

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

Návrh a konstrukce měřidla ionizujícího záření

Marek Miladinovič
Hlavní město Praha

Praha 2024/2025

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a telekomunikace

NÁVRH A KONSTRUKCE MĚŘIDLA IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ

DESIGN AND CONSTRUCTION OF IONIZING RADIATION MEASUREMENT DEVICE

AUTOR: Marek Miladinović

ŠKOLA: Gymnázium, Praha 9, Chodovická 2250

KRAJ: Hlavní město Praha

KONZULTANT: Ing. Pavel Novotný, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou práci na téma *Návrh a konstrukce měřidla ionizujícího záření* jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Novotného, Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny v práci citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Dále prohlašuji, že tištěná i elektronická verze práce SOČ jsou shodné a nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne: _____

Marek Miladinović

Poděkování

Především děkuji svému konzultantovi Ing. Pavlovi Novotnému, PhD. za jeho užitečné rady, připomínky, odborné vedení práce a poskytnutí možnosti provedení potřebných měření. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům ČMI za umožnění měření v jedné z jejich laboratoří. V neposlední řadě děkuji Jakubovi Dokulilovi za vytvoření a publikování šablony pro sazbu textu práce SOČ pomocí programu L^AT_EX.

Abstrakt

Práce se věnuje vývoji a konstrukci ručního měřidla intenzity záření beta a gama. Užitým detektorem je Geigerova-Müllerova trubice s označením J304.

V základním nastavení zařízení měří intenzitu ionizujícího záření v CPS (counts per second, impulzy za sekundu) a dále může provádět přepočet odezvy na aktivitu bodového zdroje záření (Bq) či plošnou aktivitu (Bq/cm²). Zařízení je tak možné používat pro kvantitativní laboratorní analýzu zdrojů záření, dále jako kontrolní prostředek na pracovištích s rizikem kontaminace povrchu radionuklidy, a též jako kontinuální bezpečnostní ukazatel kvantitativních změn v radiačním poli. Přístroj je kalibrován pomocí etalonů vyráběných Českým metrologickým institutem a s využitím příslušných metod pro kalibraci měřidla tohoto typu.

První část práce (teoretická část) se věnuje obecnému úvodu do problematiky detekce a měření ionizujícího záření, druhá část rozebírá konstrukci a technické provedení výrobku a třetí část obsahuje záznamy z testování a kalibrace přístroje. Práce dále obsahuje datasheet přístroje a soupis jeho technických parametrů, schémata zapojení, část zdrojového kódu MCU, fotodokumentaci vývoje zařízení, seznam použitých součástek a další dokumentaci.

Klíčová slova

Ionizující záření, detekce záření, Geigerův-Müllerův detektor, záření gama

Abstract

The thesis is focused on development and construction of a handheld beta and gamma radiation intensity meter. The detector used is a J304 Geiger-Müller tube.

In its basic configuration, the device measures the ionizing radiation intensity in CPS (counts per second) and it is also capable of converting radiation intensity to point source activity (Bq) or surface activity (Bq/cm²). The device can thus be used for quantitative laboratory analysis of radiation sources, as a control tool in workplaces with a risk of surface contamination by radionuclides, and also as a continuous safety indicator of quantitative changes in the radiation field. The instrument is calibrated using standards produced by the Czech Metrology Institute and using the appropriate methods for calibrating this type of instrument.

The first part of the thesis (theoretical part) is devoted to a general introduction to the problems of detection and measurement of ionizing radiation, the second part discusses the construction and technical design of the product, and the third part includes records of testing and calibration of the instrument. The thesis also contains a datasheet of the device and a list of its technical parameters, circuit diagrams, a part of the MCU source code, photo documentation of the device development, a list of used components and other documentation.

Keywords

Ionizing radiation, radiation detection, Geiger-Müller counter, gamma radiation

Obsah

Úvod	1
1 Teoretická část	2
1.1 Radioaktivita a ionizující záření	2
1.2 Veličiny a jednotky jaderné fyziky	3
1.3 Využití jaderných reakcí	3
1.4 Geigerův-Müllerův detektor	3
1.5 Obecné principy detektorů ionizujícího záření	4
1.6 Vlastnosti detektorů ionizujícího záření	5
1.6.1 Detekční účinnost	5
1.6.2 Energetický rozsah	5
1.6.3 Mrtvá doba	5
2 Konstrukční část	7
2.1 Charakteristika přístroje	7
2.2 Postup vývoje a tvorba práce	11
2.3 Celkový princip přístroje	13
2.4 Kompletní zapojení	14
2.5 Rozbor zapojení a funkčních celků	15
2.5.1 Napěťové úrovně	15
2.5.1.1 Spínaný stabilizátor napětí 3,3 V	15
2.5.1.2 Spínaný stabilizátor napětí 5 V	16
2.5.2 Měnič napětí 440 V	17
2.5.2.1 Spínaný step-up měnič	17
2.5.2.2 Frekvenční generátor	18
2.5.3 Obvod Geigerovy-Müllerovy trubice	19
2.5.4 Obvod pro úpravu a zpracování impulsů	20
2.5.4.1 Proudový integrátor	20
2.5.4.2 Zesilovač amplitudy pulzů	22
2.5.4.3 Diskriminátor falešných pulzů	23
2.5.4.4 Unifikátor pulzů	24
2.5.5 Zapojení MCU a prvků odezvy	25
2.5.5.1 Optická odezva	25
2.5.5.2 Zapojení displeje	27
2.5.5.3 Zapojení tlačítek	28
2.5.5.4 Měřič napětí akumulátorů	28
2.5.5.5 Senzor teploty MCU	28
2.5.5.6 Programovací přepínač	28
2.5.6 Obvod akumulátorů, nabíjení a BMS	29
2.6 Výběr důležitých komponent	30
2.6.1 Výběr Geigerovy-Müllerovy trubice	30
2.6.2 Výběr MCU	31
2.6.3 Výběr akumulátorů	31

2.6.4	Výběr displeje	32
2.7	Fyzické provedení přístroje	32
2.7.1	Desky plošných spojů	32
2.7.1.1	Deska akumulátorů	33
2.7.1.2	Základní deska přístroje	34
2.7.1.3	Adaptér trubice	35
2.7.1.4	Vrchní deska	35
2.7.2	Krabička	36
2.8	Programování MCU	37
2.9	Cenové zhodnocení	40
3	Kalibrace a testování	41
3.1	Měření elektrických vlastností	41
3.1.1	Charakteristika impulzů	41
3.1.2	Stabilita napětí na detektoru	41
3.1.3	Spotřeba přístroje	42
3.2	Princip kalibrace	42
3.3	Měření přirozeného pozadí	42
3.4	Metody výpočtu	43
3.4.1	Zákon radioaktivní přeměny	43
3.4.2	Nejistoty měření	43
3.5	Kalibrace na bodový zdroj	45
3.5.1	Etalony	45
3.5.2	Měření etalonů	45
3.6	Kalibrace na plošnou aktivitu	46
3.6.1	Etalony	46
3.6.2	Měření etalonů	46
3.7	Citlivost a kalibrační koeficienty	47
3.8	Linearita odezvy	48
3.9	Korekce četnosti na mrtvou dobu	50
3.10	Rozsah intenzity záření	50
3.11	Závislost odezvy na poloze	51
3.12	Technické parametry	52
	Závěr	54
	Použitá literatura	55
	Seznam obrázků	60
	Seznam tabulek	61
	Příloha – seznam součástek	63
	Příloha – datasheet	65

Seznam zkratek

Zkratka	Slovní spojení	Český překlad
DPS	Deska plošných spojů	- - - - -
PCB	Printed Circuit Board	Deska plošných spojů
SMD	Surface Mount Device	Komponenta pro povrchovou montáž
ADC	Analog to Digital Converter	Analogově-digitální převodník
MCU	Micro Controller Unit	Mikrokontroler
GPIO	General Purpose Input Output	Univerzální vstupní/výstupní pin
LED	Light Emiting Diode	Elektroluminiscenční dioda
CPS	Counts Per Second	Počet impulzů za sekundu
TVS	Transient Voltage Supressor	Transil
SDA	Serial Data Line	Sériová datová linka
SCL	Serial Clock Line	Linka hodinového signálu
GND	Ground	Uzemnění/záporný pól elektrického zdroje
BMS	Battery Management System	Obvod ochrany baterií/akumulátorů

Úvod

V současné době se můžeme setkat s celou řadou způsobů využití radionuklidů a ionizujícího záření. Mezi konkrétní obory, kde dochází k manipulaci se zdroji ionizujícího záření, spadá například energetika (jaderné zdroje elektrické energie), zdravotnictví (radiodiagnostika, radioterapie, nukleární medicína, sterilizace materiálů pro zdravotnictví) či defektoskopie.

Při práci se zdroji ionizujícího záření je potřeba zamezit nadbytečnému ozáření přítomných osob. Proto je nutné řídit se principy radiační ochrany a monitorovat radiační situaci na pracovišti pomocí příslušných přístrojů. Pro konstrukci takového zařízení jsem se rozhodl i já v rámci SOČ. Přístroj využívá jako detektor tzv. Geigerovu-Müllerovu trubici – plynem plněnou nádobku se dvěma elektrodami, mezi kterými může v důsledku interakcí s ionizujícím zářením téct elektrický proud.

Elektronická zapojení pro provoz těchto detektorů jsou různá, já své řešení tohoto problému navrhl mimo jiné i například s prvky úpravy signálu, kterých se využívá mimo jiné například v případě moderních polovodičových a scintilačních detektorů. Některé profesionální přístroje na principu Geigerova-Müllerova čítače dokonce ani nevyužívají žádnou pokročilejší úpravu pulzního signálu produkovaného detekční trubicí [1], na což jsem se já naopak ve své práci chtěl zaměřit.

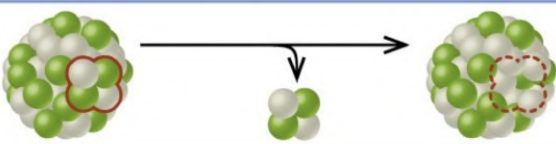
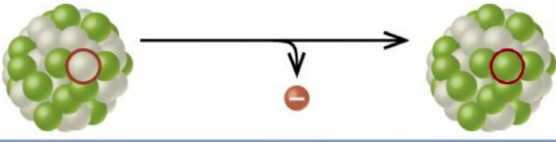
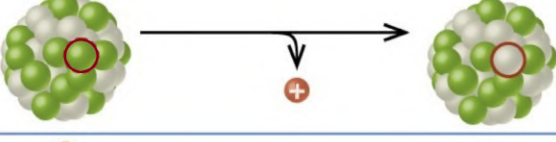
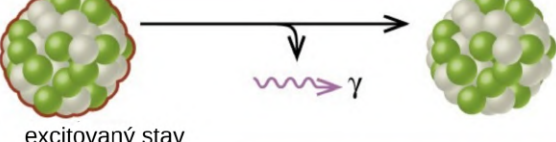
Při řešení návrhu celého přístroje jsem dbal i na celkovou velikost, hmotnost a výslednou cenu zařízení, přehlednost a srozumitelnost zobrazení hodnot veličin a uživatelského rozhraní, vestavěné vedlejší funkce (optická a akustická odezva) a koncipoval ho tedy jako měřidlo aktivity radionuklidového zdroje, plošné aktivity a obecně jako uživatelsky všestranný prvek včasného varování při práci se zdroji záření.

Mým cílem nebyla pouze konstrukce samotného přístroje, pozornost jsem věnoval i jeho kalibraci na vybrané fyzikální veličiny. Měřidlo bylo kalibrováno pomocí etalonů vyráběných Českým metrologickým institutem.

1. Teoretická část

1.1 Radioaktivita a ionizující záření

Pojem *radioaktivita* označuje samovolnou přeměnu nestabilních jader atomů v jádra stabilnější. Mezi její příčiny patří například nepoměr počtu protonů a neutronů v jádře atomu nebo přílišná velikost jádra (těžká jádra, vysoký počet nukleonů). V důsledku přeměny jader dochází k emisím tzv. *ionizujícího záření*, tedy záření schopného vyřázet elektrony z obalů atomů a vytvářet z nich tak ionty.

Typ přeměny	Rovnice	Vizualizace	Protonové/nukleonové číslo
Přeměna alfa	${}^A_ZX \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{A-4}_{Z-2}Y$		A: pokles o 4 Z: pokles o 2
Přeměna beta minus	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^A_{Z+1}Y$		A: nezměněno Z: vzestup o 1
Přeměna beta plus	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_1e + {}^A_{Z-1}Y$		A: nezměněno Z: pokles o 1
Přeměna gama	${}^A_ZX \rightarrow {}^0_0\gamma + {}^A_ZY$		A: nezměněno Z: nezměněno

Obrázek 1.1: Základní typy radioaktivních přeměn; [2], upraveno.

Mezi základní typy ionizujícího záření patří záření alfa, beta a gama (viz obrázek 1.1). Záření alfa jsou těžké hmotné částice (jádra ${}^4_2\text{He}$) emitované v důsledku přeměny alfa, která je typická pro velmi těžká jádra (např. ${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$). Přeměna beta a s ní související emise záření beta (tedy vysokoenergetických elektronů či antielektronů) se vyskytuje i u lehčích jader převážně v důsledku nepoměru počtu protonů a neutronů. Při těchto jaderných přeměnách mohou produkovaná jádra vznikat jako tzv. *jaderné izomery*, tedy jádra ve vyšším energetickém stavu. Rozdíl energie, o který jádro poklesne do základního energetického stavu, je vyzářen v podobě záření gama (vysokoenergetický foton). [3]

1.2 Veličiny a jednotky jaderné fyziky

Jednou ze základních veličin v této oblasti je aktivita. Vyjadřuje počet radioaktivních přeměn daného radionuklidu za jednu sekundu. Její jednotkou je *becquerel* (Bq). V praxi se často využívá jeho násobků (kBq, MBq, GBq atd...). Vývoj aktivity radionuklidu v čase závisí na tzv. *poločasu přeměny*, který je různý pro každý radionuklid. Jedná se exponenciální pokles, popisuje jej zákon radioaktivní přeměny.

Veličinou odvozenou od aktivity je mimo jiné plošná aktivita, tedy aktivita radionuklidů vztažená k jednotce plochy (Bq/cm^2). Slouží k popisu aktivity radionuklidů rozprostřených po určitém povrchu. Využívá se při monitorování povrchové kontaminace. [4]

Hodnocením biologických a zdravotních účinků ionizujícího záření se zabývá *dozimetrie*, která pro jejich popis využívá dávkové veličiny. Základní dozimetrickou veličinou je absorbovaná dávka, který vyjadřuje energii, kterou záření předalo hmotě. Její jednotkou je *gray* (Gy), přičemž $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$.

1.3 Využití jaderných reakcí

Jedním z příkladů využití jaderných reakcí jsou jaderná energetická zařízení. V České republice se jaderné zdroje podílí na výrobě elektřiny velmi významnou měrou. Jejich výroba pokrývá okolo třetiny celkové spotřeby elektřiny v zemi. Při štěpení těžkých jader ^{235}U vzniká řada lehčích, vysoce radioaktivních nuklidů.

Radionuklidy a ionizující záření nalézají uplatnění dále například ve zdravotnictví při léčbě nádorových onemocnění, kde jsou pomocí něj realizovány diagnostické i terapeutické úkony.

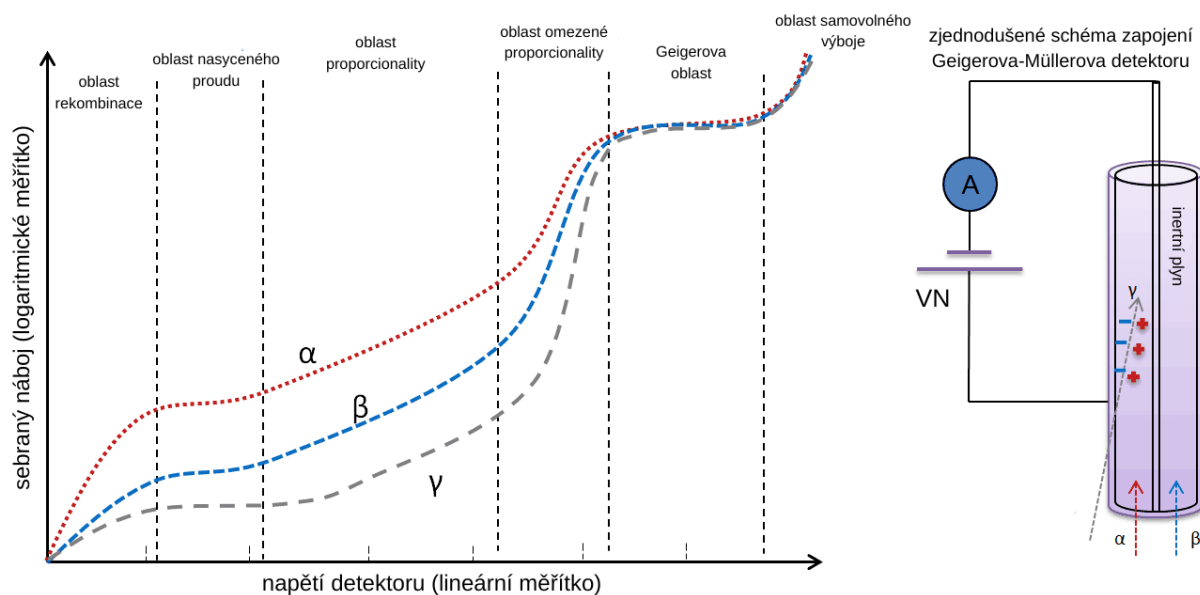
Ionizující záření se různými způsoby využívá dále i například v průmyslu. V těžkém průmyslu může sloužit jako nástroj pro screening a nedestruktivní zjišťování defektů v materiálech, v průmyslu potravinářském je ozařováním velkými dávkami záření dosahováno dezinfekce potravin (v ČR se v současnosti již neprovádí).

1.4 Geigerův-Müllerův detektor

Geigerův-Müllerův detektor je jedním z nejrozšířenějších detektorů ionizujícího záření. Využívá principů elektrického výboje v plynu. Nejčastěji bývá podlouhlého válcového tvaru (trubice). Disponuje dvěma vývody, které jsou napojeny na vrstvou inertního plynu oddělené elektrody. Interakce ionizujícího záření s citlivým objemem detektoru vyvolá krátké vodivé spojení těchto dvou elektrod.

V první fázi procesu částice interaguje s jedním z atomů plynu a v důsledku srážky mu předává svoji energii (nebo její část). Předaná energie způsobuje vyražení elektronu z obalu atomu (primární ionizace). Volný elektron je urychlován silným elektrickým polem, přičemž značná velikost napětí způsobuje, že elektron má během svého pohybu k elektrodě dostatečnou energii pro ionizaci dalších atomů (sekundární ionizace). Sekundární elektrony se poté chovají stejným způsobem a ionizují další atomy, čímž v plynu vzniká lavina ionizací. Výsledné zesílení (tedy počet sekundárních elektronů vyvolaných jedním primárním elektronem) se poté může pohybovat v rozpětí 10^6 až 10^9 . [5]

Obrázek číslo 1.2 ukazuje křivku závislosti sebraného náboje na velikosti pracovního napětí u plynových detektorů (tedy jedná se o voltampérovou charakteristiku). Na obrázku můžeme vidět několik



Obrázek 1.2: Voltampérová charakteristika plynových detektorů ionizujícího záření; [6], upraveno.

různých oblastí, přičemž Geigerovy-Müllerovy detektory pracují v tzv. *Geigerově oblasti*. Charakterizuje ji pouze velmi mírné stoupání závislosti velikosti sebraného náboje na napětí detektoru a jeho nezávislost na druhu a energii interagující částice.

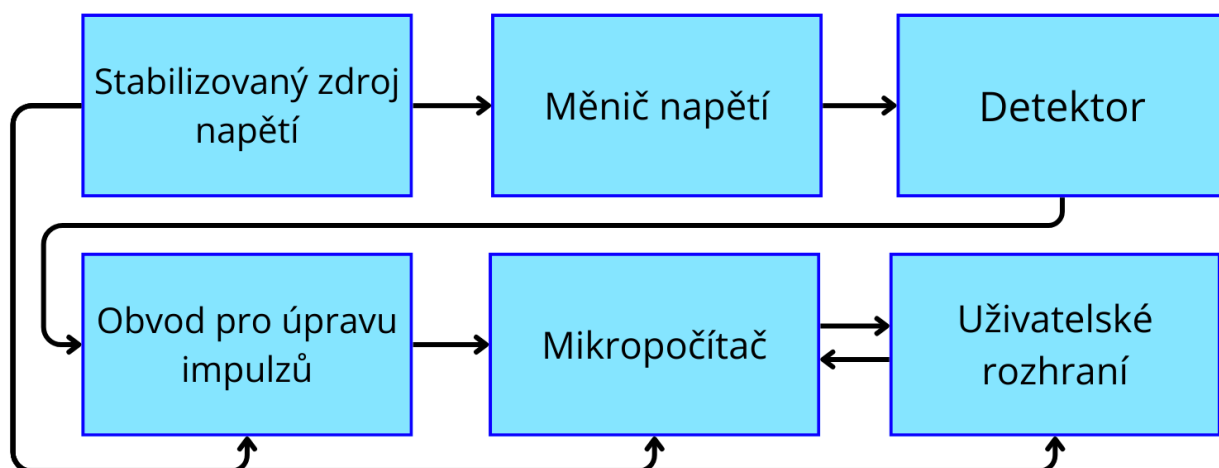
1.5 Obecné principy detektorů ionizujícího záření

Přístroje detekující ionizující záření jsou založeny na určitých fyzikálních principech. V první řadě je potřeba **stabilizovaný zdroj napětí**. Ten je zcela zásadní pro zachování stability celého přístroje a zajištění správnosti měřených hodnot.

Dále je nutné zajistit napájení detektoru. Pracovní napětí detektoru je závislé na jeho konkrétním typu, v případě Geigerova-Müllerova detektoru se pohybuje zpravidla mezi 350–500 V v případě trubice s menším průměrem a 700–1500 V u trubic s větším průměrem. Polovodičové a scintilační detektory mohou vyžadovat až několik kV, naopak ionizační komory se často provozují na nízkých napětích okolo 30–50 V (některé typy vyžadují i vyšší napětí, až do řádu stovek V). Podle pracovního napětí detektoru se poté tedy volí vhodný **měníč napětí**.

Elektrické impulzy, které detektor produkuje v důsledku interakcí s dopadajícím zářením, bývají nevhodné pro další zpracování. Proto je zapotřebí **obvodu pro úpravu impulzů**. U polovodičových a scintilačních detektorů se impuls upravuje do tvaru podobného Gaussově funkci [7]. Vzhledem k tomu, že velikost elektrického náboje sebraného na Geigerově-Müllerově trubici není závislá na energii interagujícího záření, nejvhodnější forma výstupního impulsu pro statistické zpracování je logický pulz.

O digitální zpracování četnosti impulzů, přepočítání na jednotky radiační fyziky, řízení zobrazení a uživatelského rozhraní se stará **mikropočítač**. U některých laboratorních detekčních systémů může jeho roli zastávat výkonnější stolní PC.



Obrázek 1.3: Obecné schéma zapojení detekčního přístroje.

1.6 Vlastnosti detektorů ionizujícího záření

1.6.1 Detekční účinnost

První důležitou vlastností detektoru záření je jeho detekční účinnost. Vyjadřuje se zpravidla v procentech a udává, kolik částic detektor registruje ku celkovému počtu částic, které jím prošly (tedy těch zaregistrovaných + těch co objemem detektoru prolétly bez interakce). Je též možné ji vztáhnout k celkovému počtu zdrojem emitovaných částic. Detekční účinnost závisí především na materiálu detektoru (čistota, skupenství, atomové číslo).

1.6.2 Energetický rozsah

Jednou z hlavních charakteristik detektoru je energetická závislost jeho odezvy a energetický rozsah. Počet vyvolaných impulzů je pro záření dvou různých energií o stejné intenzitě odlišný. Typický detektor má určitou nejnižší a nejvyšší energii, kterou je schopen detekovat.

1.6.3 Mrtvá doba

Další podstatnou vlastností detektoru je jeho mrtvá doba. Mrtvá doba přichází po každém impulzu a během jejího trvání není přístroj schopen zaznamenat žádný další impulz [5]. Je tedy žádoucí, aby byla co nejnižší. Původ může mít v samotném detektoru (respektive v jeho fyzikálních vlastnostech) a též v elektronickém řetězci pro úpravu signálu.

2. Konstrukční část

2.1 Charakteristika přístroje

Přístroj je možné provozovat v několika různých režimech. Přepínání mezi nimi umožňuje rychlá nabídka v horní části obrazovky. Na displeji se vždy zobrazuje jedna z průběžně odečítaných veličin, přičemž výběr veličiny zajišťuje jedna z ikon v horní části displeje (ikona V). Přístroj je schopen měřit intenzitu záření v CPS, aktivitu bodového zdroje v kBq a plošnou aktivitou v Bq/cm². V režimu aktivity bodového zdroje je možné měřit ^{137}Cs , ^{60}Co a ^{241}Am , v módu měření plošné aktivity je přístroj kalibrován na ^{90}Sr . Pokud je přístroj provozován v krabici s detekčním okénkem (viz obrázek 2.6), je možné měřit i plošnou aktivitu ^{137}Cs a ^{36}Cl (případně také ^{90}Sr s vyšší přesností).



(a) Měřidlo v pouzdře.



(b) Měřidlo bez pouzdra.

Obrázek 2.1: Fotografie měřidla.

Pro možnost dynamického sledování změn v intenzitě radiačního pole uživatelem jsou vestavěny funkce optické a akustické odezvy. První možností je okamžitá odezva, tedy krátké rozsvícení modré LED doprovázené pípnutím piezoelektrického reproduktoru po každém zaznamenaném impulzu. Druhá možnost spočívá v aktivaci alarmu v podobě blikání červené LED doprovázeného

zvukovou výstrahou při překročení nastaveného prahu intenzity záření. Ikona *L* slouží k ovládání impulzem spouštěné LED, ikona *Z* pro impulzní zvukovou odezvu. Možnost *A* zapíná/vypíná alarm. Pomocí ikony *V* uživatel volí, jakou veličinu chce měřit. Pro výběr měřeného radionuklidu slouží ikona *R*. Tabulka 2.1 rozepisuje zkratky všech ikon v obou jazycích rozhraní (český nebo anglický jazyk).

Vybráním ikony *nastavení* se uživatel dostává na zvláštní obrazovku, kde se nachází možnost změny jazyka a další dvě kolonky – *předvolby* a *kalibrace*. V první z nich uživatel nastavuje práh alarmu, volí režim měření (pětisekundové intervaly/klouzavý průměr), zapíná/vypíná odečet radiačního pozadí či opravu naměřených četností na mrtvou dobu (viz sekce 3.9). Pomocí druhé může uživatel nastavit kalibrační koeficienty pro čtyři další radionuklidy (dva aktivita bodového zdroje, dva plošná aktivita).

Tabulka 2.1: Přehled zkratek možností rychlé nabídky.

Zkratka (ČJ)	Zkrácené slovo (ČJ)	Zkratka (AJ)	Zkrácené slovo (AJ)	Stavy
L	LED	L	LED	1/0
Z	Zvuk	S	Sound	1/0
A	Alarm	A	Alarm	1/0
V	Veličina	Q	Quantity	výběr
R	Radionuklid	R	Radionuclide	výběr



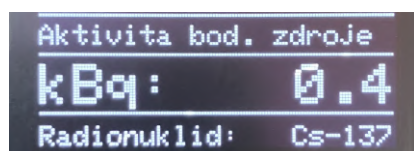
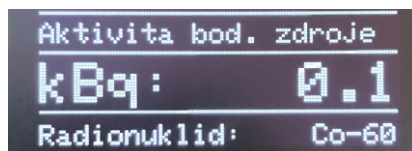
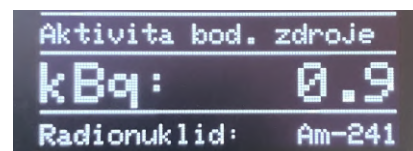
(a) Přechod do nastavení.



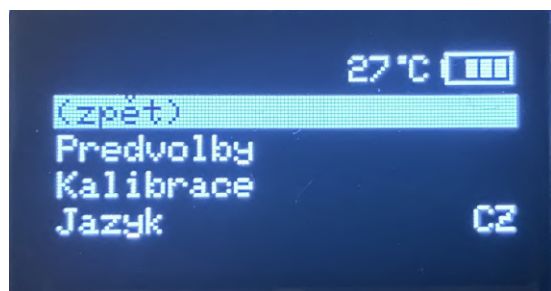
(b) Výběr radionuklidu.

Obrázek 2.2: Ukázka z uživatelského rozhraní.

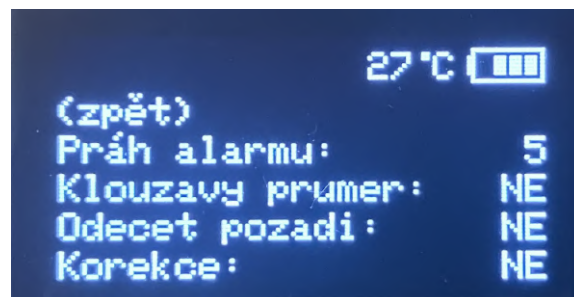
Impulzní odezva může být velmi užitečná především při kontrole radionuklidové kontaminace povrchu, protože umožňuje uživateli okamžitě citlivě zaznamenat jakékoliv anomálie v intenzitě záření a snáze tak odhalit a zmapovat kontaminované oblasti na pracovišti. Alarm může být výhodným prvkem v situacích, kdy je potřeba upozornit na překročení určité prahové hodnoty intenzity záření v daném místě, tzn. například přímo při manipulaci se zdroji ionizujícího záření. Měřidlo dále varuje uživatele o překročení intenzity záření mimo hranice linearitu odezvy (blikající výstražná ikona vedle ikony radionuklidu; viz sekce 3.8) a mimo měřicí rozsah (výrazné varování přes celou obrazovku doprovázené zvukovou výstrahou). Další varování je zobrazeno v případě potenciální poruchy přístroje, tedy pokud v intervalu jedné minuty nejsou zaznamenány žádné impulzy.

(a) ^{137}Cs .(b) ^{60}Co .(c) ^{241}Am .

Obrázek 2.3: Výběr radionuklidu.



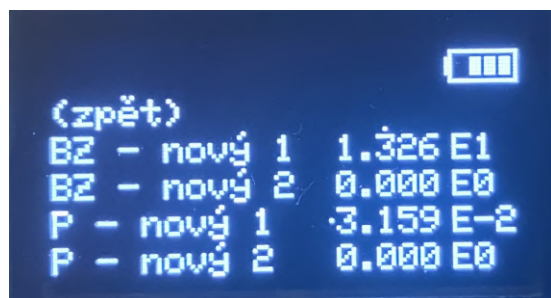
(a) Položky nastavení.



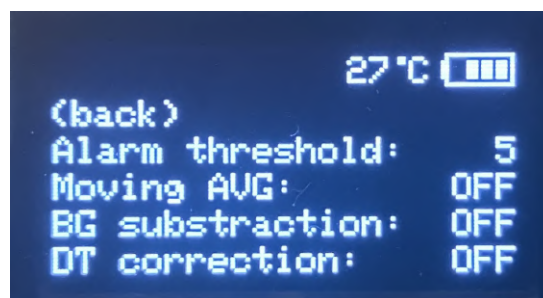
(b) Předvolby.

Obrázek 2.4: Nastavení.

Přístroj je plně přenosný, jeho napájení zajišťují vestavěné akumulátory s možností dobíjení přímo v přístroji bez nutnosti jejich vyjmutí. O stavu jejich nabití informuje ukazatel na obrazovce. Plně nabitý přístroj je schopen fungovat minimálně 15 hodin, přičemž plné nabití zabere 1–2,5 hodin v závislosti na typu použité nabíječky. Rozměry přístroje jsou 115 mm × 70 mm × 45 mm a hmotnost cca 300 g.

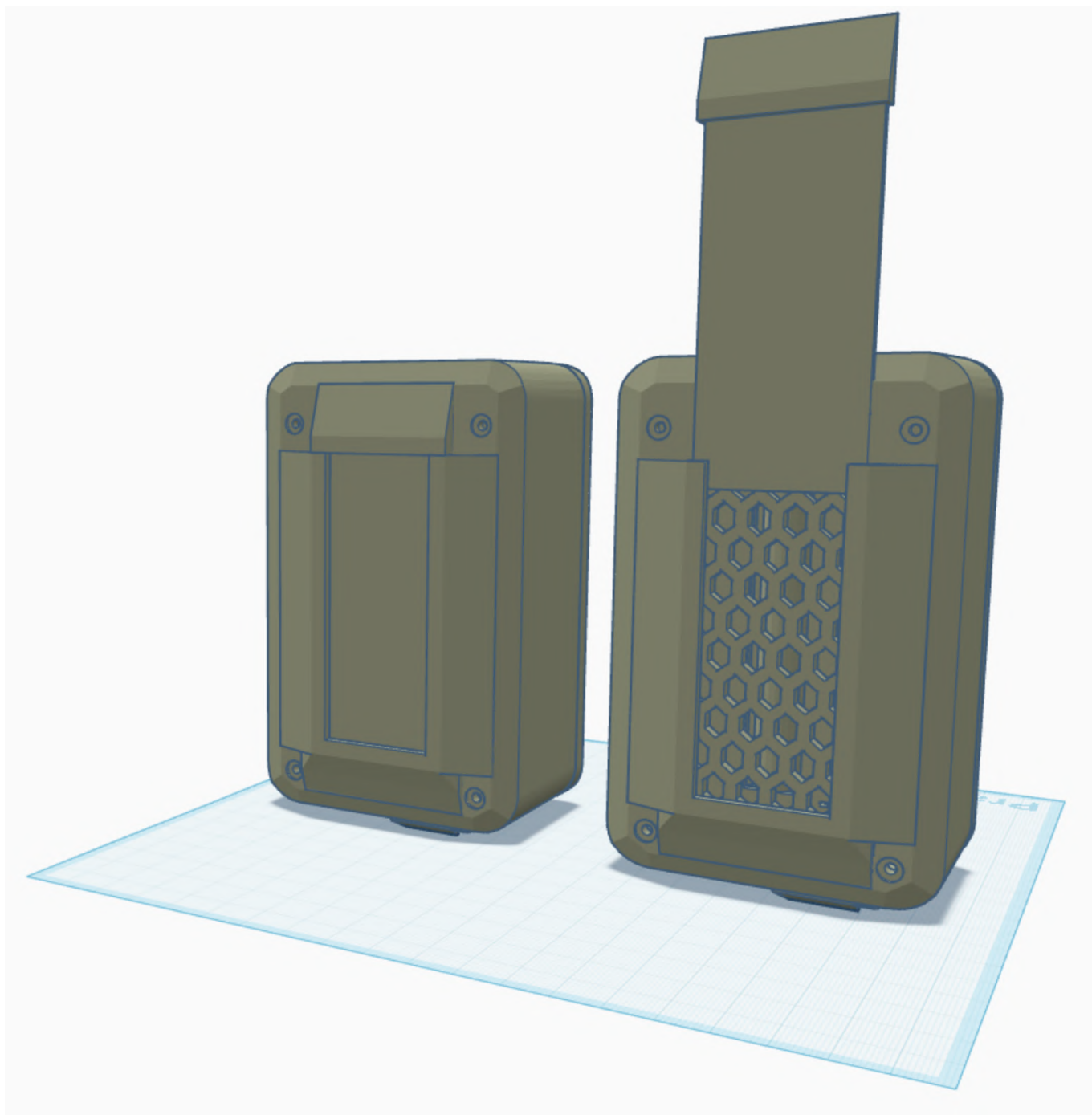


(a) Doplnění kalibračních koeficientů.



(b) Uživatelské rozhraní v angličtině.

Obrázek 2.5: Nastavení.

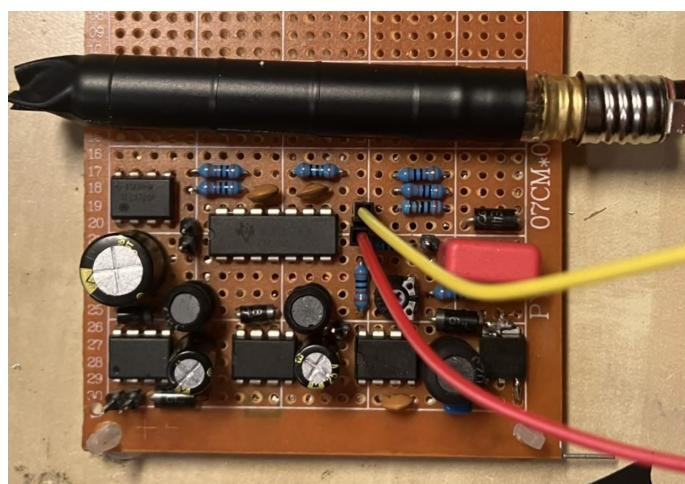


Obrázek 2.6: 3D model krabičky s detekčním okénkem.

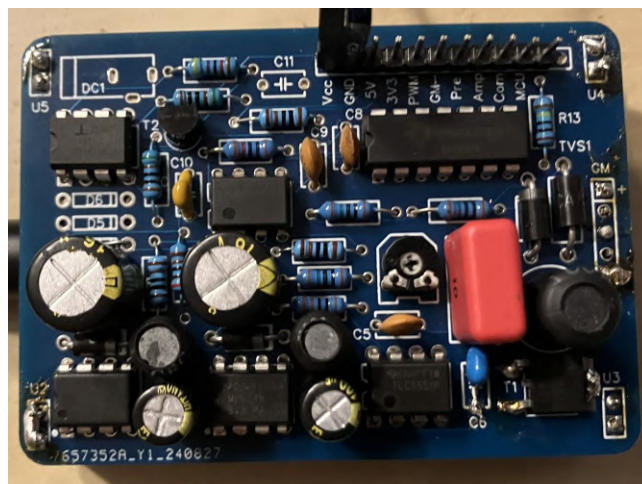
2.2 Postup vývoje a tvorba práce

Poté co se zrodila myšlenka zabývat se konstrukcí měřidla ionizujícího záření bylo potřeba začít přemýšlet nejprve nad napájením samotného detektoru. Pro prvotní vývoj měniče napětí a později i dalších elektronických prvků jsem využil možnosti testování na nepájivém poli. Nepájivé pole umožňovalo snadné a rychlé vyzkoušení různých zapojení detekční elektroniky či výměnu součástek s různými hodnotami (viz obrázek 2.8 (b) – testování).

Po dokončení každého z funkčních celků jsem zapojení začal přesouvat na univerzální DPS (desky plošných spojů). Vznikly celkem dvě verze obvodu na univerzálních DPS, přičemž druhá verze již byla na téměř uspokojivé úrovni (viz obrázek 2.7 (a)), tudíž jsem si nechal po menších úpravách průmyslově vyrobit DPS podle schématu obvodu (viz obrázek 2.7 (b)). Tuto na míru tištěnou DPS jsem si osadil a využíval jí při designu řídicího obvodu s MCU (viz obrázek 2.8 (b)). Další fotografie z vývoje zařízení se nachází v příloze práce.



(a) Detekční elektronika na univerzální DPS.



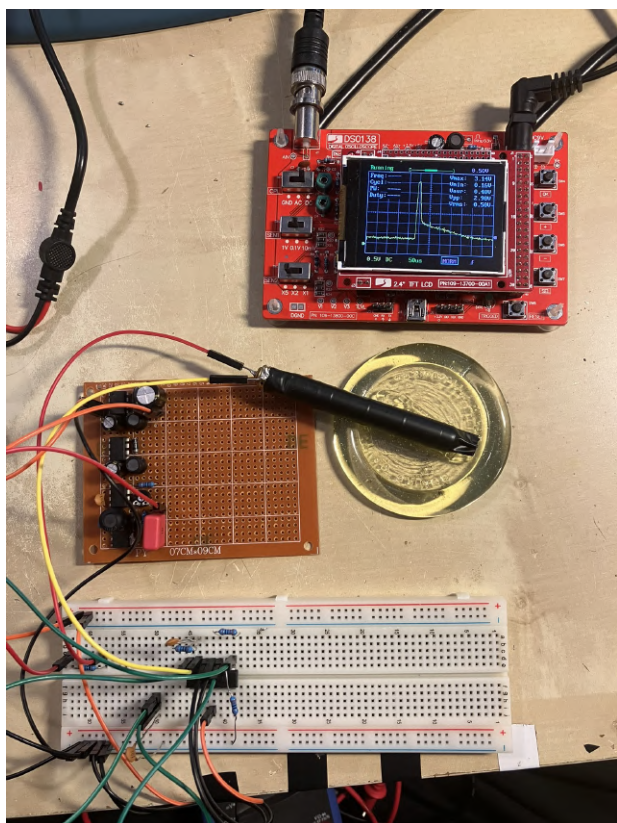
(b) Detekční elektronika na tištěné DPS.

Obrázek 2.7: Vývoj elektroniky.

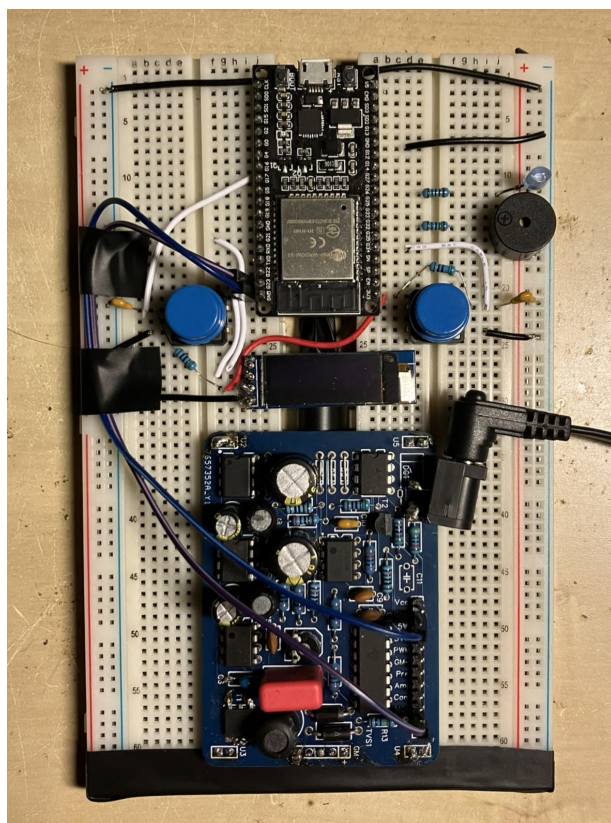
Po dokončení celého zapojení jsem začal s návrhem DPS pro finální verzi výrobku, kde již bylo nutné zaměřit se i na prostorovou koncepci přístroje, jeho tvar a ergonomii. V této fázi se mi jako nejvíce efektivní ukázala možnost rozložení přístroje na tři nad sebou situované DPS. Část obvodu jsem si v zájmu dosažení minimálních rozměrů nechal průmyslově osadit součástkami SMD (viz obrázek 2.9). SMD jsem nikdy předtím nepájel a nechtěl jsem tedy, aby se to projevilo na kvalitě provedení právě tohoto důležitého projektu pro SOČ. Zvolil jsem proto variantu precizního strojového osazení. Pro oživení přístroje bylo poté ještě potřeba některé další vývodové komponenty dopájet ručně. Byla zhotovena elektronika pro celkem pět detekčních přístrojů.

Na základě rozměrů finálních DPS jsem začal s návrhem 3D tištěného pouzdra. Pouzdro bylo nutné opatřit otvory pro displej, konektor nabíječky, tlačítka, vypínač a přenos světla z LED.

Poslední fáze výroby přístroje představovalo programování MCU a kalibrace. Kalibrace proběhly na pracovištích Katedry dozimetrie a aplikace ionizujícího záření FJFI ČVUT v Praze a Českého metrologického institutu v Praze. Měření proběhla s pomocí radionuklidových etalonů (navázaných na státní etalon) užívaných pro kalibraci profesionálních měřidel a s využitím příslušných statistických metod.

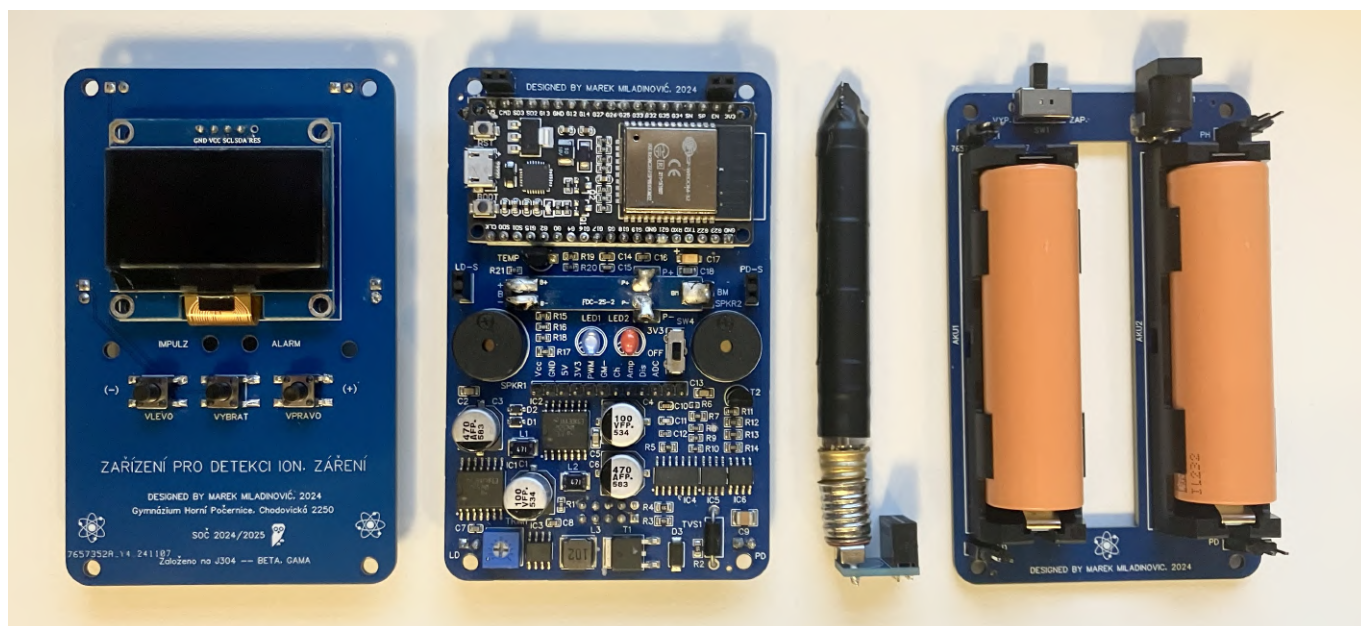


(a) Osciloskopické pozorování impulsů.



(b) Vývoj kódu MCU.

Obrázek 2.8: Vývoj elektroniky.



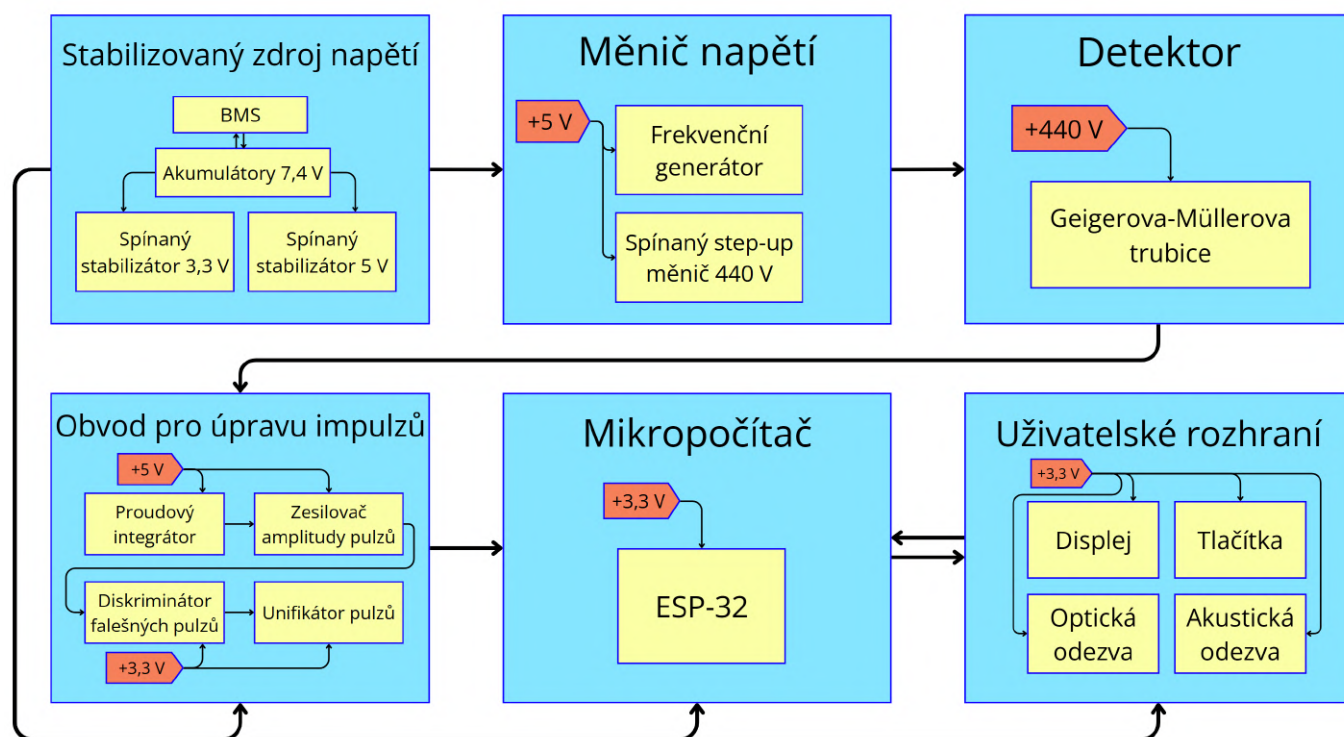
Obrázek 2.9: Finální verze – rozložený přístroj.

2.3 Celkový princip přístroje

Celý přístroj, respektive jeho elektronická část, je členěn do následujících funkčních celků:

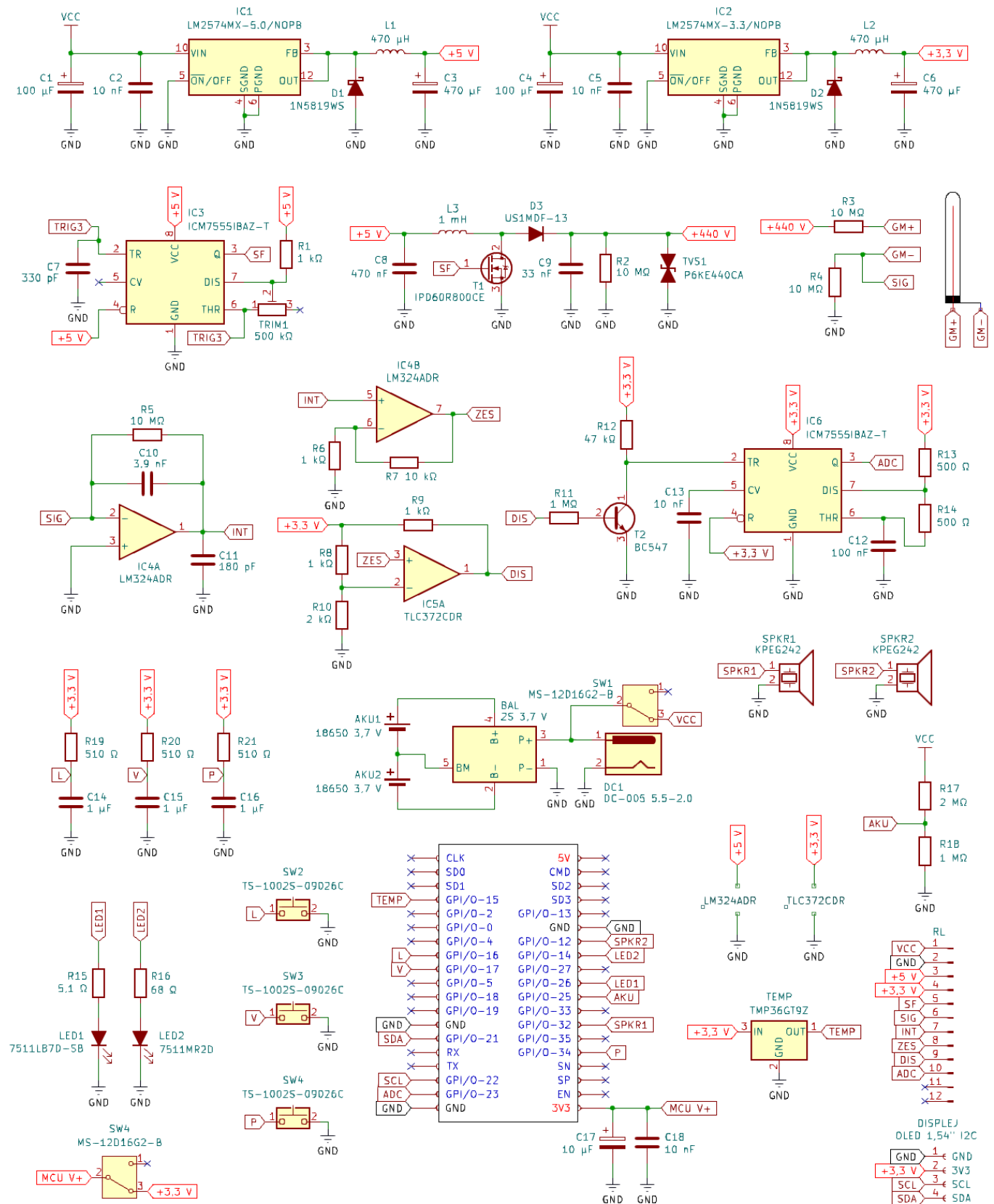
- **Obvod akumulátorů, nabíjení a BMS**
- **Stabilizátory napětí**
 - Spínaný stabilizátor napětí 3,3 V
 - Spínaný stabilizátor napětí 5 V
- **Měnič napětí 440 V**
 - Frekvenční generátor
 - Spínaný step-up měnič
- **Obvod Geigerovy-Müllerovy trubice**
- **Obvod pro úpravu impulzů**
 - Proudový integrátor
 - Zesilovač amplitudy pulzů
 - Diskriminátor falešných pulzů
 - Unifikátor pulzů
- **Řídicí obvod s MCU**
 - Prvky odezvy
 - Uživatelské rozhraní

Jednotlivé funkční celky jsou vzájemně propojeny a společně zajišťují chod celého zařízení. Jejich schematické zapojení ukazuje obrázek 2.10.



Obrázek 2.10: Blokové schéma celého přístroje.

2.4 Kompletní zapojení

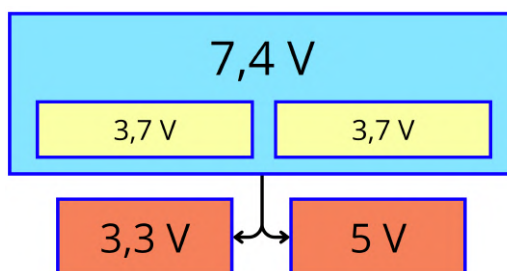


Obrázek 2.11: Schéma zapojení elektroniky přístroje.

2.5 Rozbor zapojení a funkčních celků

2.5.1 Napěťové úrovně

Přístroj pracuje se dvěma stabilizovanými napěťovými hladinami – 3,3 V a 5 V. Hladina 3,3 V slouží k napájení zvoleného mikrokontroleru (dále jen MCU; *Micro Controller Unit*), kterým je vývojová deska *Espressif Systems ESP-32*, a dále též k napájení části obvodu pro úpravu impulsů (3. a 4. fáze úpravy). Důvody využití právě ESP-32 oproti např. velmi populárnímu Arduino, které pracuje s logikou 5V, popisují v sekci 2.6.2. Hladina 5 V slouží k napájení měniče napětí pro detektor a části obvodu pro úpravu impulsů (1. a 2. fáze úpravy).

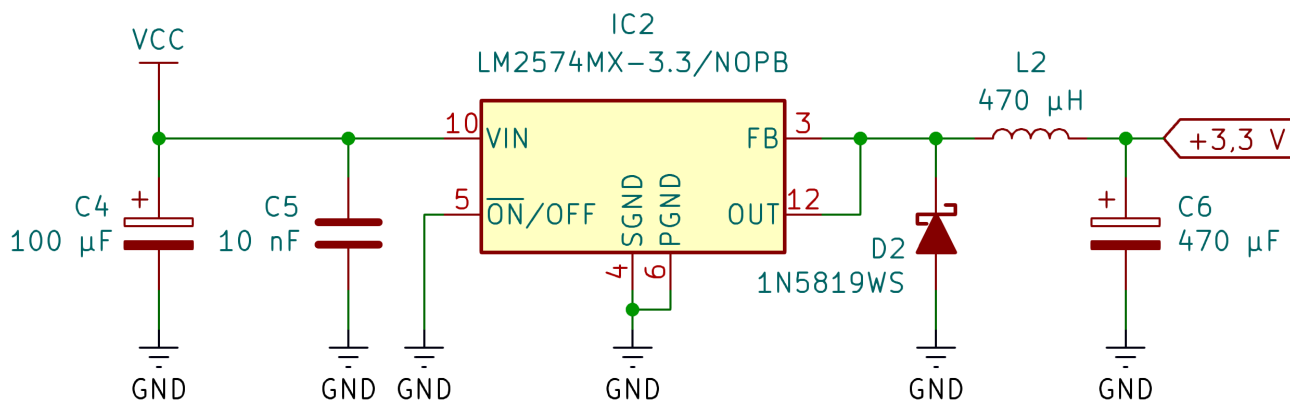


Obrázek 2.12: Schéma napěťových úrovní.

2.5.1.1 Spínaný stabilizátor napětí 3,3 V

Použití tohoto stabilizátoru by se mohlo zdát nadbytečné, protože deska ESP-32 má 3,3V stabilizátor integrovaný. Nicméně tento stabilizátor je lineární a vzhledem k tomu, že zařízení je přenosné a tedy napájené akumulátory, bylo z hlediska spotřeby ekonomičtější použít právě spínaný stabilizátor, který se vyznačuje vyšší účinností přeměny napětí.

K tomuto účelu jsem si vybral integrovaný obvod *Texas Instruments LM2574*, který na základě velikosti vstupního napětí spíná a rozepíná integrovaný tranzistor. Zapojení několika externích součástek poté dotváří step-down měnič (viz obrázek 2.13), hodnoty součástek jsem vybral podle specifik uvedených v datasheetu integrovaného obvodu [8].



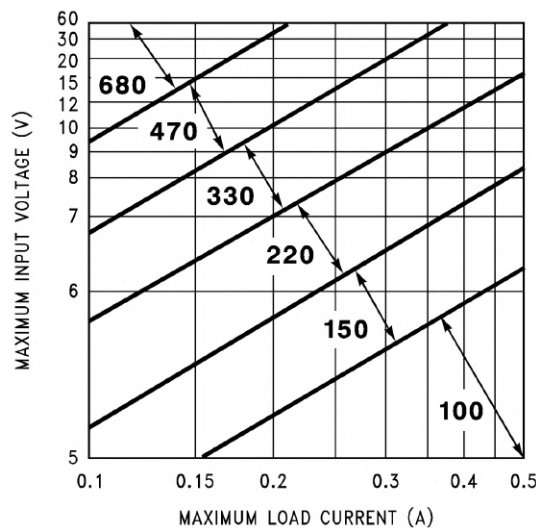
Obrázek 2.13: Schéma zapojení spínaného stabilizátoru napětí 3,3 V.

Výběr indukčnosti cívky probíhal podle grafu 2.14 (nominální napětí akumulátorů 7,4 V, odebíraný proud se pohybuje okolo 120 mA). Vstupní elektrolytický kondenzátor C4 jsem zvolil 100 µF a

přidal jsem k němu ještě další 10 nF keramický kondenzátor C5 (*lokální blokovací kondenzátory* pro potlačení šumu a nestability napájecího napětí). Minimální hodnota výstupního kondenzátoru C6 v μF je dána vztahem:

$$C_{\min} = 13000 \cdot \frac{V_{\max}}{V_{\text{out}} \cdot L_{\mu\text{F}}} = 13000 \cdot \frac{8,4}{3,3 \cdot 470} \simeq 70 \mu\text{F}. \quad (2.1)$$

$C_{\min}$	minimální kapacita výstupního kondenzátoru
$V_{\max}$	maximální vstupní napětí
V_{out}	výstupní napětí
$L_{\mu\text{F}}$	indukčnost cívky v μF



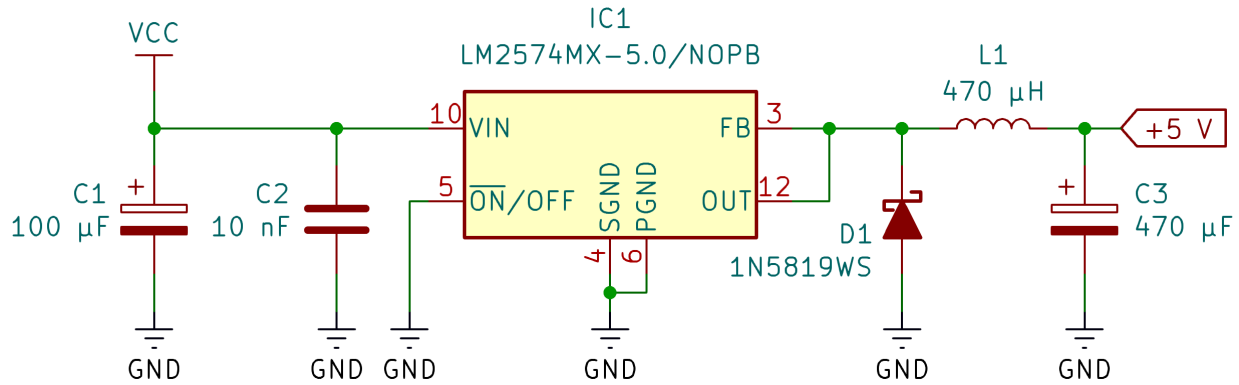
Obrázek 2.14: Doporučená indukčnost cívky 3,3V stabilizátoru v závislosti na maximálním vstupním napětí a maximálním odebíraném proudu.

Vypočtená hodnota ale představuje holé minimum, pro vyšší stabilitu je dobré aplikovat vyšší kapacitu. Kondenzátor jsem tedy raději několikrát naddimenzoval (470 μF), napěťová hladina 3,3 V později poskytuje důležitou napěťovou referenci při diskriminaci falešných impulzů (viz sekce 2.5.4.3).

2.5.1.2 Spínaný stabilizátor napětí 5 V

Obvod pro napájení Geigerovy-Müllerovy trubice napětím 440 V funguje na principu spínaného step-up měniče. Během vývoje jsem zjistil, že pravoúhlý signál 3,3 V nebyl schopný budit výkonové tranzistory, které jsem vyzkoušel, tudíž jsem nainstaloval i stabilizátor napětí 5 V, které již pro buzení stačilo. Tento stabilizátor tedy napájí samotný step-up obvod, jeho frekvenční generátor a dva operační zesilovače sloužící k provotní registraci a úpravě pulzního signálu z detektoru.

Zapojení je velmi podobné jako předchozí stabilizátor (viz obrázek 2.15), s tím že místo verze 3,3V integrovaného obvodu LM2574 je zde použita verze s výstupním napětím 5 V. Výstupní kondenzátor je opět několikrát naddimenzovaný kvůli stabilitě výstupního napětí. Jakákoliv nestabilita by se později mohla projevit na napájecím napětí trubice, což by mohlo vést ke změnám detekční účinnosti (byť poměrně mírným) a ovlivnění měření.



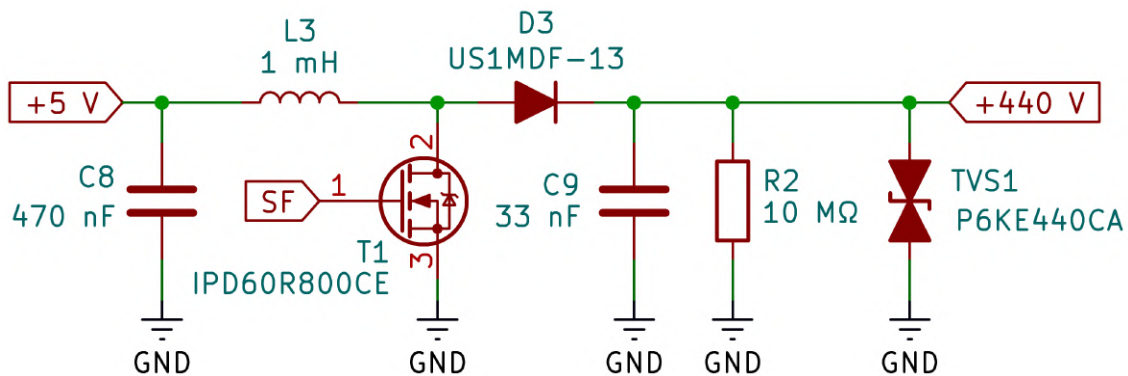
Obrázek 2.15: Schéma zapojení spínaného stabilizátoru napětí 5 V.

2.5.2 Měnič napětí 440 V

2.5.2.1 Spínaný step-up měnič

Jako zdroj vysokého napětí¹ pro Geigerovu-Müllerovu trubici jsem zvolil spínaný step-up měnič s cívkou. Nejprve jsem uvažoval o konstrukci střídače a jeho zapojení s transformátorem, případně násobičem napětí, což se ale později oproti tomuto řešení ukázalo velmi prostorově neekonomické.

V první fázi procesu je výkonový tranzistor T1 (buzený frekvenčním generátorem, viz sekce 2.5.2.2) zavřený, cívkou L3 prochází proud, vytváří magnetické pole a cívka tak uchovává energii. Po otevření tranzistoru T1 se v důsledku vytvoření nízkaimpedanční cesty k zápornému pólu zdroje mění polarita cívky. Vinutí se snaží zabránit změnám magnetického pole a vytváří tzv. *protinapětí* ve formě krátkého napěťového impulzu o amplitudě v řádu stovek V (*přechodový jev*). Těmito napěťovými špičkami dochází k pulznímu nabíjení vysokonapěťového kondenzátoru C9, přičemž napětí na něm se ustálí v řádu zlomků sekundy po zapnutí měniče. Dioda D3 brání zpětnému přetoku proudu z kondenzátoru k zápornému pólu zdroje v momentě, kdy je tranzistor T1 otevřený [10]. Rezistor R2 slouží pro vybití vysokonapěťového kondenzátoru po vypnutí obvodu.



Obrázek 2.16: Schéma zapojení step-up měniče napětí 440 V.

¹Pojmem „vysoké napětí“ se v české legislativě označuje napětí od 1000 V do 52 kV [9], v této práci pojem odkazuje na napájecí napětí trubice (440 V). To sice do vymezeného rozsahu nespadá, nicméně v kontextu přenosných elektronických zařízení a detektorů ionizujícího záření je toto označení dle mého názoru adekvátní.

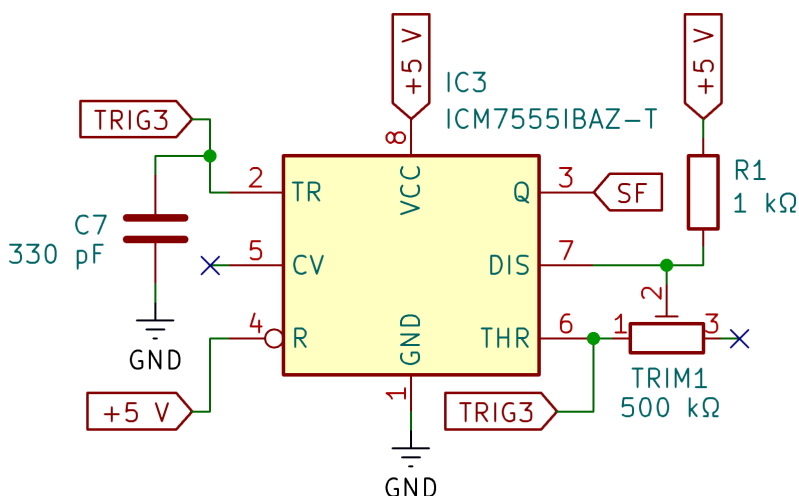
Bipolární transil TVS1 (*Transient Voltage Supressor*) slouží ke stabilizaci výstupního napětí² měniče na 440 V. Měnič je trvale provozován na mírně vyšší výkon (tzn. napětí naprázdno bez TVS by bylo o několik desítek voltů vyšší), protože při provozu bez TVS, kdy bylo požadované napětí nastaveno pomocí spínací frekvence, výstupní napětí určitým způsobem fluktovalo (cca ± 20 V). S takovým chováním jsem nebyl spokojen, protože by se mohlo projevit v nahodilých změnách detekční účinnosti a narušovat tak měření.

Vyzkoušel jsem několik různých indukčností, přičemž se ukázalo, že bez problému vyhovují hodnoty od cca 1 mH do 100 mH, ponechal jsem tedy 1 mH. Dále se experimentálně prokázalo, že kondenzátor C8 o kapacitě 470 nF pozitivně přispívá ke stabilitě výstupního napětí. Vybíjecí odpor R2 jsem zvolil vysokohmický (10 M Ω), aby příliš nesnižoval výstupní napětí měniče.

Jako spínací výkonový tranzistor T1 jsem nejprve používal MOSFET s kanálem typu N *IRF820*, později jsem však přešel na *IPDR800CE60R800CE*, který je přímo určený pro spínání zdroje a vyšší frekvence buzení, proto také dosahoval lepších výsledků než *IRF820*.

2.5.2.2 Frekvenční generátor

Pro buzení výkonového tranzistoru T1 je zapotřebí generátoru pravoúhlého signálu o 5V amplitudě³ (viz obrázek 2.18). Jako vhodný frekvenční generátor jsem zvolil časovač 555, konkrétně *Intersil ICM7555*, respektive jeho zapojení v astabilním módu (viz obrázek 2.17).



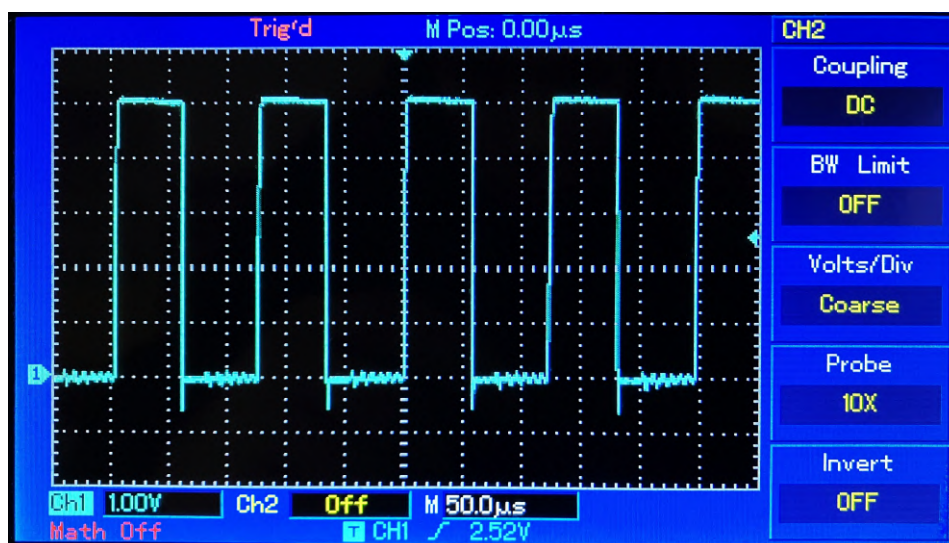
Obrázek 2.17: Zapojení integrovaného obvodu 555 jakožto astabilního oscilátoru.

Astabilní zapojení 555 se obvykle opatřuje dvěma resistory a jedním kondenzátorem. Poměrem obou odporů je udána střída. Pomocí kondenzátoru se nastavuje frekvence, přičemž ale i změna poměru odporů vyvolává změnu frekvence [11]. Vzhledem k tomu, že jak střída, tak i frekvence spínání MOSFETu T1 ovlivňuje výstupní napětí měniče, výstupní napětí by mohlo být ovlivněno tolerancemi součástek (především kondenzátoru C7). Proto jsem místo jednoho z rezistorů použil variabilní odporový prvek – trimr TRIM1. Ten mi tak v kombinaci s kondenzátorem C7 o kapacitě

²Tato součástka je původně určená pro potlačení krátkých skokových vysokonapětových pulzů (*transientů*), ale lze jí i použít pro stabilizaci stejným způsobem jako Zenerovu diodu. Tu jsem nepoužil, protože nebyla k dispozici verze s průrazným napětím více než 200 V a přišlo mi zbytečné integrovat jich několik do sériového zapojení, když byl k dispozici TVS s odpovídajícími parametry.

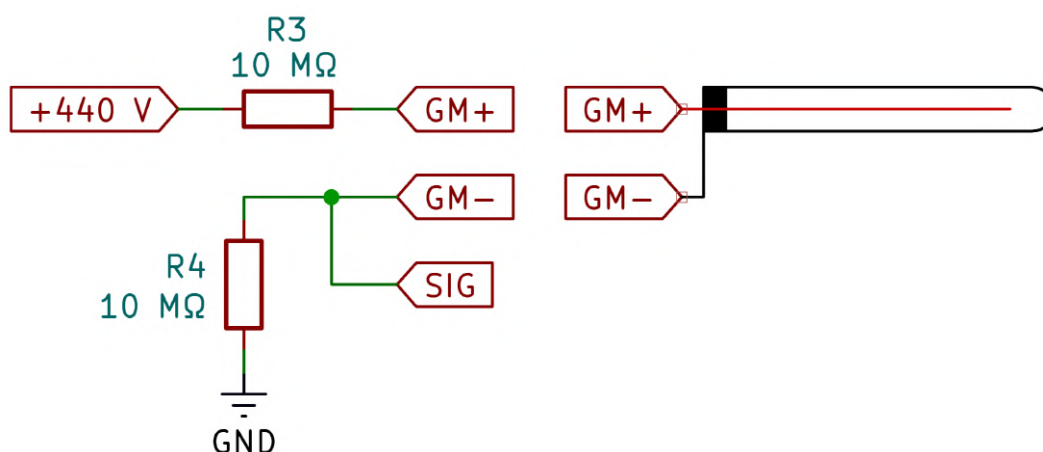
³Jak již bylo zmíněno, 3,3 V nebylo možno použít kvůli vyššímu prahovému napětí hradla.

330 pF umožnil získat poměrně široký rozsah možných frekvencí a stříd a poskytl tak možnost doladění výstupního napětí. Případně také též určitou variabilitu a možnost měnit napájecí napětí trubice v rozsahu shora omezeném propustným napětím TVS.



Obrázek 2.18: Spínací frekvence.

Testoval jsem různé verze časovače 555, včetně například jeho TTL verze *NE555*. CMOS variantu *ICM7555* jsem zvolil převážně kvůli tomu, že narozdíl od např. *NE555* se jedná o tzv. *rail-to-rail* integrovaný obvod, výstupní napětí tedy přechází v intervalu od nuly až po napětí velmi blízké napájecímu napětí. Úroveň **HIGH** na výstupu *NE555* při 5V napájení dosahovala pouze cca 4,5 V, což jsem vyhodnotil jako méně efektivní. CMOS obvody se též obecně vyznačují nižší spotřebou oproti TTL.



Obrázek 2.19: Zapojení Geigerovy-Müllerovy trubice na napětí 440 V.

2.5.3 Obvod Geigerovy-Müllerovy trubice

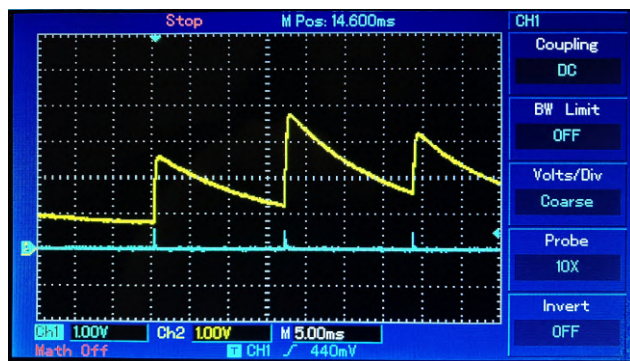
Výstup měniče vysokého napětí je přes ochranný 10MΩ rezistor R3 připojen na anodu Geigerovy-Müllerovy trubice (viz obrázek 2.19). Rezistor R3 je zde umístěn z důvodu snížení proudu procházejícího trubicí na minimum a z toho plynoucího navýšení (resp. nezkracování) životnosti trubice.

Interakce částice beta nebo gama v objemu detektoru způsobí uvolnění určitého množství elektrického náboje, což se projeví jako proudový impuls, který je dále zpracován proudovým integrátorem. Přes rezistor R4 je katoda GM trubice spojena se záporným pólem zdroje.

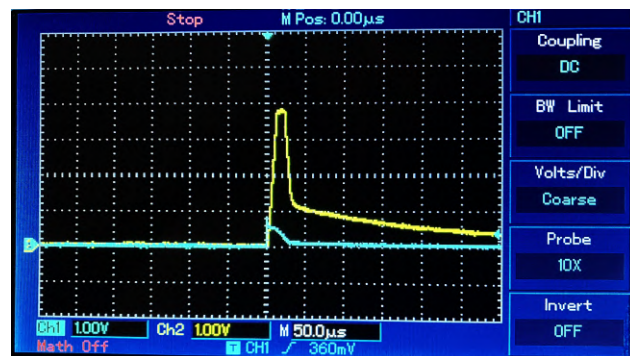
2.5.4 Obvod pro úpravu a zpracování impulsů

Účelem obvodu pro úpravu impulsů je na základě uvolňování náboje detektorem předávat mikrokontroleru informace o četnosti interakcí s ionizujícím zářením. Uvolněný náboj je nejprve převeden na napěťový impuls, jehož amplituda je následně vhodně zesílena. Platné impulsy s dostatečnou amplitudou (tedy impulsy jednoznačně vyvolané interakcí částice s detektorem) jsou poté upraveny do podoby digitálních logických pulzů a registrovány příslušným vstupem MCU. O úpravu signálu se starají následující prvky:

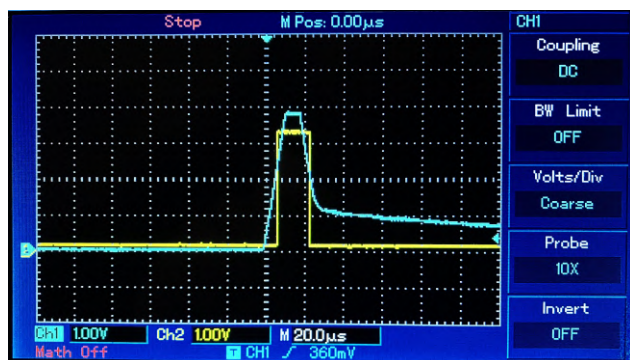
- proudový integrátor,
- zesilovač amplitudy pulzů,
- diskriminátor falešných pulzů,
- unifikátor pulzů.



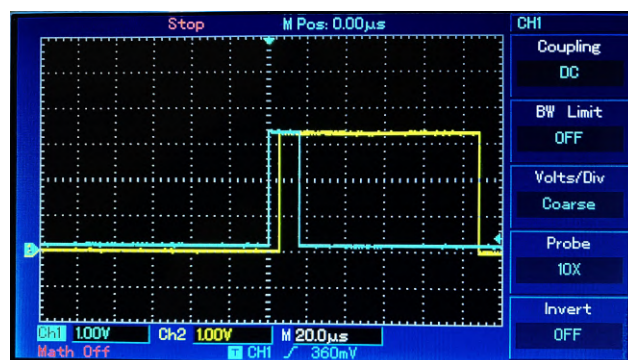
(a)



(b)



(c)



(d)

Obrázek 2.20: Porovnání fází úpravy impulsů.

2.5.4.1 Proudový integrátor

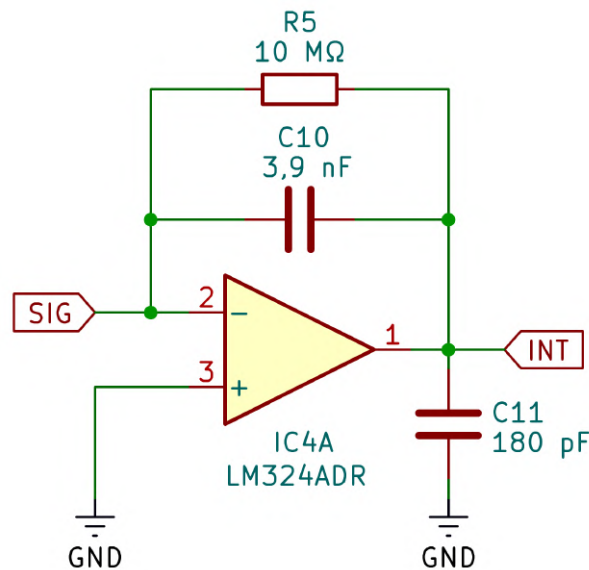
Pro prvotní elektronické zpracování detektorem uvolněného elektrického náboje používám tzv. *nábojově citlivý zesilovač*. Výstupní signál z Geigerovy-Müllerovy trubice je spíše proudového charakteru,

Tabulka 2.2: Přehled k obrázkům s porovnáním průběhu signálů jednotlivých fází úpravy.

Obrázek	Kanál 1 (modrý)	Kanál 2 (žlutý)
(a)	proudový integrátor	výstup GM trubice
(b)	proudový integrátor	zesilovač amplitudy
(c)	zesilovač amplitudy	diskriminátor
(d)	diskriminátor	unifikátor pulzů

kvůli čemuž se s ním poměrně špatně jakkoliv pracuje (viz obrázek 2.20 (a)). Existuje bezpochyby více možností⁴, jak se s tímto charakterem signálu vypořádat. Jednou z nich je náboj sbírající zapojení operačního zesilovače, jehož úkolem je integrovat vstupní proud (tedy zaznamenat celkový náboj) a převést ho na napěťový impuls. Jeho specifíkem je, že amplituda výstupního napětí je přímo úměrná velikosti sebraného náboje [12].

To z něj dělá velmi zásadní prvek v elektronické instrumentaci moderních polovodičových a scintilačních detektorů, u kterých je na základě velikosti sebraného náboje možnost určit i energii interagujícího záření [1]. Tyto přístroje pak hrají důležitou roli při komplexních analýzách radiačních polí, identifikaci neznámých radionuklidů apod. Ačkoliv Geigerova-Müllerova trubice nemá spektrometrické vlastnosti a její elektronický výstup tedy není nijak reálně závislý na energii interagující částice, přišlo mi vhodné tento způsob zachycení náboje využít.



Obrázek 2.21: Zapojení proudového integrátoru.

Vytvořený náboj nejprve nabíjí zpětnovazební kondenzátor C10 (viz obrázek 2.21), který propojuje invertující vstup a výstup operačního zesilovače IC4, zatímco neinvertující vstup je uzemněn. Na výstupu se téměř okamžitě v závislosti na rychlosti přeběhu operačního zesilovače objeví napětí $U = \frac{Q}{C}$ úměrné integrovanému proudu. Pro vybití kondenzátoru je paralelně na něj zapojen rezistor R5. Doba trvání výstupního impulsu je dána časovou konstantou toho RC obvodu $\tau = R \cdot C$. [13]

⁴Například buzení báze tranzistoru s kolektorem pod stabilizovaným napětím a následné zpracování signálu do digitální podoby nebo možnost spínání napětí přes optočlen.

Na výstupu zesilovače se objevovalo poměrně značné množství šumu. Ten mohl být způsoben například spínáním výkonového tranzistoru T1, ale také nepříliš vysokou kvalitou osciloskopického modulu, který jsem používal a dlouhými vodiči měřicích sond. To se později při měření kvalitním osciloskopem ukázalo jako pravděpodobnější varianta. Vzhledem k tomu, že výstupní signál proudového integrátoru má amplitudu okolo 600 mV, v další fázi úpravy je zesilován neinvertujícím zesilovačem. Bylo tedy potřeba se šumu zbavit, aby nedocházelo k jeho dalšímu zesílení. To je řešeno pomocí C11, hodnota 180 pF se v průběhu testování ukázala jako dostatečně účinná pro potlačení většiny šumu.

2.5.4.2 Zesilovač amplitudy pulzů

Amplituda pulzů 600 mV se mi pro další práci zdála ne příliš vhodnou, rozhodl jsem se jí tedy zesílit zařazením neinvertujícího zapojení operačního zesilovače. Pro tento typ zapojení (viz obrázek 2.22) platí, že zesílení je řízeno poměrem dvou zapojených odporů. Jeden z nich je zpětnovazební mezi invertujícím vstupem a výstupem, další je zapojen mezi invertujícím vstupem a zemí, zatímco signál se přivádí na neinvertující vstup [14]. Výstupní napětí jsem vypočítal podle vzorce

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \left(1 + \frac{R_7}{R_6}\right). \quad (2.2)$$

U_{in}	vstupní napětí
U_{out}	výstupní napětí po zesílení
R_6	odpor rezistoru R6
R_7	odpor rezistoru R7

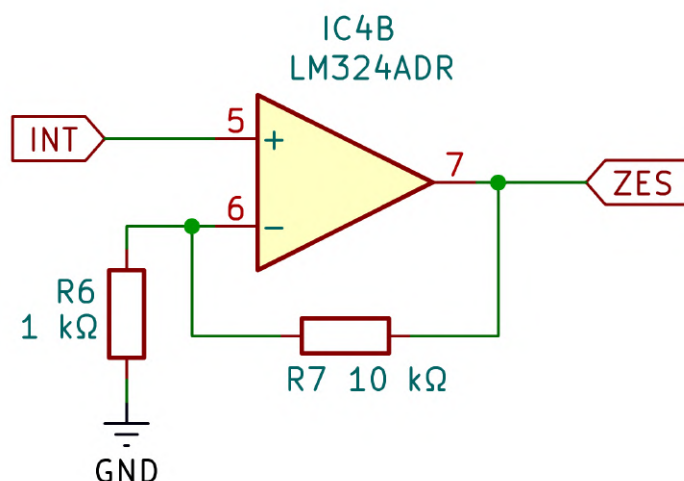
Odpor R6 jsem zvolil jako 1 k Ω a uspokojivou amplitudu výstupního napětí jako 3 V. Odpor R7 bylo potřeba dopočítat, po úpravě rovnice (2.2) dostaneme:

$$R_7 = R_6 \cdot \left(1 + \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}}\right) = 1000 \cdot \left(1 + \frac{3}{0,6}\right) = 6000 \, \Omega = 6 \, \text{k}\Omega. \quad (2.3)$$

Již zmíněný kondenzátor C11 pro kompenzaci šumu jsem přidával až později a následně jsem zjistil, že částečně potlačuje i výstupní pulzy z proudového integrátoru, tudíž jsem byl kvůli dosažení 3V amplitudy nucen zvýšit odpor R7 z vypočtených 6 k Ω na 10 k Ω pro větší zesílení. Nakonec se ukázalo, že amplituda pulzů je o cca 1 V vyšší, což jsem ale během konstrukce kvůli velmi omezeným možnostem svého malého osciloskopického modulu nezjistil (viz sekce 3.1.1). Nicméně v tomto případě není nezbytné exaktně dodržet původní plán.

Pro realizaci obou obvodů s operačními zesilovači jsem použil čtyřnásobný operační zesilovač *Texas Instruments LM324*. Byl prvním integrovaným obvodem, kterým jsem pro tyto dvě fáze úpravy signálu vyzkoušel využít. Ačkoliv by nakonec stačil dvoukanálový operační zesilovač⁵, ukázalo se, že LM324 pro danou aplikaci vyhovuje, proto jsem již neměl důvod ke změně. Vzhledem k tomu, že LM324 je velmi levný (pořídil jsem ho za 7 Kč), je možné, že využití dražšího a kvalitnějšího operačního zesilovače by mohlo přinést v některých ohledech lepší výsledky (šum, rychlost přeběhu).

⁵Původně jsem počítal s využitím i třetího kanálu k realizaci diskriminátoru pulzů. Zjistil jsem ale, že se k tomuto účelu operační zesilovač spíše nehodí a použil jsem proto raději komparátor.

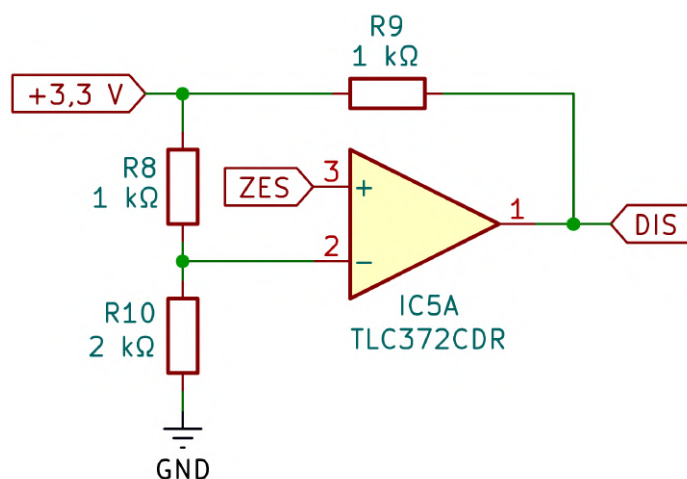


Obrázek 2.22: Zapojení neinvertujícího zesilovače pulzního signálu.

2.5.4.3 Diskriminátor falešných pulzů

Některé přichozí pulzy nemají úplně dokonalý tvar a občas se za nimi tvoří jakýsi zákmit (doběh pulzu je „roztřepen“). Tento zákmit by bez zapojení diskriminátoru mohl být elektronikou nesprávně interpretován jako další impuls. Případně při nějakém silnějším elektromagnetickém rušení (síťové transformátory) by mohlo dojít k nárůstu šumu, který by mohl v obvodu vyvolat falešné impulsy. To by mohlo mít za následek narušení správnosti měřených hodnot.

Na vyřazení impulsů s podezřele nízkou amplitudou se podílí komparátor *Texas Instruments TLC372* (viz obrázek 2.23). Pomocí napětového děliče složeného z rezistorů R8 a R10, který ze stabilizovaného napětí 3,3 V vytváří referenční úroveň 2,2 V (ta je připojena na invertující vstup), je nastaven práh komparátoru. Výstup je přes pull-up rezistor připojen na 3,3 V. Když je napětí na neinvertujícím vstupu pod referenční úrovní, integrovaný tranzistor komparátoru je otevřený a proud přes něj odtéká k zápornému pólu zdroje, na výstupu je tedy logická nula. Když vstupní napětí překročí referenční úroveň, vnitřní tranzistor se zavírá a na výstupu se objevuje napětí 3,3 V. Pokles vstupu pod 2,2 V zapříčiní opětovný návrat výstupu k 0 V.

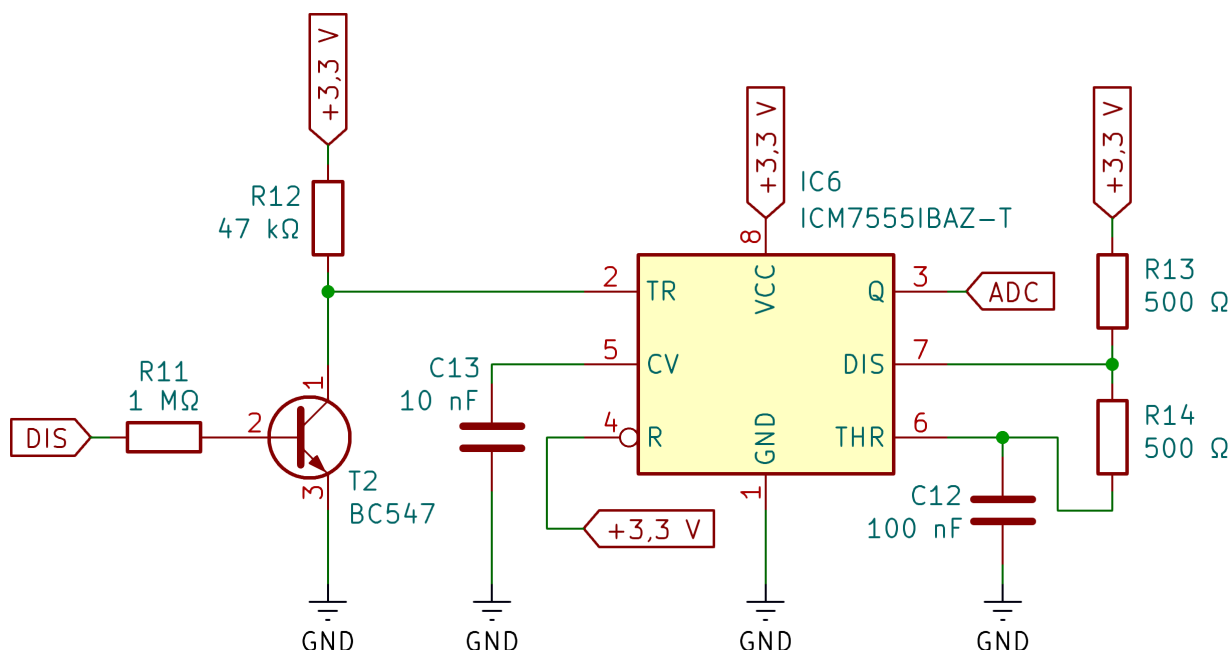


Obrázek 2.23: Diskriminátor falešných pulzů.

2.5.4.4 Unifikátor pulzů

Impulzy produkované diskriminátorem měly sice stejné napětí logické jedničky 3,3 V, ale určitou měrou se lišily ve své délce, s čímž jsem nebyl skopojený. Vzhledem k tomu, že Geigerova-Müllerova trubice nemá spektrometrickou odezvu a všechny jí vyvolané impulzy jsou tedy rovnocenné, přišlo mi vhodné jako poslední fázi úpravy signálu zahrnout prvek, jež unifikuje nejen napětí, ale i délku výstupních impulzů. Jeho výstup je tedy již napojen na jeden z digitálních pinů MCU.

Unifikátor je realizován opět pomocí integrovaného obvodu ICM7555, tentokrát však v monostabilním zapojení (viz obrázek 2.24), tzn. výstup setrvává na logické nule, dokud není úbytkem napětí na vstupu vypuzen do polohy logické jedničky.



Obrázek 2.24: Unifikátor pulzů.

Nejprve přes $1\text{M}\Omega$ rezistor R11 přichází impuls na bázi bipolárního tranzistoru T2. Velká hodnota rezistoru je zvolena proto, aby před ním bylo možné relativně nezkresleně pozorovat či kontrolovat pulzy na výstupu diskriminátoru. Kolektor tranzistoru a vstup 555 časovače je přes pull-up rezistor R12 držen na úrovni logické jedničky. Při průchodu impulsu se otevírá tranzistor T2 a na vstupu 555 vzniká napěťový úbytek, který vyvolá impuls na výstupu časovače 555.

Pro nastavení délky pulzu bylo nutné vypočítat hodnoty příslušných součástek. Vyjdeme z informace, že délka výstupního impulsu časovače 555 v monostabilním zapojení se rovná [15]:

$$T = 1,1 \cdot \tau = 1,1 \cdot R \cdot C. \quad (2.4)$$

Celkový odpor R je roven součtu odporů R13 a R14, tudíž

$$T = 1,1 \cdot (R_{13} + R_{14}) \cdot C_{12}. \quad (2.5)$$

Vhodnou délku výstupního impulsu jsem stanovil na 100 μs . Když zvolíme dva rezistory o celkovém odporu 1 k Ω , budeme k dosažení zvolené délky pulzu potřebovat kondenzátor o kapacitě:

$$C_{12} = \frac{T}{1,1 \cdot (R_{13} + R_{14})} \quad (2.6)$$

$$C_{12} = \frac{10^{-4}}{1,1 \cdot (500 + 500)} \text{ nF} \quad (2.7)$$

$$C_{12} \simeq 9,1 \cdot 10^{-8} \text{ F} = 91 \text{ nF} \quad (2.8)$$

Vzhledem k tomu, že není nijak nezbytně nutné délku pulzu dodržet exaktně na 100 μs , používám zde běžný 100 nF s 5% tolerancí (kapacita kondenzátoru tedy může být 95 až 105 nF).

$$T = 1,1 \cdot (500 + 500) \cdot 9,5 \cdot 10^{-8} \mu\text{s} \quad (2.9)$$

$$T \simeq 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 105 \mu\text{s} \quad (2.10)$$

$$T = 1,1 \cdot (500 + 500) \cdot 1,05 \cdot 10^{-7} \mu\text{s} \quad (2.11)$$

$$T \simeq 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ s} = 116 \mu\text{s} \quad (2.12)$$

Délka pulzu se tedy v závislosti na konkrétním kondenzátoru pohybuje od 105 μs do cca 116 μs .

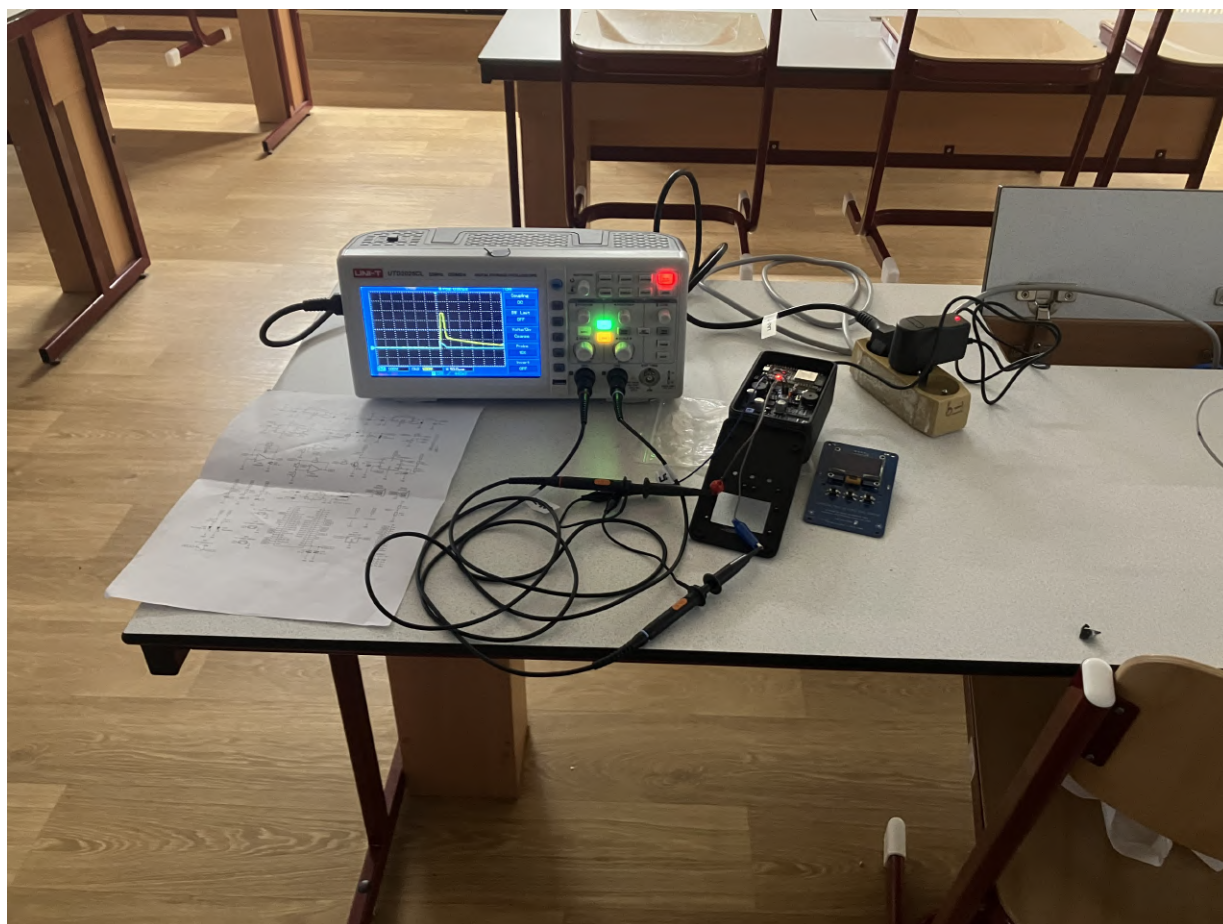
2.5.5 Zapojení MCU a prvků odezvy

ESP32 disponuje 15 plnohodnotnými vstupně-výstupními GPIO (*General Purpose Input Output*) digitálními piny, které mohou být využity pro nepřeberné množství aplikací [16].

První pin, který používám, je GPIO pin číslo 23. Pracuje ve vstupním režimu a registruje digitální impulsy produkované unifikátorem reprezentující jednotlivé impulsy produkované zářením beta a gama, které MCU zpracovává a převádí na číselné hodnoty. Prvky odezvy využívají piny 12, 14, 26 a 32. Viditelnou odezvu zajišťují dvě LED, o zvukovou odezvu se stará dvojice piezoelektrických reproduktorů *KPEG242*. Ty mají integrovaný piezoelektrický krystal, díky čemuž není nutné je budit předem generovanou frekvencí, piezoelektrický krystal po přiložení stejnosměrného napětí kmitá a frekvenci tak produkuje sám.

2.5.5.1 Optická odezva

Parametry LED jsou zaneseny v tabulce číslo 2.8. Bylo nutné vypočítat odpory předřadníků k oběma LED a jejich ztrátové výkony. Vhodný napájecí proud pro obě LED jsem stanovil na 20 mA s ohledem na maximální doporučený trvalý proud GPIO pinů a též z důvodu šetření baterie a prodloužení



Obrázek 2.25: Probíhající osciloskopické pozorování.

životností LED. Vypočtené rezistory jsem pak nahradil velmi podobnými hodnotami z důvodu nedostupnosti přesných odporů, což zde nehraje významnou roli.

Impulzní LED

$$U_R = U - U_D = 3,3 - 3,2 = 0,1 \text{ V} \quad (2.13)$$

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{0,1}{0,02} = 5 \text{ } \Omega \quad (2.14)$$

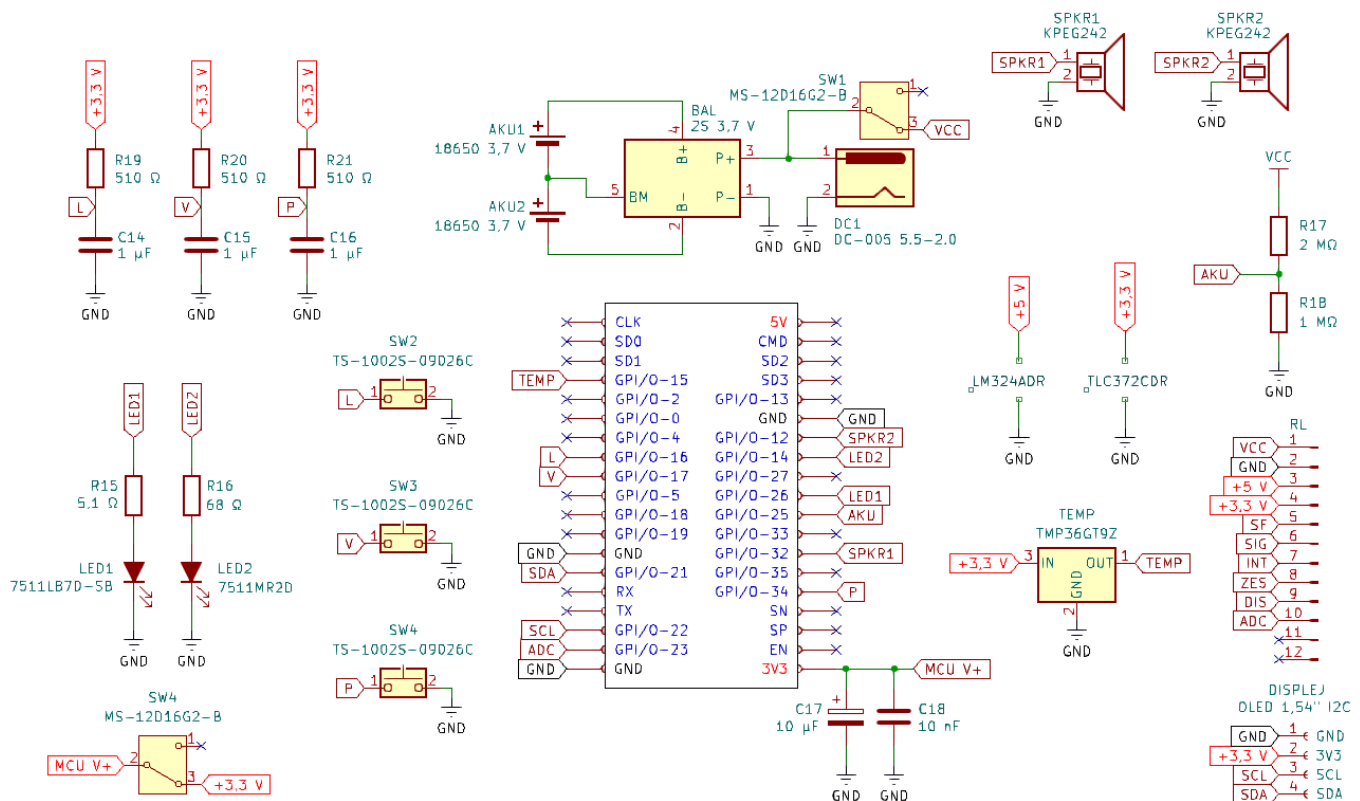
$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{0,1^2}{5} \simeq 2 \text{ mW} \quad (2.15)$$

LED alarmu

$$U_R = U - U_D = 3,3 - 2 = 1,3 \text{ V} \quad (2.16)$$

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{1,3}{0,02} = 65 \text{ } \Omega \quad (2.17)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{1,3^2}{65} \simeq 26 \text{ mW} \quad (2.18)$$



Obrázek 2.26: Schéma zapojení MCU, prvků odezvy a uživatelského rozhraní.

Tabulka 2.3: Parametry LED [17] [18].

Označení LED	7511LB7D-SB	7511MR2D
Barva světla	modrá	červená
Jmenovité napětí	3,2 V	2 V
Maximální proud	30 mA	30 mA
Svítivost	400 mcd	400 mcd
Světelný tok	470 lm	625 lm

2.5.5.2 Zapojení displeje

Zvolený displej (o výběru displeje píše v sekci 2.6.4) komunikuje s MCU pomocí protokolu I²C (*Internal Integrated Circuit protocol*). Tento displej si tak kromě 3,3 V a GND vystačí se zapojením pouze dvou dalších vodičů, SDA a SCL, což se jeví jako výhoda z důvodu úspory počtu využitých pinů MCU. Vodičem SCL (*Serial Clock*) se přenáší hodinový signál produkovaný MCU, SDA (*Serial Data*) slouží pro transport dat. Přenos dat je zahajován a ukončován pomocí tzv. START a STOP bitů, mezi nimi jsou data přenášena po jednotlivých bytech (tedy 8 bitech). Souběžným vysláním hodinového pulzu SCL a logické jedničky na SDA je realizována hodnota 1 binární soustavy, hodinový pulz a logická nula na SDA reprezentuje binární hodnotu 0 [19].

Displej slouží primárně pro zobrazení aktuálních měřených hodnot, avšak je též využíván pro orientaci a přepínání mezi jednotlivými režimy přístroje, přičemž pro pohyb mezi jednotlivými položkami na displeji se využívají instalovaná tlačítka (viz dále).

2.5.5.3 Zapojení tlačítek

Tlačítka (vlevo, vpravo a vybrat/potvrdit) slouží k volbě režimu přístroje. Vstupní pin pro každé z tlačítek je standardně držen přes pull-up rezistor na logické úrovni **HIGH**. Stisknutím tlačítka dojde k poklesu vstupu na **LOW**, na což MCU zareaguje zavoláním příslušné funkce. Občas dochází k několika rychlým přeběhům mezi logickými úrovněmi z důvodu zakmitání mezi stavy tlačítka při stisknutí. Tomu zamezují kondenzátory C14, C15 a C16.

2.5.5.4 Měřič napětí akumulátorů

O měření napětí akumulátorů se stará GPIO pin 25 připojený na napěťový dělič složený z rezistorů R17 a R18. Vzhledem k poměru odporů rezistorů se na pinu objevuje skutečné napětí akupacku dělené 3 (kvůli měřicímu rozsahu pinu do 3,3 V). S touto informací MCU dále pracuje a realizuje ukazatel aktuálního stavu nabití akumulátorů, který je znázorněn pomocí ikony baterie v pravém horním rohu displeje. Vnitřní plocha ikony je rozdělena na čtyři čárky, které ilustrují aktuální stav nabití akumulátorů (100 %, 75 %, 50 %, 25 %, 0 %)

Experimentálně se prokázalo, že při poklesu napětí akumulátorů pod cca 6 V může začít klesat výstupní napětí 5V stabilizátoru, což může mít za následek narušení správnosti měření (pokles napájecího napětí trubice, nedostatečné zesílení impulsu). Při poklesu napětí akumulátorů pod 6 V tedy ikona ukazuje již naprosto vybitou baterii (0 %, není zobrazena ani jedna čárka), avšak zařízení je ponecháno v provozu na nižší napětí až do úplného vybití akumulátorů (tedy do odpojení pomocí BMS při napětí 2,5 V na článek). Je tak možné v případě potřeby využít celý potenciál kapacity akumulátorů. Taková nutnost by hypoteticky mohla nastat při používání přístroje v nějaké naléhavé expoziční situaci, kdy by i třeba pouze orientační měření mohlo být užitečné.

2.5.5.5 Senzor teploty MCU

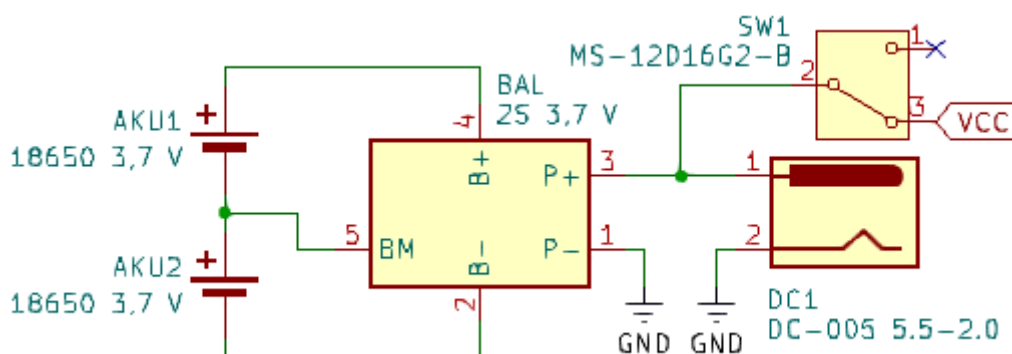
MCU je dále vybaven senzorem teploty TMP36. Ten se nachází v blízkosti MCU, tzn. pravděpodobně největšího zdroje tepla v celém zařízení. Průběžné měření teploty a zobrazení na displeji poté uživateli poskytuje představu o teplotě uvnitř přístroje a případně může poukázat na nutnost dočasného vypnutí přístroje. Taková situace by mohla nastat např. při užití přístroje v prostředí s vysokou teplotou okolního vzduchu.

2.5.5.6 Programovací přepínač

Jakákoliv budoucí další úprava zdrojového kódu MCU by při jeho připojení přímo na 3,3 V vyvolala situaci, kdy by byl MCU napájen ze dvou zdrojů současně – 3,3 V ze spínaného regulátoru napětí a 5 V z USB. Takovéto zapojení by mohlo MCU poškodit, proto je pro případné další programování MCU instalován přepínač, kterým je možné jeho napájení z 3,3 V odpojit a při programování napájet pomocí USB.

2.5.6 Obvod akumulátorů, nabíjení a BMS

Funkci akumulátorů plní dva sériově zapojené Li-Ion články⁶ s nominální hodnotou napětí 3,7 V. Vzhledem k tomu, že každý z akumulátorů má vlivem nedokonalosti výroby mírně rozdílný vnitřní odpor, mohlo by v sériovém zapojení docházet k nerovnoměrnému vybíjení, které by mohlo mít za následek podvybití nebo přílišné nabití jednoho ze článků, což by mohlo vést k narušení požární bezpečnosti přístroje. Akumulátory jsem tedy opatřil vhodným BMS (*Battery Management System*). BMS modul, jenž jsem vybral, chrání články proti přílišnému nabití, podvybití a též zajišťuje vyrovnání napětí na obou článcích (balancér)⁷.



Obrázek 2.27: Zapojení akumulátorů.

Modul balancéru a ochrany má celkem 5 vývodů. Na B+ a B– je připojen kladný, resp. záporný pól jejich sériového zapojení. Vývod BM je připojen mezi články a umožňuje tak vyrovnávání jejich napětí. P+ a P– slouží k připojení nabíjení/zátěže. Mezi výstupem BMS a zbytkem elektroniky zařízení se nachází přepínač SW1, pomocí něhož se přístroj zapíná/vypíná. Nabíječka je připojena na konektor DC1 a jedná se o síťovou nabíječku určenou k nabíjení sériového zapojení dvou článků o maximálním celkovém napětí 8,4 V. Konkrétní typ nabíječky, který používám, má maximální nabíjecí proud 1 A. Úplné nabití přístroje tedy trvá cca dvě a půl hodiny. Dobu nabíjení lze snížit i pod jednu hodinu za předpokladu použití 3A nabíječky. Nabíjení vyšším proudem již není možné, protože BMS má maximální nabíjecí i vybíjecí proud 3 A.



Obrázek 2.28: Ochrana a balancér napětí akumulátorů [20].

⁶Výběr typu akumulátoru detailněji popisují v sekci 2.6.3

⁷Na případnou otázku, proč jsem BMS nerealizoval sám, bych chtěl odpovědět tak, že jsem si netroufl designovat tak bezpečnostně důležitý prvek. BMS obzvláště při použití Li-Ion akumulátorů v podstatě chrání proti případnému požáru a já si tedy chci být skutečně jistý, že nic takového se v případě mého výrobku nestane. Využil jsem tedy jeden z komerčně vyráběných modulů.

2.6 Výběr důležitých komponent

2.6.1 Výběr Geigerovy-Müllerovy trubice

Na mezinárodním trhu je k dispozici několik různých typů Geigerových-Müllerových trubic dostupných pro širokou veřejnost. Provedl jsem proto průzkum trhu, abych zjistil, která z variant bude pro mou aplikaci nejvhodnější. Mezi běžně nabízené trubice patří například:

- SBM-20, SBM-21, SI-3BG, SI-22G, SI-29BG, STS-6, ZP-1400;
- LND-712, LND-714, LND-715;
- M4011, J304, J305.

Prvních 7 zmíněných jsou staré modely z armádních skladů, původně sovětské nebo jugoslávské výroby, většinou kovové. Poslední tři jsou příklady čínských trubic, jejichž stěny jsou vyrobeny ze skla. Trubice firmy LND jsou americké výroby a jsou v mnoha ohledech velmi kvalitní⁸. Lze je objednat přímo přes webové stránky společnosti, nicméně jejich cena je poměrně vysoká (nad rámec toho, jak chci zařízení koncipovat). Tabulka 2.4 ukazuje srovnání trubic SBM-20, J304 a LND-712 provedené nezávislým zdrojem [23].

Tabulka 2.4: Klíčové parametry potenciálně vhodných GM trubic [23] [24].

Typ trubice	LND-712	J304 ⁹	SBM-20
Typ detekovaného záření	α, β, γ	β, γ	β, γ
Rozměry [mm] (d × l)	15 × 49	11 × 107	11 × 109
Země původu	USA	Čína	SSSR
Referenční radionuklid	⁶⁰ Co	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs
Citlivost [CPS/(μSv/h)]	2,1	5,1	2,5
Mrtvá doba [μs]	90	N/A	190
Odezva na pozadí [CPS]	N/A	0,42	1
Vlastní pozadí [CPS]	0,17	0,2	1
Doporučené provozní napětí [V]	500	400	400

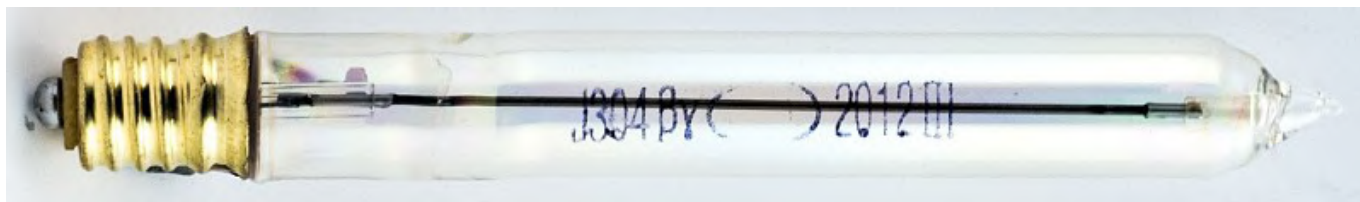
S ohledem na cenu tedy pro mou aplikaci vychází nejlépe J304. Má v porovnání s ostatními trubicemi podobných rozměrů poměrně vysokou citlivost a též nízké vlastní pozadí¹⁰.

J304 nedisponuje žádným tenkostěnným okénkem, tudíž zde odpadá možnost přímé detekce záření alfa. Radioaktivní přeměna alfa je však často doprovázena emisí záření gama, tudíž i přítomnost radionuklidů přeměňujících se přeměnou typu alfa dokáže přístroj při jejich dostatečné aktivitě registrovat (např. ²⁴¹Am).

⁸Energetický rozsah LND-712 podle jednoho ze zdrojů začíná již na 30 keV [21], zatímco například trubice STS-6 podle jiného zdroje detekuje záření až od cca 500 keV [22].

⁹Zdroj původně srovnává trubici J305, která je však velmi podobná jako J304, jen má jinou orientaci vývodů (J304 radiální, J305 axiální). Dá se tedy očekávat, že bude mít i velmi podobné parametry. J304 má oproti J305 výhodu, že má šroubovací závit, který pasuje do objímky na žárovku velikosti E10.

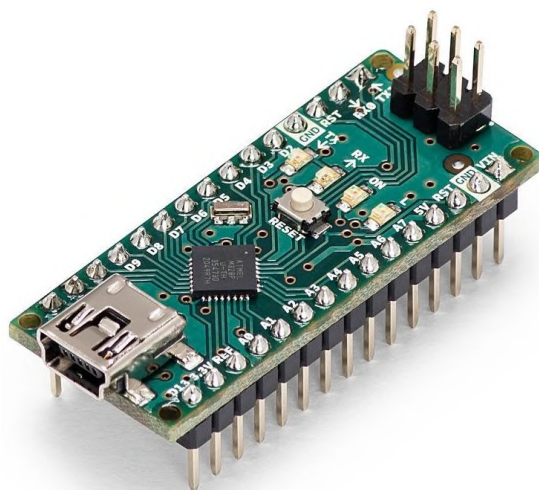
¹⁰Počet impulzů za jednotku času, které vyprodukují radionuklidy obsažené v samotném materiálu trubice.



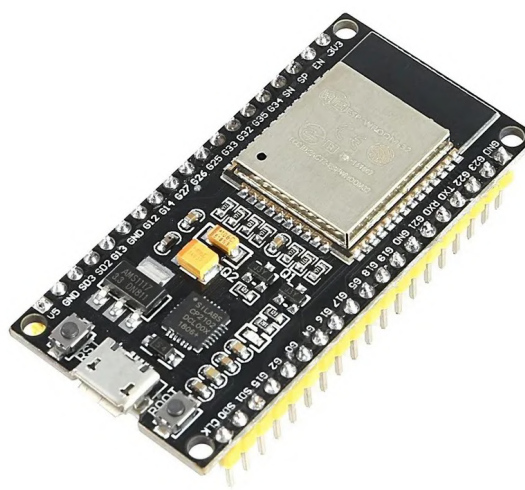
Obrázek 2.29: Geigerova-Müllerova trubice J304 [25].

2.6.2 Výběr MCU

Nejprve jsem uvažoval o využití mikrokontroleru Arduino Nano. Oproti ostatním deskám Arduino vyniká především menšími rozměry. V kategorii prostorově úsporných MCU jsem brzy narazil na desku ESP-32. Ta se oproti Arduino vyznačuje vyšším výpočetním výkonem, větší pamětí všech typů (Flash, SRAM, EEPROM), větším počtem vstupně-výstupních pinů a potenciální možností Bluetooth/Wi-Fi konektivity.



(a) Arduino Nano [26].



(b) ESP-32 [27].

Obrázek 2.30: Potenciálně vhodné vývojové desky.

Zatímco Arduino má hardwarově oddělené analogové a digitální piny, ESP-32 může GPIO pin využít jako analogový i digitální v závislosti na softwarové deklaraci. I přes tyto výhody je ESP-32 zároveň mnohem levnější než Arduino Nano, tudíž jsem se rozhodl využít právě ESP-32. Nevýhodou oproti desce Arduino Nano byla nutnost zavedení logické úrovně 3,3 V. ESP-32 je též mírně rozměrnější než Arduino Nano. Tabulka 2.5 srovnává důležité parametry obou desek.

2.6.3 Výběr akumulátorů

Již na začátku jsem se rozhodl, že chci, aby byl přístroj plně přenosný. S tím se pojí nutnost vyřešení výběru akumulátoru a vhodného BMS. Stabilizaci napájecích napětí jsem chtěl řešit přes step-down měniče, tudíž bylo potřeba, aby bylo napětí akumulátorového zdroje dostatečně vysoké i při téměř úplném vybití akumulátorů. Tyto parametry dobře splňovalo sériové zapojení dvou Li-Ion článků o nominálním napětí 3,7 V. Napětí plně nabitého článku se pohybuje okolo 4,2 V, při úplném vybití je napětí cca 2,5 V. Při sériovém zapojení se tedy pohybujeme v rozmezí 5 V až 8,4 V. Pro tuto

Tabulka 2.5: Vybrané parametry potenciálně vhodných MCU [28] [29].

Model MCU	Arduino Nano	ESP-32
Procesor	Atmel ATmega328 8-bit	Tensilica Xtensa LX6 32-bit
Frekvence procesoru	16 MHz	240 MHz
Počet jader	1	2
Logická úroveň	5 V	3,3 V
Počet pinů	8 A, 14 D	26 A/D
SRAM	2 kB	520 kB
EEPROM	1 kB	448 kB
Flash	32 kB	4 MB
Bezdrátová konektivita	S využitím přídatných modulů	Ano
Rozměry [mm]	18 × 43	28 × 55

aplikaci se prostorově vyplatilo použít válcový typ 18650. Vzhledem k prostorové koncepci těchto akumulátorů se mezi ně dá výhodně uložit GM trubice. Články tak poté také plní úlohu částečného radiačního stínění pro záření přicházející z nežádoucích směrů, tzn. ze stran. Kapacita konkrétního typu akumulátoru, jenž jsem zvolil, dosahuje podle datasheetu 2600 mAh [30].

2.6.4 Výběr displeje

Při výběru displeje jsem uvažoval 3 možné varianty – LCD, OLED a THT. Běžný LCD displej byl nejlevnější variantou, kterou jsem však rychle zamítl kvůli špatnému kontrastu, nízkému pozorovacímu úhlu, nutnosti podsvícení a vyšší spotřebě [31]. Jako zajímavá alternativa mě zaujal displej využitý na mém osciloskopickém modulu, THT displej, což je zvláštní typ LCD. Vyznačuje se vysokou kvalitou obrazu a barev [32]. Barevné rozlišení jsem však nakonec posoudil jako pro tuto aplikaci nepotřebné a uchýlil se k displeji typu OLED, který je charakterizován nižší spotřebou v porovnání s LCD a navíc disponuje vysokým kontrastem a širokým pozorovacím úhlem [31]. U tohoto typu displeje navíc světélkují přímo pixely, není proto nutné používat žádné podsvícení jako u LCD. Nakonec byl vybrán model komunikující přes I²C rozhraní s 1,54" úhlopříčkou (3,9 cm) a rozlišením 128×64 pixelů.

2.7 Fyzické provedení přístroje

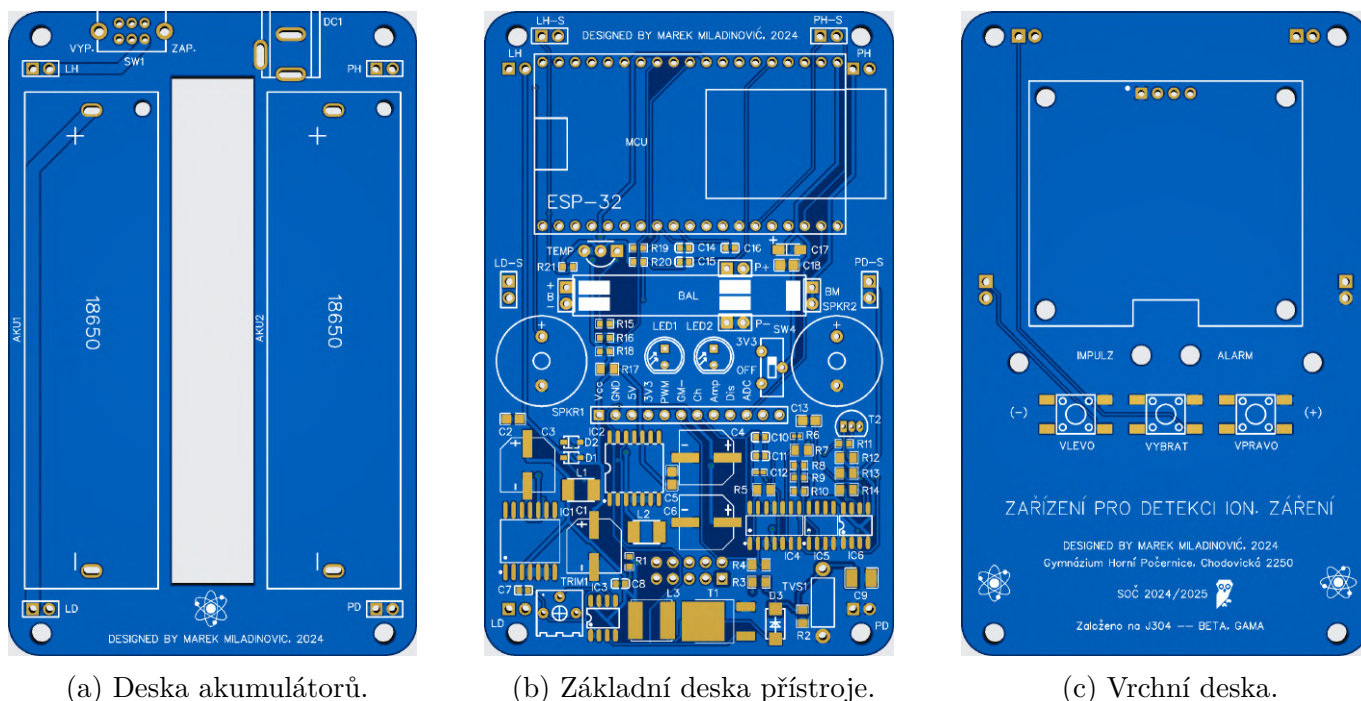
2.7.1 Desky plošných spojů

Umístění celé elektronické instrumentace přístroje pouze na jednu desku plošných spojů se ukázalo být poměrně prostorově neekonomické, vzhledem k tomu, že zařízení bylo koncipováno jako malý přenosný měřák. Celý přístroj jsem se tedy rozhodl rozložit na několik samostatných DPS. Tyto jsou poté situovány nad sebou ve třech etážích a drženy pomocí podpěrných sloupků. Podpěrné sloupky jsou realizovány vhodnými spojeními krátkých dutinkových a kolíkových lišt, slouží tedy i pro elektrické propojení všech DPS. Přístroj je tedy soudržný a kompaktní i když není uložen v

ochranné schránce a lze jej tedy používat i bez ní. Konkrétně je přístroj složen z těchto 4 desek (3 z nich ukazuje obrázek číslo 2.31):

- deska akumulátorů,
- základní deska přístroje,
- adaptér GM trubice,
- vrchní deska.

Design všech DPS proběhl pomocí softwaru *EasyEDA Standard* (viz obrázek 2.33). Tento editor mne zaujal především rozsáhlými vestavěnými knihovnami součástek a možností přístupu a editace online. V zájmu dosažení co nejmenší velikosti celého přístroje jsem zvolil možnost strojového osazení DPS součástkami typu SMD (*Surface Mount Device*). Využil jsem tedy služby *PCB Assembly*, kterou poskytuje společnost *JLCPCB*, která rovněž zhotovila samotné desky plošných spojů.

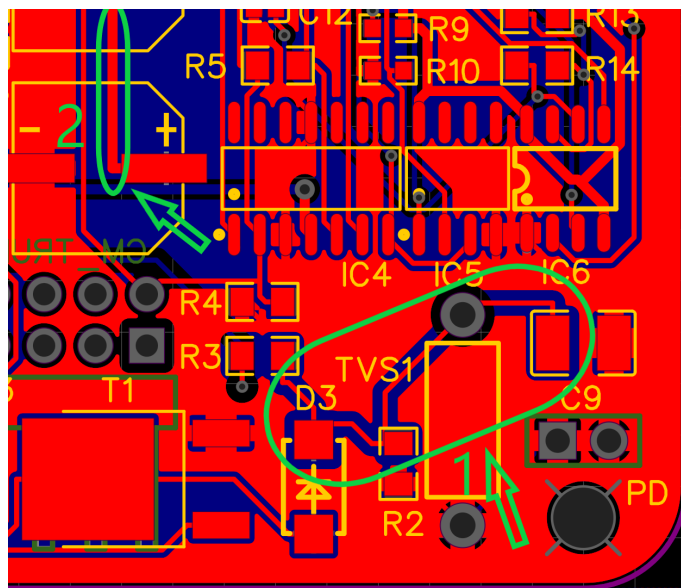


Obrázek 2.31: Desky plošných spojů.

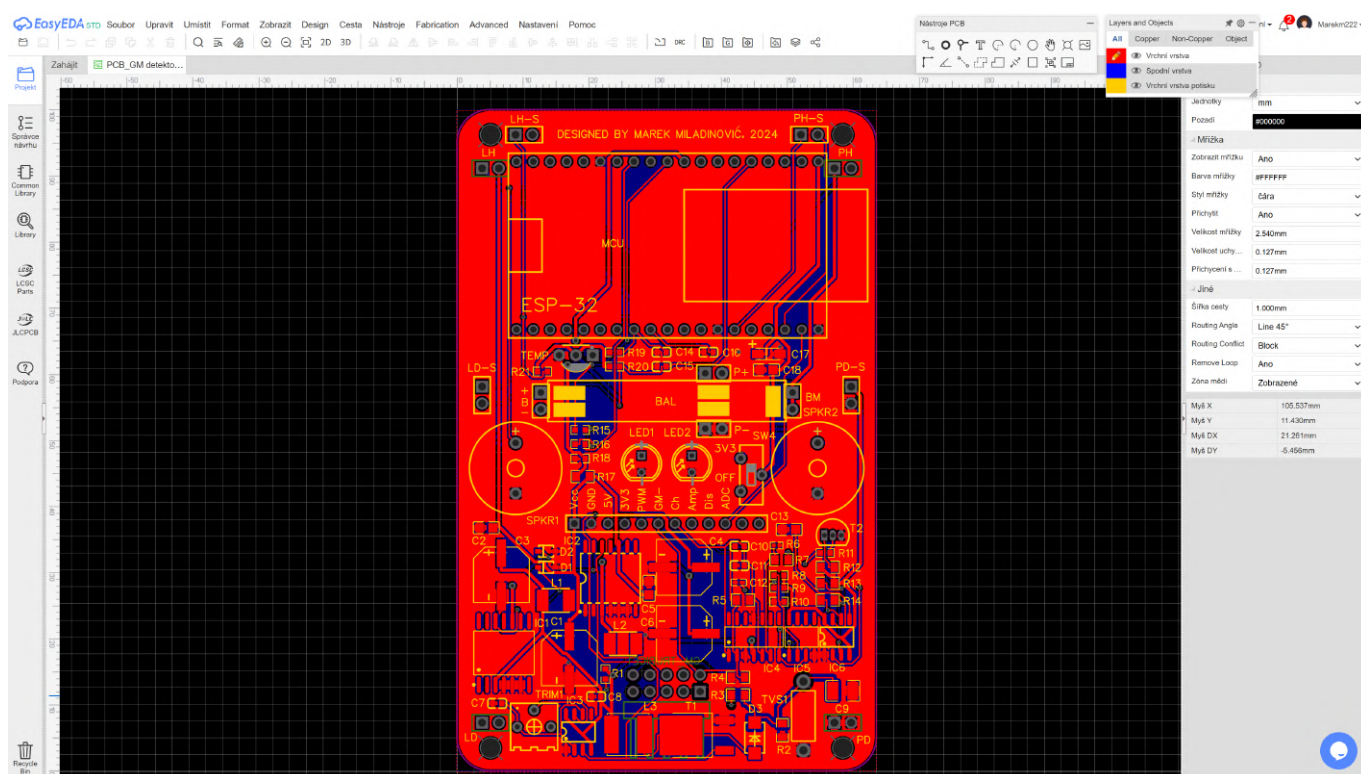
Během designu desek jsem se snažil o co nejvýhodnější možné rozvržení součástek, aby bylo dosaženo minimálních rozměrů. Dále jsem například obvod pro úpravu impulzů umístil alespoň ne přímo vedle nějakého spínaného prvku, který by mohl způsobovat rušení. Součástky na větví, kde je přítomno vysoké napětí, jsem umístil s většími rozestupy a vysokonapěťové vývody orientoval směrem k sobě (viz obrázek 2.32 – 1), aby mezi nimi a vývody připojenými na záporný pól zdroje nedošlo ke svodu přes vrstvu vzduchu. Zde jsem též navýšil mezeru mezi touto větví a rozlévanou mědí na desce. U cestíček vedoucích vyšší proudy jsem zvolil větší tloušťku (viz obrázek 2.32 – 2).

2.7.1.1 Deska akumulátorů

Tato deska je držákem pro akumulátory a zároveň vytváří spodní část přístroje. Dále poskytuje uchycení pro vypínač a nabíjecí konektor. V její prostřední části se nachází podlouhlý otvor, nad kterým je pomocí adaptéru uchycena Geigerova-Müllerova trubice (viz sekce 2.7.1.3). Otvor je v tomto



Obrázek 2.32: Přizpůsobení cest a rozložení na desce.



Obrázek 2.33: Probíhající design DPS.

místě proto, aby materiál desky zbytečně nestínil záření přicházející právě zespodu přístroje, tzn. ze směru, který je určen pro měření.

2.7.1.2 Základní deska přístroje

Na této DPS se nachází hlavní elektronická část zařízení. V jeho spodní části je situována veškerá elektronika pro zpracování signálu z detektoru (tedy od stabilizátorů napětí až po unifikátor pulzů). V prostřední části jsou umístěny prvky odezvy – piezoelektrické reproduktory a LED. Nad prvky

odezvy se nachází adaptér pro balancér napětí akumulátorů. Ve vrchní části DPS je prostor pro MCU.

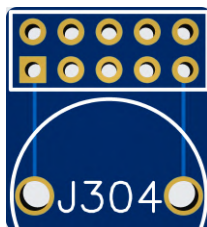
Nad detekční elektronikou je umístěna **revizní kolíková lišta**. Jsou na ní vyvedeny klíčové body úpravy signálu, napěťové hladiny, spínací frekvence T1 atd. Lišta v případě jakéhokoliv neočekávaného chování přístroje umožní rychlý přístup ke klíčovým prvkům elektroniky a zajistí tak snazší a rychlejší diagnostiku případného problému, což se později velmi osvědčilo při prvotní kompletaci přístroje. Tabulka 2.6 rozepisuje zkratky zanesené na DPS u jednotlivých vývodů lišty.

Tabulka 2.6: Zapojení vývodů revizní lišty.

Zkratka	Zapojení pinu	Spoj
Vcc	Napětí akumulátorů	VCC
GND	Uzemnění	GND
5V	Výstup stabilizátoru napětí 5 V	+5 V
3,3V	Výstup stabilizátoru napětí 3,3 V	+3,3 V
GM–	Katoda Geigerovy-Müllerovy trubice	SIG
Ch	Výstup proudového integrátoru	INT
Amp	Výstup zesilovače pulzů	ZES
Dis	Výstup diskriminátoru falešných pulzů	DIS
ADC	Výstup unifikátoru pulzů	ADC

2.7.1.3 Adaptér trubice

K uchycení trubice slouží tento adaptér. Geigerova-Müllerova trubice je našroubována v objímce velikosti E10, která je připájena do adaptéru v příslušných otvorech. Adaptér s trubicí je pomocí dvouřadé dutinkové lišty uchycen pod základní deskou přístroje, z pod které vystupuje dvouřadá kolíková lišta zakřivená v úhlu 90°. Trubice se tedy nachází mezi akumulátory pod základní deskou přístroje orientovaná jako osa kratší strany přístroje.



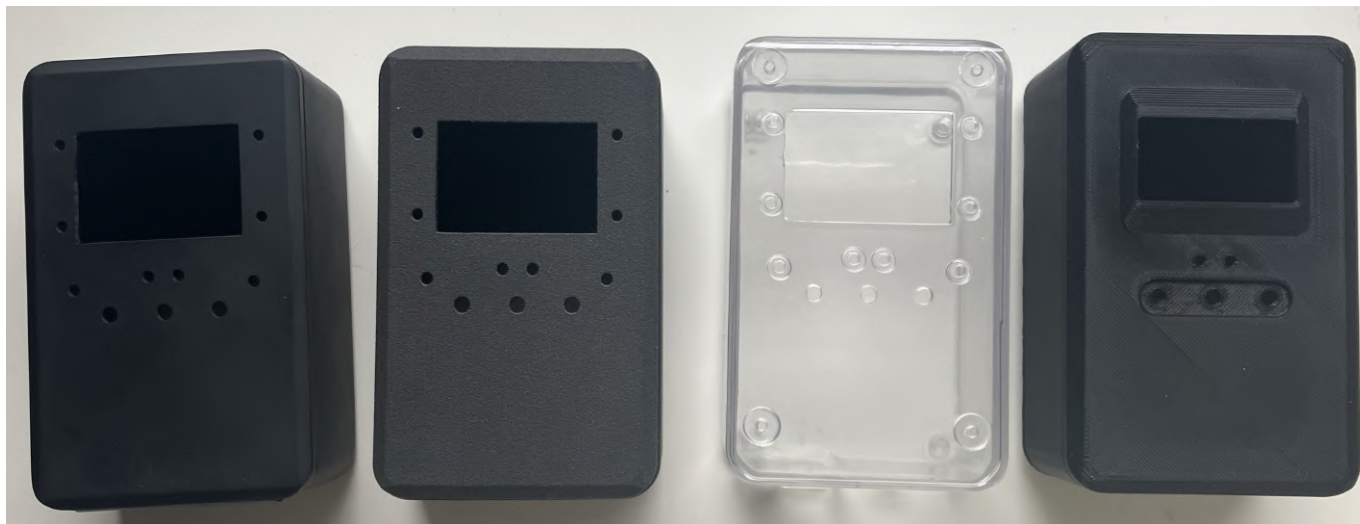
Obrázek 2.34: Adaptér GM trubice.

2.7.1.4 Vrchní deska

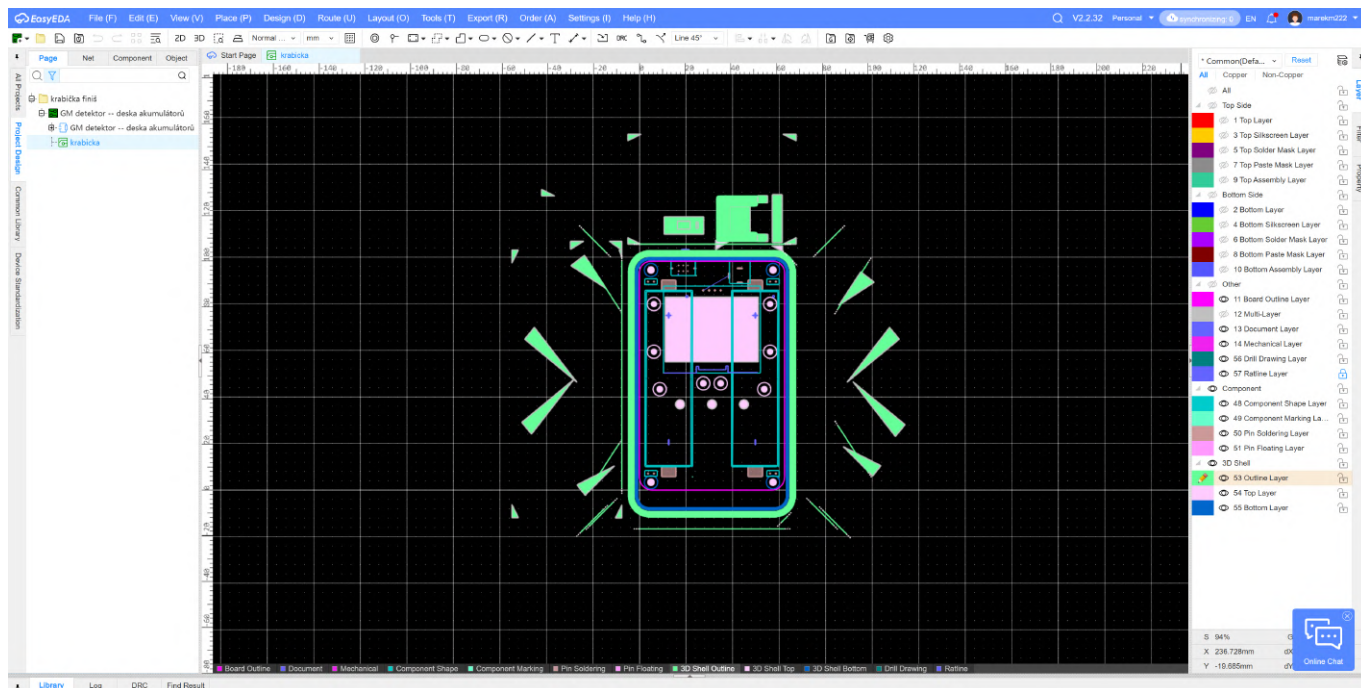
Vrchní DPS poskytuje uchycení pro OLED diplej a trojici tlačítek. V desce je vyvrtáno několik otvorů pro přenos světla z LED a zvuku z piezoelektrických reproduktorů. Rozlévaná měď napojená na záporný pól zdroje zde spolu s rozlévanou mědí desky akumulátorů plní též funkci částečného stínění detekční elektroniky proti elektromagnetickému poli.

2.7.2 Krabička

Z počátku jsem uvažoval o podřízení designu celého zařízení konkrétní krabičce. Tuto variantu však brzy zastínila možnost pozdějšího zhotovení krabičky přímo na míru pomocí 3D tisku, podle potřeb a finálních rozměrů elektroniky. Pro design krabičky jsem využil program *EasyEDA Professional* a první verze krabičky nechal zhotovit též u JLCPCB, protože mne zde zaujala možnost tisku z transparentního materiálu. Verzi krabičky s detekčním okénkem jsem později tiskl ve škole na 3D tiskárně *Průša MK4S*.



Obrázek 2.35: Fotografie krabiček.



Obrázek 2.36: Probíhající design krabičky.

Krabička se skládá ze dvou dílů. Ve spodním díle se v příslušných místech nachází otvory pro vypínač a nabíjecí konektor. Otvor pro nabíjení je navíc opatřen posuvným šoupátkem, s jehož

pomocí je možné konektor uzavírat a chránit tak před případným vniknutím prachu či nežádoucího předmětu do otvoru během používání přístroje.

Vrchní část obsahuje obdélníkový otvor pro displej a několik kulatých otvorů pro tlačítka, přenos světla z LED, přenos zvuku z reproduktorů a též otvory sloužící pro montáž ochranného skla displeje.

2.8 Programování MCU

Vývojová deska ESP-32 umožňuje programování v jazycích *Wiring* a *MicroPython*. S jazykem Wiring jsem měl již zkušenosti z předchozího programování desek Arduino, rozhodl jsem se u něj tedy zůstat. Programoval jsem v prostředí *Arduino IDE*, které je po instalaci příslušného ovladače s deskami ESP-32 plně kompatibilní. Během programování se ukázalo, že je nutné se bezpodmínečně vyhnout funkci `delay`(délka trvání) určené k realizaci časovacích úkonů. Zmíněná funkce totiž zcela zastavuje chod programu, což by mělo za následek narušení přesného odpočítávání času pro měření četnosti impulzů. To se zpočátku jevilo jako velký problém, záhy se mi jej však povedlo obejít pomocí odpočtů realizovaných užitím funkce `millis`() .

Základní část kódu se skládá ze zavolání potřebných knihoven, inicializace displeje a načtení funkcí definovaných v samostatných souborech.

```
#include "SPI.h"
#include "Wire.h"
#include "Adafruit_GFX.h"
#include "Adafruit_SSD1306.h"
#include "EEPROM.h"

#define EEPROM_SIZE 30
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1
#define SCREEN_ADDRESS 0x3C

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);

#include "promenne.h"

#include "vlevo.h"
#include "vpravo.h"
#include "vybrat.h"
#include "stavy.h"

#include "vypocet.h"
#include "zobrazeni.h"

#include "led.h"
#include "spkr.h"
#include "alarm.h"
```

Následuje samotný program rozložený do dvou hlavních funkcí: `setup`() a `loop`() . Funkce `setup`() se spustí pouze jednou na začátku celého programu. Příkaz `pinMode`(číslo pinu, režim pinu) nastavuje daný pin jako vstupní či výstupní. Nevyužitým pinům je pro pomoci INPUT_PULLDOWN trvale přiřazena logická nula, pro omezení jakýchkoliv přeběhů mezi vysokým a nízkým stavem. Příkazy `Serial.begin(...)` a `display.begin(...)` se starají o spuštění sériového monitoru a dis-

pleje. Soubor `start.h` obsahuje úvodní obrazovku, která je spuštěna po startu přístroje. Funkce `EEPROM.begin(EEPROM_SIZE)` nastavuje počet adres nevolatilní paměti EEPROM, která slouží pro zachování hodnot některých proměnných i po vypnutí měřidla.

```
void setup() {

    pinMode(detekcniPin, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(lPin, INPUT);
    pinMode(pPin, INPUT);
    pinMode(vPin, INPUT);
    pinMode(batPin, INPUT);
    pinMode(tempPin, INPUT);
    pinMode(impLED_Pin, OUTPUT);
    pinMode(impSpkr_Pin, OUTPUT);
    pinMode(alarmSpkr_Pin, OUTPUT);
    pinMode(alarmLED_Pin, OUTPUT);
    pinMode(0, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(1, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(2, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(3, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(4, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(5, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(13, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(18, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(19, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(27, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(33, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(35, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(36, INPUT_PULLDOWN);
    pinMode(39, INPUT_PULLDOWN);

    Serial.begin(9600);
    display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, SCREEN_ADDRESS);
    EEPROM.begin(EEPROM_SIZE);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(detekcniPin), isr, RISING);

    #include "start.h"
    #include "set_eeprom.h"

}
```

Příkaz `attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(číslo pinu), volaná funkce, režim)` přiřazuje hardwarové přerušování¹¹ programu na pin zaznamenávající příchozí impulzy od unifikátoru pulzů. Přerušování je v režimu `RISING`, funkce `isr()` (*Interrupt Service Routine*) je tedy zavolána při každém přeběhu stavu pinu z `LOW` na `HIGH`. Vnitřek funkce v důsledku příchozího impulzu zajišťuje zvednutí hodnoty proměnné celkového počtu impulzů o jedna, na základě čehož jsou vyhodnocovány měřené veličiny.

¹¹Program místo periodického kontrolování stavu vstupu čeká na příchozí impulz, který na velmi krátký okamžik přerušuje chod programu a provede příslušnou softwarovou operaci.

```

void isr() {
    cpsPlus_interrupt++;
    cpsPlus_op_interrupt++;
    pocet_interrupt++;
    kontrolni_cpmPlus_interrupt++;
}

```

Následuje funkce `loop()`, která je volána periodicky až do vypnutí MCU, její obsah je tedy hlavní část celého programu. Jednotlivé vnitřní funkce jsou již předem definovány v příslušných souborech (`.h`) načítaných na začátku programu.

```

void loop() {
    stavy();
    vypocet();
    ledTrig();
    spkrTrig();
    zobrazeni();
    ledTerm();
    spkrTerm();
    almTrig();
    almTerm();
}

```

Tabulka číslo 2.8 shrnuje fungování všech devíti dílčích funkcí, které jsou obsahem funkce `loop()`.

Tabulka 2.7: Popis činnosti dílčích funkcí.

Název funkce	Popis vykonávaných činností
<code>stavy()</code>	Kontroluje stavy tlačítek a v případě stisku volá příslušné funkce.
<code>vypocet()</code>	Měří počet impulzů vzhledem k časovému intervalu a vypočítává tak četnost a aktivitu. Dále měří napětí akumulátorů a teplotu MCU.
<code>ledTrig()</code>	Po zaznamenání impulzu spouští LED.
<code>spkrTrig()</code>	Po zaznamenání impulzu spouští reproduktor.
<code>zobrazeni()</code>	Stará se o vykreslení obrazovky.
<code>ledTerm()</code>	Po uplynutí časového intervalu (délka bliknutí LED) vrací LED1 zpět na LOW .
<code>spkrTerm()</code>	Po uplynutí časového intervalu (délka pípnutí reproduktoru) vrací SPKR1 zpět na LOW .
<code>almTrig()</code>	Kontroluje hodnotu intenzity, při překročení prahové úrovně spouští alarm.
<code>almTerm()</code>	Kontroluje hodnotu intenzity, pokud není překročen práh, alarm udržuje vypnutý; vypíná alarm pokud je alarm již spuštěn a intezita poklesne pod prahovu úroveň.

2.9 Cenové zhodnocení

Jedním z cílů mé práce bylo udržení nízké ceny přístroje, jelikož cena je důležitým faktorem, který vstupuje do procesu vývoje víceméně jakéhokoliv výrobku. Tabulka 2.8 rozepisuje ceny za jednotlivé položky. Náklady jsou vztaženy vzhledem k jednomu kusu měřidla.

Tabulka 2.8: Cenový rozpis.

Položka	Cena
Tištěné DPS	70,-
SMD součástky	300,-
Osazení	470,-
Doprava	230,-
Ostatní součástky	80,-
Detektor	600,-
Displej	260,-
Mikrokontroler	220,-
Akumulátory	220,-
Součet	~2500,-

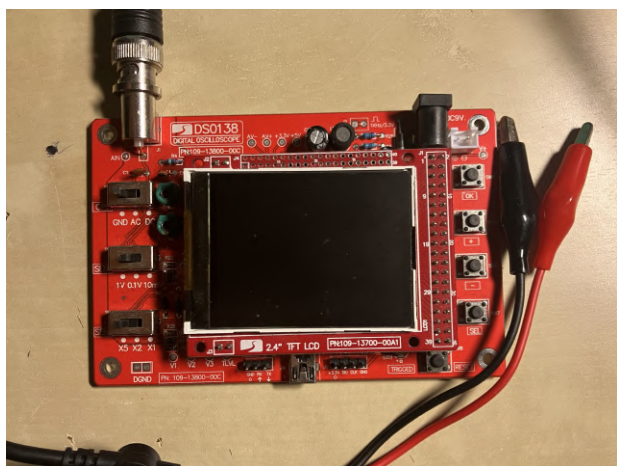
Celkové náklady pro zhotovení jednoho přístroje nakonec vyšly na cca 2500 Kč. To ve výsledku v oblasti měřidel ionizujícího záření není nijak zvláště vysoká částka. Vzhledem k tomu, že veškeré ceny jsou zde maloobchodní, dá se očekávat, že náklady by teoreticky v případě zavedení do sériové výroby určitou měrou klesly.

3. Kalibrace a testování

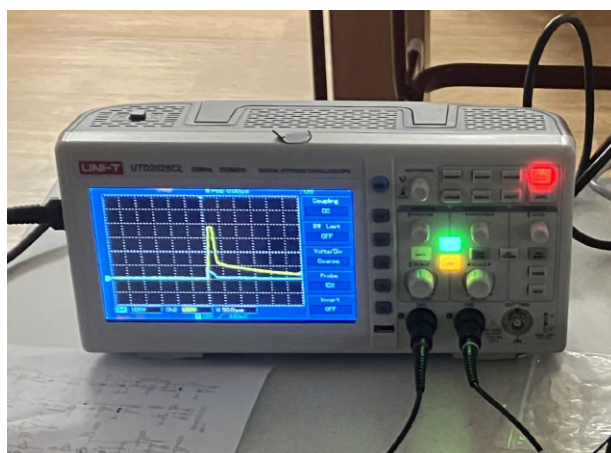
3.1 Měření elektrických vlastností

3.1.1 Charakteristika impulsů

V průběhu návrhu detekční elektroniky probíhala základní osciloskopická měření pomocí malého osciloskopického modulu *DSO138 200 kHz*.



(a) DSO138 200 kHz.



(b) UTD2025CL 20 MHz.

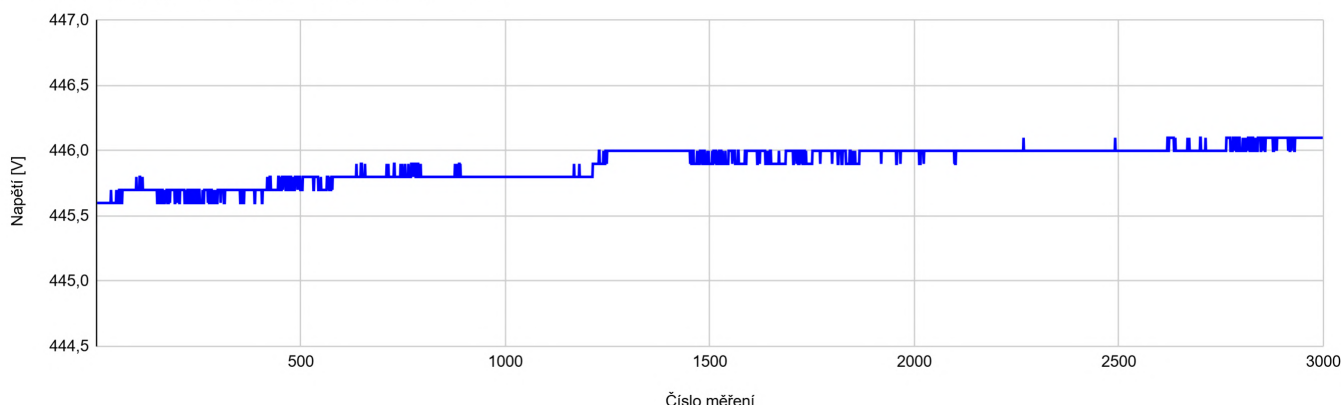
Obrázek 3.1: Osciloskopické přístroje užívané během tvorby práce.

V zájmu pořízení kvalitnějších snímků impulsů bylo uskutečněno pozorování pomocí profesionálního dvoukanálového osciloskopu *UNI-T UTD2025CL 20 MHz*. Snímky impulsů a různých fází jejich úpravy se nachází v konstrukční části práce (viz obrázek 2.20). Měření probíhalo v budově Gymnázia Chodovická.

3.1.2 Stabilita napětí na detektoru

Dále v rámci ověřování elektrických vlastností proběhlo měření stability napětí měniče (440 V). Napětí bylo měřeno pomocí multimetru *Owon B35T+*. Obrázek 3.2 ukazuje stabilitu napětí v průběhu 50 minut (3000 měření po jedné sekundě). V měřeném úseku se napětí změnilo maximálně o cca 0,5 V, což lze vzhledem k povaze Geigerovy oblasti označit jako zanedbatelnou fluktuaci bez významného vlivu na detekční účinnost.

Stabilita napájecího napětí v průběhu času



Obrázek 3.2: Stabilita napětí na detektoru.

3.1.3 Spotřeba přístroje

Zjištění přibližné elektrické spotřeby přístroje proběhlo jednorázovým měřením opět pomocí multimetru *Owon B35T+*. Celý přístroj vykazoval spotřebu cca 160 mA. Po přiložení zdroje záření, který v citlivém objemu detektoru vyvolal přibližně 50 CPS, stoupla spotřeba na cca 175 mA. Dá se tedy přepokládat, že při dalším zvyšování intenzity radiačního pole bude určitou měrou stoupat i spotřeba elektrické energie. Výrobce užitých akumulátorů udává kapacitu 2600 mAh [30], plně nabitě akumulátory tedy teoreticky pokryjí cca 16 hodin provozu při běžném radiačním pozadí. Průměrná radiační zátěž 50 CPS odpovídá cca 15 hodinám provozu.

3.2 Princip kalibrace

Kalibrace se provádí porovnáním změřených CPS se skutečnou aktivitou radionuklidového etalonu (po odečtení radiačního pozadí v místě měření), čímž získáme závislost těchto dvou veličin. Měřidlo se kalibruje na konkrétní radionuklid, tedy na konkrétní energii (případně směs energií) záření, protože každý radionuklid vyzařuje na odlišné energii a detektor má pro různé energie záření různou detekční účinnost.

3.3 Měření přirozeného pozadí

V místě měření je jako všude jinde přítomno určité radiační pozadí, která má původ v přeměnách volně rozptýlených přirozených a reziduálních umělých radionuklidů. Především při měření nízkých intenzit záření je nutné vzít radiační pozadí v potaz a v případě potřeby jej změřit a odečíst. Veškeré kalibrace tedy byly provedeny po odečtení pozadí v místě měření. Měřidlo též disponuje možností odečtu pozadí.

3.4 Metody výpočtu

Zpracování dat a výpočet statistických veličin probíhal v programu *Microsoft Excel* kvůli možnosti předdefinování výpočetních mechanismů, které usnadňují práci s velkým množstvím čísel. Některé další výpočty jsem prováděl také pomocí programovacího jazyka *Python*.

3.4.1 Zákon radioaktivní přeměny

Každý radionuklidový etalon má určitou hodnotu aktivity vztahenou k referenčnímu datu. Současné aktivity etalonů bylo tedy nutné dopočítat. Především v případě radionuklidů s nižším poločasem přeměny by zanedbání toho kroku mohlo zapříčinit značné zkreslení výsledků. Aktivitu v čase t zjistíme pomocí vzorce

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (3.1)$$

A	aktivita v čase t
A_0	původní aktivita
λ	přeměnová konstanta
t	uplynulá doba

Přeměnová konstanta λ popisuje průběh rozpadu jader radionuklidu a je rovna

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{\frac{1}{2}}}. \quad (3.2)$$

$T_{\frac{1}{2}}$	poločas přeměny
-------------------	-----------------

3.4.2 Nejistoty měření

Aktivita etalonů je udávána vždy s určitou nejistotou. Kromě výpočtu nynějších aktivit pomocí zákona radioaktivní přeměny je nutné dopočítat i aktuální nejistoty. Velikost výsledné nejistoty u_v při násobení veličiny x s nejistotou u_x určitou konstantou k odpovídá vztahu

$$u_v = u_x \cdot k. \quad (3.3)$$

V tomto případě budou tyto veličiny reprezentovat následující¹:

$$u_v = u_A, \quad (3.4)$$

$$u_x = u_{A_0}, \quad (3.5)$$

$$k = e^{-\lambda t}. \quad (3.6)$$

¹Zde u_A nepředstavuje nejistotu typu A (viz sekce 3.4.2), nýbrž výslednou nejistotu veličiny aktivita (A).

Pro nejistotu výsledné aktivity při použití zákona radioaktivní přeměny tedy platí vztah

$$u_A = u_{A_0} \cdot e^{-\lambda t}. \quad (3.7)$$

Nejistoty měření pro každý z radionuklidů byly vypočteny pomocí vzorců zavedených matematickou statistikou. Standardní kombinovaná nejistota u je rovna odmocnině ze součtu druhých mocnin nejistoty typu A a nejistoty typu B [37]. Nejistotu typu A vyvolávají náhodné vlivy způsobené neznámými příčinami. Její výpočet probíhá pomocí dat získaných z opakovaných měření. Nejistotu typu B způsobují známé či odhadnutelné vlivy [38]. Pro její výpočet byla použita data z měření linearit odezvy (viz sekce 3.8). Nejistoty byly zaokrouhlovány na dvě platná místa a to vždy nahoru. Výpočty kombinované standardní nejistoty jsem provedl s pomocí vztahů:

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (3.8)$$

u	kombinovaná standardní nejistota
u_A	nejistota typu A
u_B	nejistota typu B

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \quad (3.9)$$

$\bar{x}$	aritmetický průměr
x_i	konkrétní měřená hodnota
n	počet měření

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (3.10)$$

s^2	rozptyl hodnot
-------	----------------

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.11)$$

$s_{\bar{x}}$	odchylka výběrového průměru
s	výběrová směrodatná odchylka

$$u_B = \frac{\Delta x_m}{\chi}. \quad (3.12)$$

Δx_m	maximální dovolená chyba
χ	faktor zohledňující průběh pravděpodobnosti velikosti odchylky

3.5 Kalibrace na bodový zdroj

3.5.1 Etalony

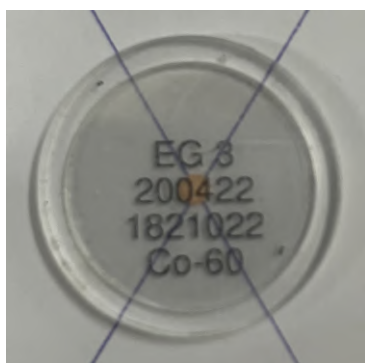
Kalibrace přístroje na aktivitu bodového zdroje probíhala s pomocí tří radionuklidových etalonů – ^{137}Cs , ^{60}Co a ^{241}Am . Jedná se o etalony aktivity typu EG 3, tedy uzavřené radionuklidové zdroje pro kalibraci spektrometrů nebo čítačů záření s klasifikací ISO/14/C12133 podle ČSN ISO 2919. Etalony jsou vyráběny Českým metrologickým institutem (ČMI), přičemž referenční datum užitých etalonů je 15.12. 2022 a platnost certifikátu 3 roky (certifikáty viz obrázek číslo 3.5) [33]. Měření probíhalo na pracovišti Katedry dozimetrie a aplikace ionizujícího záření FJFI ČVUT v Praze na přelomu listopadu a prosince 2024, tedy cca 2 roky (konkrétně 715 dní) po referenčním datu etalonů.

Tabulka 3.1: Bodové zdroje typu EG 3.

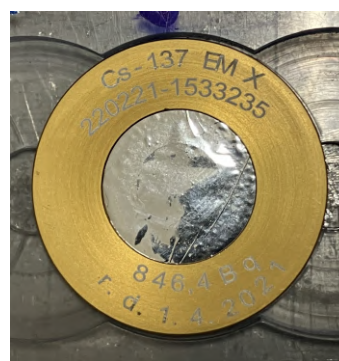
Radionuklid	Aktivita [kBq]	Odezva [CPS]
^{137}Cs	323,5(40)	167,2(14)
^{60}Co	165,4(19)	384,9(15)
^{241}Am	497,8(35)	111,8(13)

3.5.2 Měření etalonů

Kalibrace pro každý nuklid sestávala z 20 měření, z kterých byl poté vypočten aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Při měření byl etalon umístěn na rovné podložce z homogenního materiálu. Na něm byl položen přístroj, přičemž etalon byl vycentrován na střed dna přístroje. Při umístění etalonu na desce působí deska jako reflektor a dochází tak od ní k částečnému odrazu určité části záření do citlivého objemu detektoru, což teoreticky určitou měrou navyšuje počet zaznamenaných impulzů. V reálné situaci se však měřený zdroj též nachází na nějakém povrchu, tudíž k odrazu zde dochází také. Kalibrace tímto způsobem (ne např. zavěšením etalonu do volného prostoru) tak pomáhá se více přiblížit skutečným podmínkám při praktickém měření.



(a) Etalon EG 3 ^{60}Co .



(b) Etalon EM X ^{137}Cs .

Obrázek 3.3: Etalony aktivity bodového zdroje.

3.6 Kalibrace na plošnou aktivitu

3.6.1 Etalony

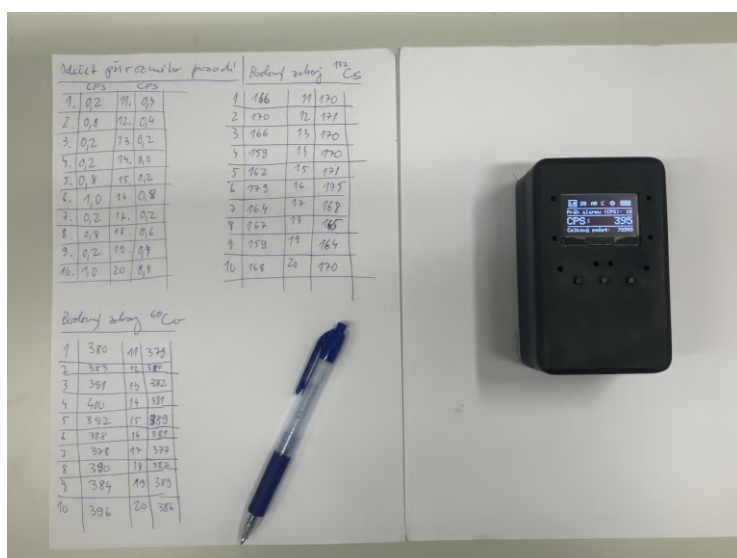
Přístroj je dále kalibrován na plošnou aktivitu ^{90}Sr pomocí příslušného etalonu vyrobeného ČMI. Kalibrace plošné aktivity na ^{60}Co a ^{241}Am se nezdařila, protože dostupné etalony měly příliš nízkou aktivitu. V kombinaci s nízkou detekční účinností detektoru tedy vyvolaly tak nízkou četnost impulzů, že byla téměř srovnatelná s přirozeným pozadí v místě měření, což znemožnilo kalibraci na tyto nuklidy.

Tabulka 3.2: Plošné zdroje typu EZ 1.

Radionuklid	Aktivita [Bq/cm^2]	Odezva [CPS]	Odezva [CPS] – otevřené okénko
^{90}Sr	9,217(72)	3,20(24)	11,85(31)
^{137}Cs	8,846(49)	-----	1,04(18)
^{36}Cl	9,54(13)	-----	1,19(19)

3.6.2 Měření etalonů

Měření plošných etalonů byla realizována položením přístroje na etalon. S každým etalonem bylo provedeno 20 odečtů hodnot. Při měření s přístrojem uloženým v krabici byla odezva dostatečná pouze u etalonu ^{90}Sr . Etalony ^{137}Cs a ^{36}Cl jsem tedy změřil po vyndání přístroje ven z pouzdra (viz podobrázek 3.4 (b)). Tato kalibrace je tedy použitelná s verzí pouzdra s uzavíratelným detekčním okénkem.

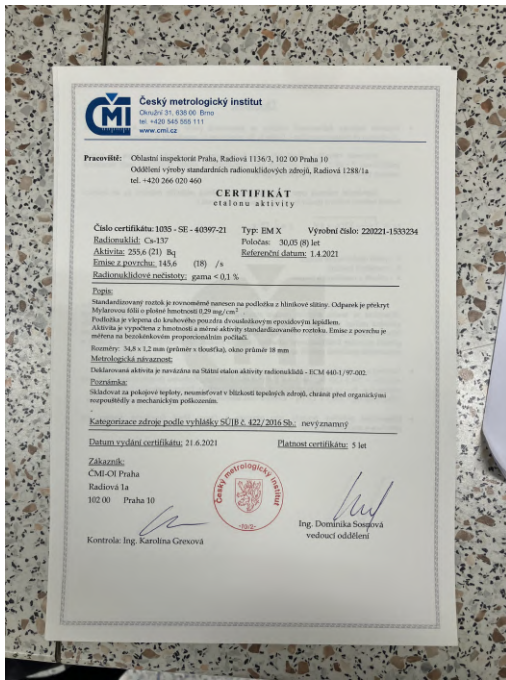


(a) Měření na FJFI.



(b) Měření v ČMI.

Obrázek 3.4: Měření etalonů.

(a) Certifikát etalonu EM X ^{137}Cs .(b) Certifikát etalonu EZ 1 ^{36}Cl .

Obrázek 3.5: Certifikáty etalonů.

3.7 Citlivost a kalibrační koeficienty

Z naměřených dat jsem dále získal hodnoty citlivosti detektoru. Veličina citlivost vyjadřuje, kolik zaznamenaných CPS připadá pro daný nuklid a danou geometrii měření na jeden Bq, tedy

$$C = \frac{N_k}{A_k}. \quad (3.13)$$

N_k | četnost změřená při kalibraci
 A_k | aktivita etalonu

Ze vzorce pro výpočet nejistoty při dělení dvou veličin vyplývá, že nejistota citlivosti u_C je rovna

$$u_C = C \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{N_k}}{N_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{A_k}}{A_k}\right)^2}. \quad (3.14)$$

Aby bylo možné v softwaru měřidla vypočítávat aktivitu na základě dosazení měřené četnosti, zavádí se ještě určitý kalibrační faktor k , kterým budeme násobit měřenou četnost. Kalibrační faktor bude roven

$$k = \frac{A_k}{N_k} = \frac{1}{C} \quad (3.15)$$

a výsledný vzorec pro výpočet aktivity využitý v softwaru měřidla tedy bude

$$A = k \cdot N. \quad (3.16)$$

Hodnoty citlivosti na různé radionuklidy a jejich kalibrační koeficienty jsou zaneseny v tabulkách 3.3 a 3.4. Kalibrační koeficienty byly zaokrouhleny na čtyři platná místa.

Tabulka 3.3: Citlivost na různé radionuklidy + kalibrační faktory (aktivita bodového zdroje).

Radionuklid	Citlivost [CPS/Bq]	Kalibrační faktor [kBq/CPS]
^{137}Cs	$5,168(74) \cdot 10^{-4}$	1,935
^{60}Co	$2,327(29) \cdot 10^{-3}$	0,4297
^{241}Am	$2,245(31) \cdot 10^{-4}$	4,454

Tabulka 3.4: Citlivost na různé radionuklidy + kalibrační faktory (plošná aktivita)².

Radionuklid	Citlivost [$\frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$]	Kalibrační faktor [$\frac{\text{Bq/cm}^2}{\text{CPS}}$]	Podmínky
^{90}Sr	0,347(27)	2,882	Uzavřené okénko
^{90}Sr	1,286(36)	0,7776	Otevřené okénko
^{137}Cs	0,118(21)	8,475	
^{36}Cl	$8,1(41) \cdot 10^{-2}$	12,35	

3.8 Linearita odezvy

V realitě závislost odezvy na aktivitě vlivem dalších charakteristik detektoru zpravidla nebývá po celém svém rozsahu zcela lineární. Interakce částice s atomem detektoru v okamžiku, kdy ještě neplynula mrtvá doba vyvolaná předchozí interagující částicí, způsobí nezaznamenání tohoto impulsu. S narůstající četností impulsů tedy dochází k postupnému úpadku odezvy detektoru. Tuto vlastnost je potřeba prozkoumat, protože umožňuje stanovit rozsah, ve kterém měřidlo nepřekračuje maximální dovolenou chybu danou technickou normou ČSN EN 60325. Dále díky ní můžeme závest korekci měřených četností podle mrtvé doby.

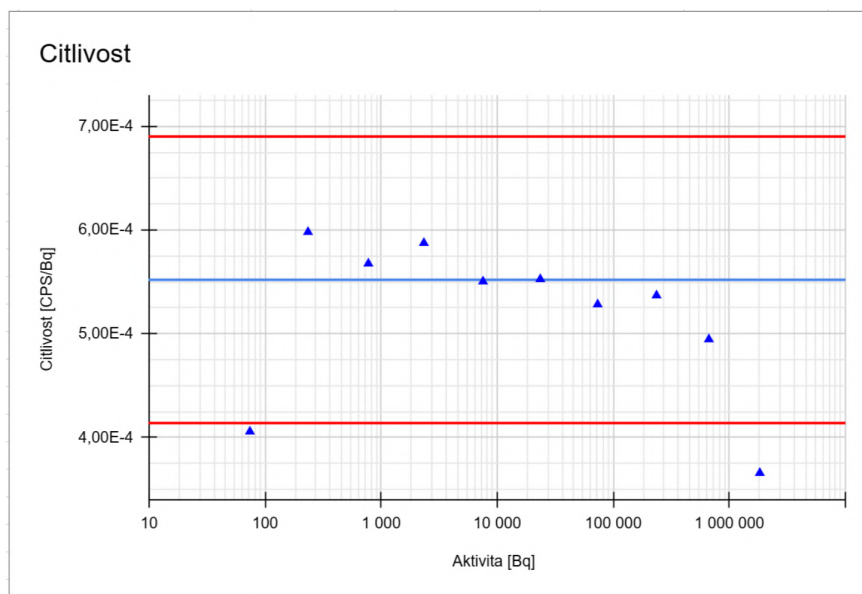
Tabulka 3.5: Sada bodových zdrojů ^{137}Cs typu EM X pro měření linearitu odezvy + naměřená data.

Aktivita	73,93(56) Bq	234,1(20) Bq	775,1(63) Bq	2,322(20) kBq	7,540(68) kBq
Odezva	0,030(88) CPS	0,14(11) CPS	0,44(12) CPS	1,37(14) CPS	4,15(18) CPS
Aktivita	23,47(22) kBq	73,27(67) kBq	235,6(24) kBq	665,8(62) kBq	1,828(20) MBq
Odezva	12,97(38) CPS	38,71(73) CPS	126,5(11) CPS	329,4(16) CPS	668,9(13) CPS

V zájmu zjištění linearitu odezvy detektoru bylo provedeno měření se sadou radionuklidových etalonů ^{137}Cs typu EM X s různými aktivitami. Naměřené hodnoty jsou zaneseny v tabulce číslo 3.5. Měření se uskutečnilo na Oblastním inspektorátu ČMI v Praze na oddělení legální metrologie veličin

²Citlivosti a kalibrační faktory při otevřeném okénku jsou relevantní samozřejmě pouze pro verzi krabičky s uzavíratelným detekčním okénkem.

ionizujícího záření. Naměřená data mi umožnila sestavit graf citlivosti detektoru napříč různými intenzitami záření (obrázek 3.6). V grafu je na ose aktivity užito logaritmické měřítko, modrá přímka vyznačuje průměr³ citlivosti $\bar{C}$, červené ohraničují oblast maximální dovolené chyby 25 % dané technickou normou ČSN EN 60325 [39]. Z grafu vyplývá, že do oblasti nepřekračující maximální dovolenou chybu spadá většina měřených bodů.



Obrázek 3.6: Citlivost detektoru (¹³⁷Cs).

Z tabulky a grafu je patrné, že citlivost detektoru není nijak zvláště vysoká, pohybuje se v řádu desetitísíc CPS/Bq. To je bohužel charakteristickou vlastností Geigerových-Müllerových detektorů, která je dána především jeho náplní, tedy plynem s nízkou hustotou. V tomto ohledu tato metoda zůstává za jinými způsoby detekce ionizujícího záření, kdy detektor často tvoří pevná látka (například polovodič či scintilátor).

Tabulka 3.6: Hodnoty citlivosti detektoru napříč různými aktivitami (¹³⁷Cs).

Aktivita	Odezva [CPS]	Citlivost [CPS/Bq]	Odchylka od $\bar{C}$
73,93(56) Bq	0,030(88)	$4(12) \cdot 10^{-4}$	26,5 %
234,1(20) Bq	0,14(11)	$6,0(47) \cdot 10^{-4}$	8,33 %
775,1(63) Bq	0,44(12)	$5,7(16) \cdot 10^{-4}$	2,83 %
2,332(20) kBq	1,37(14)	$5,87(61) \cdot 10^{-4}$	6,42 %
7,540(68) kBq	4,15(18)	$5,50(24) \cdot 10^{-4}$	0,29 %
23,47(22) kBq	12,97(38)	$5,53(17) \cdot 10^{-4}$	0,11 %
73,27(67) kBq	38,71(73)	$5,28(12) \cdot 10^{-4}$	4,29 %
235,6(24) kBq	126,5(11)	$5,370(71) \cdot 10^{-4}$	2,73 %
665,8(62) kBq	329,4(16)	$4,947(52) \cdot 10^{-4}$	10,4 %
1,828(20) MBq	668,9(13)	$3,659(41) \cdot 10^{-4}$	33,7 %

³Průměr po vyloučení odlehlých bodů.

3.9 Korekce četnosti na mrtvou dobu

Jak již bylo zmíněno, měření četnosti je obzvláště při vyšších intenzitách záření značně narušeno mrtvou dobou detektoru. Zavádí se proto určitá oprava naměřené četnosti impulzů. Abychom ji mohli realizovat, potřebujeme znát délku mrtvé doby detektoru. Tu jsem vypočetl též pomocí dat z měření linearity odezvy. Aktivita jednotlivých etalonů rostou přibližně v násobcích čísla 3. Pro naměřené četnosti by tedy v ideálních podmínkách platil vztah

$$3N_1 = N_2, \quad (3.17)$$

kde N_1 a N_2 jsou měřené četnosti impulzů pro dva po sobě jdoucí etalony. V ideálních podmínkách by dále platilo, že

$$\frac{N}{N_z} = 1, \quad (3.18)$$

kde N_z je měřená (zdánlivá) četnost impulzů a N skutečná četnost interakcí částic nenarušená mrtvou dobou. Ve skutečnosti měřidlo tedy neměří počet impulzů za 1 sekundu, nýbrž za $1 - \tau N_z$ sekund, přičemž τ je mrtvá doba detektoru [40]. Pro poměr skutečné a zdánlivé četnosti tedy platí

$$\frac{N}{N_z} = \frac{1}{1 - \tau N_z}. \quad (3.19)$$

Dosazením do rovnice (3.17) získáváme vztah

$$3 \cdot \frac{N_1}{1 - \tau N_1} = \frac{N_2}{1 - \tau N_2}. \quad (3.20)$$

Vyjádřením mrtvé doby τ získáváme rovnici

$$\tau = \frac{3N_1 - N_2}{2N_1N_2}. \quad (3.21)$$

Dosazením za četnosti N_1 a N_2 získáváme číselnou hodnotu mrtvé doby detektoru τ , zde konkrétně 600 μ s. Opravenou četnost impulzů poté získáme zpětným dosazením do vzorce

$$N = \frac{N_z}{1 - \tau N_z}, \quad (3.22)$$

se kterým mikrokontroler dále operuje a přepočítává zdánlivé četnosti impulzů na skutečné.

3.10 Rozsah intenzity záření

Postupným navyšováním intenzity záření se dostaneme do bodu, kdy křivka závislosti aktivity a CPS začne podle typu detektoru v lepším případě čím dál více směřovat k rovnoběžnosti s osou odpovídající skutečné četnosti. Takový detektor má mrtvou dobu tzv. *nekumulativního typu*.

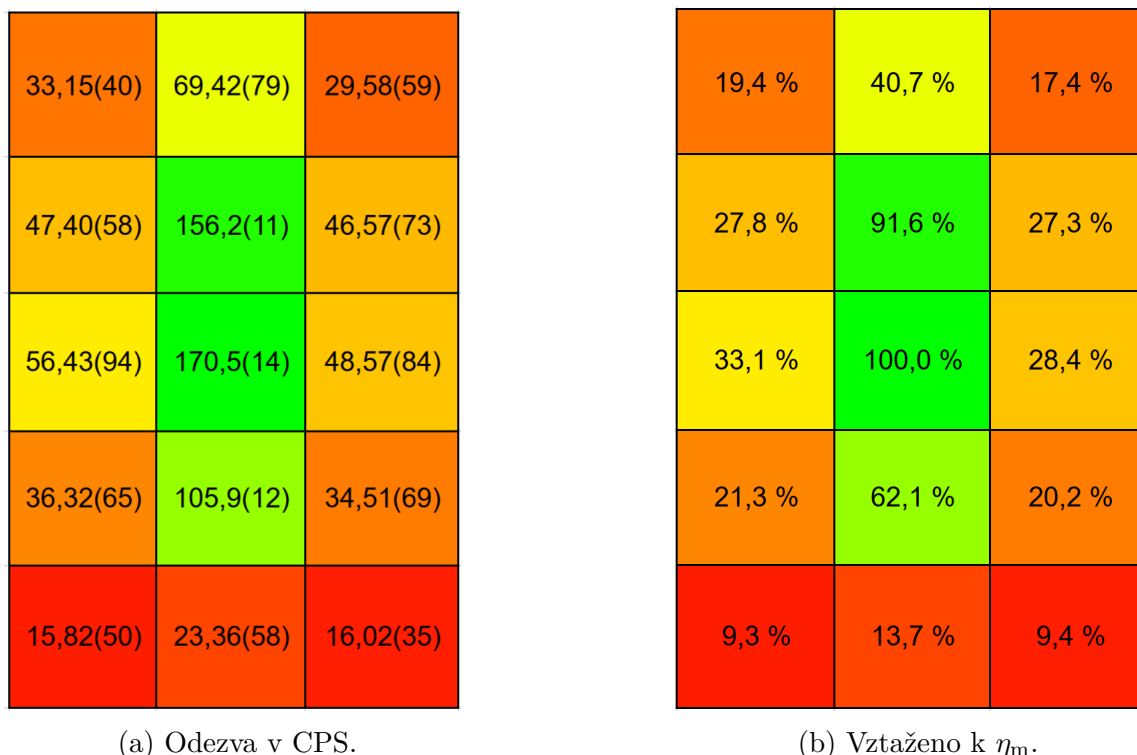
V případě, že daný detektor je detektorem s mrtvou dobou tzv. *kumulativního typu*, může nastat situace, kdy po dosažení bodu saturace detektoru začne docházet k postupnému poklesu měřených CPS. Tato situace může být i potenciálně nebezpečná (například v případě analýzy neznámého zdroje záření), protože ačkoliv přístroj ukazuje například relativně nízkou hodnotu, skutečná úroveň

radiace může být mnohem vyšší. Z tohoto důvodu je přístroje s touto vlastností nutno používat pouze v omezeném rozsahu.

V případě mého detektoru se však kumulativní charakter v měřeném rozsahu neprojevil. Z měření linearity odezvy vyplynula jako nejvyšší možná měřená četnost spadající do regionu linearity 330 CPS (665,8(62) kBq ^{137}Cs). Podle směrnice trendu citlivosti je pravděpodobné, že hranice maximální dovolené chyby 25 % jsou reálně překročeny až někde okolo cca 500 CPS. To však nebylo možné spolehlivě dokázat, protože nebyl k dispozici etalon, pomocí kterého by se dala prověřit přesně tato oblast, tudíž by nebylo správné to s jistotou uvést. Měření dalšího etalonu s vyšší aktivitou (1,828(20) MBq ^{137}Cs) ukázalo, že přístroj je dále schopen detekovat četnost impulzů až do minimálně cca 700 CPS. Reálný rozsah četností může být ve skutečnosti ještě vyšší, nicméně toto nebylo ověřeno.

3.11 Závislost odezvy na poloze

Odezva přístroje závisí též na poloze zdroje záření (bodového zdroje) vzhledem k citlivému objemu detektoru. Radionuklid vycentrovaný na střed detektoru vyvolá v jeho citlivém objemu nejvíce interakcí. Dno přístroje bylo rozčleněno do matice o pěti řádcích a třech sloupcích. Pro stanovení polohové závislosti byl použit etalon ^{137}Cs , nicméně poměrný vztah odezvy v různých místech by měl být pro všechny radionuklidy obdobný.



Obrázek 3.7: Závislost odezvy na poloze zdroje.

Výsledky měření ukazuje obrázek číslo 3.7. Na podobrázku 3.7 (a) je zanesena čistá odezva na etalon, podobrázku 3.7 (b) obsahuje procentuální porovnání odezvy jednotlivých segmentů vzhledem k maximální detekční účinnosti η_m ve středu dna měřidla. Z tohoto testu tedy vyplynulo, že odezva s narůstající vzdáleností od detektoru rapidně klesá. Pro dosažení správnosti měření je tedy přísně nutné umísťovat zdroj záření do středu dna.

3.12 Technické parametry

Maximální četnost (nejvyšší dovolená chyba <25 %)	330 CPS
Nejvyšší ověřená četnost	700 CPS
Měřicí rozsah (aktivita bodového zdroje)	
^{137}Cs	400 Bq – 640 kBq
^{60}Co	100 Bq – 140 kBq
^{241}Am	900 Bq – 1,45 MBq
Měřicí rozsah (plošná aktivita)	
^{90}Sr	0,6 Bq/cm ² – 950 Bq/cm ²
Měřicí rozsah (plošná aktivita – otevřené okénko)	
^{90}Sr	0,2 Bq/cm ² – 250 Bq/cm ²
^{137}Cs	1,7 Bq/cm ² – 2,8 kBq/cm ²
^{36}Cl	2,5 Bq/cm ² – 4 kBq/cm ²
Citlivost na radionuklidy (aktivita bodového zdroje)	
^{137}Cs	$5,168(74) \cdot 10^{-4} \text{ CPS/Bq}$
^{60}Co	$2,327(29) \cdot 10^{-3} \text{ CPS/Bq}$
^{241}Am	$2,245(31) \cdot 10^{-4} \text{ CPS/Bq}$
Citlivost na radionuklidy (plošná aktivita)	
^{90}Sr	$0,347(27) \frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$
Citlivost na radionuklidy (plošná aktivita – otevřené okénko)	
^{90}Sr	$1,286(36) \frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$
^{137}Cs	$0,118(21) \frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$
^{36}Cl	$8,1(41) \cdot 10^{-2} \frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$
Napětí detektoru	440 V
Mrtvá doba detektoru	600 μs
Předpokládaná životnost detektoru (dle [25])	10^9 impulzů
Kapacita akumulátoru	2600 mAh
Jmenovité napětí akumulátoru	7,4 V
Proudová spotřeba	175 mA
Výdrž akumulátoru	15 hodin
Rozměry	115 × 70 × 45 mm
Hmotnost	300 g

Závěr

Práce se zabývala konstrukcí přenosného měřidla ionizujícího záření. Přístroj se ukázal být vhodným především pro měření intenzity záření a aktivity bodového zdroje záření. Je určen pro měření záření o maximální četnosti impulzů 700 CPS. Do oblasti nepřesahující největší dovolenou chybu (25 %) určenou státní normou ČSN EN 60325 spadá měřidlo v rozsahu od cca 400 Bq do 640 kBq (pro bodový zdroj ^{137}Cs). Maximální měřená četnost nevybočující z oblasti linearitu je tedy 330 CPS.

Měřidlo dále může v módu měření plošné aktivity sloužit jako monitor povrchové kontaminace radionuklidy. Ukázalo se, že pro tento účel se v současném stavu hodí méně než pro výše zmíněné. Nízké aktivity plošných etalonů, které jsem měl k dispozici, v kombinaci s nepříliš vysokou detekční účinností Geigerova-Müllerova detektoru vyvolaly nízké četnosti impulzů s poměrně značnými odchylkami mezi jednotlivými měřeními. Kalibrace tedy v tomto případě není tak precizní jako s bodovými zdroji o aktivitách v řádu stovek kBq. Software přístroje však umožňuje snadné doplnění předvolby pro další radionuklidy, tudíž je zde otevřena možnost jakékoliv další kalibrace s jiným etalonem a její zavedení do zdrojového kódu prostřednictvím jednoho z nastavení.

Pro kompenzaci nízké detekční účinnosti Geigerovy-Müllerovy trubice jsem také navrhl verzi pouzdra s detekčním okénkem, plastové dno totiž stíní detektor před značnou částí záření beta. Při měření bez pouzdra přístroje došlo ke znatelnému nárůstu citlivosti na některé beta-emitující nuklidy. Jiným vylepšením by mohlo být například zapojení několika Geigerových-Müllerových trubic (paralelně na výstup měniče napětí, případně pro větší preciznost každou s vlastním řetězcem úpravy signálu), což by však vyžadovalo rozsáhlejší úpravy a pozměnění celé fyzické i elektronické koncepce měřidla. Vlastnostem měřidla by též rozhodně prospěla výměna současné detekční trubice za jiný, kvalitnější typ. Použitá trubice J304 je přeci jen stále výrobek pro spíše amatérské využití a nelze tak od ní očekávat excelentní vlastnosti. V rámci SOČ však bylo nutné spokojit se s touto, nicméně navržená elektronika přístroje je schopna pracovat s víceméně jakoukoliv samozhášecí trubicí provozovanou na daném napětí.

Celý přístroj jsem navrhl tak, aby bylo možné ho z velké části vyrobit průmyslově a jeho následná kompletace do provozuschopného stavu vyžadovala pouze několik ručně prováděných úkonů. To by případně mohlo usnadnit jeho teoretické zavedení do sériové výroby. Snažil jsem se dosáhnout co nejmenších možných rozměrů, což se poměrně vydařilo a přístroj je tedy možno označit a využívat jako lehké kapesní měřidlo. Této koncepci napomáhá i poměrně nízká pořizovací cena. Takovýto přístroj by tak mohl najít uplatnění na různých pracovištích se zdroji záření. Může se tedy jednat například o zdravotnická zařízení (při výrobě a manipulaci s radiofarmaky), jaderná energetická zařízení, průmyslové aplikace záření, pracoviště s defektoskopickými zářiči či výzkumný sektor. Nabízí se též možnost využití ve školství například formou zhotovení výukové stavebnice na základě mého návrhu, kde by mohly být odděleně zhotoveny plošné spoje s jednotlivými funkčními celky pro výuku a zajímavé podání principů detektorů ionizujícího záření a obecně popularizaci oboru. Při kalibraci

zařízení byly použity standardizované prostředky i postupy, tudíž lze přístroj za daných podmínek, v dané měřicí geometrii, v daném rozsahu a s danou přesností považovat za spolehlivé měřidlo.

Před započítím konstrukce bylo zapotřebí, abych se s pomocí literatury a dalších zdrojů v oboru elektronika příslušně dovzdělal, protože na mé škole (víceleté gymnázium) se toto zaměření nevyučuje. Během práce se však ukázalo, že konstrukce takového to měřidla obnáší nutnost zapojení několika oborů, práce byla tedy zajímavým propojením elektroniky, fyziky a informatiky. Myslím si tedy, že práce pro mě byla zajímavým vhledem do této problematiky, velmi mě inspirovala k dalšímu zájmu o elektroniku měřidel ionizujícího záření. Na práci bych chtěl určitě nějakým způsobem navázat i v budoucnu při studiu na vysoké škole.

Použitá literatura

- [1] KNOLL, Glenn. *Radiation Detection and Measurement* [online]. Třetí vydání. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. ISBN 0-471-07338-5. Dostupné z https://www.fisgeo.unipg.it/~fiandrin/didattica_fisica/rivelatori1617/bibliografia/Radiation%20detection%20and%20measurement_knoll.pdf.
- [2] Western Oregon University. Allied Health Chemistry. *Radioactivity and Nuclear Chemistry* [online]. Monmouth: Western Oregon University [citováno 15.12. 2024]. Dostupné z <https://wou.edu/chemistry/courses/online-chemistry-textbooks/ch103-allied-health-chemistry/ch103-chapter-3-radioactivity/>.
- [3] L'ANNUNZIATA, Michael F. et al. *Handbook of Radioactivity Analysis*. Třetí vydání. Amsterdam: Elsevier, 2012. ISBN 978-0-12-384873-4.
- [4] HÁLA, Jiří. *Radioaktivita, ionizující záření, jaderná energie*. První vydání. Brno: Konvoj, 1998. ISBN 80-85615-56-8.
- [5] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04710-1.
- [6] Nuclear Power. *Geiger-Müller tube – Geiger Chamber* [online]. Nuclear Power, 2024 [citováno 18.12. 2024]. Dostupné z <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/gaseous-ionization-detector/geiger-counter-geiger-mueller-detector/geiger-muller-tube-geiger-chamber/>.
- [7] GILMORE, Gordon R. *Practical gamma-ray spectrometry* [online]. Druhé vydání. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-86196-7. Dostupné z <https://nna1989.files.wordpress.com/2015/05/gordon-gilmore-practical-gamma-ray-spectroscopy-2008.pdf>.
- [8] Texas Instruments. *LM2574x SIMPLE SWITCHER® 0.5-A Step-Down Voltage Regulator* [online]. Dallas: Texas Instruments, 1999, revidováno 2020 [citováno 3.10. 2024]. Dostupné z <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2574.pdf>.
- [9] ČSN 33 0010 ED.2. *Elektrická zařízení - Rozdělení a pojmy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 8 stran. Třídící znak 330010.
- [10] SILVER, H. Ward et al. *The ARRL Handbook For Radio Communications* [online]. Devadesáté druhé vydání. Newington: The National Association for Amateur Radio, 2015. ISBN 978-1-62595-019-2. Dostupné z <https://datassette.org/livros/us-estados-unidos-eletronica-diversos-livros/arrl-handbook-2015>.

- [11] MITCHELL, Collin. *50 555 Circuits* [online]. Dostupné z <https://www.talkingelectronics.com/projects/50%20-%20555%20Circuits/50-555Circuits.pdf>.
- [12] LUTZ, Gerhard. *Semiconductor Radiation Detectors*. První vydání. Berlin: Springer, 1999. ISBN 978-3-540-71678-5.
- [13] Hamamatsu. *Characteristics and Use of Charge Amplifier* [online]. Hamamatsu: Hamamatsu, 2001 [citováno 22.10. 2024]. Dostupné z https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/charge_amp_kacc9001e.pdf.
- [14] FIORE, James M. *Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits: Theory and Application* [online]. Třetí vydání. Mohawk Valley: James M. Fiore, 2021. ISBN 978-1796856897. Dostupné z https://www2.mvcc.edu/users/faculty/jfiore/OpAmps/OperationalAmplifiersAndLinearICs_3E.pdf.
- [15] MUNI. *Časovač 555* [online]. Dostupné z https://is.muni.cz/el/sci/jaro2015/F2400/um/Casovac_555.pdf.
- [16] Fyzikální kabinet. Moduly ESP32 a ESP32-CAM. *ESP32 – Jak používat GPIO piny* [online]. Fyzikální kabinet, 2024 [citováno 2.11. 2024]. Dostupné z <http://kabinet.fyzika.net/ESP32/ESP32-gpio/vstupy-a-vystupy-ESP32.php>.
- [17] GM Electronic. Optosoučástky a LED diody. *7511LB7D-SB LED oválná modrá* [online]. GME, 2024. Dostupné z <https://www.gme.cz/v/1494652/7511lb7d-sb-led-ovalna-modra>.
- [18] GM Electronic. Optosoučástky a LED diody. *7511MR2D LED oválná červená* [online]. GME, 2024. Dostupné z <https://www.gme.cz/v/1494653/7511mr2d-led-ovalna-cervena>.
- [19] Texas Instruments. *A Basic Guide to I²C* [online]. Dallas: Texas Instruments, 2022, [citováno 5.11. 2024]. <https://www.ti.com/lit/an/sbaa565/sbaa565.pdf?ts=1731039180385>.
- [20] GM Electronic. Ochrany baterií – moduly. *Ochranný modul Li-ion/pol 2S 7,4V/3A* [online]. GME, 2024. Dostupné z <https://www.gme.cz/v/1508284/ochranny-modul-li-ion-pol-2s-74v-3a>.
- [21] GAMMA-SCOUT GmbH & Co. KG. *Manual GAMMA-SCOUT Standard* [online]. Schriesheim: GAMMA-SCOUT GmbH, 2015 [citováno 10.11. 2024]. Dostupné z https://www.radonshop.com/mediafiles/Anleitungen/Strahlung/GAMMA-SCOUT_Standard/GAMMA-SCOUT_Standard_ManualEN.pdf.
- [22] *Detektory i sčítáči β -izlučenja*. Dostupné z https://lampes-et-tubes.info/rd/Russian_Detectors_and_Counters_1.pdf.
- [23] IoT-devices. *Geiger-Muller tubes: Comparison of SBM20, J305 and LND712* [online]. Kyjev: IoT-devices, 2023 [citováno 15.11. 2024]. Dostupné z https://iot-devices.com.ua/en/comparison-of-geiger-muller-tubes-sbm20-j305-and-lnd712/?srsltid=AfmBOoBBWEf8JnBUHhg4N_nIv0xRcAsIdL06-ZNnIJ84fqXT9v0KK.

- [24] Radu Motisan. PocketMagic. *Tube: SBM-20 Geiger tube* [online]. Timisoara: Radu Motisan, 2013 [citováno 21.11. 2024]. Dostupné z <https://www.pocketmagic.net/tube-sbm-20-%D1%81%D0%B1%D0%BC-20-geiger-tube/>.
- [25] Giorgio Basile. Lampes & Tubes. *J304 β γ Geiger-Müller Counter Tube* [online]. Nivelles: Giorgio Basile. Dostupné z <https://lamps-et-tubes.info/rd/rd041.php?l=f>.
- [26] HWKITCHEN. *Arduino NANO originál* [online]. HWKITCHEN, 2024. Dostupné z <https://www.hwkitchen.cz/arduino-nano-original/>.
- [27] DHGate. *ESP32 Development Board WiFi+Bluetooth* [online]. DHGate, 2024. Dostupné z <https://www.dhgate.com/product/new-1pcs-esp32-development-board-wifi-bluetooth/970115742.html?skuId=1244793969145679882>.
- [28] Arduino. *Product Reference Manual* [online]. Ivrea: Arduino, 2024 [citováno 2.12. 2024]. Dostupné z <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>.
- [29] Espressif. *ESP32 Series Datasheet* [online]. Shanghai: Espressif, 2024 [citováno 2.12. 2024]. Dostupné z https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.
- [30] Westinghouse. *18650 2600 mAh Specification Approval Sheet*. Cranberry Township: Westinghouse, 2019 [citováno 3.12. 2024]. Dostupné z https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/11/540-583/dsh.540-583.1.pdf.
- [31] Winstar. *Comparison of OLED / STN LCD / VFD* [online]. Tchaj-čung: Winstar, 2024 [citováno 5.12. 2024]. Dostupné z <https://www.winstar.com.tw/technology/oled/4.html>.
- [32] Mateusz Mróz. Botland. *TFT displej – Co je to a k čemu se používá?* [online]. Botland, 2024 [citováno 5.12, 2024]. Dostupné z <https://botland.cz/blog/tft-displej-co-je-to-a-k-cemu-se-pouziva/>.
- [33] ČMI. *Katalog výrobků ČMI - oblastní inspektorát Praha* [online]. Praha: ČMI [cit. 12.12. 2024]. Dostupné z https://cmi.gov.cz/sites/all/files/public/download/katalog_cz.pdf.
- [34] LEBLOND, S. *Cs-137* [online]. Saclay: LNHB, 2021 [citováno 14.12. 2024]. Dostupné z http://www.lnhb.fr/nuclides/Cs-137_tables.pdf.
- [35] HELMER, R. G. *Co-60* [online]. Saclay: LNHB, 1998 [citováno 14.12. 2024]. Dostupné z http://www.lnhb.fr/nuclides/Co-60_tables.pdf.
- [36] CHECHEV, V. P. a N. K. KUZMENKO. *Am-241* [online]. Saclay: LNHB, 2000 [citováno 14.12. 2024]. Dostupné z http://www.lnhb.fr/nuclides/Am-241_tables.pdf.
- [37] FS ČVUT. *Chyby a nejistoty měření* [online]. Dostupné z [https://www.fs.cvut.cz/content/files/12102/2024chybyanejistoty\(3\).pdf](https://www.fs.cvut.cz/content/files/12102/2024chybyanejistoty(3).pdf).

- [38] NOVOTNÝ, Pavel. *Prezentace k přednáškám: metrologie ionizujícího záření – nejistoty měření* [online]. Praha: FJFI, 2024.
- [39] NOVOTNÝ, Pavel. *Prezentace k přednáškám: metrologie ionizujícího záření – ověřování a kalibrace* [online]. Praha: FJFI, 2024.
- [40] HÁLA, Jiří et al. *Cvičení z jaderné chemie* [online]. Brno: MUNI, 2007 [citováno 7.3. 2025]. Dostupné z https://is.muni.cz/el/sci/jaro2017/C6020/um/Skripta_v15.pdf.

Seznam obrázků

1.1	Základní typy radioaktivních přeměn	2
1.2	Voltampérová charakteristika plynových detektorů	4
1.3	Obecné schéma zapojení detekčního přístroje.	5
2.1	Fotografie měřidla.	7
2.2	Ukázka z uživatelského rozhraní.	8
2.3	Výběr radionuklidu.	9
2.4	Nastavení.	9
2.5	Nastavení.	9
2.6	3D model krabičky s detekčním okénkem.	10
2.7	Vývoj elektroniky.	11
2.8	Vývoj elektroniky.	12
2.9	Finální verze – rozložený přístroj.	12
2.10	Blokové schéma celého přístroje.	13
2.11	Schéma zapojení elektroniky přístroje.	14
2.12	Schéma napěťových úrovní.	15
2.13	Schéma zapojení spínaného stabilizátoru napětí 3,3 V.	15
2.14	Doporučená indukčnost cívky 3,3V stabilizátoru	16
2.15	Schéma zapojení spínaného stabilizátoru napětí 5 V.	17
2.16	Schéma zapojení step-up měniče napětí 440 V.	17
2.17	Zapojení integrovaného obvodu 555	18
2.18	Spínací frekvence.	19
2.19	Zapojení Geigerovy-Müllerovy trubice na napětí 440 V.	19
2.20	Porovnání fází úpravy impulzů.	20
2.21	Zapojení proudového integrátoru.	21
2.22	Zapojení neinvertujícího zesilovače pulzního signálu.	23
2.23	Diskriminátor falešných pulzů.	23
2.24	Unifikátor pulzů.	24
2.25	Probíhající osciloskopické pozorování.	26
2.26	Schéma zapojení MCU, prvků odezvy a uživatelského rozhraní.	27
2.27	Zapojení akumulátorů.	29
2.28	Ochrana a balancér napětí akumulátorů	29
2.29	Geigerova-Müllerova trubice J304	31
2.30	Potenciálně vhodné vývojové desky.	31
2.31	Desky plošných spojů.	33

2.32	Přizpůsobení cest a rozložení na desce.	34
2.33	Probíhající design DPS.	34
2.34	Adaptér GM trubice.	35
2.35	Fotografie krabiček.	36
2.36	Probíhající design krabičky.	36
3.1	Osciloskopické přístroje užité během tvorby práce.	41
3.2	Stabilita napětí na detektoru.	42
3.3	Etalony aktivity bodového zdroje.	45
3.4	Měření etalonů.	46
3.5	Certifikáty etalonů.	47
3.6	Citlivost detektoru (^{137}Cs).	49
3.7	Závislost odezvy na poloze zdroje.	51

Seznam tabulek

2.1	Přehled zkratk možností rychlé nabídky.	8
2.2	Přehled k obrázkům s porovnáním průběhu signálů jednotlivých fází úpravy.	21
2.3	Parametry LED	27
2.4	Parametry potenciálně vhodných GM trubic.	30
2.5	Parametry potenciálně vhodných MCU.	32
2.6	Zapojení vývodů revizní lišty.	35
2.7	Popis činnosti dílčích funkcí.	39
3.1	Bodové zdroje typu EG 3.	45
3.2	Plošné zdroje typu EZ 1.	46
3.3	Citlivost na různé radionuklidy + kalibrační faktory (aktivita bodového zdroje).	48
3.4	Citlivost na různé radionuklidy + kalibrační faktory (plošná aktivita).	48
3.5	Sada etalonů typu EM X pro měření linearitu odezvy + naměřená data.	48
3.6	Hodnoty citlivosti detektoru napříč různými aktivitami (^{137}Cs).	49

Příloha – seznam součástek

Zkratka	Typ součástky	Hodnota	Označení prodejce
AKU1, AKU2	Li-Ion akumulátor	2600 mAh	INR18650 2600
B, BM, P+, P-	kolíková lišta 2 piny	- - - - -	RE-H022TD-1190(LF)(SN)
BAL	modul balanceru	- - - - -	Ochrana Li-Ion 2S 3A
C1, C4	elektrolytický kondenzátor	100 μ F	EEEF1V101AP
C2, C5, C13, C18	keramický kondenzátor	10 nF	CL21B103KBANNNC
C3, C6	elektrolytický kondenzátor	470 μ F	EEEF1A471AP
C7	keramický kondenzátor	330 pF	CL10C331JB8NNNC
C8	keramický kondenzátor	470 nF	CL10B474KA8NNNC
C9	keramický kondenzátor	33 nF	NV1210B333K102CEGN
C10	keramický kondenzátor	3,9 nF	0603B392K500NT
C11	keramický kondenzátor	180 pF	CC0603JRNPO9BN181
C12	keramický kondenzátor	100 nF	CL05B104KB54PNC
C14, C15, C16	keramický kondenzátor	1 μ F	CL10A105KB8NNNC
C17	tantalový kondenzátor	10 μ F	TAJA106K016RNJ
D1, D2	Schottkyho dioda	- - - - -	1N5819WS S4
D3	rychlá dioda	- - - - -	US1MDF-13
DC1	DC konektor	- - - - -	Z-DC00R02P-2000
DIAGNOSTIKA1	kolíková lišta 12 pinů	- - - - -	2541WV-12P
IC1	spínaný stabilizátor napětí	5 V	LM2574MX-5.0/NOPB
IC2	spínaný stabilizátor napětí	3,3 V	LM2574MX-3.3/NOPB
IC3, IC6	CMOS časovač 555	- - - - -	ICM7555IBAZ-T
IC4	operační zesilovač	- - - - -	LM324ADR
IC5	komparátor	- - - - -	TLC372CDR
L1, L2	cívka	470 μ H	FHW1812IF471KST
L3	výkonová cívka	1 mH	YNR6028-102M
LED1	elektroluminiscenční dioda	470 lm	7511LB7D-SB
LED2	elektroluminiscenční dioda	625 lm	7511MR2D
MCU	mikrokontroler	- - - - -	ESP-32S, 2.4GHz Dual-Mode
DISPLEJ	modul OLED displeje	- - - - -	SSD1309 I2C 1.54
R1, R8, R9	tlustovrstvý rezistor	1 k Ω	0603WAF1001T5E

Zkratka	Typ součástky	Hodnota	Označení prodejce
R2, R3, R4, R5	tlustovrstvý rezistor	10 M Ω	HV05W8J0106T5E
R6	tlustovrstvý rezistor	1 k Ω	0402WGF1001TCE
R7	tlustovrstvý rezistor	10 k Ω	0805W8F1002T5E
R10	tlustovrstvý rezistor	2 k Ω	RTT032001FTP
R11, R18	tlustovrstvý rezistor	1 M Ω	0603WAF1004T5E
R12	tlustovrstvý rezistor	47 k Ω	0805W8F4702T5E
R13, R14	tlustovrstvý rezistor	500 Ω	ARG05BTC5000
R15	tlustovrstvý rezistor	5,1 Ω	0603WAF510KT5E
R16	tlustovrstvý rezistor	68 Ω	0603WAF680JT5E
R17	tlustovrstvý rezistor	2 M Ω	0805W8F2004T5E
R19, R20, R21	tlustovrstvý rezistor	510 Ω	0603WAF5100T5E
SPKR1, SPKR2	piezoelektrický reproduktor	4,1 kHz, 77 dB	KPEG242
SW1	posuvný přepínač	-----	SK-22D02-G5
SW1, SW2, SW3	tlačítko	-----	TS-1002S-09026C
SW4	posuvný přepínač	-----	MS-12D16G2-B
T1	tranzistor N-MOSFET	-----	IPD60R800CE
T2	bipolární tranzistor	-----	BC547B
TEMP	teplotní čidlo	-----	TMP36GT9Z(UMW)
TRIM1	cermetový trimr	500 k Ω	3362P-1-504
TVS1	bipolární transil	440 V	P6KE440CA

Další součástky

Funkce	Součástka
detektor	Geigerova-Müllerova trubice J304
úchyt detektoru	objímka E10
sloupky mezi DPS	dutinkové a kolíkové lišty (2 piny)
držáky akumulátorů	BH-18650-A6AJ002

Příloha – datasheet

Měřidlo ionizujícího záření

Specifika

- Lehké přenosné měřidlo záření **beta a gama**
- Možnost **měření 3 veličin**
 - Δ Absolutní četnost impulzů (CPS)
 - Δ Aktivita bodového zdroje (kBq)
 - Δ Plošná aktivita (Bq/cm²)
- Kalibrováno pomocí **etalonů vyráběných ČMI** (navázaných na státní etalony)
- Uzavíratelné **detekční okénko**
- Možnost **odečtu radiačního pozadí**
- Indikace poruchy a překročení rozsahu
- Možnost volby způsobu odečítání hodnot
 - Δ Průměr v intervalu 5 s
 - Δ Klouzavý průměr
- **Korekce** měřených četností
- Důraz na elektronickou úpravu pulzního signálu



Obrázek 1: Fotografie měřidla.

Další vlastnosti a funkce

- Uživatelsky přívětivé grafické menu
- Intuitivní ovládání pomocí tří tlačítek
- Indikace stavu baterie
- Měření teploty uvnitř přístroje
- Možnost výběru jazyka rozhraní (český/anglický)

Přístroj je opatřen displejem typu OLED, který vyniká výborným kontrastem, širokým pozorovacím úhlem a čitelností i za zhoršených světelných podmínek bez nutnosti podsvícení.

Informace o radiačním poli uživateli dále poskytuje optická i akustická signalizace četnosti impulzů a alarm s nastavitelným prahem (1–700 CPS).

Detektor

- Geigerova-Müllerova trubice *J304*
- Měřicí rozsah <700 CPS

Kalibrace

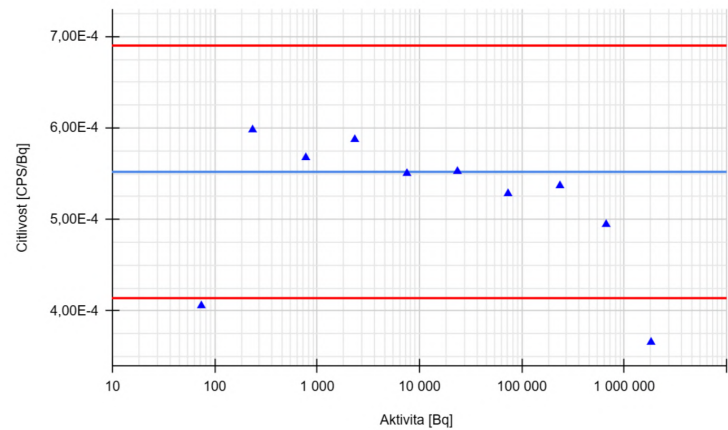
- Aktivita bodového zdroje
 - Δ ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ²⁴¹Am
- Plošná aktivita
 - Δ ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³⁶Cl
- Možnost uživatelské kalibrace
 - Δ Doplnění předvolby přes rozhraní

Radiační charakteristika

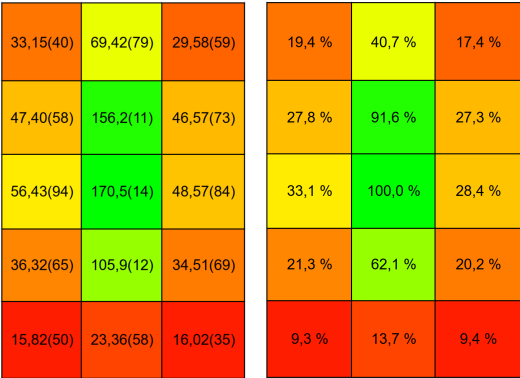
Tabulka 1: Citlivost detektoru.

Veličina	Radionuklid	Hodnota	Jednotka	Podmínky
Aktivita bodového zdroje	¹³⁷ Cs	5,168(74) · 10 ⁻⁴	CPS/Bq	Uzavřené okénko
	⁶⁰ Co	2,327(29) · 10 ⁻³	CPS/Bq	
	²⁴¹ Am	2,245(31) · 10 ⁻⁴	CPS/Bq	
Plošná aktivita	⁹⁰ Sr	0,347(27)	$\frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$	Uzavřené okénko
Plošná aktivita ¹	⁹⁰ Sr	1,286(36)	$\frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$	Otevřené okénko
	¹³⁷ Cs	0,118(21)	$\frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$	
	³⁶ Cl	8,1(41) · 10 ⁻²	$\frac{\text{CPS}}{\text{Bq/cm}^2}$	

¹ Relevantní pouze pro verzi s detekčním okénkem.



Obrázek 2: Graf citlivosti detektoru napříč různými aktivitami (¹³⁷Cs).



Obrázek 3: CPS Obrázek 4: % η_m

Poznámky: Modrá přímka uprostřed grafu na obrázku číslo 2 značí průměr citlivosti (odlehle body nejsou v průměru zahrnuty). Dvojice červených přímek ohraničuje oblast, ve které měřidlo nepřekračuje *nejvyšší dovolenou chybu* 25 % danou technickou normou ČSN EN 60325. V tomto rozsahu je tedy možné jeho odezvu považovat za lineární. Nejvyšší ověřená četnost prokazatelně nepřekračující meze nejvyšší dovolené chyby je 330 CPS. Linearita odezvy byla zkoumána pomocí sady etalonů ¹³⁷Cs s různými aktivitami typu EM X, pro každý další radionuklid bude odezva měřidla v daném rozsahu též lineární.

Citlivost přístroje též závisí na poloze zdroje záření. Obrázek číslo 3 srovnává odezvu různých částí dna přístroje na etalon aktivity bodového zdroje ¹³⁷Cs. Na obrázku číslo 4 je zanesen poměrný vztah vzhledem k maximální detekční účinnosti η_m ve středu dna měřidla. Správným postupem při měření aktivity bodového zdroje je tedy vycentrování radionuklidu na střed přístroje.

Maximální četnost impulsů je 700 CPS, při překročení maximální četnosti přístroj zobrazuje varovné hlášení. V rozsahu, ve kterém byla ověřována linearita odezvy, se kumulativní charakter mrtvé doby neprojevil. Pokud přístroj po dobu jedné minuty nezaznamená žádné impulsy, dá se očekávat potenciální porucha některé části elektronické instrumentace měřidla a je tedy zobrazeno varovné hlášení.

Tabulka 2: Měřicí rozsah.

Veličina	Radionuklid	Spodní hranice	Jednotka	Horní hranice	Jednotka
Aktivita bodového zdroje	¹³⁷ Cs	400	Bq	640	kBq
	⁶⁰ Co	100	Bq	140	kBq
	²⁴¹ Am	900	Bq	1,45	MBq
Plošná aktivita	⁹⁰ Sr	0,6	Bq/cm ²	950	Bq/cm ²
Plošná aktivita ¹	⁹⁰ Sr	0,2	Bq/cm ²	250	Bq/cm ²
	¹³⁷ Cs	1,7	Bq/cm ²	2,8	kBq/cm ²
	³⁶ Cl	2,5	Bq/cm ²	4	kBq/cm ²

¹ Relevantní pouze pro verzi s detekčním okénkem.

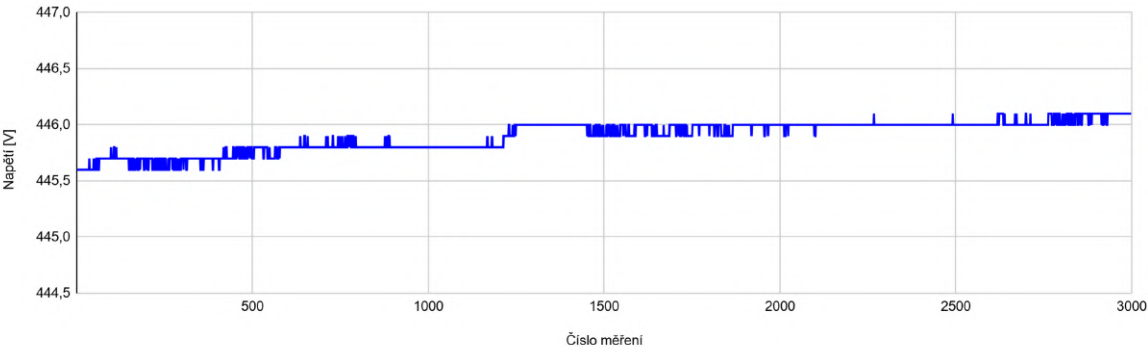
Elektrické vlastnosti

Tabulka 3: Vybrané elektrické vlastnosti měřidla.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Napětí detektoru	440	V
Mrtvá doba detektoru	600	µs
Předpokládaná životnost detektoru	10 ⁹	imp.
Kapacita akumulátoru	2600	mAh
Jmenovité napětí akumulátoru	7,4	V
Proudová spotřeba ¹	175	mA
Výdrž akumulátoru	15	h

¹ Při radiační zátěži zdrojem záření, který v citlivém objemu detektoru vyvolal 50 CPS.

Obrázek 5 ukazuje průběh napájecího napětí detektoru po dobu 50 minut. Jeho stabilita je zásadní z hlediska udržení stejné detekční účinnosti detektoru v průběhu času.

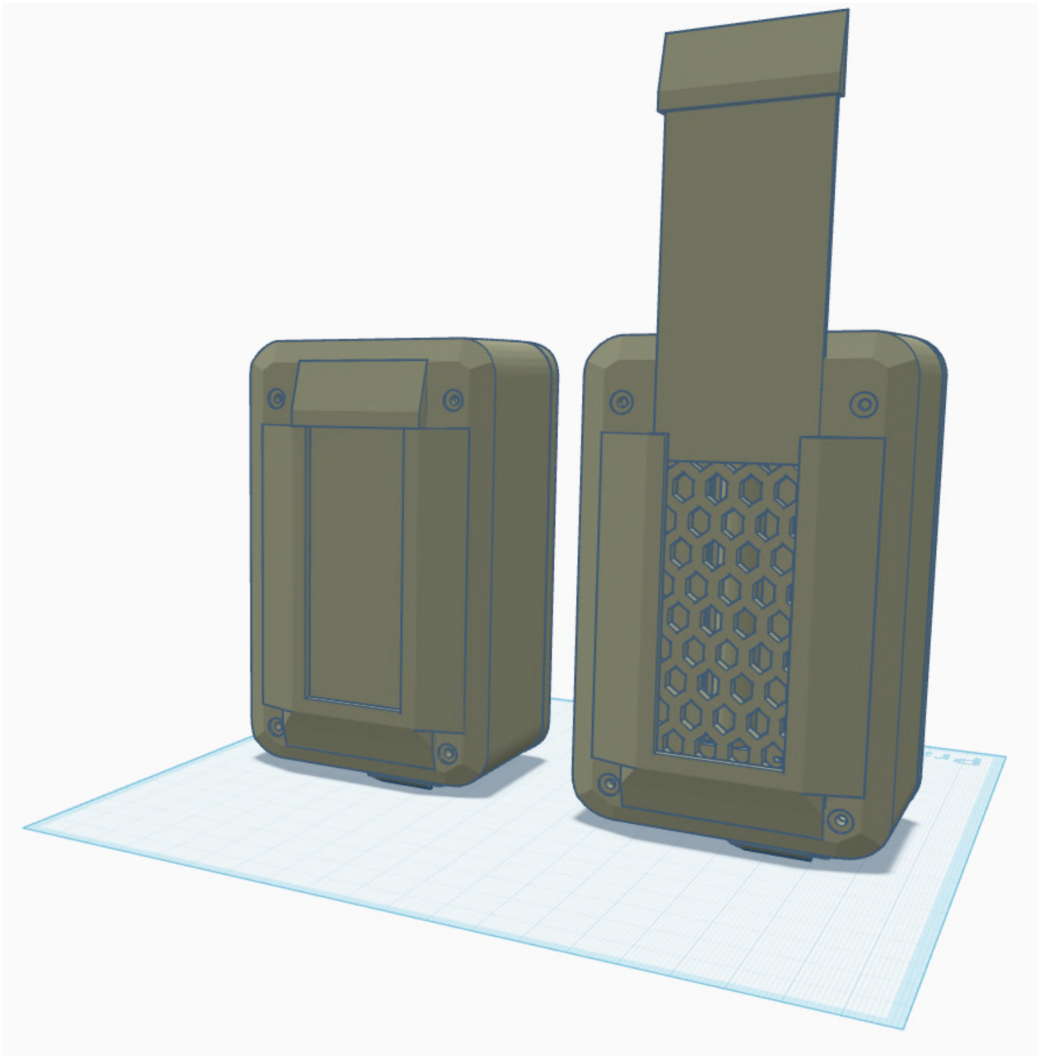


Obrázek 5: Stabilita pracovního napětí detektoru.

Mechanické vlastnosti

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti přístroje.

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výška	115	mm
Šířka	70	mm
Hloubka	45	mm
Hmotnost	300	g



Obrázek 6: Detekční okénko.