

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroniky a informačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Detekce ionizujícího záření s využitím PIN diod

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš MULÁK**
Osobní číslo: **E18B0022P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Téma práce: **Detekce ionizujícího záření s využitím PIN diod**
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

Zásady pro vypracování

1. Popište princip použití PIN diod pro detekci ionizujícího záření.
2. Zvolte některou z potencionálně vhodných komerčně dostupných PIN diod a navrhnete zapojení, umožňující její využití jako detektoru ionizujícího záření.
3. Navržené zapojení zrealizujte a otestujte.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhnete případné možnosti zlepšení.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

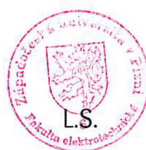
Seznam doporučené literatury:

1. Knoll, Glenn F. Radiation Detection and Measurement, 4th ed. 2010. 978-0-470-13148-0.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Urban**
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Dodatek k zadání Bakalářské práce

Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení sev intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Původní znění bodu 3 zadání práce:

3. Navržené zapojení zrealizujte a otestujte.

Nové znění bodu 3 zadání práce:

3. Navržené zapojení zrealizujte a otestujte, případně proved'te simulaci obvodu.

V Plzni dne 6.4.2021



Vedoucí práce:

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 29.3.2021



Student:

V Plzni dne



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Cílem práce bylo prostudování principu detekce ionizujícího záření s použitím polovodičových PIN diod, výběr vhodných komerčně dostupných PIN diod a návržení zapojení, schopného ionizující záření detekovat. Komerčně dostupné detektory ionizujícího záření bývají drahé a složité, alternativou pro tyto drahé, ale přesné detektory je levný, čistě elektronický a jednoduchý detektor, schopný uživatele informovat o dopadajícím ionizujícím záření. Zařízení bylo navrženo na napájení z USB konektoru a zpracování elektrického signálu vytvářeného na PIN diodě pomocí nábojového zesilovače, registrování signálu vnějším přerušením mikrokontroléru a signalizaci pomocí připojeného počítače nebo LED na DPS. Podle provedených simulací lze usoudit, že nábojový zesilovač je schopný zesílit velmi malé proudové impulsy vytvářené na PIN diodě a tím detekovat vysoce energetické ionizující záření. Vytvořený detektor se prezentuje jako levná alternativa pro detekci ionizujících záření vyšších energií, zejména záření α a β .

Klíčová slova

Ionizující záření, PIN diody, nábojový zesilovač, elektronický detektor ionizujícího záření.

Abstract

The goal of this thesis was to study the principles of detection of ionising radiation with the use of PIN diodes, selection of suitable commercially available PIN diodes and designing an electronic circuit, which is able to detect ionising radiation. Commercially available detectors of ionising radiation are often expensive and complex, the alternative to these expensive, but precise detectors is an inexpensive, electronical and simple detector, that is able to inform the user of ionising radiation interacting with the detector. The device was designed to be powered by a USB connector, to be able to process an electrical signal, which is being created by the PIN diode, using a charge amplifier, which is able to generate an external interrupt on a connected microcontroller. The ionising radiation is visualised to the user by a connected computer or a LED located on the PCB. According to the simulations, we can conclude, that the charge amplifier is able to amplify a very small current pulses, created by the PIN diode and therefore detect highly energetic ionising radiation. The designed detector is presenting itself as an inexpensive alternative in detection of ionising radiation, especially α and β radiation.

Key words

Ionising radiation, PIN diodes, Charge amplifier, electronical detector of ionising radiation.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.



.....
podpis

V Plzni dne 26.5.2021

Tomáš Mulák

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	11
1.1 CO TO JE IONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ	11
1.2 DRUHY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	13
1.3 DETEKCE IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	15
2 PIN DIODY	17
2.1 PIN DIODY JAKO DETEKTORY IONIZUJÍCÍHO ZÁŘENÍ.....	18
3 NÁVRH ELEKTRONIKY DETEKTORU	18
3.1 VOLBA PIN DIOD	18
3.2 BLOKOVÉ SCHÉMA	20
3.3 ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLU	21
3.3.1 Nábojový zesilovač.....	21
3.3.2 Rychlý komparátor	22
3.4 NAPÁJENÍ	23
3.4.1 LDO.....	23
3.4.2 Zdroj předpětí.....	24
3.5 UŽIVATELSKÉ ROZHRAŇÍ	25
3.5.1 USBT-UART	26
3.5.2 Ovládací a indikační prvky.....	27
3.6 MIKROKONTROLÉR	28
3.7 DPS.....	30
4 MĚŘENÍ/SIMULACE A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	32
ZÁVĚR	35
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36
PŘÍLOHY	1

Úvod

Cílem této práce je návrh čistě elektronického, nízkonapěťového detektoru ionizujícího záření, který je založen na polovodičové PIN diodě. Hlavním zářením, které má detektor být schopen detekovat je záření alfa a beta.

V první části je popsána teorie ionizujícího záření, je zde vysvětleno záření ionizující, které je odlišeno od záření neionizujícího. Pozornost je zde také věnována druhům ionizujícího záření, jeho vlivům na člověka, způsoby ochrany před ionizujícím zářením a samotné detekci ionizujícího záření.

Část druhá se zabývá PIN diodami, jejich vlastnostmi a využitím jejího principu pro detekci ionizujícího záření.

Část třetí se již zabývá samotným návrhem detektoru, je zde uvedeno blokové schéma, které rozděluje návrh na několik dalších částí, počínaje napájecím napětím a jeho převodem z +5 V na napětí jiná, dále využitá v zapojení. Další část návrhu se zaměřuje na teorii nábojového zesilovače a posléze návrhu parametrů, které jsou stěžejní pro zesílení malých proudových impulsů poskytovaných dopadem ionizujícího záření na PIN diodu. Dále je řešeno uživatelské rozhraní, komunikace s PC je realizována převodníkem USB-UART, je zde také popsáno využití dvou tlačítek a indikační LED. Posléze byl řešen způsob ovládání celého zapojení, byl zde využit mikrokontrolér, který je schopen zachytávat změny signálu za pomoci externích přerušení. Poslední část návrhu je zaměřena na postup návrhu DPS.

Čtvrtá a poslední část práce je věnována simulaci nábojového zesilovače a rozboru výsledných dat a vlivů parametrů nábojového zesilovače na celkovou funkčnost zapojení.

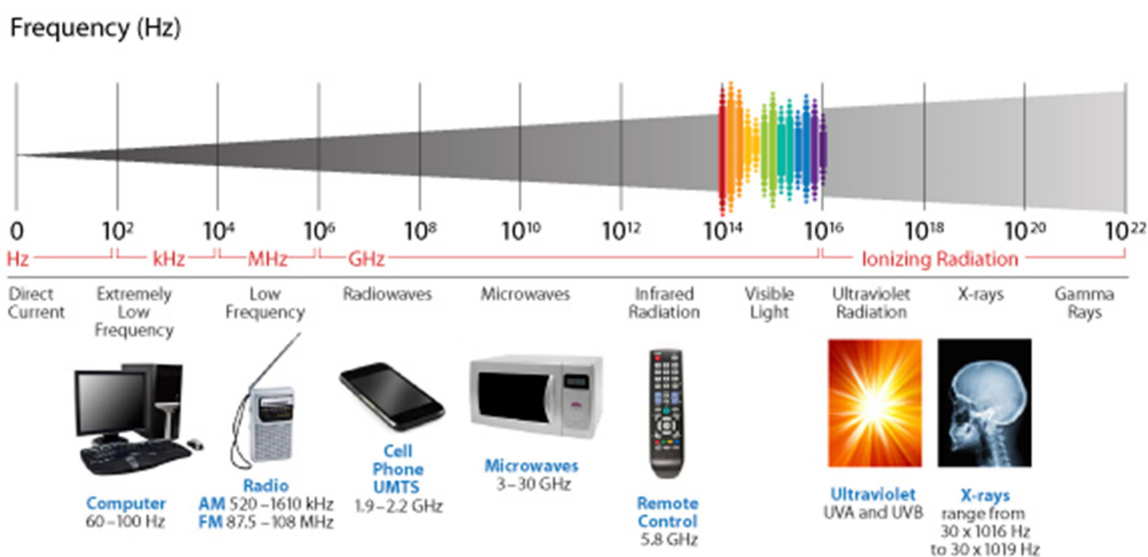
Seznam symbolů a zkratk

<i>DNA</i>	Deoxyribonukleová kyselina – nositel genetické informace
<i>CERN</i>	Evropská organizace pro jaderný výzkum
<i>USB</i>	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
<i>UART</i>	Univerzální asynchronní přijmač/vysílač
<i>A/D</i>	Analogově / číslicový
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů
<i>TXD</i>	Transmitted data – vysílaná data
<i>RXD</i>	Received data – přijmaná data
<i>LED</i>	Light emitting diode – světlo emitující dioda
<i>PC</i>	Personal computer – osobní počítač
<i>USB – UART</i>	Převodník USB - UART
μC	Mikrokontrolér

1 Ionizující záření

Obecně záření, neboli jinak radiace je emise nebo přenos energie ve formě vln nebo částic přes přenosové prostředí. Záření může nést i informace o svém zdroji nebo o prostředí, kterým prochází. Nositeli této informace může být, jak intenzita záření, tak i spektrální energetické rozložení. Tohoto principu se využívá hojně např. v astronomii, kde se pomocí analýzy záření zkoumají různá vesmírná tělesa (přes hvězdy až po černé díry) nebo již nastalé události (např. supernovy nebo i samotný velký třesk). Mezi záření se řadí jak už akustické vlnění, neboli zvuk nebo také elektromagnetické vlnění. Tyto druhy záření nemají dostatečnou energii pro ionizaci, proto jsou označovány jako neionizující záření. Na Obr. 1.1 je znázornění elektromagnetického spektra a rozdělení záření.[1]

Electromagnetic Spectrum



Obr. 1.1 – Elektromagnetické spektrum[18]

1.1 Co to je ionizující záření

Ionizující záření je záření, které má dostatečnou energii pro ionizaci. Ionizace je proces, při kterém je atomu přidán nebo odebrán elektron, stává se z něj kladně nebo záporně nabitý iont, tedy kationt a aniont. „Ionizujícím zářením nazýváme takové záření, jehož kvanta mají natolik vysokou energii, že jsou schopna vyrážet elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat“[1].

- **Zdroje ionizujícího záření**

Všechny předměty, přístroje nebo látky, které emitují ionizující záření se nazývají zdroje ionizujícího záření, jinak také zářiče. Zářiče se dají rozdělit podle několika kritérií, např. zářiče přírodní a umělé.[1]

Mezi umělé zdroje záření se řadí např. rentgenové trubice, používané především v medicíně nebo také urychlovače částic, které se používají k výzkumu v částicové fyzice.[1]

Mezi přírodní zdroje ionizujícího záření se řadí např. záření vesmírného původu, které vzniká při vysoce energetických procesech, tedy termionukleárních reakcích, které využívají hvězdy ke generování energie, nebo také výbuchy supernov a dění kolem černých děr.[1]

- **Veličiny charakterizující ionizující záření**

Mezi veličiny, které charakterizují ionizující záření se řadí kinetická energie částic. Základní fyzikální jednotka kinetické energie je joule [J], tato jednotka se rozsáhle používá, ale v případě charakterizace kinetické energie je tato jednotka příliš velká, proto byla zavedena jednotka elektronvolty [eV]. Převodní vztah mezi elektronvolty a jouly je: $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$. Jednotka eV odpovídá kinetické energii, získanou elektronem urychleným ve vakuu napětím 1 V. Zdroje ionizujícího záření většinou nevyzařují záření jen jedné energie, ale různá záření o různých energiích, proto se energie záření charakterizuje energetickým spektrem, které charakterizuje relativní zastoupení emitovaných částic podle energie. [1]

Další veličinou zdroje je jeho intenzita, resp. množství záření, které zdroj vysílá za jednotku času. Jinak se veličina nazývá emise zdroje, udávaná v počtech kvant za sekundu. [1]

- **Vlivy ionizujícího záření na lidské tělo**

Vlivy ionizujícího záření na lidské tělo jsou velice obávanou a značně studovanou disciplínou. Jelikož ionizující záření dokáže vyrážet elektrony z atomů, dokáže poškodit molekuly, DNA nebo i způsobit rakovinu. Lidské tělo dokáže rychle poškozené/zmutované buňky opravit nebo jim dát povel „umřít“, v některých případech ale buňky „umřít“ odmítnou a tím pádem se stávají rakovinotvornými. Při vystavení ionizujícímu záření se zvyšuje šance na vytvoření mutací buněk nebo rakoviny[5]. Naopak při ozáření ve velkých dávkách, i krátkodobém se může objevit v lidech tzv. radiační nemoc,

kdy je množství poškozených buněk velké a tělo nedokáže dostatečně rychle buňky znovu vytvořit, radiační nemoc se dělí podle intenzity. Tato otrava radiací může mít za následek zvracení, bolest hlavy, sterilitu u mužů, nebo dokonce při vyšších dávkách i smrt.[3, 5, 6, 7]

1.2 Druhy ionizujícího záření

Ionizující částice se dají dělit mnoha způsoby, jedním z hlavních dělení je záření přímo a nepřímo ionizující.[1]

- **Přímo ionizující záření**

Přímo ionizující záření je druh ionizujícího záření, které je elektricky nabitě, nese elektrický náboj a je schopno přímo vyrážet nebo vytrhávat elektrony z atomů. Nejčastějšími jsou záření alfa a beta.[1]

- a) **Záření alfa α**

Záření alfa je druh přímo ionizujícího záření, které je charakterizováno jako velice rychle letoucí jádro helia (rychlost kolem 5 % rychlosti světla c). Toto záření je emitováno většinou radioaktivních prvků, jako je např. uran, thorium nebo radium. Záření α má dva typy vlivů na člověka, rozděluje se na vnitřní a vnější. Vnější vliv je pro člověka neškodný a je odstíněn tenkou vrstvou lidské pokožky nebo např. listem papíru. Vnitřní vliv už ale škodný být může, tedy pokud by člověk pozřel materiál emitující toto záření, mohou být ozářeny vnitřní tkáně a tím může dojít k jejich poškození. [1, 3, 4]

- b) **Záření beta β**

Záření beta je charakterizováno jako proud elektronů, tedy β^- nebo jako proud pozitronů (kladně nabitě elektrony, antičástice elektronu), označováno β^+ . Záření je emitováno při různých jaderných přeměnách radioaktivních prvků, při přeměně neutronu na proton se záření nazývá β^- a při přeměně opačné, protonu na neutron se nazývá β^+ . Pronikavost β záření je už větší než u záření α , dokáže pronikat materiály s nízkou hustotou nebo malou tloušťkou, ale stále se dá relativně jednoduše odstínit, a to pomocí tenkého plechu kovu (např. hliníku) nebo dostatečně silné vrstvy vzduchu nebo jiného materiálu, tloušťka nutných stínících materiálů závisí na velikosti energie dopadajícího záření. [1, 3, 4]

- **Nepřímo ionizující záření**

Nepřímo ionizující záření, oproti záření přímo ionizujícímu, elektricky nabitě není, svou kinetickou energii předávají nabitým částicím v látce, na kterou působí, tedy elektronům, výjimečně i jádrům a tím je ionizuje. [1]

- a) **Záření gama γ**

Záření gama je elektromagnetické záření ve formě fotonů, které mají vysokou energii, nad 100 keV, z celého elektromagnetického spektra mají nejkratší vlnovou délku. Jelikož je záření ve formě fotonů, dosahuje rychlosti světla. Vzniká při radioaktivních přeměnách, ve formě energie, kterou ztrácí jádro, které ho vytvořilo. Záření γ je pro člověka velmi nebezpečné, má na člověka více nebezpečných vlivů. Jeho předání kinetické energie látce, na kterou dopadá, má za důsledek oteplení, které může způsobit hluboké popáleniny. Druhým vlivem je proniknutí do lidského těla, kde dokáže způsobit poškození buněk a DNA. Způsob ochrany proti záření γ je již složitější, záření má vysokou pronikavost, proto se jako ochrana používá při své vysoké hustotě např. olovo.[1, 3, 4]

- b) **Záření X (Rentgenové)**

Rentgenové záření je stejně jako záření γ , záření fotonové, je tedy součástí elektromagnetického spektra. Vyskytuje se na vlnových délkách 10 nm, až 1 pm. Je velice podobné záření gama, jejich spektrum se překrývá, rozdíl mezi nimi je podle způsobu vzniku, kde záření rentgenové vzniká v atomovém obalu a záření gama při procesech uvnitř jádra. Rentgenové záření se hojně využívá např. v medicíně, a to k zobrazení kostní struktury pacienta a následné analýzy zdravotního stavu. I rentgenové záření je nebezpečné pro člověka, přesto je využíváno velmi často, jelikož velké uplatnění v medicíně převažuje nad zdravotními riziky chvilkového ozáření ve formě pulsů rentgenového záření. [1, 3, 4]

- c) **Neutronové záření**

Pod pojmem neutronové záření se rozumí proud pohybujících se neutronů. Neutrony se z jader uvolňují pomocí jaderných reakcí, např. v jaderných reaktorech ať už štěpením nebo jadernou fúzí. Dále se vyskytují v urychlovačích částic, vytvořené pomocí laboratorních zdrojů elektronů. Neutronové záření nemá, už z principu neutronu, žádný náboj, nedokáže tedy samo ionizovat. Ionizaci způsobují až sekundární částice, které vznikají při interakcích neutronů s jádry jiných atomů. Při interakcích s jádry jiných atomů vznikají záření jiná, hlavně záření γ . Toto je hlavní důvod nebezpečí neutronového záření, samotné není nijak nebezpečné ale interakce, které vyvolá, dokáže toto záření přeměnit

na záření jiná, která již nebezpečná pro člověka jsou. Jako ochrana proti neutronovému záření se používá kombinovaná forma materiálů. Jako první vrstva ochrany se používají látky bohaté na vodík, např. voda z důvodu zpomalení neutronového proudu srážkami s protony v jádře vodíku. Dále je nutno již zpomalené neutrony pohltit, k tomu se používá např. kadmium nebo indium. Reakce způsobené zachycením vytváří již zmíněné záření γ , které je nutno stínit např. olovem.[1, 3, 4]

- ***Další dělení ionizujícího záření***

Dále lze ionizující záření dělit na vlnové a korpuskulární. Záření vlnové je záření, které má nulovou hmotnost, je to záření ve formě elektromagnetických vln (pohybuje se rychlostí světla), do této kategorie se řadí např. záření γ . Záření korpuskulární už má nějakou hmotnost, jedná se o hmotné částice, které mají rychlost mnohem menší než rychlost světla. Mezi korpuskulární záření se řadí např. záření α nebo záření neutronové.[1]

1.3 Detekce ionizujícího záření

Jelikož ionizující záření je lidským okem nepozorovatelné je nutno ho detekovat. Pro detekci ionizujícího záření se využívá řada fyzikálních metod, využívajících principu ionizujícího záření k jeho detekci. Zařízení, která jsou využívána k detekci, se nazývají radiometry nebo jinak dozimetry, v případě detekce účinků na živou tkáň. [2]

Radiometry se dělí podle třech různých kritérií. Podle časového průběhu detekce, principu detekce a komplexnosti měřené informace.[2]

- ***Dělení podle časového průběhu detekce***

Dělení podle časového průběhu detekce rozlišujeme na dva typy, kontinuální a kumulativní. Kontinuální detektory poskytují skoro okamžitou detekci dopadajících částic, zatímco detektory kumulativní fungují např. jako fotoaparát, kdy shromažďují rostoucí počet detekovaných částic během expoziční fáze a poté je vyhodnocují. Výsledkem je údaj celkového ozáření za dobu expozice. [2]

- ***Dělení podle principu detekce***

Dělení podle principu detekce je důležité, jelikož různé principy detekování ionizujícího záření mají různé vlastnosti a i použití, ne všemi detektory lze detekovat všechny druhy ionizujících částic.[2]

Prvním principem, na kterém se detektory realizují, je princip fotografický, který využívá fotochemických účinků záření k zobrazování dat. Detektory na materiálovém principu využívají změny vlastností určitých materiálů, např. mohou v materiálech zanechávat různé stopy. Asi nejčastějším a nejlepším principem pro detekci ionizujícího záření jsou elektronické detektory, které detekují dopadající částice a převádějí je na elektrický proud či proudové impulsy. [2]

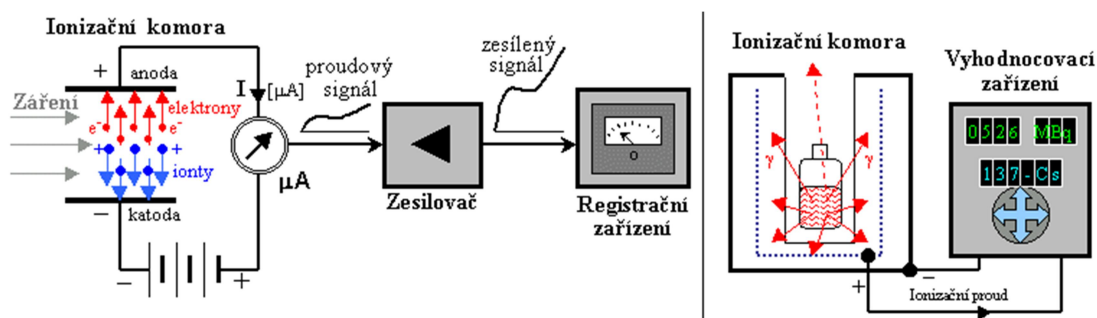
- **Dělení podle komplexnosti měřené informace**

Dále se detektory dělí podle informace, kterou jsou schopny zobrazit. Pokud je třeba měřit pouze intenzitu dopadajícího záření, vystačí detektory záření. Pokud je třeba analyzovat energetické rozložení (spektrum), využívají se spektrometry ionizujícího záření. Dále se ještě můžeme setkat se zobrazovacími detektory, které prostorové rozložení zobrazují vizuálně nebo elektronicky, v případě potřeby zjistit dráhy ionizujících částic, používají se detektory dráhové.[2]

- **Elektronické detektory**

Elektronické detektory využívají energie ionizačního záření, kterou převádí na elektrický proud. Tento elektrický proud, který může být ve formě plynulé nebo pulsů je dále elektronicky zpracován. [2]

Mezi principy, které se využívají v elektronických detektorech se řadí např. princip ionizační komory, který využívá principů ionizace plynu a tím pádem jeho vodivosti. Když žádné záření nedopadá, tak obvodem neteče žádný proud. Pokud dopadají ionizující částice na komoru s plynem, plyn ionizuje a vyrážené elektrony způsobují malý proud, který je dále zpracován. Mezi detektory s ionizační komorou se řadí např. Geiger-Müllerovy detektory, které patří mezi první a nejjednodušší detektory ionizujícího záření. [2]

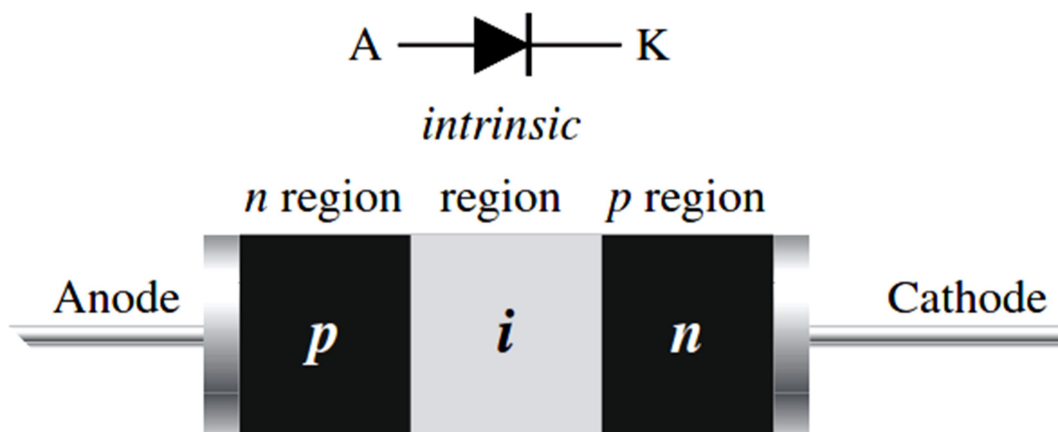


Obr. 1.2 - Schéma principu ionizační komory[2]

Druhý hlavní princip elektronického detektoru je založen na polovodičových součástkách. Tyto detektory využívají zapojení diod v závěrném směru s vysokým napětím. Při dopadu ionizujícího záření na diodu jsou vygenerovány proudové pulsy, které jsou dále zpracovávány. Detektory jsou dražší, než ty, které jsou založeny na principu ionizační komory, ale přesnější.[2]

2 PIN diody

PIN dioda je speciální typ polovodičové diody. Normální polovodičová dioda se skládá z polovodiče typu P a polovodiče typu N, což jsou vrstvy polovodičového materiálu, který je silně dotován majoritními vodiči elektrického proudu, tedy elektrony ve vrstvě N nebo děrami ve vrstvě P. Ve speciálním případě PIN diody, je mezi tyto dvě vrstvy vložena ještě vrstva intrinsická. To je vrstva, která je dotovaná velice málo nebo nemusí být dotovaná vůbec. [8]



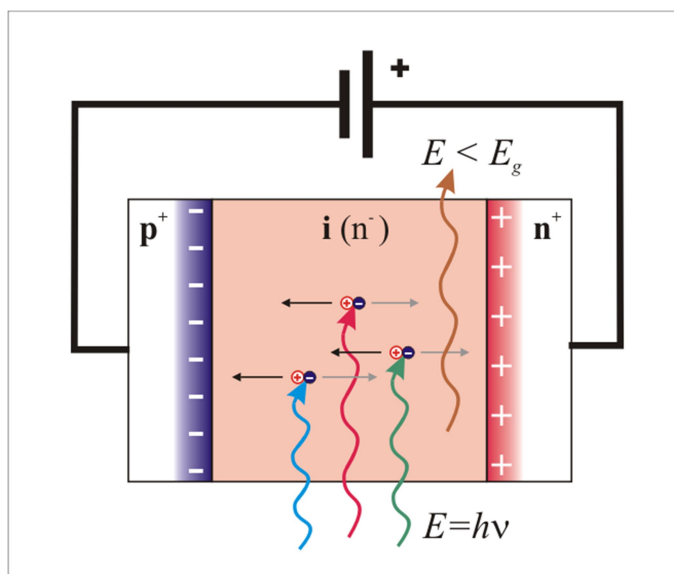
(a) Construction

Obr. 2.1 - Konstrukce PIN diody[8]

V propustném směru, proud teče skrz intrinsickou vrstvu a dioda se chová jako proměnný rezistor. Ve směru závěrném se vyčerpaná zóna rozšíří na velkou plochu intrinsické vrstvy a PIN dioda se vyznačuje vysokou hodnotou závěrného průrazného napětí. [8]

2.1 PIN diody jako detektory ionizujícího záření

S využitím zapojení PIN diody v závěrném směru pokrývá vyčerpaná zóna plochu intrinsické vrstvy, která je oproti vrstvám P a N širší. Této vyčerpané oblasti se využívá při dopadu ionizujícího záření. Při dopadu ionizujícího záření na vyčerpanou oblast předává ionizující záření svou energii a vznikají v intrinsické vrstvě páry, elektron díra, které jsou přitahovány k elektrodám, elektrony ke kladné a díry k záporné. Dopad záření se jeví jako velmi malé proudové impulsy, které je dále nutno zpracovat. Obr. 2.2 ukazuje princip detekce.[9]



Obr. 2.2 - Princip detekce ionizujícího záření PIN diodou[9]

3 Návrh elektroniky detektoru

Celý návrh byl realizován v návrhářském softwaru Altium Designer, s pomocí studentské licence.

3.1 Volba PIN diod

Výběr PIN diod je velmi důležitá část návrhu, jelikož funkčnost celého zařízení záleží na správném výběru. Ve výběru PIN diod je třeba se zaměřit na několik důležitých parametrů.

Jedním z nejdůležitějších parametrů pro tuto aplikaci je temný proud, neboli dark current. Temný proud, je proud, který je generován za „temna“, tedy když na PIN diodu nedopadají žádné částice (ani viditelné fotony ani částice jiné), způsoben je náhodnou rekombinací elektronů a děr a tím vytváření malého proudu, v řádu nA. Pro účely této aplikace by měl být tento proud co nejnižší, proto aby bylo možné detekovat dopadající

částice. Jinak by se mohlo stát, že by se nám částice jevila jen jako součást temného proudu (z důvodu malého odstupu signál-šum).

Druhým parametrem, na který je nutno se zaměřit je velikost aktivní plochy PIN fotodiody, tedy plochy, na kterou dopadají částice a generují energii. Pro zachycení ionizujícího záření je to důležitý parametr, kdybychom měli moc malou aktivní plochu, tak by nedopadalo příliš velké množství ionizujících částic na detektor a tím pádem by nemusely dopadající částice být vůbec detekovány, pracovali bychom tedy s velice malou účinností. Proto se snažíme o co největší aktivní plochu, aby byla šance na zachycení částic co nejvyšší.

Tyto dva parametry spolu úzce souvisí, čím větší aktivní plocha, tím více párů elektronů a děr se bude generovat, rekombinovat a tím se zvyšuje temný proud. Musíme proto vybrat PIN fotodiodu, která splňuje co nejlépe obě kritéria, jedná se o kompromis.

Dalším parametrem je maximální velikost závěrného napětí.

Vybral jsem proto 4 PIN fotodiody, které se jeví jako vhodné pro tuto aplikaci.

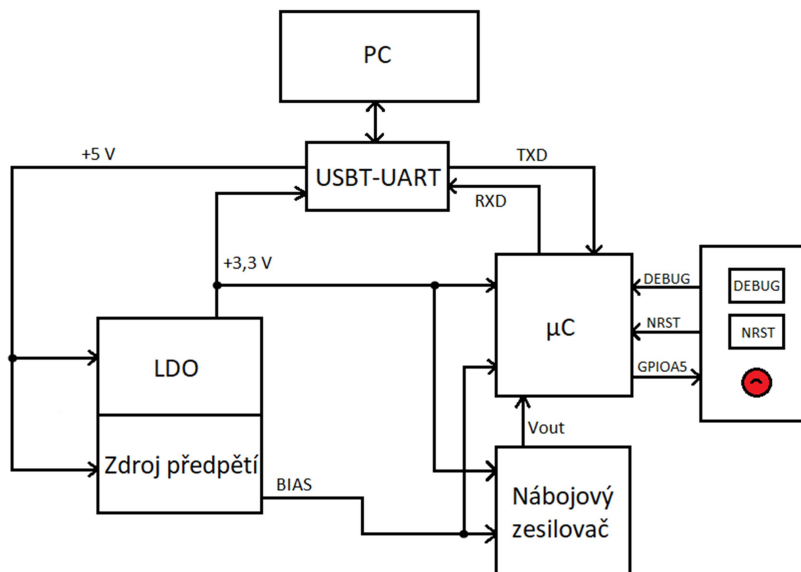
Jako první byla vybrána fotodioda BPX 61[10], přesně ta fotodioda, která byla použita při zapojení od CERNu [9], ze kterého jsem čerpal informace a zapojení. Z prezentovaných výsledků [9] lze usoudit, že tato PIN dioda je pro cílovou aplikaci vhodná. Dioda má velikost aktivní plochy 7 mm², což je oproti většině komerčně dostupných diod značně více. Velikost temného proudu je též velice příznivá, v datasheetu jsou uvedeny 2 nA.

Ostatní PIN fotodiody, které jsem vybral, tedy VEMD5060X01[13], BPW41N[12], QSE773[11] mají podobné vlastnosti jako BPX61, a to velikost aktivní plochy kolem 7 mm² a velikost temného proudu v řádu nA. Srovnání parametrů vybraných PIN fotodiód je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1 – Tabulka srovnání parametrů PIN fotodiód

Název	Výrobce	Aktivní plocha[mm ²]	Temný proud [nA]	Závěrné napětí [V]
BPX61[10]	Osram Opto Semiconductors	7,02	2 (typ.)	32
QSE773[11]	ON Semiconductor	2,71	30 (max.)	32
BPW41N[12]	Vishay	7,5	2 (typ.)	60
VEMD5060X01[13]	Vishay	7,5	0,2 (typ.)	20

3.2 Blokové schéma



Obr. 3.1 - Blokové schéma

Blokové schéma vyobrazené na Obr. 5 nám rozděluje zapojení na pomocné bloky a 4 hlavní části:

- **Napájení**

Napájení je rozděleno do dvou částí:

LDO (Low-dropout regulator), neboli napěťový stabilizátor nám napětí z 5 V, které do něj vstupují, přemění na 3,3 V, které dále využíváme.

Zdroj předpětí, nastavitelný spínaný boost (Step Up) měnič mění vstupních 5 V na nastavitelný BIAS, neboli napětí, které využíváme k detekci dopadajících ionizujících částic.

- **Nábojový zesilovač**

Dopadající ionizující částice na PIN diodu, je třeba přeměnit na elektrický signál, vhodný k dalšímu zpracování. K tomu je využito dvoustupňové zapojení operačních zesilovačů a komparátor vytvářející výsledné pulsy Vout.

- **USBT – UART**

Zapojení slouží ke komunikaci s počítačem, pomocí signálů TXD a RXD komunikaci s mikrokontrolérem, zobrazování dat, a zároveň jako zdroj 5 V z USB portu na počítači, které je dále rozváděno do vnitřních měničů napětí, které toto napětí převádějí na napěťové úrovně vhodné pro další obvody.

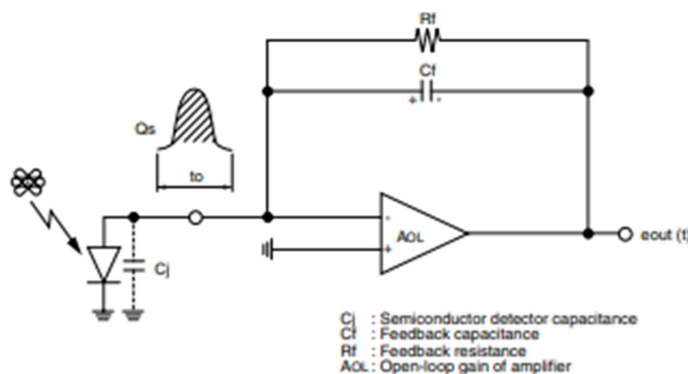
- **Mikrokontrolér**

Zapojení mikrokontroléru slouží ke zpracování dat a ovládání celého zapojení, jsou na něj připojeny indikační prvky a tlačítka sloužící na reset a jedno programovatelné tlačítko, které se může naprogramovat na „debugování“, tedy ladění počítačového programu.

3.3 Zpracování signálu

Zpracování signálu je u elektronických detektorů velmi důležité. Při použití PIN diod se generují malé proudové pulsy, které musí být zesíleny, aby se s nimi mohlo dále pracovat.

3.3.1 Nábojový zesilovač



Obr. 3.2 - Teoretické zapojení nábojového zesilovače[19]

Na Obr. 3.2 je znázorněno teoretické zapojení nábojového zesilovače. Dopadajícím ionizujícím zářením na aktivní plochu PIN diody se vytváří pulsy elektrického náboje Q_s s amplitudou odpovídající dopadající energii záření. Výstupní napětí takového zesilovače je určeno podle:

$$U_{out} = -\frac{Q_s}{C_f} \tag{1}$$

Z této rovnice lze pozorovat, že výstupní napětí je závislé na zpětnovazebním kondenzátoru C_f . Výsledné zesílení zapojení, tedy G_C je rovno:

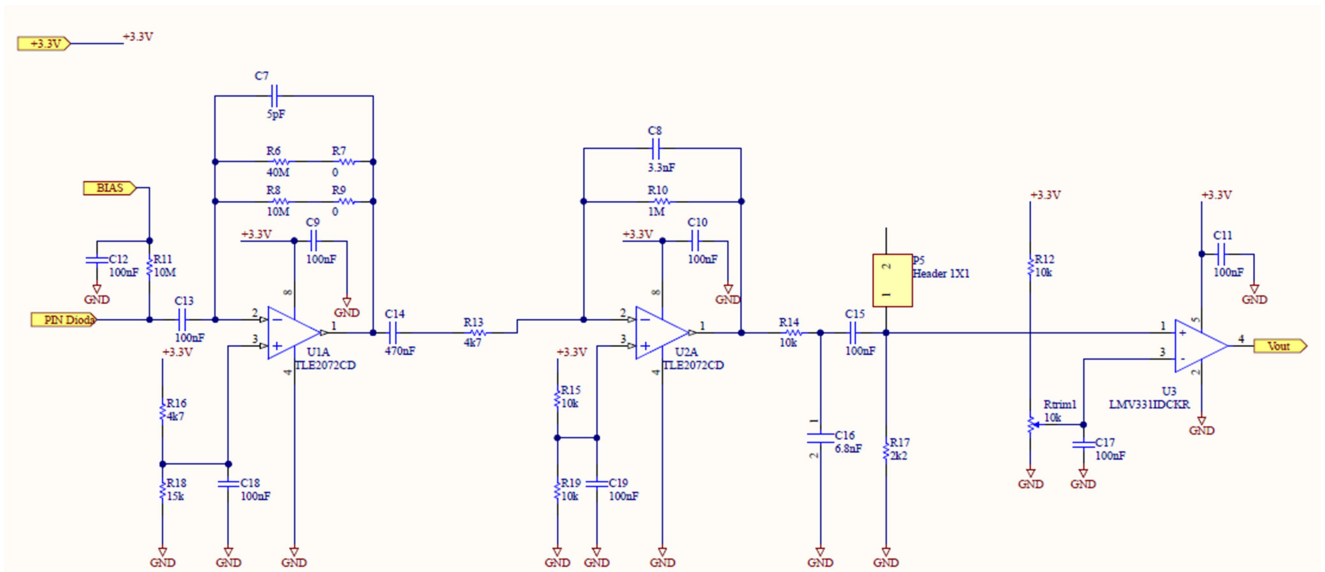
$$G_C = \frac{U_{out}}{Q_s} = \frac{1}{C_f} \tag{2}$$

Volba zpětnovazebního kondenzátoru C_f je tedy velice důležitá. Velikost odporu rezistoru R_f určuje časovou konstantu τ , která udává, za jak dlouho se náboj generovaný na PIN vybije. Časová konstanta je tedy daná vzorcem:

$$\tau = R_f * C_f \tag{3}$$

Zapojení, které jsem použil, bylo navrženo na základě zapojení, publikovaném v [9].

Návrh zesilovače a hodnot použitých komponent byl ověřen simulacemi v LTSpice.



Obr. 3.3 - Zapojení zpracování signálu

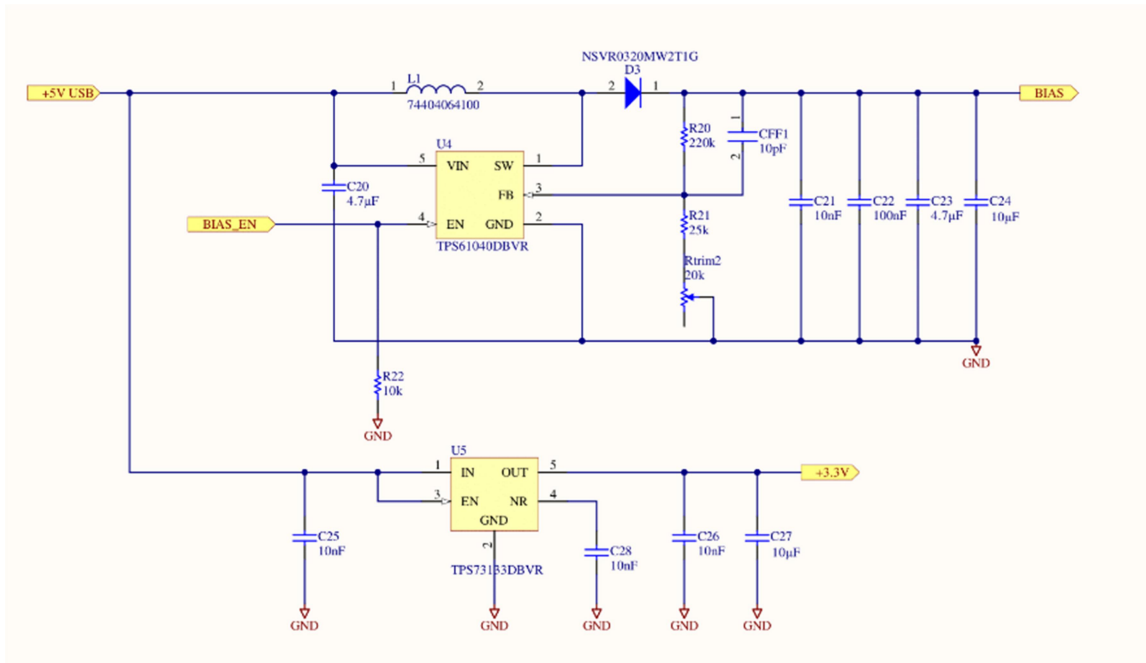
Na Obr. 3.3 je zobrazeno celé zapojení zpracování signálu. Byly použity dva stupně zesílení. Podle vzorce (2) lze díky velikosti zpětnovazebních kondenzátorů pozorovat, že první stupeň má zesílení větší než stupeň druhý. Byly zvoleny stejné operační zesilovače, jako v [9], tedy operační zesilovače s označením TLE2072CD, kvůli svému malému šumu a vysoké rychlosti. Jednotlivé stupně zesílení jsou odděleny kondenzátory. U prvního stupně zapojení lze pozorovat nulové rezistory R7 a R9, které tam jsou z důvodu doladění časové konstanty při zapojení různých PIN diod vybraných v kapitole 3.1.

3.3.2 Rychlý komparátor

Na pravé straně Obr. 3.3 je zapojení rychlého komparátoru. Komparátor je schopen podle rozhodovací úrovně nastavitelné pomocí trimeru R_{trim1} vydávat dvě úrovně napětí, tedy 3,3 V nebo 0 V, což se uplatní v digitální části celkového zapojení v mikrokontroléru, který tedy rozliší hodnotu logické „1“ a „0“.

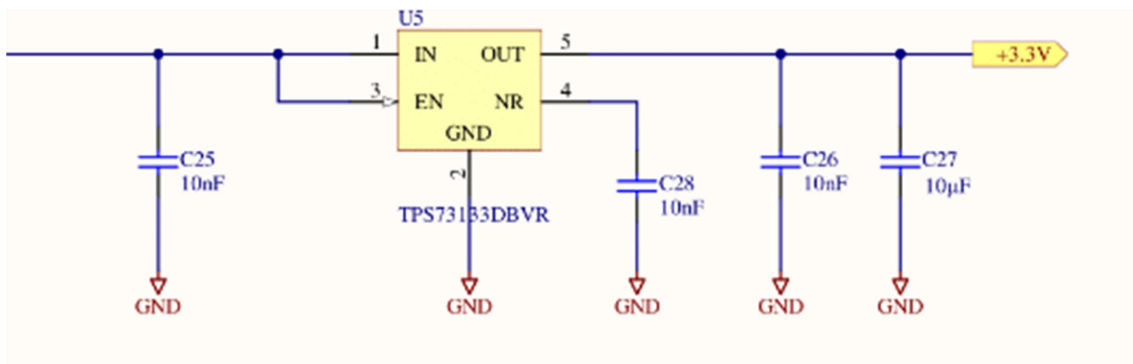
3.4 Napájení

Blok napájení poskytuje dvě napěťové úrovně pro další obvody. Jedná se o zdroj 3,3 V pomocí LDO a zdroj nastavitelného napětí (takzvaného „BIAS“), pomocí spínaného zvyšujícího měniče. Úplné zapojení napájení je na Obr. 3.4



Obr. 3.4 - Zapojení Napájení

3.4.1 LDO



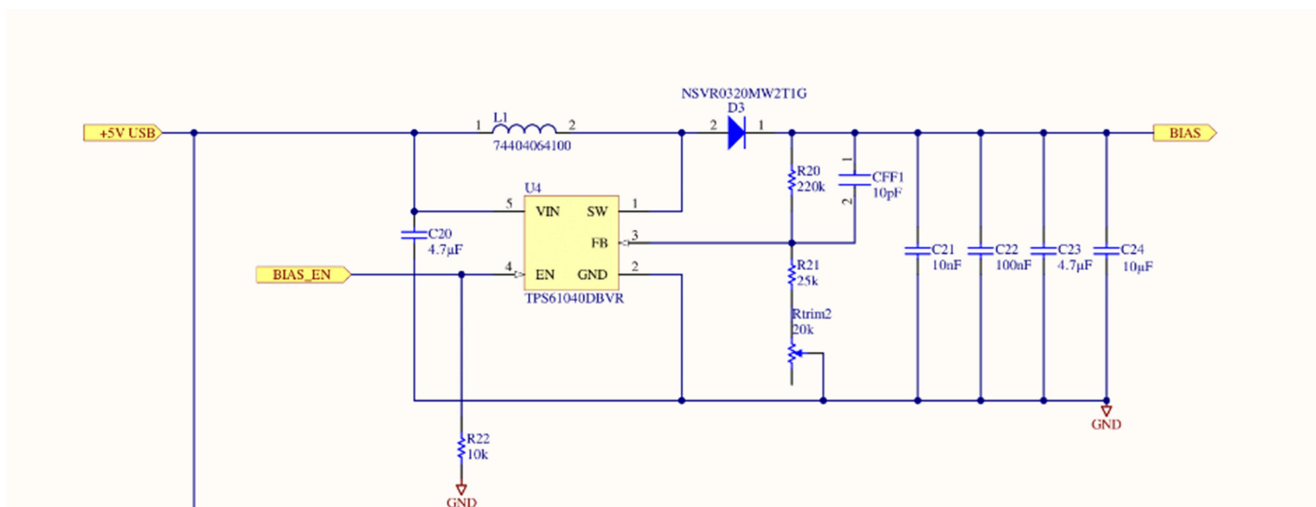
Obr. 3.5 - Zapojení LDO

Zapojení, na Obr. 3.5 je tzv. tříbodové zapojení stabilizátoru. Stabilizátor (spojitý napájecí zdroj) je zapojení, které „stabilizuje“ výstupní napětí na určité hodnotě (určené vnitřním zapojením stabilizátoru), i když se mění výstupní parametry. LDO bylo zvoleno z důvodu malého odstupe výstupního napětí od vstupního, které je v našem případě menší než 2 V. V takovém případě je doporučeno použití LDO, které je k tomuto účelu určeno.

Třibodové zapojení je vlastně integrovaný stabilizátor, kde je zapojení realizováno jako jednočipové řešení. Stabilizátor, který jsem vybral, TPS73133DVBR[15] je tzv. fixed voltage, neboli s pevně nastaveným výstupním napětím, v tomto případě 3,3 V využívané k napájení jednotlivých částí celkového zapojení, tedy není potřeba měnit. Vstupní napětí, které tento stabilizátor využívá je v rozsahu 1,7 – 5,5 V.

Stabilizátor má 5 pinů, pin IN reprezentuje vstupní napětí, v našem případě to je 5V z USB. Pin EN, neboli „enable“ má funkci povolení stabilizátoru, pokud je připojen na logickou „1“ je ve funkčním stavu, pokud by byl na logické „0“, neboli připojen k zemi, tak by byl v režimu „shutdown“, což by znamenalo, že by stabilizátor nepracoval. Jelikož v našem případě stabilizátor bude pořád v chodu, pin je připojen na vstupních 5 V, tedy na logickou „1“. Pin GND slouží funkci země vnitřního zapojení stabilizátoru. Pin NR („noise reduction“), má funkci snížení šumu vnitřního zapojení stabilizátoru a je tedy zapojen na filtrační kondenzátor. Poslední pin OUT, jak už z názvu vyplývá je výstup stabilizátoru, vystupuje z něj 3,3 V, které dále využíváme. Pin je ještě opatřen dvojicí filtračních kondenzátorů.

3.4.2 Zdroj předpětí



Obr. 3.6 - Zdroj předpětí

Zapojení má za úkol vytvořit předpětí pro diodu označované jako BIAS, které ovlivňuje rychlost odčerpání náboje vytvořeného reakcí ionizující částice v PIN diodě. Pro vytvoření tohoto napětí jsem vybral spínaný step up regulátor napětí (boost) TPS61040DBVR, který je z 1,8 – 6 V na vstupu schopen vytvořit 1,8 – 28 V na výstupu. Zapojení bylo realizováno na základě doporučení od výrobce uváděného v datasheetu [14]. Pin VIN slouží pro přivedení vstupního napětí, pin GND je připojení na zem vnitřního

zapojení, pin EN povoluje činnost regulátoru, je na něj připojen signál BIAS_EN, který je řízen mikrokontrolérem. Tento zdroj můžeme tedy vypnout. Důvod je takový, že pro měření dopadajícího ionizujícího záření můžeme využít i externí zdroj napětí. V takovém případě může být tento zdroj vypnut a tím dojde k omezení případného elektromagnetického rušení, způsobeného jeho činností. Piny SW a FB se liší od pinů, které byly na stabilizátoru LDO, důvod toho je, že tento regulátor je nastavitelný, oproti LDO, které drží konstantních 3,3 V. Pin FB (feedback) slouží k nastavení výstupního napětí, je připojen na dělič napětí, pomocí kterého toto napětí měníme. Pin SW slouží k připojení induktoru L1 a schottkyho diody D3.

Induktor L1 ovlivňuje spínací frekvenci napěťového regulátoru, v datasheetu byla doporučena indukčnost v rozsahu 2,2 μH - 47 μH . V tomto případě byla volena podle doporučeného zapojení výrobce, tedy 10 μH .

Velikost výstupního napětí ovlivňuje zapojení napěťového děliče a dá se vypočítat pomocí vzorce uvedeného v datasheetu :

$$V_{OUT} = 1,233 * \left(1 + \frac{R_{20}}{R_{11} + R_{trim2}} \right) \quad (4)$$

Volil jsem nastavitelný trimr o maximálním odporu 20 k Ω , když tedy dosadíme do rovnice hodnoty, vychází BIAS v rozsahu 7,2 V – 12,1 V.

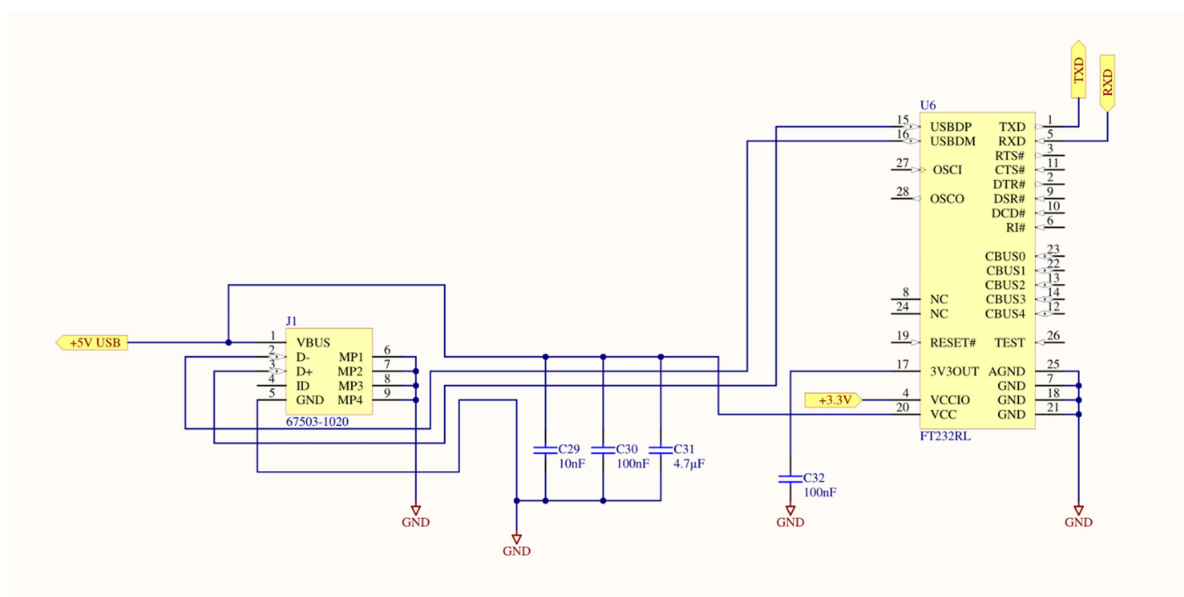
Hodnota C_{FF1} byla zvolena podle doporučení datasheetu, 10 pF.

Na výstup je přidána řada filtračních kondenzátorů, pro potlačení zvlnění výstupního napětí.

3.5 Uživatelské rozhraní

Navržený koncept umožňuje interakci s uživatelem zejména prostřednictvím připojení k PC pomocí USB. Zařízení však rovněž obsahuje ovládací a indikační prvky přímo na desce.

3.5.1 USBT-UART

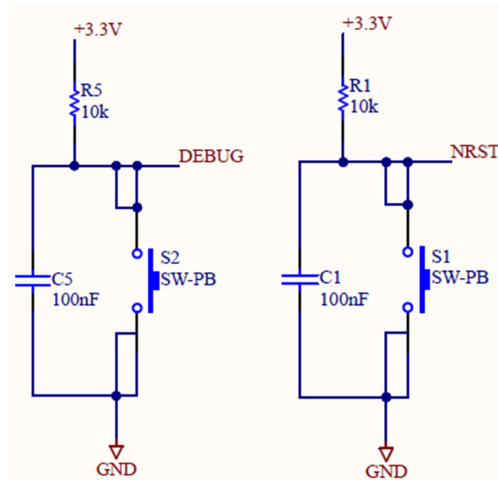


Obr. 3.7 - USBT-UART

Toto zapojení realizuje napájení detektoru a komunikaci s počítačem pomocí USB konektoru. Zapojení jsem převzal z datasheetu součástky FT232RL[16]. Komponenta s označením J1, označována výrobcem jako 67503-1020 je USB mini konektor, volil jsem mini-USB z důvodu úspory místa. Konektor má několik pinů, pin VBUS poskytuje napájení +5 V generované připojeným PC. Z tohoto pinu je poté vyveden signál +5V USB, který je dále rozváděn a konvertován v zapojení napájení. Piny D+ a D- reprezentují data+ a data-, jsou to tedy piny realizující komunikaci konektoru s PC. Pin ID slouží pro identifikaci host – slave, je tedy ponechán jako „floating“, tedy nezapojen. Piny MP 1 – 4 jsou tzv. „mounting“ piny, tedy piny upevňující náš konektor k desce, volil jsem SMD technologii, takže jsou piny jen přímo připájeny k desce.

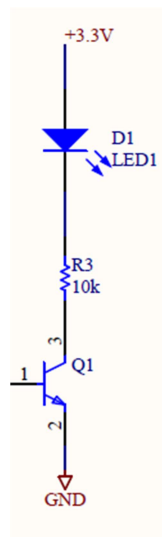
Pro převod komunikace mezi USB a UART byl zvolen čip FT232RL. Tento čip disponuje celou řadou funkcionalit, nicméně, pro tuto aplikaci, kde je zapotřebí tohoto čipu jen k realizaci komunikace s PC využijeme jen malou část jeho funkce. Pin VCC slouží jako napájení, je tedy připojen k 5 V z USB, pro stabilitu je opatřen několika kondenzátory. Pin VCCIO napájí řadu vstupních a výstupních pinů, např. TXD a RXD, tento pin je připojen na 3,3 V, čímž je určena napěťová úroveň vstupně – výstupních pinů na 3,3 V. Piny USBDP a USBDM jsou diferenční datové piny USB sběrnice. Pin 3V3OUT je pin vnitřního LDO regulátoru napětí, který je podle doporučení připojen na oddělovací kondenzátor. Poslední dva piny, které využíváme, jsou TXD a RXD, které realizují přenos dat mezi mikrokontrolérem a USBT – UART.

3.5.2 Ovládací a indikační prvky



Obr. 3.8 - Zapojení tlačítek

Zařízení je navíc vybaveno ovládacími a indikačními prvky, tedy dvěma tlačítky a LED. Tlačítka jsou zapojena podle Obr. 3.8. Tlačítko NRST je určené k resetu programu mikrokontroléru a tlačítko DEBUG lze použít pro ladění programu.



Obr. 3.9 - Zapojení LED

Na Obr. 3.9 je zapojení indikační diody ovládané pomocí NPN bipolárního tranzistoru.

Zapojení ovládacích a indikačních prvků jsou součástí zapojení mikrokontroléru, celkové zapojení je uvedeno v přílohách.

3.6 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér v zapojení realizuje „mozek operace“, je to část zapojení, kde je realizováno měření nastaveného předpětí diody, registrování impulsů generovaných elektronikou PIN diody a samotné ovládání celého zařízení. Celé zapojení mikrokontroléru je uvedeno v přílohách.

- **Výběr mikrokontroléru**

Při výběru mikrokontroléru bylo hleděno na řadu stanovených kritérií.

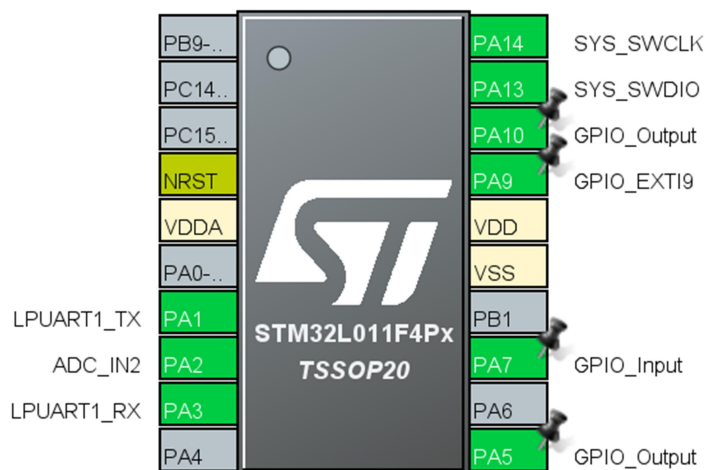
První, na které jsem bral ohled, je rozteč pinů a s tím související počet pinů, jelikož deska plošného spoje byla plánována na výrobu pomocí frézy KEI, která dokáže precizně vyrobít tloušťku spojů do 0,2 mm, pokud by byly spoje užší, mohly by nastat problémy. Proto jsem volil mikrokontrolér s menším počtem pinů a větší pinovou roztečí, aby to byla fréza schopná vyrobít.

Druhým kritériem byla dostatečná vybavenost mikrokontroléru z hlediska periférií. Tato aplikace vyžaduje A/D převodník, schopnost pracovat s UART a registraci rychlých externích přerušení (pro detekci dopadajícího ionizujícího záření). Tyto funkce splňuje většina dostupných mikrokontrolerů, proto to nebyl žádný problém.

Rovněž byl brán ohled na spotřebu mikrokontroléru, proto jsem volil z řady STM32-L, tedy ultra low power.

Zvolen byl mikrokontrolér STM32L011F4P6 [17], který splňuje všechna tato kritéria. Disponuje 20 piny s pinovou roztečí 0,65 mm a požadované funkce s přehledem splňuje.

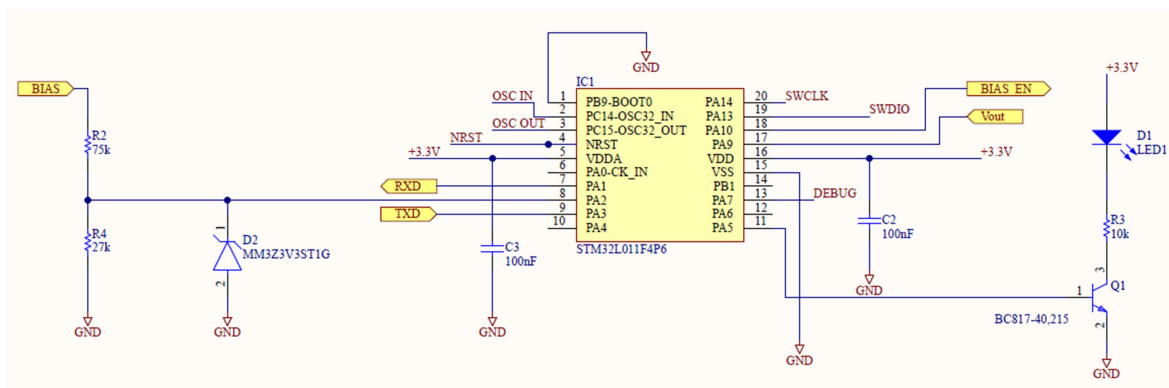
- **Rozložení pinů mikrokontroléru**



Obr. 3.10 - Rozložení pinů mikrokontroléru

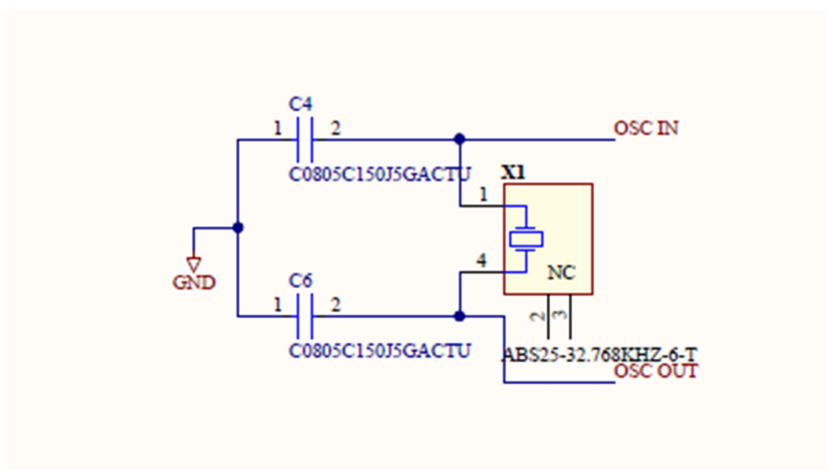
Pro správné přiřazení pinů, které jsou schopny požadované funkce realizovat, jsem použil program STM32CubeMX od firmy STMicroelectronics, výrobce tohoto mikrokontroléru. Mikrokontrolér jsem vyhledal a poté přiřazoval funkce pinům.

- **Zapojení mikrokontroléru**



Obr. 3.11 - Zapojení samotného mikrokontroléru

První pin tedy PB9-BOOT0 je tzv. bootovací pin, resp. startovací, který zajišťuje start mikrokontroléru. Pin je defaultně přiveden na GND. Další piny, PC14-OSC32_IN a _OUT jsou piny určené k připojení externího krystalového oscilátoru, zapojení je uvedeno na Obr. 3.12. Externí oscilátor byl zvolen z důvodu nepřesnosti interního oscilátoru mikrokontroléru. Pro tuto aplikaci by nepřesné časování pravděpodobně nevadilo, jelikož rozhraní UART nepracuje s vysokými přenosovými rychlostmi, ale u rychlejších komunikací by mohly vznikat problémy.



Obr. 3.12 - Zapojení externího krystalového oscilátoru

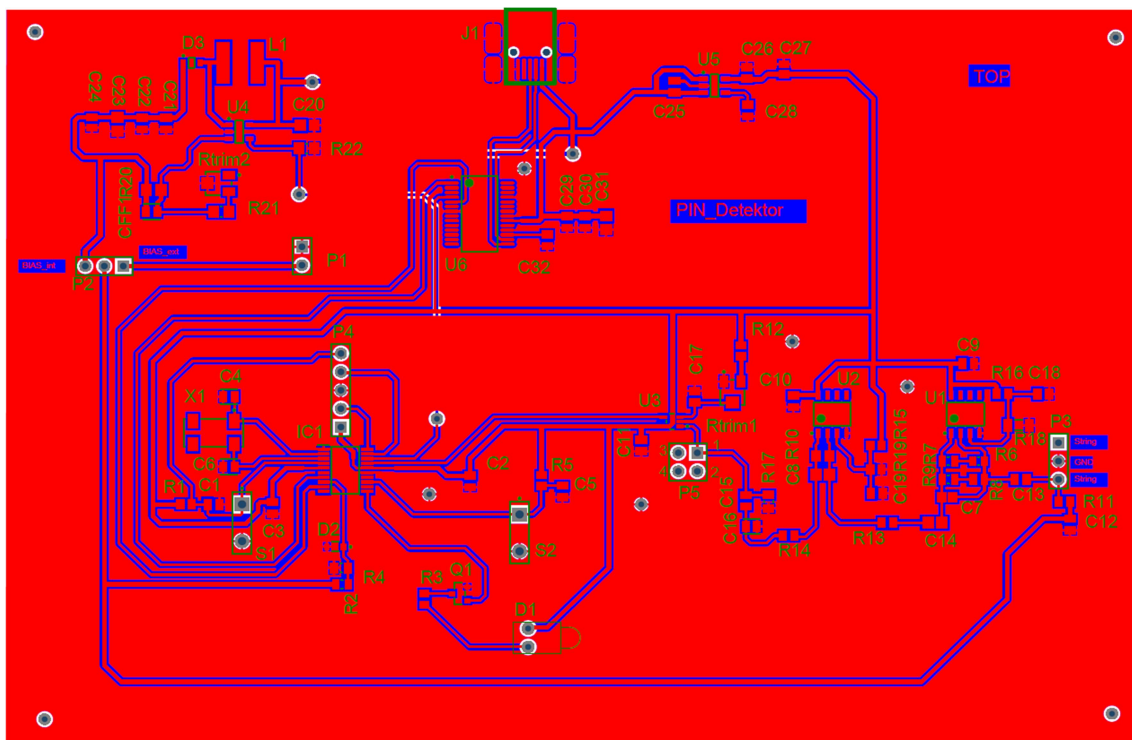
Pin NRST je resetovací pin, připojený na tlačítko pomocí kterého je možné mikrokontrolér resetovat. Další piny jež využíváme, jsou PA1 a PA3. Tyto piny slouží k realizaci TXD a RXD, viz USBT – UART. Piny, které jsou této funkci určeny, jsou právě piny PA1 a PA3. Další pin, který využíváme je PA2, tento pin slouží jako vstup A/D převodníku a je na něj přiváděno napětí ze spínaného zdroje BIAS, které chceme měřit.

Toto napětí na pin ale nemůže být přivedeno celé, na mikrokontrolér musí být přivedeno napětí menší než VDDA (referenční napětí A/D převodníku), v našem případě, menší než 3,3V. Proto jsem napětí BIAS, až 12,1 V vydělil pomocí napěťového děliče, podle vzorce:

$$U_{AD} = U_{BIAS} * \frac{R_4}{R_2+R_4} = 12,1 * \frac{27*10^3}{(27+)*10^3} = 3,2 V \quad (5)$$

Maximální napětí, které je schopen zdroj BIAS vytvořit je 12,1 V, když ho vydělíme pomocí děliče, maximální napětí, co může být na tomto A/D pinu je 3,2 V, což je menší než 3,3 V, tedy v pořádku. Pin PA5 využíváme v našem případě jako ovládání LED, pin PA7 jako tlačítko DEBUG. Další pin PA9 je využíván jako externí přerušování, slouží k zachycení krátkých impulsů z komparátoru nábojového zesilovače a tím zaznamenání dopadajícího ionizujícího záření. Pin PA10 slouží pouze k povolení spínaného zdroje BIAS, popsáno v části „Zdroj předpětí“. Piny PA13 a PA14, tedy SWCLK a SWDIO slouží k programování mikrokontroléru pomocí programovacího konektoru. Zbývající piny, jsou piny napájecí, pin VDDA slouží jako zdroj napětí A/D převodníku, pin VDD má funkci napájení digitální části, tedy 3,3 V a poslední VSS, který slouží jako společná zem pro celý mikrokontrolér.

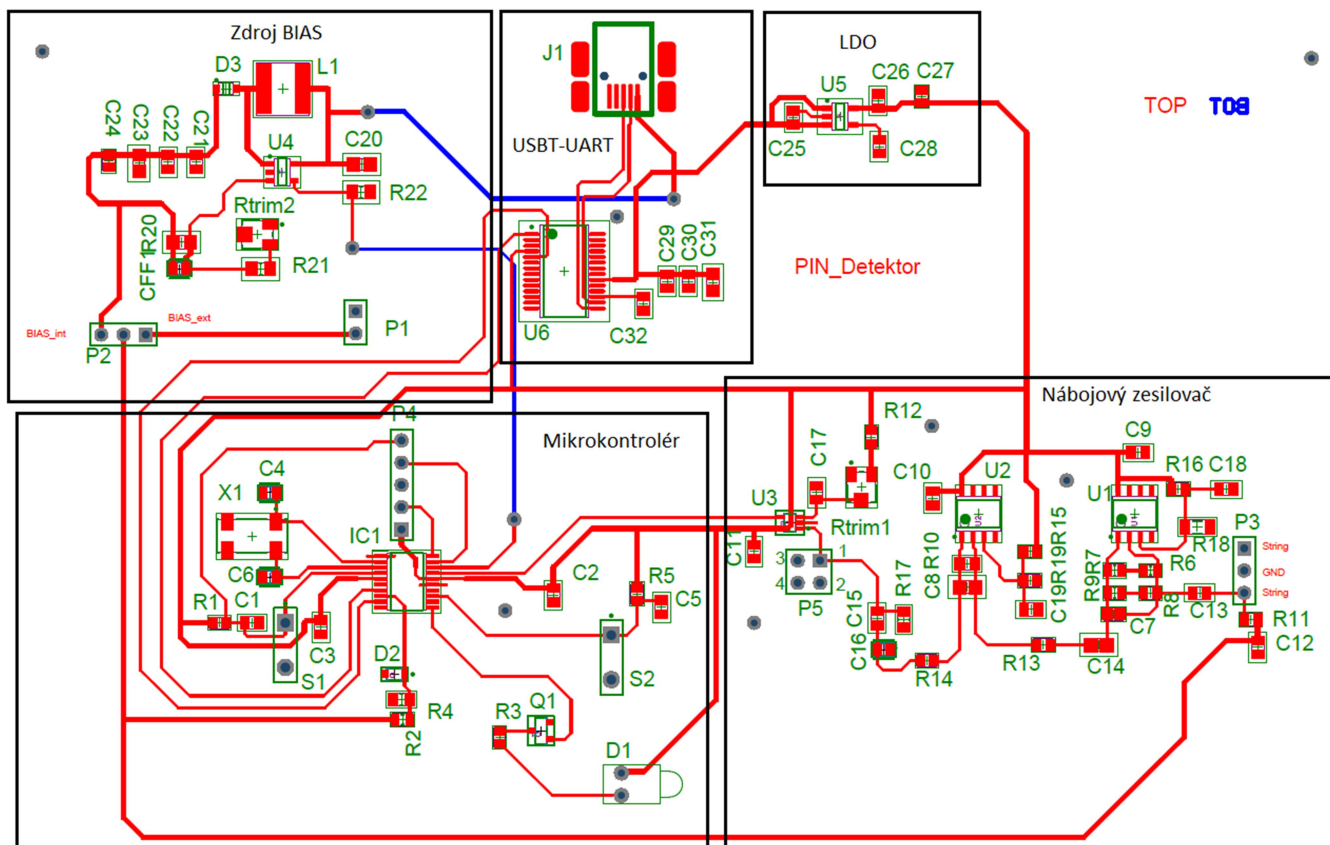
3.7 DPS



Obr. 3.13 - Deska plošných spojů s rozlitou mědí

Na Obr. 3.13 je Rozložení desky plošných spojů s rozlitou mědí GND. Volil jsem dvouvrstvou desku z důvodu těžkého rozvádění některých signálů a z důvodu kvalitního rozlitého signálu GND a přístupu některých pinů nebo součástek k tomuto signálu. Pro tento účel byly vytvořeny pokovené otvory, které tento signál rozvádí z vrstvy BOT.

Na Obr. 3.14 je DPS bez rozlité mědi pro větší čitelnost. Jednotlivá zapojení a části návrhu jsou ohraňována černými obdélníky.



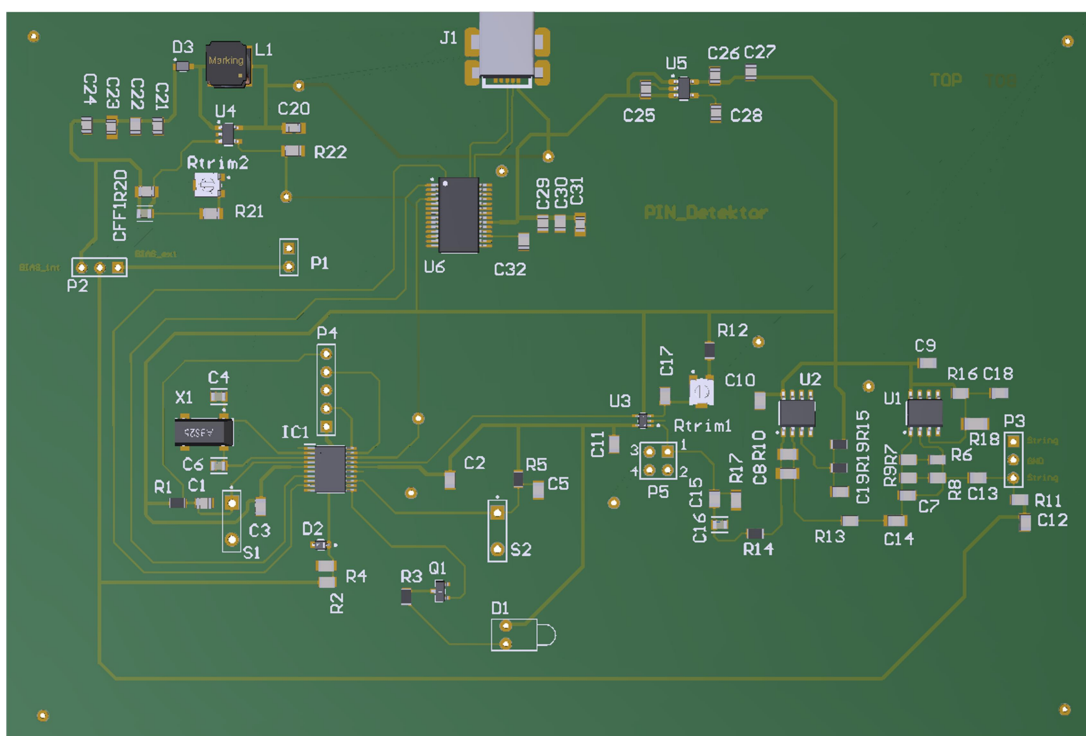
Obr. 3.14 - Rozložení součástek a jednotlivých zapojení bez rozlité mědi

Při návrhu byl brán důraz na dodržení pravidel návrhu DPS. Napájecí signály jsou tedy vedeny tlustším spojem, z důvodu snížení jejich odporu a indukčnosti a tím i ke snížení poklesů napětí při zvýšení odběru komponent. Zdroj předpětí BIAS je vzdálen co nejvíce od nábojového zesilovače z důvodu elektromagnetické kompatibility, pokud by byly tyto dvě části blízko sebe, mohlo by se stát, že by se zmenšil odstup signálu od šumu (SNR), citlivý nábojový zesilovač by zesiloval tento šum tvořený zdrojem předpětí a požadované proudové pulsy způsobené dopadajícím ionizujícím zářením by nemusely být detekovány. Zároveň byl brán ohled na vzdálenosti mezi jednotlivými stupni nábojového zesilovače a součástkami, které k nim patří, snažil jsem se o co nejkratší

vzdálenosti vodivých propojení. Vzdálenosti filtračních kondenzátorů od vstupních napájecích pinů byly též co nejvíc zkráceny.

Celkový pohled na vrstvy BOT je dostupný v přílohách.

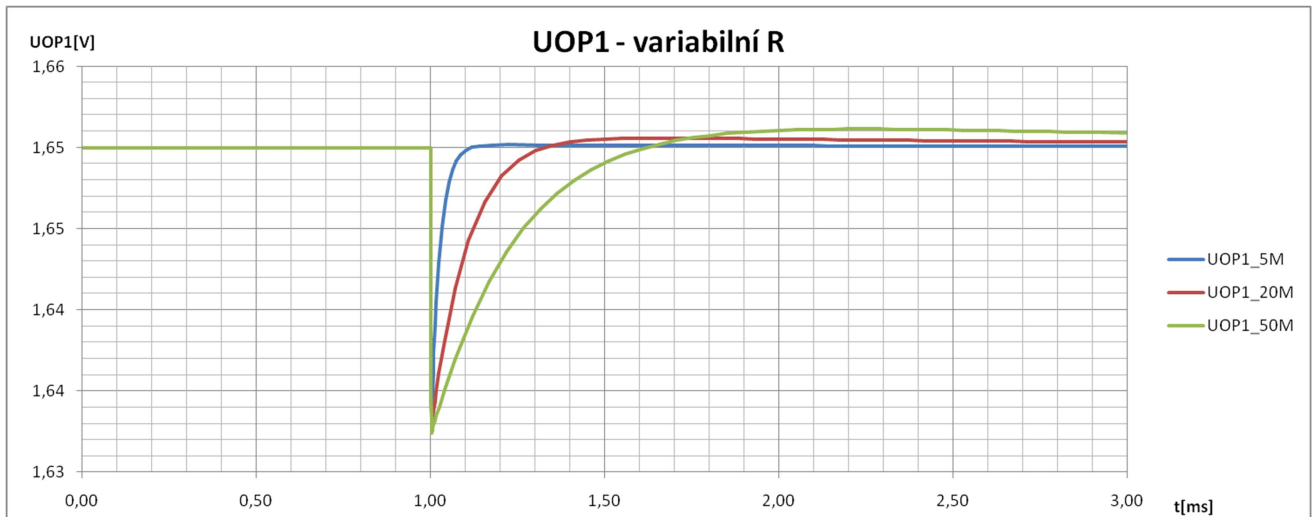
Z důvodu nemožnosti realizace desky plošných spojů je na Obr. 3.15 uveden 3D model.



Obr. 3.15 - 3D model DPS

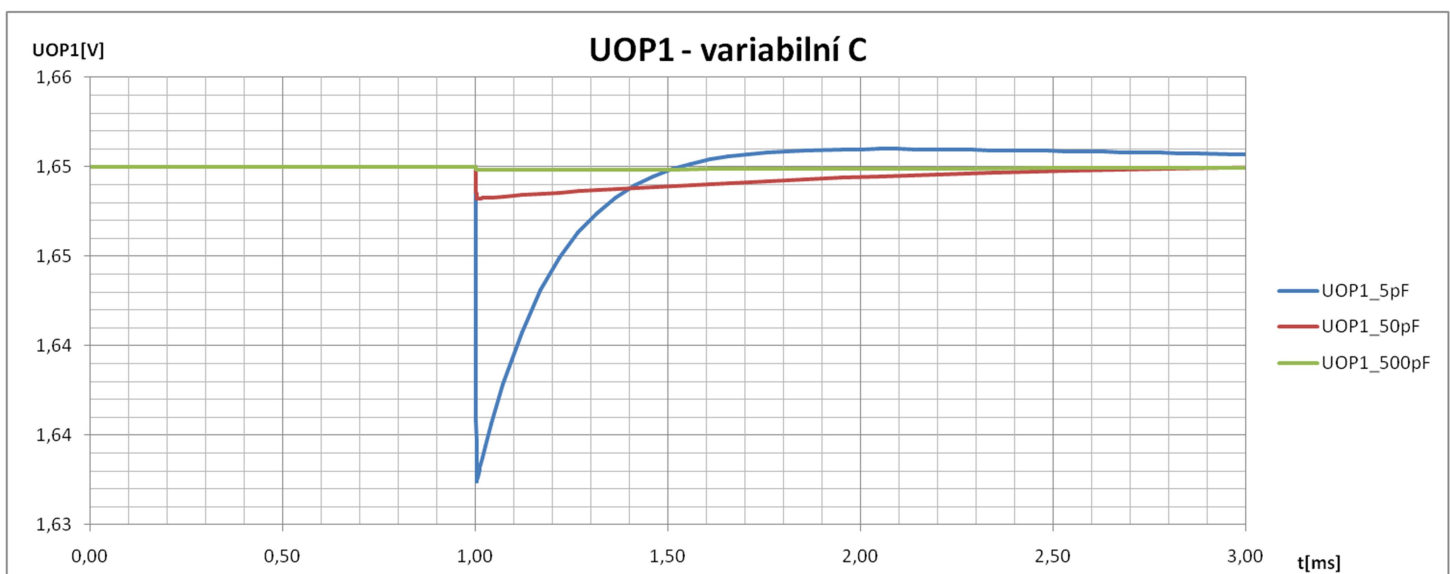
4 Měření/Simulace a zhodnocení výsledků

Pro ověření funkce nábojového zesilovače byla provedena simulace v simulačním programu LTspice. Elektrický proud vytvářený dopadajícím ionizujícím zářením je úměrný velikosti energie, kterou ionizující záření nese. Dopadající ionizující záření bylo znázorněno proudovým zdrojem, produkujícím elektrický proud o velikosti 45 nA pracujícím v pulsním režimu s délkou pulsu 1 μ s.



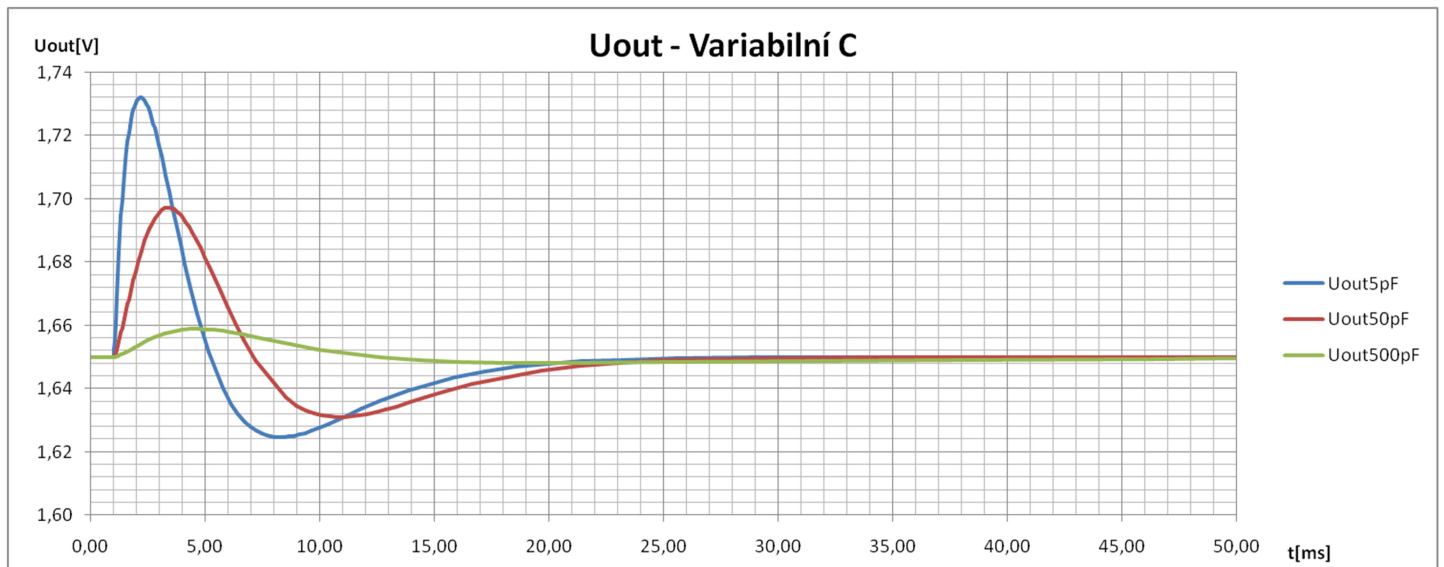
Obr. 4.1 - Vliv R na časovou konstantu

V grafu na Obr. 4.1 lze pozorovat vliv zpětnovazebního odporu R na časovou konstantu τ , podle rovnice (3), kdy se s rostoucí hodnotou odporu prodlužuje časová konstanta.



Obr. 4.2 - Vliv C na časovou konstantu a výstupní napětí a zesílení

Na Obr. 4.2 je znázornění výstupního napětí prvního stupně zapojení nábojového zesilovače. Se stoupající hodnotou zpětnovazební kapacity kondenzátoru roste časová konstanta τ , podle vzorce (3). Zároveň ale klesá zesílení a s tím i citlivost zapojení na dopad ionizujícího záření podle vzorců (1,2).



Obr. 4.3 - Výstupní napětí druhého stupně nábojového zesilovače

Průběh výstupního napětí U_{out} při dopadu ionizující částice je znázorněn na Obr. 4.3. Zde lze pozorovat i vliv velikosti kapacity kondenzátoru v prvním stupni nábojového zesilovače na celkové napětí, které se projeví na výstupu detektoru ionizujícího záření.

Z prezentovaných grafů lze pozorovat důležitosti výběru zpětnovazebních komponentů v zapojení nábojového zesilovače.

Celé zapojení a průběhy zachycené v simulaci LTspice jsou uvedeny v přílohách.

Závěr

Cílem této práce bylo prostudování teorie ionizujícího záření a následně návrh detektoru ionizujícího záření, který využívá specifických vlastností PIN diod.

V teoretické části jsem popsal ionizující záření, jeho druhy, vlivy na člověka a zdraví, detekce ionizujícího záření, pomocí PIN diod a zároveň i ochrana proti jednotlivým druhům záření.

Nejvíce prostoru jsem věnoval samotnému návrhu detektoru, všechny části jsou uvedeny v blokovém schématu. Zapojení nebylo z pandemických důvodů realizováno.

Napájení celého zařízení bylo řešeno prostřednictvím USB portu PC. Tento port rovněž slouží k realizaci interakce s uživatelem. Komunikace i napájení je tedy řešeno jediným konektorem. Zařízení mohlo být též napájeno z bateriových zdrojů, díky své nízkonapěťové koncepci. Jako možnost řešení takového problému se jeví rozšíření ovládacích prvků doplněním dalších tlačítek a indikačních prvků, které by data zobrazovala nebo uživatele jinak informovala o dopadajícím ionizujícím záření. Další částí návrhu je zpracování signálu, které bylo realizováno nábojovým zesilovačem. To se z výsledků simulace jeví jako dobré řešení, signál je zesílen a komparátor, by po nastavení a doladění napěťové úrovně pomocí odporového trimru měl být schopen detekovat změnu napětí a tím dopadající ionizující záření. Mikrokontrolér měl za úkol celé zapojení řídit a signály zpracovávat, jeho součástí měl být také obslužný program, který by měl za úkol celé zařízení řídit a dále zpracovávat data ze zapojení zpracování signálu, ten ale nebyl navržen z nemožnosti realizace návrhu.

Z důvodu nezrealizování zapojení nebylo možné otestovat vhodnost PIN diod na detekci ionizujícího záření, ale na základě provedených simulací a výsledků prezentovaných například v [9] lze předpokládat, že by navržená koncepce detektoru měla být funkční.

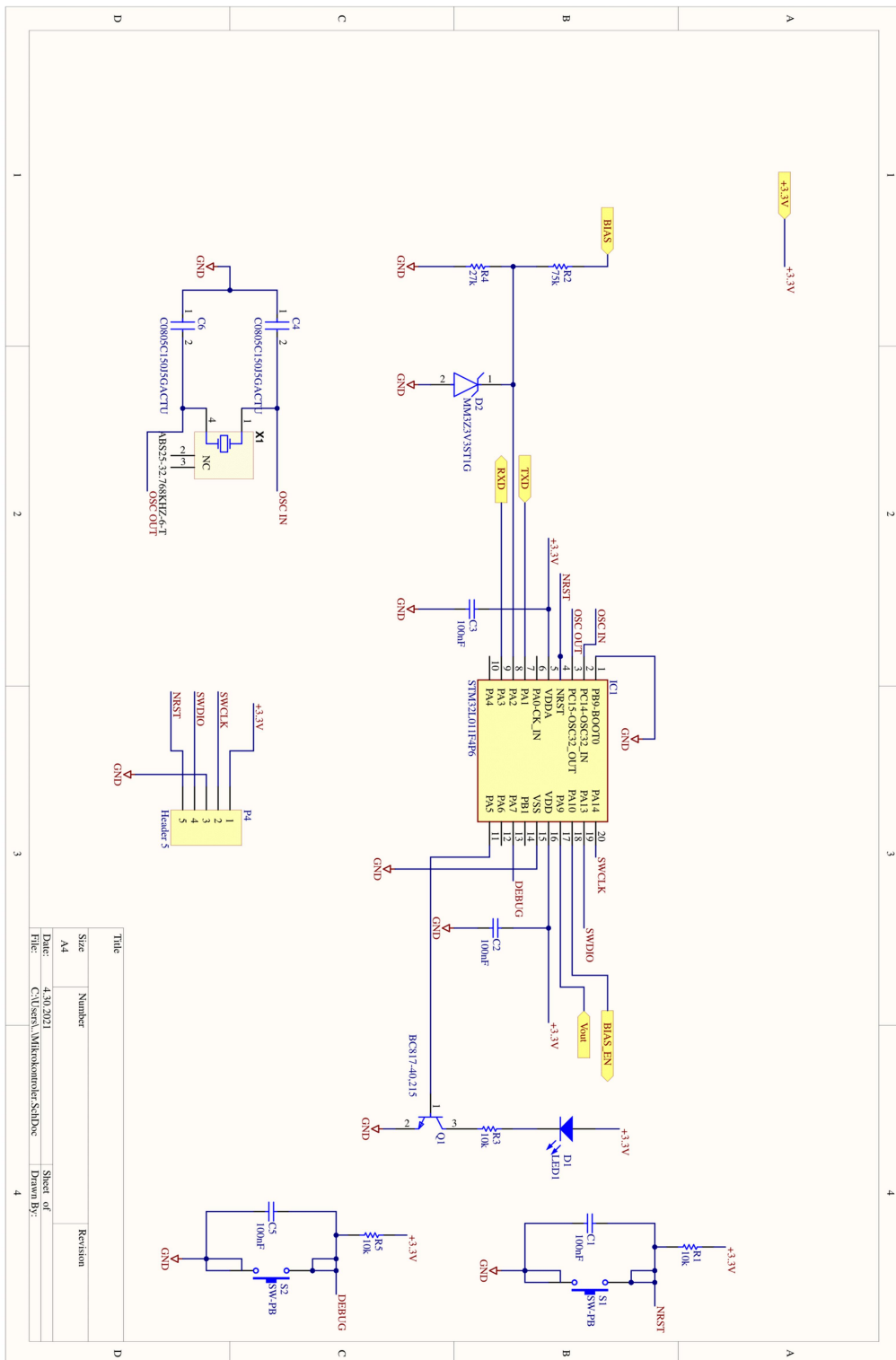
Možnosti zlepšení mohly být ve formě využití stabilizátoru na 3,3 V, jež je integrován v rámci obvodu FT232, slouží jako napájení většiny komponentů, tedy nemuselo být nutné dodatečného LDO stabilizátoru a tím by došlo k zmenšení DPS. Rozložení komponent na DPS bylo provedeno s ohledem na fakt, že se jedná o prototyp, u něhož hrozí nutnost neočekávaných, snadno proveditelných úprav. V případě plnohodnotné otestované verze by mohla být DPS lépe optimalizována, což by vedlo na následné zmenšení DPS.

Seznam literatury a informačních zdrojů

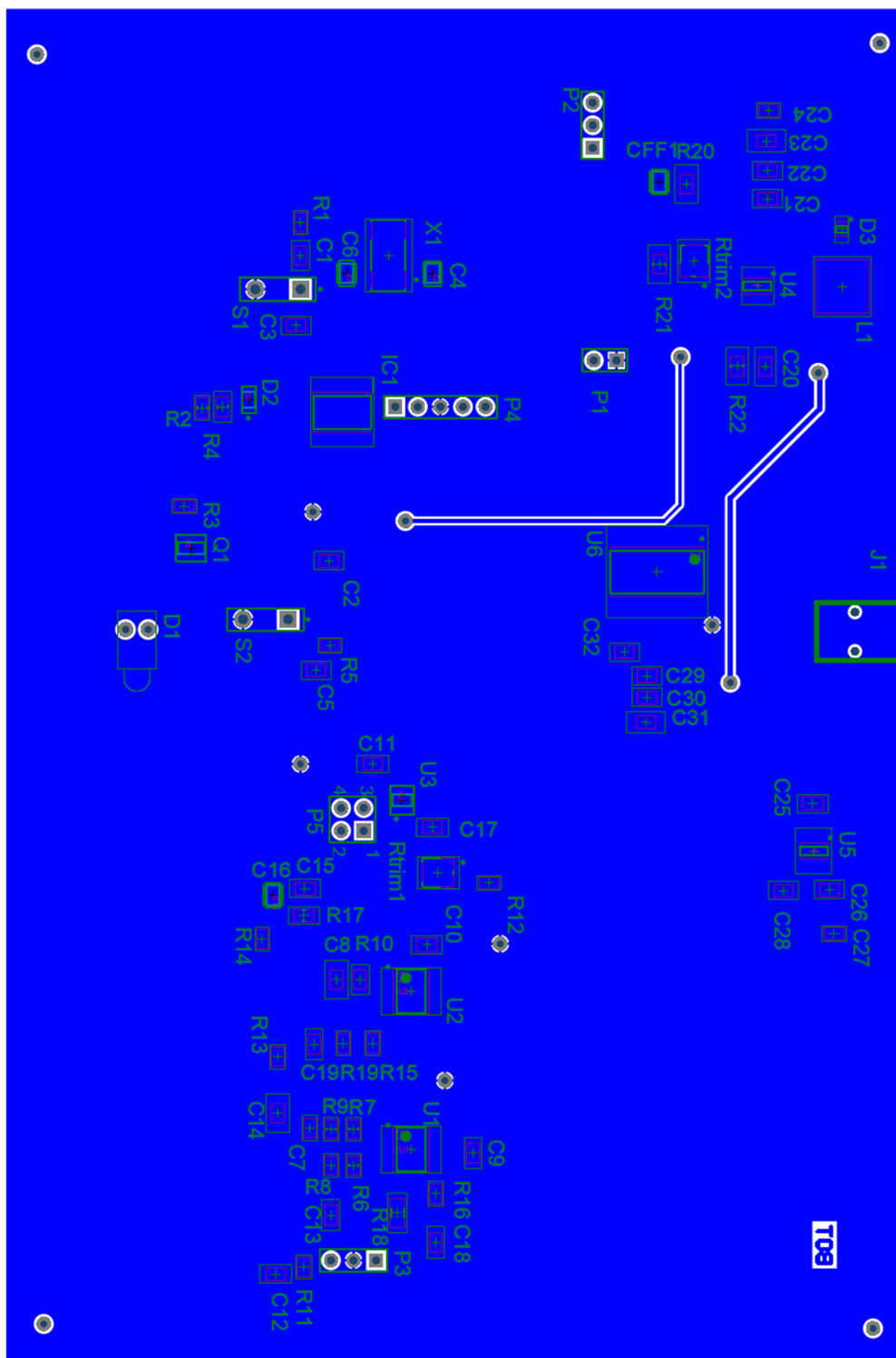
- [1] ULLMANN, Vojtěch. *Astronuklfyzika: Ionizující záření* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>
- [2] ULLMANN, Vojtěch. *Astronuklfyzika: Detekce a spektrometrie ionizujícího záření* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [3] *ARPANSA: Ionising radiation* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation>.
- [4] *Energyweb: Druhy ionizujícího záření* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: https://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.5.2
- [5] *EPA: Radiation Health Effects* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-health-effects>
- [6] *Wikipedia: Akutní radiační syndrom* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Akutn%C3%AD_radia%C4%8Dn%C3%AD_syndrom
- [7] *Medlineplus: Radiation sickness* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://medlineplus.gov/ency/article/000026.htm>
- [8] *Instrumentationtools: PIN diode working principle* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://instrumentationtools.com/pin-diode-working-principle/>
- [9] *PhysicsOpenLab: CERN DIY Particle Detector* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://physicsopenlab.org/2020/06/15/cern-diy-particle-detector/>
- [10] *Farnell: BPX61 - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2711564.pdf>
- [11] *ON semiconductor: QSE773 - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/qse773-d.pdf>
- [12] *Farnell: BPW41N - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2046124.pdf>
- [13] *Farnell: VEMD5060X01 - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2633001.pdf>
- [14] *Texas Instruments: TPS61040DBVR - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61040.pdf>
- [15] *Texas Instruments: TPS73133DBVR- datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps731.pdf>
- [16] *Farnell: FT232RL - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2007793.pdf>
- [17] *STMicroelectronics: STM32L011F4P6 - datasheet* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l011d4.pdf>
- [18] *NIH - Office of Research Services: Electromagnetic spectrum* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.ors.od.nih.gov/sr/dohs/safety/Pages/non-ionizing.aspx>
- [19] *Hamamatsu: Characteristics and use of Charge amplifier* [online]. [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/charge_amp_kacc9001e.pdf

Přílohy

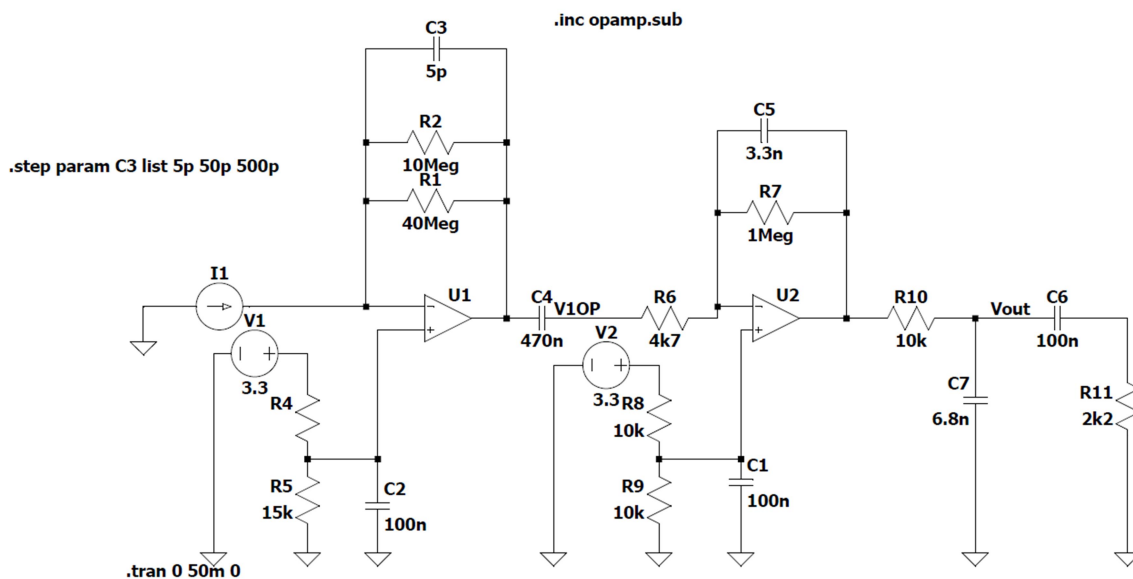
Příloha A – Zapojení mikrokontroléru a indikačních prvků



Příloha B – DPS – vrstva BOT

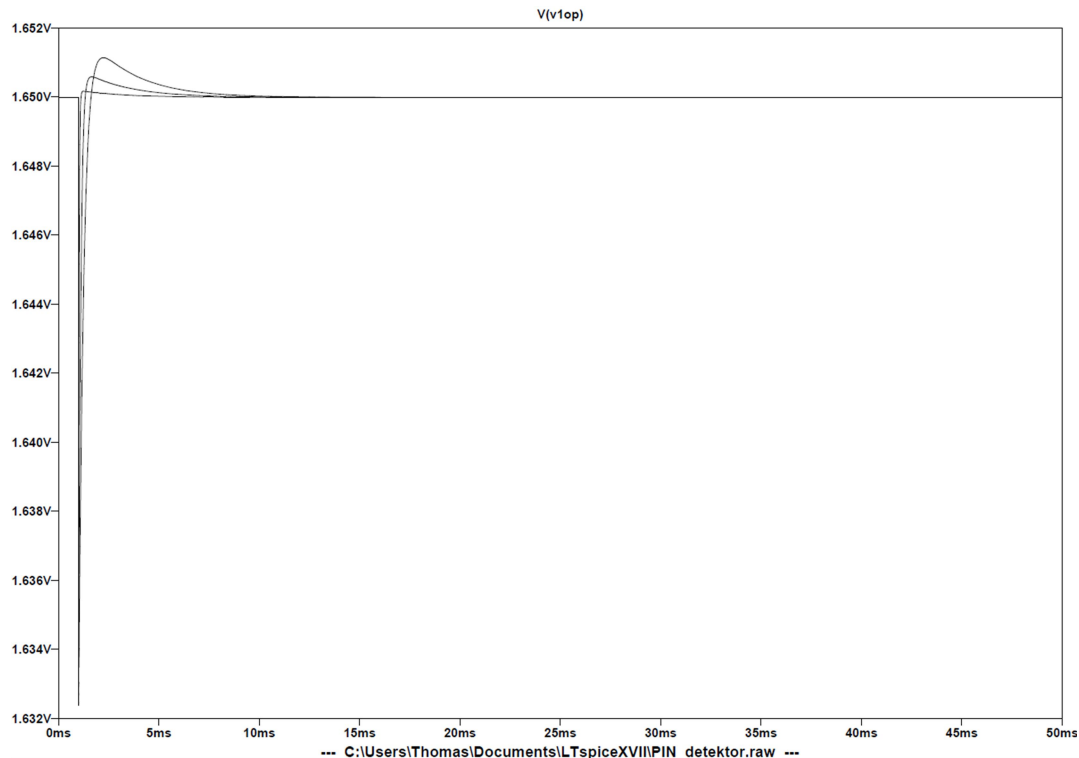


Příloha C – Zapojení nábojového zesilovače provedené v LTspice



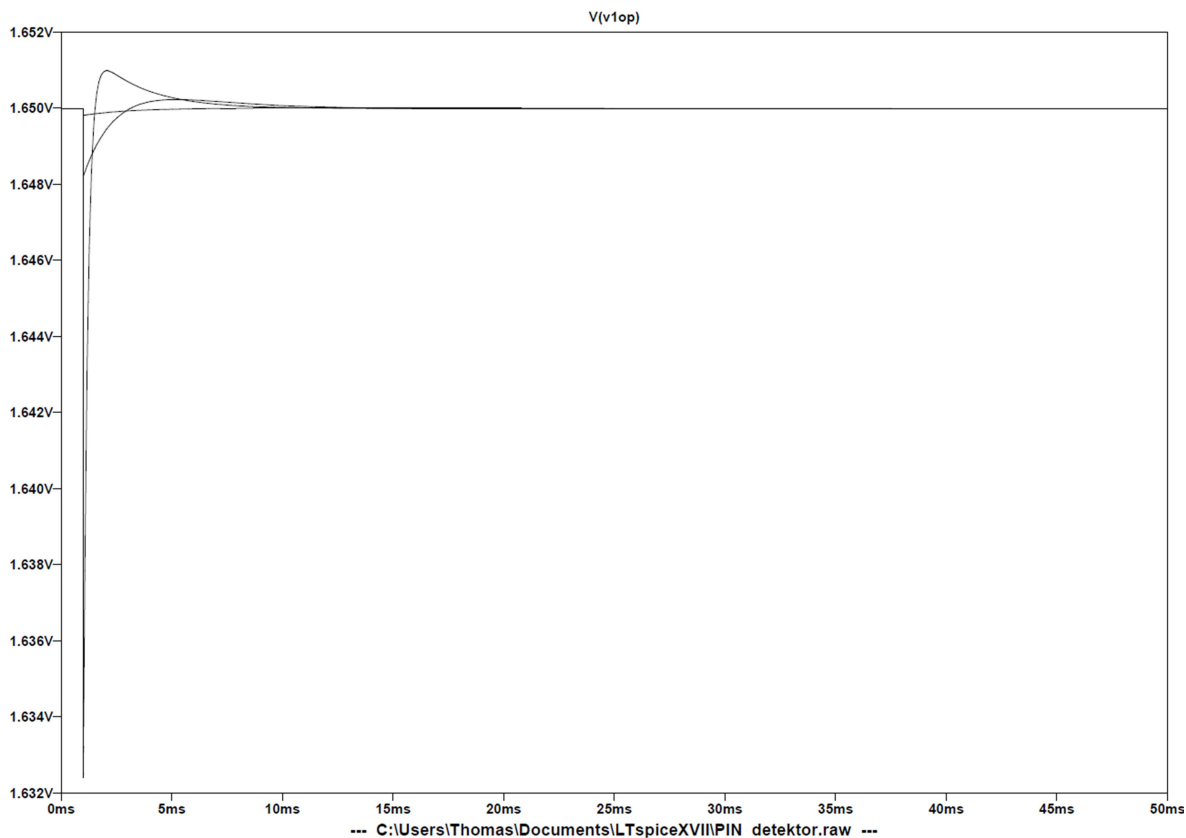
--- C:\Users\Thomas\Documents\LTspiceXVIII\PIN_detektor.asc ---

Příloha D– LTspice, průběh na výstupu napětí prvního stupně nábojového zesilovače při variabilním R

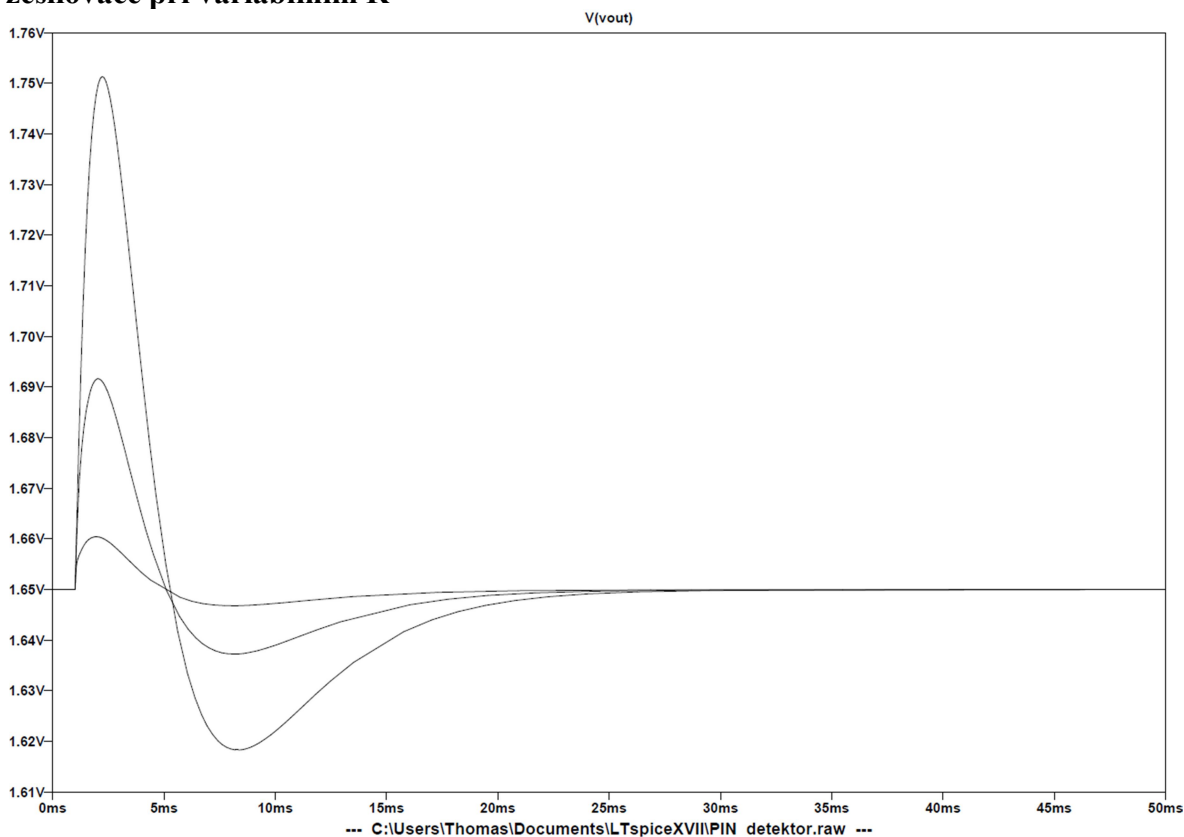


--- C:\Users\Thomas\Documents\LTspiceXVIII\PIN_detektor.raw ---

Příloha E – LTspice, průběh na výstupu napětí prvního stupně nábojového zesilovače při variabilním C



Příloha F – LTspice, průběh napětí na výstupu druhého stupně nábojového zesilovače při variabilním R



Příloha G – LTspice, průběh napětí na výstupu druhého stupně nábojového zesilovače při variabilním C

