

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

Obor: Kybernetika a robotika



# Detektor ionizujícího záření pro mobilního robota

## Ionizing radiation detector for mobile robot

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Martin Indrych

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Rok: 2021



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Indrych** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **483594**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Detektor ionizujícího záření pro mobilního robota**

Název bakalářské práce anglicky:

**Ionizing radiation detector for mobile robot**

Pokyny pro vypracování:

- Seznamte se s principy funkce detektorů radiace.
- Navrhněte, sestavte a otestujte detektor radiace založený na PIN fotodiodovém detektoru se scintilačním krystalem i bez něj, detektor bude umožňovat připojení na sběrnici CAN a RS232.
- Porovnejte jeho citlivost s detektorem s Geiger-Mullerovou trubicí.
- Sestavte i ruční verzi detektoru s displejem a možností záznamu dat.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Syed Naeem Ahmed: "Physics and Engineering of Radiation Detection". Elsevier Science & Technology, 2007
- [2] Paul Horowitz, Winfield Hill: "The Art of Electronics", 3rd edition, Cambridge University Press 2015
- [3] Ahmet Bindal: "Electronics for Embedded Systems". Springer International Publishing, Switzerland 2017
- [4] Mark I. Montrose: "EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple", IEEE 1999

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D., 13138**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2021/2022**

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

3.5.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Martin Indrych



## **Poděkování**

Děkuji Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily. Také děkuji panu Ing. Pavlu Novotnému za provedené měření v Českém metrologickém institutu v oddělení legální metrologie veličin ionizujícího záření.

Martin Indrych

*Název práce:*

## **Detektor ionizujícího záření pro mobilního robota**

*Autor:* Martin Indrych

*Studijní program:* Kybernetika a robotika

*Obor:* Kybernetika a robotika

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Katedra měření

*Abstrakt:* Tato práce se zabývá problematikou měření ionizujícího záření. Cílem práce je sestavit a otestovat detektor ionizujícího záření za pomoci PIN diod a scintilačního krystalu na mobilního robota. Následně navrhnout řídicí desku, která detekované záření zpracuje, vyhodnotí a pomocí komunikačního rozhraní odešle informace o měření. Řídicí desky byly vyhotoveny ve dvou provedeních, pro mobilního robota a jako ruční detektor napájený bateriemi. V závěru práce jsou sestavené detektory otestovány a porovnány s Geiger-Müllerovou trubicí.

*Klíčová slova:* ionizující záření, detekce, pulzy

*Title:*

## **Ionizing radiation detector for mobile robot**

*Author:* Martin Indrych

*Abstract:* The thesis deals with the issue of ionizing radiation. The aim of the thesis is to build and test a detector of ionizing radiation with PIN diode and scintillation crystal for mobile robot. Then to design a control board which will process the ionizing radiation generated in the detectors, evaluate it and then send the measured data via communication. The control boards were made in two versions. One is used for the mobile robot and the second one is used as a handheld detector with batteries. At the end of the thesis there is a comparison between GM Tube and built detectors.

*Key words:* ionizing radiation, detection, pulses

# Obsah

Seznam použitých zkratk	xi
Seznam obrázků	xii
Úvod	1
<b>1 Ionizující záření</b>	<b>3</b>
1.1 Charakteristika ionizujícího záření . . . . .	3
1.1.1 Alfa záření . . . . .	3
1.1.2 Beta záření . . . . .	4
1.1.3 Gama záření . . . . .	6
1.2 Veličiny a jednotky . . . . .	6
1.3 Zdroje ionizujícího záření . . . . .	7
1.3.1 Přírodní zdroje . . . . .	8
1.3.2 Umělé zdroje . . . . .	8
1.3.3 Zdroje záření použité pro testování . . . . .	9
1.4 Vliv ionizujícího záření na člověka . . . . .	9
<b>2 Detekce ionizujícího záření</b>	<b>11</b>
2.1 Pojmy spojené s detektory . . . . .	11
2.1.1 Mrtvá doba . . . . .	11
2.1.2 Stínění detektoru . . . . .	11
2.2 Dělení detektorů . . . . .	12
2.2.1 Spektrometrický a nespektrometrický detektor . . . . .	12
2.2.2 Kontinuální a kumulativní detektory . . . . .	12
2.2.3 Dle principu detekce . . . . .	12
2.3 Geiger-Müllerova trubice . . . . .	13
2.4 Detektor se scintilačním krystalem . . . . .	15
2.5 Detektor s PIN diodou . . . . .	16

<b>3</b>	<b>Návrh a testování detektoru ionizujícího záření</b>	<b>17</b>
3.1	Návrh schématu prototypu detektoru s PIN diodou . . . . .	17
3.2	Návrh detektoru se Scintilačním krystalem . . . . .	19
3.3	Návrh detektoru s PIN diodou . . . . .	21
3.4	Detektor se scintilačním krystalem přichyceným na PIN diody . . . . .	21
3.5	Porovnání sestavených detektorů . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Návrh a testování řídicí desky</b>	<b>25</b>
4.1	Návrh schéma řídicí desky pro ruční detektor . . . . .	25
4.1.1	Napájecí blok . . . . .	26
4.1.2	3V3 regulátor . . . . .	26
4.1.3	5V regulátor . . . . .	27
4.1.4	Mikrokontroler . . . . .	28
4.1.5	OLED displej . . . . .	28
4.1.6	USB modul . . . . .	29
4.1.7	Blok zpracování signálů z detektoru . . . . .	30
4.1.8	Doplňkové obvody . . . . .	30
4.2	Návrh DPS řídicí desky pro ruční detektor . . . . .	31
4.3	Návrh schéma řídicí desky pro rover . . . . .	33
4.3.1	Modul CAN . . . . .	34
4.3.2	Modul RS232 . . . . .	34
4.4	Návrh DPS řídicí desky pro rover . . . . .	35
4.5	Oživení a testování řídicích desek . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Firmware řídicí desky</b>	<b>37</b>
5.1	Firmware řídicí desky ručního detektoru . . . . .	37
5.1.1	Zpracování pulzů a měření napájecího napětí . . . . .	38
5.1.2	Komunikace přes USB . . . . .	38
5.1.3	SPI komunikace s displejem . . . . .	40
5.1.4	Obsluha tlačítek . . . . .	40
5.1.5	Čítač pulzů . . . . .	41
5.2	Firmware řídicí desky pro rover . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Testování a porovnání s Geiger-Müllerovou trubicí</b>	<b>43</b>
6.1	Měření na ručním detektoru . . . . .	44
6.1.1	Cs-137 . . . . .	45



---

6.1.2	Kobalt, Cesium a Yttrium . . . . .	46
6.1.3	Amplituda pulzů . . . . .	48
6.2	Měření na detektoru pro rover . . . . .	51
6.2.1	Cs-137, Co-60, Y-88 . . . . .	51
	<b>Závěr</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>55</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>59</b>
A	Výkresy spodní a vrchní části pouzdra ručního detektoru . . . . .	59



# Seznam použitých zkratek

<b>DPS</b>	Deska plošných spojů
<b>GM</b>	Geiger Müllerova (trubice)
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>AD</b>	Analogově-digitální (převodník)
<b>DA</b>	Digitálně-analogový (převodník)

# Seznam obrázků

1.1	Schéma vzniku alfa částice . . . . .	4
1.2	Schéma vzniku beta částice s emisí elektronu . . . . .	5
1.3	Schéma vzniku beta částice s emisí pozitronu . . . . .	5
1.4	Schéma vzniku gama částice . . . . .	6
1.5	Průměrná expozice obyvatel . . . . .	7
1.6	Školní demonstrační zdroj záření . . . . .	9
1.7	Kempingová punčoška . . . . .	9
1.8	Ozařovna Řež . . . . .	10
2.1	Schéma zapojení GM trubice . . . . .	14
2.2	Schéma scintilačního krystalu . . . . .	15
2.3	Pravděpodobnost absorpce záření gama . . . . .	16
3.1	Schéma prototypu detektoru záření . . . . .	17
3.2	Osazená deska prototypu . . . . .	18
3.3	Schéma zapojení detektoru se scintilačním krystalem . . . . .	19
3.4	Deska plošných spojů detektoru se scintilačním krystalem . . . . .	20
3.5	DPS <sup>1</sup> detektoru se scintilačním krystalem . . . . .	20
3.6	DPS detektoru s pin diodami . . . . .	21
3.7	Samostatně vytvořený detektor se scintilačním krystalem . . . . .	22
3.8	Pulz detektoru s PIN diodami . . . . .	22
3.9	Pulz detektoru se scintilačním krystalem . . . . .	23
4.1	Blokové schéma řídicí desky pro ruční detektor . . . . .	26
4.2	Schéma napájecího bloku . . . . .	26
4.3	Schéma 3,3 V regulátoru . . . . .	27
4.4	Schéma 5V regulátoru . . . . .	28

---

<sup>1</sup>Deska plošných spojů



---

4.5	OLED displej . . . . .	29
4.6	Schéma USB modulu . . . . .	29
4.7	Schéma bloku zpracování signálů z detektoru . . . . .	30
4.8	DPS řídicí desky . . . . .	31
4.9	Řídicí deska . . . . .	31
4.10	Vyfrézované pouzdro . . . . .	32
4.11	Boční pohled na vnitřní rozmístění v pouzdře . . . . .	32
4.12	Spodní a horní strana pouzdra detektoru . . . . .	33
4.13	Blokové schéma řídicí desky pro rover . . . . .	33
4.14	Modul CAN . . . . .	34
4.15	Modul RS232 . . . . .	35
4.16	DPS řídicí desky pro rover . . . . .	35
4.17	Finální zpracování řídicí desky pro rover . . . . .	36
5.1	Výpis informací do terminálu . . . . .	39
5.2	Výpis informací pro logování v terminálu . . . . .	39
5.3	Příklad vykreslených pulzů z hodnot odeslaných přes USB . . . . .	40
6.1	Měření ručním detektorem . . . . .	44
6.2	Porovnání frekvence měřených pulzů . . . . .	45
6.3	Pulzy naměřené na Cs-137 vzorek 86 . . . . .	46
6.4	Porovnání frekvence měřených pulzů pro další etalony . . . . .	47
6.5	Pulzy naměřené na Y-88 . . . . .	48
6.6	Histogram pulzů pro detektor se Scintilačním krystalem . . . . .	49
6.7	Histogram pulzů pro detektor s PIN diodami . . . . .	49
6.8	Histogram pulzů pro detektor se Scintilačním krystalem . . . . .	50
6.9	Histogram pulzů pro detektor s PIN diodami . . . . .	50
6.10	Měření detektorem pro rover . . . . .	51
6.11	Porovnání frekvence měřených pulzů etalonů pro rover . . . . .	52
12	Výkres přední části pouzdra . . . . .	59
13	Výkres spodní části pouzdra . . . . .	60



# Úvod

Ionizující záření slouží člověku již mnoho let. Dokážeme jej využít v různých odvětvích, ať už je to například energetika, lékařství nebo výzkum. Všude, kde se ionizující záření vyskytuje, je nezbytné myslet na odbornou ochranu proti jeho úniku a následným dopadům na zdraví člověka. Protože je ionizující záření mimo viditelné spektrum lidského oka, jeho přítomnost v našem okolí nijak neodhalíme. Pokud tedy nemluvíme o takové dávce, která by způsobila akutní zdravotní obtíže.

K účelu detekce ionizujícího záření se používají různé typy detektorů založených na různých principech. Může se jednat o detektory upozorňující na ionizující záření v okolí nebo přímo měřící jeho dávku nebo také zaznamenávající dlouhodobé působení s pozdějším vyhodnocením. Nejznámějším detektorem ionizujícího záření je Geiger-Müllerova trubice.

První detektor sestavený v této práci využívá stíněných PIN diod, které jsou schopné ionizující záření převést na proudový pulz. Tento pulz je dále zesílen operačními zesilovači, aby jej bylo možné měřit. Druhý detektor využívá scintilačního krystalu, který je připevněn na povrch PIN diody. Luminiscenční scintilační krystal je schopen zachytit ionizující záření. Pohlcením záření se excitují elektrony krystalu a při jejich následné deexcitaci emitují fotony viditelného světla. [1] Detektor se scintilačním krystalem by měl mít vyšší procentuální šanci na zachycení ionizujícího záření i pro vyšší hodnoty energie (60 keV a více) gama záření. Výše zmíněnými detektory je možné snímat beta a gama záření. Alfa záření je zastaveno stíněním, kterým jsou detektory chráněny před světelným a elektromagnetickým rušením.

Kromě samotného detektoru ionizujícího záření byly vypracovány řídicí desky, které zpracovávají signály z detektorů. Vypracovány byly ve dvou provedeních, pro mobilního robota a ruční detektor. Ve verzi pro mobilního robota je využita samotná řídicí deska, která se spojí s robotem pomocí 6-pinového kabelu, který slouží

k napájení a komunikaci přes RS232 (s PC) a CAN<sup>2</sup> (s roverem). V případě ručního detektoru je navíc přidáno napájení pomocí baterií, aby nevznikla závislost na připojení ke zdroji pomocí kabelu. Dále jsou přidána tlačítka a displej pro intuitivní nastavování detektoru a vyčítání naměřených hodnot přímo z displeje.

V závěru práce je popsán vytvořený firmware pro obsluhu řídicích desek. Také je zmíněno testování na etalonech aktivity a porovnání s Geiger-Müller trubicí. Případné další možnosti vylepšení a další vhodné implementace jsou popsány na samotném konci práce.

---

<sup>2</sup>Controller Area Network



# Kapitola 1

## Ionizující záření

### 1.1 Charakteristika ionizujícího záření

Název pro ionizující záření pochází z termínu ionizace. Označuje to proces, při kterém se elektricky neutrální atom nebo molekula přemění na iont. Ionizující záření je charakterizováno tím, že jeho kvanta mají energii postačující k ionizaci atomů nebo molekul látky která je ozářena. Neboli je to záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu, a tím látku ionizovat[2].

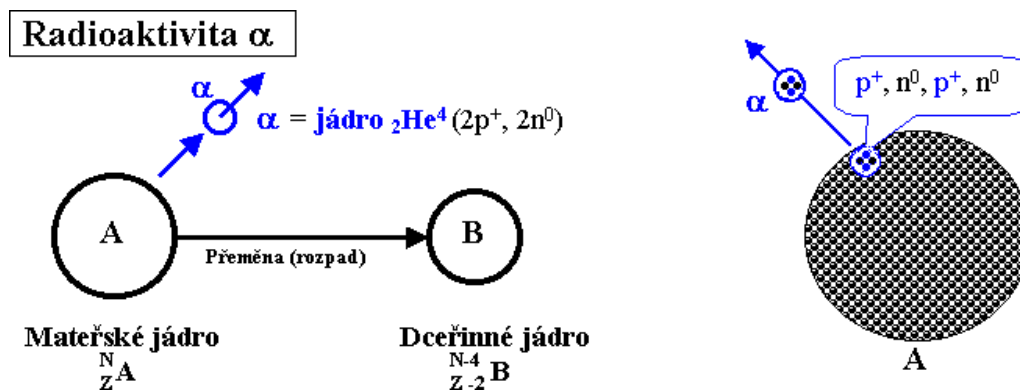
Z pohledu způsobu interakce záření s hmotou lze ionizující záření rozdělit na přímo a nepřímo ionizující. Přímou ionizující záření je sestaveno z nabitých částic. Jsou to například elektrony, pozitrony nebo protony. Tyto zmíněné částice mají dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby byly schopny vyvolat ionizaci. Nepřímo ionizující záření je na druhou stranu sestaveno z nenabitých částic, jako jsou fotony nebo neutrony. Tyto částice samy o sobě prostředí neionizují. Při interakci s látkou nebo prostředím předávají svoji energii nabitým částicím a ty následně přímo působí na atomy a způsobují následnou ionizaci. Samotná ionizace je pak přímo způsobena těmito nabitými částicemi. Záření dále dělíme dle jednotlivých částic.

#### 1.1.1 Alfa záření

Alfa záření, neboli také proud alfa částic se skládá, jak je z názvu zřejmé, z alfa částic. Název označuje jádro helia tvořené dvěma protony a dvěma neutrony. Částice je tedy kladně nabitá s elektrickým nábojem  $+2e$ . Vzniká při uvolnění z

jádra rozpadajících se prvků, ze kterých odvede dva protony a dva neutrony.

"Vzhledem k tomu, že částice alfa rychle ztrácí ionizační energii, je dolet alfa záření velmi malý. V plynech je to řádově několik centimetrů, v kapalinách a pevných látkách zlomky milimetrů." [3]. Jako častý příklad se také uvádí, že k zastavení alfa částic stačí tenký list papíru.

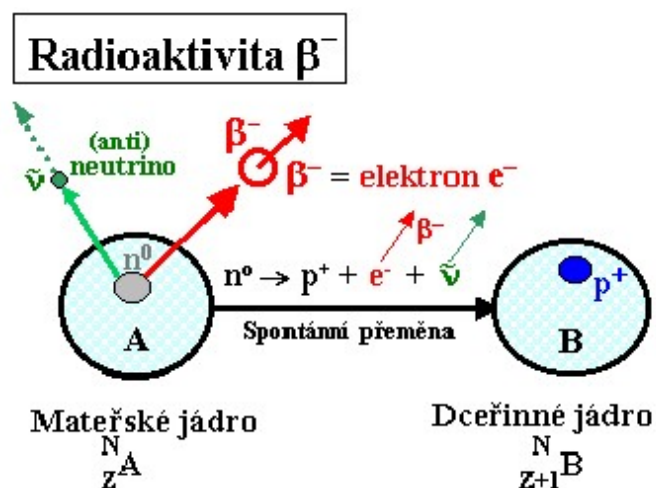


Obrázek 1.1: Schéma vzniku alfa částice [4]

Proces vytvoření alfa částice je zachycen na obrázku 1.1. Mateřské jádro se rozdělí na alfa částici a dceřiné jádro, které je oproti mateřskému jádru poníženo o dva elektrony a dva neutrony. Současné využití alfa částic je například v detektorech kouře (kouř, který vstoupí do detektoru, sníží počet alfa částic a spustí tím alarm) nebo slouží jako takzvaný eliminátor statických nábojů ze zařízení [5].

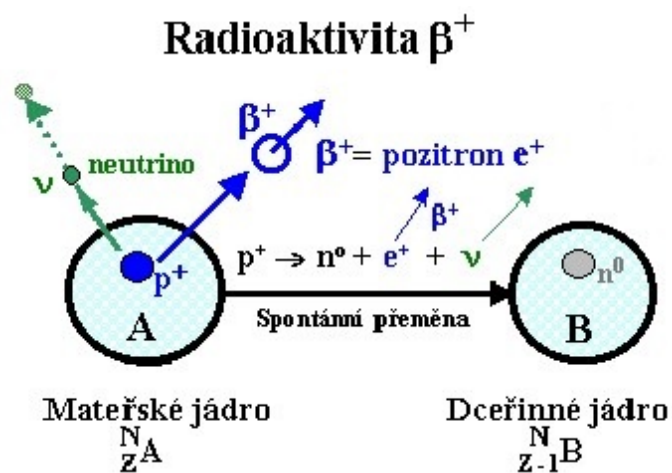
### 1.1.2 Beta záření

Beta záření se dělí na dva různé typy. Beta rozpad s emisí elektronu ( $\beta^-$ ) a beta rozpad s emisí pozitronu ( $\beta^+$ ). Nejprve si rozebereme rozpad s emisí elektronu. Jak již název napovídá, jádro emituje elektron. Vzhledem k tomu, že v jádře atomu se žádné elektrony nenacházejí, musí této emisi předcházet přeměna neutronu v jádře na proton, elektron a antineutrino. Tento proces je zachycen na obrázku 1.2.



Obrázek 1.2: Schéma vzniku beta částice s emisí elektronu [4]

Druhým typem je rozpad s emisí pozitronu. Pozitron vzniká v jádře atomu přeměnou protonu na neutron, pozitron a neutrino. Grafické znázornění viz obrázek 1.3.

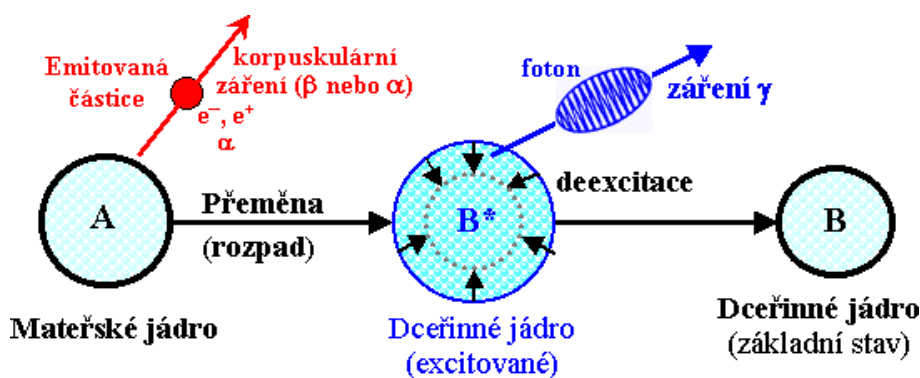


Obrázek 1.3: Schéma vzniku beta částice s emisí pozitronu [4]

Vzhledem ke skutečnosti, že beta záření nese elektrický náboj (kladný nebo záporný), je jejich pohyb ovlivňován. Nejčastěji může být ovlivňován elektrickým nebo magnetickým polem. Oproti alfa záření se beta záření vyznačuje vyšší pronikavostí. Obecně známým faktem je, že jej lze zastavit 1 mm tlustým kovovým plátem. Využití beta záření v současnosti je například měření tloušťky tenkých materiálů.

### 1.1.3 Gama záření

Gama záření může vzniknout během jaderných reakcí nebo při radioaktivním rozpadu při přechodu jádra z vyššího do nižšího energetického stavu. To je jev, ve kterém se jádro zbavuje své excitační energie. Vzhledem k tomu, že mluvíme o proudu fotonů, částice gama záření nepřenáší žádný elektrický náboj. Jedná se ovšem o vysoce energetické záření s velmi krátkou vlnovou délkou  $10^{-11}$  až  $10^{-13}$ m [3]. Gama záření je schopné proletět skrz lidské tělo a obecně známý způsob zastavení gama záření je 1 m tlustá betonová stěna. Na obrázku 1.4 lze vidět grafické znázornění již popsaného jevu, při kterém vzniká gama částice. Použití gama záření je například v lékařství k radioterapii.



Obrázek 1.4: Schéma vzniku gama částice [4]

## 1.2 Veličiny a jednotky

První termín využívaný u ionizujícího záření se nazývá poločas přeměny. Vyjadřuje dobu, za kterou klesne aktivita radioaktivní látky na polovinu. Poločas přeměny se liší pro jednotlivé radioaktivní látky. Přesněji se pohybuje od setin sekundy do milionu let. Například poločas rozpadu draslíku, který je hlavním zdrojem radioaktivity našich těl, je 1,42 miliardy let [6].

Aktivita zdroje záření vyjadřuje počet radioaktivních přeměn probíhajících v určitém množství radionuklidu za jednotku času. Jednotkou aktivity je Becquerel [Bq]. Dojde-li v látce k jedné přeměně za 1 sekundu, má aktivitu 1 Bq. Obecně je tato jednotka velmi malá, často mluvíme alespoň o tisících až milionech Bq.

Základní veličinou která popisuje účinek záření je dávka. Udává množství energie pohlčené na jednotku hmotnosti. Jednou je Gray (Gy). Pro srovnání, 1 Gy od-

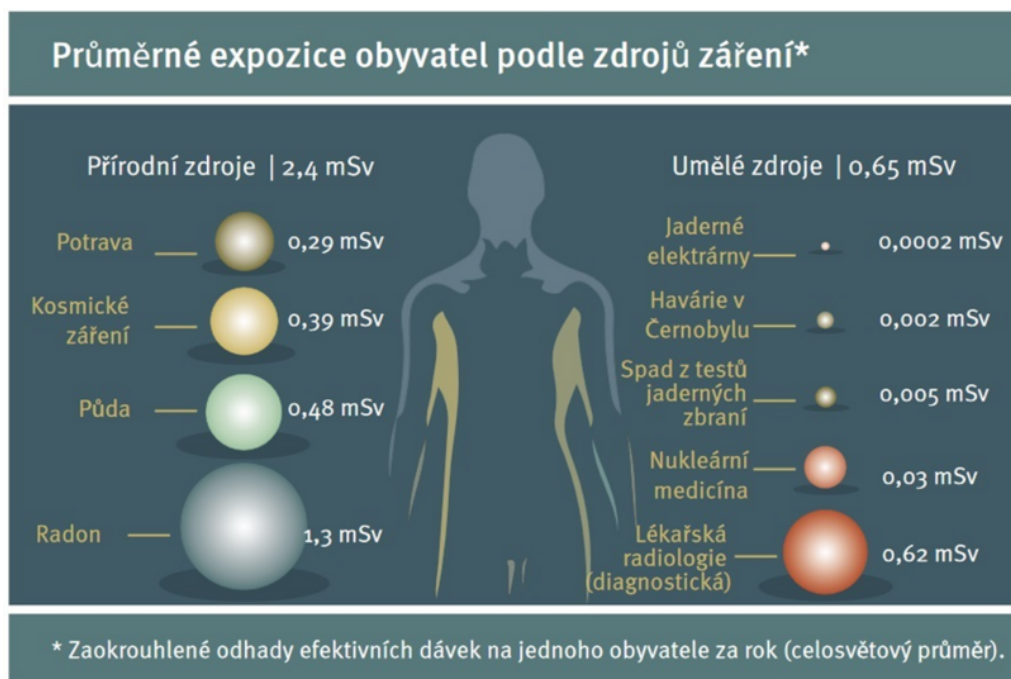


povídá energii o velikosti 1 joule na 1 kilogram hmotnosti, na který energie působí.

Pro měření vlivu záření na člověka byla zavedena veličina dávkový ekvivalent, jejíž jednotkou je Sievert (Sv). Pro příklad jedno rentgenové vyšetření plic může představovat až 1 mSv [6]. Tato veličina byla vytvořena z důvodů odlišných účinků jednotlivých záření při shodné dávce.

### 1.3 Zdroje ionizujícího záření

Celý život je člověk vystaven ionizujícímu záření aniž by si to uvědomoval. Zdroje tohoto záření jsou všude kolem nás, dokonce i v našem organismu. Nejvíce jsme vystaveni záření z takzvaných přírodních zdrojů (zhruba 90 %). Zbýlých 10 % zastávají umělé zdroje. Tyto umělé zdroje byly vyvinuty lidskou rasou a jsou používány například v lékařství (rentgen), výzkumu, nebo průmyslu. Zdroje ionizujícího záření můžeme také nazvat zářiče. Rozdělujeme je na dva základní typy, a to, jak již bylo zmíněno, na přírodní a umělé zdroje záření. Na obrázku 1.5 můžeme vidět průměrné hodnoty expozice obyvatel.



Obrázek 1.5: Průměrná expozice obyvatel [7]

### 1.3.1 Přírodní zdroje

Nejznámější z přírodních zdrojů jsou záření z kosmického prostoru a záření z radioaktivních materiálů vyskytujících se v zemské kůře a jádru. Jsou to zdroje, které nejsou nijak uměle vytvořeny lidmi.

Kosmické záření je již dle svého názvu v kosmickém prostoru. Nejčastěji je vyzařováno Sluncem a erupcemi, které na něm probíhají. Vzhledem k umístění výskytu záření platí na planetě Zemi, že v čím nižší nadmořské výšce se nacházíme, tím nižší hodnotě ozáření jsme vystaveni. Je to způsobeno vyšším stíněním záření vzduchem v nižší nadmořské výšce. Lidé žijící u hladiny moře jsou v průměru vystaveni efektivní dávce 0,3 mSv ročně. Naopak lidé žijící ve výšce 2000 metrů nad mořem jsou ozařování několikanásobně vyšší dávkou. Při běžné letové výšce při 10 hodinovém letu činí průměrně efektivní dávka 0,03-0,08 mSv [7].

V zemské kůře, či jádru můžeme najít například známý plyn Radon. Radon-222 je radionuklid, který samovolně uniká z půdy. Může pronikat do budov přes sklepy a schodištní prostory, čímž se v obytné a případně nevětrané oblasti domu zvyšuje jeho koncentrace. Kromě samotného pronikání můžeme Radon a další radionuklidy ze zemské kůry a jádra přijmout v potravě. Je tomu tak nejčastěji u mořských produktů, ovoce nebo zeleniny. Celkem můžeme ve vzduchu, vodě a půdě najít přes 60 přírodně se vyskytujících radioaktivních zdrojů [8].

### 1.3.2 Umělé zdroje

Umělé zdroje ionizujícího záření lze nejjednodušeji vystihnout jako produkty nebo zařízení vytvořená člověkem, které jsou určené k vyzařování ionizujícího záření za nejrůznějšími účely. Jsou využívány například v lékařství, ve výzkumu, v jaderném průmyslu, k tvorbě jaderných zbraní nebo získávání energie v jaderném reaktoru (z jádra U-238).

V lékařství jsou umělé zdroje využívány v odvětví nazývaném radiologie. Nejčastěji pro pořízení rentgenových snímků určité části těla. To se liší od klasického ozáření, kde je ozářeno celé tělo. Druhým nejčastějším použitím je terapie určená k odstraňování zhoubných i nezhoubných nádorů v těle pacienta.

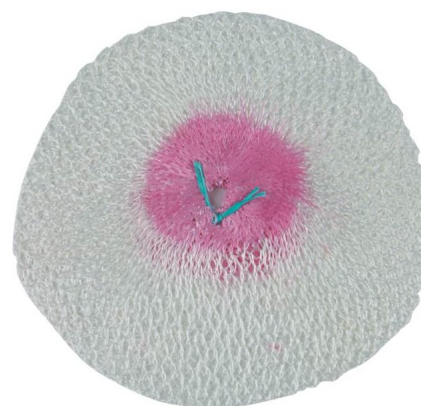
### 1.3.3 Zdroje záření použité pro testování

Základní testování vytvořených detektorů bylo provedeno ve škole za pomoci dvou různých zdrojů. Prvním z nich je školní demonstrační zdroj záření ŠDZZ-1 ze školní sady gamabeta. Použitý zdroj záření beta je radionuklid Sr-90 a záření gama radionuklid Am-241 (výstupu záření alfa je zabráněno) [9]. S tímto zařízením lze přepínat mezi zářením, které zrovna vychází z otvoru k tomu určenému. Demonstrační zdroj k nahlédnutí na obrázku 1.6.

Druhým zdrojem záření použitým pro testování je lidově řečeno kempingová punčoška. Jedná se o tkaninu napuštěnou mimo jiné také izotopem thoria, které vyzařuje radioaktivní plyn radon-220. Využívá se ke kempování, přesněji se nasadí na hořák, který slouží jako svítilna. Punčoška dokáže emitovat většinu záření ve viditelném spektru a část záření o nízké energii v infračerveném spektru. Na obrázku 1.7 je náhled na to, jak kempingová punčoška vypadá.



Obrázek 1.6: Školní demonstrační zdroj záření



Obrázek 1.7: Kempingová punčoška [10]

## 1.4 Vliv ionizujícího záření na člověka

Vzhledem k tomu, že s ionizujícím zářením se setkáváme, dle doposud zjištěných informací, každý den, je nutné znát také případné účinky ionizujícího záření na člověka. Buňka vystavená ozáření buď umře, nebo přežije. Jestliže přežije, je více než pravděpodobné, že ji záření určitým způsobem poznamená, změní ji. Tato změna

může mít za následek rakovinotvorné nebo genetické onemocnění. Proto je nutné se před ionizujícím zářením chránit a nakládat s ním tak, aby nebyl ohrožen nikdo jiný.

K tomuto účelu může právě detektor ionizujícího záření sloužit, k detekci ionizujícího záření v našem bezprostředním okolí. Například při ozařování elektrických komponent. To je proces, při kterém se ozařují elektronické obvody a zařízení, aby se zjistila jejich odolnost vůči ionizujícímu záření. Laboratoř MAGLAB z ČVUT FEL využívá k testování ozařovnu v Řeži. Je tedy zajímavé a pro zdraví člověka důležité změřit, zda-li ionizující záření nikde neuniká a jaká je bezpečná vzdálenost od místa testování. Na obrázku 1.8 je možné vidět místo, kde ozařování probíhá.



**Obrázek 1.8:** Ozařovna Řež

# Kapitola 2

## Detekce ionizujícího záření

Detektor ionizujícího záření je přístroj, který dokáže měřit, nebo zaznamenávat přítomnost ionizujícího záření v jeho okolí. Bez tohoto detektoru bychom, když pomineme následné zdravotní komplikace z vyšší dávky ozáření, o jeho přítomnosti kolem nás ani nevěděli. Detektory dělíme na několik základních typů. Ty nejčastější jsou v této práci uvedeny.

### 2.1 Pojmy spojené s detektory

Pro snazší práci s detektory je nutné si definovat pár pojmů, které jsou často používány a zajímají nás při návrhu či nákupu určitého detektoru.

#### 2.1.1 Mrtvá doba

Čas, po který musí být dva pulzy mezi sebou odděleny, aby byl detektor schopen rozlišit, že se jedná o 2 různé pulzy a nesplynuly do jednoho, se nazývá mrtvá doba [11]. Vždy platí snaha o co nejkratší mrtvou dobu, abychom byli schopni měřit co nejvíce záření, ideálně veškeré.

#### 2.1.2 Stínění detektoru

Pro správnou funkci detektoru musí být důkladně stíněn jak proti elektromagnetickému, tak světelnému rušení. Toho lze dosáhnout různými způsoby, v závislosti na tom, k čemu chceme daný detektor použít. V případě snímání alfa částic je stínění velmi obtížné, protože jej zastaví i pouhý list papíru. Pro beta a gama částice lze

použít stínící pásku, kterou se detektor obmotá nebo detektor uzavřít do materiálu, který záření, které chceme snímat, bez problému propustí. Může to být například tenký plast, určitý typ pásky a podobně.

## 2.2 Dělení detektorů

### 2.2.1 Spektrometrický a nespektrometrický detektor

Spektrometrický detektor umožňuje kromě zaznamenání přítomnosti záření v okolí také určení energie částice záření. Nespektrometrické detektory tedy informaci o energii částice neposkytují, ale pouze zaznamenávají její zachycení.

### 2.2.2 Kontinuální a kumulativní detektory

Toto rozdělení se týká časového průběhu detekce. Kontinuální detektory poskytují průběžná data o přítomnosti a okamžité intenzitě ionizujícího záření. Pokud je detektor ozařován, výstupní hodnota by měla odpovídat okamžité hodnotě intenzity záření. Po ukončení ozařování je jeho hodnota nulová. Kumulativní detektory na druhou stranu zaznamenávají ionizující záření po celou dobu expozice. Při ukončení měření lze vyhodnotit celkovou hodnotu ozáření za danou (přerušovanou nebo nepřerušovanou) dobu ozařování.

### 2.2.3 Dle principu detekce

Podle principu, jakým detekujeme ionizující záření, lze detektory dále dělit. Přesněji na fotografické, materiálové a elektronické detektory.

#### Fotografické detektory

Světlo, nebo jiné záření, které dopadne na fotografické detektory, vyvolá fotochemické reakce. Pro snímání se využijí světlocitlivé materiály, které musí být pečlivě stíněné proti záření, které nechceme snímat (například okolní světlo nebo elektromagnetické rušení v okolí). Záření je na těchto světlocitlivých materiálech zachyceno. Po ozáření se vyhodnotí zaznamenané záření na materiálu a lze z něj určit míru a intenzitu ozáření. Jako zástupce dané skupiny lze vybrat například filmový

dozimetr. Používá se pro osobní měření pracovníků, kteří přichází do styku s ionizujícím zářením. Přesněji jsou používány spíše pro dlouhodobou kumulativní detekci v řádu několika týdnů, poté se vyhodnotí a vymění světlocitlivý materiál pro další měření [12].

### **Materiálové detektory**

Materiálové detektory pracují na principu změny vlastností látek působením ionizujícího záření. Jedná se spíše o dlouhodobé účinky, jako tomu bylo u fotografických detektorů. Po ozáření lze zkoumat změny materiálu ve složení, barvě, elektrické vodivosti nebo například objemu dané látky. Změna dané látky způsobená ozářením je přímo úměrná její intenzitě.

### **Elektronické detektory**

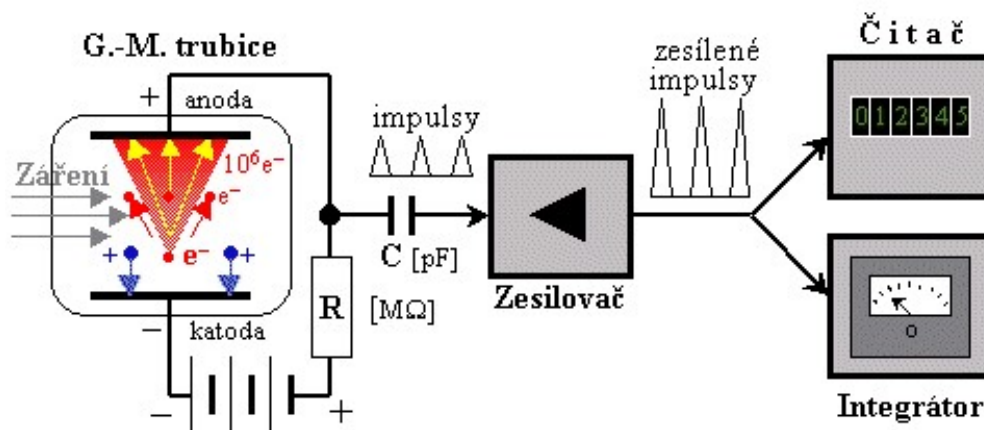
V elektronických detektorech je ionizující záření převedeno na elektrický signál, který je vyhodnocen v elektronických aparaturách. Elektrický signál může být měřitelný ve formě elektrického impulsu vyvolaného na základě záření pro pulzní režim. Také může být měřitelný jako nízká hodnota proudu odpovídající intenzitě záření. Při zpracování signálu je nutné nejprve signál zesílit, poté oddělit signál vyvolaný zářením od šumu a následně jej zpracovat. Mezi nejznámější detektory patří v této skupině Geiger-Müllerova trubice, nebo detektor se scintilačním krystalem.

## **2.3 Geiger-Müllerova trubice**

Nejrozšířenější a nejznámější detektor ionizujícího záření se nazývá Geiger-Müllerova trubice (dále jen GM<sup>1</sup>), nebo také Geiger-Müllerův počítač. Hlavní částí detektoru je přímo samotná trubice. Je to válcová uzavřená dutá trubice naplněná plynem (nejčastěji argon 90% + ethanol 10%), jejímž středem je vedena tenká elektroda. Obal trubice je nazýván katoda a je připojen na nulový potenciál. Elektroda uvnitř trubice je oddělena od trubice nevodivým izolantem a nazývá se anoda. Dále je v obvodu zdroj vysokého napětí (1000-3000V) v sérii s rezistorem, který je připojen na anodu. Paralelně na rezistor je připojen zesilovač a snímač pulzů generovaných GM trubicí.

---

<sup>1</sup>Geiger Müllerova (trubice)



Obrázek 2.1: Schéma zapojení GM trubice [12]

Při průchodu částice ionizujícího záření obalem trubice způsobí kolizi s částicemi uvnitř a spustí se proces ionizace. To znamená, že se v trubici vytvoří kladně a záporně nabitý iont. Vzhledem k vysokému rozdílu potenciálů, který je poskytován zdrojem, bude kladný náboj přitahován ke katodě a záporný k anodě velmi vysokou rychlostí. To způsobí další ionizaci po cestě elektronu k anodě. Tomuto jevu se také říká řetězová reakce nebo lavinový jev. Během tohoto jevu se navíc může vlivem zpomalování a kolizí elektronu vytvořit foton, který vystřelí do dalších částí trubice a způsobí další ionizaci. Výše popsaný jev vytvoří lavinový efekt po celém objemu trubice. Elektrony vytvořené během ionizace způsobí napěťový úbytek na rezistoru. Dále přes zdroj napětí uzavírají okruh na plášti trubice (katodě), kde rekombinují s pozitivně nabitými ionty. Tento proces je znázorněn na obrázku 2.1.

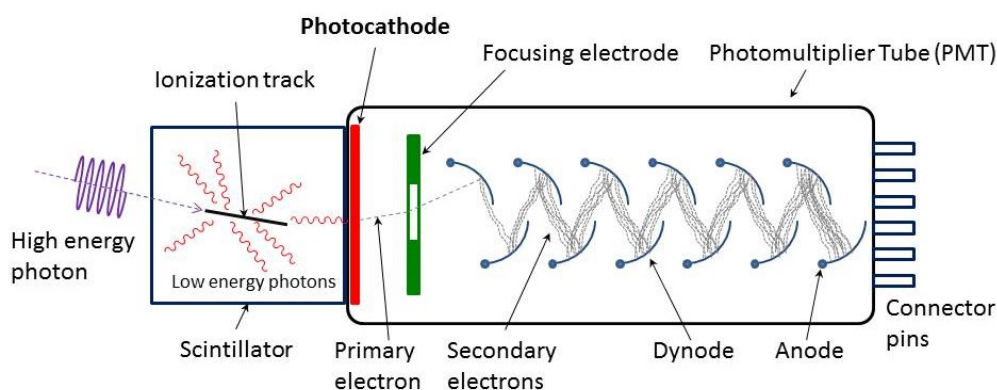
Při rekombinaci ovšem může být emitován foton, který by opět přispěl do vytvoření další laviny. To je ovšem nežádoucí jev. Kdyby tomu tak bylo, celý proces by se prodloužil a doba, po kterou by GM trubice nezaznamenávala další záření, by byla delší. Cílem je zaznamenat průchod částice trubicí, vytvořit lavinový efekt, zaznamenat úbytek na rezistoru a poté situaci v trubici utlumit, aby bylo možné znovu měřit. K tomu slouží ethanol, který je přidán k argonu v trubici. Absorbuje energii, která by vedla k vytvoření dalšího fotonu a zabrání tak další lavinové reakci. Tomuto jevu se říká zhášení. Energie, která by zapříčinila vytvoření fotonu, je převedena na vibrace, nebo rotační energii.

Mrtvá doba je v tomto případě způsobena tím, že během lavinové reakce nedokážeme rozlišit, zdali částice způsobující ionizaci přiletěla zvenčí, nebo byla vytvořena uvnitř trubice. V případě GM trubice je tato doba udávána přibližně  $200\text{--}400\mu\text{s}$ .



## 2.4 Detektor se scintilačním krystalem

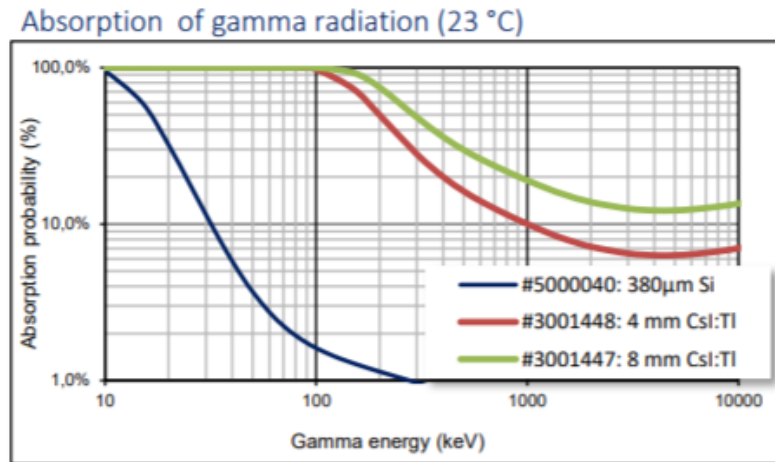
Detektor se scintilačním krystalem je jak již bylo zmíněno schopen zachytit ionizující záření. Přesněji dojde k pohlcení záření krystalem, excitují se elektrony krystalu a při následné deexcitaci se emitují fotony viditelného světla. Následně se přivedou na fotodetektor (například PIN dioda), který převede světelné paprsky na elektrický impuls. Impuls je poté nutno dále zpracovat pomocí zesilovače a špičkového analyzátoru, který jej dokáže zachytit. Případně ho lze také navzorkovat pomocí AD převodníku a rekonstruovat jeho tvar, amplitudu a vše ostatní, co nás v daném měření zajímá. Na obrázku 2.2 je vidět princip scintilačního krystalu, který jsem popsal.



Obrázek 2.2: Schéma scintilačního krystalu [13]

Jednotlivé konstrukce se samozřejmě mohou lišit. Můžeme se setkat s PIN diodou, na které je přidán samotný scintilační krystal, který pouze převede ionizující záření na světlo, které není nijak znásobeno. To je příklad PIN diody se scintilačním krystalem, která je použita i v této bakalářské práci.

Pravděpodobnost absorpce PIN diody se scintilačním krystalem X100-7 THD, která byla použita v této bakalářské práci, je znázorněna na obrázku 2.3. Značí pravděpodobnost absorpce gama záření v závislosti na energii částice. Modře znázorněný průběh je pro samotnou PIN diodu bez scintilačního krystalu, zeleně a červeně je vyznačen průběh pro PIN diodu s krystalem o různé výšce. Z grafu plyne, že pro úspěšné zachycení ionizujícího záření o vyšší energii je potřeba účinnější scintilační krystal (například s většími rozměry).



Obrázek 2.3: Pravděpodobnost absorpce záření gama [14]

## 2.5 Detektor s PIN diodou

V případě potřeby lze využít i samotnou PIN diodu ke snímání ionizujícího záření. "U této diody je mezi vrstvou vodivosti typu P a vrstvou vodivosti typu N vložena vrstva z čistého křemíku a s vlastní vodivostí, typu I." [15] Jestliže na její povrch dopadne ionizující záření, je přeměněno na proudový impuls, který se dále zpracovává (zesiluje a filtruje). Zapojují se do obvodu v závěrném směru. Příkladem velmi rozšířené PIN diody k tomuto účelu je BPW34. Její cena se pohybuje kolem 30 Kč/ks, což z ní dělá velmi dostupnou alternativu oproti drahým sensorům nebo scintilačním krystalům. BPW34 je také použita v této práci. PIN dioda musí být správně stíněna, aby zaznamenávala pouze ionizující záření a ne okolní světlo.

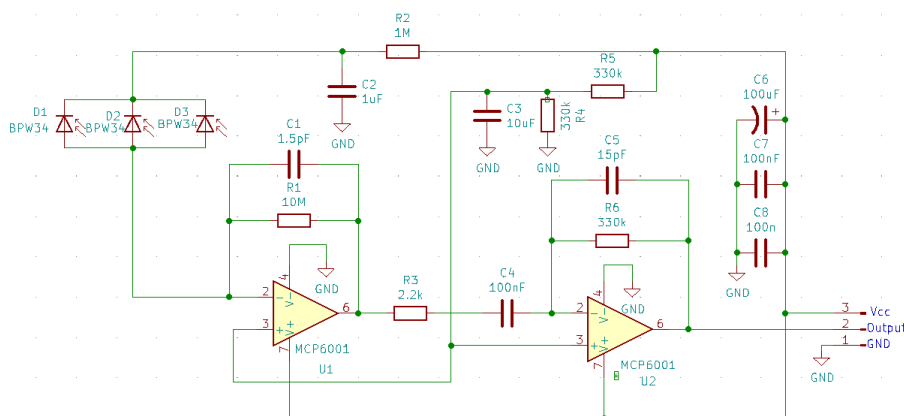
# Kapitola 3

## Návrh a testování detektoru ionizujícího záření

Prvním praktickým úkolem bylo vyhledání a vyzkoušení obvodu pro samotné snímání ionizujícího záření a jeho převedení na elektrický napěťový impuls. Veškeré návrhy obvodů a desek plošných spojů byly vytvořeny v programu KiCad.

### 3.1 Návrh schématu prototypu detektoru s PIN diodou

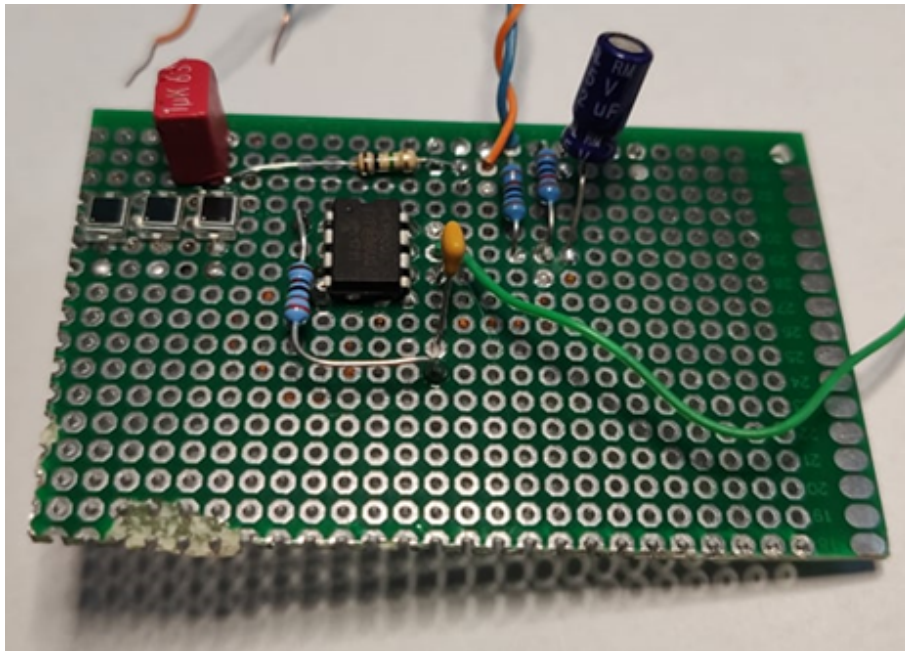
Pro jednoduché senzory ionizujícího záření se často využívají PIN diody BPW34 a také v prvním návrhu byly použity. Návrh na schéma zapojení byl převzat z webu tefatronix [16].



Obrázek 3.1: Schéma prototypu detektoru záření

Obvod 3.1, který byl realizován, se skládá ze tří paralelně zapojených PIN diod BPW34 pro ztrojnásobení snímací plochy. Jak bylo vysvětleno v minulé kapitole, jsou zapojeny v závěrném směru, aby při zachycení ionizujícího záření vytvořily proudový pulz, který je zpracován invertujícím zesilovačem převádějícím proud na napětí. Následuje kondenzátor  $C_4$ , který slouží k filtrování stejnosměrné složky signálu. Nakonec je napěťový pulz zesílen druhým operačním zesilovačem. Pro toto zapojení se udává, že na výstupu obvodu lze při zachycení ionizujícího záření změřit pulz s amplitudou několik stovek mV [16]. Výstup je posunut o polovinu napájecího napětí, tedy v klidovém režimu má na výstupu polovinu napájecího napětí. Použitím tohoto napěťového offsetu se nemusí na operační zesilovače přivádět záporné napájení pro zesílení celého pulzu.

Vlastní prototyp zapojení byl vypracován na pájivém poli za pomoci THT a SMD součástek. Na obrázku 3.2 je uvedeno vlastní zhotovení. Navíc pro odstínění okolního světla byly diody přelepeny elektrickářskou páskou. Pro utlumení elektromagnetického rušení byly diody dodatečně přes pásku obaleny tenkou vrstvou alobalu připojenou drátkem na zem.



**Obrázek 3.2:** Osazená deska prototypu

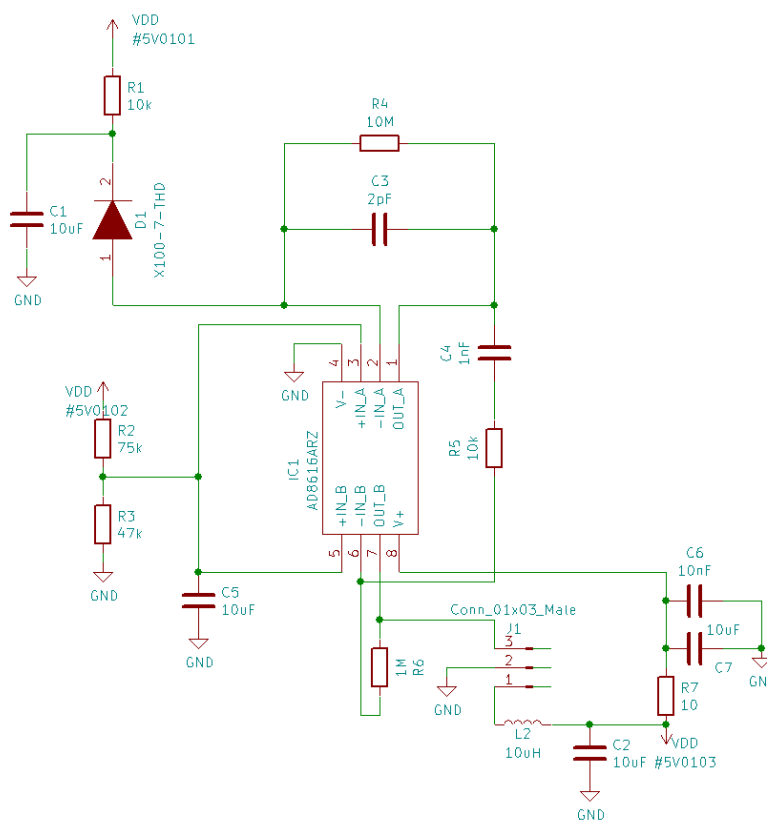
Vzhledem k nepřesnostem při pájení, výskytu parazitních kapacit a celkové obtížnosti přesného pájení na tomto typu desky byl výstup neměřitelný a silně zašuměný v okolním rušení. Dalším postupem bylo vytvořit schéma a návrh desky

plošných spojů detektoru, který bude přesnější a odolnější vůči rušení a následně vyzkoušet jeho funkčnost oproti prototypu. Zároveň je zajímavé porovnat detektor založený na PIN diodách a detektor založený na PIN diodě se scintilačním krystalem, proto byly vytvořeny dvě verze detektoru.

## 3.2 Návrh detektoru se Scintilačním krystalem

Scintilační krystal pro tento detektor byl vybrán od společnosti First Sensor, označení produktu X100-7 THD. Přesněji se jedná o 100 mm<sup>2</sup> PIN detektor s 8 mm scintilačním krystalem. Procentuální pravděpodobnost absorpce gama záření je výrobcem uvedena na již zmíněném grafu 2.3.

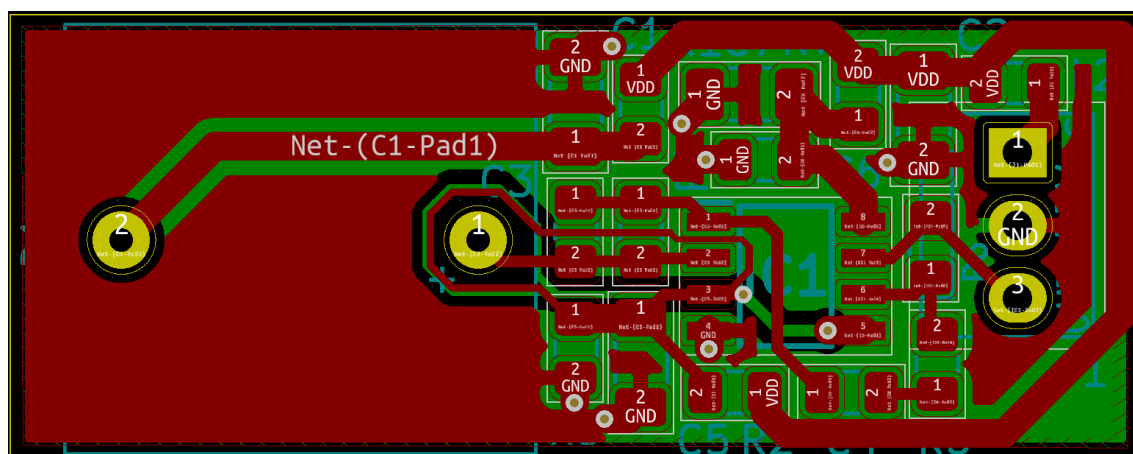
Schéma zapojení 3.3 bylo převzato z datasheetu společnosti First Sensor, která se zabývá detekcí ionizujícího záření a použití jejich produktů [17]. Sestává opět ze dvou operačních zesilovačů. Stejně jako v minulém návrhu v klidovém režimu (bez dopadajícího ionizujícího záření) je na výstupu nenulová hodnota napětí.



**Obrázek 3.3:** Schéma zapojení detektoru se scintilačním krystalem

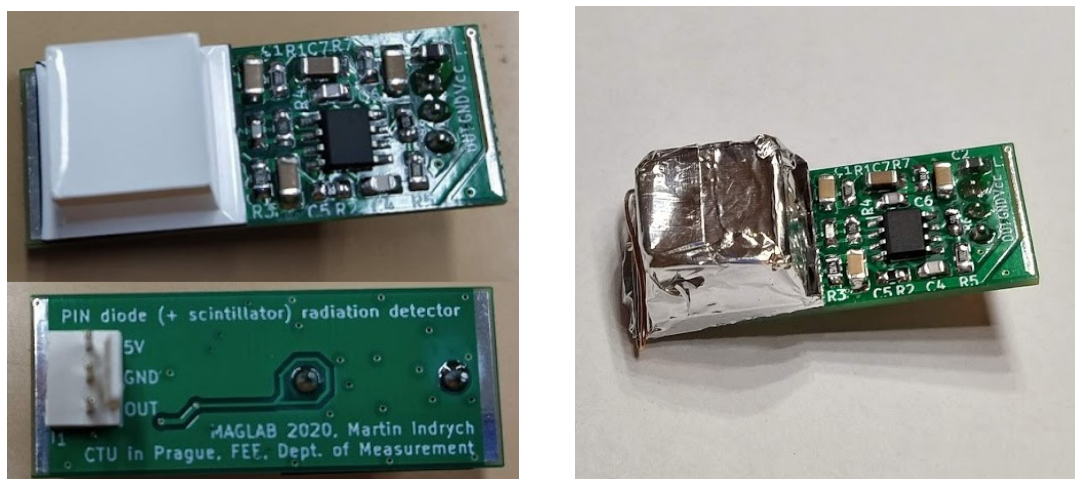
Deska plošných spojů 3.4 byla vytvořena ve 2 vrstvách, kde na spodní vrstvě je

rozlitá zem. Kromě klasických spojů byl do obvodu přidán "guard ring". Pod tímto pojmem se skrývá ochranná smyčka vytvořená z měděného spoje, v mém případě v obou vrstvách. Používá se k ochraně kritických částí obvodu před okolním rušením při vysokofrekvenčních aplikacích. Zde je využit ke stínění části obvodu mezi výstupem PIN diody a vstupem do převodníku I-U před svodovými proudy. Rozměry celého detektoru jsou 39x15mm. Připojení k desce je realizováno pomocí 3-pinového konektoru.



**Obrázek 3.4:** Deska plošných spojů detektoru se scintilačním krystalem

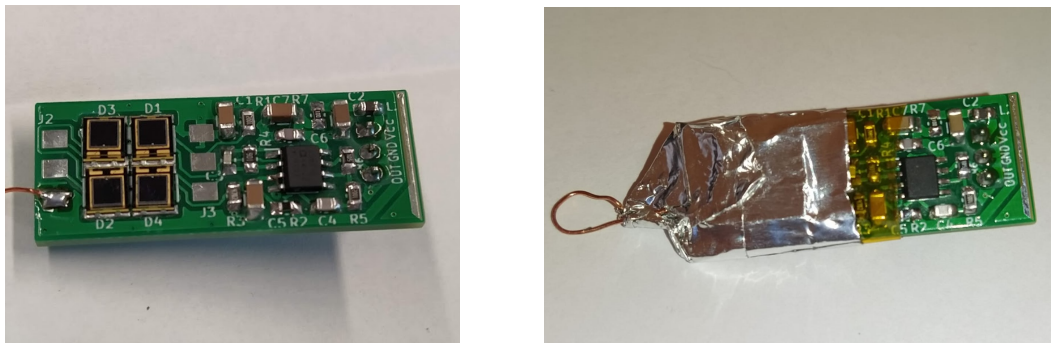
Výroba byla realizována externí firmou. Jednalo se čistě o výrobu desky. Pájení bylo realizováno ve škole. Na obrázku 3.5 je vidět již finální, sestavený detektor se scintilačním krystalem. Zde je dioda se scintilačním krystalem obalena nejprve kaptonovou páskou proti vyzkratování obvodu a poté alobalem připojeným na GND jako ochrana před elektromagnetickým rušením.



**Obrázek 3.5:** DPS detektoru se scintilačním krystalem

### 3.3 Návrh detektoru s PIN diodou

Aby bylo možné s něčím porovnat funkci diody se scintilačním krystalem oproti obyčejné PIN diodě použité při tvorbě prototypu, byl navrhnout i detektor se čtyřmi pin diodami s označením TEMD5080X01 zapojenými paralelně [18]. Schéma i návrh DPS vypadají, až na použité PIN diody, stejně. Vyhotovený detektor i s přidáním stíněním viz obrázek 3.6.

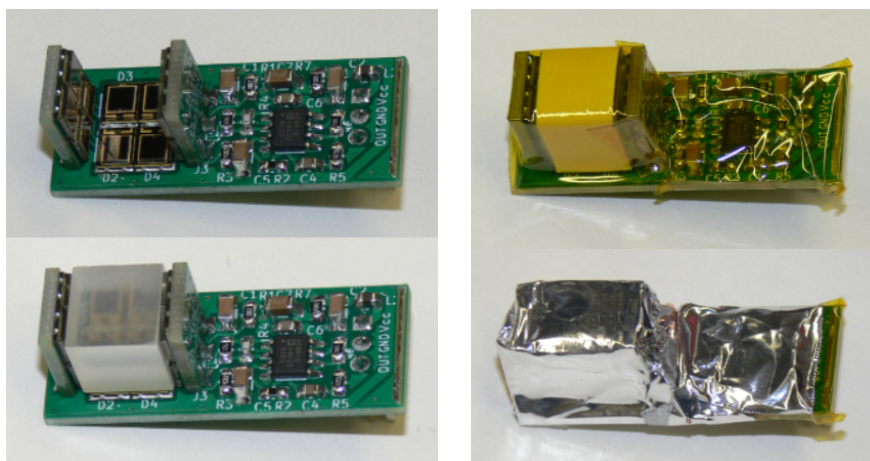


Obrázek 3.6: DPS detektoru s pin diodami

### 3.4 Detektor se scintilačním krystalem přichyceným na PIN diody

Třetím typem detektoru, který byl v práci použit je detektor se scintilačním krystalem přichyceným na PIN diody. Přesněji se jedná o detektor vyrobený panem Ing. Vojtěchem Petruhou, Ph.D.. Jde o krystal, který nám byl darován společností SAINT-GOBAIN CRISTAUX ET DETECTEURS. Tento krystal byl pouze pomocí reflexní pásky přichycen na PIN diody viz obrázek 3.7. Zbytek obvodu byl až na paralelní zapojení 12 PIN diod stejný.

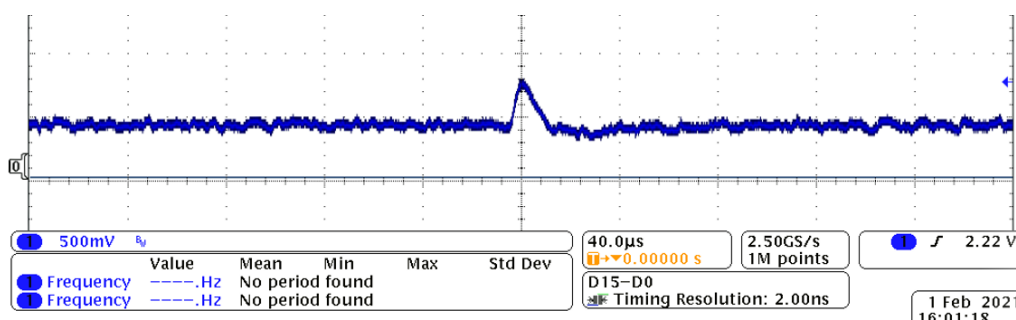




Obrázek 3.7: Samostatně vytvořený detektor se scintilačním krystalem

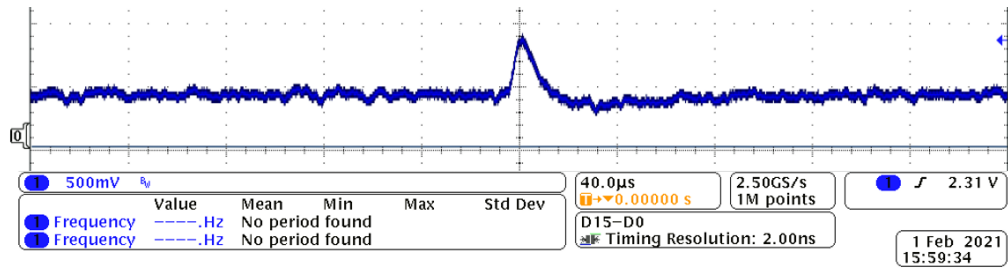
### 3.5 Porovnání sestavených detektorů

Porovnání jednotlivých detektorů bylo realizováno ve škole pomocí přípravku punčošky při zhasnutých světlech. Na obrázku 3.8 vidíme pulz s amplitudou 400 mV zachycený na osciloskopu pro detektor s PIN diodami. Na obrázku 3.9 lze vidět pulz s amplitudou 300 mV zachycený pomocí detektoru se scintilačním krystalem. Po porovnání je jasné, že detektor se scintilačním krystalem je více náchylnější na rušení, zejména okolního světla. Při detailnějším zkoumání si lze povšimnout periodicky se opakujících zákmitů u detektoru se scintilačním krystalem. Druhým rozdílem je amplituda pulzu, detektor s pin diodami vygeneruje o 100 mV větší pulz.



Obrázek 3.8: Pulz detektoru s PIN diodami





**Obrázek 3.9:** Pulz detektoru se scintilačním krystalem

Vzhledem k tomu, že takto výrazné pulzy lze bez problému zpracovat ať už pomocí mikrokontroleru, nebo komparátoru, bylo možné se přesunout k další části práce. Přesněji k vytvoření DPS, která bude mít za úkol zpracování zachycených pulzů a komunikaci s roverem nebo počítačem pro další zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

Třetí samostatně vytvořený detektor nebyl předem testován, protože byl sestaven až na konci samotné bakalářské práce.



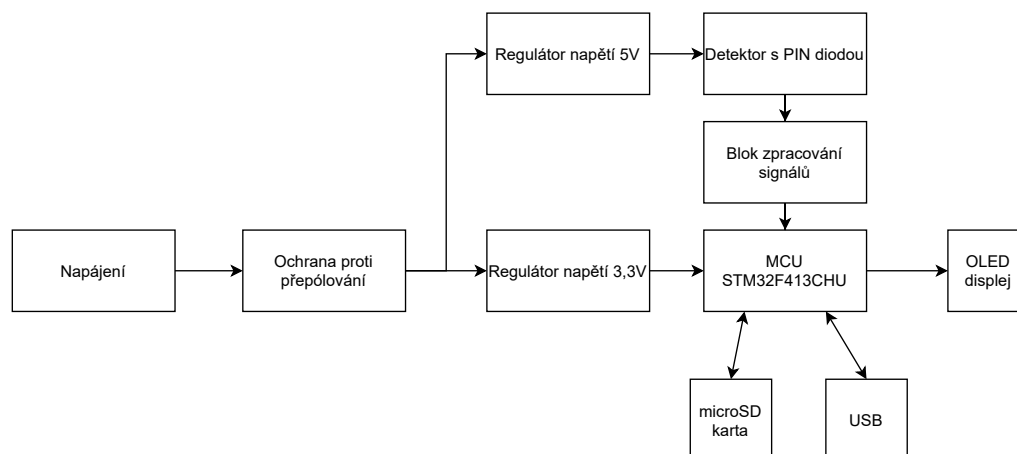
# Kapitola 4

## Návrh a testování řídicí desky

K samotnému detektoru ionizujícího záření byla vytvořena deska, do které se detektor připojí pomocí konektorů. Její název je řídicí deska (control board). Slouží ke zpracování pulzů, které vytvoří detektor, komunikaci s PC, poskytnutí uživatelského rozhraní pro snazší ovládání a ke zvukové a světelné signalizaci záření. Řídicí deska byla zhotovena ve dvou verzích. Jedna pro ruční detektor napájená bateriemi a druhá pro rover. Každá deska má stejný základ a své přidané části důležité pro dané použití. Nejdříve bude popsána deska pro ruční detektor a následně deska pro rover a jejich rozdíly.

### 4.1 Návrh schéma řídicí desky pro ruční detektor

Při návrhu řídicí desky pro ruční detektor bylo nejprve nutné vyjasnit si, k čemu bude deska využívána. Jádrem musí být programovatelný procesor, do kterého se nahraje firmware řídicí desky. Dále je potřeba realizovat komunikaci s počítačem, ta je zde řešena pomocí USB. Také displej pro zobrazení měřených hodnot, stavu baterie a aktuálního nastavení. Dále microSD karta pro ukládání naměřených dat. Pro napájení všech výše vyjmenovaných komponentů je nutné využít regulátorů na 5 V a 3,3 V. Na vstupu je také důležitá ochrana proti přepólování. Poslední důležitou částí desky jsou komparátory ke zpracování signálů z detektoru. Výše zmíněné je využito v blokovém schématu 4.1 pro základní představení činnosti desky. Deska je přizpůsobena pro zapojení jednoho nebo dvou detektorů ionizujícího záření.

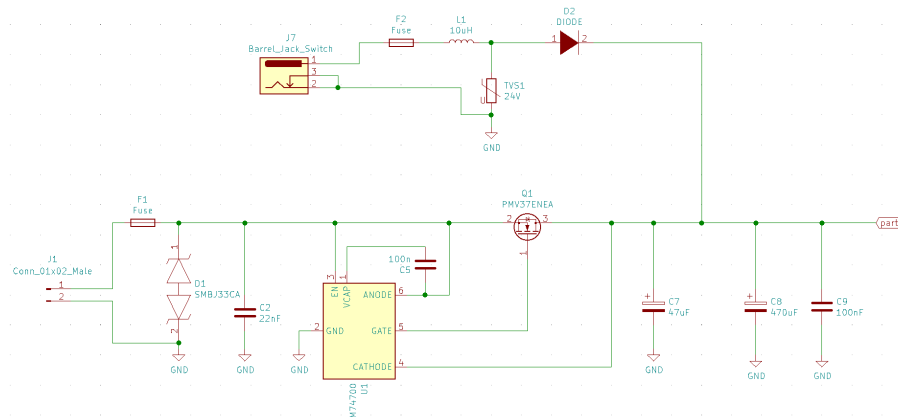


**Obrázek 4.1:** Blokové schéma řídicí desky pro ruční detektor

V následujících podkapitolách jsou rozebrány jednotlivé části kompletního schématu.

### 4.1.1 Napájecí blok

Vstupem do obvodu jsou dva napájecí bloky na obrázku 4.2. Jeden určen pro napájení ze šesti 1,5 V baterií a druhý pomocí konektoru barel jack (testováno pro 14V). Vstupy jsou chráněny před přepólováním a přepětím pomocí pojistek, transilů, diody a součástky LM74700, která byla zapojena dle datasheetu [19] s N-kanálovým MOSFETem PMV37ENEA na výstupu.

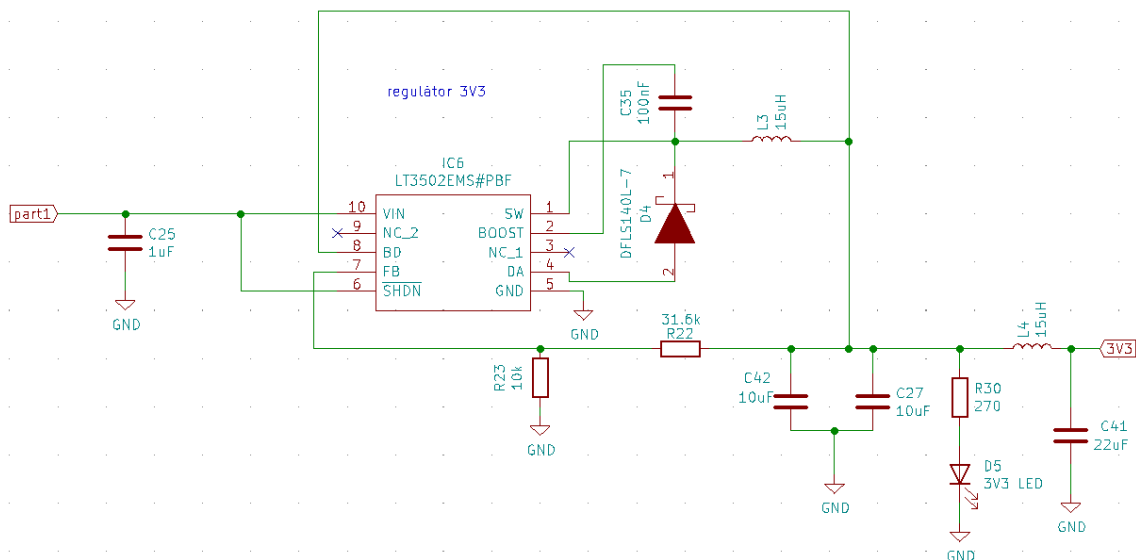


**Obrázek 4.2:** Schéma napájecího bloku

### 4.1.2 3V3 regulátor

Další částí desky je regulátor napětí na 3,3 V. Jeho využití je vyžadováno pro napájení většiny komponent na řídicí desce (například USB a displej). Napájení re-

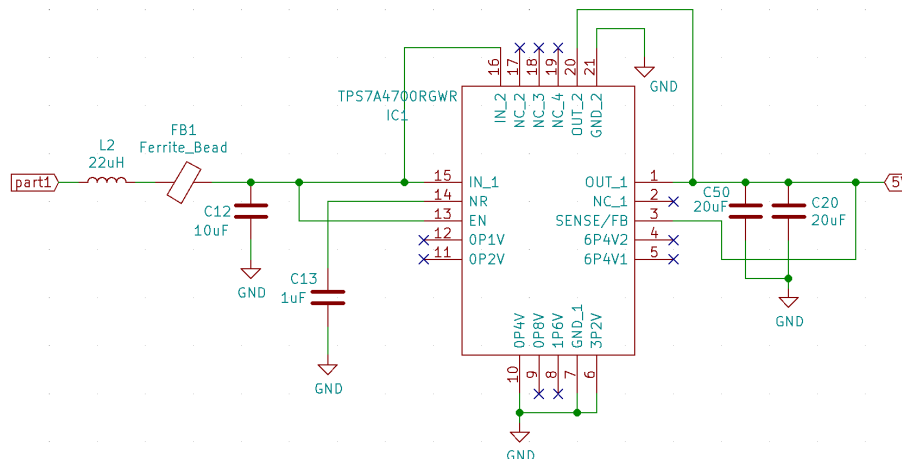
gulátoru je přivedeno z napájecího bloku. Použitá součástka nese název LT3502EMS a je zapojena dle datasheetu [20]. Jedná se o "step-down"spínaný zdroj s výstupním napětím nastavovaným pomocí zpětné vazby. Navíc je na výstup regulátoru přidána LED pro světelnou signalizaci funkčnosti a LC filtr.



Obrázek 4.3: Schéma 3,3 V regulátoru

### 4.1.3 5V regulátor

Stejně jako u předchozího regulátoru, i zde si nasazení 5V regulátoru vyžadují použité komponenty. Přesněji je 5V napájení využito pro detektory ionizujícího záření. V jádře regulátoru je samotná součástka TPS7A4700, zapojení součástek bylo navrženo dle datasheetu [21]. Jedná se o lineární "ultralow-noise, low dropout"napěťový regulátor, kterému se nastaví výstupní hodnota napětí pomocí uzemnění příslušných pinů. Výstupní proud může dosáhnout až hodnoty 1A. Regulátor je napájen přímo z bloku pro externí napájení.



Obrázek 4.4: Schéma 5V regulátoru

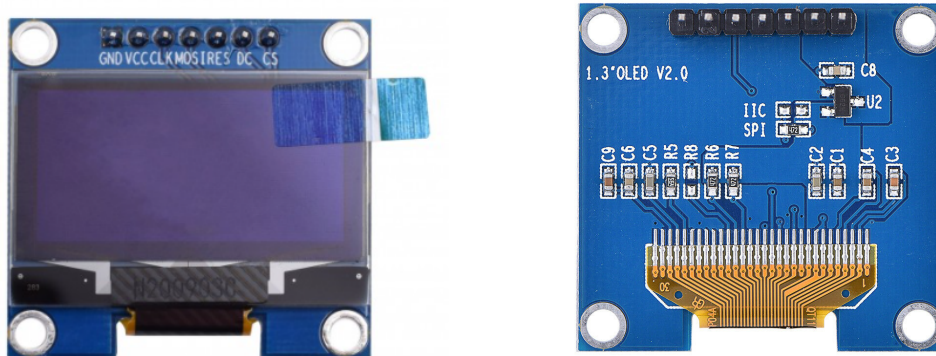
#### 4.1.4 Mikrokontroler

Mikrokontroler byl zvolen od společnosti STMicroelectronics, přesný název je STM32F413CHU, založený na 32-bitovém jádře Cortex-M4 od firmy ARM. [22] Jedná se o 48-pinový mikrokontroler s frekvencí až 100 MHz a napájený pomocí napětí 3,3 V. Poskytuje 1,5 MB Flash paměti, připojení externího oscilátoru, dva 12-bitový DA převodníky, jeden 12-bitový A/D převodník, DMA, 18 timerů, debug mode, až 114 vstupů/výstupů s možností přerušení a až 24 komunikačních rozhraní (UART, SPI, SDIO, CAN a jiné). U napájecích vstupů se nachází blokovací kondenzátory dle doporučeného zapojení z datasheetu. Přímo z procesoru jsou vyvedeny programovací piny na konektor.

#### 4.1.5 OLED displej

Vzhledem k povaze ručního detektoru je nutný určitý typ rozhraní mezi uživatelem a detektorem, který by uživateli poskytl aktuální informace bez nutnosti připojení k počítači. K tomu slouží použitý OLED displej, přesněji 1.3"128x64 OLED displej ukázaný na obrázku 4.5, komunikující přes sběrnici SPI. Komunikace je realizována pouze ve směru od mikrokontroleru k displeji. Displej je tvořen jednočipovým driverem SH1106 používaným nejčastěji pro řízení OLED displejů. [23] Zapojení do řídicí desky je realizováno přes lištu konektorů, do které se displej zasune. Následně je displej přímo zapojen na mikrokontroler. Displej je napájen z 3,3V a má na vstupu

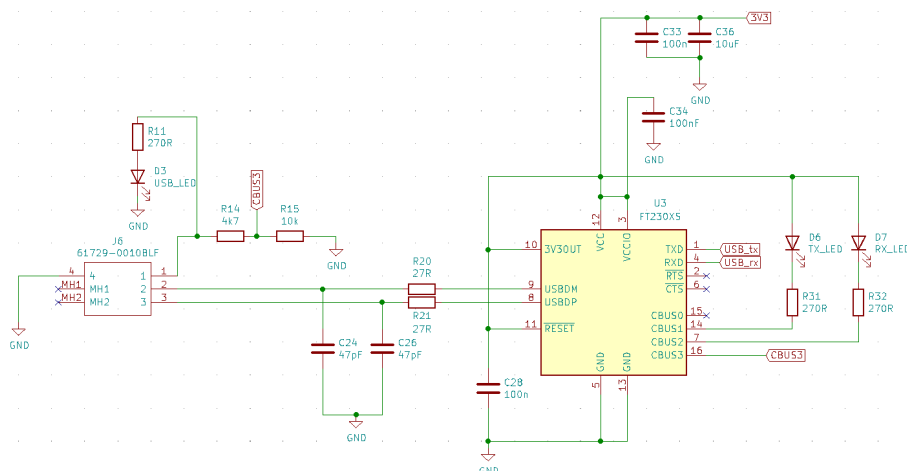
napájení připojen blokovací kondenzátor. Na zadní straně displeje lze pomocí přepájení rezistoru změnit typ sběrnice na I2C.



Obrázek 4.5: OLED displej

#### 4.1.6 USB modul

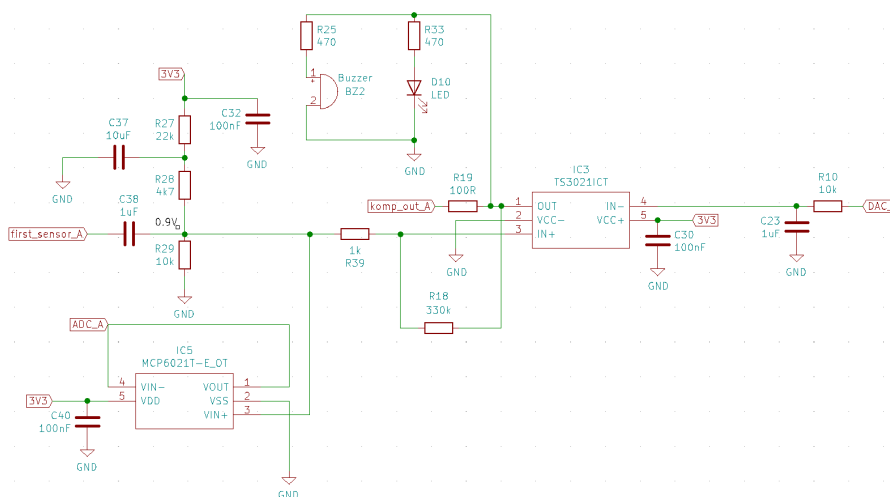
Ke komunikaci s počítačem bylo do projektu desky přidáno USB rozhraní s konektorem typu B z důvodu jeho robustnosti. Jádrem zapojení je součástka s názvem FT230XS [24]. Jedná se o převodník USB na seriové UART rozhraní, které se připojí do mikrokontroleru. Převodník je schopen dosáhnout rychlosti přenosu až 3 Mbaud. Disponuje 512 B bufferem pro odesílání a přijímání zpráv. Schéma zapojení USB viz 4.6 bylo převzato z datasheetu. Převodník je napájen v obvodu napětím 3,3 V a USB kabel je tedy využit pouze k odesílání dat. Do schématu zapojení jsou přidány 3 LED pro signalizaci zapojení USB do počítače, příjmu a odesílání dat.



Obrázek 4.6: Schéma USB modulu

### 4.1.7 Blok zpracování signálů z detektoru

Tento blok slouží ke zpracování signálů, které jsou generovány detektorem ionizujícího záření. Tento blok je vytvořen ve dvojím identickém provedení. Je složen z komparátoru, který má na neinvertujícím vstupu signál z detektoru posunutý o 0,9 V. Na invertující vstup je přiveden výstup DA převodníku z mikrokontroleru pro nastavení komparační úrovně. Výstup z komparátoru je připojen na signalizační LED, piezo měnič a na čítač mikrokontroleru. Zároveň je výstup detektoru připojen na sledovač napětí, ze kterého je přiveden do AD převodníku mikrokontroleru pro rekonstrukci a zaznamenání přijatého signálu. Pro komparování byl použit rail-to-rail vysokorychlostní komparátor TS3021 [25]. Jako sledovač napětí byl využit rail-to-rail 10 MHz operační zesilovač MCP6021 [26].



**Obrázek 4.7:** Schéma bloku zpracování signálů z detektoru

### 4.1.8 Doplnkové obvody

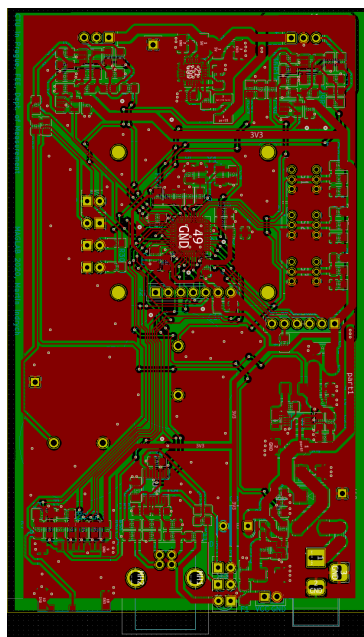
Zbylé části obvodu nejsou nijak významné z pohledu zapojení, stojí ovšem za zmínku jejich použití. Pro zvýšení přesnosti byl do obvodu přidán krystal ABM3B 8MHz [27]. Aby mohla být deska ovládána uživatelem i bez připojení k počítači, obsahuje řídicí deska 3 tlačítka. Významným prvkem je microSD karta, která měla sloužit k ukládání záznamů o detekci záření. Footprint SD karty byl ovšem nesprávně umístěn a její použití není možné z důvodu nemožnosti zasunutí microSD karty do slotu. Dalším důležitým blokem je měření vstupního napětí. Měření je napojeno na výstup napájecího bloku (před regulátory). Obvod se skládá z děliče napětí 1:10,



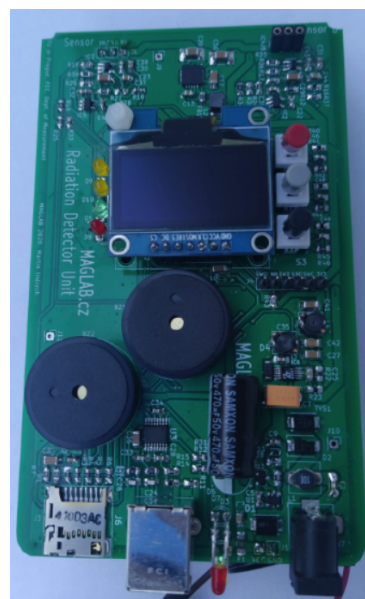
který je realizován pomocí rezistorů a paralelně na něj je připojen kondenzátor a zenerova dioda z důvodu zamezení vyššího napětí, než 3,3 V do mikrokontroleru.

## 4.2 Návrh DPS řídicí desky pro ruční detektor

Stejně jako u desky pro samotný detektor, i zde byla deska plošných spojů vyrobena externí firmou. Je dvouvrstvá, na spodní vrstvě má ve volných místech rozlitou měď. Rozměry jsou 123x73.85 mm. Takto atypické rozměry byly zvoleny podle velikosti pouzdra, do kterého se ruční detektor vloží. Displej je umístěn nad procesorem přibližně ve středu desky, vedle něj se na jedné straně nachází tlačítka a na druhé signální LED. Na spodní části jsou vyvedené konektory pro napájení a komunikaci přes USB. V horní části jsou vyvedeny konektory pro zapojení až dvou detektorů ionizujícího záření.



Obrázek 4.8: DPS řídicí desky



Obrázek 4.9: Řídicí deska

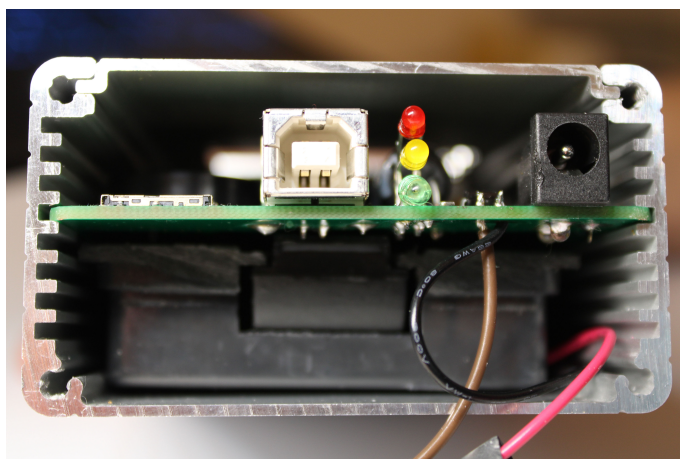
Celá DPS řídicí desky je umístěna do pouzdra (krabičky) s označením 1455K1201 HAMMOND, které bylo zakoupeno v internetovém obchodě TME. Dle výkresů v příloze do něj byly vyfrézovány otvory pro displej, uchycení plexiskla, tlačítka, vypínač, USB konektor, bareljack konektor, signální LED a otvory na uchycení a vyvedení kabelů pro samotné detektory. Dále byly na pouzdro vygravírované popisky jednotlivých tlačítek a signálních LED. Na obrázku 4.9 lze vidět pohled

shora na vyrobenou a osazenou desku plošných spojů a na obrázku 4.10 je pouzdro po frézování se vsunutou řídicí deskou.



**Obrázek 4.10:** Vyfrézované pouzdro

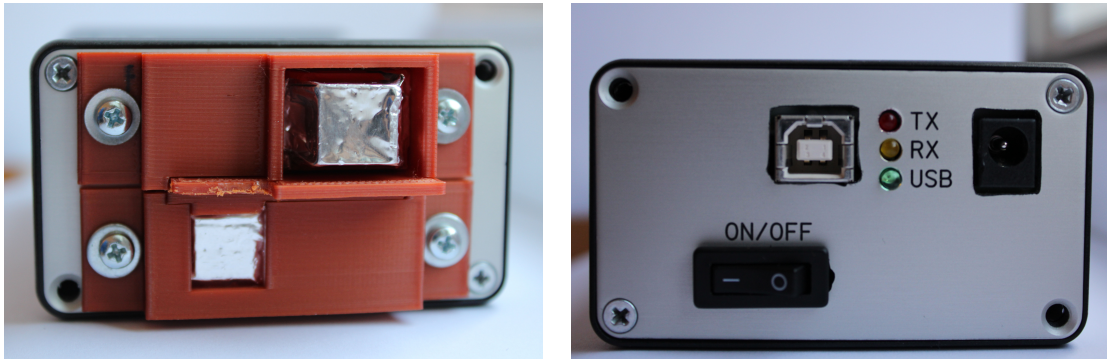
Pod deskou zasunutou v pouzdře je umístěno pouzdro na šest 1,5V AAA baterií, které jsou přes vypínač připojeny k desce viz 4.11.



**Obrázek 4.11:** Boční pohled na vnitřní rozmístění v pouzdře

Kryty na senzory byly vytisknuty na 3D tiskárně a výkresy modelů jsou přiloženy v příloze. Jedná se vždy o 2 díly (tělo a víko), které jsou k sobě přilepené.

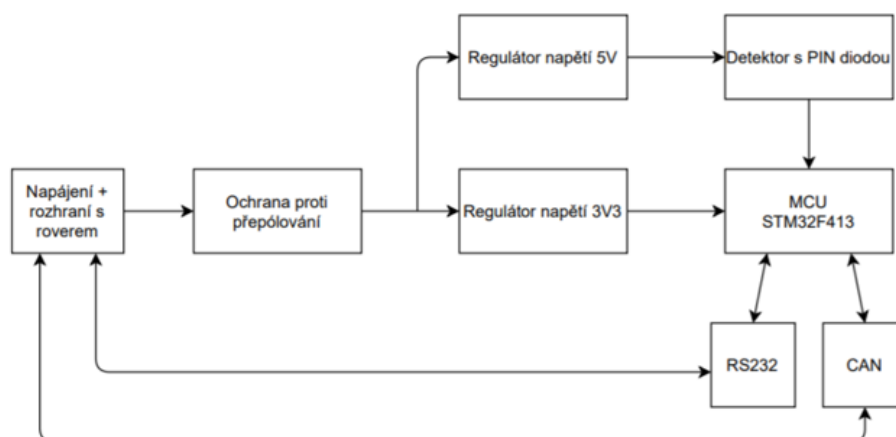
Přichyceny na krabičku byly pomocí šroubů M3x8 s podložkou a pojistnou matkou. Na obrázku 4.12 je vidět finální provedení odjímatelných stran celého zařízení detektoru.



Obrázek 4.12: Spodní a horní strana pouzdra detektoru

### 4.3 Návrh schéma řídicí desky pro rover

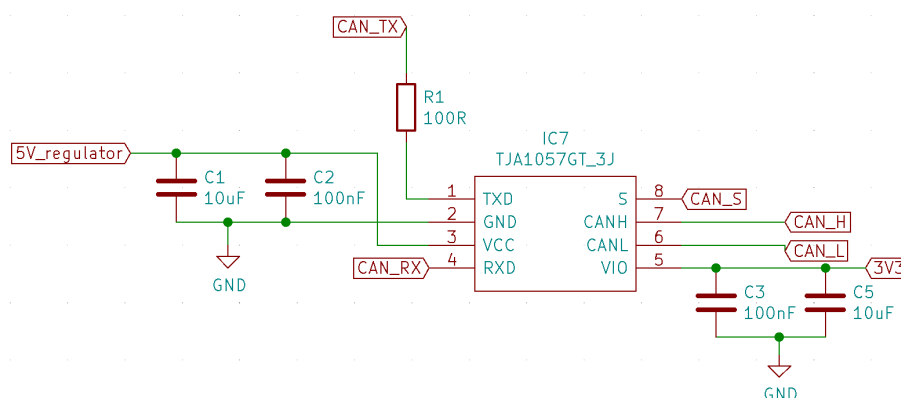
Řídicí deska pro rover bude umístěna přímo na vozítku, ze kterého bude i napájena a ovládána. Deska se s roverem spojí pomocí 6-pinového konektoru, který slouží k napájení, komunikace přes CAN a RS232. Vzhledem ke způsobu využití, není potřeba přidávat na desku displej nebo SD kartu. Na rozdíl od návrhu řídicí desky pro ruční detektor byl zde kladen důraz na minimalizaci rozměrů desky. Na obrázku 4.13 je blokové schéma řídicí desky pro rover. Deska se skládá z částí jako předešlý návrh (ochrana proti přepólování, regulátory napětí, připojení pro detektory, komparátory, krystal) a navíc je zde již zmíněný CAN a RS232, jejichž realizace bude dále představena. Celé schéma je opět v příloze bakalářské práce.



Obrázek 4.13: Blokové schéma řídicí desky pro rover

### 4.3.1 Modul CAN

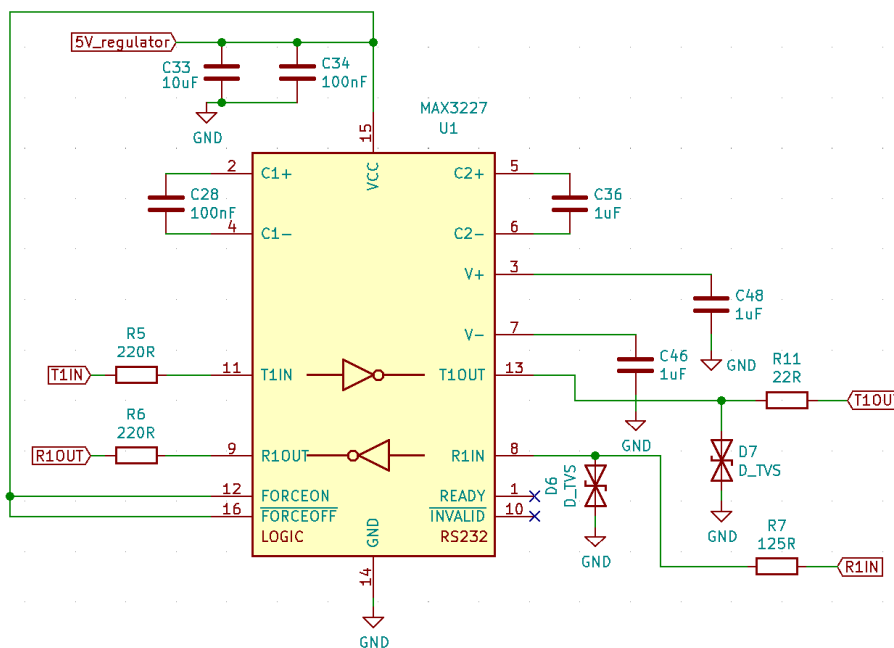
Komunikace přes CAN pro přijímání a odesílání dat s roverem je zařízena pomocí součástky TJA1057GT (driver fyzické vrstvy CAN) [28]. Jedná se o vysoko-rychlostní CAN přijímač zajišťující rozhraní mezi CAN protokolem a fyzickou dvou-žilovou vrstvou CANu. Schéma zapojení 4.14 je realizováno dle datasheetu. Napájení pro CAN i RS232 je v tomto případě řešeno přidaným 5V regulátorem KF50BDT-TR [29]. Cílem bylo ponechat již použitý 5 V regulátor pro detektory ionizujícího záření, aby používání CANu nebo RS232 nijak neovlivňovalo měřící detektory.



Obrázek 4.14: Modul CAN

### 4.3.2 Modul RS232

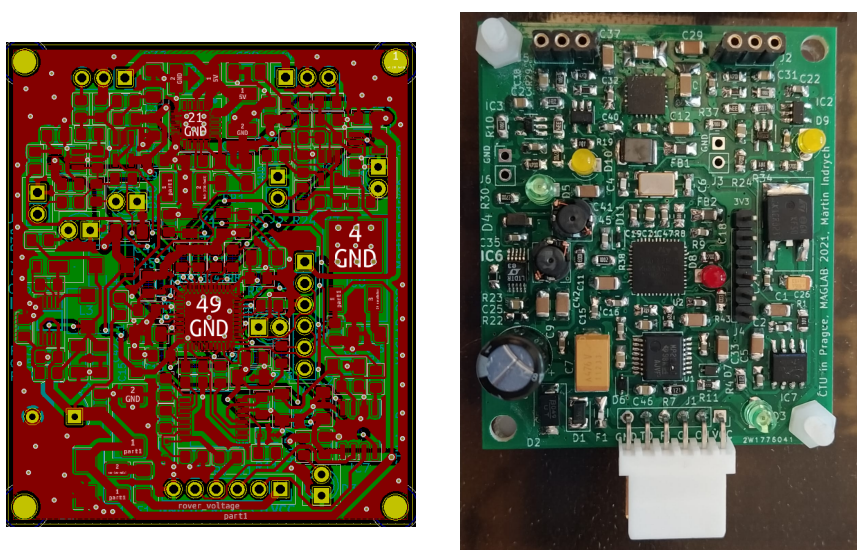
Modul komunikace RS232 slouží k zajištění komunikace mezi řídicí deskou a roverem. Jádrem modulu je součástka MAX3227 [30] zapojená ve schématu 4.15 dle datasheetu. Jedná se o převodník komunikace mezi rozhraním UART na RS232. Oproti klasickému USB má výhodu, že lze použít na větší vzdálenosti pro délku kabelu. Například pro hodnoty 0-100 metrů, aniž by byl signál nikterak významně rušen.



Obrázek 4.15: Modul RS232

## 4.4 Návrh DPS řídicí desky pro rover

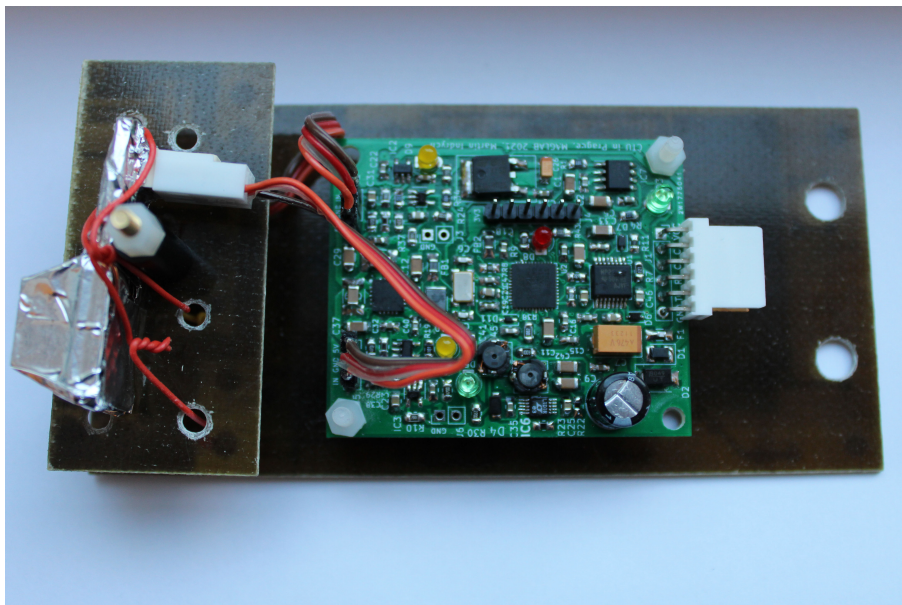
Stejně jako u předchozí desky, i zde jsou 2 vrstvy. Tam, kde je to možné, je rozlita měď ve spodní vrstvě. Rozměry řídicí desky pro rover jsou 48x57 mm. Ke snížení rozměrů jsou zde vynechány piezo měniče zabírající velkou část plochy a jsou nahrazeny konektory na externí připojení. Na obrázku 4.16 je vidět vyrobená a osazená DPS řídicí desky pro rover.



Obrázek 4.16: DPS řídicí desky pro rover



Finální verze DPS řídicí desky pro rover byla přimontována na kus uříznutého cuprexitu. Sensory byly také připevněny nad sebe do patra za pomoci dalšího kousku cuprexitu viz 4.17



**Obrázek 4.17:** Finální zpracování řídicí desky pro rover

## 4.5 Oživení a testování řídicích desek

Řídicí desky byly pájeny ve škole a to po částech tak, aby se vždy otestoval určitý blok a poté se na něj navazovalo. Například nejprve se pájel blok pro napájení a regulátory napětí, aby se otestovala správnost návrhu a nebyly poškozeny žádné součástky navíc. Pro obě desky proběhlo oživení bez problémů. Při zkoušce funkčnosti zpracování signálů komparátory a následné signalizace pomocí LED a piezo měničů bylo vše funkční. Mikrokontroler a jednotlivé periferie také fungují dle návrhu, což bylo otestováno vytvořeným firmwarem popsáním v následující kapitole.

# Kapitola 5

## Firmware řídicí desky

Jak již bylo zmíněno, pro oba projekty řídicích desek byl použit mikrokontroler STM32F413CHU. Jedná se o 48-pinový mikrokontroler napájený ze 3,3V. Byl vybrán na základě použitých periférií. Přesněji se jedná o čítání pulzů, vzorkování pulzu AD převodníkem na základě vnějšího přerušení, komunikace pomocí USB (u desky pro rover komunikace přes CAN a RS232), SDIO komunikaci pro SD kartu, SPI komunikaci s displejem, DA převodník pro nastavení komparační úrovně a vstupní a výstupní piny pro tlačítka a LED. Níže v podkapitolách jsou jednotlivé realizace částí firmware popsány a rozděleny pro řídicí desku ručního detektoru a roveru. Kód byl psán v jazyce C, v programu STM32CubeIDE. Nahráván byl do desky přes ST-Link desky NUCLEO-F303RE. Pro tento účel byl na řídicích deskách vyveden programovací konektor, který se spojil s Nucleem. K obsluze jednotlivých rozhraní byla využita knihovna HAL sloužící k usnadnění práce a času.

### 5.1 Firmware řídicí desky ručního detektoru

Jádrem firmware pro řídicí desku ručního detektoru je nekonečný while loop, ve kterém je zpracováno vykreslení OLED displeje, výpočet a zpracování aktuálně naměřených hodnot, obsluha odesílání zpráv USB komunikace a čtení hodnot jednotlivých tlačítek. Zbylá část programu je obsluhována pomocí přerušení. Dále budou jednotlivé části kódu popsány a vysvětleny.

### 5.1.1 Zpracování pulzů a měření napájecího napětí

Pomocí digitálně analogového převodníku lze pro jednotlivé detektory nastavit různé komparační úrovně. Výstupy komparátorů vedou na čítače pulzů zapojené na vstup timeru. Analogově digitální převodník slouží k navzorkování pulzů a spustí se při startu mikrokontroleru. Pomocí DMA ukládá hodnoty ze svého registru do bufferu. Přesněji se jedná o tři aktivní kanály AD<sup>1</sup> převodníku. Dva jsou pro vzorkování signálu generovaného detektory ionizujícího záření a třetí slouží k měření vstupního napětí. Napájecí napětí změřené na AD převodníku je každých 5 minut přepočítáno na reálné napájecí napětí a uloženo do proměnné, kterou displej načte a zobrazí.

Jak bylo řečeno, AD převodník zapisuje neustále data do bufferu, který má velikost 3x50 hodnot. Každý kanál má tedy k dispozici 50 hodnot k uložení. V okamžiku, kdy nastane přerušení na EXTI pinu, zkopírují se data z bufferu odpovídající zdroji, ze kterého bylo vytvořeno přerušení. Data se převedou pomocí přepočtu na hodnotu napětí. Přepočet použitý pro získání hodnot napětí je

$$U = (3,3/4096) \cdot V_{ADC}, \quad (5.1)$$

kde  $U$  je reálná hodnota napětí změřená AD převodníkem a  $V_{ADC}$  je hodnota naměřená AD převodníkem [LSBs]. Postup je takový, že se nejprve vydělí maximální hodnota, kterou může ADC změřit počtem bitů převodníku, zde 4096. Poté se hodnota vynásobí změřenou hodnotou ADC, výsledná hodnota odpovídá napětí na vstupu AD převodníku.

### 5.1.2 Komunikace přes USB

Komunikace přes USB je realizována pomocí přerušení. Jakmile přijde zpráva, vyhodnotí se její obsah a vykonají se dané kroky. Implementované zprávy a jejich popisy jsou zmíněny v následujících odstavcích. Zprávy jsou posílány jako jednoznakové pomocí proměnné typu char až na případ nastavení DA<sup>2</sup> převodníku. Pro odesílání informací do vizuálně příjemné tabulky byly využity escape sekvence, aby tabulka nebyla vypisována znovu, ale pouze se přepisovala na stejném místě v terminálu.

<sup>1</sup>Analogově-digitální (převodník)

<sup>2</sup>Digitálně-analogový (převodník)



Znak 'd' - Po přijetí tohoto znaku kód obsluhující USB očekává v dalším přerušení zprávu o velikosti 5x char. Pět znaků tvořících string "yxxxx"- Po přijetí tohoto řetězce zpráv následuje dekodování, na místě 'y' je písmeno 'a' nebo 'b' značící DA převodník, kterému budeme přenastavovat hodnotu výstupního napětí. Zbylá část zprávy "xxxx" je 4 místná hodnota napětí zadaná v milivoltech, která bude nastavena na příslušném DA převodníku. Příklad takové zprávy může být například 'd' pro aktivaci změny DAC hodnoty a následně "a1100" pro nastavení DAC připojeném na senzor A na hodnotu 1100 mV.

Znak 'r' - Přijetí znaku resetuje všechny proměnné, ve kterých se ukládají hodnoty počtů pulzů. Vymazání proměnných je uskutečněno pro oba detektory.

Znak 'i' - Tento znak aktivuje automatické vypisování a přepisování okna (každou sekundu) s informacemi o počtu pulzů, nastavení DAC a naměřených amplitud pulzů viz 5.1. Opětovné odeslání stejného znaku deaktivuje automatické vypisování.

```
Hodnota DAC senzoru A: 1140 mV
Hodnota DAC senzoru B: 1800 mV
Sensor A      pulzy 1s      pulzy 10s      pulzy 60s      pulzy celkem
Sensor B      0                0                3                8
Amplitudy pulzu:      1180      1179      1139      1193      1027
```

Obrázek 5.1: Výpis informací do terminálu

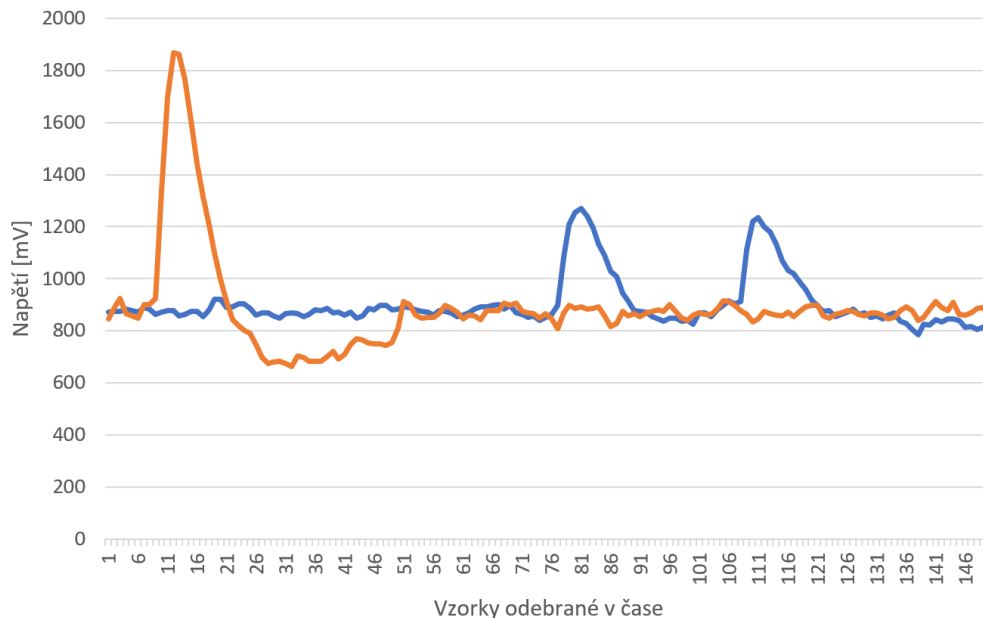
Znak 'l' - Odeslání znaku 'l' aktivuje automatické vypisování (každou sekundu) počtu pulzů. Jednotlivé hodnoty jsou oddělené mezerami a po odeslání všech hodnot je kurzor přemístěn na začátek nového řádku viz 5.2. Tento mód byl navrhnut pro ukládání do počítače například přes Realterm. Opětovné odeslání stejného znaku deaktivuje vypisování.

```
PulzyA PulzyB 1sA 1sB 10sA 10sB 60sA 60sB
8 8 0 0 0 0 0 0
8 9 0 1 0 1 0 1
8 9 0 0 0 1 0 1
8 9 0 0 0 1 0 1
8 9 0 0 0 1 0 1
8 9 0 0 0 1 0 1
8 14 0 5 0 6 0 6
8 17 0 3 0 9 0 9
8 23 0 6 0 6 0 15
8 26 0 3 0 9 0 18
```

Obrázek 5.2: Výpis informací pro logování v terminálu

Znak 'p' - Po přijetí tohoto znaku se spustí režim, při kterém se ve while cyklu

v main funkci odešle vždy naposledy zachycený pulz (všech jeho 50 hodnot). Mód byl navrhnout pro záznam pulzů například do Matlabu/Excelu a následné vykreslení navzorkovaného pulzu viz 5.3. Opětovné odeslání stejného znaku deaktivuje vypisování.



**Obrázek 5.3:** Příklad vykreslených pulzů z hodnot odeslaných přes USB

### 5.1.3 SPI komunikace s displejem

Pro komunikaci s displejem byla využita knihovna [31]. Knihovna byla převzata a upravena pro aktuální potřebu. Na displeji je pro snadnou práci s detektorem výpis celkového počtu pulzů zaznamenaného za celou dobu běhu přístroje a za posledních 60 sekund. Dále je zobrazeno napětí měřené na napájecím bloku a aktuální hodnoty nastavené na DAC pro jednotlivé senzory. Překreslení displeje probíhá periodicky ve while loopu v hlavní funkci main.

### 5.1.4 Obsluha tlačítek

Tlačítka jsou na desce celkem tři a slouží především k ovládání digitálně analogových převodníků nastavujících komparační úrovně a k nulování hodnot pro snímané pulzy. Jedno tlačítko slouží k inkrementaci DAC o 20 mV, druhé tlačítko slouží ke snižování hodnot DAC o 20 mV. Prostředním tlačítkem se přepíná mezi jednotlivými DAC pro senzory A a B. Podržením prostředního tlačítka na déle než dvě

sekundy se resetují uložené hodnoty o počtu naměřených pulzů.

### 5.1.5 Čítač pulzů

Pro čítání jednotlivých pulzů je využit timer, který má na pin označovaný jako externí trigger (ETR) připojen výstup z komparátoru. Vždy, když přijde signál (logická 1), čítač se inkrementuje. Není tedy nutné realizovat další přerušení. Vzhledem k tomu, že čítač je pouze 16-bitový, byla vytvořena 32-bitová proměnná, která data z čítače vypisuje a v případě jeho přetečení může čítat dále do podstatně vyšší maximální hodnoty.

## 5.2 Firmware řídicí desky pro rover

Firmware řídicí desky pro rover je totožný s firmwarem pro ruční detektor. Pouze jsou odebrané zde neimplementované části hardware. Je tedy využit program na zaznamenávání pulzů, komunikaci přes RS232 (programováno přes UART, stejně jako pro USB). Zbývá implementace CANu, která nebyla vytvořena kvůli aktuální situaci a tedy nemožnosti komunikaci propojit a vyzkoušet.



# Kapitola 6

## Testování a porovnání s Geiger-Müllerovou trubicí

K testování v rámci základní funkčnosti jednotlivých částí byly využity již dříve popsané zdroje záření (kempingová punčoška a zdroj ze sady Gamabeta). Po sestavení ale bylo možné zařízení vyzkoušet i jinými zdroji záření, aby se ověřilo, jak přesně detektor měří a zdali lze určit souvislost mezi energií záření a amplitudou vygenerovaného pulzu. V tomto nám vyšlo vstříc pracoviště Českého metrologického institutu, oddělení legální metrologie veličin ionizujícího záření, ve kterém bylo možné provést další měření na zdrojích záření se známou aktivitou.

Použity byly různé zdroje záření, v příloze jsou příslušné certifikáty s dodatečnými hodnotami o daném etalonu aktivity. Níže jsou popsána měření s etalony a srovnání s Geiger-Müllerovou trubicí. Všechna měření pro detektor se scintilačním krystalem a PIN diodami byla prováděna kontaktně, to znamená, že etalon aktivity byl přímo umístěn na senzor. Měření s Geiger-Müllerovou trubicí probíhala ve vzdálenosti 5 cm mezi zdrojem a trubicí. Zdroje vyzařovaly pouze záření gama dané energie. Hodnoty pro jednotlivé etalony byly zaneseny do tabulky 6.1.

Pro určité skupiny etalonů aktivity byly vytvořeny srovnávací grafy na kterých je celá škála frekvencí, které byly naměřeny. Tučně znázorněná je průměrná hodnota, slaběji maximum a minimum. Hodnoty grafu byly voleny tak, aby měly určitou vypovídající hodnotu, proto nebyly zařazeny zdroje s vysokou frekvencí do srovnání s nižšími.

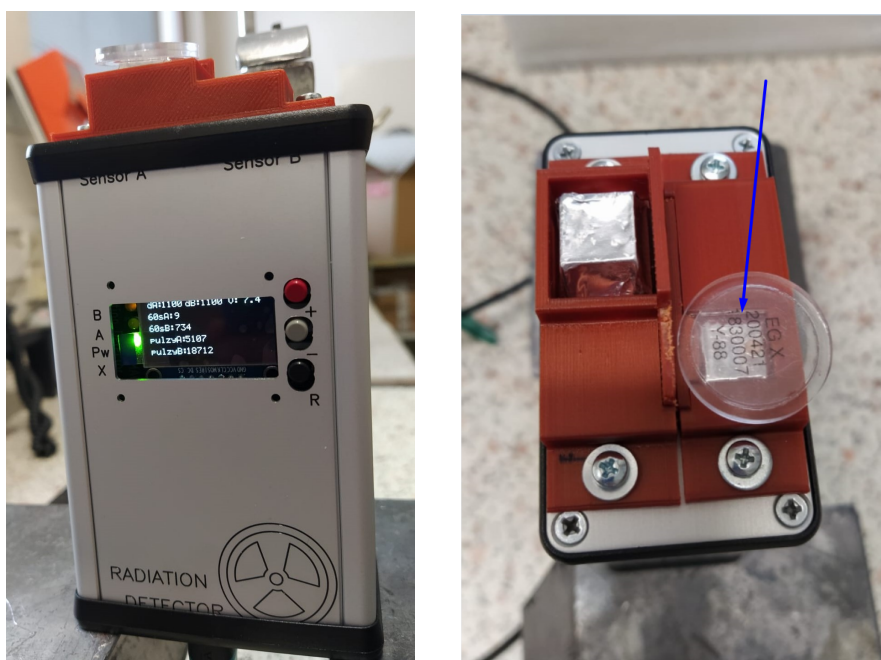
**Tabulka 6.1:** Přehled využitých etalonů pro měření

Označení	Prvek	Aktivita [Bq]	Energie [keV]
Cs-137 n. 86	Cesium	2,003M	661
Cs-137 n. 87	Cesium	764,4k	661
Cs-137 n. 88	Cesium	309,5k	661
Co-57	Kobalt	2,715M	706,42 , 136,47
Cs-137 EG	Cesium	903,4k	661,7
Co-60	Kobalt	927k	1173,2 , 11332,5
Y-88	Yttrium	1,012M	1830

Dále jsou jednotlivé měření rozebrány podle použitých zdrojů.

## 6.1 Měření na ručním detektoru

Měření na ručním detektoru probíhalo viz obrázek 6.1. Etalon aktivity byl označen modrou šipkou na obrázku. Detektor byl napájen pomocí tužkových baterií a logování dat probíhalo přes USB pomocí programu Realterm. Ruční detektor je osazen popisovanými detektory a to detektorem se scintilačním krystalem (First Sensor) a detektorem se 4 PIN diodami (TEMD5080X01).

**Obrázek 6.1:** Měření ručním detektorem

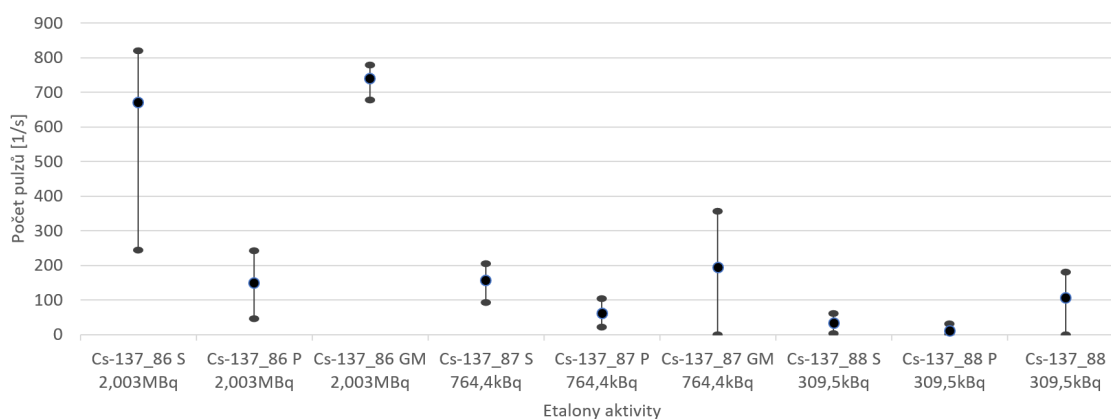
### 6.1.1 Cs-137

Prvním etalonem byl Cs-137. Přesněji se jednalo o sadu etalonů se snižující se aktivitou (vždy o 1/3). Označení uvedené v tabulce vyplývá z výrobního čísla. V tabulce 6.2 jsou zpracovaná data naměřená na sadě etalonu Cs-137. Měření bylo provedeno pro porovnání na detektorech se scintilačním krystalem, s PIN diodami a Geiger-Müllerovou trubicí. V kolonce označení je vždy daný detektor upřesněn pomocí \_S pro scintilační krystal, \_P pro PIN diody a \_GM pro Geiger-Müllerovu trubicí.

**Tabulka 6.2:** Data naměřená na sadě radionuklidu Cs-137

Označení	Minimum [1/s]	Průměr [1/s]	Maximum [1/s]
86_S	245	670,7	821
86_P	72	148,9	242
86_GM	678	739,4	778
87_S	93	156	205
87_P	22	61	104
87_GM	0	194,7	356
88_S	3	32	61
88_P	1	11,8	31
88_GM	0	105,6	180

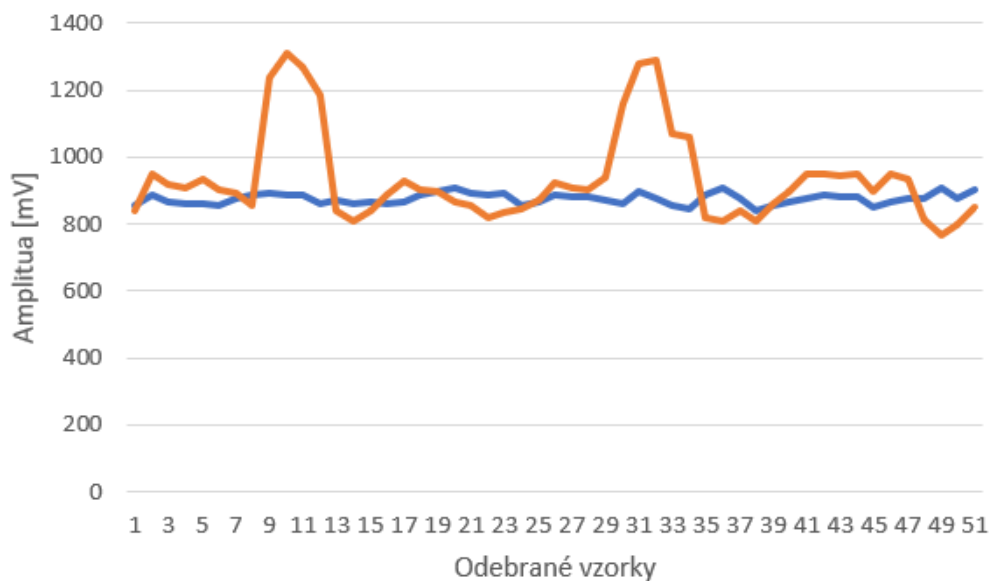
Výše naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu 6.2. Jedná se o trojici dat naměřených různými detektory na stejném zdroji záření.



**Obrázek 6.2:** Porovnání frekvence měřených pulzů

Vždy pro každou trojici naměřených dat na stejném etalonu aktivity je vidět porovnání, že GM trubice naměřila v průměru nejvyšší hodnoty frekvence. Následně za ní je detektor se scintilačním krystalem a nejhůře dle frekvence zachyceného záření je na tom detektor s PIN diodami.

Zároveň také pro radionuklid s výrobním označením 86 byly zaznamenány pomocí AD převodníku pulzy. Teoreticky by pulzy měly mít stejnou amplitudu pro všechny etalony ze stejné sady prvku Cs-137, protože daný prvek vyzařuje gama záření o stejné energii. Na obrázku 6.3 jsou vykresleny dva náhodně vybrané pulzy zachycené detektorem a navzorkované AD převodníkem. Oranžový průběh odpovídá detektoru se scintilačním krystalem, který zachytil a zaznamenal pulz, modrý odpovídá detektoru s PIN diodami měřící šum (zdroj záření byl pouze na jednom senzoru).



**Obrázek 6.3:** Pulzy naměřené na Cs-137 vzorek 86

### 6.1.2 Kobalt, Cesium a Yttrium

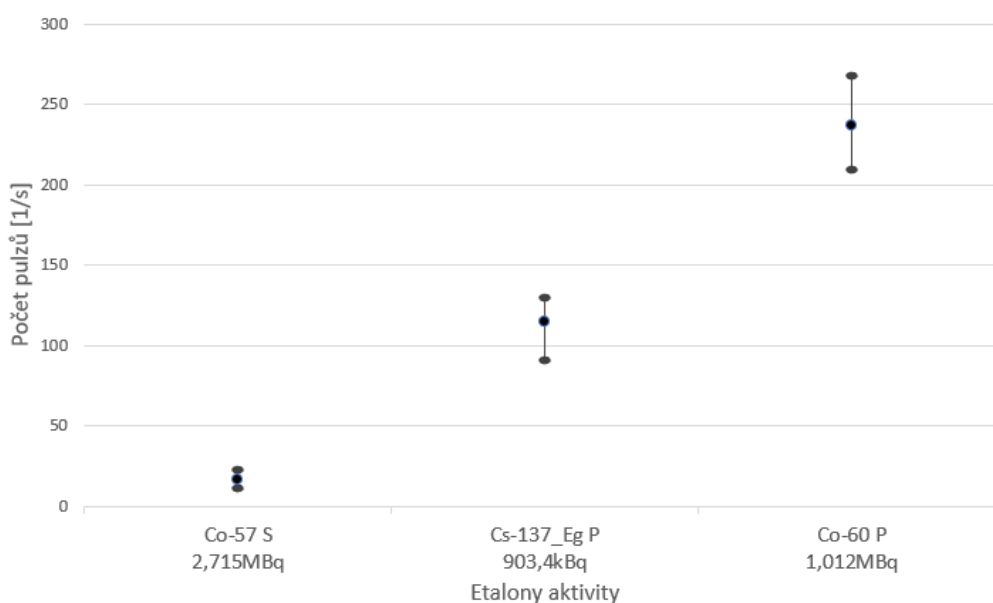
Další trojicí etalonů jsou radionuklidy prvků Kobalt, Cesium a Yttrium. Nejedná se o žádnou sadu, jen pro přehlednější zápis byly tyto prvky sloučeny do jedné sekce. V tabulce 6.3 jsou uvedeny naměřené hodnoty pro výše zmíněné prvky.



**Tabulka 6.3:** Data naměřená na dalších etalonech

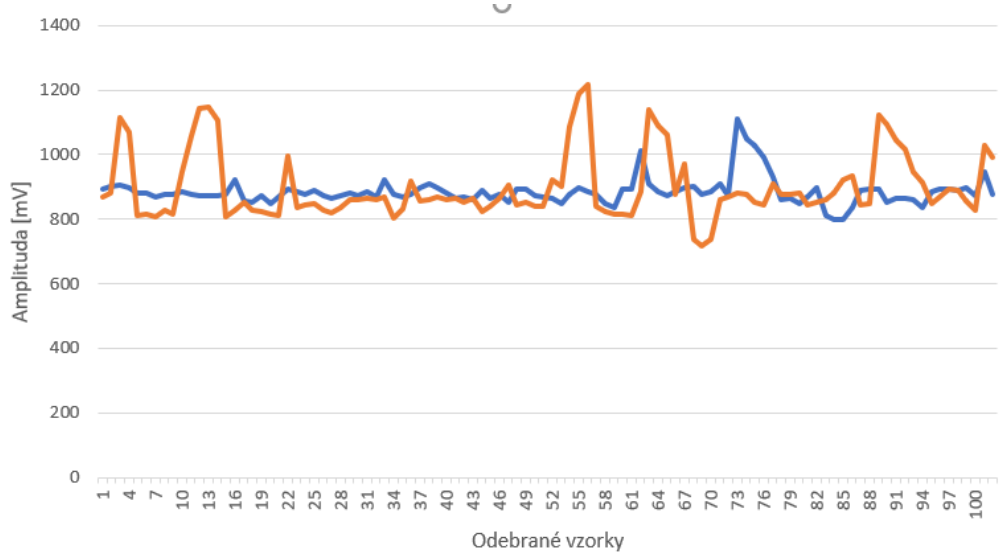
Označení	Minimum [1/s]	Průměr [1/s]	Maximum [1/s]
Co-57_S	11	16,2	23
Cs-137_EG_P	91	114,9	130
Co-60_S	4012	4100,5	4257
Co-60_P	209	236,4	268
Y-88_S	6446	6624	6792

Na obrázku 6.4 je opět srovnání hodnot dle tabulky 6.3. Z vykreslení do grafu byly vzhledem k zobrazení hodnot vyjmuty 2 nejvyšší frekvence a to u Y-88 a Co-57\_S. Grafické porovnání je tedy spíše doplňkové a je nutné vycházet hlavně z hodnot zanesených v tabulce. Z ní lze vypočítat porovnání pro sestavené detektory pouze u Co-60. Nastává stejný jev, jako u předchozího měření. Detektor se scintilačním krystalem je schopen zachytit více ionizujícího záření za stejných podmínek jako detektor s PIN diodami.

**Obrázek 6.4:** Porovnání frekvence měřených pulzů pro další etalony

Zobrazení náhodně zaznamenaných pulzů při měření viz 6.5. Jedná se o část s větší koncentrací pulzů (to odpovídá také nejvyšší naměřené frekvenci pulzů). Oranžový průběh odpovídá detektoru se scintilačním krystalem, který zachytil a

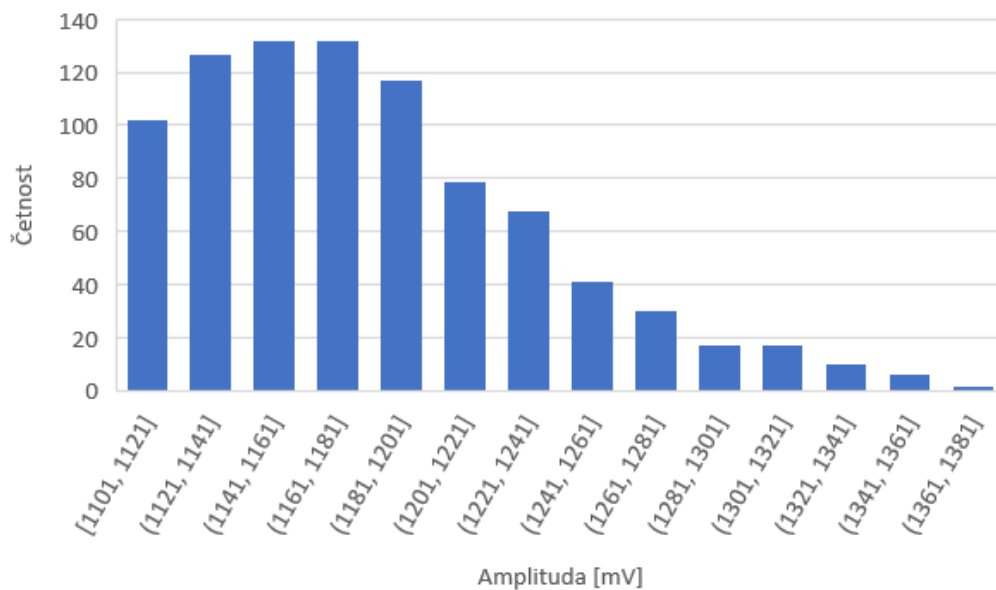
zaznamenal několik pulzů, stejně jako modrý, který odpovídá detektoru s PIN diodami.



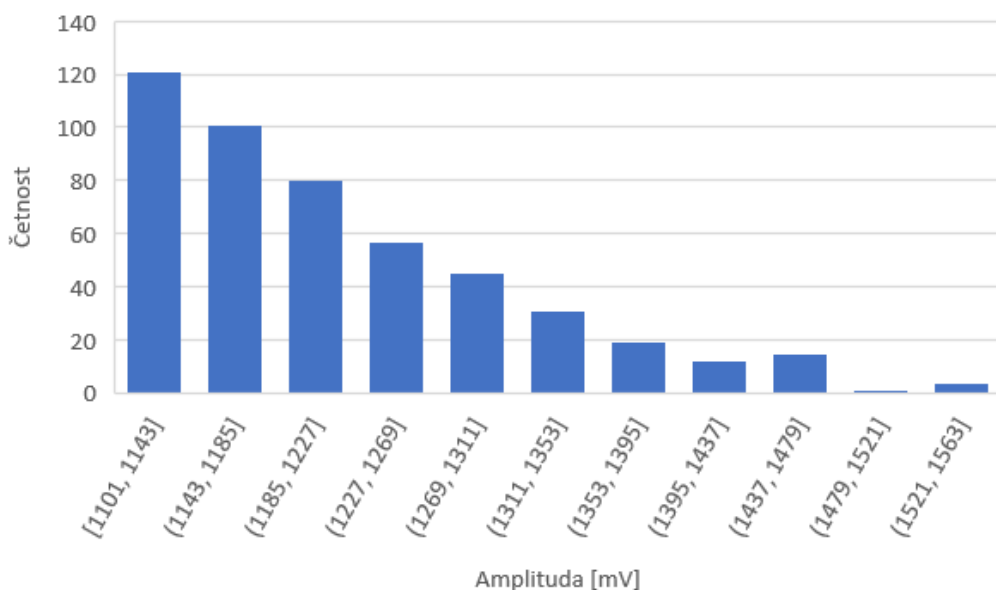
**Obrázek 6.5:** Pulzy naměřené na Y-88

### 6.1.3 Amplituda pulzů

Pomocí navzorkování AD převodníkem jednotlivých pulzů je možné si vykreslit hodnoty amplitud pro jednotlivé zachycené pulzy. Nejprve na obrázku 6.6 je ukázán histogram vykazující četnost různých hodnot amplitudy pulzů etalonu Cs-137\_86 měřený scintilačním krystalem. Na druhém obrázku 6.7 je histogram pro detektor s PIN diodami.



**Obrázek 6.6:** Histogram pulzů pro detektor se Scintilačním krystalem

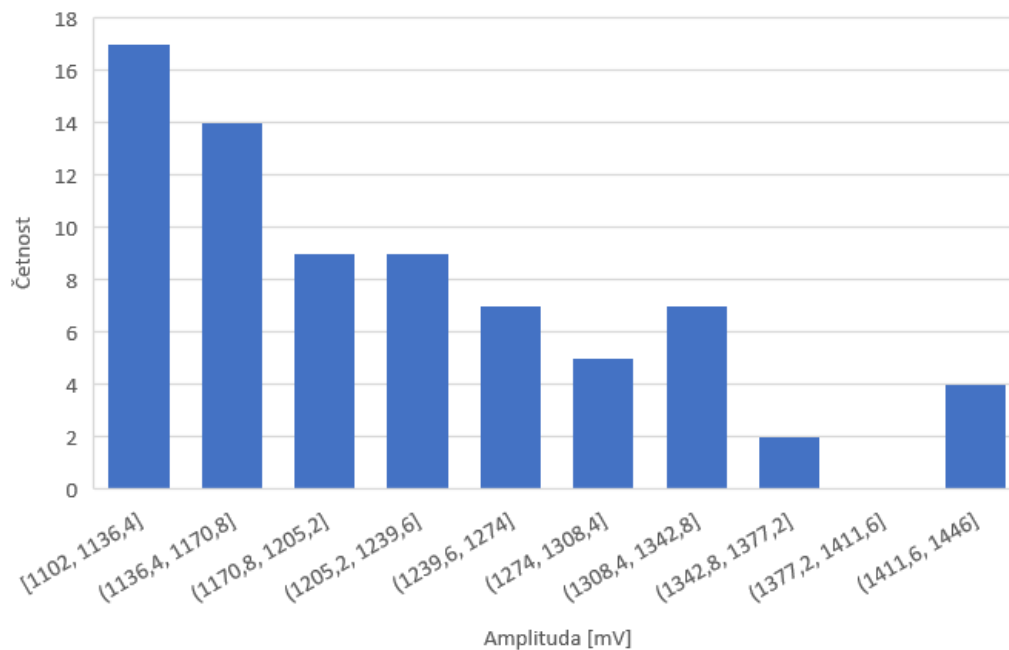


**Obrázek 6.7:** Histogram pulzů pro detektor s PIN diodami

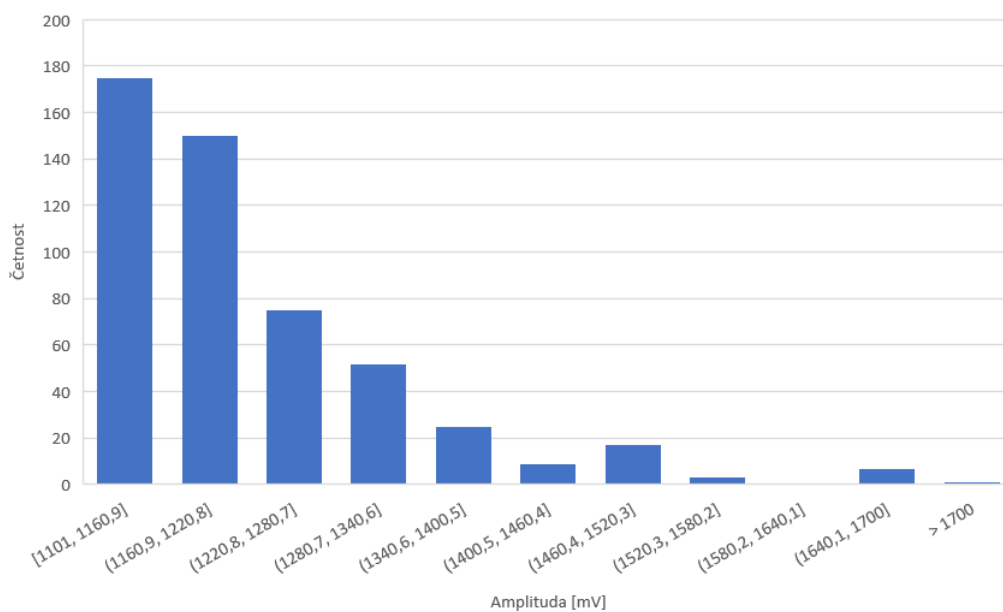
Po jednoduchém porovnání histogramů lze usoudit, že dioda se scintilačním krystalem je schopna vytvořit větší proudový pulz, nežli čtveřice PIN diod pro stejný zdroj záření. Detektor se scintilačním krystalem proto lze považovat za účinnější, protože se jeho signály ne tak snadno ztratí v šumu. Tento závěr lze vyvodit také z naměřené frekvence. Pro stejné zdroje záření měří detektor s PIN diodami mnohem menší hodnoty frekvence než detektor se scintilačním krystalem. Zároveň zde také

není vidět žádná významná závislost mezi amplitudou pulzů a energií etalonu, která je poloviční mezi danými měřeními.

K dalšímu porovnání byly naměřeny pulzy na zdroji záření Co-60 viz 6.8 a 6.9. I v tomto měření je ale závěr stejný.



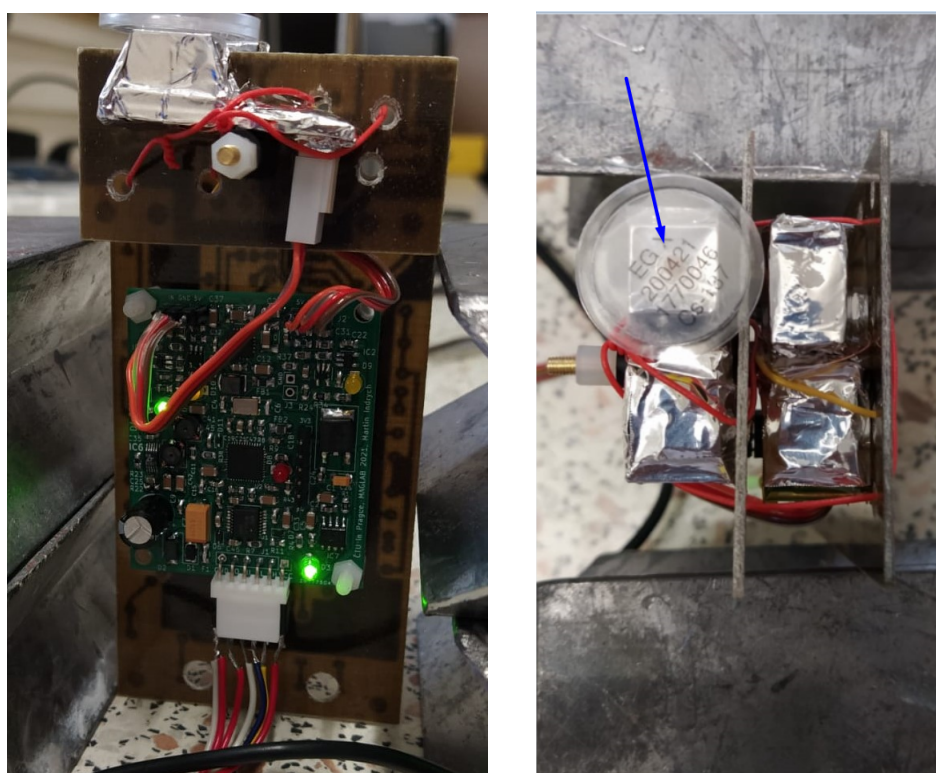
**Obrázek 6.8:** Histogram pulzů pro detektor se Scintilačním krystalem



**Obrázek 6.9:** Histogram pulzů pro detektor s PIN diodami

## 6.2 Měření na detektoru pro rover

Měření na detektoru pro rover probíhalo viz obrázky 6.10. Napájen byl pomocí externího napájecího zdroje (12V) připojeného na napájecí blok a logování dat probíhalo přes převodník RS232 na USB, přes program Realterm. Detektor pro rover je osazen již popsáním detektorem se scintilačním krystalem (First Sensor) a samostatně vyrobeným detektorem se scintilačním krystalem a PIN diodami (SAINT-GOBAIN CRISTAUX ET DETECTEURS).



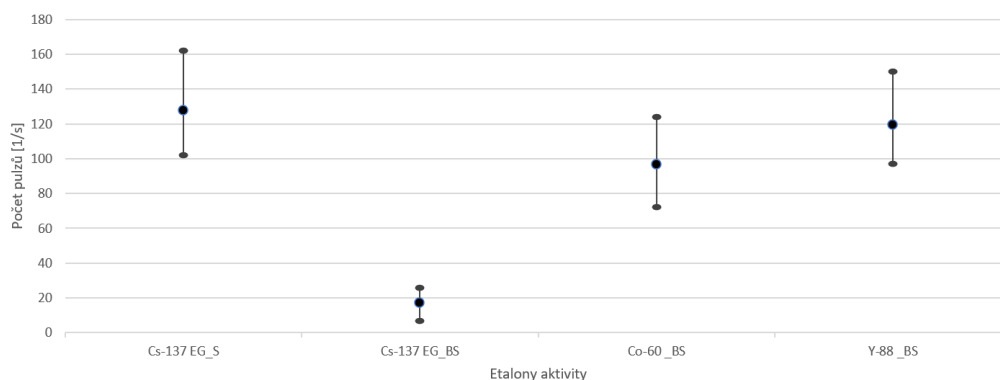
Obrázek 6.10: Měření detektorem pro rover

### 6.2.1 Cs-137, Co-60, Y-88

Etalony aktivity použité pro měření s detektorem pro rover jsou podrobněji označeny v tabulce 6.1. Hodnoty frekvencí naměřené pro jednotlivá měření všech tří zdrojů, zvláště detektorem se scintilačním krystalem (S) a sestaveným scintilačním krystalem s diodami (BS). Zkratky pro jednotlivé typy detektorů byly využity i v grafu srovnávajícím frekvence měřených pulzů detektorem pro rover 6.11. Zároveň jsou v tabulce 6.4 vyneseny všechny naměřené frekvence.

**Tabulka 6.4:** Data naměřená na etalonech s detektorem pro rover

Označení	Minimum [1/s]	Průměr [1/s]	Maximum [1/s]
Cs-137 EG _S	102	127,9	162
Cs-137 EG _BS	7	17,2	26
Co-60 _S	2709	2802,9	2921
Co-60 _BS	72	96,7	124
Y-88 _S	3931	4050,6	4147
Y-88 _BS	97	119,4	150

**Obrázek 6.11:** Porovnání frekvence měřených pulzů etalonů pro rover

Z porovnání frekvencí je opět vidět dominance komerčního detektoru se scintilačním krystalem od společnosti First Sensor. Stejně jako při měření s ručním detektorem i zde měří vyšší hodnoty pulzů za sekundu. Problém u druhého typu senzoru nejspíš spočívá v neodborném sestavení celého detektoru se samostatným krystalem. Bez žádných dalších znalostí a úkonů potřebných ke správné funkci finálního detektoru byl krystal přichycen na PIN diody pomocí reflexní pásky. Správně se ale při využití scintilačního krystalu mezi krystal a diody nanáší vrstva speciální kapaliny pro zajištění správné funkčnosti detektoru. Povrch krystalu také nebyl nijak povrchově upraven.

# Závěr

Stěžejním cílem této práce bylo vytvoření detektoru ionizujícího záření pro mobilního robota a následné porovnání funkčnosti s Geiger-Müllerovou trubicí. Všechny body zadání byly splněny bez závažnějších problémů. Kromě samotného detektoru pro mobilního robota byl vytvořen i ruční detektor.

Nejprve jsem vytvořil prototyp, který byl ovšem velmi nepřesný a nebylo možné ověřit jeho funkčnost. Dále jsem vytvořil DPS dvou detektorů, se scintilačním krystalem a se samotnými PIN diodami, otestoval jsem jejich funkčnost a porovnal napěťové pulzy na výstupu. Z porovnání je zřejmé, že senzor se scintilačním detektorem (First Sensor) a PIN diodou dokáže vygenerovat pulzy o větší amplitudě (o 100 mV) a tím tak lépe oddělit ionizující záření od okolního světelného i elektromagnetického šumu. Zároveň jsem zjistil, že detektor se scintilačním krystalem je náchylnější na okolní rušení, zejména ve formě světla.

Dále jsem vytvořil DPS řídicích desek, jejíž funkcí je zaznamenávat naměřená data. Ať už se jedná o amplitudy pulzů, frekvence snímaných pulzů nebo samotný průběh pulzu v čase. Obě řídicí desky zvládnou obsluhovat dva detektory najednou. Řídicí deska ve variantě pro rover je schopna odesílat naměřená data po aktivaci pomocí příkazů přes rozhraní RS232. Přesněji amplitudy zachycených pulzů, počet pulzů za celou dobu měření, posledních 60, 10 a 1 sekundu. Také je schopna odeslat měření s navzorkovaným pulzem. Deska je osazena také součástkami pro komunikaci přes CAN, tato komunikace ovšem není prozatím zprovozněna, protože kvůli aktuální situaci nebylo možné komunikaci propojit.

Řídicí deska pro ruční detektor je namísto RS232 osazena USB rozhraním a slouží stejně jako u roveru ke komunikaci a odesílání naměřených dat. Navíc je zde osazen displej a tlačítka, díky kterým není detektor nutno nikam připojovat a lze si všechna potřebná nastavení a odečtení hodnot pomocí nich zajistit. Také je na

desku osazena signalizační LED, která při zachycení pulzů bliká a piezo měnič vydává typický zvuk pro detektory ionizujícího záření. Na desce měla být také využita microSD karta pro ukládání dat a následné čtení z PC. To ovšem vzhledem k nevhodně umístěnému footprintu není možné a z implementace této části nakonec sešlo.

V poslední části práce jsem vytvořil firmware pro obě řídicí desky a následně provedl samotné testování a porovnání s Geiger-Müllerovou trubicí. Z porovnání je jasné, že, co se týče měřené frekvence pulzů, je Geiger-Müllerova trubice spolehlivější a přesnější. Za ní následuje detektor se scintilačním krystalem a poté detektor se samotnými PIN diodami. Zároveň jsem při měření zjistil, že neexistuje žádná jednoznačná závislost mezi energií záření a amplitudou vygenerovaného pulzu.

Oproti Geiger-Müllerově trubicí je ale možné detektor vylepšit a používat ho k určení spektra ionizujícího záření. Zároveň je také možný přepočít na jednotku dávky Sv po dalším zkoušení a kalibraci AD převodníku. Prostoru pro vylepšení je velmi mnoho, ale základ detektoru jak pro rover, tak ruční detektor, je zajiště kvalitní.



# Bibliografie

1. NAVRÁTIL, Leoš; ROSINA, Jozef. *Medicínská biofyzika 2*. Grada Publishing, 2019. ISBN 978-80-271-0209-9.
2. ULLMANN, RNDr. Vojtěch. *Jaderná a radiační fyzika - Ionizující záření*. Dostupné také z: <https://www.astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>.
3. ŠVEC, Jiří. *RADIOAKTIVITA A IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ*. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě, 2005. ISBN 80-86634-62-0.
4. ULLMANN, RNDr. Vojtěch. Dostupné také z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>.
5. ARPANSA, 2019. Dostupné také z: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/alpha-particles>.
6. ČEZ. *Veličiny a jednotky*. Dostupné také z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/veliciny\\_5.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/veliciny_5.html).
7. OSN. *Ionizující záření, účinky a zdroje*. OSN, 2016. Dostupné také z: [https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/dokumenty/Radiation-InsidePart-Czech-Feb\\_2017-1.pdf](https://www.sujb.cz/fileadmin/sujb/docs/radiacni-ochrana/dokumenty/Radiation-InsidePart-Czech-Feb_2017-1.pdf).
8. World Health Organization, 2016. Dostupné také z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.
9. *gamabeta-CEZ*. 1995. Dostupné také z: [http://physics.ujep.cz/~rseifert/prirucky\\_navody-scany/gamabeta-CEZ/](http://physics.ujep.cz/~rseifert/prirucky_navody-scany/gamabeta-CEZ/).

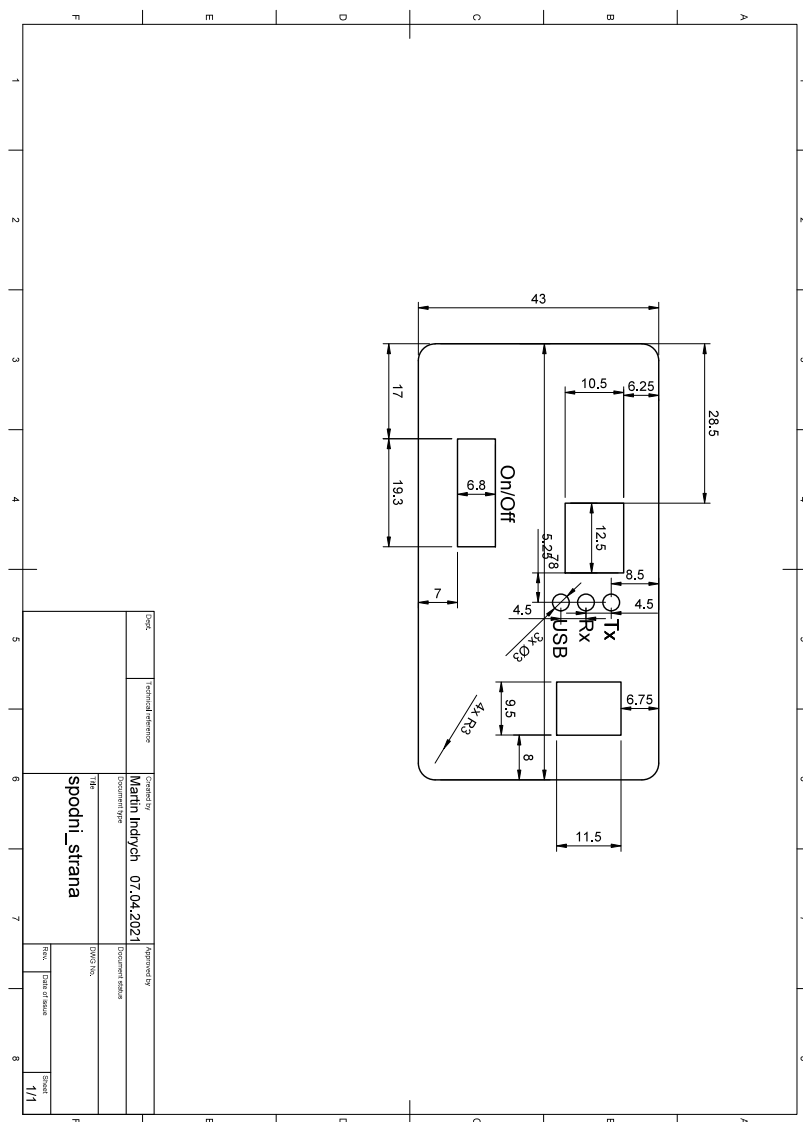
10. *Punčoška dvojjazná - kartušové lampy*: [n.d.]. Dostupné také z: [https://www.rybarske-zbozi.cz/puncoska-dvojjazna-kartusove-lampy/?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxN5DTecR2qP8btn45uYYFHh9MzS2h57oVFcNwnAKyer\\_ptxeUEud0aAm9KEALw\\_wcB](https://www.rybarske-zbozi.cz/puncoska-dvojjazna-kartusove-lampy/?gclid=Cj0KCQjw4v2EBhCtARIsACan3nxN5DTecR2qP8btn45uYYFHh9MzS2h57oVFcNwnAKyer_ptxeUEud0aAm9KEALw_wcB).
11. NAKHOSTIN, Mohammad. *Signal processing for radiation detectors*. John Wiley, 2017. ISBN 81119410140.
12. ULLMANN, RNDr. Vojtěch. *Detekce a spektrometrie ionizujícího záření*. Dostupné také z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm#G-M>.
13. *Scintillation counter*. Wikimedia Foundation, 2020. Dostupné také z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation\\_counter](https://en.wikipedia.org/wiki/Scintillation_counter).
14. *First Sensor PIN detector*. 2018. Č. X100-7 THD. Dostupné také z: [https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/X100-7\\_THD\\_3001447\\_3001448.pdf](https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/X100-7_THD_3001447_3001448.pdf).
15. *Tunelová dioda, PIN, Schotkyho dioda*. Dostupné také z: [http://dlabos.wz.cz/en/11-Tunelova\\_dioda,PIN,Schotkyho\\_dioda.html](http://dlabos.wz.cz/en/11-Tunelova_dioda,PIN,Schotkyho_dioda.html).
16. ŠTEFANEC, František. *Detektor radioaktivity s fotodiodou*. Dostupné také z: <http://tefatronix.g6.cz/display.php?page=photorad&lang=cz>.
17. *SILICON PHOTODIODES FOR GAMMA RAY DETECTION*. 2013. Č. X100-7. Dostupné také z: <https://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/gamma-ray-detection.pdf>.
18. *Silicon PIN Photodiode*. 2019. Č. TEMD5080X01. Dostupné také z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/427/temd5080-1767083.pdf>.
19. *LM74700-Q1 Low IQ Reverse Battery Protection Ideal Diode Controller*. 2017. Č. LM74700-Q1. Dostupné také z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm74700-q1.pdf?ts=1621492427836&ref\\_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.ti.com%5C%252Fdocument-viewer%5C%252FLM74700-Q1%5C%252Fdatasheet%5C%252FGUID-5D180CB2-8768-4E9A-9F23-5CA07CF4ED91](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm74700-q1.pdf?ts=1621492427836&ref_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.ti.com%5C%252Fdocument-viewer%5C%252FLM74700-Q1%5C%252Fdatasheet%5C%252FGUID-5D180CB2-8768-4E9A-9F23-5CA07CF4ED91).
20. *Step-Down Regulator*. 2017. Č. LT3502EMS. Dostupné také z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3502fd.pdf>.

21. *TPS7A470x 36-V, 1-A, 4- $\mu$ VRMS, RF LDO Voltage Regulator*. 2012. Č. TPS7A470x. Dostupné také z: <http://www.ti.com/general/docs/suppproductinfo.tsp?distId=26&gotoUrl=http%5C%3A%5C%2F%5C%2Fwww.ti.com%5C%2Flit%5C%2Fds%5C%2Fsymlink%5C%2Ftps7a47-q1.pdf>.
22. *STM32F423CH*. Dostupné také z: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f423ch.html>.
23. *132 X 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller*. 2013. Č. SH1106. Dostupné také z: <https://www.crystalfontz.com/controllers/SinoWealth/SH1106/>.
24. *FT230X USB TO BASIC UART IC*. 2016. Č. FT230XS. Dostupné také z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT230X.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf).
25. *Rail to rail 1.8 V high-speed comparator*. Č. TS3021. Dostupné také z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ts3021.pdf>.
26. *Rail-to-Rail Input/Output, 10 MHz Op Amps*. 2016. Č. MCP6021. Dostupné také z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001685e.pdf>.
27. *CERAMIC SMD CRYSTAL*. 2015. Č. ABM3B. Dostupné také z: <https://abracon.com/Resonators/abm3b.pdf>.
28. *TJA1057 High-speed CAN transceiver*. 2017. Č. TJA1057GT. Dostupné také z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1057.pdf>.
29. *KFXX Very low drop voltage regulators with inhibit*. 2018. Č. KF50BDT-TR. Dostupné také z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/cd00000970-1795532.pdf>.
30. *MAX3227 3-V TO 5.5-V SINGLE-CHANNEL RS-232 LINE DRIVER/RECEIVER WITH  $\pm 15$ -kV ESD PROTECTION*. 2016. Č. MAX3227. Dostupné také z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/max3227.pdf>.
31. SIRYI, Alex. *SH1106 driver 1.3 OLED display for STM32 using HAL*. 2018. Dostupné také z: <https://github.com/desertkun/pods>.

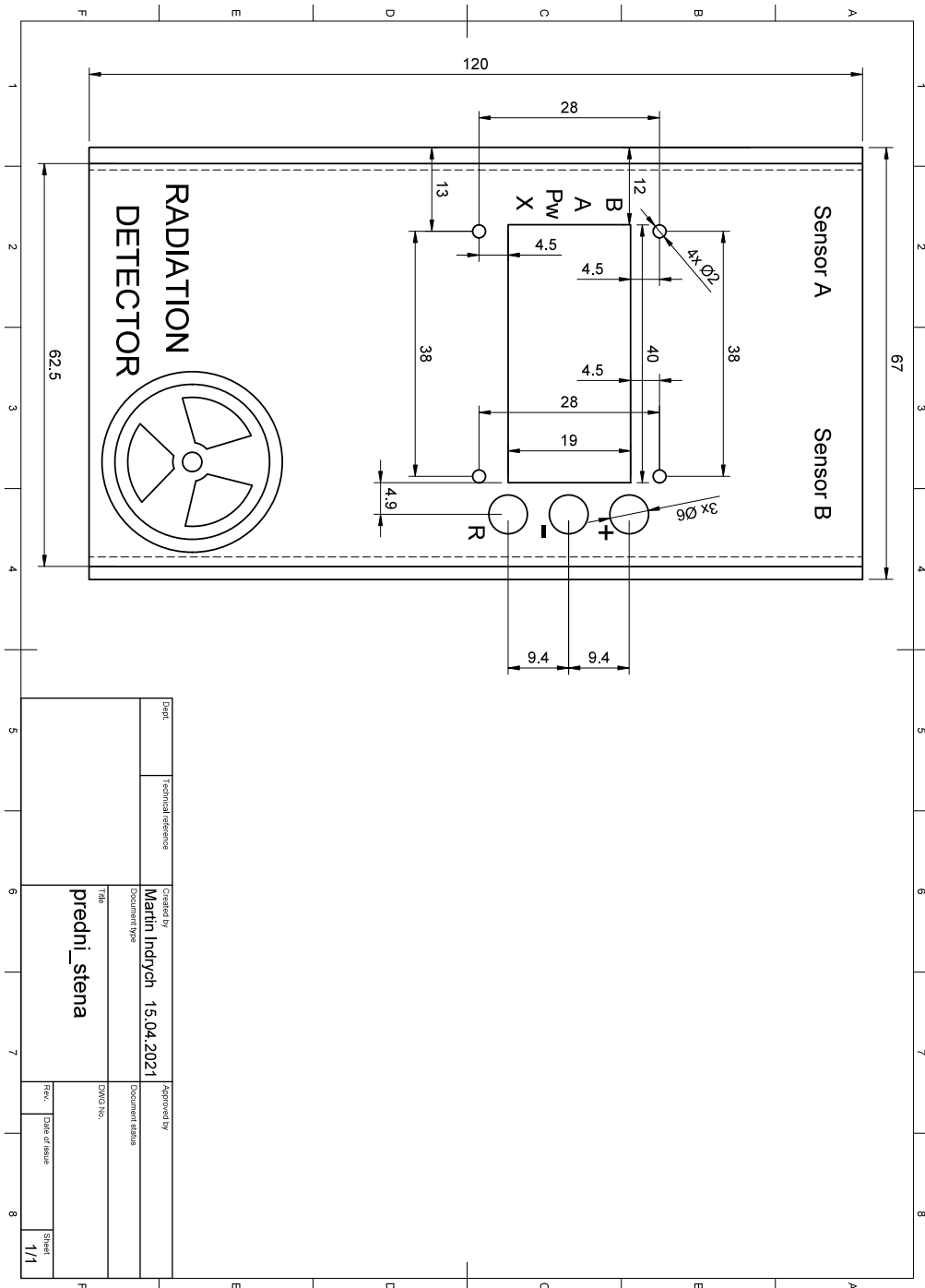


# Přílohy

## A Výkresy spodní a vrchní části pouzdra ručního detektoru



Obrázek 12: Výkres přední části pouzdra



Obrázek 13: Výkres spodní části pouzdra