek bodů jsem simuloval průjezd návěsu kamionu, který má právě tyto rozměry a to maximální výšku 4 m, dále pak výšku ložné plochy 1 m.

Se zářičem v těchto měřících bodech jsem projížděl detekčními rámy na výjezdu ze střeženého pásma ETE. Ve všech případech došlo k překročení alarmových úrovní na stabilním měřicím zařízení. U stabilního měřicího zařízení dojde při překročení nastavených alarmových úrovní k akustické signalizaci a dále k automatickému tisku protokolu o překročení alarmové úrovně (viz obrázek 15). V tomto protokolu jsou uvedeny hodnoty kanálů jednotlivých detektorů a dále pak hodnota součtového kanálu

v impulsích za sekundu a procentuální vyjádření překročení alarmu. Dle informací servisní firmy, tohoto stabilního měřícího zařízení bylo zjištěno, že alarmová úroveň má hodnotu 7 % nad úroveň přirozeného pozadí. To bylo současně v servisním módu softwaru ověřeno.

Pomocí procentuálního vyjádření překročení alarmu byly následně dopočítány hraniční hodnoty aktivity pro jednotlivé body měření, které způsobí překročení alarmové úrovně. Tyto aktivity jsem poté ověřoval ve svém druhém měření.

Jak už bylo uvedeno výše pomocí procentuálního vyjádření překročení alarmu na stabilním měřícím zařízení při průjezdu se zářičem o aktivitě 3 982 kBq, byly následně dopočítány přibližné hraniční hodnoty (aktivita) pro jednotlivé měřící body, při kterých dojde k překročení alarmových úrovní. Výpočet probíhal tímto způsobem:

Nastavená signalizační úroveň/ ve skutečnosti překročená úroveň * aktivita použitého zdroje.

3.4 Druhé měření

Předchozí výpočtem stanovené hraniční hodnoty jsem poté ověřoval v reálných průjezdech měřícím stabilním zařízením kdy, jsem do jednotlivých měřících bodů umísťoval zářiče o různých aktivitách a sledoval překročení či nepřekročení alarmové úrovně. Následným rozborem a porovnáním hodnot (procentuálního překročení alarmové úrovně) která je 7 % nad úroveň přirozeného pozadí jsem po porovnání s protokoly stanovil nejbližší hraniční hodnoty pro jednotlivé měřící body.

Tabulka 4: Zářiče použité k měření (zdroj vlastní)

| Použité zářiče Cs ¹³⁷ | Počáteční aktivita (kBq) | Aktivita ke dni měření (kBq) |
|----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 | 51,06 | 49,2 |
| 2 | 54,64 | 53,7 |
| 3 | 181,1 | 177,8 |
| 4 | 221,8 | 217,8 |
| 5 | 428,2 | 420,5 |
| 6 | 615,9 | 604,8 |

Alarm - datum protokolu: 20.10.17 - 18:29:37

| Čís. | Det1 | Det1Cs | Det1Co | Det2 | Det2Cs | Det2Co | Det1+2 | # | -Alarm- | - Chyba - |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|----|---------|-------------|
| 01 | 4736,0 | 14,7 | 0,9 | 6058,6 | 12,5 | 1,1 | 10792,0 | 51 | 1101101 | 0000000 1 1 |
| 02 | 4695,5 | 14,0 | 1,3 | 6070,3 | 12,6 | 1,8 | 10770,5 | 51 | 1101101 | 0000000 1 1 |
| 03 | 4742,0 | 13,1 | 1,6 | 6002,8 | 12,6 | 1,9 | 10767,8 | 51 | 1101101 | 0000000 1 1 |
| 04 | 4693,8 | 13,1 | 1,8 | 5889,7 | 12,9 | 2,2 | 10491,5 | 51 | 1101101 | 0000000 1 1 |
| 05 | 4641,5 | 12,8 | 1,9 | 6022,0 | 13,1 | 2,4 | 10681,4 | 51 | 1101101 | 0000000 1 1 |
| 06 | 4607,9 | 13,4 | 2,0 | 6124,0 | 13,0 | 2,5 | 10768,0 | 51 | 1101101 | 0000000 1 0 |
| 07 | 4690,0 | 13,4 | 2,1 | 6048,0 | 12,9 | 2,6 | 10748,8 | 51 | 1101101 | 0000000 1 0 |
| 08 | 4647,1 | 12,9 | 2,3 | 6083,0 | 12,5 | 2,7 | 10740,2 | 51 | 1101101 | 0000000 1 0 |
| 09 | 4738,5 | 12,8 | 2,3 | 6100,4 | 13,2 | 2,7 | 10826,5 | 51 | 1101101 | 0000000 1 0 |
| 10 | 4699,6 | 12,7 | 2,3 | 6016,9 | 13,9 | 2,8 | 10706,0 | 51 | 1101101 | 0000000 1 0 |

Kontrola radiace materiálu zásilky
Nákladová vrátnice ETE výjezd
Version 2.530

Protokol o alarmu : 000014

Datum : 20.10.17 18:29:37

Popis vozu :

Dopravní firma:

Čís.vozu:

Dodavatel materiálu:

Výsledek monitorování stacionárn.detektory (ips)

| Detektor- název | Hodnota (ips) | Pozadí (ips) | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|--------------------|------------------|-----------------|----------------------|---------------|--------------|-------|
| Det1 | 4742,0 | 2627,3 | 80,4 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 14,7 | 8,2 | 79,2 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 2,3 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 6124,0 | 3556,5 | 72,1 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 13,9 | 8,6 | 61,6 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 2,8 | 3,3 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 10826,5 | 6139,5 | 76,3 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Výsledek monitorování odstaveného vozidla dozimetrem (ips)

| Pozadí | Nákl. auto | Korba | Materiál |
|--------|------------|-------|----------|
| | | | |

Poznámka :

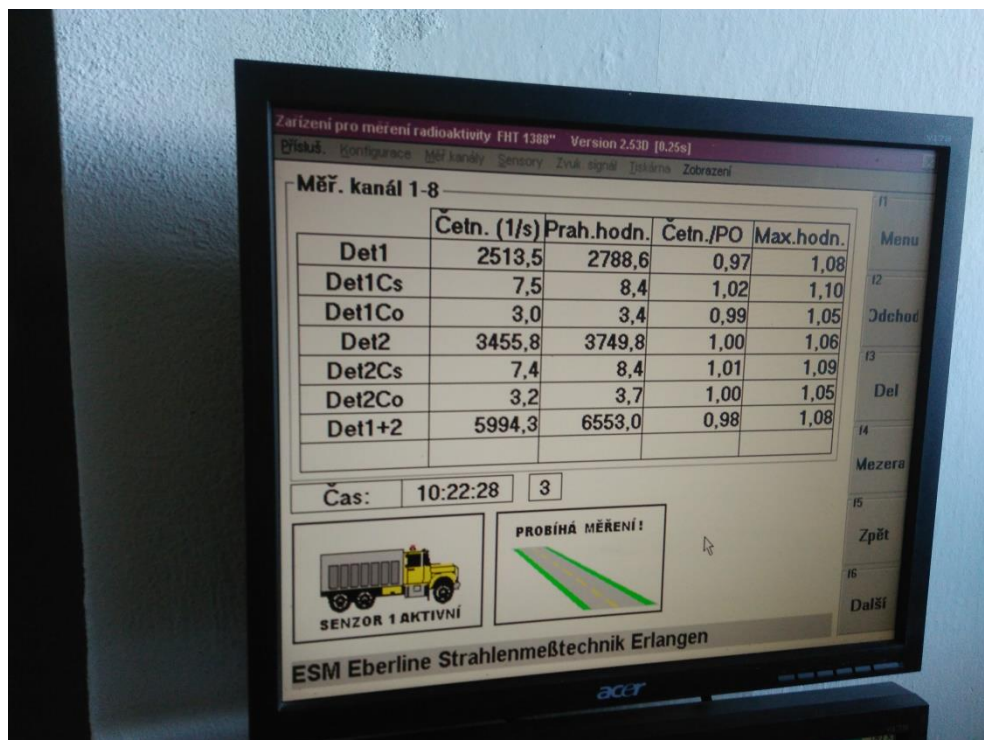
Podpis:

Obrázek 15: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

3.5 Stanovení měřicího bodu pro přenosný spektrometr k následnému dohledávání a identifikaci radionuklidů

Vzhledem k tomu, že svojí prací chci ověřit možnosti přenosného spektrometru Inspector 1000 při detekci, lokalizaci a identifikaci radionuklidů, které vyvolají překročení alarmové úrovně na stabilním měřicím zařízení, stanovil jsem si bod měření, ve kterém by obsluha (dozimetrista) přivolaná k řešení překročení alarmové úrovně umístila přenosný spektrometr, a spustila spektrometrickou analýzu. Tento bod měření

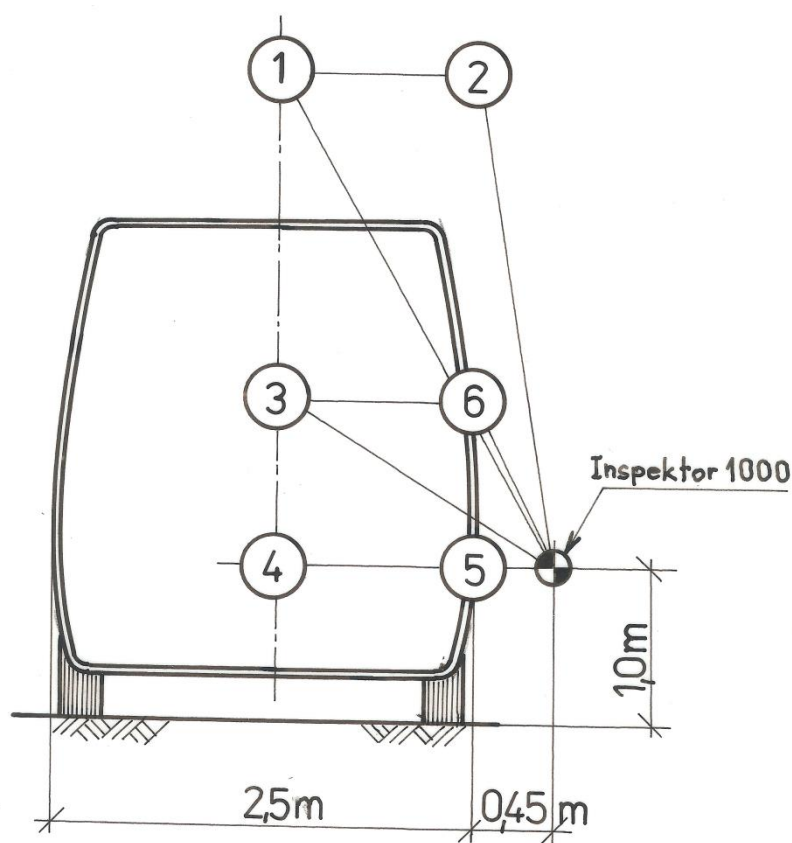
byl stanoven dle dispozičního řešení výjezdu ze STP a dále pak s ohledem na snadnou manipulaci s přístrojem. Stanovený bod je 45 cm vzdálen od boku automobilu a je ve výšce 1 m od vozovky. V případě, že by se jednalo o dlouhý automobil popř. kamion či jeho návěs, a nebylo by zřejmé ve které chvíli (části vozidla) došlo k signalizaci překročení alarmové úrovně, tak v tomto případě má dozimetrista možnost u obsluhy stabilního měřícího zařízení sledovat obrazovku, na které jsou uvedeny hodnoty impulsů od přírodního pozadí, a dále pak nárůst způsobený přepravovaným radionuklidem viz obrázek 16. Ve chvíli indikace nejvyššího počtu impulsů je zřejmé, že radionuklidy (zdroje IZ), které tento zvýšený počet impulsů způsobily, jsou v sektoru mezi detektory stabilního měřícího zařízení. Další možností jak odhadnout přibližnou lokaci zdroje ionizujícího záření v rozměrném nákladu pomocí obrazovky stabilního měřícího zařízení je přepnutí do režimu grafu, který přesně zobrazí nejvyšší počet naměřených impulsů v čase. A tím je také možno přibližně lokalizovat polohu zdroje v nákladu.



Obrázek 16: Obrazovka stabilního měřícího zařízení (zdroj vlastní)

3.6 *Dopočítání vzdálenosti jednotlivých měřících bodů od přenosného spektrometru a stanovení relativní citlivosti přístroje Inspector 1000*

V dalším kroku svého projektu jsem dopočítal vzdálenosti jednotlivých měřících bodů k uvažovanému umístění přenosného spektrometru před spuštěním spektrometrické analýzy. Tyto vzdálenosti jsou uvedeny v tabulce 7. Dále byla stanovena relativní citlivost pro jednotlivé body měření a to pomocí vztahu A/r^2 kdy nejnižší koeficient znamená nejhorší možnou variantu pro detekci daného zářiče.



Obrázek 17: Schéma uvažovaného umístění přenosného spektrometru (zdroj vlastní)

3.7 *Měření přenosným spektrometrem*

Dle výsledků, které jsou shrnuty v tabulce 7 bylo zjištěno, že nejhorší variantou pro detekci zářiče je měřící bod č. 2 a to aktivita 604,8 kBq ve vzdálenosti 3,03 m od přenosného spektrometru. Proto jsem v dalším měření ověřoval možnost detekce a následné identifikace radionuklidu v této měřící geometrii.

1. Zářič ^{137}Cs o aktivitě ke dni měření 604,8 kBq byl umístěn ve vzdálenosti **3,03 m** od detektoru přenosného spektrometru. Následně byla na spektrometru zahájena spektrometrická analýza (nabírání impulsů) vnitřní metodikou doporučenou dobu 600s. Poté byla provedena série měření v této měřicí geometrii, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.
2. Další série měření probíhala stejným způsobem tak, že jsem zářič o aktivitě 604,8 kBq umístil ve vzdálenosti navýšené o 0,5 m tedy **3,53 m** od detektoru přenosného spektrometru a spustil spektrometrickou analýzu.
3. V třetím měření jsem opět zvýšil vzdálenost o 0,5 m při použití stejného zářiče. Celková vzdálenost zářiče od detektoru přenosného spektrometru byla **4,03 m**.

Vzhledem k tomu že nejhorší varianta zachytitelnosti daného zářiče byla stanovena koeficientem relativní citlivosti a následným praktickým měřením ověřena. Bylo v dalších měření zřejmé, že v ostatních měřících bodech bude ^{137}Cs jednoznačně identifikován. Zajímalo mě tedy, za jakou dobu bude výše uvedený radionuklid nalezen v energetickém spektru. Pro ověření časů zachycení aktivity u ostatních měřících bodů byla provedena série měření.

4 Výsledky

4.1 První ověřovací měření na účinnost stabilních detekčních rámů na výjezdu z ETE

Vypočtené hraniční hodnoty pro překročení alarmové úrovně na stabilním měřicím zařízení pro jednotlivé měřicí body jsou uvedeny na obrázku 18–23.

Bod 1 – $7/80,4 \cdot 3982 = 346,7 \text{ kBq}$

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 4742,0 | 2627,3 | 80,4 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 14,7 | 8,2 | 79,2 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 2,3 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 6124,0 | 3556,5 | 72,1 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 13,9 | 8,6 | 61,6 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 2,8 | 3,3 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 10826,5 | 6139,5 | 76,3 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Obrázek 18: Protokol o překročení alarmu v měřicím bodě č. 1 (zdroj vlastní)

Bod 2 – $7/83 \cdot 3982 = 335,8 \text{ kBq}$

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 3951,1 | 2745,3 | 43,9 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 11,2 | 8,5 | 31,7 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 3,0 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 6749,0 | 3686,4 | 83,0 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 13,9 | 8,9 | 56,1 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 3,5 | 3,3 | 6,0 % | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 10610,1 | 6397,6 | 65,8 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Obrázek 19: Protokol o překročení alarmu měřicí bod č. 2 (zdroj vlastní)

Bod 3 – $7/141,7 \cdot 3982 = 196.7$ kBq

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 6620,9 | 2738,5 | 141,7 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 16,4 | 8,4 | 95,2 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 2,5 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 8524,0 | 3677,3 | 131,8 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 15,7 | 8,8 | 78,4 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 3,1 | 3,3 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 15213,1 | 6384,1 | 138,2 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Obrázek 20: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 3 (zdroj vlastní)**Bod 4 – $7/122 \cdot 3982 = 228.5$ kBq**

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 6014,3 | 2708,0 | 122,0 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 14,8 | 8,2 | 80,4 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 3,1 | 3,0 | 3,3 % | 0 | | 1 |
| Det2 | 7215,3 | 3647,9 | 97,7 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 14,5 | 8,7 | 66,6 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 3,4 | 3,3 | 3,0 % | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 12872,0 | 6329,8 | 103,3 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Obrázek 21: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 4 (zdroj vlastní)**Bod 5 – $7/291,1 \cdot 3982 = 95,8$ kBq**

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 4726,8 | 2721,4 | 73,6 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 12,9 | 8,3 | 55,4 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 2,4 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 14360,0 | 3671,3 | 291,1 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 24,9 | 8,7 | 186,2 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 2,9 | 3,3 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 19204,0 | 6367,8 | 201,5 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Obrázek 22: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 5 (zdroj vlastní)

Bod 6 – $7/346,7 \cdot 3982 = 74 \text{ kBq}$

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 4725,8 | 2719,5 | 73,7 % | 1 | | 1 |
| Det1Cs | 11,9 | 8,3 | 43,3 % | 1 | | 1 |
| Det1Co | 3,1 | 3,0 | 3,3 % | 0 | | 1 |
| Det2 | 16376,0 | 3665,7 | 346,7 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 21,3 | 8,7 | 144,8 % | 1 | | 1 |
| Det2Co | 3,4 | 3,3 | 3,0 % | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 21043,5 | 6360,8 | 230,8 % | 1 | | 1 |

- Alarm umělá radioaktivita -

Obrázek 23: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 6 (zdroj vlastní)

Výše uvedeným výpočtem byly stanoveny hraniční hodnoty pro překročení alarmové úrovně na stabilním měřícím zařízení viz tabulka 5.

Tabulka 5: Vypočtené hraniční hodnoty (zdroj vlastní)

| Měřící bod č. | Vypočtená hraniční hodnota (kBq) pro překročení alarmové úrovně |
|---------------|---|
| 1. | 346,7 |
| 2. | 335,8 |
| 3. | 196,7 |
| 4. | 228,5 |
| 5. | 95,8 |
| 6. | 74 |

4.2 Druhé měření

V měřícím bodě č. 1 při použití zářiče o aktivitě 822,6 kBq, byl vyvolán alarm a to při překročení úrovně přírodního pozadí o 9 % přičemž tj. o 2 % více než je nastavena alarmová úroveň na stabilním měřícím zařízení. Přesné sestavení zářiče pro 7% překročení nebylo možné realizovat z provozních důvodů elektrárny, ani nelze

k ověřování přesné hodnoty zapůjčit optimální skladbu zářičů. Všechny hodnoty, pro daný bod měření ze stabilního zařízení viz obrázek 24.

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 2839,3 | 2676,6 | 6,0 % | 0 | | 1 |
| Det1Cs | 8,0 | 7,4 | 8,1 % | 0 | | 1 |
| Det1Co | 3,0 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 3979,0 | 3649,7 | 9,0 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 8,3 | 7,2 | 15,2 % | 0 | | 1 |
| Det2Co | 3,2 | 3,2 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 6853,8 | 6283,9 | 9,0 % | 1 | | 1 |

Obrázek 24: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

V měřicím bodě č. 2 při použití zářiče o aktivitě 604,8 kBq byl vyvolán alarm a to při překročení úrovně přírodního pozadí o 8,4 % tj. o 1,4 % více než je nastavena alarmová úroveň na stabilním měřicím zařízení viz obrázek 25.

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 2768,9 | 2665,9 | 3,8 % | 0 | | 1 |
| Det1Cs | 8,3 | 7,3 | 13,6 % | 0 | | 1 |
| Det1Co | 3,0 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 3946,4 | 3637,6 | 8,4 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 8,0 | 7,1 | 12,6 % | 0 | | 1 |
| Det2Co | 3,2 | 3,2 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 6584,5 | 6265,1 | 5,0 % | 0 | | 1 |

Obrázek 25: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

V měřicím bodě č. 3 při použití zářiče o aktivitě 402,5 kBq byl vyvolán alarm a to při překročení úrovně přírodního pozadí o 7,8 % tj. o 0,8 % více než je nastavena alarmová úroveň na stabilním měřicím zařízení viz obrázek 26.

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 2847,7 | 2663,1 | 6,9 % | 0 | | 1 |
| Det1Cs | 8,1 | 7,3 | 10,9 % | 0 | | 1 |
| Det1Co | 3,0 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 3875,7 | 3632,2 | 6,7 % | 0 | | 1 |
| Det2Cs | 8,0 | 7,1 | 12,6 % | 0 | | 1 |
| Det2Co | 3,2 | 3,1 | 3,2 % | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 6750,3 | 6257,7 | 7,8 % | 1 | | 1 |

Obrázek 26: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

V měřícím bodě č. 4 při použití zářiče o aktivitě 402,5 kBq byl vyvolán alarm a to při překročení úrovně přírodního pozadí o 8,7 % tj. o 1,7 % více než je nastavena alarmová úroveň na stabilním měřícím zařízení viz obrázek 27.

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 2817,2 | 2664,3 | 5,7 % | 0 | | 1 |
| Det1Cs | 8,1 | 7,3 | 10,9 % | 0 | | 1 |
| Det1Co | 3,0 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 3827,8 | 3518,7 | 8,7 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 8,1 | 7,1 | 14,0 % | 0 | | 1 |
| Det2Co | 3,2 | 3,1 | 3,2 % | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 6792,6 | 6257,0 | 8,5 % | 1 | | 1 |

Obrázek 27: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

V měřícím bodě č. 5 při použití zářiče o aktivitě 280,9 kBq byl vyvolán alarm a to při překročení úrovně přírodního pozadí o 8,7 % tj. o 1,7 % více než je nastavena alarmová úroveň na stabilním měřícím zařízení viz obrázek 28.

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 2631,8 | 2645,7 | | 0 | | 1 |
| Det1Cs | 7,1 | 7,2 | | 0 | | 1 |
| Det1Co | 2,3 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 3744,0 | 3442,0 | 8,7 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 7,2 | 7,1 | 1,4 % | 0 | | 1 |
| Det2Co | 2,8 | 3,1 | | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 6267,6 | 6241,7 | 0,4 % | 0 | | 1 |

Obrázek 28: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

V měřícím bodě č. 6 při použití zářiče o aktivitě 226,6 kBq byl vyvolán alarm a to při překročení úrovně přírodního pozadí o 10,1 % tj. o 3,1 % více než je nastavena alarmová úroveň na stabilním měřícím zařízení viz obrázek 29.

Výsledek monitorování stacionár.detektory (ips)

| Detektor-název | Hodnota [ips] | Pozadí [ips] | Pozadí pozadí v % | Alarm Stav | ODL uSv/h | Vagon |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|------------|-----------|-------|
| Det1 | 2674,6 | 2659,2 | 0,5 % | 0 | | 1 |
| Det1Cs | 8,0 | 7,3 | 9,5 % | 0 | | 1 |
| Det1Co | 3,0 | 3,0 | | 0 | | 1 |
| Det2 | 3902,9 | 3542,0 | 10,1 % | 1 | | 1 |
| Det2Cs | 7,9 | 7,1 | 11,2 % | 0 | | 1 |
| Det2Co | 3,2 | 3,1 | 3,2 % | 0 | | 1 |
| Det1+2 | 6537,7 | 6239,0 | 4,7 % | 0 | | 1 |

Obrázek 29: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)

V tabulce 6 je uveden přehled jednotlivých (ověřených) hraničních hodnot v měřících bodech.

Tabulka 6: Porovnání vypočtených a skutečných hodnot aktivity (zdroj vlastní)

| Měřící bod | Výpočtem odhadnutá aktivita (kBq) pro překročení alarmové úrovně u stabilního měřícího zařízení | Hraniční (skutečná) aktivita (kBq) pro překročení alarmové úrovně u stabilního měřícího zařízení |
|------------|---|--|
| Bod č. 1 | 346,7 | 822,6 |
| Bod č. 2 | 335,8 | 604,8 |
| Bod č. 3 | 196,7 | 402,5 |
| Bod č. 4 | 228,5 | 402,5 |
| Bod č. 5 | 95,8 | 280,6 |
| Bod č. 6 | 74 | 226,9 |

4.3 *Dopočítání vzdálenosti jednotlivých měřících bodů od přenosného spektrometru a stanovení relativní citlivosti přístroje Inspector 1000*

V tabulce 7 jsou uvedeny vzdálenosti měřících bodů od uvažovaného umístění přenosného spektrometru.

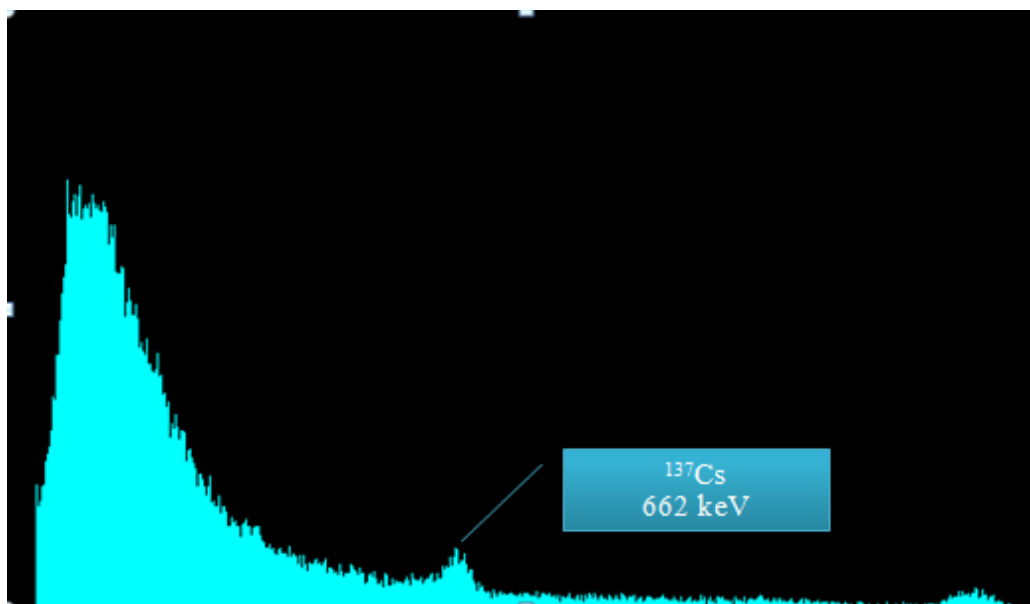
V metodice uvedeným výpočtem jsem ověřil, že nejhorší variantou pro detekci zářiče je v rámci druhého bodu aktivita 604,2 kBq na vzdálenost 3,03 m viz tabulka 7.

Tabulka 7: Dopočítané vzdálenosti k bodu měření stanoveného pro přenosný spektrometr a určení relativní citlivosti (zdroj vlastní)

| Měřící bod | Aktivita (kBq) | Vzdálenost (m) | Relativní citlivost (k) |
|------------|----------------|----------------|-------------------------|
| 1 | 822,6 | 3,45 | 69 |
| 2 | 604,8 | 3,03 | 66 |
| 3 | 402,5 | 1,9 | 111,5 |
| 4 | 402,5 | 1,7 | 139,2 |
| 5 | 280,6 | 0,45 | 1403 |
| 6 | 226,9 | 0,92 | 267 |

4.4 *Výsledky měření přenosným spektrometrem*

1. Zářič o aktivitě 604,8 kBq ve vzdálenosti 3,03 m. Už po 196 sekundách identifikoval přenosný spektrometr radionuklid ^{137}Cs ve svém energetickém spektru viz obrázek 30.



Obrázek 30: Identifikován radionuklid ^{137}Cs ve spektru (zdroj vlastní)

Tabulka 8: Série měření (aktivita - 604,8 kBq) ve vzdálenosti 3,03 m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ^{137}Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 196 |
| 2 | Ano | 191 |
| 3 | Ano | 298 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 228 |

Měřením bylo zjištěno, že přenosný spektrometr Inspector 1000 je schopen opakovaně zachytit přítomnost radionuklidu ^{137}Cs v této měřící geometrii, v průměrném čase 228 sekund.

2. V měřící geometrii 604,8 kBq na vzdálenost 3,53 m zaznamenal opakovaně spektrometr přítomnost ^{137}Cs ve svém energetickém spektru a jednoznačně ho identifikoval. Doba potřebná k identifikaci radionuklidu byla v tomto případě v prvním měření 400 sekund. Poté proběhla série měření výsledky v tabulce 9.

Tabulka 9: Série měření (aktivita 604,8 kBq) ve vzdálenosti 3,53m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 400 |
| 2 | Ano | 458 |
| 3 | Ano | 397 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 418 |

Taktéž měřením uvedeným v tabulce 9 bylo prokázáno, že přenosný spektrometr je schopen identifikovat ¹³⁷Cs i v této měřicí geometrii a to v průměrném čase 418 sekund.

3. V této měřicí geometrii nebyl ani po 600 sekundách identifikován radionuklid ¹³⁷Cs, proto jsem provedl dalších dvě měření pokaždé s negativním výsledkem. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Série měření (aktivita 604,8 kBq) ve vzdálenosti 4,03m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba měření (sekund) |
|--------------|---------------------------------------|----------------------|
| 1 | Ne | 600 |
| 2 | Ne | 600 |
| 3 | Ne | 600 |

Pomocí výše uvedených měření jsem ověřil, že přenosný spektrometr Inspector 1000 není schopen identifikovat zářič o aktivitě 604,8 kBq na vzdálenost 4,03m. Z výše uvedeného je zřejmé, že limitní zachycení uvedené aktivity leží v rozmezí 3,53 – 4,03m.

Tabulky 11 až 16 znázorňují průměrné časy identifikace zdroje ionizujícího záření v jednotlivých měřicích bodech.

Měřící bod 1

Tabulka 11: Série měření (aktivita 822,6 kBq) ve vzdálenosti 3,45m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 258 |
| 2 | Ano | 279 |
| 3 | Ano | 312 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 283 |

Měřící bod 2

Tabulka 12: Série měření (aktivita 604,8 kBq) ve vzdálenosti 3,03m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 196 |
| 2 | Ano | 191 |
| 3 | Ano | 210 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 199 |

Měřící bod 3

Tabulka 13: Série měření (aktivita 402,5 kBq) ve vzdálenosti 1,9m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 82 |
| 2 | Ano | 78 |
| 3 | Ano | 81 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 80 |

Měřící bod 4

Tabulka 14: Série měření (aktivita 402,5 kBq) ve vzdálenosti 1,7m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 52 |
| 2 | Ano | 40 |
| 3 | Ano | 41 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 44 |

Měřící bod 5

Tabulka 15: Série měření (aktivita 280,6 kBq) ve vzdálenosti 0,45 m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 10 |
| 2 | Ano | 9 |
| 3 | Ano | 10 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 10 |

Měřící bod 6

Tabulka 16: Série měření (aktivita 226,9 kBq) ve vzdálenosti 0,92 m (zdroj vlastní)

| Měření číslo | ¹³⁷ Cs nalezeno ve spektru | Doba identifikace (s) |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| 1 | Ano | 18 |
| 2 | Ano | 19 |
| 3 | Ano | 17 |
| Průměrný čas identifikace v energetickém spektru | | 18 |

5 Diskuse

Cílem mé diplomové práce bylo posoudit možnosti dohledání a následné identifikace radionuklidů v přepravovaných materiálech zachycených detekčními rámy na hranici střeženého prostoru Jaderné elektrárny Temelín. Za tímto účelem bylo nedříve provedeno měření, kdy zářič ^{137}Cs o aktivitě ke dni měření 3 982 kBq, byl postupně umísťován do stanovených měřících bodů 1 až 6. Následným rozbořem a výpočtem z hodnot obsažených v protokolech (protokoly o překročení alarmové úrovně ze stabilního měřícího zařízení), byly vypočteny neblížší hraniční hodnoty pro překročení alarmové úrovně v jednotlivých měřících bodech. Ty byly poté ověřeny v praktickém měření.

Dalším krokem bylo dopočítání vzdálenosti mezi jednotlivými měřícími body a uvažovaným umístěním přenosného spektrometru před spuštěním spektrometrické analýzy. Po zjištění vzdálenosti byl vypočten i koeficient relativní citlivosti spektrometru. Dle výsledků tohoto výpočtu byla zjištěna nejhorší varianta pro zachycení zářiče tj. 604,8 kBq na vzdálenost 3,03 m.

Shrnutím a porovnáním výsledků provedených praktických měření bylo prokázáno, že pro stanovený měřící bod 1, což je střed automobilu ve výšce 4 m nad úrovní terénu (vozovky) je neblížší hraniční hodnotou pro překročení alarmové úrovně stabilního měřícího zařízení na výjezdu ze střeženého pásma elektrárny aktivita zářiče ^{137}Cs 822,6 kBq. Při následném doměřování tohoto měřícího bodu přenosným spektrometrem Inspector 1000 bylo prokázáno, že v měřící geometrii, která je 822,6 kBq na vzdálenost 3,45 m (vzdálenost měřícího bodu 1 k uvažovanému umístění přenosného přístroje), dojde vždy k detekci daného zářiče a k následné identifikaci. Průměrná doba potřebná k identifikaci zářiče činila 283 sekund.

V druhém měřícím bodě, který je umístěn na boku automobilu ve výšce 4 m nad úrovní vozovky je hraniční hodnotou pro překročení alarmové úrovně aktivita 604,8 kBq. I v tomto případě při následném doměřování přenosným spektrometrem došlo vždy k detekci zářiče a i jeho následné identifikaci. Průměrný čas identifikace v tomto měřícím bodě byl 199 sekund. Vzdálenost zářiče k uvažovanému umístění spektrometru byla 3,03 m.

Ve třetím měřícím bodě (střed automobilu ve výšce 180 cm nad vozovkou) byla zjištěna hraniční hodnota aktivity pro překročení alarmové úrovně na stabilním měřícím zařízení a to 402,5 kBq. I v této měřící geometrii 402,5 kBq na vzdálenost 1,9 m byl vždy záříč bezpečně detekován a v průměrném čase 80 sekund i identifikován.

V čtvrtém měřícím bodě (střed automobilu ve výšce 100 cm nad vozovkou), byla opět měřením zjištěna hraniční hodnota aktivity pro překročení alarmové úrovně o velikosti 402,5 kBq. Následné doměření této aktivity na vzdálenost 1,7 m od přenosného spektrometru bylo s tímto výsledkem. Ve všech měřeních detekován záříč ^{137}Cs a i identifikován a to v průměrném čase 44 sekund.

V pátém měřícím bodě (bok automobilu ve výšce 100 cm nad vozovkou) zjištěna hraniční hodnota pro překročení alarmové úrovně 280,6 kBq. I při této měřící geometrii 0,45 m při použití výše jmenované aktivity došlo ve všech případech měření přenosným spektrometrem k detekci daného záříče, a v průměrném čase 10 sekund i k jeho identifikaci.

V posledním šestém měřícím bodě (bok automobilu ve výšce 180 cm nad úrovní vozovky) byla měřením zjištěna hraniční hodnota pro překročení alarmové úrovně na stabilním měřícím zařízení 226,9 kBq. Následným doměřením přenosným spektrometrem v geometrii 0,92 m od záříče ověřeno, že ve všech případech dojde jak k detekci záříče, tak i k jeho následné identifikaci v průměrném čase 18 sekund.

Rozdíl mezi očekávanými a skutečně naměřenými hodnotami byl způsoben zpracováním signálů z detektorů. Software stabilního měřícího zařízení používá časový filtr pro hlazení statistických fluktuací odezvy detektorů výrobcem označovaný jako ADF (Advanced Digital Filter). Ten při vyšších četnostech impulsů měřených při první sadě s aktivitou 3 982 kBq zajistí dosažení maximální hodnoty odezvy detektorů v průběhu sledovaného intervalu 10 sekund. Tento deseti sekundový interval je standardní časový interval pro vyhodnocení alarmu. V případě nižších četností impulsů těsně nad alarmovou hranicí je vyžadován delší časový interval pro dosažení maximální hodnoty. To znamená, že pro překročení alarmu při průjezdu vozidla je potřeba vyšší aktivita nebo zastavení vozidla mezi detektory.

Na stanovenou výzkumnou otázku diplomové práce - Dokáže přenosný spektrometr Inspector 1000 detekovat, identifikovat a následně i lokalizovat radionuklidy

v přepravovaných materiálech?, můžeme na základě provedených měření a analýz odpovědět, že přenosný spektrometr Inspector 1000 je schopen v navržených měřících bodech radionuklidu v přepravovaných nákladech detekovat, a současně i identifikovat. Pro následnou přesnou lokalizaci radionuklidu v uvažovaném nákladu je zapotřebí využít mód dávkového příkonu, který je méně citlivý než spektrometrický mód, tudíž je zapotřebí dostat se k radionuklidu na výrazně kratší vzdálenost. Tato varianta lokalizace radionuklidu v nákladu je možná pouze tehdy, umožňuje-li to charakter nákladu, například jednotlivé palety s nákladem uvnitř vozu.

6 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na využití přenosného spektrometru Inspector 1000 k detekci, identifikaci a následné lokalizaci radionuklidů v přepravovaných materiálech, které překračují střežené pásmo Jaderné elektrárny Temelín. Pro dosažení tohoto cíle byla navržena soustava měření a výpočtů ke stanovení hraničních hodnot aktivity zdrojů ionizujícího záření, které způsobí překročení alarmových úrovní na detekčních rámech stabilního měřícího zařízení. Výsledky měření a výpočtů prokázaly, že přenosný spektrometr Inspector 1000 je schopen účinně detekovat výše uvedené zdroje ionizujícího záření s to s vyšší účinností než stabilní měřící zařízení. Dále v porovnání s detekčními rámy stabilního měřícího zařízení dokáže zdroje ionizujícího záření identifikovat a přesněji lokalizovat.

Diplomová práce bude poskytnuta útvaru radiační ochrany Jaderné elektrárny Temelín, jako podklad pro upřesnění metod měření a jejich zavedení do programu monitorování. Předpokládám, že splněním cíle této diplomové práce, bude pro oddělení radiační ochrany provozu Jaderné elektrárny Temelín přínosem.

7 Seznam literatury

BENEŠ, Jiří, Pravoslav STRÁNSKÝ a František VÍTEK, 2005. *Základy lékařské biofyziky*. Praha: Karolinum. ISBN 80-246-1009-4.

BROUNKOVÁ A KOL., 2007. *Vstupní školení do Jaderné elektrárny Temelín*. Temelín.

BROUNKOVÁ, Dana, 2007. *Radiační ochrana: Pro vybrané pracovníky služeb významných z hlediska radiační ochrany*.

Canberra [online], 2017. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: http://www.canberra.com/products/hp_radioprotection/inspector-1000.asp

ČEZ, A.S., 2004. *Ionizující záření* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k22.htm>

ČEZ, A.S., 2018. *Působení JE na okolí* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/jaderna-energetika/jaderne-elektrarny-cez/ete/technologie-a-zabezpeceni/11.html#3>

ČÍHALOVÁ, Jana, 2018. *RIA instrumentace*. Brno.

Emergency Preparedness and Response [online], 2014. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://emergency.cdc.gov/radiation/isotopes/cesium.asp>

FIGALLA, Radim, 2009. *Interní zpráva ETE: ČEZ. JE Temelín*.

FIGALLA, Radim, 2018. *Ústní sdělení*. Temelín.

Flicker [online], [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/bionerd/3003241488>

Fyzmatik [online], 2009. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/639-druhy-radioaktivniho-zareni-song.html>

Gaiger counter radiation detector [online], [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/Geiger-counter>

GERNDT, Josef, 1994. *Detektory ionizujícího záření*. Praha: ČVUT. ISBN 80-01-01229-8.

HÁLOVÁ, Helena, 2012. *Aktuální stav kontaminace zemědělských půd radiocesiem CS 137*. Brno. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Prof.RNDr. Michael Pöschl CSc.

Inspector 1000 digitální přenosný MCA: Uživatelský manuál, 2003. In: .

Ionization chamber [online], [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/anasyess1/ionization-chamber>

KIBUS, Miroslav, Radim FIGALLA a Dušan HANZAL, 2018. *Program monitorování pracoviště: Systémový provozní předpis OTS628*. Temelín.

KLENER, Vladislav, 2000. *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Azin. ISBN 80-238-3703-6.

KLENOVSKÝ, Pavel, 2013. *Certifikát o schválení typu měřidla: portálový radiometrický systém (typ FHT 1388 S)*. Třebíč.

KLÍMEK, František a Dušan HANZAL, 2016. *Program monitorování pracoviště: ČEZ_ME_0456r09*. Temelín.

KOLÁČEK A KOL., 2009. *Radiační ochrana v ETE: Učební text pro přípravu personálu*. Brno.

KOLÁČEK A KOL., 2017. *Radiační ochrana*. Brno.

KOLÁČEK, Bohumil, 1998. *Radiační bezpečnost a radiační kontrola: Text pro základní skupiny RBRK a pro vstup do KP*. Brno.

KOLÁČEK, Bohumil, 2015. *Radiační ochrana: Pro vybrané pracovníky velmi významných zdrojů*. Brno.

KOLÁČEK, Petr, 2007. *Radiační ochrana: Pro vybrané pracovníky velmi významných zdrojů*. Brno.

KOLEKTIV AUTORŮ, 2003. *Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření: Sborník učebních textů*. Ostrava. ISBN 80-02-01529-0.

KOLEKTIV AUTORŮ, 2017. *Jaderná fyzika* [online]. 2017 [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/sajdlp/tjch1.doc>

KOLEKTIV AUTORŮ, 2017. *Užití ionizujícího záření*.

KREJČÍ, Vladimír, 2002. *Scintilační detektory*.

KROUPA a DVORSKÝ, 2018. Spektrometrie záření gama. *Spektrometrie záření gama* [online]. [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/5633240/>

KUNA, Pavel a Leoš NAVRÁTIL, 2005. *Klinická radiobiologie*. Praha: Manus. ISBN 80-86571-09-2.

LÁZNA, Tomáš, 2015. *Měření záření gama: Bakalářská práce*. Brno.

LEPORELO, 2018. *Radiometrické přístroje* [online]. [cit. 2018-05-03]. Dostupné z: <https://leporelo.info/radiometricke-pristroje>

MAKRLÍK, Jaroslav a Juraj PAPAN, 2017. *Režimová opatření radiační ochrany v ETE: ČEZ_ME_0433r20*. Temelín.

Nastavení detekčních systémů, 2015. *FJFI ČVUT* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.sujb.cz/.../Metodika_MONTE_Priloha_V_Nastaveni_detekcnich_systemu..

NAVRÁTIL A KOL., 2010. *Radiobiologie* [online]. 2010 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/4-kapitola/43/433.html>

NAVRÁTIL, Leoš a Jozef ROSINA, 2005. *Medicínská biofyzika*. Praha: Grada. ISBN 8024711524.

NOVOTNÝ, 2018. *Spektrometrie gama záření*. Praha: ČVUT.

Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření [online], 2018. 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:4mOh2CC9ycIJ:https://www.uochb.cz/web/document/cms_library/758.pdf+&cd=13&hl=cs&ct=clnk&gl=cz&client=firefox-b-ab

ÖSTERREICHER, Jan a Jiřina VÁVROVÁ, 2003. *Přednášky z radiobiologie*. Hradec Králové.

Radioactivity.eu.com [online], 2018. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Caesium_137.htm

Scintilátory kolem nás, 2017. 1. Praha 1: Středisko společných činností AV ČR. ISSN 2464-6245.

Semiconductor detectors [online], [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: https://www.google.cz/search?q=semiconductor+detectors&client=firefox-b-ab&dcr=0&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjW0-zbsZzZAhUJGOwKHatMC7MQ_AUICigB&biw=1680&bih=913#imgrc=VQkZ2kroamFtWM:

Spektrum záření gama [online], 2018. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/webtools_b/ad1.htm

Stanford: Advanced Optical Ceramics Laboratory [online], [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://web.stanford.edu/group/scintillators/scintillators.html>

STARÝ, Jan, 1987. *Cvičení z jaderné chemie* [online]. Praha [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: www2.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/Cs_PV.pdf.

SÚRO [online], 2018. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.suro.cz/cz/radiacni-ochrana/zakladni-pojmy>

ŠIMEK, Pavel, 2002. *Detekce ionizujícího záření*.

ŠTĚPÁNEK, Petr, 2013. *Polovodičové detektory ionizujícího záření*. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Václav Kraus.

ŠVEC, Jiří, 2005. *Radioaktivita a ionizující záření* [online]. Ostrava [cit. 2018-02-10]. Vysoká škola báňská.

Techmania science center, 2018. *Techmania science center* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [Techmania science center](http://edu.techmania.cz/cs/fyzika/atomy-castice/detekce-ionizujiciho-zareni) [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: edu.techmania.cz/cs/fyzika/atomy-castice/detekce-ionizujiciho-zareni

ÚLEHLA, Ivan, Zbyšek TRKA a Michal SUK, 1990. *Atomy, jádra, částice: celostátní vysokoškolská učebnice pro stud. matematicko-fyzikálních a přírodověd. fakult*. Praha: Academia. ISBN 80-200-0135-2.

ULLMANN, Vojtěch, 2008. *AstroNuklFyzika* [online]. [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>

United States Enviromental Protection Agency [online], 2017. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radionuclide-basics-cesium-137>

URBANČÍK, Libor, 2015. *Jaderná a radiační bezpečnost provozu českých jaderných elektráren*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-5238-1.

VÁVRA, Jiří, 2014. *Porovnání plastového scintilačního detektoru s detektorem NaI(Tl) jejich užitných a dozimetrických vlastností*. České Budějovice.

Vyhláška č. 422/2016 Sb.: Vyhláška o radiační ochraně a zabezpečení radionuklidového zdroje, 2016. In: *Sbírka zákonů ČR*. ročník 2016.

X Ray Proportional Counter [online], [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://physicsopenlab.org/2017/07/23/x-ray-proportional-counter-2/>

Zákon č. 263/2016, Atomový zákon. In: *Sbírka zákonů*. Česká republika, částka 102,

ZELENKA, Jiří, 2013. *Zajišťování plnění bezpečnostních požadavků FO JM a JZ: ČEZ_ME_0899r01*. Temelín.

8 Seznam zkratek

| | |
|----------|-------------------------------|
| ETE | Jaderná elektrárna Temelín |
| STP | střežené pásmo elektrárny |
| FO | fyzická ochrana |
| RO | radiační ochrana |
| SPD 32 | plastový scintilační detektor |
| FHT 671A | inteligentní předzesilovač |
| G-M | Geiger-Müller počítač |
| IZ | ionizující záření |
| HWR | těžkovodní reaktor |

9 Seznam obrázků

- Obrázek 1: Fotoefekt (Navrátil, 2005)
- Obrázek 2: Comptonův rozptyl (Navrátil, 2005)
- Obrázek 3: Tvorba elektron pozitronových párů (Navrátil, 2005)
- Obrázek 4: zářič ^{137}Cs (Flicker)
- Obrázek 5: Blokové schéma radiometrické aparatury (Kolektiv autorů, 2003)
- Obrázek 6: Geiger-Müller počítač (Gaiger counter radiation detector)
- Obrázek 7: Proporcionální detektor (X Ray Proportional Counter)
- Obrázek 8: Ionizační komora (Ionization chamber)
- Obrázek 9: Scintilační detektor (Stanford: Advanced Optical Ceramics Laboratory)
- Obrázek 10: Proporcionální detektor (Semiconductor detectors)
- Obrázek 11: Energetické spektrum záření gama (Spektrum záření gama, 2018)
- Obrázek 12: Inspector 1000 (Cannbera, 2017)
- Obrázek 13: Použitý vůz Mercedes Vito s přípravkem na střeše (zdroj vlastní)
- Obrázek 14: Rozmístění měřících bodů (zdroj vlastní)
- Obrázek 15: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 16: Obrazovka stabilního měřícího zařízení (zdroj vlastní)
- Obrázek 17: Schéma uvažovaného umístění přenosného spektrometru (zdroj vlastní)
- Obrázek 18: Protokol o překročení alarmu v měřícím bodě č. 1 (zdroj vlastní)
- Obrázek 19: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 2 (zdroj vlastní)
- Obrázek 20: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 3 (zdroj vlastní)
- Obrázek 21: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 4 (zdroj vlastní)
- Obrázek 22: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 5 (zdroj vlastní)
- Obrázek 23: Protokol o překročení alarmu měřící bod č. 6 (zdroj vlastní)
- Obrázek 24: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 25: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 26: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 27: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 28: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 29: Protokol o překročení alarmové úrovně (zdroj vlastní)
- Obrázek 30: Identifikován radionuklid ^{137}Cs ve spektru (zdroj vlastní)

10 Seznam tabulek

Tabulka 1: Kontrola vozidel na hranici střeženého prostoru ETE (Program monitorování pracoviště)

Tabulka 2: Základní metrologické a technické charakteristiky portálového radiometrického systému FHT 1388 S (Klenovský, 2013)

Tabulka 3: Technická specifikace Inspector 1000 (Inspector 1000 digitální přenosný MCA, 2003)

Tabulka 4: Zářiče použité k měření (zdroj vlastní)

Tabulka 5: Vypočtené hraniční hodnoty (zdroj vlastní)

Tabulka 6: Porovnání vypočtených a skutečných hodnot aktivity (zdroj vlastní)

Tabulka 7: Dypočítané vzdálenosti k bodu měření stanoveného pro přenosný spektrometr a určení relativní citlivosti

Tabulka 8: Série měření (aktivita - 604,8 kBq) ve vzdálenosti 3,03 m (zdroj vlastní)

Tabulka 9: Série měření (aktivita 604,8 kBq) ve vzdálenosti 3,53m (zdroj vlastní)

Tabulka 10: Série měření (aktivita 604,8 kBq) ve vzdálenosti 4,03m (zdroj vlastní)

Tabulka 11: Série měření (aktivita 822,6 kBq) ve vzdálenosti 3,45m (zdroj vlastní)

Tabulka 12: Série měření (aktivita 604,8 kBq) ve vzdálenosti 3,03m (zdroj vlatní)

Tabulka 13: Série měření (aktivita 402,5 kBq) ve vzdálenosti 1,9m (zdroj vlastní)

Tabulka 14: Série měření (aktivita 402,5 kBq) ve vzdálenosti 1,7m (zdroj vlastní)

Tabulka 15: Série měření (aktivita 280,6 kBq) ve vzdálenosti 0,45 m (zdroj vlastní)

Tabulka 16: Série měření (aktivita 226,9 kBq) ve vzdálenosti 0,92 m (zdroj vlastní)