

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA

**Přístroje radiační ochrany na novém jaderném
zdroji**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor práce: Lukáš Leština
Studijní program: Ochrana obyvatelstva
Studijní obor: Ochrana obyvatelstva se zaměřením na CBRNE
Vedoucí práce: Mgr. Renata Havránková, Ph.D.
Datum odevzdání práce: 4. května 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené formě 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 kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 4. května 2012

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je zmapování trhu s přenosnými přístroji radiační ochrany, vytipování vhodných přístrojů, které nabízejí výrobci specializující se na oblast měřící jaderné elektroniky, jako jsou Thermo Scientific, Canberra Packard a VF Černá Hora a následné vzájemné porovnání za účelem nalezení provozněoptimálního řešení přenosných přístrojů pro měření radiačních veličin na novém jaderném zdroji.

Na začátku práce je čtenář seznámen se vznikem ionizujícího záření, fyzikálními principy, na jejichž základě přístroje pracují a radiačními veličinami, kterými přístroje interpretují výsledné hodnoty. Je zde popsán současný stav přenosné měřící techniky, která je používána pracovníky radiační ochrany na jaderné elektrárně Temelín. Popis přístrojů obsahuje základní informace, fotografie a jejich technické specifikace.

Na základě zkušeností z provozu jaderné elektrárny je vypracována metodika s kritérii pro výběr nových přenosných přístrojů. Vytipované přístroje z rozsáhlé nabídky výrobců jaderné elektroniky jsou popsány v samostatné kapitole této práce.

Diskuze se zaměřuje na uživatelský komfort a vhodnost použití přístrojů vycházející z reálných podmínek jaderné elektrárny Temelín. Pozornost je také věnována univerzálnosti přístrojů a jejich možnosti rozšíření o doplňující zařízení, jako jsou externí sondy příkonu dávkového ekvivalentu, povrchové kontaminace nebo sond pro měření příkonu dávkového ekvivalentu neutronů. Přístroje by měly co nejlépe odpovídat potřebám pracovníků radiační ochrany, kteří by tak mohli co nejefektivněji naplňovat program monitorování na novém jaderném zdroji.

Abstract

The aim of the bachelor thesis is mapping the market with portable radiation protection devices offered by manufacturers specialized in nuclear measurement electronics, like Thermo Scientific, Canberra Packard and VF Černá Hora and subsequent comparison of for the purpose of finding operationally optimal solution of portable instrument for measurement of radiation quantities on a new nuclear source.

At the beginning the reader is familiarized with occurrence of ionizing radiation, physical principles the instruments are based on and the radiation quantities by which the instruments interpret the final values. There is a description of the present state of portable measurement technologies used by radiation protection staff at Temelín Nuclear Plant. The description includes basic information, photos and specifications. A methodology with criteria of selection of new portable instruments was elaborated upon experience with the plant operation. Selected instruments from the large range by nuclear electronics manufacturers are described in an extra chapter.

The discussion focuses on user comfort and suitability of the instruments based on the real situation of Temelín Nuclear Plant. Attention is also paid to versatility of the instruments and possibilities of their extension by additional devices like external probes of dose equivalent input, surface contamination or probes measuring dose equivalent input of neutrons. The instruments should correspond to the needs of the radiation protection staff as much as possible, so as they are able to fulfil the programme of monitoring on a new nuclear source in the most efficient manners.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí práce Mgr. Renatě Havránkové, Ph.D. za metodické vedení a cenné rady v průběhu mé práce.

Obsah

1	Současný stav	10
1.1	Historické pozadí	10
1.2	Radioaktivita a ionizující záření	11
1.2.1	Radioaktivní přeměna s emisí α částic	11
1.2.2	Radioaktivní přeměna s emisí β částic	12
1.2.3	Vznik γ záření	12
1.2.4	Radioaktivní přeměna s emisí neutronových částic	12
1.3	Fyzikální principy ionizujícího záření	13
1.3.1	Ionizující záření	13
1.3.2	Ionizace	13
1.3.3	Excitace - deexcitace	14
1.3.4	Absorpce	15
1.4	Detekce ionizujícího záření	15
1.5	Detektory přenosných přístrojů radiační ochrany	17
1.5.1	Plynové detektory - úvod	17
1.5.2	Geiger-Müllerův detektor	19
1.5.3	Proporcionální detektor	20
1.5.4	Scintilační detektor	22
1.6	Operační veličiny přenosných přístrojů radiační ochrany	25
1.6.1	Aktivita A	25
1.6.2	Prostorový dávkový ekvivalent $H^*(10)$	26

1.6.3	Kerma K	27
1.7	Aktuálně používané přístroje radiační ochrany	27
1.7.1	Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Thermo Scientific	27
2	Cíle práce a hypotéza	34
2.1	Cíle práce	34
2.2	Hypotéza	34
3	Popis metodiky	35
3.1	Výběr přenosných přístrojů pro měření radiačních veličin	35
3.2	Kritéria výběru přístrojů	35
3.3	Kritéria pro osobní porovnání	35
4	Výsledky	37
4.1	Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Thermo	37
4.1.1	RadEye - PRD-ER	37
4.1.2	RadEye – B20-ER	38
4.1.3	RadEye - AB100	39
4.1.4	Rozšiřující sonda FHZ 742 pro FH 40GL-10	40
4.2	Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Berthold	41
4.2.1	LB 124	41
4.2.2	LB 6411 neutronová sonda s přístrojem LB 123 UMo	42
4.3	Přístroje pro měření radioaktivity výrobce VF Černá Hora	43
4.3.1	PAM 350	43
4.4	Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Canberra Packard	44

4.4.1	Colibri TTC	44
4.4.2	Širokorozsahová gama sonda STTC	45
4.4.3	Alfa/Beta sonda SAB-100	46
5	Diskuze	47
6	Závěr	57
7	Seznam zdrojů	58
8	Klíčová slova	61

Úvod

Každé pracoviště, kde se vykonávají radiační činnosti, podléhá striktním pravidlům vycházejícím ze zákona č. 18/1997 Sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření tzv. atomový zákon a také 23 prováděcími právními předpisy. Z pohledu této práce je významným prováděcím předpisem vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně ve znění vyhlášky č. 499/2005 Sb.

Při nakládání se zdroji ionizujícího záření nebo otevřenými zářiči je očekávaným jevem kontakt s ionizujícím zářením a radioaktivní látkou. Nevhodně zvolené postupy nebo chybně vyhodnocené nebezpečí s sebou přinášejí určitá bezpečnostní rizika ohrožující zdraví lidí a životní prostředí. Pro zhodnocení rizik a přijmutí dostatečných ochranných opatření, je správné vyhodnocení, interpretace naměřených výsledků a druhu ionizujícího záření v uvažovaném pracovním prostředí. Další neméně důležitá je informace o zdroji ionizujícího záření a formě, v jaké se nachází. Na základě výše uvedených poznatků lze v praxi velmi dobře dosáhnout optimalizace dávek při řešení radiační ochrany, jejímž podstatným cílem je bezesporu úplné zamezení deterministických účinků ionizujícího záření a minimalizace na co nejmenší možnou míru účinků stochastických. Jak je známo, vše v našem světě je měřitelné a nejinak je tomu i u ionizujícího záření. Již krátce po objevu ionizujícího záření se začaly vyvíjet i přístroje k jeho detekci a měření, stejně tak jako byly pozorovány a zkoumány biologické účinky záření.

1 Současný stav

1.1 Historické pozadí

Ionizující záření ať již kosmické nebo z přírodních zdrojů doprovází naši planetu po celou dobu její existence. Logicky tak ionizující záření působí i na vše živé, včetně člověka samotného. Bez povšimnutí tomu tak bylo až do doby před necelými 120–ti lety, kdy byly Wilhelmem Conradem Rentgenem objeveny a vědecké společnosti představeny paprsky X, a následující rok Henri Becquerelem objevena radioaktivita. Důsledkem byl rozsáhlý rozvoj vědecké činnosti zaměřené na paprsky X, respektive radioaktivitu. Postupně byly objeveny a popsány druhy záření tak, jak je známe dnes. Těmi nejznámějšími jsou záření alfa (α), beta (β), gama (γ), X (rentgenové záření) a neutronové záření [1].

Záření je forma energie, která může být částečně nebo zcela předána vhodné látce, a tak vyvolat ionizující účinek. Velmi brzo bylo zaznamenáno, že kromě fotografických, ionizačních a scintilačních účinků má záření i jiné účinky. Od prvních dnů práce s radiací se začaly vyskytovat i jeho biologické účinky. V dubnu 1896 Daniel popsal závažné kožní reakce, ke kterým došlo po dlouhodobé expozici rentgenovým zářením. Další podobná pozorování byla také učiněna jinými rentgenovými vyšetřovateli. Avšak ještě před tím, než bylo objeveno rentgenové záření, již bylo zaznamenáno jedno z rentgenových popálení! E. Grubbemu se při práci s katodovou vybíjecí trubicí, v létě 1895, udělaly na rukách zvláštní kožní dermatitidy, které si on ani jeho lékař nedokázali vysvětlit [1].

Dalším pozorovaným fyziologickým účinkem, po objevu rádia, byl rychlý útlum leukocytů v krvi po podání radioaktivních kapalin. Také vyšlo najevo, že slepí lidé měli pocit světla, když byly jejich oči vystaveny rádiovému zdroji, důvodem je fluorescence v oční čočce na sítnici při expozici gama zářením [1].

V roce 1928 na druhém mezinárodním kongresu radiologie byla založena Mezi-

národní komise pro radiologickou ochranu (ICRP), původně pod názvem Mezinárodní rentgenový a rádiový výbor pro ochranu (ICRU). Tento orgán přijal vedoucí úlohu při stanovení zásad radiační bezpečnosti [1].

Již dnes víme, že přístroje pro detekci ionizujícího záření existovaly poměrně brzy. Termoluminiscenční jev byl prvně popsán v 17. století, v 18. století byl vynalezen elektroskop W. Gilbertem a do nejznámější podoby elektroskopu se zlatými lístky upraven A. Bennetem. Účinky objevené na počátku výzkumné práce s rentgenovým zářením a radioaktivitou látek zůstávají základním principem pro detekci záření až do dnešní doby. Detekční přístroje byly v průběhu let mnohokrát vylepšeny [1].

1.2 Radioaktivita a ionizující záření

Radioaktivita je neovlivnitelná přeměna nestabilních atomových jader, která je provázena emisí jedné nebo více částic a popřípadě ještě kvanta elektromagnetického záření γ . Tato přeměna vede k dosažení energeticky výhodnějšího stavu [2, 3].

Problematika radioaktivity je velice rozsáhlá a byla by nad rámec této práce, proto si níže nastíníme pouze vznik radioaktivních částic, které jsou měřeny na jaderné elektrárně.

1.2.1 Radioaktivní přeměna s emisí α částic

Částice α vzniká při rozpadu těžkých jader, jejich nukleonové číslo je větší než 140, výjimečně se vyskytuje i u lehčích jader. Při rozpadu je emitováno jádro hélia, které obsahuje dva protony a dva neutrony. Mateřský radionuklid bude tedy mít o tyto dva protony a neutrony méně a v periodické tabulce se posune o dvě místa doleva [3].

1.2.2 Radioaktivní přeměna s emisí β částic

Vznik β částic je nejrozšířenějším typem přeměny a mají největší praktický význam. Přibližně 80 % všech radionuklidů podléhá přeměnám β . Při β přeměnách se nemění počet nukleonů v jádře, ale dochází pouze k úpravě jejich poměru v jádře. Jedná se pouze o izobarické přeměny. Pod radioaktivní přeměnu β jsou zahrnovány tři různé procesy [3]:

Rozpad β^- - vzniká při přebytku neutronů v jádře, přičemž se v jádře přemění neutron na proton (p), elektron (β^-), a elektronové antineutrino ($\bar{\nu}_e$). Elektron je emitován ven z jádra i atomu a dále podléhá řadě interakčních procesů .

Rozpad β^+ - vzniká při nedostatku neutronů v jádře. Proton se přemění na neutron (n), pozitron (β^+) a elektronové neutrino (ν_e). Stejně jako u elektronu i pozitron opouští jádro a atom a podléhá interakčním procesům.

Elektronový záchyt - vzniká u radionuklidů s nedostatkem neutronů. Při tomto procesu proton v jádře zachytí a pohltí elektron z atomového obalu a přemění se na neutron a elektronové neutrino (ν_e). Z elektronového obalu je nejčastěji zachycen elektron z nejbližší K-vrstvy, lze se tedy setkat i s názvem K-záchyt.

1.2.3 Vznik γ záření

Záření γ je průvodním zářením ostatních radioaktivních rozpadů. Při rozpadu bývá jádro zpravidla excitováno do vyšších energetických hladin a deexcitací se vyzařuje energie ve formě záření γ [3].

1.2.4 Radioaktivní přeměna s emisí neutronových částic

Neutrony jsou za normálních okolností vázané v jádrech silnou interakcí spolu s protony. Některá těžká jádra v oblasti uranu a transuranů, kromě radioaktivity α , vykazují ještě jeden specifický, ale méně častý druh radioaktivní přeměny. Jedná se

o samovolné rozštěpení těžkého mateřského jádra na dvě lehčí jádra. Kromě těchto výsledných jader se při štěpení emitují i neutrony, v počtu zpravidla dvou až tří. Další možností vzniku neutronů z jader je jejich uvolnění jadernými reakcemi, vznikajícími při ozařování vysokoenergetickými částicemi z urychlovačů a při štěpení těžkých jader. Intenzivními zdroji neutronového záření jsou jaderné reaktory [4].

1.3 Fyzikální principy ionizujícího záření

1.3.1 Ionizující záření

Ionizujícím zářením se rozumí přenos energie v podobě částic nebo elektromagnetických vln vlnové délky nižší nebo rovnající se 100 nanometrů, anebo s frekvencí vyšší nebo rovnající se 3×10^{15} hertzů, který je schopen přímo nebo i nepřímo vytvářet ionty [5].

Častěji se, ale setkáme s touto definicí: ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyřádit elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat [6].

Přístroje pro měření radioaktivity pracují na základě tří fyzikálních principů ionizujícího záření: ionizace, excitace - deexcitace a absorpce. Detaily o principu interakcí částic s hmotou nebudou zmiňovány, neboť pro účely této práce nemají žádný význam.

1.3.2 Ionizace

Stav, kdy se z původně elektricky neutrálních atomů stávají atomy elektricky nabitě vyražením nebo vytržením elektronů z atomového obalu. Takto vzniklé částice mají kladný náboj. Předpokladem je, že dodaná energie elektronu je větší než jeho energie vazebná [7].

Ionizaci částic způsobují nabitě částice (přímo ionizující) s dostatečnou ener-

gií nebo nenabité částice (nepřímí ionizující), mechanismus u nenabitých částic je složitější. Dojde u nich k interakci s elektronovým obalem nebo s jádrem a to je zprostředkující proces, jehož důsledkem je vznik nabitých částic, které pak ionizaci způsobí. Letící částice o vysoké energii působí ionizaci, uvolní statisíce elektronů, z nichž některé mají tak vysokou energii, že ionizují hmotu také a tak se postupně zmenšuje energie letící částice [7].

Přímí ionizující záření způsobují těžké nabité částice α , protony, štěpné trosky a lehké nabité částice β^- (elektrony), částice β^+ (pozitrony). Nepřímí ionizující záření způsobují neutrální částice mezi něž řadíme fotony záření γ , fotony záření X a neutrony. Tento jev lze dobře využít v detektorech, neboť vzniklý elektrický náboj lze měřit a změřená hodnota je úměrná dávce ionizujícího záření [7].

1.3.3 Excitace - deexcitace

Je-li energie letící částice menší než je vazebná energie elektronů v obalu a nemůže tak dále působit ionizaci, má ještě možnost svou energií vyvolat excitaci. To znamená, že elektron atomu přijme od částice energii, která jej vynese na vyšší energetickou hladinu. Takto excitovaný elektron je však nestabilní a jeho snahou je dostat se zpět do stabilního stavu na svoji původní energetickou hladinu. Při tomto procesu však logicky musí ztratit přebytečnou energii, kterou získal od ionizující částice. Tato energie se vyzáří ve formě fotonu charakteristického rentgenového záření nebo luminiscenčního světla (záblesku) [7].

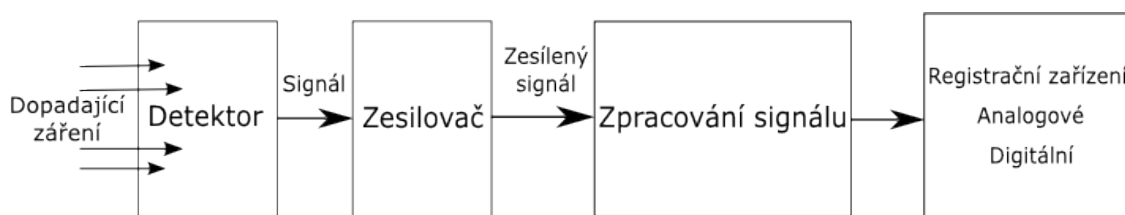
Tento jev je využíván v mnoha oborech lidské činnosti. V dozimetrii v termoluminiscenčních dozimetrech, které vzniklou světelnou složku dokážou změřit, a tato hodnota je úměrná dávce ionizujícího záření [7].

1.3.4 Absorpce

Částice ionizujícího záření, která ztratí svoji energii ionizacemi a excitacemi natolik, že již dále není schopna další ionizace ani excitace, je pohlcena látkou, kterou proniká - je absorbována. Předá zbytek energie molekulám prostředí, ty se proto pohybují rychleji, což představuje zahřátí látky [7].

1.4 Detekce ionizujícího záření

Ionizující záření je lidskými smysly neregistrovatelné. K tomu, abychom jej mohli zaregistrovat a vyhodnotit, je potřeba jeho přítomnost detekovat a vyhodnocovat s pomocí vhodné přístrojové techniky [7].



Obrázek 1: Detekční řetězec [6].

Při detekci se využívá vlastností ionizujícího záření a jeho interakcí s hmotným prostředím tj. ionizace, excitece (deexcitace) a absorpce. V detektoru se mění energie dopadajícího ionizujícího záření na elektrický signál, který se v druhé části přístroje zpracovává tak, aby mohl být v poslední části přístroje zaregistrován a vyhodnocen [8]. Byla vyvinuta řada detektorů využívajících (kromě společného základního jevu ionizačních účinků záření) různých principů a technických konstrukcí. Fungují samostatně, nebo jsou součástí přístrojů pro měření některých veličin a monitorování určitých dějů pomocí radiačních metod [6].

Vlastnosti detektoru ionizujícího záření určují základní parametry měřícího systému a musí jim být přizpůsobeno vyhodnocovací zařízení i metody zpracování jím

získaných informací. Zpracováním signálů detektorů se zabývá jaderná elektronika a zpracováním informací metody měření ionizujícího záření [9].

Detektory ionizujícího záření je možno rozdělit do skupin podle různých hledisek. Podle časového průběhu detekce se rozeznávají dvě základní skupiny detektorů [10]:

- 1) Kontinuální „on-line“ detektory, poskytující průběžnou informaci o okamžité intenzitě záření či počtu kvant ionizujícího záření a
- 2) kumulativní (integrální) detektory, které postupně shromažďují svou rostoucí odezvu během expozice. Tato odezva (signál, výsledek měření) zůstává v detektoru uchována i po skončení expozice a může se vyhodnotit dodatečně.

A nebo se dají dělit podle principu detekce na [10]:

- 1) fotografické, založené na fotochemických účincích záření (filmové dozimetry, RTG filmy, jaderné emulze), nebo využívající fotografické zobrazení stop částic v určitém látkovém prostředí (mlžné komory a bublinové komory).
- 2) Elektronické, u těchto detektorů se část absorbované energie ionizujícího záření převádí na elektrické proudy či impulzy, které se zesilují a vyhodnocují v elektronických obvodech. Patří sem ionizační komory (včetně proporcionálních a GM detektorů), scintilační detektor, polovodičové detektory, magnetické spektrometry.
- 3) Materiálové, využívající dlouhodobější změny vlastností určitých látek (barva, složení) působením ionizujícího záření. Dále se mohou dělit podle komplexnosti měřené informace na detektory záření, udávající pouze intenzitu záření, respektive počet kvant záření, bez informace o druhu záření a jeho energii a spektrometry ionizujícího záření, které měří nejen intenzitu či počet kvant záření, ale i energii kvant záření a případně jeho další charakteristiky.

Není účelem této práce vypisovat všechny druhy detektorů, a proto se zaměříme jen na ty, jež jsou významné, a používají se v přenosných přístrojích radiační ochrany, které jsou porovnávány v této práci.

1.5 Detektory přenosných přístrojů radiační ochrany

První tři níže uvedené detektory se řadí do skupiny plynových detektorů. Samozřejmě do této skupiny patří i Korónový detektor, ale jak bylo výše napsáno, nebudeme se jím zabývat, protože v přenosných přístrojích není používán.

1.5.1 Plynové detektory - úvod

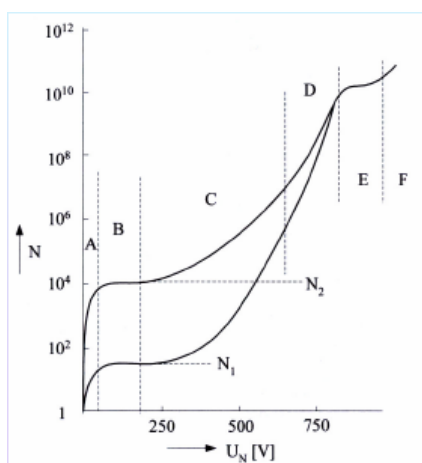
Za standardních laboratorních podmínek se plyny chovají jako velmi dobré až vynikající izolanty. Působením přímo ionizujícího záření se některé atomy nebo molekuly, původně neutrální, přeměňují ionizací na kladně nebo záporně nabitě částice [9].

Při interakci nepřímo ionizujícího záření tuto ionizaci způsobují sekundární nabitě částice. Důsledkem toho vodivost plynu vzrůstá. Detektory využívající tohoto jevu se označují jako plynové detektory, popřípadě detektory s plynovou náplní. Patří k nim následující druhy detektorů [9]:

- A) ionizační komory;
- B) proporcionální detektory;
- C) Geiger-Müllerovy detektory;
- D) Korónové detektory;

jež se od sebe vzájemně odlišují především velikostí a rozložením intenzity elektrického pole, určeného geometrií detektoru, použitým napájecím napětím a dále druhem a tlakem pracovního plynu [9].

Modelově si lze představit takový detektor jako deskový kondenzátor, na jehož desky (elektrody) je přivedeno napětí U . Detektor je vzduchotěsně uzavřen a naplněn vhodným plynem, těmito plyny mohou být xenon, argon, butan. Plyny jsou voleny podle charakteristik a jejich vhodností k detekci zvoleného typu záření. Tímto kondenzátorem prochází nepatrný proud I , který je způsoben ionizačními účinky kosmického záření a radionuklidů obsažených ve vzduchu. Prochází-li v blízkosti kondenzátoru radioaktivní zářič, proud značně naroste. Tento ionizační proud je způsoben ionty a elektrony, které se vytvářejí účinkem ionizujícího záření v plynu mezi deskami kondenzátoru. Vytvořené nosiče nábojů (ionty a elektrony) jsou nuceny k pohybu k deskám kondenzátoru vytvořeným elektrickým polem. Kromě toho vzniklé ionty také zanikají rekombinací. Mění-li se napětí na deskách kondenzátoru a měříme přitom procházející proud, získáváme charakteristiku obvodu. Typická charakteristika takového obvodu vykazuje několik výrazných oblastí viz obrázek (obrázek 2) [11].



Obrázek 2: Závislost počtu sebraných iontů na napětí na detektoru.

A - oblast Ohmova zákona, nízké napětí, převažuje rekombinace bez využití; B - oblast nasyceného proudu, všechny páry doputují k elektrodám bez zesílení; C - proporcionální oblast, zesílení $10^3 - 10^4$; D - oblast zmenšené proporcionality bez využití; E - oblast Geiger-Müllerových detektorů, tvorba vzniku párů nezávislá na typu ionizujícího záření; F - oblast samostatného výboje [9].

Křivka 1 odpovídá částici, která uvnitř pracovního objemu detektoru vytvoří

N_1 iontových párů, křivka 2 pak jiné částici, která vytvoří $N_2 > N_1$ iontových párů. Je zřejmé, že tato druhá částice zanechala v detektoru větší energii [9]. V porovnávaných přístrojích se vyskytují tyto tři druhy detektorů: Geiger-Müllerův, proporcionální a scintilační.

1.5.2 Geiger-Müllerův detektor

Geiger-Müllerovy detektory náleží k nejstarším detektorům záření. Objeveny byly již v roce 1928 a pro svojí jednoduchost, nízkou cenu a snadnou aplikovatelnost jsou hojně používány pro prostou detekci při nízkých četnostech interakcí dodnes. Jejich vývoj v současné době již prakticky nepokračuje [9].

Geiger-Müllerův detektor je ionizační komora, hermeticky uzavřená, naplněná zředěným plynem o tlaku nižším než atmosférický. Detektory pracují zásadně v impulzním režimu. Detekční účinnost detektorů je pro nabitě částice velmi velká. Jediným omezujícím činitelem je zde vliv stěn, resp. vstupního okénka. Za běžných podmínek každá nabitá částice, která se dostane do pracovního objemu detektoru, vyvolá lavinovitý výboj, a tedy je vždy zaznamenána. Velkou výhodou Geiger-Müllerových detektorů je velká amplituda výstupních impulzů a velká detekční účinnost. Amplituda napěťových impulzů se v závislosti na typu detektoru pohybuje v rozmezí od několika voltů až do 100 V. Další zpracování signálu z takového detektoru proto nevyžaduje zesilovač. Elektrody tohoto detektoru jsou zapojeny v elektrickém obvodu na takové napětí, aby detektor pracoval v oblasti Geiger-Müllerových detektorů viz charakteristika na obrázku 2 (napětí bývá cca 300 až 1000 V) [9].

Po vniknutí kvanta ionizujícího záření do prostoru detektoru dojde v jeho plynové náplni k ionizaci, načež se elektrony začnou pohybovat ke kladné anodě a kladné ionty k záporné katodě. Jelikož plyn je zředěný a napětí na elektrodách dostatečně vysoké, je střední volná dráha (vzdálenost mezi dvěma srážkami) každého elektronu natolik dlouhá, že v elektrickém poli získá takovou kinetickou energii, že při nárazu na atom plynu je schopen vyrazit další elektrony (a ionty) Tyto sekundární elek-

trony pak vyrážejí další sekundární elektrony atd. Tento proces probíhá lavinovitě (z jednoho primárního elektronu vzniká až 10^{10} sekundárních elektronů). V prostoru mezi elektrodami vzniká samovolný výboj. Obvodem projde poměrně silný proudový impulz a na pracovním odporu R tak vzniká vysoký napěťový impulz, který se přes oddělovací kondenzátor vede ke zpracování v příslušné elektronické jednotce dochází tak k detekci kvanta příslušného ionizujícího záření převedením na elektrický impulz [9].

Výboj, který jednou začal, by za normálních okolností nepřetržitě pokračoval. K tomu, aby tento typ detektorů byl použitelný, je třeba po každé zaznamenané částici zajistit ukončení výboje. Podle toho jakým způsobem se toho dosahuje, rozlišují se detektory samozhášecí a nesamozhášecí. V prvním případě je zhášení výboje zajištěno vhodným složením náplně (plynu), kdežto druhá metoda zhášení je založena na snížení napětí na detektoru na úroveň [9].

Geiger-Müllerovy detektory mívají nejčastěji válcový tvar. Válec tvoří katodu, druhou elektrodu představuje vlákno umístěné v ose válce. Rozměry detektorů se pohybují od několika milimetrů až do několika desítek centimetrů. Pouzdro bývá zhotoveno nejčastěji z tenkého Al plechu o síle cca 0,1 mm, který pouze minimálně „stíní“ detektor proti měkkému záření β a zcela zamezí průniku záření α . Pokud jsou detektory určené pouze pro indikaci záření γ , pak pouzdro může být zhotoveno ze silnějšího materiálu [9].

Detekční účinnost Geiger-Müllerových detektorů je pro nabitě částice velmi velká. Pro záření α a β je detekční účinnost téměř 100 %, kdežto pro záření γ a záření X je to pouze 0,1 až 1 %. V tomto případě účinnost detektoru závisí v rozhodující míře na tloušťce a složení jeho stěn [9].

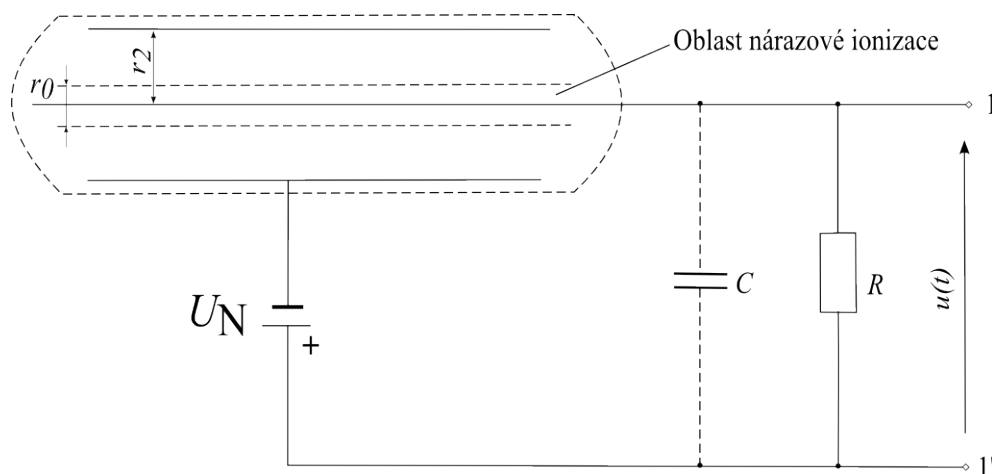
1.5.3 Proporcionální detektor

Tento typ plynových detektorů využívá jevu nazývaného plynového zesílení ke znásobení počtu nosičů nábojů vytvořených ionizací v plynu. Pracuje téměř vždy

v impulzním režimu. Výstupní impulzy mají díky plynovému zesílení podstatně větší amplitudy než u impulzně pracujících ionizačních komor, což je výhodné tehdy, je-li počet ionizací vytvořených nábojů natolik malý, že nezajišťuje dostatečnou amplitudu signálu z ionizační komory. Takovým případem je detekce a spektrometrie nízkoenergetického fotonového záření nebo velmi častá aplikace pro detekci neutronů [9].

Plynové zesílení – je závislé na intenzitě elektrického pole a začíná se za normálního atmosférického tlaku uplatňovat u plynů nevytvářejících záporné ionty od hodnot $C \geq 10^4$ V/m. Elektrony vytvořené primární ionizací jsou elektrickým polem urychlovány natolik, že způsobují na své dráze ionizaci neutrálních atomů či molekul plnicího plynu. Elektrony vzniklé tímto procesem jsou polem rovněž urychlovány a dosáhnou-li energie vyšší než je ionizační energie neutrální molekuly plynu, mohou plynovou náplň samy ionizovat. V důsledku toho počet iont-elektronových párů lavinovitě roste, vzniká tzv. Townsendova lavina [9].

Nejvýhodnějším geometrickým uspořádáním proporcionálních detektorů je válcové uspořádání viz obrázek (obrázek 3) [10].



Obrázek 3: Uspořádání proporcionálního detektoru [10].

Katoda detektoru je válcová, anodu tvoří tenký drát o poloměru $r_1 = 0,01$ až $0,1$ mm. Poměr elektrod r_2/r_1 je tedy velmi velký, volí se v rozmezí od 100 do 500.

Intenzita elektrického pole v blízkosti anody dosahuje hodnot až 10^4V/cm , což je zárukou, že elektrony, které se přiblíží na určitou vzdálenost k anodě (na obrázku 3 označeno r_0), získají dostatečnou energii k nárazové ionizaci. V úzkém prostoru vymezeném rozdílem poloměrů $r_0 - r_1$ vzniká M násobné zvětšení náboje, který je vytvořen primární ionizací v kterémkoli místě detektoru. Velikost plynového zesílení může dosáhnout až hodnot 10^6 používá se však podstatně nižších hodnot [10].

Energetická rozlišovací schopnost proporcionálních detektorů je do značné míry omezena fluktuací součinitele plynového zesílení M . Na jeho velikost, kromě složení a tlaku plynové náplně, má vliv zejména napájecí napětí detektoru. Hodnota M se může snadno měnit pomocí napájecího napětí a tím tedy měnit i amplitudu výstupního signálu detektoru. Proto se vyžaduje velká stabilita zdroje vysokého napětí [10].

Proporcionální detektory se používají k počítání α částic, absolutní měření aktivit α , počítání β částic, absolutní měření aktivit β , detekce a spektrometrie nízkoenergetického fotonového záření, detekce pomalých neutronů, detekce a spektrometrie neutronů [9].

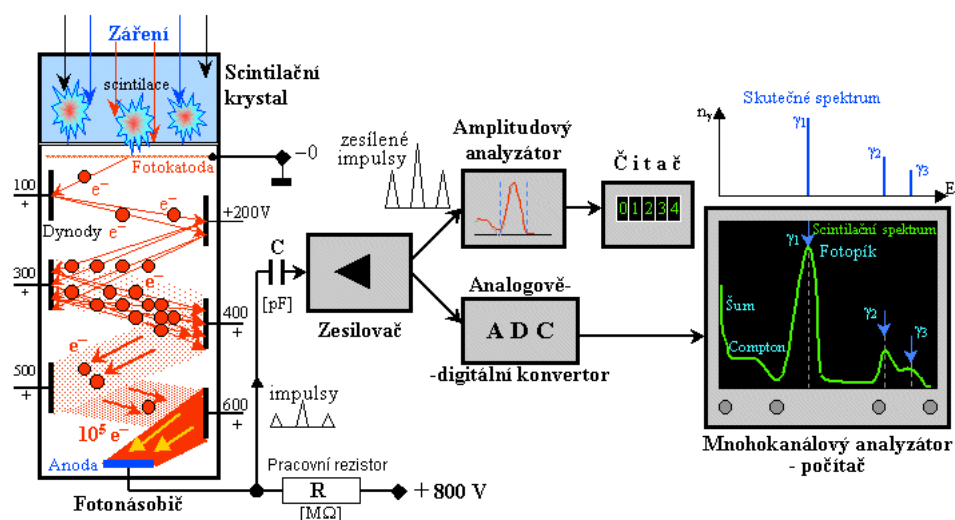
1.5.4 Scintilační detektor

Základní uspořádání scintilačního detekčního systému je patrné z obrázku 4. Vlastní čidlo detektoru představuje scintilátor, v němž dopadající zařízení způsobuje ionizaci a excitaci jeho atomů a molekul. Jejich návrat do základního stavu je doprovázen emisí světelného záření, jehož intenzita odpovídá energii, kterou detekované částice nebo fotonů vyzářených jednotlivými excitovanými centry krystalu je náhodný. Aby se mohly světelné fotony maximálně využít, obklopuje se scintilátor reflektorem. Sebrané fotony po průchodu optickým kontaktem působí pak na fotokatodu fotonásobiče. Nejlepší přenos světelné energie nastává tehdy, je-li prostor mezi scintilátorem a fotonásobičem vyplněn prostředím s velkou světelnou vodivostí. Dobré optické vazby se nejčastěji dosáhne minerálními nebo silikonovými oleji, které

na rozhraní krystalu a vstupního skleněného okna fotonásobiče vytvoří velmi tenkou transparentní vrstvu. Kromě tohoto přímého optického kontaktu vyžaduje některé speciální aplikace oddělení krystalu od fotonásobiče. V takovém případě je světlo ze scintilátoru vedeno světlovodem, obvykle ve tvaru válce. Světlovod se zpravidla připravuje ze syntetického skla (Lucit, Plexiglas), křemene nebo dalších materiálů s velkou průhledností [9].

Mechanismus činnosti fotonásobiče je následující: Fotony po dopadu na fotokatodu uvolňují fotoelektrony, které se po fokusaci a urychlení elektrickým polem dostávají na první dynodu. Povrch dynod je pokryt materiálem s velkým součinitelem sekundární emise. Vlivem toho se počet elektronů opouštějících každou následující dynodu neustále zvětšuje. Výsledkem tohoto násobícího procesu je, že každý fotoelektron vyvolá celkem n elektronů, které jsou potom sebrány na anodě fotonásobiče. Zesílení fotonásobiče bývá v rozsahu 10^5 až 10^9 [12]. Zjednodušeně řečeno, detektory převádějí absorbovanou energii ionizujícího záření na energii fotonů náležejících zpravidla do viditelné krátkovlnné nebo blízké ultrafialové oblasti spektra. Činnost jakéhokoliv scintilačního detektoru je v zásadě možno rozdělit na několik po sobě jdoucích procesů [9]:

- 1) absorpci měřeného záření scintilátorem;
- 2) vlastní scintilační proces, tj. konverzi absorbované energie záření na energii emitovaných scintilačních fotonů;
- 3) přenos fotonů emitovaných scintilátorem na fotocitlivý prvek - fotokatodu fotonásobiče (FN) nebo fotocitlivou diodu (FD);
- 4) absorpci těchto fotonů fotokatodou fotonásobiče či fotodiodou, vedoucí fotoelektrickým jevem k emisi fotoelektronů nebo ke generování elektron - děrových párů v přechodu fotodiody. U fotonásobiče např. je možno dále sledovat účinnost sběru fotoelektronů na první dynodu, vlastní násobící proces a sběr elektronů z poslední dynody na anodu fotonásobiče.



Obrázek 4: Principiální schéma scintilačního detektoru (horní větev schématu) a spektrometru (dolní větev schématu). V pravé části na obrazovce je typický tvar scintilačního spektra záření gama - ve srovnání se skutečným čárovým spektrem nahoře [6].

Výstupní signál se obvykle odebírá z anody a fotonásobiče. Někdy je však výhodnější zpracovat signál z některé z posledních dynod nebo použít pro další vyhodnocení oba signály současně. V detekční sondě (obsahující scintilátor a fotonásobič) je ve většině případů umístěn rovněž před zesilovač, jehož funkce spočívá zejména v přizpůsobení výstupního obvodu detektoru ke vstupu kabelů, kterým se signál vede na vstup vlastního vyhodnocovacího přístroje. Vzdálenost mezi detektorem a měřicím přístrojem bývá často i několik desítek metrů. Fotonásobičem se tedy světelné impulsy převádějí na elektrický signál a jeho vyhodnocením můžeme získat informace o některých důležitých parametrech měřeného záření. Je to především hustota toku částic a jejich energetické rozložení. Další informace souvisí s okamžikem výskytu výstupního signálu a analýzou jeho tvaru. Poslední operace umožňuje identifikaci částic, což lze výhodně použít při měření směsných radiačních polí [12].

1.6 Operační veličiny přenosných přístrojů radiační ochrany

Veličin a jednotek, které jsou svázané s ionizujícím zářením je poměrně mnoho a dělí se do několika kategorií. Pro účely této práce jsem kategorii operačních veličin upravil tak, aby byly zmíněny pouze veličiny, které se týkají porovnávaných přístrojů.

1.6.1 Aktivita A

Základní charakteristikou množství radioaktivního nuklidu je jeho aktivita A . Udává počet samovolných radioaktivních přeměn dN_p v radioaktivním materiálu, vztahený na jednotku času dt [13]. Jednotkou je reciproká sekunda $[s^{-1}]$, pro tento případ se jí dostalo názvu becquerel $[Bq]$ po objeviteli radioaktivity A. H. Becquerelovi [14]. Je-li v látce v průměru jedna radioaktivní přeměna za sekundu je její aktivita 1 Bq. Z čehož nám vyplývá, že se jedná o velmi malou jednotku. Aktivita je dána vztahem

$$A = \frac{dN_p}{dt} [Bq].$$

Veličina aktivita se vztahuje k zářiči jako celku, nezávisle na jeho tvaru, rozměrech nebo hmotnosti [14]. Proto je vhodné, a i se tak děje, ji vyjádřit jako rozložení aktivity na jednotku hmotnosti, plochy nebo objemu. Takto je možné definovat:

hmotnostní aktivitu a_m

$$a_m = \frac{dA}{dm} [Bq/kg],$$

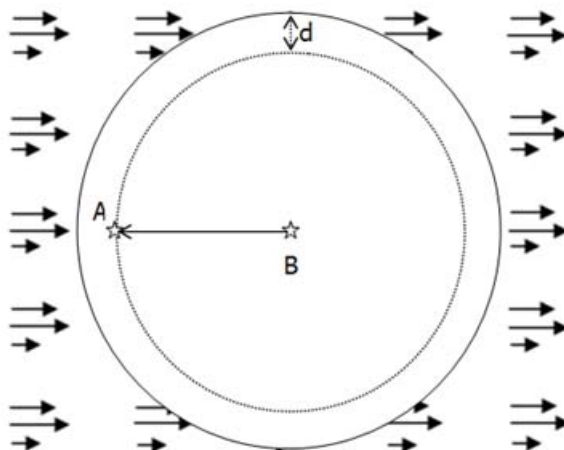
plošnou aktivitu a_s

$$a_s = \frac{dA}{dS} [Bq/m^2],$$

U plošné aktivity se lze častěji setkat se vztažením na jednotkovou plochu v cm^2 . Takto zobrazují jednotky např. přenosné monitory plošné aktivity. Samozřejmě je to analogicky možné i u hmotnostní a objemové aktivity.

1.6.2 Prostorový dávkový ekvivalent $H^*(10)$

Prostorový dávkový ekvivalent $H^*(10)$ v bodě v poli záření je dávkový ekvivalent, který by byl realizován v odpovídajícím rozšířeném a usměrněném poli v ICRU kouli v hloubce 10 mm na rádius vektoru opačného směru, než je orientované pole. Definicí prostorového dávkového ekvivalentu v daném bodě B doprovází ilustrace na obrázku (obrázek 5) [2].



Obrázek 5: Znárodnění rozšířeného a usměrněného pole, do něhož je vložen ICRU sférický fantom (koule o průměru 30 cm tvořená tkáňově ekvivalentní látkou). Stanoví se dávkový ekvivalent v bodě A, který leží na poloměru proti směru pole v hloubce d pod povrchem koule. Číselná hodnota tohoto dávkového ekvivalentu v mSv odpovídá potom hodnotě prostorového dávkového ekvivalentu v referenčním bodě B [2].

Prostorový dávkový ekvivalent se používá k odhadu efektivní dávky, kterou pracovník obdrží v místě, kde se provádí měření pomocí vhodného monitoru kalibrovaného v jednotkách Sv resp. spíše v mSv , neboť se jedná o nízké ozáření v oblasti stochastických biologických účinků [2].

1.6.3 Kerma K

Z anglického „Kinetic Energy Released in Matterial“ (kinetická energie uvolněná v materiálu) [13]. Je definována jako v daném bodě určený podíl součtu počátečních kinetických energií dE_K všech nabitých částic uvolněných nenabitými ionizujícími částicemi v objemovém elementu daného materiálu a hmotnosti dm v tomto elementu [13, 14].

$$K = \frac{dE_K}{dm} [\text{Gy}].$$

Kerma je definována ve vztahu k dané látce, např. kerma ve vzduchu. Z definice je jasné, že je použitelná pouze pro nepřímooionizující částice fotony a neutrony [14].

1.7 Aktuálně používané přístroje radiační ochrany

1.7.1 Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Thermo Scientific

Výrobce Thermo se prezentuje modulárním systémem pro měření radioaktivity. Níže jsou uvedeny přístroje, které jsou momentálně používány na jaderné elektrárně Temelín (ETE).

FH 40G přístroj pro měření příkonu dávkového ekvivalentu

Přístroj FH 40 G může být použit v režimu měření příkonu dávkového ekvivalentu v prostředí nebo v režimu čítače. Standardním režimem je režim měření příkonu. V režimu čítače jsou počítány pulsy vyvolané v rozmezí předvolené doby měření. Z těchto hodnot je vypočten a zobrazen dávkový příkon. Vypočtené a zobrazené hodnoty měření zahrnují: příkon dávkového ekvivalentu, průměrnou hodnotu příkonu dávkového ekvivalentu, maximální příkon dávkového ekvivalentu a celkovou ekvivalentní dávku. Naměřené hodnoty mohou být uloženy v přístroji a poté přes in-

fračervený port za pomoci speciálního kabelu přeneseny do PC k dalšímu zpracování [15].



Obrázek 6: FH40GL-10 [15].

Přístroj FH 40 G je vyráběn v 5-ti modifikacích z nichž jsou na ETE používány 2 s označením FH 40 G a FH 40 GL-10. Vybrané specifikace přístrojů jsou uvedeny v tabulce (tabulka 1) [15].

Tabulka 1: Technické specifikace FH 40 G / FH 40 GL-10 [15].

	FH 40 G	FH 40 GL-10
měřená veličina	kerma ve vzduchu	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$
rozsah měření	10 nSv/h – 1 Sv/h	10 nSv/h – 100 mSv/h
rozsah energií	36 keV – 1,3 MeV	33 keV - 3 MeV
typ detektoru	proporcionální čítací trubice	
citlivost detektoru	2.0 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$	
úhlová závislost	méně než 20 % při úhlu dopadu od -75° do $+75^\circ$ s ohledem na podélnou osu přístroje.	
rozměry detektoru	25 mm; \varnothing 25.8 mm délka	
rozměry	195 mm x 73 mm x 42 mm	
hmotnost	410 g (bez baterií)	

FHZ 632 L-10 sonda pro měření příkonu dávkového ekvivalentu γ

Sonda se propojuje s přístrojem FH 40G-10 pomocí kabelu stejně jako ostatní rozšiřující zařízení. Lze ji také nasadit na teleskopickou tyč, do které se na jednom konci nasadí. Uvnitř tyče vede kabel k přístroji, který je uchycen na druhém konci [15].



Obrázek 7: FHZ632L-10 [15].

Tabulka 2: Technické specifikace FHZ 632 L-10 [15].

měřená veličina	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$
rozsah měření	100 nSv/h – 100 mSv/h
rozsah energií	30 keV – 4,3 MeV
typ detektoru	proporcionální čítací trubice
citlivost detektoru	2.0 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
úhlová závislost	75°
rozměry	Ø 35 mm x 162 mm
hmotnost	200 g

FHZ 612-10 sonda pro měření příkonu dávkového ekvivalentu γ

Princip propojení s přístrojem je stejný jako u předchozí sondy. Sonda je tvořena dvěma Geiger-Müllerovými trubicemi s automatickým přepínačem rozsahu [15].



Obrázek 8: FHZ612-10 [15].

Tabulka 3: Technické specifikace FHZ 612-10 [15].

měřená veličina	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$
rozsah měření	nízký rozsah: 100 nSv/h – 100 mSv/h vysoký rozsah: 4 mSv/h – 10 Sv/h
rozsah energií	60 keV – 1,3 MeV
typ detektoru	2 x Geiger-Müllerova trubice
citlivost detektorů	nízký rozsah: 1,7 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$ vysoký rozsah: 0,017 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
úhlová závislost	neuveďeno
rozměry	\varnothing 35 mm x 162 mm
hmotnost	200 g

FHZ 732 sonda povrchové kontaminace

Připojení k přístroji je opět kabelem. Sonda je určena pro měření povrchové kontaminace α a β . Sonda obsahuje proporcionální čítací trubici [15].



Obrázek 9: FHZ732 [15].

Tabulka 4: Technické specifikace FHZ 732 [15].

měřená veličina	povrchová kontaminace α a β
účinnost	^{241}Am : 18 % ^{60}Co : 31 % $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$: 18 %
typ detektoru	proporcionální čítací trubice
citlivost detektoru	4 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
velikost okna	Citlivá ploch přibl. \varnothing 44 mm = přibl. 15 cm ²
rozměry	\varnothing 245 mm x 68 mm
hmotnost	300 g

FHT 752 neutronová sonda

Neutronová sonda se používá pro energeticky nezávislé měření příkonu ekvivalentní dávky neutronů podle ICRP 60. Skládá se z proporcionální čítecí trubice, PE-moderátoru, vysokonapětového předzesilovače tvarujícího pulsy. Vrchní část obsahuje speciální držák pro přístroj FH 40 G a úchop pro přenášení v jedné ruce. Připojení k sondě je také kabelem. Neutrony a γ jsou měřeny současně [15].



Obrázek 10: FHT752 [15].

Tabulka 5: Technické specifikace FHT752 [15].

měřená veličina	příkon ekvivalentní dávky neutronů podle ICRP 60
rozsah měření	1 nSv/h – 400 mSv/h
rozsah energií	0.025 keV – 20 MeV podle ICRP 60
typ detektoru	proporcionální čítecí trubice
citlivost detektoru	neutrony: 0,5 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$ pro ^{252}Cf gamma: $< 10^{-5}$ na 1 Sv/h (^{137}Cs) tj. méně než 10 $\mu\text{Sv/h}$ příkonu dávkového ekvivalentu neutronů se zobrazí, takže diskriminační neutronové měření může být provedeno ve smíšené oblasti.
plnicí plyn	^3Bf (100 kPa)
rozměry	\varnothing 208 mm x 435 mm
hmotnost	11 kg

Contamat FHT 111 M měřič povrchové kontaminace α , β a γ izotopů

FHT 11 M je měřič povrchové kontaminace α , β a γ izotopů. Skládá se z dvou částí vyhodnocovací jednotky a nasazovací sondy. Lze použít tři druhy proporcionálních sond, průtočné (s použitím plynů metan, zemní plyn, argon-metan, argon, CO_2 nebo butan), xenonové (plněná xenonem) a tritiové (měřicím plynem je butan). Přístroj obsahuje knihovnu radionuklidů s účinností detekce mezi nimiž lze přepínat. Displej je velký s možností podsvícení. Má indikátor upozornění slabých baterií. [16].



Obrázek 11: FHT111M [16].

Tabulka 6: Technické specifikace FHT 111 M [16].

měřená veličina	povrchová kontaminace α a β
rozsah měření	0 až 19999 s ⁻¹ , 0 až 19999 Bq/cm ² 0 až 10 ³ Bq
účinnost xenonová sonda	⁶⁰ Co:10 % ⁹⁰ Sr/Y: 26 % ¹³⁷ Cs: 20 %
butanová sonda	²⁴¹ Am:16 %
typ detektoru	xenonové čítací trubice s trvalou náplní průtočné butanové čítací trubice s permanentní plnicí nádržkou
velikost okna	citlivá ploch 166 cm ²
rozměry	Ø 215 mm x 138 mm x 111 mm
hmotnost	950 g

2 Cíle práce a hypotéza

2.1 Cíle práce

- a) Zmapování aktuální nabídky přístrojů pro potřeby radiační ochrany, které momentálně nabízejí výrobci či autorizovaní zástupci výrobců.
- b) Porovnání vytipovaných přístrojů pro měření radioaktivity s přístroji momentálně používanými na jaderné elektrárně Temelín.
- c) Nalezení provozně optimálního řešení přenosných přístrojů pro měření radioaktivity na novém jaderném zdroji.

2.2 Hypotéza

Momentálně používané přístroje pro měření radiačních veličin jsou stále vhodné i pro použití na novém jaderném zdroji.

3 Popis metodiky

3.1 Výběr přenosných přístrojů pro měření radiačních veličin

První fáze výběru přístrojů byla zaměřena na sběr informací z produktových katalogů výrobců, které jsou dostupné na internetových stránkách výrobců. Takto byl utvořen celek přístrojů, které svými parametry vyhovují kritériím nebo jsou podobné aktuálně používaným přístrojům na jaderné elektrárně Temelín.

3.2 Kritéria výběru přístrojů

Pro výběr přístrojů byla stanovena následující kritéria:

1. Měřené veličiny;
2. rozměry;
3. váha;
4. měřicí rozsah;
5. citlivost;
6. možnost rozšíření externími sondami.

3.3 Kritéria pro osobní porovnání

Všechny přístroje uvedené v této práci mají typové schválení a jsou ověřeny nebo kalibrovány autorizovanou respektive akreditovanou laboratoří, proto není účelem této práce porovnávat přístroje z hlediska naměřených hodnot.

Fyzické porovnání je provedeno na základě provozních zkušeností. Zaměřuje se na velikost a váhu přístroje, mechanickou odolnost, možnosti uchycení popruhu k snadnému přenášení, způsob ovládání, možnost dekontaminace, univerzálního využití, dodávaného příslušenství (např. teleskopické nástavce s možností instalace přístroje). Přístroje, které nebyly zapůjčeny jsou porovnány s ostatními na základě

domněnek a poskytnutých informací zástupcem pro Českou republiku.

4 Výsledky

V následujících kapitolách jsou popsány přístroje, které byly vybrány na základě výše uvedených kritérií.

4.1 Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Thermo

4.1.1 RadEye - PRD-ER

Tento přístroj je vhodný díky své vysoké citlivosti k detekci ionizujícího záření. Toho je dosaženo vysoce citlivým NaI(Tl) scintilačním detektorem s miniaturním fotonásobičem umožňující detekce velmi nízkých úrovní radiace s důrazem na energie pod 400 keV. Je určen k měření příkonu dávkového ekvivalentu $\dot{H}^*(10)$ [17].



Obrázek 12: RadEye - PRD-ER [17].

Tabulka 7: Technické specifikace RadEye - PRD-ER [17].

měřená veličina	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$
rozsah měření	0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 100 mSv/h
rozsah energií	60 keV – 1,3 MeV
typ detektoru	Scintilační NaI(Tl) s μ - fotonásobičem
citlivost detektoru	^{137}Cs (662 keV): 150 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$ ^{241}Am (60 keV): 2000 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
rozměry	96 mm x 61 mm x 31 mm
hmotnost	160 g

4.1.2 RadEye – B20-ER

I tento přístroj je velice malý, oproti svému předchůdci s ním lze měřit i záření α a β , měření záření α lze využít pouze pro rychlý odhad. S přístrojem je dodáváno jako volitelné příslušenství stínící energetický filtr pro odstínění energie záření β a simulace příkonu dávkového ekvivalentu v hloubce tkáně 0,07 mm a 10 mm. Taktéž lze použít filtr pro rychlý odhad záření α , který je též volitelným zařízením. Možností je také využití prodlužovacího nástavce v délce 0,35 m a teleskopické tyče o délce 1,2 respektive 4 m. Přístroj lze nosit v dodávané kapsičce s klipsem pro uchycení na opasek. Na přístroji lze volit měřenou veličinu a jednotky. Lze také vybrat z knihovny nuklid, pro který chceme interpretovat výsledky [17].



Obrázek 13: RadEye - B20-ER [17].

Tabulka 8: Technické specifikace RadEye – B20-ER [17].

měřená veličina	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$ ($\dot{H}^*(0,07)$) záření α a β
rozsah měření	0,01 $\mu\text{Sv/h}$ – 100 mSv/h
rozsah energií	17 keV – 1,3 MeV
2π účinnost	^{60}Co : 25 % ^{241}Am : 28 %
typ detektoru	Geiger-Müllerova trubice
citlivost detektoru	^{137}Cs (662 keV): 4 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
rozměry	130 mm x 67 mm x 62 mm
hmotnost	300 g

4.1.3 RadEye - AB100

Přístroj je určen pro detekci záření α a β . Skládá se z detekční jednotky a k ní přidělané vyhodnocovací jednotky, která je tvarem stejná jako RadEye PRD-ER. Jako již dříve zmíněné přístroje i tento má knihovnu nuklidů, z nichž lze vybírat správný kalibrační faktor. Lze také nastavit jednotky, v nichž lze měřit (např. Bq, Bq/cm², imp/s). Nastavení přístroje probíhá přes menu. Taktéž se dají nastavit dvě alarmové úrovně jako u předchozích přístrojů z řady RadEye [17].



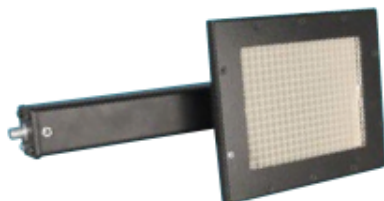
Obrázek 14: RadEye - AB100 [17].

Tabulka 9: Technické specifikace RadEye - AB100 [17].

měřená veličina	záření α a β
rozsah měření	β , γ : 0,01 imp/s – 100 000 imp/s α : 0,01 imp/s – 10 000 imp/s
účinnost	²⁴¹ Am: 40 % ⁶⁰ Co: 11 % ⁹⁰ Sr/Y: 33 % ¹³⁷ Cs: 23 %
typ detektoru	dvojitý scintilační
citlivost detektoru	¹³⁷ Cs: 32 imp/s na μ Sv/h
velikost okna	citlivá ploch: 69 x 145 mm (100 cm ²)
rozměry	355 mm x 100 mm x 180 mm
hmotnost	900 g

4.1.4 Rozšiřující sonda FHZ 742 pro FH 40GL-10

Sonda je určena pro měření α i β povrchové kontaminace. Obsahuje scintilační detektor ZnS s citlivou plochou 125 cm². Vyhodnocovací elektronika je umístěna v rukojeti sondy. FH 40 GL-10 resp. FH 40 G slouží jako zobrazovací jednotka. [18].



Obrázek 15: FHZ 742 [18].

Tabulka 10: Technické specifikace FHZ 742 [18].

měřená veličina	záření α a β
rozsah měření	100000 imp/s
účinnost	²⁴¹ Am: 40 % ⁶⁰ Co: 17 % ⁹⁰ Sr/Y: 56 %
typ detektoru	scintilační ZnS
velikost okna	citlivá ploch: 100 x 125 mm (125 cm ²)
rozměry	310 mm x 156 mm x 84 mm
hmotnost	1200 g

4.2 Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Berthold

4.2.1 LB 124

Přístroj firmy Berthold je určen pro měření povrchové kontaminace α a β . Srdcem je scintilační ZnS(Ag) detektor pevně spojený s vyhodnocovací jednotkou. Na velkém displeji je zobrazována hodnota pro záření α i β . Přístroj má automatickou korekci na pozadí, které je automaticky načítáno při startu přístroje. Přístroj se ovládá pomocí tlačítek. V menu lze provádět nastavení přístroje jako např. nastavit požadovaný radionuklid z knihovny radionuklidů. V přístroji lze předem definovat uživatelské profily [19].



Obrázek 16: LB 124 [19] [19].

Tabulka 11: Technické specifikace LB 124 [19].

měřená veličina	záření α a β
rozsah měření	α : 5000 imp/s β : 50000 imp/s
účinnost	^{241}Am : 21 % ^{60}Co : 29 % ^{137}Cs : 43 %
typ detektoru	scintilační ZnS(Ag)
velikost okna	170 cm ²
rozměry	240 mm x 140 mm x 110 mm
hmotnost	1300g

4.2.2 LB 6411 neutronová sonda s přístrojem LB 123 UMo

Neutronová sonda je s přístrojem propojena pomocí kabelu. Přístroj je uchyten ve speciálním držáku neutronové sondy. Sonda má na spodní straně tři nožky pro možnost postavení na stabilní plochu. Sonda je tvořena proporcionální čítačí trubicí plněnou ^3He plynem. Úhlová závislost je téměř izotropní, ovšem ovlivněna elektronikou umístěnou v horní části kulové konstrukce [20].



Obrázek 17: LB 6411 s přístrojem LB 123 UMo [20].

Tabulka 12: Technické specifikace LB 6411 [20].

měřená veličina	příkonu ekvivalentní dávky neutronů $\dot{H}^*(10)$ podle ICRP 60
rozsah měření	30 nSv/h - 100 mSv/h
rozsah energií	tepelné neutrony do 20 MeV
typ detektoru	proporcionální čítačí trubice
citlivost detektoru	neutrony: 0,79 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$ pro ^{252}Cf
plnicí plyn	^3He
rozměry	250 x 410 mm
hmotnost	9200 g

4.3 Přístroje pro měření radioaktivity výrobce VF Černá Hora

4.3.1 PAM 350

Jedná se o kompaktní lehký přístroj s detektorem umístěným v dolní části a zakrytým ochrannou mřížkou. Digitální displej a ovládací prvky jsou umístěny v horní části. Plastický scintilátor s ZnS(Ag), reflektor, fotonásobič a elektronika na zpracování signálu jsou uloženy uvnitř plastového pouzdra. Přístroj lze na požádání rozšířit o úchyty na popruh. Přístrojem lze měřit jak záření α , tak i β . Grafický displej s dobrým rozlišením zobrazuje četnost nebo aktivitu, buď jako číslcovou hodnotu nebo sloupcový graf. Na displeji je rovněž zobrazen indikátor baterie. Podle potřeby je možno aktivovat podsvícení displeje. U přístroje je také možné nastavit korekci na pozadí [21].



Obrázek 18: PAM 350 [21].

Tabulka 13: Technické specifikace PAM 350 [21].

měřená veličina	záření α a β
rozsah měření	až do 100000 imp/s
účinnost	^{241}Am : 37 % $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$: 44 % ^{137}Cs : 38 %
typ detektoru	scintilační ZnS(Ag)
velikost okna	100 x 100 mm (100 cm ²)
rozměry	neuvedeno
hmotnost	1000 g

4.4 Přístroje pro měření radioaktivity výrobce Canberra Packard

4.4.1 Colibri TTC

Přístroj Colibri je konstruován jako měřič dávkového příkonu s možností rozšíření až osmi CSP (Canberra Smart Probes) inteligentních sond najednou, jedné připojené kabelem a dalších sedm lze spárovat s přístrojem pomocí Bluetooth nebo Wi-Fi technologií, přičemž je vždy zobrazen dávkový příkon v místě uživatele. Sonden budou přiblíženy samostatně níže. Colibri TTC tedy slouží jako měřič příkonu ekvivalentní dávky v prostředí $\dot{H}^*(10)$ a zároveň může sloužit jako zobrazovací jednotka pro CSP sondy. [22].



Obrázek 19: Colibri TTC [22].

Tabulka 14: Technické specifikace Colibri TTC [22].

měřená veličina	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$ podle ICRP 60
rozsah měření	0,05 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 Sv/h
rozsah energií	58 keV – 1,5 MeV
typ detektoru	Geiger-Müllerova trubice
citlivost detektoru	^{137}Cs : 0,73 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$ ^{241}Am (60 keV): 2000 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
rozměry	195 mm x 100 mm x 69 mm
hmotnost	730 g

4.4.2 Širokorozsahová gama sonda STTC

Tato sonda je vhodná k rozšíření přístroje Calibri TTC pro případ potřeby měření s dálkovým přenosem ať již s pomocí kabelu nebo bezdrátového přenosu s komunikačním nástavcem CSP-COM. Lze ji samozřejmě také připevnit na teleskopickou tyč. Sonda je také vyráběna ve vodotěsné modifikaci do hloubky 40 m s označením STTC-W [23].



Obrázek 20: Širokorozsahová gama sonda STTC [23].

Tabulka 15: Technické specifikace širokorozsahové gama sondy STTC [23].

měřená veličina	příkon dávkového ekvivalentu v prostředí $\dot{H}^*(10)$ podle ICRP 60
rozsah měření	0,05 $\mu\text{Sv/h}$ – 10 Sv/h
rozsah energií	36 keV – 1,5 MeV
typ detektoru	Geiger-Müllerova trubice
citlivost detektoru	^{137}Cs : 0,74 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$
rozměry	132,5 x 35 mm x 69 mm
hmotnost	130 g

4.4.3 Alfa/Beta sonda SAB-100

Tento detektor je rozšiřující inteligentní sondou pro Calibri TTC, sonda je určena pro měření kontaminace záření α a β . S přístrojem se propojuje pomocí kabelu nebo přes rozhraní Bluetooth nebo Wi-Fi (s komunikačním nástavcem CSP-COM). Tělo sondy je z lakovaného hliníku. Detektorem je scintilační ZnS(Ag). Detekční plocha je kryta vyjímatelnou mřížkou pro snadnou dekontaminaci. Na těle je přepínací tlačítko režimu počítání α , β nebo $\alpha + \beta$. Režim počítání je indikován LED diodou (α -nesvítí, β -svítí stále, $\alpha + \beta$ LED bliká). Po odejmutí ochranné mřížky je sonda stále funkční a světlotěsná. Přístroj lze upevnit do ručního držáku s úchytem pro Calibri TTC nebo na teleskopickou tyč (max. délka 2,02 m) taktéž s úchytem pro Calibri TTC [24].



Obrázek 21: Alfa/Beta sonda SAB-100 [24].

Tabulka 16: Technické specifikace alfa/beta sondy SAB-100 [24].

měřená veličina	záření α a β
rozsah měření	0 - 10000 imp/s
účinnost	^{241}Am : 33 % ^{60}Co : 11 % $^{90}\text{Sr/Y}$: 33 %
typ detektoru	scintilační ZnS(Ag)
citlivost	< 0,35 imp/s na $\mu\text{Sv/h}$ (^{137}Cs)
velikost okna	62 x 150 mm (102 cm ²)
rozměry	313 x 94 x 84 mm
hmotnost	670 g

5 Diskuze

Na základě průzkumu katalogů a internetových stránek výrobců přístrojů jaderné elektroniky bylo možné vybrat produkty k porovnání s přístroji radiační ochrany momentálně používanými na ETE. Samotné vyzkoušení již však nemohlo být provedeno se všemi přístroji. Důvodem je jejich momentální nedostupnost v České republice. Konkrétně se jedná o rozšiřující sondu FHZ 742 povrchové kontaminace α i β a přístroje z rodiny CSP výrobce Canberra Packard.

Pokud budeme porovnávat jednotlivé přístroje, je třeba klást důraz na aplikovatelnost v reálných podmínkách jaderné elektrárny.

Přístroje výrobce Thermo tvoří přístroje a sondy, které se navzájem doplňují. Na ETE je momentálně používána kombinace měřiče příkonu dávkového ekvivalentu FH 40 G (FH 40 GL-10) (dále jen FAG) a měřiče povrchové kontaminace FHT 111 M (dále jen Kontamat). Tyto dva přístroje jsou základní sestavou přístrojů pracovníků radiační ochrany pro vyhodnocování příkonu dávkového ekvivalentu (PDE) a povrchové kontaminace β . Každý pracovník radiační ochrany má přidělenou jednu sestavu. Dále jsou tyto dva přístroje rozšiřovány dle potřeby. V případě vstupu do kontejneru za provozu bloku, při manipulacích s CASTORem, v němž je uloženo vyhořelé jaderné palivo či k monitorování prostředí ve skladu vyhořelého jaderného paliva, se používá neutronová sonda FHT 752 propojená kabelem s FAGem. Sondy FHZ 632 L-10 nebo FHZ 612-10 nacházejí využití při monitorování prostředí s vysokým PDE, kde jsou nasazeny v úchytu teleskopické tyče. Lze je také použít v kombinaci s dlouhým kabelem a spouštět do nepřístupných míst a provést prvotní mapování PDE, například po vypuštění šachty revize a oprav jaderných palivových souborů. Tyto sondy jsou rovněž připojovány pomocí kabelu k FAGu.

Samotná práce s FAGem je jednoduchá, po zapnutí se na displeji objeví indikace napětí baterií, a poté již samotná hodnota dávkového příkonu. Díky možnosti nasazení popruhu jej lze nosit zavěšený přes rameno nebo krk, to je výhodné, je-li potřeba

mít obě ruce volné například při lezení po žebříku. Pro potřeby pracovníků ETE, byly vyrobeny kožené kapsičky na opasek, kam lze přístroj zasunout. Přístroj se pak nevzdaluje od těla a nedochází tak k nežádoucímu nekontrolovanému výkyvu, který by mohl znepríjemnit pracovníkovi pohyb ve stísněných prostorech a překonávání překážek. Díky možnosti nastavení alarmové hodnoty je uživatel zvukovou signalizací upozorněn na dosažení nastavené úrovně a takto může odhalit např. odchylku od normálního stavu, aniž by neustále pozoroval displej. Váha přístroje je příjemná a nijak nezatěžuje uživatele. Ergonomie je vhodně zvolena a lze jej dobře držet jednou rukou. Citlivost detektoru není vysoká, to se projevuje delší dobou měření v prostorech s nízkým PDE nebo při přechodu z vysokého PDE do nízkého. Tělo přístroje je z odolného plastu, který je dobře dekontaminovatelný. Jedinou slabinou je skleněný kryt displeje, který při nárazu praská. Avšak náraz musí být relativně silný, aby došlo k jeho porušení.

K tomuto přístroji je také dostupná sonda povrchové kontaminace FHZ 732, díky své malé ploše a zobrazované jednotce v imp/s však není prakticky využívána. Nachází pouze uplatnění při detekci a upřesnění malé kontaminované plochy, kde nelze díky velké detekční ploše Kontamatu lokalizovat místo kontaminace. Výsledná hodnota v imp/s a následné přepočítání na Bq/cm² je také nepraktické. Sondu je možné nosit v pouzdře, které bylo rovněž vyrobeno na zakázku k opasku. Propojení s FAGem je opět kabelem.

Přístroj FAG, neutronová sonda FHT 752, sonda α , β kontaminace FHZ 732, sondy PDE FHZ 632 L-10 a FHZ 612-10 tvoří starší modulární systém Thermo Scientific.

Druhým přístrojem ze základní sestavy je Kontamat, který je ve verzi pro pracovníky radiační ochrany opatřen xenonovou sondou k měření kontaminace β . Sonda je však oddělitelná a lze ji nahradit butanovou sondou pro kontaminaci α . V tomto případě je nutno celou sestavu vyhodnocovací jednotky a sondy kalibrovat. Z tohoto důvodu jsou připraveny na centrální dozorně radiační kontroly (CDRK) dva

Kontamaty s možností měření kontaminace α . Kontamat α se využívá například při činnostech spojených s čerstvým jaderným palivem.

Použití samotného přístroje Kontamat pro práci je jednoduché. Ovládá se tlačítky, některá nastavení se provádějí dvojtiskem nebo různými kombinacemi membránových tlačítek. Displej je dostatečně velký, s podsvícením. Indikátor slabých baterií, který displej zobrazí, není bohužel s dostatečným předstihem a v případě, že v průběhu měření dojde k indikaci slabé baterie, následuje po krátké době jeho vypnutí a potřeba výměny baterií. To je hodně nepraktické, protože Kontamat pracuje s pěti bateriemi AA, a ty nelze pořád s sebou nosit. Včasné odhalení slabých baterií se dá sice obejít zkusmým rozsvícením displeje, ale myslím, že to není to pravé řešení. Vhodnější by byla přímá indikace baterie na displeji se zobrazením stavu baterií, jako třeba u mobilního telefonu. Držadlo přístroje nijak neomezuje v práci a pohodlí. Přístroji chybí uchycení popruhu, aby se též dal nosit pohodlně na krku či rameni. Opět lze toto obejít vlastním připevněním popruhu na držadlo. Ale také to nepokládám za elegantní řešení. Konstrukce vyhodnocovací jednotky je z odolného plastu. Případná dekontaminace je díky použitému materiálu snadná. Sondy jsou kovové s tenkou fólií na aktivní ploše měření. Aktivní plocha je chráněna při přenosu nasazovacím krytem z plechu. Největší slabinou celého přístroje je sonda, při měření v provozu je vcelku snadné ji protrhnout, i když se uživatel snaží být sebevíc opatrný. Po protržení dochází k úniku plynu. V případě, že uživatel nezjistí protržení sondy, může dojít k chybnému vyhodnocení naměřených hodnot, které se blíží k nulovým hodnotám v závislosti na množství zbývajících plynu v sondě. Následná oprava je velice zdoluhavá, sondu je potřeba odeslat výrobci. Váha je vcelku přijatelná, ale při delším měření začíná být znát. Jako výhodu tohoto přístroje vidím možnost přepínání jednotek měření, mohou být nastaveny Bq/cm^2 , imp/s a samotná celková aktivita v Bq. Přístroj je velice citlivý na jemné změny pozadí a velice rychle je detekuje. Měření Kontamatem s α sondou je náročné na přípravu a před samotným měřením je nutné doplnit butan do zásobníku a následně jím propláchnout samotnou sondu. Poté je třeba provést kalibraci na α zářiči a v průběhu měření stále kontro-

lovat, za pomoci α zářiče, zda přístroj vyhodnocuje korektně. V opačném případě je nutné znovu provést proplach sondy a doplnit plyn do zásobníku.

Neutronová sonda FHT 752 je objemné a těžké zařízení vážící 11 kg (viz technické specifikace v tabulce 5). Úchyt pro FAG je umístěn na vrchní části sondy pod držadlem k uchopení a přenášení. Konstrukce je odolná, z blíže nespecifikovaného kovu. Po připojení k FAGu se na displeji automaticky zobrazí hodnoty měřené neutronovou sondou. V případě potřeby lze tlačítkem přepnout na interní sondu pro zjištění PDE γ . Žádné velké výhrady k této sondě nemám. V této kategorii, lze jen těžko hledat menší a mnohem lehčí alternativu.

Alternativou k FAGu je RadEye - PRD-ER. Je prvním z rodiny RadEye přístrojů výrobce Thermo. Přístroj je malý a lehký (viz technické specifikace v tabulce 7), rychle reaguje na změnu příkonu dávkového ekvivalentu, což je dané vysokou citlivostí 150 impulsů na μSv (viz technické specifikace v tabulce 7), která je bezkonkurenčně nejvyšší ze všech vybraných přístrojů. Konstrukce je odolná. Je možné nastavit dvě úrovně alarmových hodnot. Po zapnutí přístroj 30 vteřin načítá pozadí, poté je připraven k detekci. Přístroj je možné nosit v pouzdře uchytilelném pomocí klipsu na opasek. Přes malé rozměry se dobře drží v ruce. Přístroj lze uchytit na teleskopickou tyč, ale vzhledem k malému displeji si v reálných podmínkách ETE nedokáže představit odečítání hodnot na větší vzdálenost. Vzhledem k jeho nemožnosti připojit k přístroji detektor nebo jinou sondu a nepraktickému odečítání hodnot při upevnění na teleskopické tyči není moc vhodným přístrojem pro pracovníky radiační ochrany na ETE.

Rodina přístrojů RadEye dále obsahuje B20-ER. Jedná se o univerzální přístroj k měření záření α , β i γ . I tento přístroj je velice malý, oproti svému předchůdci s ním je možno měřit i záření β a α , měření záření α lze využít pouze pro rychlý odhad. S přístrojem je dodáváno jako volitelné příslušenství stínící energetický filtr pro odstínění energie záření β a pro simulaci příkonu dávkového ekvivalentu v hloubce tkáně 0,07 mm a 10 mm. Rychlý odhad záření α můžeme provést s pomocí volitel-

ného filtru. Také se dá využít prodlužovací nástavec v délce 0,35 m a teleskopické tyče o délkách 1,2 respektive 4 m [17]. Přístroj je možné nosit v dodávané kapsičce s klípsem pro uchycení na opasek. Na přístroji lze volit měřenou veličinu a jednotky. Z knihovny se dá vybrat nuklid, pro který chceme interpretovat výsledky. Nasazení a sejmutí energetického filtru je jednoduché. Filtr je usazen v gumovém pouzdře, které se nasazuje na detektor. Na detektoru dobře sedí a nelze jej při běžné činnosti neopatrností odstranit. U tohoto přístroje absence připojení rozšiřujících detektorů není závadou. Vzhledem k jeho hmotnosti a rozměrům jej lze mít zasunut v kapsičce a v případě potřeby měření větších ploch na povrchovou kontaminaci by bylo možné použít jiný přístroj s větším detektorem. Což by bylo reálné za provozu bloku mimo odstávky na výměnu paliva. Podíváme-li se na použití přístroje během odstávky, je jeho detekční plocha malá. Jelikož spousta činností k měření větších ploch nastává během pochůzkové nebo kontrolní činnosti, pracovník by se musel vracet na své výchozí stanoviště pro přístroj s větší detekční plochou, což by vedlo k nežádoucí časové prodlevě. Pro běžnou pochůzkovou činnost mimo odstávku výrobního bloku a monitorování místností před prací, si dokáží tento přístroj představit. Jeden by mohl být uložen na CDRK, a být tak k dispozici všem pracovníkům radiační ochrany.

Posledním porovnávaným přístrojem z rodiny RadEye je AB100. Konstrukčně je přístroj dobře řešen. Mechanická odolnost se zdá být na dobré úrovni, stejně jako u ostatních přístrojů. Přístroji chybí možnost připevnění popruhu a tak jej musí uživatel nosit v ruce. Při lezení po žebříku tak nastává problém a lezení je neohrabané. Určitě by se dalo řešit kapsou na opasek vyrobenou na zakázku nebo vlastním „kutilským“ připevněním popruhu. U přístroje za \$2.824,74 [25] bych to předpokládal jako součást dodávky s přístrojem. Displej nepatří zrovna k největším a na větší vzdálenost je hůře čitelný. Kdyby došlo k doplnění o možnost uchycení popruhu, mohl by být dobrou náhradou za Kontamat. Rychlost odezvy na změnu okolního pozadí je jen o málo pomalejší než u Kontamatu. Na základě použití a principu scintilačního detektoru lze včas odhalit protržení sondy. Reakce na světlo

se projeví zobrazením vysoké hodnoty. Ověření, že se jedná o protrženou sondu je jednoduché a lze ho provést vystavením detektoru přímému světlu. Je-li reakce okamžitá, je potvrzeno protržení sondy. Rychlost opravy oproti Kontamatu je v tomto případě rychlá (defacto stačí „přelepít“ protrženou část). Váha 900 g (viz technické specifikace v tabulce 9) je obdobná jako u ostatních přístrojů.

Všechny přístroje z rodiny RadEye jsou svou konstrukcí a použitím materiálů dobře dekontaminovatelné.

Dalším výrobkem firmy Thermo je α , β sonda FHZ 742. Tato sonda nepatří k nejnovějším přístrojům nabídky výrobce Thermo, ale vybral sem ji do užšího výběru, protože patří do modulárního systému s přístrojem FAG, a mohl by být náhradou za Kontamat. Bohužel se mi tento přístroj nedostal do ruky k bližšímu prozkoumání a lze tedy jen usuzovat z prospektu a technických dat. Konstrukce vypadá bytelná, podle obrázku lze předpokládat kov nebo silnější plech. Účinnost se výrazně neliší od ostatních sond přibližně stejné velikosti. Váha přístroje je o 250 g vyšší než u Kontamatu a není to zásadní rozdíl. Připojení je k FAGu jako u ostatních rozšiřujících sond pomocí kabelu. Problém bych viděl v přenášení přístroje. Muselo by se řešit speciálně vytvořenou kapsičkou na opasek. Dále by se musel upravit kabel na rozumnou délku, aby se během přenášení a měření uživateli nepletl. Také by asi bylo nutné přepracovat software přístroje, aby šla provést kompenzace pozadí. Osobně bych přepracoval celou koncepci sondy tak, aby bylo možné vyhodnocovací jednotku jednoduše přichytit k sondě bez pomoci kabelu. V této sondě je velký potenciál a s přístrojem FAG by po změnách vznikla kvalitní základní sestava s dobrou přenositelností. Další nespornou výhodou by bylo odpadnutí používání samostatného přístroje pro záření α . Nevýhodu bych viděl ve větší váze celé sestavy, která by se blížila dvěma kilogramům.

Další uvažovanou alternativou ke Kontamatu by mohly být přístroj LB 124 od výrobce Berthold. Konstrukce je z odolného plastu, který je také dobře dekontaminovatelný. Detektor je chráněn vysouvací plechovou clonou, kterou lze sejmut

přes mírný odpor, který je dostatečný, aby nemohlo dojít k samovolnému vysunutí. U protržené sondy je analogický stav jako u RadEye AB100 od Therma a rychlost opravy je v tomto případě také rychlá. Samotná aktivní plocha by mohla být větší, vzhledem k velikosti spodní části přístroje mi přijde plocha nedostatečně využita. Reakce přístroje na změnu pozadí je delší než u Kontamatu, zvláště u nízkých aktivit, je možné po úpravě v menu částečně eliminovat na úkor přesnosti měření. Přístroj má zvukovou signalizaci pro nastavený alarm. Dosažením alarmové hodnoty se alarm spustí a nelze jej ztlumit, lze obejít nastavením na vysokou hodnotu. Při měření povrchové kontaminace pracovník sleduje displej neustále a změnu hodnoty vidí, není tedy potřeba zvukové signalizace. Pro přenášení přístroje je LB 124 osazen rukojetí a tak práce s ním je obdobná jako s Kontamatem. Navíc je schopen měřit záření α . Na displeji, který má možnost podsvícení, lze zobrazit zároveň hodnoty α i β nebo jednu z nich jako hlavní a druhá je zobrazena ve spodní části displeje. Přístroj lze označit za zmodernizovanou verzi Kontamatu avšak od jiného výrobce.

Výrobek VF Černá Hora PAM 350 je dalším z řady porovnávaných přístrojů, kterým lze úspěšně nahradit Kontamat. Konstrukce je opět z odolného dobře dekontaminovatelného plastu. Displej je velký a dobře čitelný možnost podsvícení je samozřejmostí jako u ostatních přístrojů. Ovládání je triviální přes tlačítka a lze si ho osvojit během pár minut. Tlačítka lze přepínat mezi typem měřené kontaminace, vybírat radionuklid nebo provádět korekci na pozadí. Nespornou výhodou je možnost, na požádání přístroj rozšířit o úchyty na popruh. Váha jednoho kilogramu odpovídá a nevymyká se od jiných přístrojů. Malou výtku bych měl k vyvážení přístroje, které je však logické z principu jeho tvaru a umístění rukojeti. Přístroj vás mírně „táhne“ za sebou. Jinak lze PAM 350 hodnotit jako povedený a je možné jeho použití v provozech, kde je potřeba měření α a β kontaminace.

Podíváme-li se na rodinu přístrojů CSP od výrobce Canberra Packard, lze nalézt jistou analogii s modulárním systémem přístroje FAG od Therma Scientific. Ovšem s jedním podstatným rozdílem. U přístrojů z rodiny CSP je vidět zapracování no-

vých technologií do přístrojů. Srdcem vybraných přístrojů je Colibri TTC, který jako FAG měří PDE. Ovládá se přes velký dotykový displej. Přístroj je možné přichytit na opasek pomocí klipsu nebo jej nasunout na hřbet ruky za pomoci popruhu upevněného na spodní části přístroje. Lze jej také nosit na zápěstí za pomoci řemínku. Přístroj je vyroben z polykarbonátu s elastomerem, klávesnice je silikonová. Přístroj je vodotěsný a snadno dekontaminovatelný. Citlivost detektoru je nízká, ve srovnání s FAGem dosahuje téměř třetiny jeho hodnoty, to by mohlo značně prodlužovat dobu měření v nižších PDE. K přístroji lze připojit, jak již bylo uvedeno v hlavním popisu, až osm zařízení. Sedm bezdrátovou technologií a osm pomocí kabelu. Colibri TTC je vybaven GPS modulem pro zaznamenání polohy s naměřenou hodnotou, takto lze uložit až 60 000 měřených hodnot [22]. Pro bezdrátový přenos je potřeba instalovat na sondu komunikační port, který má podobu malého válečku [26] a ergonomicky po nasazení splývá se sondou. U bezdrátového přenosu komunikačním modulem pomocí Bluetooth, by jistě stálo za zvážení místo verze 2.0, použití Bluetooth low energy, snížila by se tak energetická náročnost na provoz při používání Bluetooth a zároveň by se prodloužila vzdálenost komunikace s Colibri TTC, která je nyní udávána 20 m [26]. Ovšem je nutné přihlídnout k objemu dat, který je přenášen. Předpokládám, že rychlost 0,26 Mbit/s by měla být dostačující. Wi-Fi přenos je možný pouze ze sondy s komunikačním modulem přes aktivní Wi-Fi bod a dále prostřednictvím počítačové sítě. V počítači připojenému k počítačové síti je pak pomocí softwarového prostředí možné kontinuálně kontrolovat měřené hodnoty z několika sond najednou. Nevýhodou je chybějící hybridní komunikační port pro sondy, který by obsahoval Bluetooth a Wi-Fi přenos najednou. Jsou vyráběny pouze samostatně v bluetooth, Wi-Fi, radiofrekvenční a POE ethernet modulech. Sondy jsou samostatně napájeny z vlastní dobíjecí Li-ion baterie. Výdrž baterie je uvedena >80 h. Z externích sond nejlépe vyhovují širokorozsahová γ sonda STTC a Alfa/beta sonda SAB-100. Sonda STTC má analogické využití se sondami FHZ 632 L-10 a FHZ 612-10 v kombinaci s teleskopickou tyčí nebo kabelem. Teleskopická tyč od Canberry Packard má pohyblivý výkyvný systém uchycení sondy, stejně je

i řešen systém uchycení Colibri. Využitelnost vidím při měření povrchové kontaminace velkých ploch, jako jsou například podlahy. Pracovník by mohl pohodlně monitorovat podlahu ve stoje. Další výhodou je snadné monitorování podvozků automobilů nebo těžko přístupných ploch. Teleskopické tyče jsou dodávány v délkách 420 - 1410 mm a 1030 - 2020mm [27]. Kratší teleskopická tyč by mohla ve složeném stavu při nasazení sondy SAB-100 a Colibri TTC celkem efektivně nahradit mnou navrhované vylepšení u sondy FHZ 742. Ovšem váha takovéto sestavy by se blížila téměř k 3,5 kg. Přístroj by mohl být díky GPS a ukládání dat využit rychlou mobilní monitorovací skupinou v případě mimořádné události. Tato myšlenka je pouze spekulativní a nad rámec této práce. Může však být inspirací a zhodnocena v jiné práci.

Posledním z porovnávaných přístrojů je neutronová sonda LB 6411 s přístrojem LB 123 UMo. Sonda je téměř o dva kilogramy 12) lehčí než neutronová sonda FHT 752 od Therma Scientific. Zobrazovací jednotka je přichycena ve speciálním úchytu umístěném na vrchní části sondy. Je třeba dbát na pevného zaaretování jednotky. Jinak se snadno uvolní a dochází k posuvu v úchytu. Přístroj tvoří kompaktní celek. Přístroj LB 123 UMo slouží jako zobrazovací jednotka, lze na ni připojit i jiná zařízení, ale pro účely a použití jako přenosného zařízení jsou nevhodné. Jediná vhodná kombinace je s neutronovou sondou LB 6411. Tuto sondu má ve své výbavě i Český metrologický institut.

Jak je vidět z výše uvedené diskuze výsledků, všechny přístroje jsou schopny plnit účel, ke kterému byly vyrobeny. Nemožnost vyzkoušet v praxi všechny přístroje brání nalezení optimálního řešení přenosných přístrojů pro měření radioaktivity na novém jaderném zdroji.

Budeme-li vycházet z úvahy, že nový jaderný zdroj bude stavěn nejnovějšími technologiemi a pracovníky radiační ochrany budou tvořit generace, které již nemají problém plně využívat nové technologie, jistě tyto technologie uvítají i pracovníci radiační ochrany při své práci. Z tohoto pohledu také bude jistě vyžadován ucelený

modulární systém přenosných přístrojů, respektive jeden mateřský přístroj, který bude schopen měřit příkon dávkového ekvivalentu a zároveň bude zobrazovací jednotkou pro ostatní lehce připojitelné sondy a detektory, které spojením vytvoří lehký a kompaktní složený systém. Takto vytvořený modulární systém nalezne využití na jakékoli jaderné elektrárně i jiném pracovišti, vyžadující monitorování více než jedné radiační veličiny. Tomuto požadavku zatím nevyhovuje žádný systém.

Systém od výrobce Thermo Scientific, kde lze považovat FH 40 G za mateřský přístroj, v kombinaci s externími sondami a detektory, má systém zatím nejucelnější. Tento celek by notně potřeboval zmodernizovat a přizpůsobit požadavkům moderního uživatele.

Systém CSP od výrobce Canberra Packard je obohacen o nové technologie, které usnadňují práci. Při zkombinování dostupných produktů rodiny CSP se lze částečně přiblížit k ideální sestavě moderního pracovníka radiační ochrany. Tento systém však nebyl prakticky vyzkoušen a nelze tedy s jistotou potvrdit ani vyvrátit jeho vhodnost pro použití na novém jaderném zdroji.

6 Závěr

Cílem práce bylo zmapování aktuální nabídky přístrojů pro potřeby radiační ochrany, které momentálně nabízejí výrobci či autorizovaní zástupci výrobců. Vzájemně je porovnat s přístroji momentálně používanými na jaderné elektrárně Temelín a následně nalezení provozně optimálního řešení přenosných přístrojů pro měření radioaktivity na novém jaderném zdroji.

Z katalogů a internetových stránek výrobců přístrojů jaderné elektroniky bylo možné zmapovat aktuální nabídku přístrojů a tento cíl byl splněn.

Vzájemné porovnání všech přístrojů již však nemohlo být provedeno. Důvodem je jejich momentální nedostupnost v České republice. Konkrétně se jedná o rozšiřující sondu FHZ 742 povrchové kontaminace α i β a přístroje z rodiny CSP výrobce Canberra Packard. Tento cíl byl splněn částečně.

Nemožnost vyzkoušet v praxi všechny přístroje brání nalezení optimálního řešení přenosných přístrojů pro měření radioaktivity na novém jaderném zdroji. Tento cíl nebyl splněn.

Po zhodnocení všech dostupných informací o přístrojích a praktickém vyzkoušení většiny z nich nelze s jistotou potvrdit ani vyvrátit hypotézu o vhodnosti stávajících přístrojů pro nový jaderný zdroj.

Tato práce bude poskytnuta oddělení radiační ochrany jaderné elektrárny Temelín. Jejím předpokladem je, že zjištěné výsledky napomohou při výběru nových přístrojů na nový jaderný zdroj nebo k případné obnově stávajících.

7 Seznam zdrojů

- [1] FLAKUS, F.N. Detection and measuring ionizing radiation - a short history. *IAEA BULLETIN*, 1981. roč. 23, č. 4.
- [2] *Radiobiologie* [online]. [cit. 2012-03-29]. URL <http://fbmi.sirdik.org/>.
- [3] BROUNKOVÁ, Dana. *Radiační ochrana pro vybrané pracovníky služeb významných z hlediska radiační ochrany*. Brno: Centrum rozvoje a přípravy ČEZ a.s., 2007.
- [4] ULLMANN, Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika*, 2008 [2012-04-27]. URL <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>.
- [5] Zákon č.18/1997 sb., o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření (atomový zákon) a o změně a doplnění některých zákonů.
- [6] ULLMANN, Vojtěch. *Detekce aplikace ionizujícího záření* [online]. 2008 [2012-03-29]. URL <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>.
- [7] KOLÁČEK, Petr. *Radiační ochrana pro vybrané pracovníky velmi významných zdrojů*. Centrum rozvoje a přípravy ČEZ a.s., 2000.
- [8] ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření* [online]. 2012 [cit. 2012-03-29]. URL <http://www.fbi.vsb.cz/miranda2/export/sites-root/fbi/050/cs/sys/resource/PDF/studijni-materialy/zareni.pdf>.
- [9] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření*. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2011. 182 s. ISBN 978-80-01-04710-1 (BROŽ.).
- [10] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření 5.díl*. 1. vyd. Praha: BEN, 2007. 189 s. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [11] SAJDL, Petr. *Přehled detektorů ionizujícího záření* [online]. 2005. URL <http://web.vscht.cz/sajdlp/Detektor.doc>.

- [12] KREJČÍ, Vladimír. *Scintilační detektory* [online]. 2002 [cit. 2012-04-26]. URL <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Scintilacni%20detektory.pdf>.
- [13] ŠEDA, Josef a kol. *Dozimetrie ionizujícího záření*. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1983. 420 s.
- [14] KLENER, Vladislav, . *Principy a praxe radiační ochrany*. Praha: Státní úřad pro jadernou bezpečnost, 2000. 619 s. ISBN 80-238-3703-6.
- [15] THERMO SCIENTIFIC. *FH 40 G Přístroj pro měření dávkového příkonu*, 2003. Prospekt.
- [16] THERMO SCIENTIFIC. *Přenosný monitor kontaminace "Contamat" FHT 111 M*, 1992. Prospekt.
- [17] *Radeye - selection guide* [online]. 2007 [cit. 2012-04-25]. URL http://www.thermo.com.cn/Resources/200802/productPDF_3090.pdf.
- [18] THERMO SCIENTIFIC. *The Modular System for Radioactivity Measurements*, 2007 [cit. 2012-04-25]. Prospekt, URL http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Product/productPDF_2635.pdf.
- [19] *Lb 124 scint for α - and β - γ -measurement* [online]. [cit. 2012-04-25]. URL <https://www.berthold.com/en/rp/product/lb-124-scint-and-b-g-measurement>.
- [20] *Lb 6411 neutron probe* [online]. [cit. 2012-04-25]. URL <https://www.berthold.com/en/rp/product/lb-6411-neutron-probe>.
- [21] *Přenosná měřidla kontaminace pam* [online]. [cit. 2012-04-25]. URL <http://www.vf.cz/data/files/b-10-b0002c-pam-series-4-pages-236-cz.pdf>.

- [22] *Colibri ttc: Hand-held health physics communication alara platform* [online]. 2010 [cit. 2012-04-25]. Prospekt, URL <http://www.canberra.com/pdf/Products/Colibri-Intl-SS-C37947.pdf>.
- [23] *Sttc wide range gamma probe* [online]. 2011 [cit. 2012-04-25]. URL <http://www.canberra.com/pdf/Products/STTC-SS-C39120.pdf>.
- [24] *Sab-100 alpha/beta probe* [online]. 2011 [cit.2012-04-25]. URL <http://www.canberra.com/pdf/Products/SAB-100-SS-C36942.pdf>.
- [25] *Thermo scientific* radeye ab100 alpha-beta contamination monitors* [online]. 2012 [cit. 2012-03-29]. URL <http://www.fishersci.com/ecom/servlet/fsproductdetail?storeId=10652&productId=11958453&catalogId=29104&matchedCatNo=19810124&endecaSearchQuery=%23store%3DScientific%23N%3D0%23rpp%3D15&fromSearch=1&searchKey=RadEye&highlightProductsItemsFlag=Y>.
- [26] *Csp-com: Communication modules for csp probes* [online]. 2012 [cit. 2012-03-29]. URL <http://www.canberra.com/products/438199.asp>.
- [27] *Telescoping pole for radiagem and csp* [online]. 2008 [cit. 2012-03-29]. URL <http://www.canberra.com/pdf/Products/TelescopingPole-Radiagem-SS-C30041.pdf>.

8 Klíčová slova

přístroje radiální ochrany - nový jaderný zdroj - jaderná elektrárna - měřicí jaderná elektronika - příkon dávkového ekvivalentu -povrchová kontaminace - detektory záření