



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

Detektor ionizujícího záření pro medicínské dohledové systémy

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský inženýr

Autor diplomové práce: Bc. Kryštof Minář

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Veselý

Kladno 2016

Katedra biomedicínské techniky

Akademický rok: 2015/2016

Z a d á n í d i p l o m o v é p r á c e

Student: **Bc. Kryštof Minář**
Studijní obor: Biomedicínský inženýr
Téma: **Detektor ionizujícího záření pro medicínské dohledové systémy**
Téma anglicky: Radiation detector for medical monitoring systems

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhňte koncept sensorového modulu detekce ionizujícího záření pro osobní bezdrátové medicínské dohledové systémy. Vytvořte schéma zapojení a plošný spoj v návrhovém softwaru EAGLE. Na základě Vámi vytvořených technologických podkladů nechte zhotovit desku plošných spojů a osadte ji. Naprogramujte firmware řídicího kontroléru a pomocí něj oživte hardware sensorového modulu. Vzniklý funkční vzorek kalibrujte a ověřte správnost jeho funkce. Zároveň ověřte funkčnost v rámci medicínského dohledového systému a proveďte sadu pilotních měření.

Seznam odborné literatury:

- [1] Stefaan Tavernier, Alexander Gektin, Boris Grinyov, Radiation Detectors for Medical Applications, Springer Science & Business Media, 2006, 315 s., ISBN 1402050917
- [2] Glenn F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, 2010, ISBN 0470131489

Vedoucí: Ing. Tomáš Veselý

Zadání platné do: 20.08.2017

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 20.01.2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Detektor ionizujícího záření pro medicínské dohledové systémy“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Kladně dne 20. 5. 2016

.....

Bc. Kryštof Minář

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Tomáši Veselému a odbornému kolektivu Společného biomedicínského pracoviště Albertov, zejména panu Ing. Lukáši Kučerovi, za veškerou pomoc a cenné rady při zpracování této práce.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a vývojem detektoru ionizujícího záření pro medicínské dohledové systémy, včetně tvorby schématu zapojení, desky plošných spojů a návrhu firmwaru řídicího kontroléru. Vytvořený funkční vzorek sensorového modulu je kalibrován Státním úřadem jaderné, chemické a biologické ochrany a je tak schopen korektní detekce ionizujícího záření. Jeho odolnost vůči ztíženým podmínkám a zároveň jeho funkčnost v rámci medicínského dohledového systému je ověřena sadou pilotních měření ve výcvikovém polygonu hasičského záchranného sboru.

Klíčová slova:

Medicínské dohledové systémy, detekce ionizujícího záření, PIN fotodiody, mikrokontrolér

Abstract:

This master thesis deals with the design and development of a ionizing radiation detector for medical monitoring systems, including the electrical wiring and printed circuit board layout and microcontroller firmware design. A functional developed detector is calibrated at the National Institute for Nuclear, Chemical and Biological Protection and is thus capable to correctly detect ionizing radiation. The unit's endurance and functionality within medical monitoring systems is verified by a set of pilot measurements at a training area for firefighters.

Key words:

Medical monitoring systems, ionizing radiation detection, PIN photodiode, microcontroller

Úvod	1
1 Přehled současného stavu	3
1.1 Detekce ionizujícího záření pomocí Geiger-Müllerova čítače.....	4
1.2 Detekce ionizujícího záření pomocí scintilačního detektoru	7
1.3 Přímá detekce ionizujícího záření pomocí polovodičů	11
1.4 Analýza přehledu současného stavu.....	18
2 Cíle práce	20
3 Návrh a realizace sensorového modulu	21
3.1 Návrh konceptu sensorového modulu detekce ionizujícího záření.....	21
3.2 Ladění dílčích prvků konceptu sensorového modulu	23
3.2.1 Testovací modul pro ověření detekce ionizujícího záření pomocí fotodiody.....	23
3.2.2 Testovací sensorový modul pro ladění zesilovacího obvodu	30
3.2.3 Testovací sensorový modul pro ověření vlastností PIN fotodiody.....	34
3.3 Návrh vlastního sensorového modulu.....	41
3.3.1 Výběr komponent a návrh schématu zapojení sensorového modulu	41
3.3.2 Návrh desky plošných spojů sensorového modulu.....	47
3.4 Realizace sensorového modulu.....	50
3.5 Firmware a oživení sensorového modulu	53
3.5.1 Vývojové prostředky pro návrh firmwaru a jeho struktura	53
3.5.2 Návrh firmwaru řídicího mikrokontroléru.....	55
3.5.3 Digitální zpracování a vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu	55
3.5.4 Oživení sensorového modulu	59
3.6 Ověření funkčního vzorku sensorového modulu	61
3.6.1 Ověření základních funkcí funkčního vzorku.....	61
3.6.2 Kalibrace funkčního vzorku.....	62
3.6.3 Ověření funkčního vzorku sensorového modulu v rámci medicínského dohledového systému	66
4 Výsledky	70
5 Diskuze	81
Závěr	85
Reference	87
Seznam obrázků	92

Seznam tabulek	95
Seznam příloh.....	96

Úvod

Ionizující záření je obecně proud hmotných částic či fotonů elektromagnetického záření, které s sebou nesou dostatečné množství energie k ionizaci atomů prostředí, kterým procházejí. Při interakci ionizujícího záření s živou tkání může v důsledku těchto ionizací docházet k tvorbě radikálů a narušení iontové rovnováhy v organismu, což vede k trvalému poškození buněk, jejich usmrcení či změně jejich genetické informace. [10]

Vzhledem k tomu, že je ionizující záření okem nepozorovatelné, je zapotřebí se před ním chránit jeho včasnou detekcí pomocí vhodných přístrojů. Nukleární technologie v poslední době zaznamenala významné rozšíření na poli energetiky, medicíny a výzkumu. S ohledem na riziko havárie nukleárních zařízení je tak potřeba monitorování a včasné upozornění na nebezpečné úrovně ionizujícího záření stále vyšší [1].

Po havárii nukleární elektrárny ve Fukušimě v roce 2011 byl zaznamenán nárůst potřeby kompaktních, úsporných a dostupných zařízení pro detekci radiace, a to zejména pro potřeby radiačních pracovníků, záchranných sborů a armády [2].

V současné době zároveň dochází k rychlému rozvoji osobních telemetrických dohledových systémů, které umožňují sledování parametrů sledovaných osob či prostředí, ve kterých se nachází. Dohledové systémy tak nacházejí využití v mnoha oborech, kterými jsou například monitorování seniorů, pacientů v domácí péči, sportovců, členů záchranných sborů či armády [3].

V kombinaci současných požadavků na kompaktní a úsporné detektory ionizujícího záření a rozvoj biotelemetrických bezdrátových dohledových systémů tak vzniká prostor v oblasti vývoje jednotky detekce ionizujícího záření. Současný technologický pokrok na poli mikroelektroniky a mikroprocesorové techniky umožňuje návrh a realizaci dostatečně miniaturního a úsporného detektoru ionizujícího záření vhodného pro integraci v bezdrátovém dohledovém systému pro monitoraci osob, a to bez omezení jejich pohybu a provádění jejich běžných činností.

Tato diplomová práce se zabývá vývojem sensorového modulu detekce ionizujícího záření pro osobní bezdrátové medicínské dohledové systémy. Navrhovaný sensorový modul není zamýšlen pro použití v konkrétním dohledovém systému. Má však splňovat

veškeré požadavky, které jsou na sensorové moduly těmito systémy kladeny, a být tak koncepčně i konstrukčně připraven na tento způsob použití a integrace.

Práce se tak v souladu s jejím zadáním věnuje návrhu konceptu sensorového modulu detekce ionizujícího záření pro osobní bezdrátové medicínské dohledové systémy. Dále je v práci obsažen návrh schématu zapojení a plošných spojů, tvorba technologických podkladů pro zhotovení desky plošných spojů a její osazení. Práce se také věnuje návrhu firmwaru řídicího kontroléru tohoto sensorového modulu a jeho oživení. Vzniklý funkční vzorek je následně kalibrován a je ověřena jeho funkce v rámci medicínského dohledového systému.

1 Přehled současného stavu

V současnosti k dispozici komerčně dostupná dozimetrická zařízení, která umožňují monitorování a zobrazení obdržené dávky ionizujícího záření za určitý čas a dokonce i aktuální dávkový příkon, jedná však se o zcela samostatné přístroje bez možností integrace do bezdrátových dohledových systémů. Zpravidla jsou vybaveny displejem pro zobrazení naměřených hodnot a akustickými alarmy pro upozornění uživatele při překročení určitých limitů [6][5][4][7].

V rámci bezdrátového dohledového systému je však zapotřebí, aby tato monitorovací jednotka byla schopná zajistit bezdrátový přenos naměřených veličin do sledovací jednotky, kde teprve dojde k jejich vyhodnocení a zpětnému upozornění monitorované osoby. Důvodem tohoto konceptu sledování a alarmů je možnost použití těchto bezdrátových dohledových systémů v rámci IZS (Integrovaného Záchraného Systému), armády a jiných zásahových sborů, jejichž členové nejsou při zásahu schopni sami sledovat a vyhodnocovat data získaná ze senzorických jednotek, tedy i z dozimetrické senzorické jednotky [8][9].

Vlastní návrh senzorového modulu detekce ionizujícího záření je tak pro jeho integraci do bezdrátového dohledového systému nezbytný. Z hlediska principu detekce ionizujícího záření je k dispozici několik možností, jejich výběr je však zúžen některými omezeními danými použitím v bezdrátových dohledových systémech. Touto limitací je zejména kontinuální charakter detekce z hlediska časového průběhu detekce, kdy musí odezva detektoru v reálném čase reflektovat aktuální vlastnosti přítomného ionizujícího záření. Kumulativní princip detekce záření je pro použití v bezdrátovém dohledovém systému zcela nevhodný, a to z důvodu jejich odezvy, která neodpovídá aktuální intenzitě přítomného ionizujícího záření, ale dochází k její kumulaci po dobu expozice a je zapotřebí jejího zpětného vyhodnocení [10].

1.1 Detekce ionizujícího záření pomocí Geiger-Müllerova čítače

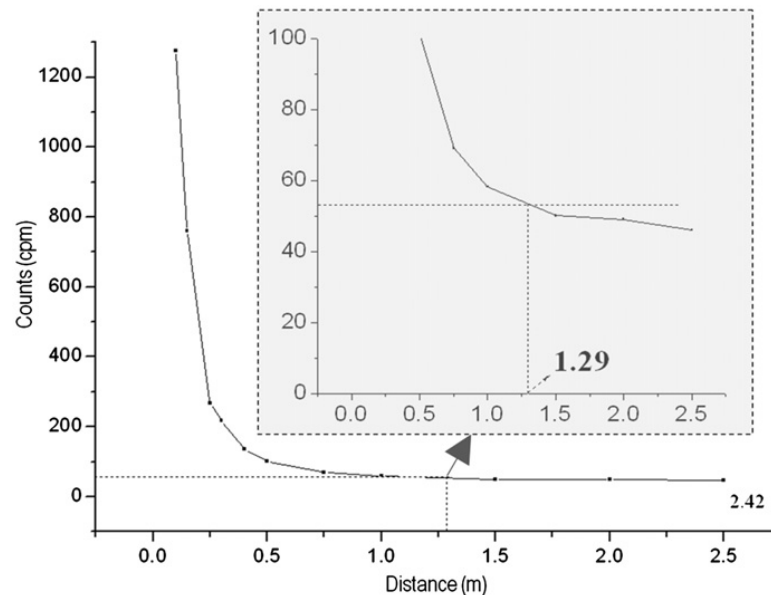
Principiálně nejjednodušším kontinuálním detektorem ionizujícího záření je Geiger-Müllerův čítač. Obvykle se jedná o soustavu trubicové katody s koncentricky umístěnou anodou v hermeticky uzavřené trubicí, jež je naplněna inertním plynem o tlaku nižším než atmosférickém. Elektrody jsou připojeny na vysoké napětí, díky čemuž tento detektor pracuje v oboru přídavné ionizace, konkrétně v Geiger-Müllerově oboru. V důsledku průchodu částice ionizujícího záření trubicí dochází k ionizaci plynného prostředí detektoru, vzniká tak množství elektronů s kinetickou energií dostačující pro sekundární ionizaci dalších plynných částic. Tento lavinový efekt je doprovázen tokem ionizačního proudu tekoucího ve vnějším obvodu, který se následně upravuje a zaznamenává. Každý průchod částice ionizujícího záření detekční trubicí je tak indikován proudovým či napěťovým pulzem, díky čemuž je možné zjistit počet částic ionizujícího záření v prostředí a prostřednictvím kalibrace i jiné veličiny charakterizující přítomné ionizující záření [11][10].

Geiger-Müllerovy čítače jsou obecně vzato levná a spolehlivá řešení detekce ionizujícího záření, která mají výhodu ve vysoké energetické citlivosti a nízkých požadavků na provozní podmínky, tj. okolní teplotu, vlhkost či mechanické namáhání. Proti použití tohoto principu v kompaktních bateriových detektorech ionizujícího záření však hovoří velké rozměry samotné detekční trubice zejména pak a potřeba vysokého napětí v řádu několika set voltů. Navzdory těmto limitujícím faktorům byl na Vědeckotechnické univerzitě Číny (USTC) navržen funkční vzorek Geiger-Müllerova čítače kompaktních rozměrů a s nízkým proudovým odběrem a je k dispozici i několik komerčních řešení [1][7].

Funkční vzorek detektoru ionizujícího záření navržený na USTC využívá komerčně dostupnou detekční trubicí. Jako zdroj vysokého napětí slouží napájecí zdroj vlastní konstrukce, jenž se skládá z tranzistorového oscilátoru, jednofázového transformátoru a vyhlazovacích prvků na sekundárním vinutí transformátoru pro úpravu napájecího napětí pro detekční trubicí. Proudové impulzy z trubice jsou převedeny na napěťové pulzy s amplitudou 1 V a následně tvarovány pomocí kaskády Schmittových klopných obvodů. Takto zpracované pulzy jsou následně přivedeny na vstup přerušení mikrokontroléru MSP430F149 od firmy Texas Instruments, který zaznamenává jejich četnost. Takto získaná data o detekovaných částicích záření jsou následně odeslána do připojeného PC prostřednictvím USB sběrnice nebo prostřednictvím dvojice

bezdrátových modulů ZigBee připojených k modulu pomocí sběrnice I²C a k PC pomocí sběrnice RS232 [1].

Z hlediska detekce ionizujícího záření je tento sensorový modul schopen záření ze zdroje ⁶⁰Co o aktivitě 8,14 kBq, a to na vzdálenost až 2,5 m. Počet detekovaných částic záření však klesá s druhou mocninou vzdálenosti mezi zdrojem a detektorem, viz graf na Obr. 1, přičemž ve vzdálenosti 1 m senzoru od výše uvedeného zdroje záření bylo detekováno pouhých 78 částic záření za minutu. Vzdálenost 1,29 m vyznačená na Obr. 1 odpovídá limitní vzdálenosti senzoru od zdroje záření ⁶⁰Co, kdy lze daným senzorem 1,2násobek hodnoty pozadí, tedy počtu detekovaných částic bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření [1].



Obr. 1: Graf závislosti počtu detekovaných částic na vzdálenosti senzoru od zdroje [1].

Zhotovený funkční vzorek tohoto detektoru ionizujícího záření má rozměry $125 \times 76 \times 27$ mm. Z hlediska provozních vlastností má spotřebu 3,9 mA při napájecím napětí 3,3 V, této hodnotě však není zohledněna spotřeba řídicího mikrokontroléru. Provozní teplota senzoru se pohybuje od -14 do 75 °C a relativní vlhkost vzduchu od 10 do 99 % [1]. Zhotovený funkční vzorek tohoto detektoru je vpravo na Obr. 2.



Obr. 2: Zapouzdřený funkční vzorek detektoru ionizujícího záření s Geiger-Müllerovým čítačem (vpravo) [1].

1.2 Detekce ionizujícího záření pomocí scintilačního detektoru

Dalším způsobem detekce ionizujícího záření je prostřednictvím scintilátoru připojeného k zařízení citlivého na světlo. Scintilátor je transparentní látka, v níž při absorpci ionizujícího záření dochází k excitaci některých částic, jejichž následná de-excitace je doprovázena emisí elektromagnetického vlnění ve viditelném spektru. Scintilační vlastnosti tak obecně vykazují transparentní látky, které obsahují luminiscenční centra – oblasti v krystalové mřížce s vloženým iontem cizího prvku. Může se jednat o látky organického původu (naftalen, stilben, antracen), aktivované anorganické krystaly (ZnS(Ag), NaI(Tl)) či roztoky těchto látek. Při průchodu ionizujícího záření scintilátorem tak v jeho objemu vznikají záblesky viditelného světla, které lze následně detekovat a zaznamenávat připojeným světlocitlivým zařízením. Tím je v konvenčních scintilačních detektorech používaných v lékařství fotonásobič, respektive matice fotonásobičů. Jedná se o soustavu elektrod, kde vstupní fotokatoda slouží k přeměně fotonů ze scintilátoru na elektrony prostřednictvím fotoelektrického jevu, vzniklý proud elektronů je usměrněn a zesílen postranními dynodami, na anodu fotonásobiče tak dopadá $10^5 - 10^9$ elektronů na každý elektron vyražený z fotokatody. Prostřednictvím zátěžového rezistoru ve vnějším obvodu fotonásobiče tak vzniká napěťový pulz, který je následně zpracován a zaznamenán [11][10].

Vzhledem k tomu, že je intenzita záblesku ve scintilátoru úměrná energii absorbovaného ionizujícího záření, je energii úměrná i amplituda tohoto napěťového pulzu. Pomocí scintilačních detektorů tak lze na rozdíl od Geiger-Müllerova čítače určovat energii dopadajícího záření, díky čemuž scintilační detektory nalézají uplatnění ve spektrometrii. Scintilační detektory taktéž nabízejí vysokou energetickou citlivost - jsou schopné detekovat záření o energii až několik MeV. Z hlediska použití scintilačního detektoru v rámci kompaktního bateriového sensorového modulu je však omezujícím prvkem elektrodový fotonásobič konvenčně užívaný k zesílení záblesků ve scintilátoru, a to z důvodu jeho velkých rozměrů, potřeby vysokého napájecího napětí a citlivosti na mechanické poškození [2][12].

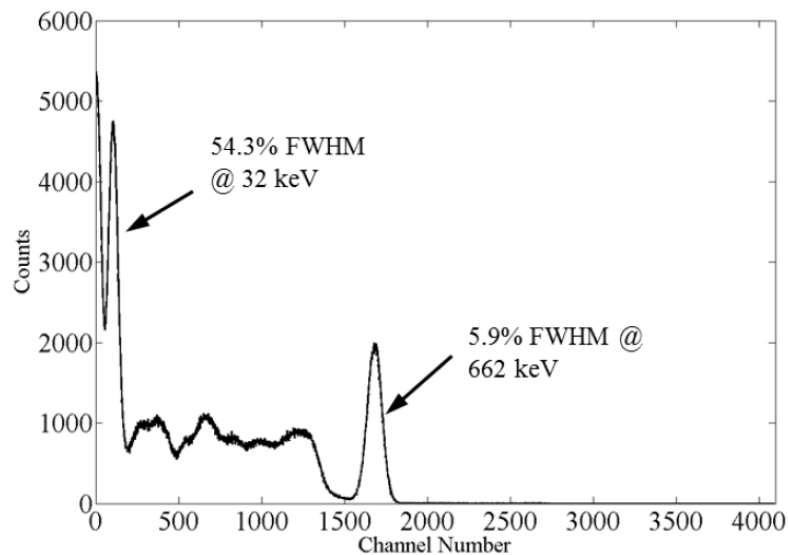
Energeticky a prostorově méně náročnou alternativou k elektrodovému fotonásobiči je jeho polovodičová varianta SPM (Silicon PhotoMultiplier). Jedná se o hustě uspořádanou matici světlocitlivých buněk, tzv. mikrocel, přičemž každá z těchto mikrocel se skládá z křemíkové fotodiody a tlumicího rezistoru. Průchodem fotonu dopadajícího viditelného záření fotodiódou dochází k předání energie procházejícího

fotonu valenčnímu elektronu částice v polovodiči. V důsledku toho dojde k jeho vyražení do vodivostního pásma, čímž vznikne pár elektron-díra s tendencí pohybovat se do vyprázdněné oblasti kolem PN přechodu fotodiody a tam zaniknout. Tomu lze zabránit zapojením fotodiody v závěrném směru pod určitým napětím, v důsledku čehož dojde k průtoku slabého elektrického proudu fotodiodou. Při přítomnosti elektrického pole s dostatečně vysokou intenzitou (více než $5 \cdot 10^5$ V/cm) mezi elektrodami fotodiody navíc dojde k urychlení nosičů náboje vzniklých v důsledku absorpce fotonu, a to do takové míry, kdy nosiče náboje mají dostatečnou kinetickou energii k vytvoření sekundárních párů elektron-díra. Díky tomu může absorpce jediného fotonu způsobit kaskádu sekundárních ionizací, v důsledku čehož je proud tekoucí fotodiodou při absorpci fotonu značně zesílen. Fotodioda zapojená tímto způsobem pracuje v Geigerově oboru a je společně s tlumícím rezistorem, který slouží k utlumení vzniklého proudového pulzu, základním prvkem polovodičového fotonásobiče - mikrocelou. Vzhledem k tomu, že je výstup této mikrocely pouze dvoustavový, tedy neposkytuje informaci o intenzitě dopadajícího záření, je polovodičový fotonásobič složen z mnoha takových mikrocel, řádově v počtu 100 – 1000 mikrocel na jeden mm^2 plochy fotonásobiče. Jejich výstupy jsou spojeny v jeden společný, výstup celého fotonásobiče je tak sumou výstupů jednotlivých mikrocel. Počet aktivovaných mikrocel je úměrný intenzitě dopadajícího záření a je tak tomu proporcionální i výstup fotonásobiče [12].

Základem kompaktního bezdrátového detektoru ionizujícího záření "MiniSpec" zkonstruovaného na Oregon State University (OSU) je kombinace výše popsanych detekčních prvků, tedy scintilačního krystalu CsI(Tl) připojeného k polovodičovému fotonásobiči MicroSL 60035. Vzhledem k proporcionalitě výstupu fotonásobiče k energii ionizujícího záření absorbovaného připojeným scintilátorem není detektor MiniSpec koncipován jako Geiger-Müllerův čítač s binárním výstupem, nýbrž jako spektrometr schopný identifikace přítomného radioizotopu. Signál z fotonásobiče napájeného napětím 30 V je tak po zesílení a filtraci přiveden na AD převodník s 12-bitovým kvantizačním rozlišením a vzorkovací frekvencí 40 MHz. Digitalizovaný signál je následně odeslán do programovatelného hradlového pole (FPGA), v němž je zpracován a vyhodnocen. Takto získaná data jsou odesílána do připojeného PC prostřednictvím USB sběrnice, případně bezdrátově do mobilního telefonu pomocí

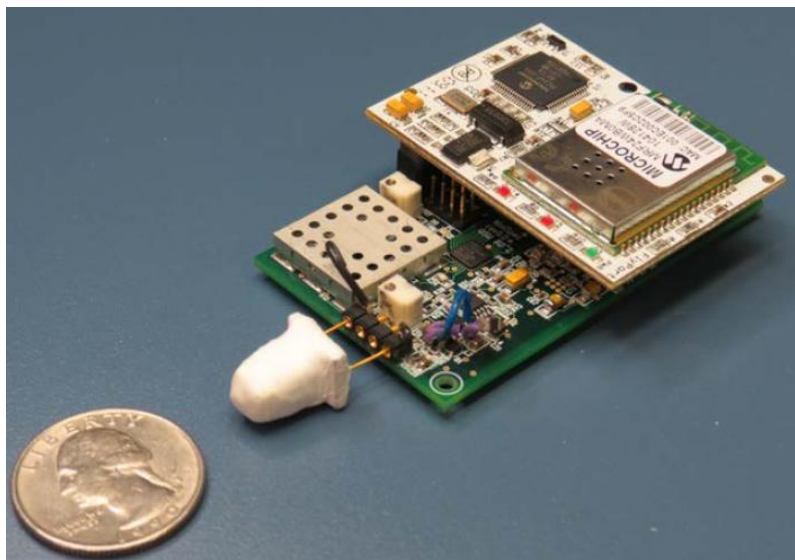
bezdrátové síťové WiFi karty OpenPicus připojené k FPGA prostřednictvím SPI sběrnice [2].

Spektrometr MiniSpec tak poskytuje informaci o přítomném ionizujícím záření, a to v podobě energetického spektra. Jedná se o závislost počtu získaných pulzů na jejich amplitudě, což lze interpretovat jako spektrum energií detekovaných částic. Energetický rozsah spektrometru MiniSpec se pohybuje v rozsahu 22 – 1800 keV. Díky tomu lze na získaném energetickém spektru přítomného zdroje ionizujícího záření pozorovat charakteristické prvky a píky spektra zdroje ionizujícího záření, tedy pík úplného pohlcení, Comptonovské kontinuum, pík zpětného rozptylu a případně i pík způsobený přítomností dalšího prvku ve zkoumaném zářiči, viz získané energetické spektrum zdroje ^{137}Cs na Obr. 3 [2].



Obr. 3: Energetické spektrum ^{137}Cs získané z funkčního vzorku spektrometru MiniSpec [2].

Zhotovený funkční vzorek tohoto spektrometru má rozměry $25,4 \times 38,1$ mm, hmotnost 28 g (bez baterie) a jeho proudový odběr se při napájecím napětí z 3,7 V pohybuje okolo 110 mA. Jeho provozní teplotu a vlhkost vzduchu autoři neuvádějí, avšak zmiňují zkreslení výstupního signálu vlivem teploty vzduchu. Kompenzace této teplotní závislosti však nebyla v době vzniku funkčního vzorku implementována. Výsledný funkční vzorek navrženého detektoru je na *Obr. 4* [2].



Obr. 4: Zhotovený funkční vzorek spektrometru pro ionizující záření MiniSpec [2].

1.3 Přímá detekce ionizujícího záření pomocí polovodičů

Polovodičový senzor lze k detekci ionizujícího záření použít nejen v kombinaci se scintilačním krystalem, nýbrž i samostatně. Na rozdíl od polovodičového fotonásobiče se zpravidla jedná o samostatnou strukturu s PN přechodem, tedy s rozhraním mezi oblastí převažujícími nosiči volnými náboje typu P (díry) a oblastí s převažujícími volnými nosiči náboje typu N (elektrony). Na přechodu mezi těmito oblastmi nepřevažuje žádný typ volných nosičů náboje, přítomné neutrální částice vznikají rekombinací elektronů a děr z P a N oblasti. O PN přechodu lze tak hovořit i o vyprázdňené (depletační) oblasti a o celém polovodičovém detektoru jako o diodě [13][14].

V případě vniku částice ionizujícího záření do vyprázdňené oblasti dojde k opětovné ionizaci těchto neutrálních částic. Stejně jako v případě SPM (Silicon PhotoMultiplier) lze zabránit opětovné rekombinaci takto vzniklých nabitých částic připojením detekční diody v závěrném směru na zdroj napětí. V důsledku toho se tyto částice začnou pohybovat směrem k elektrodám diody s opačnou polaritou a diodou proteče elektrický proud, který se následně převádí na napěťový pík, jenž se následně zesiluje a zpracovává. Amplituda tohoto píku je úměrná energii absorbované částice ionizujícího záření, což umožňuje použití přímých polovodičových detektorů ve spektrometrii γ a RTG záření [14][15].

V současnosti užívané polovodičové spektrometry zhotovené z vysoce čistého germania (HPGe – high-purity germanium) jsou schopné detekovat vysokoenergetické částice (až 8 MeV) a nabízejí vysoké energetické rozlišení, avšak jsou velmi rozměrné a k jejich provozu je potřeba vysoké závěrné napětí v řádu tisíců voltů a chladič systém na bázi kapalného dusíku pro potlačení závěrného proudu [11][10].

K detekci ionizujícího záření lze kromě germaniových detektorů použít i polovodičové diody na bázi křemíku, které jsou kompaktní, schopné pracovat při nízkém závěrném napětí v řádu jednotek voltů, nevyžadují chlazení a nabízí dobré energetické rozlišení. Maximální energie detekovatelných částic je však v případě křemíkových diod značně omezena, obvykle na několik desítek, maximálně několik set keV. Ačkoliv tato detekční čidla nenabízejí ideální parametry pro konstrukci spektrometru, jsou díky svým nízkým nárokům na provozní podmínky vhodné pro užití v kompaktních, bateriových, bezdrátových a jiných detektorech, kde nelze zajistit vysoké napájecí napětí a účinné chlazení. [16].

Z tohoto důvodu byla křemíková dioda použita jako detekční čidlo v systému bezdrátových detektorů ionizujícího záření, jenž byl navržen a zkonstruován ve spolupráci akademických a výzkumných institucí v Bukurešti a Pitesti v Rumunsku. Systém se skládá z několika bezdrátových sensorových modulů a jedné centralizované výpočetní konzole pro zpracování a záznam dat. Tento detekční systém byl navržen pro monitoraci a lokalizaci přítomného ionizujícího záření v jaderných elektrárnách a pro osobní dozimetrii [13].

Detekčním čidlem každého navrženého sensorového modulu je křemíková PIN fotodiody. Ta se od standardní křemíkové diody liší PN přechodem konstrukčně zpřístupněným okolnímu záření. Do PN přechodu je zároveň vložena vyprázdňená oblast I zhotovená z čistého křemíku bez příměsí, a to z důvodu zvětšení aktivní plochy fotodiody pro zvýšení pravděpodobnosti absorpce dopadajících částic. Proudové pulzy generované PIN diodou v důsledku absorpce částic ionizujícího záření jsou následně zesíleny a filtrovány zesilovacím obvodem, jehož posledním stupněm je komparátor pro vytvoření dvoustavového výstupu k rozlišení mezi detekovanou částicí a šumem. Zesilovací obvod je připojen na mikroprocesorovou jednotku sensorového modulu, která zpracovává výstupní signál zesilovače a určuje počet detekovaných částic ionizujícího záření. Takto získanou informaci sensorový modul následně odesílá do

centrální jednotky prostřednictvím GSM technologie, přičemž součástí odesílané zprávy je i GPS pozice daného sensorového modulu [13].

Zhotovený funkční vzorek bezdrátového sensorového modulu je schopen detekce ionizujícího záření o energii v rozsahu 50 - 2000 keV. Ukázka výstupního signálu při detekci částice ionizujícího záření je na Obr. 5 [13].



Obr. 5: Záznam napětového pulzu získaného sensorovým modulem při detekci částice [13].

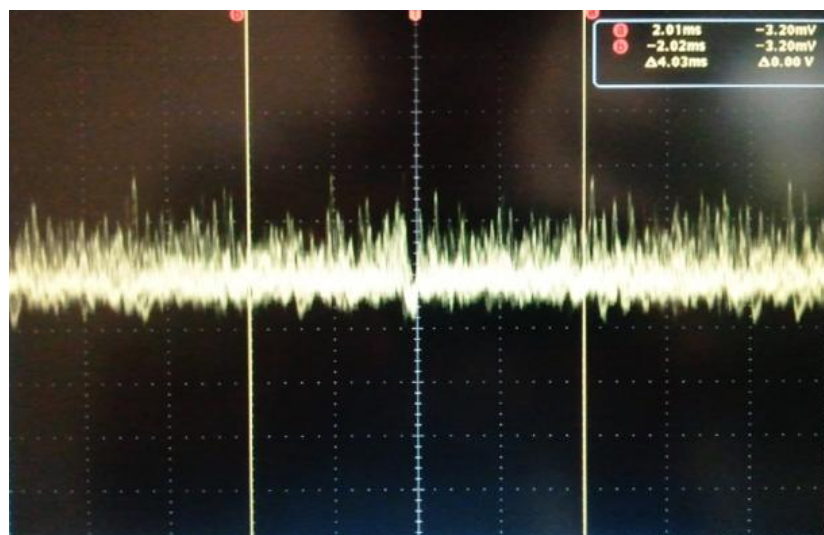
Klíčovým prvkem při použití PIN fotodiody jakožto detektoru ionizujícího záření je zesilovací obvod sloužící k zesílení proudových pulzů generovaných fotodiodou při absorpci částice ionizujícího záření. Při jejich získávání hraje roli způsob zapojení fotodiody v zesilovacím obvodu. Tu je možno zapojit v propustném směru, kdy se chová jako samostatný zdroj elektrického proudu, jehož velikost je dána dopadajícími částicemi záření a v takovém případě se jedná o fotovoltaický režim zapojení. Pokud je dioda zapojena v závěrném směru a pod určitým napětím, chová se fotodioda jako proměnlivý rezistor, jehož odpor je dán částicemi dopadajícího záření, tehdy je fotodioda zapojena ve fotokonduktivním (fotovodivostním) režimu [15][17].

Oba z výše popsaných způsobů zapojení nabízejí jistá pozitiva, přičemž pro detekci rychlých dějů, jakými jsou jednotlivé dopady částic ionizujícího záření, je vhodnější fotokonduktivní režim. Ten v důsledku závěrného napětí snižuje celkovou kapacitanci fotodiody, která je díky tomu schopná patřičně reagovat na jednotlivé dopady částic ionizujícího záření. Dalším důsledkem fotokonduktivního zapojení fotodiody je zvýšení jejího temného proudu, tedy elektrického proudu jenž fotodiodou zapojenou v závěrném směru protéká i bez jakéhokoli ozáření jejího PN přechodu. Tím pádem dochází ke vzniku nežádoucího šumu [15].

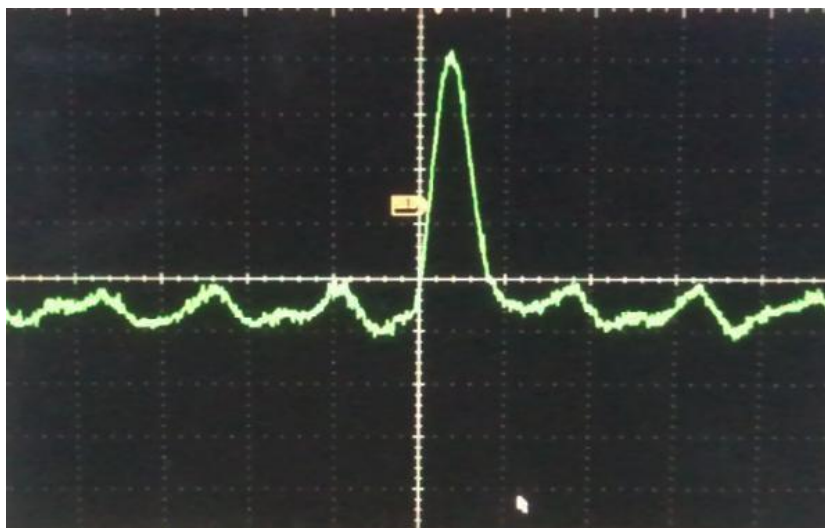
Pro zesílení proudových impulzů generovaných PIN fotodiodou při absorpci ionizujícího záření se zpravidla používá transimpedanční zesilovač, který obecně vzato slouží k převodu elektrického proudu na napěťový signál a jeho následné zesílení [21]. Návrhu, konstrukci a ověření transimpedančního zesilovacího obvodu se skupinou detekčních PIN fotodiod zapojených ve fotokonduktivním režimu pro detekci RTG a γ záření se věnovali na Southern Methodist University v Texasu [18].

Detekčním čidlem navrženého sensorového modulu byla skupina čtyř křemíkových PIN fotodiod BPW34 od firmy Vishay zapojených ve fotokonduktivním režimu pod závěrným napětím 9 V. K zesílení jimi produkovaných proudových pulzů při detekci ionizujícího záření byl navržen zesilovací obvod, jenž se skládal ze dvou zesilovacích stupňů s operačními zesilovači LMC662 od firmy Texas Instruments. První zesilovací stupeň je zapojen jako transimpedanční zesilovač a převádí proudové pulzy z fotodiod na napěťový signál, jenž je dále zesílen druhým zesilovacím stupněm, jímž je operační zesilovač v invertujícím zapojení [18].

Pro ověření funkce byl realizovaný sensorový modul vystaven záření ze zářiče ^{60}Co . Výstupní signál získaný pomocí osciloskopu je na Obr. 6, přiblížený napěťový pulz indukující absorpci jedné částice je na Obr. 7 [18].

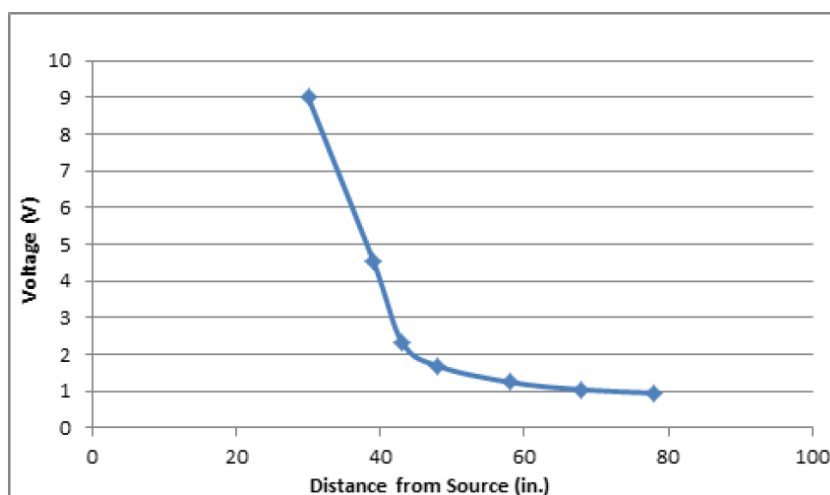


Obr. 6: Napěťový signál ze sensorového modulu při ozáření zářičem ^{60}Co [18].



Obr. 7: Napěťový pulz ze sensorového modulu indikující absorpci částice ze zdroje ^{60}Co [18].

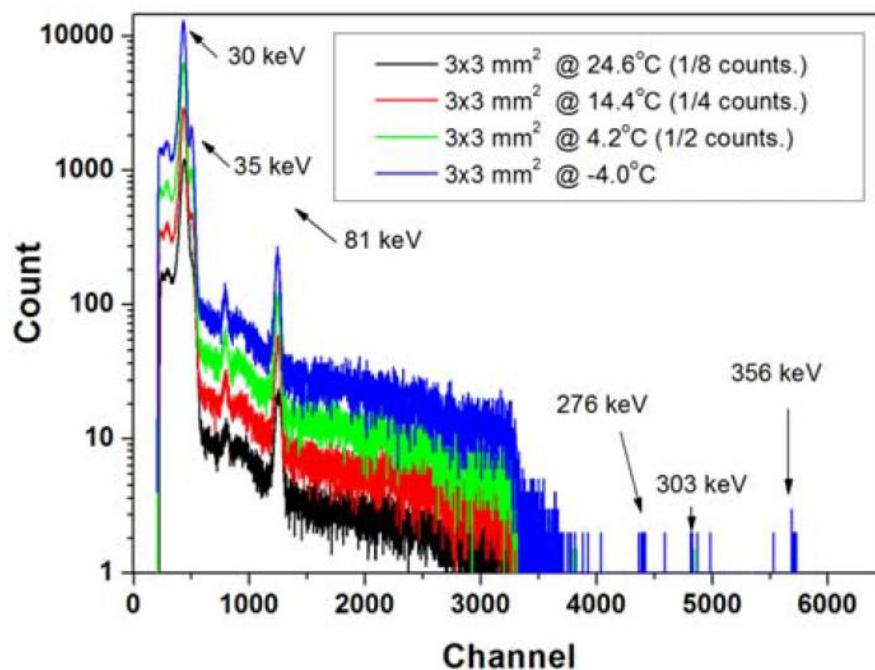
Výstupní hodnota tohoto sensorového modulu nebyla v podobě počtu detekovaných částic ionizujícího záření za jednotku času, který se užívá například v případě Geiger-Müllerových čítačů, ale v podobě výstupního napětí zesilovacího obvodu, jehož průměrná hodnota se zvyšuje s rostoucím počtem detekovaných částic. Závislost výstupního napětí detektoru na vzdálenosti mezi ním a zdrojem záření je na Obr. 8 [18].



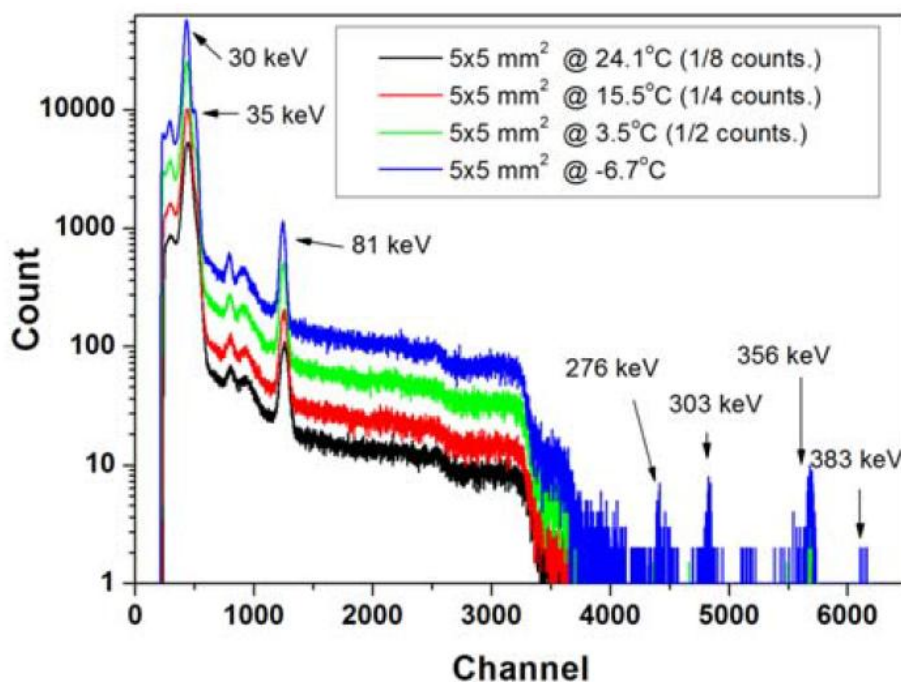
Obr. 8: Závislost výstupního napětí detektoru (Voltage) na vzdálenosti od zdroje záření ^{60}Co (Distance from Source) [18].

Mocninný charakter závislosti je způsoben zákonem převrácených čtverců, podle něžž klesá počet detekovaných částic z bodového zdroje záření s druhou mocninou vzdálenosti [1].

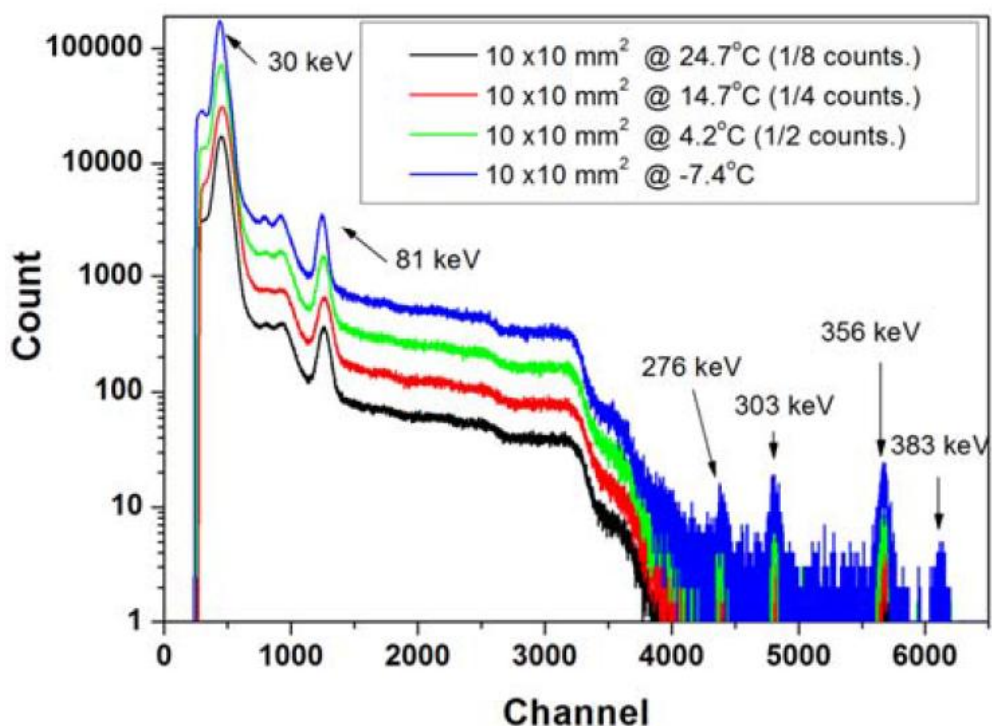
Detekční křemíková fotodioda je stejně jako jiné polovodičové součástky citlivá na teplotu okolního prostředí. Tato teplotní závislost fotodiody v rámci detekce částic ionizujícího záření byla zkoumána ve spolupráci Yonsei University a Korea Atomic Energy Research Institute v Koreji. Měření byly podrobeny tři křemíkové PIN fotodiody o rozměrech 10×10 mm, 5×5 mm a 3×3 mm, přičemž pro každou z nich bylo provedeno měření v přítomnosti zářiče ^{133}Ba . Pomocí připojeného Peltierova článku byly zajištěny různé teploty okolního prostředí. Naměřené spektrum, tedy závislost počtu detekovaných částic na jejich energii, reprezentované počtem detekovaných píků a jejich amplitudou, je pro různé teploty zaneseno na Obr. 9, Obr. 10 a Obr. 11, tedy pro každou z měřených fotodiód [19].



Obr. 9: Naměřené spektrum zářiče ^{133}Ba fotodiódou o rozměrech 3×3 mm pro teploty 24,6 °C (černá křivka), 14,4 °C (červená křivka), 4,2 °C (zelená křivka) a -4,0 °C (modrá křivka) [19].



Obr. 10: Naměřené spektrum zářiče ^{133}Ba fotodiodou o rozměrech 5×5 mm pro teploty $24,1$ °C (černá křivka), $15,5$ °C (červená křivka), $3,5$ °C (zelená křivka) a $-6,7$ °C (modrá křivka) [19].



Obr. 11: Naměřené spektrum zářiče ^{133}Ba fotodiodou o rozměrech 10×10 mm pro teploty $24,7$ °C (černá křivka), $14,7$ °C (červená křivka), $4,2$ °C (zelená křivka) a $-7,4$ °C (modrá křivka) [19].

Z výše uvedených spekter je zřejmá teplotní závislost křemíkové PIN fotodiody, kdy při nižších teplotách okolního prostředí byl fotodiodou detekován větší počet částic ionizujícího záření, zejména pak v případě částic s vyšší energií. Naopak v případě vyšších teplot se tato hodnota snižuje a při nejvyšší teplotě je detekována 1/8 počtu částic, jenž byl detekován v případě teploty nejnižší [19].

Vzájemným porovnáním těchto spekter je zřetelný i vliv rozměrů použité fotodiody. V případě fotodiody s detekční plochou 10×10 mm je maximální počet detekovaných částic v řádu stovek tisíc, zatímco u fotodiody o rozměrech 3×3 mm je tato hodnota o řád nižší [19].

1.4 Analýza přehledu současného stavu

Každý ze způsobů detekce ionizujícího záření popsaných v předchozích kapitolách nabízí při vzájemném porovnání jisté přednosti a zároveň omezení. Při návrhu vlastního sensorového modulu, který by splňoval požadavky kladené jeho integrací v medicínském bezdrátovém dohledovém systému, je však kromě detekčních vlastností důležité zvážit i provozní charakteristiky daného principu detekce.

Detekce založená na principu Geiger-Müllerova čítače nabízí přednosti ve směru provozní stability, spolehlivosti a odolnosti vůči teplotním změnám. Proti jeho použití v rámci kompaktního bezdrátového sensorového modulu však hovoří potřeba vysokého napájecího napětí v řádu několika stovek voltů pro detekční trubici, jehož vytvoření z bateriového napájení je vždy komplikací. Limitujícím faktorem jsou i obvykle relativně velké rozměry detekční trubice. I v případě nejmenších komerčně dostupných modelů se jejich délka pohybuje okolo 50 mm. Ve spojení s nezbytným zdrojem vysokého napětí by tak byl výsledný sensorový modul založený na této technologii rozměrný a pravděpodobně i energeticky neefektivní.

V současnosti hojně využívané scintilační detektory nabízejí mnohé přednosti, zejména pak v oblasti spektrometrie. Umožňují detekci širokého rozsahu energií ionizujícího záření a jsou schopné zjistit energii jednotlivých dopadajících částic. Dříve standardně užívané elektrodové fotonásobiče nezbytné pro chod těchto detektorů jsou v současnosti nahrazovány fotonásobiči polovodičovým. Ty odstraňují i některé provozní nedostatky scintilačních detektorů, kterými bylo vysoké napájecí napětí, velikost a náchylnost k mechanickému poškození. Moderní řešení těchto detektorů jsou sice kompaktní a umožňují bateriové napájení, avšak vzhledem k jejich vysoké ceně a nízké dostupnosti

by bylo jejich použití v rámci sensorového modulu detekujícího pouze nebezpečné úrovně ionizujícího záření zcela neefektivní.

Využití křemíkové PIN fotodiody pro detekci ionizujícího záření umožňuje návrh a konstrukci kompaktního a energeticky nenáročného sensorového modulu. Důvodem je její nízké pracovní napětí kolem 10 V, jehož vytvoření není v případě bateriového napájení komplikací díky široké nabídce dostupných stejnosměrných napěťových měničů typu Step-Up. Pro provoz fotodiody nejsou kromě zesilovacího obvodu vyžadovány žádné další periferie, a sensorový modul založený na tomto principu tak může být velmi energeticky úsporný. Z hlediska prostorové náročnosti jsou minimální rozměry sensorového modulu limitovány pouze velikostmi detekční fotodiody, zesilovacího obvodu a napájecího zdroje, které mohou být v současnosti velmi kompaktní. Zmíněné ideální provozní charakteristiky zmíněného principu detekce jsou však kompenzovány vysokými nároky kladenými na návrh a provedení zesilovacího obvodu, kdy musí být zajištěna jeho odolnost vůči okolnímu rušení. Z hlediska detekce ionizujícího záření je fotodioda limitována energetickým rozsahem detekovatelného záření, kdy s rostoucí energií záření klesá pravděpodobnost jeho detekce. Tento nedostatek lze však v případě potřeby odstranit připojením scintilačního krystalu k detekční fotodiodě, díky čemuž dojde k významnému rozšíření spektra detekovatelných energií. Neodstranitelnou limitací křemíkových fotodiod je však jejich významná teplotní závislost, která způsobuje zhoršování detekčních schopností fotodiody s rostoucí teplotou.

Po porovnání principů detekce popsaných výše se pro návrh a realizaci sensorového modulu detekce ionizujícího záření určeného k integraci do bezdrátového dohledového systému jeví jako ideální detekce pomocí křemíkové PIN fotodiody. Důvodem jsou příznivé provozní vlastnosti a rozšiřitelné schopnosti detekce ionizujícího záření. Teplotní závislost křemíkové fotodiody je však limitace veškerých polovodičových zařízení a ani v případě volby jiného principu detekce by nedošlo k jeho úplnému odstranění.

V následujících kapitolách je popsán kompletní návrh, realizace a ověření sensorového modulu detekce ionizujícího záření využívajícího křemíkové PIN fotodiody.

2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je kompletní návrh sensorového modulu detekce ionizujícího záření pro osobní bezdrátové medicínské dohledové systémy, jeho realizace, naprogramování řídicího firmwaru, ověření jeho základních funkcí, kalibrace a ověření jeho funkčnosti v rámci medicínského dohledového systému.

Dílčí cíle zahrnují návrh schématu zapojení a plošného spoje v návrhovém softwaru EAGLE, vytvoření technologických podkladů pro zhotovení desky plošných spojů a její osazení součástkami, vytvoření firmwaru řídicího mikrokontroléru a oživení zhotoveného sensorového modulu.

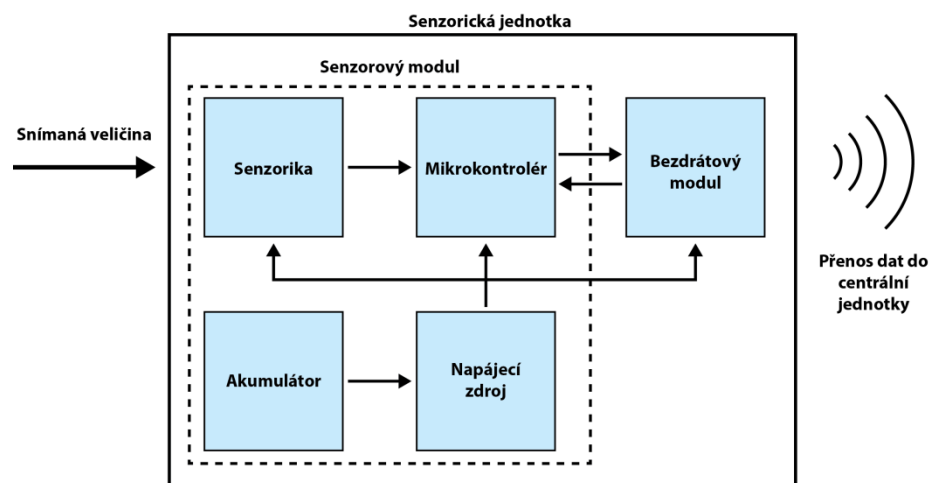
3 Návrh a realizace sensorového modulu

V této kapitole je popsán proces návrhu a realizace sensorového modulu, metody ověření jeho základních funkcí, kalibrace a naměření sady pilotních dat. Kapitola je koncipována jako chronologicky uspořádaný popis vývoje sensorového modulu, přičemž se v počátku věnuje konceptuálnímu návrhu sensorového modulu, ověřování a ladění jeho dílčích prvků pomocí testovacích modulů a následně přechází v popis vývoje vlastního sensorového modulu a způsobu jeho kalibrace a ověření v dohledovém systému.

3.1 Návrh konceptu sensorového modulu detekce ionizujícího záření

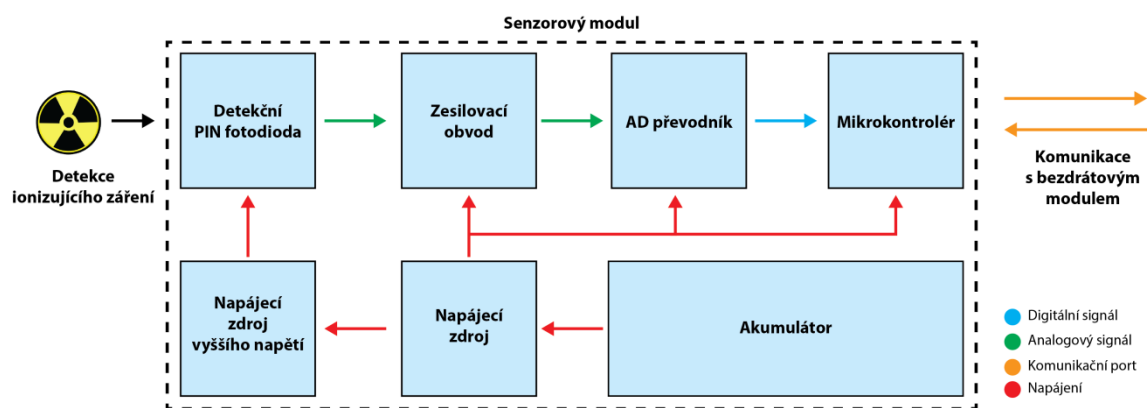
Moderní osobní bezdrátové dohledové systémy hojně využívají v současnosti rychle se rozvíjející mikroprocesorovou techniku, která umožňuje stále vyšší úroveň autonomie jednotlivých sensorických jednotek těchto systémů. Jednotka vybavená řídicím mikrokontrolérem je tak schopna samostatně obsluhovat bezdrátovou komunikaci s centrální jednotkou, sběr, zpracování a vyhodnocení dat z její sensoriky a řídit vlastní spotřebu energie [3].

Sensorická jednotka bezdrátového dohledového systému je tvořena sensorovým modulem a modulem pro zajištění bezdrátové komunikace s centrální jednotkou. V sensorovém modulu je zpravidla obsažena veškerá sensorika pro sběr dat, řídicí mikrokontrolér a zdroj a správa napájení. Blokové schéma uspořádání sensorické jednotky je na Obr. 12.



Obr. 12: Blokové schéma ilustrující uspořádání sensorické jednotky bezdrátového dohledového systému.

V případě sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření je tak na místě sensoriky detekční čidlo pro detekci ionizujícího záření. Na základě analýzy přehledu současného stavu byl pro zvolen princip využívající PIN fotodiodu. Její využití jakožto detekčního čidla ionizujícího záření vyžaduje zdroj vyššího stejnosměrného napětí a zesilovací obvod pro zesílení proudových pulzů a jejich převod na napěťový signál. Ten je potřeba digitalizovat AD převodníkem a vzorkovaný signál následně zpracovat a vyhodnotit mikrokontrolérem. Blokové schéma uspořádání sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření je na Obr. 13.



Obr. 13: Blokové schéma ilustrující uspořádání sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření.

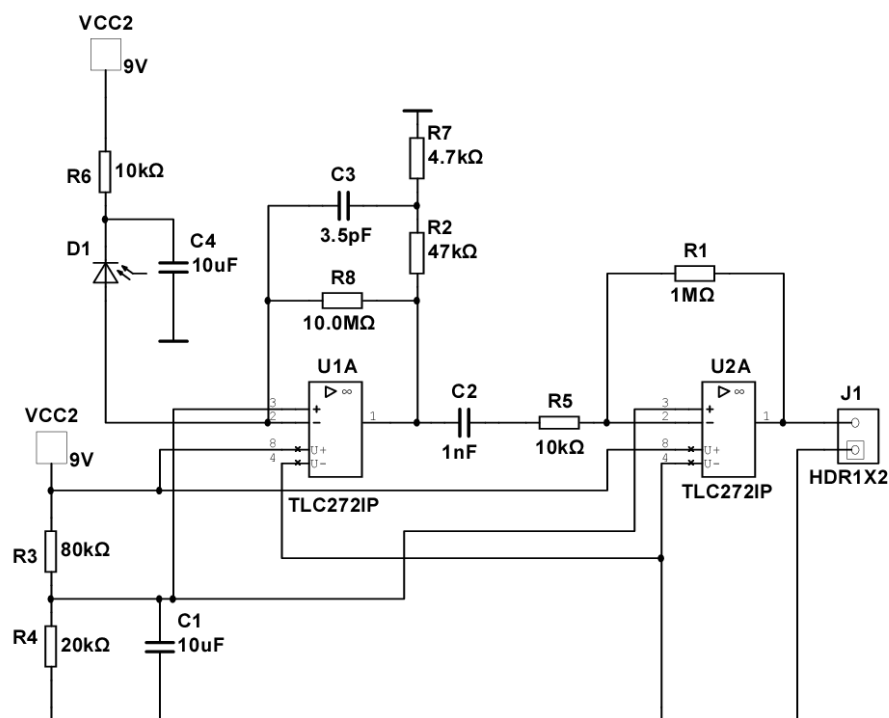
Z hlediska podoby výstupních dat odesílaných prostřednictvím bezdrátového modulu do centrální jednotky byl na základě konzultace s pracovníky SÚJCHBO (Státní Úřad Jaderné, Chemické a Biologické Ochrany) zvolen třístavový indikátor stupně nebezpečí detekovaného ionizujícího záření v prostředí. Mikrokontrolér sensorového modulu tak získá aktuální informace o přítomném ionizujícím záření ze zesilovacího obvodu a detekční fotodiody, zpracuje je a zároveň vyhodnotí. Uživatel, tedy obsluha centrální jednotky již získá vyhodnocená data ve snadno čitelné podobě, na jejichž základě bude moci činit rychlá rozhodnutí. Definice těchto stupňů nebezpečí je popsána v kapitole 3.6.2 *Kalibrace funkčního vzorku, sběr, zpracování a vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu* je v kapitole 3.5.3 *Digitální zpracování a vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu*.

3.2 Ladění dílčích prvků konceptu sensorového modulu

Před návrhem vlastního sensorového modulu založeného na výše popsaném konceptu určeného k realizaci, ověření, kalibraci a následném použití v osobních bezdrátových dohledových systémech bylo vyvinuto několik testovacích modulů. Jejich účelem bylo primárně ověření zvoleného principu detekce ionizujícího záření a ladění jeho jednotlivých funkčních prvků.

3.2.1 Testovací modul pro ověření detekce ionizujícího záření pomocí fotodiody

Pro ověření detekce ionizujícího záření pomocí fotodiody byla zvolena křemíková PIN fotodioda BPW-34, vyznačující se vysokou citlivostí, rychlou odezvou a relativně velkou aktivní plochou [20]. Fotodioda je zapojena v závěrném směru pod napětím 9 V, pracuje tak ve fotokonduktivním režimu, jenž umožňuje rychlejší odezvu fotodiody na procházející částice [15]. Pro zesílení elektrického proudu vznikajícího v důsledku průchodu částic fotodiódou byl navržen vnější zesilovací obvod, jehož schéma je na Obr. 14 [18][17][21]. Zesilovač se skládá ze dvou stupňů. První zesilovací stupeň slouží k převodu elektrického proudu, resp. elektrického náboje z fotodiody na napětí a jedná se tedy o trans-impedanční zesilovač. Druhý zesilovací stupeň slouží k opětovnému zesílení napěťového signálu a jeho filtraci a jde o aktivní filtr prvního řádu typu horní propust [22].



Obr. 14: Schéma zapojení testovacího modulu pro ověření detekce záření pomocí fotodiody [18][17][21].

Katoda fotodiody D1 je připojena přes omezující rezistor R6 k napětí 9 V, které je vyhlazeno kondenzátorem C4. Anoda fotodiody je přímo připojena na invertující vstup operačního zesilovače U1A, který je zapojen jako trans-impedanční zesilovač pomocí pasivních součástí C3, R2, R7 a R8.

Zesílení trans-impedančního zesilovače není dáno poměrem vstupního a výstupního napětí, ale vztahem [23]:

$$V_{OUT} = -\frac{Q}{C_f}, \quad (1)$$

kde V_{OUT} (V) je velikost výstupního napětí, Q (C) je velikost náboje vzniklého ve fotodiodě v důsledku absorpce částice ionizujícího záření a C_f (F) je velikost kondenzátoru ve zpětné vazbě zesilovače, v případě navrženého zesilovacího obvodu na Obr. 1 se jedná o kondenzátor C3. Při úplné absorpci částice ionizujícího záření v přechodové oblasti fotodiody vzniká pár elektron-díra, přičemž počet vzniklých párů je přímo úměrný energii absorbované částice, avšak závisí na teplotě a materiálu přechodové oblasti fotodiody. V případě křemíkové fotodiody při teplotě 23 °C se tak

velikost energie potřebná pro vznik jednoho páru elektron-díra pohybuje okolo 3,6 eV. Velikost náboje Q (C), který je získán při absorpci částice o určité energii E (eV), je tak dán vztahem [14]:

$$Q = \frac{E}{3,6} \cdot e, \quad (2)$$

kde e je velikost elementárního náboje, tedy $1,602 \times 10^{-19}$ C. Například ^{241}Am , které můžeme nalézt v některých požárních hlásičích, je kromě vysokého počtu α částic i zdrojem γ záření o energii přibližně 60 keV [10]. Při úplné absorpci takové částice v přechodové oblasti fotodiody by tak byl získán celkový náboj o velikosti:

$$Q = \frac{60000}{3,6} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 2,67 \cdot 10^{-15} \text{ C}.$$

Pro zjištění velikosti výstupního napětí trans-impedančního zesilovače je třeba dále znát velikost kapacity C_f kompenzačního kondenzátoru ve zpětné vazbě. Tato kapacita však závisí na šířce pásma (Unity Gain Bandwidth) GBW (Hz) zvoleného operačního zesilovače, velikosti odporu zpětnovazebního rezistoru R_f (Ω) a vstupní kapacitanci, která je dána kapacitancí C_i (F) použité fotodiody. Velikost kapacity kompenzačního kondenzátoru je tak dána vztahem [24]:

$$C_f = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R_f \cdot GBW} \cdot \left(1 + \sqrt{(1 + 8 \cdot \pi \cdot R_f \cdot C_i \cdot GBW)} \right). \quad (3)$$

Kompenzační kondenzátor je nezbytná součást trans-impedančního zesilovače, a to z důvodu přítomnosti zpětnovazebního rezistoru s vysokou hodnotou elektrického odporu, který by v kombinaci s kapacitancí na vstupu v podobě fotodiody začal nekontrolovatelně oscilovat. Kompenzační kondenzátor připojený paralelně ke zpětnovazebnímu rezistoru je pak schopen vstupní kapacitu fotodiody kompenzovat a oscilace vyrušit [15][17]. Velikost zpětnovazebního odporu neovlivní přímo zesílení trans-impedančního zesilovače, ale má takovou hodnotu, aby nepředstavovala pro fotodiodu významnou zátěž a zároveň aby měl operační zesilovač stále zpětnou vazbu mezi výstupem a vstupem. Zpravidla se volí velikost v řádu desítek megaohmů [21].

Šířka pásma operačního zesilovače je jedním z parametrů, které hrají zásadní roli při výběru vhodného operačního zesilovače při konstrukci trans-impedančního zesilovače pro fotodiodu. Šířkou pásma se obecně rozumí spektrum frekvencí vstupního signálu, které je operační zesilovač schopen zesílit se ziskem větším než jedna. V případě tohoto

návrhu je potřeba zvolit takový operační zesilovač, který bude disponovat šířkou pásma nejméně 1 MHz. Dalšími klíčovými parametry operačního zesilovače jsou vysoká vstupní impedance, vysoká rychlost přeběhu, nízké vstupní šumové napětí a nízký vstupní šumový proud. Při výběru vhodného operačního zesilovače splňující veškeré tyto požadavky je nemožné vyhnout se kompromisu. BiFET zesilovače zpravidla nabízejí vysokou vstupní impedanci a nízký vstupní šumový proud - bipolární zesilovače mají nízké vstupní šumové napětí, jejich vstupní impedance však není příliš vysoká a mohla by představovat významnou zátěž pro fotodiodu [15][17].

Zvolený operační zesilovač TLC-272 od firmy Texas Instruments nabízí vysokou vstupní impedanci v řádu jednotek gigaohmů, šířku pásma typicky o velikosti 2 MHz, nízký vstupní šumový proud v řádu desítek pA a nízké vstupní šumové napětí v řádu desítek nV. Zároveň je tento operační zesilovač konstruován pro použití s nesymetrickým napájením, což je vhodné pro bateriový provoz finálního sensorového modulu [25].

Posledním parametrem určujícím velikost kompenzačního kondenzátoru je velikost vstupní kapacity trans-impedančního zesilovače, která je dána kapacitancí použité fotodiody BPW-34. Ta je nepřímo úměrná velikosti závěrného napětí a pro hodnotu 9 V je velikost kapacity přibližně 15 pF [20].

Dosažením těchto hodnot do vztahu (3) získáme velikost kapacity C_f potřebného kompenzačního kondenzátoru:

$$C_f = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^6} \cdot \left(1 + \sqrt{(1 + 8 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^6)}\right)$$

$$C_f = 3,5 \cdot 10^{-13} \text{ F} = 0,35 \text{ pF}$$

Získanou hodnotu kapacity kompenzačního kondenzátoru můžeme použít ve vztahu (1) pro výpočet velikosti výstupního napětí trans-impedančního zesilovače. V případě úplné absorpce částice záření γ o energii 60 keV tak bude na výstupu trans-impedančního zesilovače napětí V_{OUT} o velikosti:

$$V_{OUT} = -\frac{2,67 \cdot 10^{-15}}{3,5 \cdot 10^{-13}} = 7,63 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 7,63 \text{ mV}$$

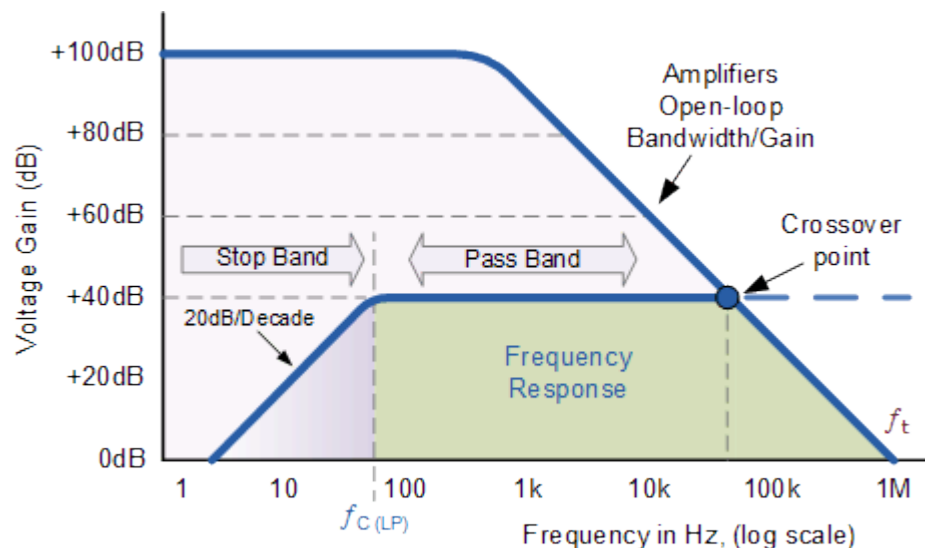
Vypočtená kapacita kompenzujícího kondenzátoru 0,35 pF je však velmi nevhodná pro praktické použití, jelikož kondenzátory o tak nízkých kapacitách jsou prakticky nedostupné. Pomocí napětíového děliče ve zpětné vazbě tvořeného rezistory R2 a R7 je

tak docíleno snížení ekvivalentní hodnoty kapacity kondenzátoru C3 ve zpětné vazbě. Napěťový dělič je v poměru 1/10, který taktéž snižuje ekvivalentní kapacitu kondenzátoru, tedy na vypočítanou hodnotu 0,35 pF.

K zesílení výstupního napětí z transimpedančního zesilovače slouží druhý stupeň zesilovacího obvodu. Ten je složen z operačního zesilovače v invertujícím zapojení a předřadného filtru typu horní propust, společně tak tyto prvky vytváří aktivní filtr prvního řádu typu horní propust sloužící k zesílení vybraných kmitočtů. Mezní frekvence f_c (Hz) takového filtru, tedy kmitočt signálu, v jehož případě dojde k poklesu amplitudy signálu o 3 dB, je dána vztahem [22]:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_{in} \cdot C_{in}}, \quad (4)$$

kde R_{in} je odpor rezistoru na vstupu operačního zesilovače a C_{in} je kapacita kondenzátoru zapojeného v sérii s tímto rezistorem. Horno-propustní charakter tohoto filtru lze však uvažovat pouze v případě použití ideálního operačního zesilovače. Použitím reálného operačního zesilovače se z tohoto filtru stane pásmová propust, kde dolní mezní frekvence f_c je dána vztahem (4) a horní mezní frekvence je dána parametrem GBW . Frekvenční odezva aktivní pásmové propusti s vyznačenými mezními frekvencemi je na Obr. 15.



Obr. 15: Frekvenční odezva aktivního filtru prvního řádu typu horní propust - zesílení (Voltage Gain) v závislosti na frekvenci zesilovaného signálu (Frequency) [21].

Napětový signál s vyšší frekvencí než f_c a nižší frekvencí než je omezení šířkou pásma je pak tímto aktivním filtrem zesilován. Velikost tohoto zesílení je dána vztahem [22]:

$$A = -\left(\frac{R_f}{R_{in}}\right), \quad (5)$$

kde R_f je velikost odporu rezistoru ve zpětné vazbě a R_{in} je velikost odporu rezistoru na invertujícím vstupu operačního zesilovače.

Druhý stupeň zesilovacího obvodu je pomocí rezistorů R1 a R5 nastaven na stonásobné zesílení. Napětový výstupní signál z trans-impedančního zesilovače s amplitudou v řádu jednotek mV tak bude zesílen na hodnotu několika stovek mV, což je již snadno měřitelná velikost napětí. Mezní frekvence f_c je pomocí kondenzátoru C2 a rezistoru R5 nastavena na následující hodnotu:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-9}} = 15\,924 \text{ Hz}$$

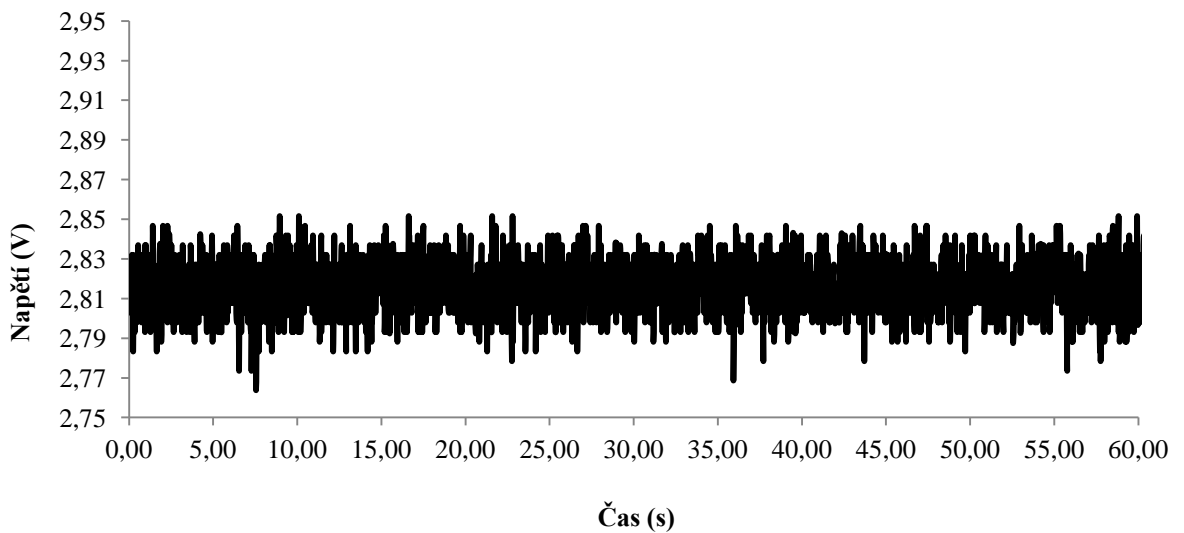
Druhý zesilovací stupeň tak stonásobně zesílí napětové signály s frekvencí vyšší než 16 kHz a potlačí veškeré nízkofrekvenční rušení. Důvodem nastavení této mezní frekvence je očekávaná šířka napětových pulzů 50 μ s [18].

Takto navržený testovací modul byl realizován prostřednictvím univerzálního nepájivého pole. Pro zamezení přístupu světla k fotodiodě a odstínění zesilovacího obvodu před elektromagnetickým rušením byl celý testovací sensorový modul obalen stínicí hliníkovou folií, která byla vodivě spojena s uzemněním testovacího modulu.

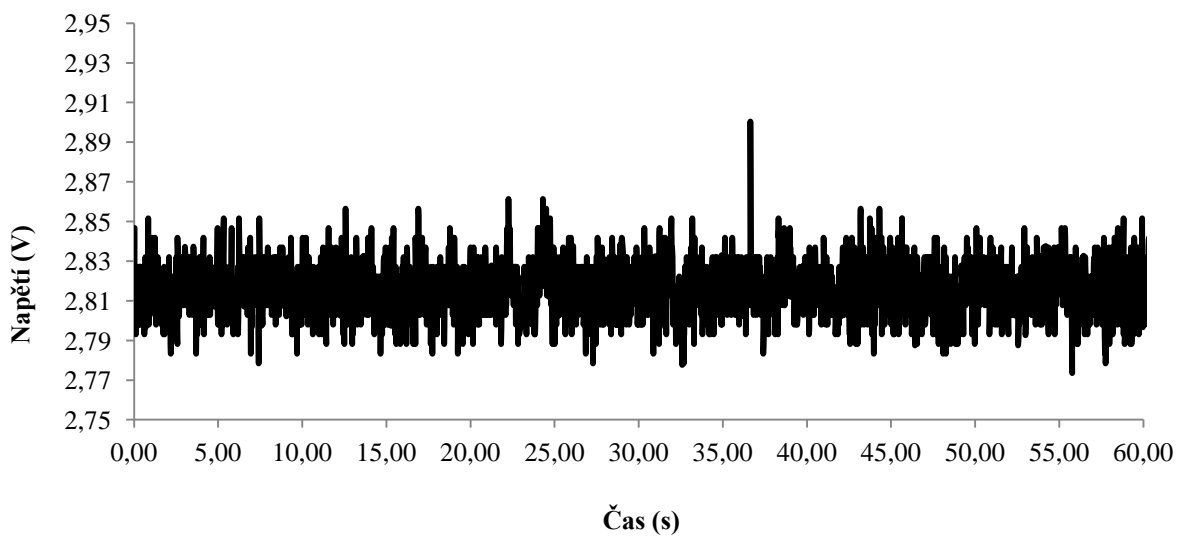
Ověření probíhalo naměřením výstupního signálu sensorového modulu po dobu přibližně 60 sekund, a to v přítomnosti zdroje ionizujícího záření – uranového skla a pro porovnání i bez jeho přítomnosti. Výstupní signál byl zaznamenán pomocí 10-bitového AD převodníku se vzorkovací frekvencí 20 kHz. Použitý zdroj ionizujícího záření - uranové sklo - je na Obr. 16, vybrané části zaznamenaných signálů jsou vyneseny v grafech Obr. 17 a Obr. 18,



Obr. 16: Zdroj slabého ionizujícího záření použitý pro ozařování testovacích sensorových modulů - sklo obarvené uranovým barvivem.



Obr. 17: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření.



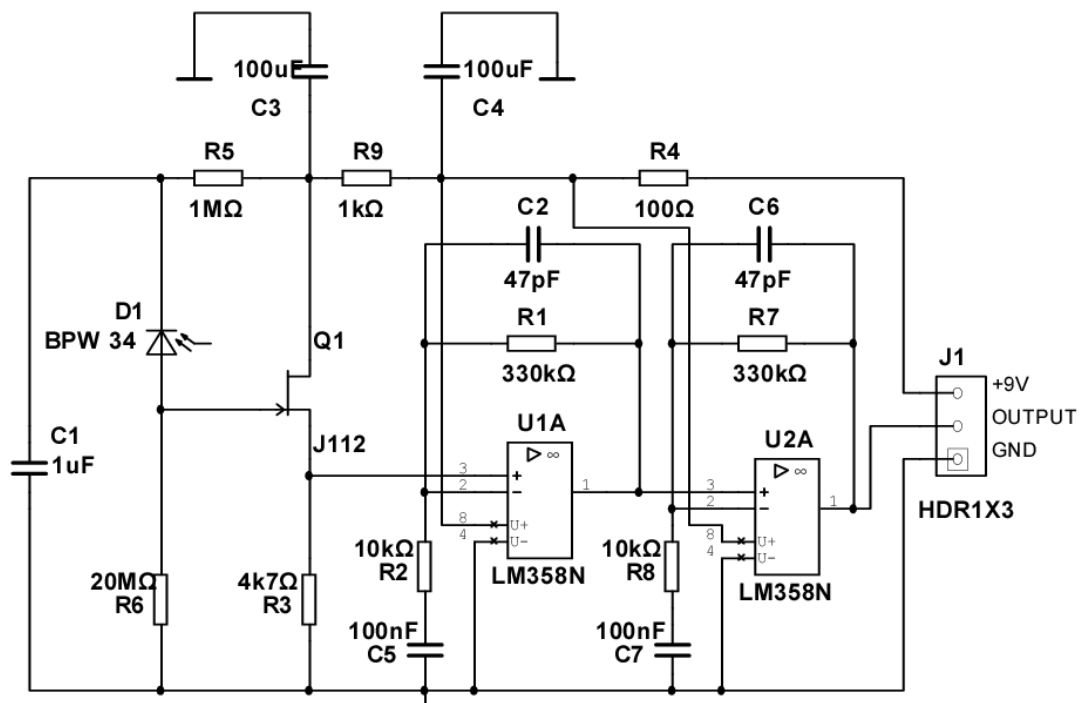
Obr. 18: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.

Porovnáním obou zaznamenaných signálů lze usoudit, že je detekce ionizujícího záření fotodiodou proveditelná. Použitý návrh zesilovacího obvodu však neumožňuje dostatečné zesílení potřebných napěťových špiček, které jsou pak v důsledku toho špatně rozeznatelné od okolního šumu. Napěťový rozsah šumu (špička – špička) je místy až 10 mV, zatímco amplituda napěťového píku vzniklého v důsledku absorpce částice záření je přibližně 20 mV.

Důvodem je pravděpodobně nevhodný použitý operační zesilovač TLC-272, jehož typické hodnoty vstupního šumového proudu a vstupního napěťového šumu jsou příliš vysoké. Při změně zesílení druhého zesilovacího stupně tak docházelo k celkovému zesílení napěťových píků i šumu. Byl proto navržen zcela odlišný zesilovací obvod, v jehož případě nehrají parametry zvoleného operačního zesilovače tak významnou roli.

3.2.2 Testovací sensorový modul pro ladění zesilovacího obvodu

Jako detekční čidlo druhého testovacího modulu byla opět zvolena křemíková PIN fotodioda BPW-34. Návrh zesilovacího obvodu byl výrazně modifikován, schéma zapojení je na Obr. 19 [26].



Obr. 19: Schéma zapojení testovacího modulu s modifikovaným zesilovacím obvodem [26]-upraveno.

Vstupem zesilovacího obvodu je JFET tranzistor Q1, jenž je v zapojení se společným Drainem. Tranzistor se v tomto zapojení chová jako napěťový sledovač nabízející vysokou vstupní impedanci a nízkou výstupní impedanci díky JFET technologii, teoretické proudové zesílení takového zapojení je pak nekonečně velké. Výstupní napětí V_{OUT} tranzistoru, tedy napětí mezi Sourcem a uzemněním, je v případě zapojení se společným Drainem dáno vztahem (6) a jeho velikost je přibližně jednotková [27]:

$$V_{OUT} = \frac{g_m R_s + 1}{g_m R_s} \approx 1, \quad (6)$$

kde R_s je velikost odporu rezistoru mezi Sourcem a uzemněním, ve schématu zapojení na Obr. 19 se jedná o rezistor R3, a g_m je transkonduktance - parametr charakterizující výstupní proud tranzistoru v závislosti na napětí mezi Drainem a Sourcem.

Proud generovaný fotodiodou v důsledku absorpce částice záření je tak převeden na napětí vznikající na Sourcu tohoto tranzistoru, které je následně zesíleno dvojitou operacích zesilovačů U1A a U2A. Tyto operační zesilovače jsou v neinvertujícím zapojení, jehož zesílení A_n je dáno vztahem [22]:

$$A_n = 1 + \frac{R_{f1}}{R_{f2}}, \quad (7)$$

kde R_{f1} je velikost odporu rezistoru ve zpětné vazbě, v tomto případě rezistorů R1 a R7, a R_{f2} je velikost odporu rezistoru mezi invertujícím vstupem a uzemněním, v tomto případě R2 a R8. Zesílení je tak u obou operačních zesilovačů nastaveno na 33, společně tedy zesilují výstupní napětí ze vstupního tranzistoru Q1 více než tisíckrát. Oba operační zesilovače jsou zároveň zapojeny jako neinvertující aktivní pásmové propusti prvního řádu, přičemž horní mezní frekvence f_{cH} takového filtru je dána vztahem [22]:

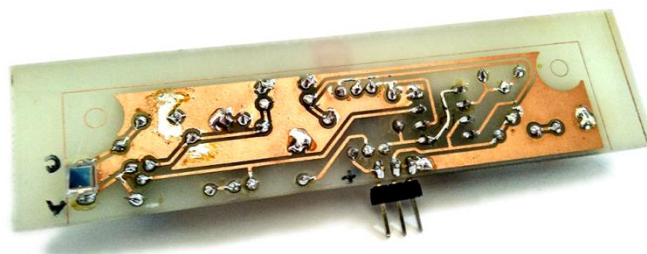
$$f_{cH} = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot R}, \quad (8)$$

kde C je kapacita kondenzátoru ve zpětné vazbě a R odpor rezistoru ve zpětné vazbě. V případě navrženého obvodu je tak horní mezní frekvence obou operačních zesilovačů dána kondenzátory C2 a C6 a rezistory R1 a R7 a je tak nastavena na hodnotu přibližně 10 kHz.

Dolní mezní frekvence tohoto filtru je dána též vztahem (8), avšak figurují zde hodnoty kondenzátoru a rezistoru, jenž jsou zapojeny v sérii mezi invertujícím vstupem zesilovače a uzemněním [22]. V případě navrženého obvodu je tak dolní mezní frekvence obou operačních zesilovačů dána kondenzátory C5 a C7 a rezistory R2 a R8 a je tak nastavena na hodnotu přibližně 160 Hz.

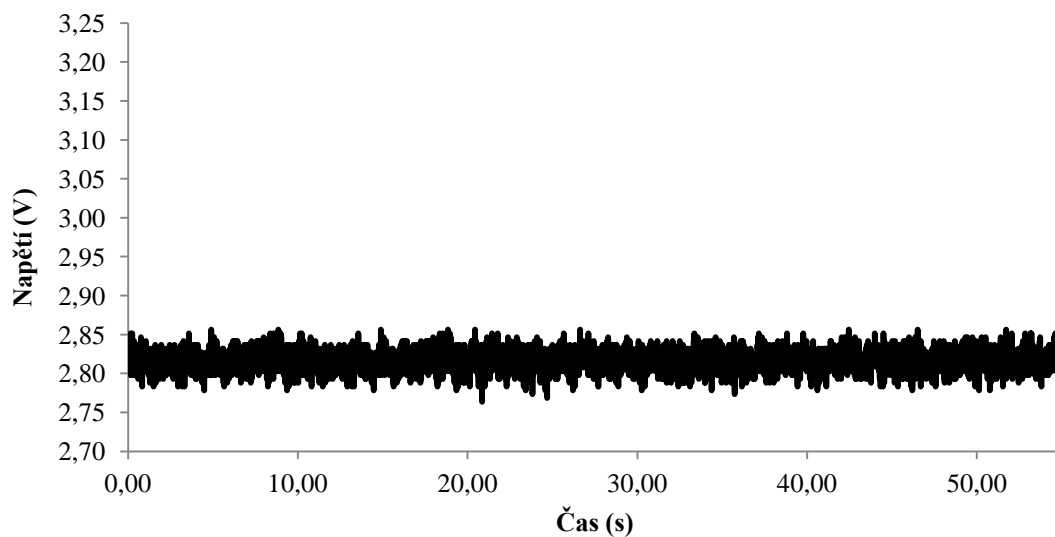
Důvodem volby dvojice neinvertujících aktivních filtrů je zachování stejnosměrné složky výstupního signálu, která je naopak v případě invertujících aktivních filtrů potlačena. Napěťová úroveň této stejnosměrné složky je v případě navrženého zapojení dána odporem rezistoru R3 a parametrem $V_{GS(off)}$ vstupního JFET tranzistoru, v případě zvolených součástek odpovídá přibližně hodnotě 2,8 V a poskytuje tak nenulový pracovní bod pro operační zesilovače [26]. To umožňuje bateriové, tedy nesymetrické napájení operačních zesilovačů a celého testovacího sensorového modulu. Výstupní signál tak může nabývat hodnot v rozsahu napájecího napětí, přičemž klidová hodnota výstupního signálu odpovídá právě pracovnímu bodu operačních zesilovačů, tedy přibližně 2,8 V. Důvodem nastavení výše uvedených mezních frekvencí aktivních filtrů je očekávaná šířka napěťových pulzů 500 μ s, které tak budou zesíleny s výše uvedeným zesílením a nízkofrekvenční a vysokofrekvenční šum bude potlačen [26].

Pro ověření takto navrženého zesilovacího obvodu byla vyrobena deska plošných spojů, která byla následně osazena potřebnými součástkami. Opět byla použita fotodioda BPW-34 a operační zesilovače TLC-272. Sensorový modul byl stejně jako v předchozím případě odstíněn před nežádoucím osvětlením fotodiody a elektromagnetickým rušením hliníkovou folií. Zhotovený testovací sensorový modul pro ladění zesilovacího obvodu je na Obr. 20.

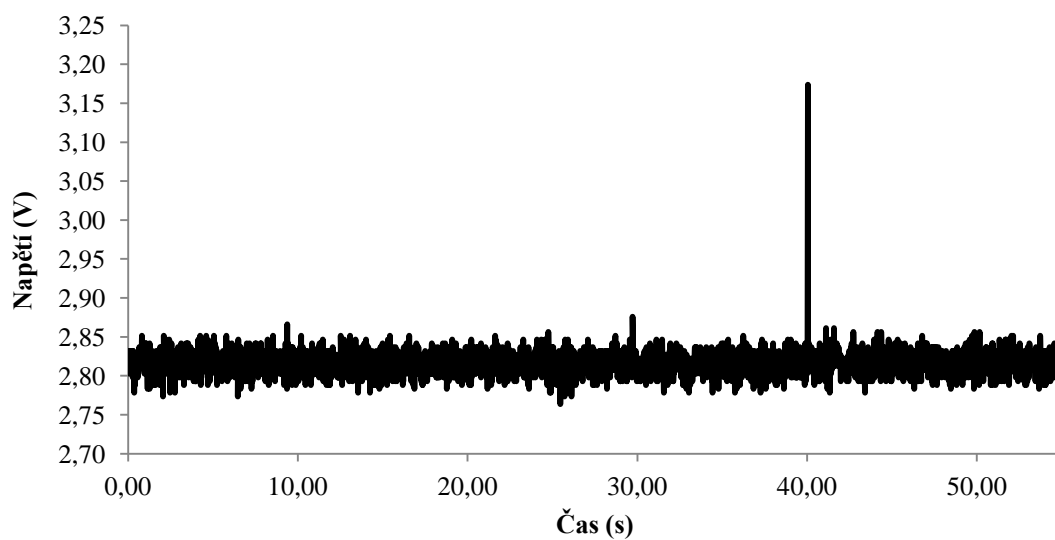


Obr. 20: Zhotovený testovací sensorový modul pro ladění zesilovacího obvodu.

Ověření probíhalo stejným způsobem jako v případě ověření předchozího testovacího modulu. Zaznamenané výstupní signály ze sensorového modulu v přítomnosti zdroje ionizujícího záření i bez něj jsou vyneseny v grafech na Obr. 21 a Obr. 22.



Obr. 21: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření.



Obr. 22: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.

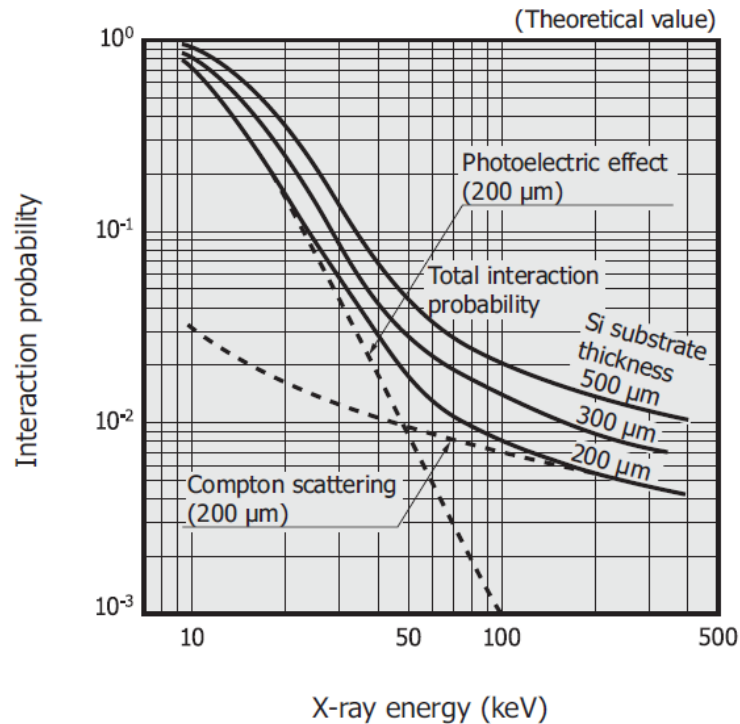
Detekovaná částice ionizujícího záření je na Obr. 22 doprovázena napětovým píkem s amplitudou (špička-špička) přibližně 400 mV a je tak snadno odlišitelný od klidového šumu na Obr. 21, jehož amplituda (špička – špička) je přibližně 50 mV. V porovnání s výstupními signály z předchozího testovacího modulu lze usoudit, že došlo k výraznému zvětšení zesílení napětových píků, které jsou tak lépe detekovatelné, a to i navzdory k šumu, který byl také zesílen.

Kromě zesilovacího obvodu má na výstupní signál sensorového modulu významný vliv i použitá detekční PIN fotodiody, resp. některé její vlastnosti. Následující testovací sensorový modul tak byl osazen odlišnou PIN fotodiody disponující vhodnějšími parametry pro detekci částic ionizujícího záření.

3.2.3 Testovací sensorový modul pro ověření vlastností PIN fotodiody

Základními parametry PIN fotodiody s přímým vlivem na detekci částic ionizujícího záření jsou její fyzické rozměry, zejména rozměry aktivní oblasti, tedy její plocha a tloušťka, kapacitance a velikost temného proudu [14][28][29].

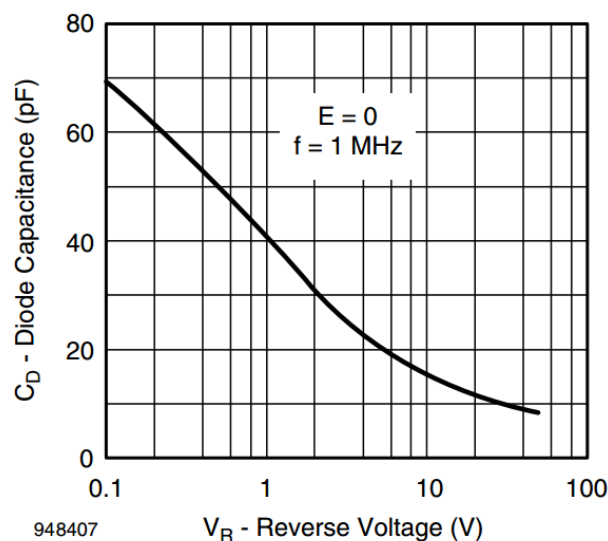
Velikost aktivní plochy fotodiody, kterou se v případě PIN fotodiody rozumí vyprázdněná vrstva I vložená do PN přechodu, přímo ovlivňuje počet detekovaných částic záření, neboť větší aktivní plocha se zcela logicky setká s větším počtem částic než plocha malá. Tloušťka polovodičového substrátu, z něž je PN přechod zhotoven, má přímý vliv na absorpci procházející částice ionizujícího záření. V případě záření γ a RTG, jejichž částice nenesou na rozdíl od částic β žádný náboj a tudíž nevytváří v PN přechodu páry elektron-díra přímo, ale prostřednictvím fotoelektrického jevu či Comptonova rozptylu. Pravděpodobnost vzniku jednoho z těchto efektů však není při průchodu částice PN přechodem stoprocentní, ale je závislá na energii procházející částice a právě zmiňované tloušťce PN přechodu, viz Obr. 23 [28][30].



Obr. 23: Závislost pravděpodobnosti interakce částice ionizujícího záření (Interaction probability) a energie dané částice (X-ray energy) pro různé tloušťky křemíkového substrátu[30].

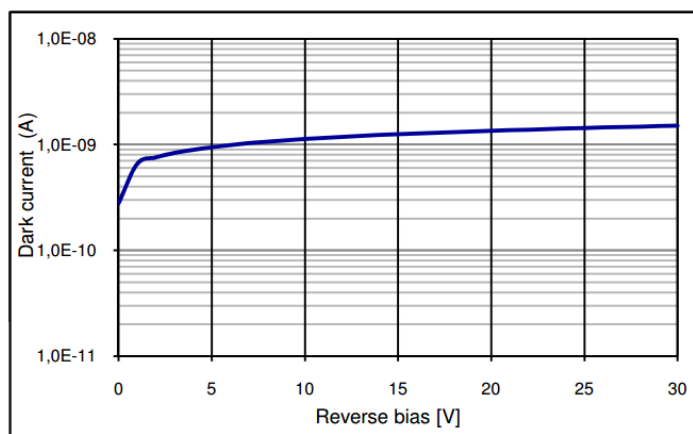
Jak je vidět v grafu na Obr. 23, s rostoucí energií dopadajícího záření klesá pravděpodobnost interakce s prostředím relativně rapidně, přičemž pro tloušťku substrátu 500 μm je tento pokles pozvolnější než v případě tloušťky 200 μm . V témže grafu je také znázorněn typ interakce, který pro danou energii dopadajícího záření převládá, přičemž pro energie 50 keV a nižší převládá vznik fotoelektrického jevu, pro vyšší energie naopak dochází převážně ke vzniku Comptonova rozptylu [30].

Větší fyzické rozměry PIN fotodiody tak umožňují spolehlivější detekci většího počtu částic ionizujícího záření, avšak mají za následek větší kapacitanci PN přechodu fotodiody. Tento parametr má přímý vliv na rychlost odezvy fotodiody, vysoká kapacitance je tak v případě detekce jednotlivých částic záření nežádoucí. Pokud je však fotodioda zapojena v závěrném směru, tedy ve fotokonduktivním režimu, lze snížit kapacitanci jejího PN přechodu připojením nenulového napětí na katodu fotodiody, přičemž je výsledná kapacitance závislá na velikosti tohoto závěrného napětí, viz Obr. 24 [15][20].

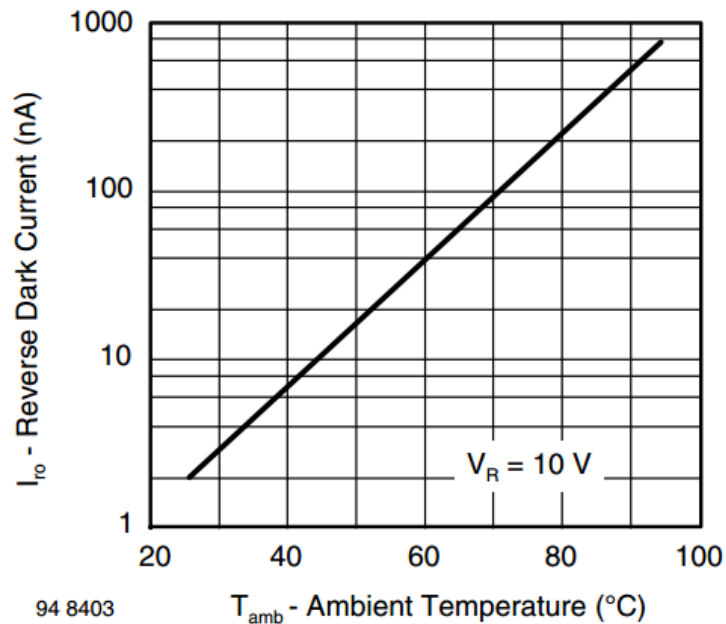


Obr. 24: Závislost kapacitance PN přechodu PIN fotodiody (Diode Capacitance) BPW-34 na velikosti závěrného napětí (Reverse Voltage) [20].

Zvýšením závěrného napětí je tak možno snížit kapacitanci použité fotodiody a dosáhnout tak rychlé odezvy na dopadající částice záření. S rostoucím závěrným však dochází ke zvyšování temného proudu – elektrického proudu protékajícího fotodiadou při naprostém odstranění přístupu jakéhokoli záření k jejímu PN přechodu, viz Obr. 25. Přítomnost temného proudu je příčinou vzniku klidového šumu a tudíž je potřeba i tento parametr brát v potaz při návrhu zesilovacího obvodu a výběru vhodné detekční fotodiody. Kromě závěrného napětí má na velikost temného proudu fotodiody také významný vliv teplota okolního prostředí. Závislost těchto dvou veličin je na Obr. 26 [15][20][31].



Obr. 25: Závislost temného proudu (Dark Current) na velikosti závěrného napětí (Reverse Bias) pro fotodiody PS-100 [31].



Obr. 26: Závislost temného proudu (Dark Current) na okolní teplotě (Ambient Temperature) pro fotodiodu BPW-34 [20].

PIN fotodioda BPW-34 firmy Vishay použitá v obou předchozích testovacích sensorových modulech disponuje aktivní plochou o velikosti 7 mm^2 a o tloušťce $500 \text{ }\mu\text{m}$. Díky těmto relativně malým fyzickým rozměrům nabízí nízkou kapacitanci PN přechodu s hodnotou 25 pF při závěrném napětí 3 V a při napětí 9 V použitém v obou předchozích testovacích modulech dokonce pouhých 15 pF . Velikost temného proudu se typicky pohybuje okolo 2 nA , jeho hodnota však nepřesáhne 30 nA . Ačkoli jsou hodnoty kapacitance a temného proudu fotodiody BPW-34 nízké a fotodioda se tak jeví jako vhodný detekční prvek sensorového modulu, limitujícím faktorem jsou její malé fyzické rozměry, které jsou příčinou nízké pravděpodobnosti detekce částice ionizujícího záření [20][14].

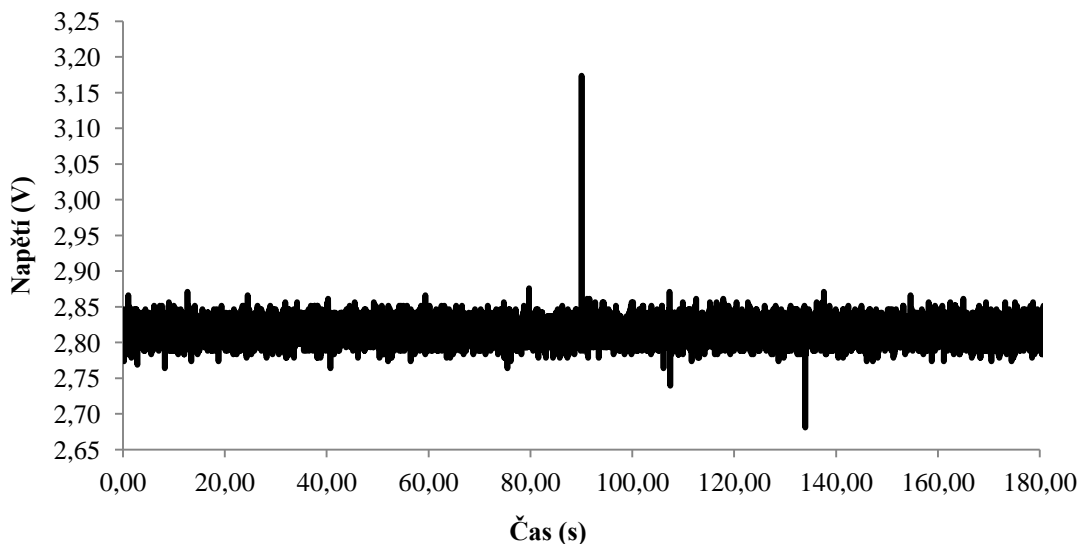
V případě γ záření o energii 60 keV dopadající na PN přechod fotodiody BPW-34, tedy na křemíkový substrát o tloušťce $500 \text{ }\mu\text{m}$, projde $96,34 \%$ částic beze změny energie či směru. Pouze v případě zbývajících $3,67 \%$ částic dojde k úplné či částečné změně jejich energie a jsou tudíž fotodiudou detekovatelné, v případě $1,47 \%$ částic prostřednictvím fotoefektu, v případě zbývajících $2,3 \%$ částic prostřednictvím Comptonova rozptylu [32][33].

Pro zvýšení počtu detekovatelných částic dopadajícího ionizujícího záření je třeba použít fotodiodu s větší aktivní plochou pro zvýšení počtu dopadajících částic a zároveň s větší tloušťkou křemíkového substrátu pro zvýšení pravděpodobnosti interakce

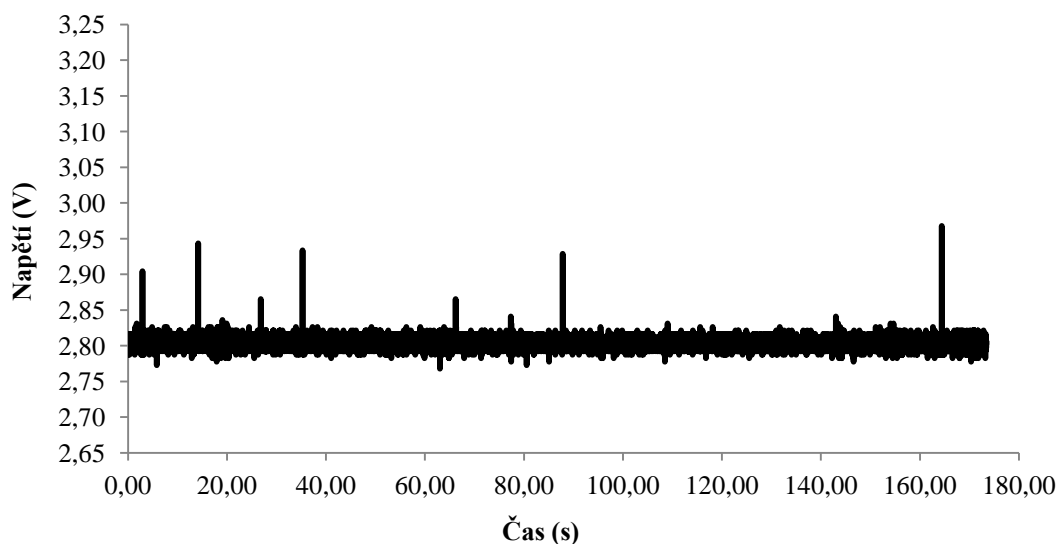
procházející částice s PN přechodem fotodiody. Se zvětšením těchto parametrů se však zvyšují i nežádoucí parametry fotodiody, kterými jsou kapacitance jejího PN přechodu a velikost temného proudu. PIN fotodioda PS-100-7 firmy First Sensor nabízí aktivní plochu o velikosti 100 mm^2 a o tloušťce $900 \text{ }\mu\text{m}$, tedy výrazně lepší parametry pro detekci částic ionizujícího záření než jakými disponuje fotodioda BPW-34 použitá v předchozích testovacích sensorových modulech. Zároveň však disponuje kapacitancí PN přechodu o velikosti 80 pF při závěrném napětí 12 V a nízkým temným proudem o velikosti 5 nA při též závěrném napětí. V porovnání s fotodiódou BPW-34 tak nabízí fotodioda PS-100-7 téměř 14krát větší aktivní plochu s téměř dvojnásobnou tloušťkou, a to při zachování relativně nízké kapacitance a temného proudu [31][20].

V případě γ záření o energii 60 keV dopadající na PN přechod fotodiody PS-100-7, tedy na křemíkový substrát o tloušťce $900 \text{ }\mu\text{m}$, $93,5 \%$ částic projde fotodiódou beze změny energie či směru. Zbývajících $6,5 \%$ dopadajících částic bude zcela nebo částečně absorbováno fotodiódou a budou tudíž detekovatelné, v případě $1,47 \%$ částic prostřednictvím fotoefektu, v případě zbývajících $2,3 \%$ částic prostřednictvím Comptonova rozptylu. V porovnání s fotodiódou BPW-34 je tak pravděpodobnost detekce dopadajících částic téměř dvojnásobná [32][33].

Pro ověření tohoto předpokladu byl naměřen výstupní signál testovacího sensorového modulu osazeného nejprve fotodiódou BPW-34 a následně fotodiódou PS-100-7. K sensorovému modulu byl pokaždé přiložen stejný zdroj ionizujícího záření stejně jako v případě ověřování předchozích testovacích modulů, tedy uranové sklo, a byl zaznamenán výstupní signál po dobu přibližně tří minut pro každou fotodiódou, viz grafy na Obr. 27 a Obr. 28.



Obr. 27: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu osazeného PIN fotodiodou BPW-34 v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.



Obr. 28: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu osazeného PIN fotodiodou PS-100-7 v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.

Porovnáním zaznamenaného signálu z testovacího modulu s fotodiodou PS-100-7 na Obr. 28 a signálu z testovacího modulu s fotodiodou BPW-34 na Obr. 27 na lze sledovat vliv velikosti aktivní plochy a její tloušťky na počet detekovaných částic ze zdroje ionizujícího záření. Ten je v případě fotodiody PS-100-7 výrazně větší, a to téměř trojnásobně. Kromě počtu detekovaných částic lze porovnáním obou signálů pozorovat i vliv kapacity PN přechodu fotodiody na tvar výstupního signálu, zejména napěťových píků vznikajících absorpcí částice záření. Ty ve výstupním signálu pro

fotodiodou PS-100-7 nabývají velikosti 200-250 mV, v případě fotodiody BPW-34 je to téměř dvojnásobek. Avšak i píky s takto sníženou amplitudou jsou snadno odlišitelné od klidového šumu a stále detekovatelné AD převodníkem.

Na základě předchozích zjištění byl navržen zesilovací obvod a vybrány komponenty vhodné pro detekci ionizujícího záření, včetně detekční fotodiody. Zesilovací obvod byl následně použit v návrhu vlastního senzorového modulu ve vývojovém prostředí EAGLE.

3.3 Návrh vlastního sensorového modulu

K vytvoření návrhu vlastního sensorového modulu bylo použito vývojové prostředí EAGLE, a to z důvodu uživatelsky přívětivého prostředí, podpory návrhu vícevrstvých desek plošných spojů, možnosti přípravy podkladů pro výrobu navržené desky apod. Podle vytvořeného návrhu byla následně vygenerována technologická data pro výrobu a realizaci navržené desky plošných spojů.

3.3.1 Výběr komponent a návrh schématu zapojení sensorového modulu

Základním prvkem sensorového modulu je mikrokontrolér (MicroController Unit – MCU). Zpravidla se jedná o kompletní systém na jednom čipu (System on Chip – SoC), jehož úkolem je řídit veškeré procesy probíhající v rámci sensorového modulu, komunikaci s okolím a získávat, zpracovávat a vyhodnocovat data získaná ze sensoriky [3].

Při výběru konkrétního typu mikrokontroléru je třeba dbát na základní požadavky, které jsou v rámci sensorového modulu na mikrokontrolér kladeny. V případě sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření se z hlediska HW vybavení jedná o požadavek na integrovaný AD převodník s dostatečným úroňovým a časovým rozlišením pro vyčítání napětového signálu ze zesilovacího obvodu pro detekční fotodiodu. Dále je požadována přítomnost UART zařízení (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) pro komunikaci s dalšími zařízeními, podpora programovacího rozhraní JTAG (Joint Test Action Group), přítomnost univerzálních GPIO pinů (General Purpose Input Output) pro ovládání periférií a napájecích zdrojů a dostatečně velký paměťový prostor FLASH a RAM pro uložení a běh zdrojového kódu. Z hlediska provozních vlastností je na mikrokontrolér kladen požadavek na možnost nastavení dostatečného taktu, nízkou spotřebu a podporu úsporných režimů.

Na základě takto vymezených požadavků byl zvolen mikrokontrolér LPC1759 od firmy NXP postavený na jádře Cortex M3 architektury ARM. Zvolený mikrokontrolér LPC1759 se v porovnání s ostatními modely ze stejné řady vyznačuje možností vysokého taktu 120 MHz, jenž nalezne využití zejména při vývoji a ladění firmwaru. Dále disponuje integrovaným 8-kanálovým AD převodníkem s 12-bitovým rozlišením a maximální vzorkovací frekvencí 200 kHz. Další základní charakteristiky zvoleného mikrokontroléru jsou uvedeny v Tab. 1 [34].

Tab. 1: Výběr parametrů použitého mikrokontroléru LPC1759 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [34].

Parametr	Hodnota
Architektura, jádro	ARM 32 bit, Cortex M3
Maximální takt	120 MHz
Proudový odběr (mA)/Takt (MHz)	0,4 mA
Komunikace	4×UART (až 6,25 Mbit/s) 1×USB (Device/Host/OTG)
FLASH paměť pro zdrojový kód	512 kB
SRAM	32 kB
GPIO piny	52
AD převodník	12-bitové kvantizační rozlišení Max. vzorkovací frekvence 200 kHz

Zdrojem napájení sensorového modulu je jedno-článekový Li-Pol akumulátor s nominálním výstupním napětím 3,7 V a kapacitou 1050 mAh. Jedná se o přenosný zdroj napájení kombinující dostatečnou kapacitu a kompaktní rozměry, jeho výstupní napětí se však stejně jako v případě všech akumulátorů se stupněm vybití mění, a to v rozsahu 2,8 – 4,2 V, což je pro napájení všech komponent sensorového modulu, zejména mikrokontroléru, zcela nepřijatelné. Je tudíž třeba zajistit konstantní napájecí napětí do jisté míry nezávislé na výstupním napětí akumulátoru, k čemuž slouží napěťové regulátory [3]. Pro zajištění konstantního napájecího napětí o velikosti 3,3 V byl zvolen obousměrný napěťový měnič (typ Buck-Boost) TPS63001DRCT od firmy Texas Instruments, jenž umožňuje konverzi napětí v obou směrech a dokáže tak využít celý rozsah výstupního napětí akumulátoru. Pro vyhlazení výstupního napětí je měnič opatřen vyhlazovacími kondenzátory. Základní charakteristiky měniče TPS63001DRCT jsou uvedeny v Tab. 2 [35].

Tab. 2: Výběr parametrů stejnosměrného měniče TPS63001DRCT relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [35].

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	1,8 – 5,5 V
Výstupní napětí	1,2 – 5,5 V
Výstupní proud	800 mA (režim Step-Up) 1200 mA (režim Step-Down)
Účinnost konverze	až 96 %
Frekvence spínání	1,25 – 1,50 MHz

K vytvoření závěrného napětí o velikosti 12 V pro zajištění správné funkce detekční fotodiody a snížení její kapacitance slouží další stejnosměrný napěťový měnič LT1301 od firmy Linear Technology. Jedná se o spínaný měnič napětí typu Step-Up vytvářející výstupní napětí 12 V z nižšího vstupního napětí, které se může pohybovat v rozsahu 1,8 – 5,5 V. Pro zajištění správného chodu tohoto měniče je vstupním napětím hlavní napájecí 3,3V větev sensorového modulu, která je již stabilizovaná a vyhlazená. Pro vyhlazení výstupního napětí je tento měnič taktéž vybaven vyhlazovacími kondenzátory. Základní charakteristiky měniče LT1301 jsou uvedeny v Tab. 3 [36].

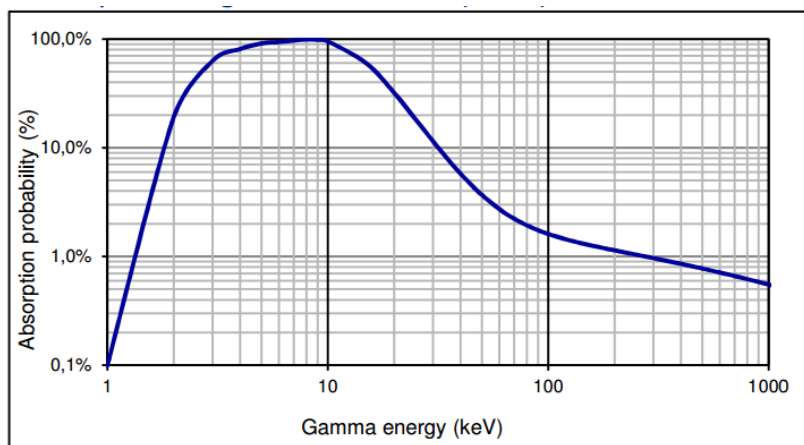
Tab. 3: Výběr parametrů stejnosměrného měniče LT1301 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [36].

Parametr	Hodnota
Vstupní napětí	1,8 – 10 V
Výstupní napětí	5 nebo 12 V
Výstupní proud	1000 mA
Účinnost konverze	až 89 %
Frekvence spínání	155 kHz

Klíčovým prvkem sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření je samotná detekční PIN fotodioda, jejíž výběr je popsán v kapitole 3.3.1 *Výběr komponent a návrh schématu zapojení sensorového modulu*. Pro usnadnění realizace sensorového modulu byla zvolena fotodioda X-100-7, viz OBR. Jde se o variantu PIN fotodiody PS-100-7, která je již z výroby opatřena blokovací vrstvou, která zamezuje přístup světla k jejímu PN přechodu, a je tak konstrukčně uzpůsobena pro detekci ionizujícího záření. Základní charakteristiky této fotodiody jsou uvedeny v Tab. 4, závislost pravděpodobnosti absorpce částice v závislosti na její energii je vynesena do grafu na Obr. 29 [37].

Tab. 4: Výběr parametrů PIN fotodiody X-100-7 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [37].

Parametr	Hodnota
Aktivní plocha	100 mm ²
Detekovatelné energie záření	5 – 1000 keV
Temný proud	1,5 nA (při závěrném napětí 12 V)
Kapacitance PN přechodu	80 pF (při závěrném napětí 12 V)



Obr. 29: Pravděpodobnost detekce částice fotodiódou X-100-7 v závislosti na energii částice [37].

Pro zesílení proudových pulzů vznikajících ve fotodiodě v důsledku dopadu částic ionizujícího záření slouží zesilovací obvod, jehož stavba je popsána v kapitole 3.2.2 *Testovací sensorový modul pro ladění zesilovacího obvodu*. Jako předzesilovač byl zvolen JFET tranzistor BF545 od firmy NXP z důvodu jeho vysokého proudového zesílení a vysoké vstupní impedance [38]. Pro následné zesílení signálu byl zvolen dvojitý operační zesilovač TLC-272 od firmy Texas Instruments, zejména z důvodu podpory nesymetrického napájení, nízkého proudového a napěťového šumu, velké šířky pásma a vysoké rychlosti přeběhu. Základní charakteristiky tohoto operačního zesilovače jsou uvedeny v Tab. 5 [25].

Tab. 5: Výběr parametrů operačního zesilovače TLC-272 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [25].

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí (nesymetrické)	3 – 16 V
Vstupní šumový proud	max. 220 pA
Vstupní napěťový šum	max. 25 nV
Šířka pásma	až 2,5 MHz
Rychlost přeběhu	až 5,9 V/ μ s

Pro kontrolu správného chodu mikrokontroléru, zamezení uvážnutí a kontrolu napájecího napětí slouží integrovaný obvod TPS3824 od firmy Texas Instruments. Jedná se o komponentu, která má za úkol detekovat pokles napájecího napětí mikrokontroléru a případně jej držet v resetovaném stavu. Stejně tak tato součástka plní funkci tzv. watch-dog, její vstup musí být tedy prostřednictvím zdrojového kódu mikrokontroléru periodicky obnovován. Pokud se tak neděje, došlo pravděpodobně k "zamrznutí" chodu mikrokontroléru, který je vzápětí resetován [39].

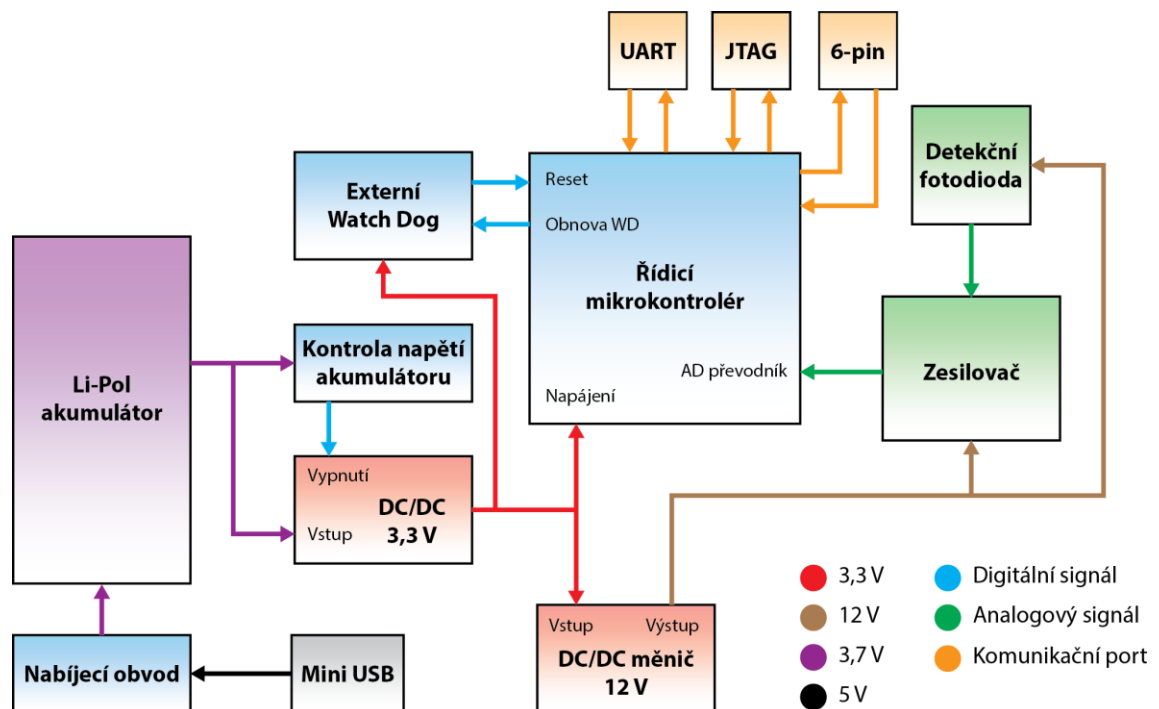
Podobným způsobem je kontrolováno i výstupní napětí z Li-Pol akumulátoru, a to integrovaným obvodem BD5231 od firmy ROHM. Jeho úkolem je detekce poklesu výstupního napětí akumulátoru pod úroveň 3,1 V a v případě jeho zjištění následné vypnutí 3,3V napájecího zdroje, v důsledku čehož dojde k okamžitému vypnutí

mikrokontroléru a všech periférií sensorového modulu. Tento obvod tak chrání akumulátor před poškozením přílišným vybitím [40].

Nabíjení napájecího Li-Pol akumulátoru prostřednictvím Mini-USB konektoru řídí nabíjecí integrovaný obvod LTC4054 od firmy Linear Technology. Úkolem této komponenty je řízení velmi specifického nabíjecího procesu Li-Pol akumulátoru, jehož součástí je dodávání nastavitelného konstantního napětí nebo proudu do akumulátoru, včasné detekování plného nabití, indikace stavu a dokončení nabíjení a tepelná ochrana [45].

Konektivitu sensorového modulu s ostatními zařízeními zajišťují konektory a rozhraní, které jsou taktéž součástí návrhu. K připojení bezdrátového modulu slouží 6-pinový konektor, programování sensorového modulu a nahrávání firmwaru zajišťuje JTAG rozhraní a komunikaci s počítačem pro účely vývoje a ladění je realizováno prostřednictvím UART rozhraní.

Blokové schéma všech výše uvedených komponent sensorového modulu a jejich vzájemných vztahů je znázorněno na Obr. 30.



Obr. 30: Blokové schéma zapojení a vzájemných vztahů hlavních komponent sensorového modulu.

Na základě zvolených komponent bylo následně v prostředí EAGLE navrženo schéma zapojení, které bylo rozděleno do dvou listů. První list obsahuje zapojení vstupů a výstupů mikrokontroléru včetně externích oscilátorů udávajících takt procesoru a běh vestavěných hodin reálného času RTC (Real Time Clock) a prvků vyhlazujících napájecí napětí. Druhý list obsahuje zapojení veškerých konektorů, pinových vstupů/výstupů a periferních obvodů, tedy napájecích zdrojů, hlídačů napětí a zesilovacího obvodu pro detekční fotodiodu. Kompletní schéma zapojení lze nalézt v příloze 1 (A, B).

3.3.2 Návrh desky plošných spojů sensorového modulu

Pro zachování kompaktních rozměrů sensorového modulu byla deska plošných spojů (DPS) navržena ve čtyřech obsahující horní a spodní vrstvu pro umístění součástek a dvě vnitřní vrstvy určené primárně pro rozvod napájení. Díky tomuto rozvržení bylo možné omezit rozměry desky na 50×25 mm.

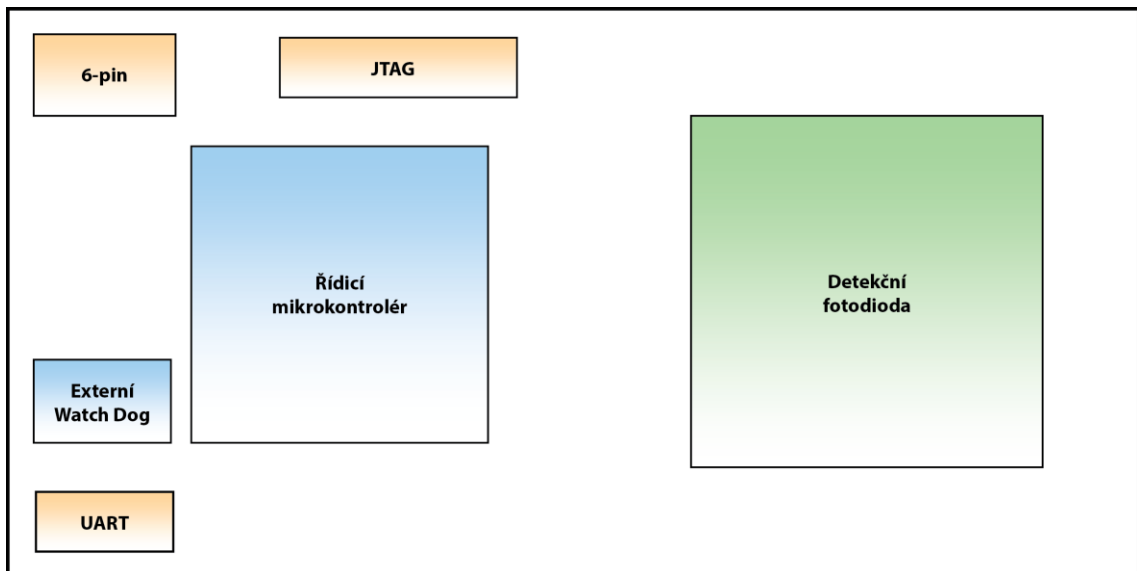
Na horní straně DPS je umístěn mikrokontrolér včetně krystalů a kaskády kondenzátorů pro vyhlazení napájecího napětí. V druhé polovině horní strany DPS je umístěna samostatná detekční fotodioda v maximální možné vzdálenosti od mikrokontroléru a není tak přímo vystavena tomuto potenciálnímu zdroji elektromagnetického rušení. V rámci ochrany fotodiody před vnějším rušením je po celé horní straně DPS rozlita zemnicí plocha.

Spodní strana DPS je osazena oběma napájecími zdroji včetně vyhlazovacích kondenzátorů, integrovanými obvody pro kontrolu napájení a chodu procesoru a zesilovacím obvodem pro fotodiodu. Spínané napájecí zdroje jakožto nejvýznamnější zdroje elektromagnetického rušení jsou seskupeny v oblasti pod mikrokontrolérem a jsou tak v největší možné vzdálenosti od zesilovacího obvodu, který je umístěn v druhé polovině spodní strany DPS, tedy pod detekční fotodiodou. Zesilovací obvod je třeba před rušením vznikajícím během spínaných zdrojů chránit, k čemuž slouží dvojice blokujících kondenzátorů umístěných mezi zesilovacím obvodem a spínanými napájecími zdroji. V rámci ochrany zesilovacího obvodu před vnějším rušením slouží stejně jako v předchozím případě rozlita zemnicí plocha po celé spodní straně DPS.

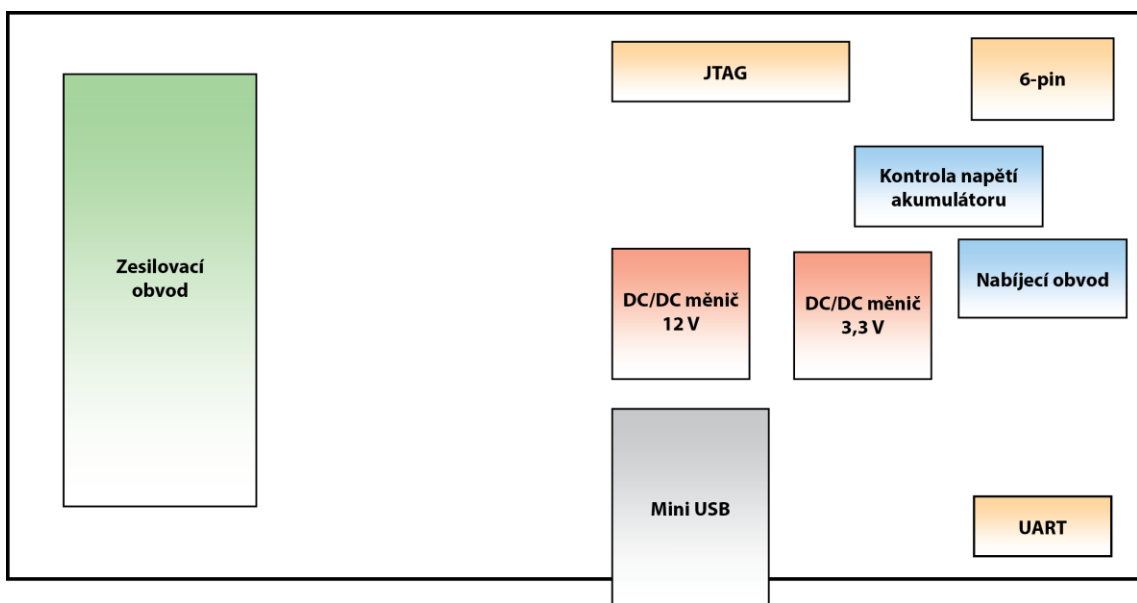
Vnitřní vrstvy DPS slouží k rozvodu 3,3V napájení a uzemnění, k nimž se přistupuje prostřednictvím tzv. prokovů – mezivrstevových vodivých spojů. Zemnicí vnitřní vrstvou jsou též vedeny cesty analogového signálu ze zesilovacího obvodu, a to z důvodu

ochrany před zkreslením signálu vnějším elektromagnetickým rušením. Za účelem snížení emise elektromagnetického záření ze sensorového modulu do prostředí jsou hrany DPS opatřeny pravidelně umístěnými prokvy spojujícími uzemnění ve vnitřní vrstvě a zemnicí plochy na horní a spodní straně DPS [41].

Blokové schéma zjednodušeně ilustrující rozmístění jednotlivých funkčních komponent v rámci DPS sensorového modulu pro její horní a spodní stranu je na Obr. 31 a Obr. 32.



Obr. 31: Rozmístění funkčních prvků sensorového modulu v rámci horní strany DPS.

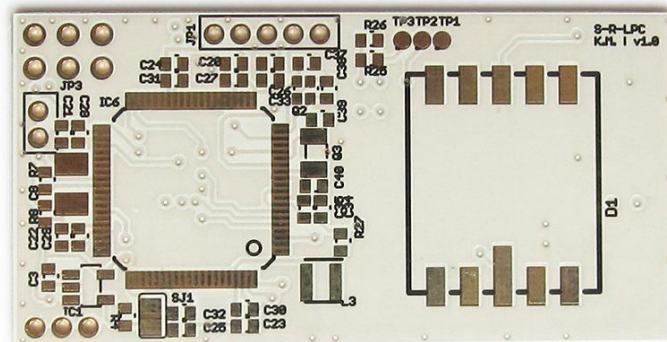


Obr. 32: Rozmístění funkčních prvků sensorového modulu v rámci spodní strany DPS.

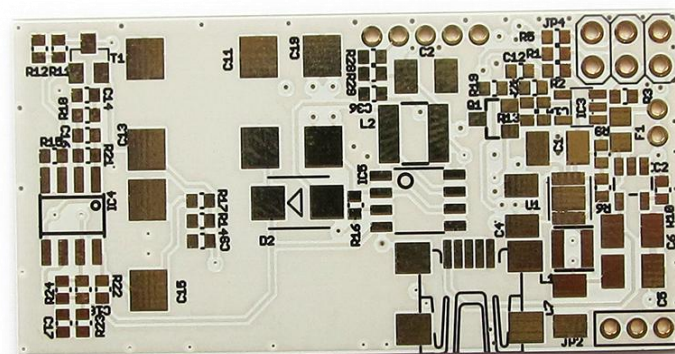
Pro umístění součástek z navázaného schématu zapojení do návrhu DPS je potřeba, aby tyto součástky disponovaly i patřičným pouzdrem, v tomto případě typu pro povrchovou montáž (SMD – Surface Mount Technology). Většina součástek byla pro použití v návrhu již k dispozici v rámci vestavěných knihoven prostředí EAGLE, některé však bylo třeba navrhnout zcela od začátku. Součástky byly rozmístěny po obou stranách DPS dle výše uvedeného konceptu a pospojovány nejkratšími možnými vodivými cestami a prokovy. Takto navržená DPS byla uzpůsobena realizaci, čímž se rozumí umístění názvů součástek na tisknutelnou vrstvu DPS pro snazší osazování, a byla z ní vygenerována technologická Gerber data formátu RS-274x pro následnou externí výrobu. Výsledný návrh DPS lze nalézt v příloze 2 (A - D) a 3 (A, B), technologická Gerber data jsou na přiloženém CD.

3.4 Realizace sensorového modulu

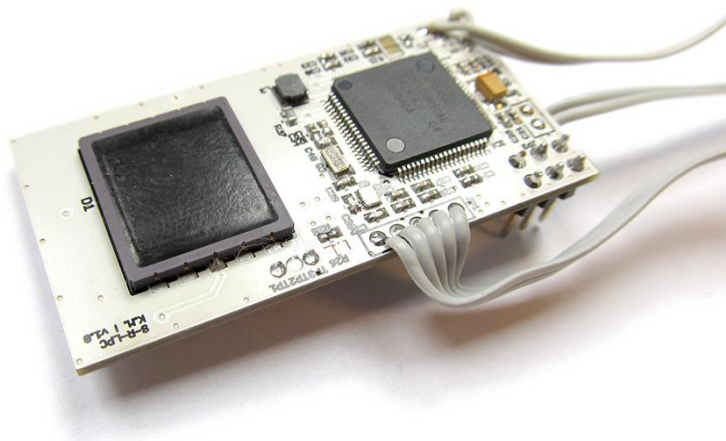
Zhotovená DPS byla ručně osazena pasivními SMD součástkami velikosti 0402, kondenzátory s vysokou kapacitou v pouzdrech SMD-B a D, integrovanými obvody v pouzdrech LQFP, SOIC, SOT-23, SSOP5 a dalších. Kromě elektronických součástek byla DPS osazena konektorem Mini USB pro nabíjení akumulátoru, 6-pinovým konektorem pro připojení bezdrátového modulu a konektory pro připojení akumulátoru, UART sběrnice a JTAG rozhraní. Po osazení veškerých součástek a konektorů pomocí elektrické páječky a horkého vzduchu byl výsledný sensorový modul očištěn izopropylalkoholem a ultrazvukovou lázní a vysušen ve vysoušecí komoře. Zhotovená neosazená DPS je na Obr. 33 a Obr. 34, kompletní sensorový modul osazený veškerými součástkami je na Obr. 35 a Obr. 36.



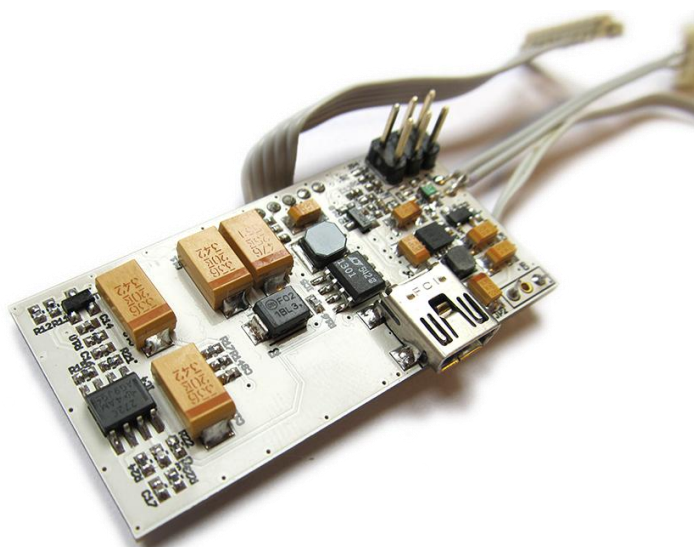
Obr. 33: Zhotovená DPS neosazená součástkami - horní strana.



Obr. 34: Zhotovená DPS neosazená součástkami - spodní strana.



Obr. 35: Zkompletovaný sensorový modul osazený veškerými součástkami - horní strana.



Obr. 36: Zkompletovaný sensorový modul osazený veškerými součástkami - spodní strana.

Pro odstínění před vnějším elektromagnetickým rušením byl zhotovený sensorový modul odstíněn hliníkovou folií vodivě spojenou s jeho uzemněním. Konektory pro připojení napájecího Li-Pol akumulátoru, komunikační port UART a programovací rozhraní JTAG byly vyvedeny skrz stínící folii. Zkompletovaný odstíněný sensorový modul je na Obr. 37.



Obr. 37: Zkompletovaný senzorový modul odstíněný hliníkovou folií.

3.5 Firmware a oživení sensorového modulu

Pro oživení zhotoveného sensorového modulu bylo zapotřebí navrhnout firmware řídicího mikrokontroléru k realizaci jeho základních funkcí. Těmi jsou zejména sběr a vzorkování analogového signálu ze zesilovacího obvodu fotodiody, jeho zpracování a vyhodnocení, tedy detekce napěťových píků a určení jejich průměrné amplitudy. Dále je pak úkolem mikrokontroléru takto získané informace o přítomném ionizujícím záření odeslat do dalšího zařízení dohledového systému, kterým může být centrální vizualizační jednotka (PC, tablet), a to pomocí bezdrátového modulu či UART rozhraní. Pro realizaci bezdrátového přenosu dat je sensorový modul vybaven 6-pinovým konektorem, na nějž je možné připojit různé bezdrátové moduly, například BlueTooth, WiFi či ZigBee. Pro účely vývoje a ladění je další funkcí mikrokontroléru odesílání nezpracovaného vzorkovaného signálu ze zesilovacího obvodu prostřednictvím UART rozhraní do připojeného PC. Dalšími podpůrnými funkcemi mikrokontroléru jsou řízení napájení zesilovacího obvodu, tedy schopnost jej z úsporných důvodů vypínat, sekundární kontrola napětí napájecího akumulátoru a řízení spotřeby připojeného bezdrátového modulu.

3.5.1 Vývojové prostředky pro návrh firmwaru a jeho struktura

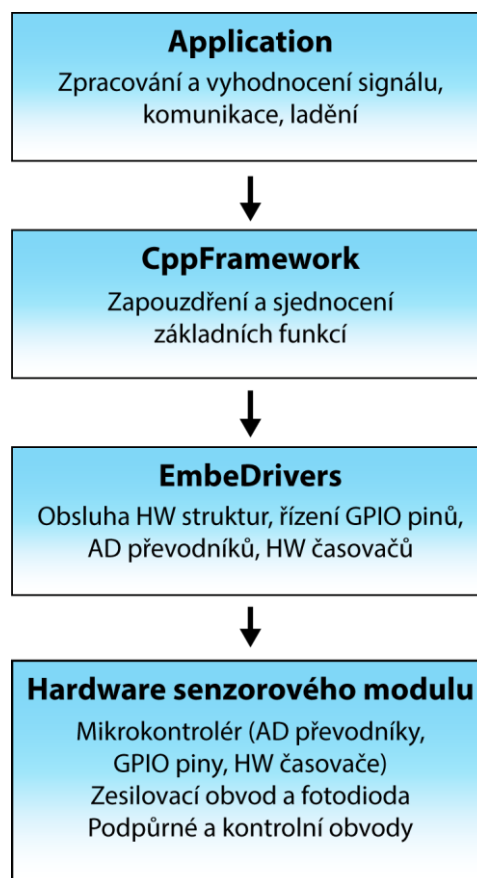
K naprogramování firmwaru řídicího mikrokontroléru bylo použito vývojové prostředí Eclipse a kombinace programovacích jazyků C a C++. Návrh firmwaru tak využívá koncepci objektově orientovaného programování, díky čemuž je přehledně strukturalizován do dílčích vrstev a funkčních bloků.

Základní vrstva navrženého firmwaru je reprezentována knihovnou *EmbeDrivers*, která umožňuje takřka platformně nezávislý přístup k jednotlivým hardwarovým komponentám. Jedná se o Hardware Abstraction Layer (HAL), tedy o abstraktní vrstvu pro vytvoření jednotného rozhraní pro obsluhu periférií mikrokontroléru. Pomocí této vrstvy je vyšším vrstvám firmwaru umožněn přístup například k AD převodníkům, komunikačním portům UART, GPIO pinům a podobně.

Hierarchicky nad touto vrstvou je využita vyšší vrstva frameworku *CppFramework*, jejíž účelem je zapouzdření a sjednocení některých často užívaných funkcí a knihoven. Na rozdíl od předchozí vrstvy umožňuje tento framework naprostou nezávislost na použité platformě. Tato vrstva tak při vývoji poskytuje nejrůznější základní funkce, například zásobníky FIFO (First In - First Out) a LIFO (Last In - First Out), ladicí

prostředky (Debugging), softwarové časování (Timery), komunikaci (streamy) a podobně. Knihovna EmbeDrivers a framework CppFramework jsou projekty, které vznikají na Společném biomedicínském pracovišti na Albertově.

Nad těmito vrstvami byla v rámci této práce vytvořena třetí - nejvyšší vrstva *Application*, která je již implementací funkcí pro sběr, zpracování a analýzu signálu ze zesilovacího obvodu detekční fotodiody. Jejich podrobnému popisu se věnuje podkapitola 3.5.3 *Digitální zpracování a vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu*. Blokové schéma hierarchického uspořádání vrstev firmwaru je na Obr. 38.



Obr. 38: Blokové schéma hierarchického uspořádání vrstev firmwaru.

3.5.2 Návrh firmwaru řídicího mikrokontroléru

Po zapnutí mikrokontroléru se běh programu dostane do hlavní funkce *main()*. Na jejím počátku jsou spuštěny požadované služby vrstvy CppFramework (DebugService - ladicí nástroje, TimerService - softwarové časování, MemoryManager - sledování dynamické alokace paměti). Následně je vytvořena instance třídy Application a firmware tak vstoupí do nejvyšší vrstvy. Třída Application představující aplikační vrstvu firmwaru obsahuje instance dalších navržených a implementovaných tříd: HardwareManager, DebugManager a Sampler a instanci třídy EventLoop, která je součástí použitého frameworku

Úkolem třídy HardwareManager je řízení napájení, úsporných režimů a taktovací frekvence procesoru. Úkolem této třídy obnova je zároveň obnova watch-dogů, vyčítání stavu nabíjecího obvodu a obsluha GPIO pinů mikrokontroléru.

Třída DebugManager umožňuje zasílání ladicích informací na komunikační port UART. Třída EventLoop z frameworku CppFramework představuje nekonečnou smyčku pro asynchronní zpracování příchozích událostí. Příchozí požadavek na provedení určitého úkolu je přidán do fronty událostí a je vykonán až v okamžiku, kdy je procesor hotov s úkoly předchozími. Využití této třídy je zejména přípravou na budoucí verzi firmwaru, ve kterém bude cestou frontování a postupného zpracování příchozích událostí řešena většina jeho funkcí, které vyžadují delší dobu zpracování a nejsou tak vhodné pro zpracování v přerušeních

Hlavní funkce navrženého firmwaru, tedy sběr, zpracování a vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu sensorového modulu, je prováděna v instanci třídy Sampler. Jejím úkolem je vzorkování analogového signálu pomocí AD převodníku a jeho následné vyhodnocení.

3.5.3 Digitální zpracování a vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu

Klíčovými prvky vzorkovaného signálu jsou napěťové píky vznikající v důsledku absorpce částic ionizujícího záření. Perioda těchto pulzů byla pomocí osciloskopu změřena a její hodnoty se pohybovaly v rozsahu 400 – 1000 μ s. Pro vzorkování těchto napěťových pulzů, jejichž nejvyšší frekvence je bez přihlídnutí k výrazně vyšší frekvenci přítomného šumu přibližně 2 kHz, je podle Shannonova teorému potřeba alespoň dvojnásobná vzorkovací frekvence, v tomto případě tedy 4 kHz. Dvojnásobná

vzorkovací frekvence je však v praxi zpravidla nedostačující, a proto byla v tomto případě zvolena vzorkovací frekvence 15 kHz.

Firmware využívá moderního konceptu, kdy mikrokontrolér provádí zadané operace pouze na základě jejich vyžádání v podobě příchozího přerušení. Stejným způsobem je prováděn i sběr dat z AD převodníku, kdy dojde ke vzniku přerušení pouze tehdy, když AD převodník dokončí konverzi analogové úrovně na digitální vzorek. Procesor se tak nedotazuje na vzorkovanou hodnotu signálu s každým průchodem, ale pouze když je připraven nový vzorek. Se vzorkovací frekvencí 15 kHz tak dojde ke vzniku tohoto přerušení 15 000krát za sekundu, přičemž každý převod vyžaduje 50 pracovních cyklů procesoru.

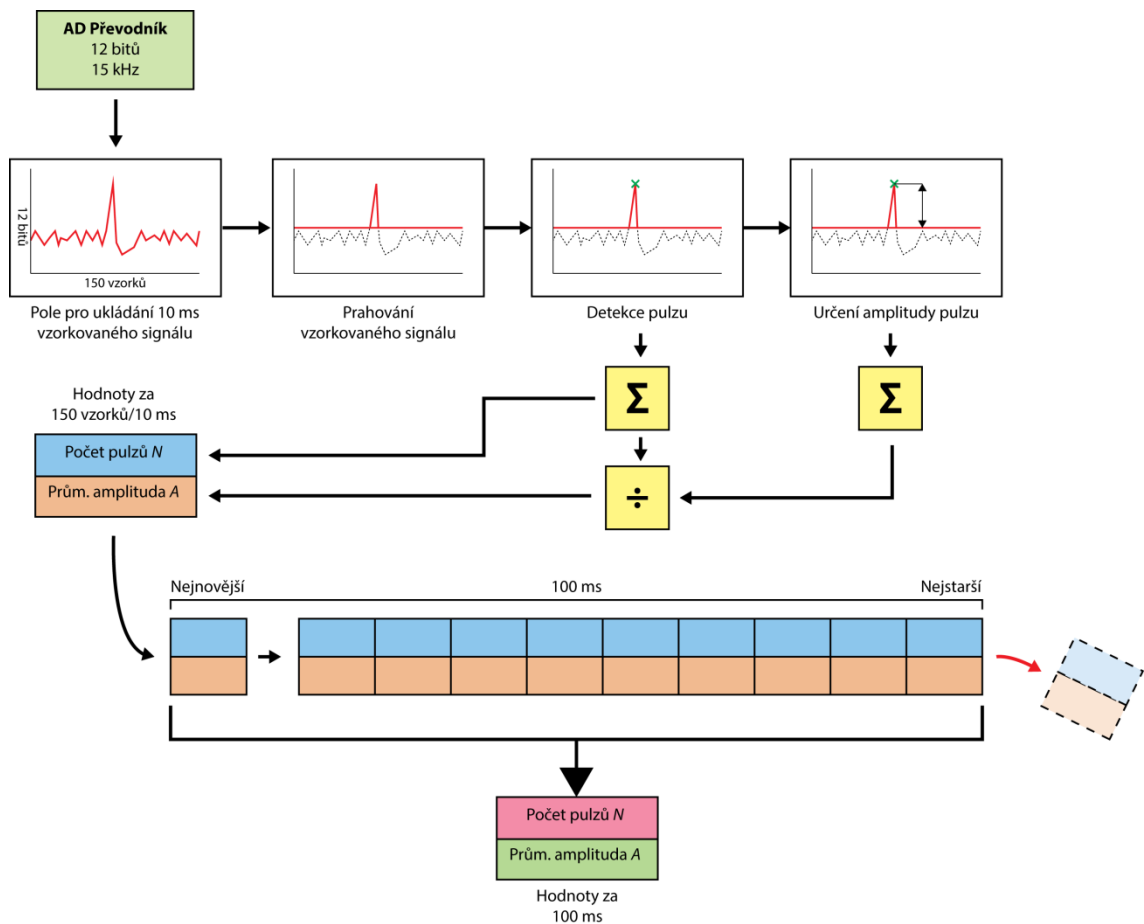
Výsledkem každého vzorkování je hodnota v rozsahu 0 – 4095 a každá úroveň reprezentuje při referenčním napětí AD převodníku 3,3 V přibližně 0,8mV úroveň vzorkovaného analogového signálu. Takto získaný vzorek je následně uložen do celočíselné proměnné bez znaménka o velikosti 16 bitů.

K vyhodnocení takto získaných vzorků slouží připravené pole o velikosti 150 celočíselných prvků se znaménkem, které je obsazováno nově příchozími vzorky, a to až do okamžiku naplnění. Při vzorkovací frekvenci 15 kHz tedy dochází k naplnění každých 10 ms, kdy dojde k jednorázovému zpracování a analýze všech hodnot uložených v poli.

Součástí zpracování signálu je i filtrace vzorků prahovou hodnotou pro odstranění nežádoucího šumu. Tato hodnota se získává při každém zpracování vzorků ve výše uvedeném poli zjištěním střední hodnoty vzorkovaného signálu. Ke střední hodnotě je následně přičtena maximální amplituda šumu, jejíž procentuální hodnota ze střední hodnoty signálu byla empiricky zjištěna z analogového signálu pomocí osciloskopu.

Prvky v poli jsou analyzovány postupně a při každém překročení vypočtené prahové hodnoty je detekován počátek pulzu. Jeho přítomnost je ověřena analýzou předchozích a následujících vzorků v poli, přičemž detekce pulzu nastává právě tehdy, kdy je aktuální prvek vyšší než předchozí a zároveň vyšší než následující prvek v poli. V témže okamžiku je zjištěna velikost aktuálního prvku, která po odečtení prahové hodnoty odpovídá amplitudě detekovaného pulzu. Součástí tohoto algoritmu je i následná sumace detekovaných pulzů v rámci 150-prvkového pole a výpočet jejich průměrné amplitudy.

Ke zjištění počtu detekovaných pulzů a jejich průměrné amplitudy v jiném časovém úseku, než je 10 ms daných velikostí výše popsaného pole, byl vytvořen další zásobník, přičemž jeho velikostí je nastaven požadovaný časový úsek měření úrovně záření formou čítání píků. Jedná se o kruhový zásobník typu LIFO, jehož účelem je hromadit hodnoty získané ze 150-prvkových polí a v okamžiku jeho naplnění nahradit "nejstarší" hodnoty nově příchozími. S každým momentem, kdy jsou do tohoto kruhového zásobníku přidány nové hodnoty, dojde k sumaci počtu detekovaných pulzů a výpočtu jejich průměrné amplitudy v rámci celého kruhového zásobníku. Díky tomu dochází k plynulému obnovování těchto hodnot - v tomto případě s frekvencí 10 Hz (tedy periodicky po 100 ms) - a zároveň jejich rozprostření přes volitelný časový úsek. Blokové schéma ilustrující proces zpracování a analýzy vzorkovaného signálu je na Obr. 39.



Obr. 39: Proces zpracování a analýzy vzorkovaného signálu, určení počtu pulzů a jejich průměrné amplitudy za časový úsek 100 ms.

Pro testovací účely byly tyto kruhové zásobníky vytvořeny tři – pro 100 ms, 1 s a 3 s dlouhý časový úsek, tedy o kapacitách 10, 100 a 300 hodnot detekovaných pulzů a jejich průměrné amplitudy. Jejich suma, respektive průměrná hodnota přes každý z těchto časových úseků, je každých 100 ms odesílána na komunikační port UART, a to ve formě CSV. Jednotlivé hodnoty jsou tedy v každém řádku odděleny středníky a díky tomu jsou v exportovaném souboru CSV přehledně rozděleny do sloupců a připravené pro přímé zpracování v tabulkových procesorech (například Excel).

Mikrokontrolér je díky navrženému firmwaru schopen kromě zpracovaných a vyhodnocených dat odesílat UART rozhraním i přímo vzorkovaný signál, a to v reálném čase, tedy bez zpoždění. Vzhledem k relativně vysoké vzorkovací frekvenci se však jedná o velký objem dat, jenž je potřeba komunikačním portem UART přenášet. Proto je jeho rychlost nastavena na 512 000 baudů/s, která je pro přenos těchto dat dostatečná.

Z důvodu přehlednosti výstupních dat neumožňuje firmware senzorového modulu odesílat jedním UART rozhraním oba druhy informací zároveň. Mikrokontrolér disponuje větším počtem těchto komunikačních portů, díky čemuž by tyto druhy informací mohl odesílat odděleně, avšak v době vývoje firmwaru v něm nebyla tato funkcionální implementována.

Kompletní zdrojový kód firmwaru včetně zdrojových kódů projektů EmbeDrivers a CppFramework je obsažen v mnoha souborech a jeho rozsah se pohybuje v řádu desítek tisíc řádků. Zdrojové kódy a zkompileované binární soubory jsou k dispozici v příloženém CD. Zdrojový kód zodpovědný za zpracování a vyhodnocení vzorkovaného signálu, jehož funkční blokové schéma je na Obr. 39, je v příloze 4.

3.5.4 Oživení sensorového modulu

Hardware sensorového modulu, tedy DPS osazená veškerými součástkami, byl následně oživen pomocí navrženého firmwaru. Kompletní zdrojový kód firmwaru v jazyce C/C++ byl přeložen do strojového kódu pomocí kompilátoru GNU GCC a GNU G++ pro procesory architektury ARM Cortex M3. Zkompilovaný firmware byl následně nahrán do mikrokontroléru sensorového modulu prostřednictvím programátoru J-Link EDU, viz Obr. 40, jenž byl k sensorovému modulu připojen přes rozhraní JTAG.

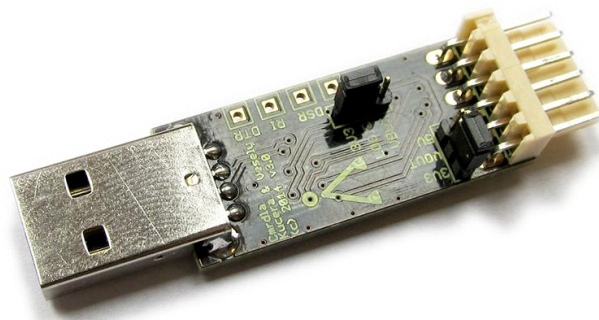


Obr. 40: Programátor J-Link pro nahrávání zkompilovaného firmwaru do mikrokontroléru.

V rámci oživení hardwaru – tedy ověření chodu jednotlivých komponent – bylo po nahrání firmwaru a připojení napájecího 3,7V Li-Pol akumulátoru změřeno napětí na klíčových místech. Funkce hlavního napájecího zdroje, tedy 3,3V spínaného regulátoru TPS63001DRCT byla ověřena změřením jeho výstupním napětím, jehož hodnota se pohybovala mezi 3,29 – 3,30 V. Stejně tak byl ověřen chod 12V napájecího zdroje LT1301 pro zesilovací obvod a fotodiody, jehož výstupní napětí bylo stabilně na hodnotě 12,04 V. Dále byla ověřena funkce nabíjecího kontroléru LTC4054, a to připojením vybitého Li-Pol akumulátoru, jehož výstupní napětí bylo na hranici vybití, a změřením výstupního napětí tohoto integrovaného obvodu. Při připojení nabíječky na nabíjecí Mini USB konektor docházelo k postupnému zvyšování tohoto napětí a tudíž nabíjení akumulátoru konstantním proudem. Při dosažení napětí 4,20 V se růst zastavil,

tehdy byl akumulátor nabíjen při konstantním napětí. Kontrola funkce integrovaného obvodu BD5231, jehož úkolem je sledování výstupního napětí napájecího akumulátoru a zabránění jeho podvybití, byla provedena připojením vybitého akumulátoru. Kontrolní obvod zabránil v důsledku detekce nízkého napájecího napětí spuštění 3,3V napájecího zdroje a tím pádem i celého sensorového modulu.

Kromě výše uvedených periferních obvodů byl otestován i chod samotného mikrokontroléru, a to pomocí připojení jeho komunikačního portu UART k počítači prostřednictvím UART-USB převodníku s čipem FT232RL firmy FTDI, viz Obr. 41. Pro sběr a zobrazení příchozích dat v počítači byl použit software RealTerm ve verzi 2.0.0.7. V rámci jeho grafického rozhraní byl nastaven patřičný virtuální komunikační port (COM port) vytvořený UART-USB převodníkem a přenosová rychlost na hodnotu 512 000 baud/s. Firmware nahraný v mikrokontroléru byl nastaven pro přímé odesílání vzorkovaného signálu ze zesilovacího obvodu prostřednictvím tohoto komunikačního portu. Po připojení napájení k sensorovému modulu byly v připojeném počítači zobrazeny základní informace o přítomném procesoru a verzi nahraného firmwaru, které mikrokontrolér odesílá na UART rozhraní okamžitě po svém nastartování a pouze v případě správného chodu. Následně bylo přijato velké množství celočíselných hodnot, které reprezentovaly vzorkovaný signál ze zesilovacího obvodu, jenž mikrokontrolér na základě nahraného firmwaru na tento komunikační port odesílala.



Obr. 41: UART-USB převodník FTDI FT232RL.

Touto sadou ověření jednotlivých hardwarových komponent byl sensorový modul oživen a byl tak připraven k ověření jeho základních funkcí, kalibraci a ověření jeho funkčnosti v rámci medicínského dohledového systému.

3.6 Ověření funkčního vzorku sensorového modulu

Zhotovený funkční vzorek sensorového modulu byl podroben ověření základních funkcí, kalibrován ve Státním ústavu jaderné, chemické a biologické ochrany (SÚJCHBO) a jeho funkčnost v rámci medicínského dohledového systému byla ověřena provedením sady pilotních měření ve výcvikovém polygonu FOK HZS (Hasičského Záchraného Sboru) ve Zbirohu.

3.6.1 Ověření základních funkcí funkčního vzorku

Ověření základních funkcí zhotoveného funkčního vzorku sensorového modulu bylo stejně jako v případě ověřování testovacích sensorových modulů provedeno pomocí vzorku uranového skla. Analogový napěťový signál ze zesilovacího obvodu byl nejprve zaznamenán osciloskopem, a to nejdříve bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření a následně s přiloženým uranovým sklem.

Takto získaný analogový signál je následně převáděn do digitální podoby pomocí 12bitového AD převodníku mikrokontroléru, a to se vzorkovací frekvencí 15 kHz. Pro ověření této funkce sensorového modulu a potvrzení dostatečnosti zvolené vzorkovací frekvence byl digitalizovaný signál zaznamenán do souboru, a to po dobu 20 s. Sběr digitalizovaného signálu v reálném čase je umožněn jeho odesláním na rozhraní UART rychlostí 512 kbaud/s, odkud je následně pomocí převodníku UART-USB zaznamenáván do souboru CSV.

Funkční vzorek je schopen digitalizovaný signál analyzovat, detekovat píky a určit jejich amplitudu, a následně tyto informace odesílat prostřednictvím UART rozhraní v podobě počtu detekovaných píků a jejich průměrné amplitudy za volitelný časový úsek. Mikrokontrolér analyzuje vzorkovaný signál oknem o šířce 150 vzorků a získává tak tyto hodnoty s obnovovací frekvencí 100 Hz (10ms okno) při vzorkovací frekvenci 15 kHz. Dále je mikrokontrolér schopen takto získané hodnoty rozprostřít do delších časových úseků při zachování výše uvedené obnovovací frekvence. Pro ověření této funkce byl zaznamenán počet detekovaných píků a jejich průměrná amplituda za 100 ms, 1 s a 3 s, a to nejprve bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření a následně po přiložení uranového skla k sensorovému modulu.

Veškerá data naměřená v rámci ověření základních funkcí vyvinutého vzorku jsou v kapitole 4 *Výsledky*, a to včetně jejich popisu a interpretace. Na základě ověření základních funkcí funkčního vzorku byla provedena jeho kalibrace v SÚJCHBO.

3.6.2 Kalibrace funkčního vzorku

Účelem kalibrace funkčního vzorku sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření bylo stanovení vztahu mezi hodnotami příkonu ekvivalentní dávky H (Sv/s) získané z referenčního měřidla a počtem detekovaných pulzů a jejich průměrnou amplitudou získaných z funkčního vzorku. Na základě této kalibrace bylo pak možné získat informaci o ekvivalentním dávkovém příkonu přímo z funkčního vzorku a upravit tak jeho výstupní signál na požadovaný tří-stavový indikátor nebezpečí přítomného ionizujícího záření.

Tyto úrovně nebezpečí byly určeny po konzultaci s pracovníky SÚJCHBO na základě limitů ekvivalentní dávky stanovených ve vyhlášce Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) 307/2002 o radiační ochraně. Základem vymezení těchto úrovní nebezpečí bylo stanovení doby přítomnosti uživatele sensorového modulu v potenciálně nebezpečném prostředí. Cílovou skupinou uživatelů tohoto detektoru jsou členové IZS, jejichž pobyt v nebezpečném prostředí je dán délkou zásahu, která by však neměla v případě jednoho zasahujícího přesáhnout 8 hodin. Za tuto dobu by jím absorbovaná ekvivalentní dávka neměla přesáhnout určité limity. Ty jsou odvozeny z výše uvedené vyhlášky, kde je obecný limit pro obyvatele stanoven na 1 mSv za jeden kalendářní rok pro součet všech efektivních dávek. Vzhledem k tomu, že členové IZS nejsou radiačními pracovníky, nemohou obdržet efektivní dávku vyšší než 6 mSv za kalendářní rok [42].

Z těchto limitů byly odvozeny prahy třístupňového indikátoru nebezpečí přítomného ionizujícího záření, kdy horní hranice nejnižšího stupně nebezpečí je vymezena obdržením dvojnásobku limitní roční dávky pro obyvatele za dobu zásahu, tedy 2 mSv za 8 hodin [42]. Střední stupeň nebezpečí přítomného ionizujícího záření navazuje spodní hranicí na předchozí stupeň. Jeho horní hranice je určena dávkou, jejíž hodnotu a vyšší mohou za kalendářní rok pouze radiační pracovníci, ve vztahu k době zásahu je tak 6 mSv za 8 hodin. Nejvyšší stupeň ohrožení je definován pouze spodní hranicí, která odpovídá horní hranici předchozího stupně nebezpečí.

Vzhledem k tomu, že je zhotovený funkční vzorek senzorového modulu detektor kontinuálního typu, odpovídá jeho výstupní hodnota aktuálně absorbované dávce záření za jednotku času. Výše odvozené prahové hodnoty absorbovaných dávek pro jednotlivé stupně nebezpečí byly převedeny na hodnoty příkonu ekvivalentní dávky H ($\mu\text{Sv/h}$), které jsou zaznamenány v Tab. 6.

Tab. 6: Prahové hodnoty příkonu ekvivalentní dávky H ($\mu\text{Sv/h}$) pro jednotlivé stupně nebezpečí.

Stupeň nebezpečí	Prahové hodnoty H ($\mu\text{Sv/h}$)
Velmi mírné	< 250
Střední	250 - 750
Vysoké	> 750

Kalibrace byla provedena na SÚJCHBO pod vedením jeho pracovníků. Pro stanovení referenčních hodnot příkonu ekvivalentní dávky H byly použity kalibrační radionuklidy ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{60}Co , jejichž parametry jsou uvedeny v Tab. 7, a kalibrovaný detektor γ záření Thermo ESM FH 40 G.

Tab. 7: Parametry zdrojů ionizujícího záření použitých ke kalibraci funkčního vzorku.

Radionuklid	Aktivita (MBq) (ke dni 6. 5. 2016)	Energie (keV)	Poločas rozpadu (roky)
$^{241}\text{Americium}$	36,85	59,54	433,012
$^{137}\text{Cesium}$	37,81	661,65	30,170
$^{60}\text{Kobalt}$	26,63	1173,21 1332,48	5,271

Kalibrace probíhala ve sledovaném pásmu pracoviště pomocí měřicí aparatury s pevnou a posuvnou základnou. Na posuvné základně byl umístěn jeden z kalibračních radionuklidů, jímž emitované ionizující záření bylo usměrněno olověným tubusovým kolimátorem. V jeho ose byl na pevné základně umístěn detektor γ záření Thermo ESM FH 40 G s měřicí sondou umístěnou na prodlužovacím rameni, jenž sloužil pro

stanovení referenčních hodnot příkonu ekvivalentní dávky. Měřitelný rozsah této veličiny referenčního detektoru je od 10 nSv/h až do 10 Sv/h a je schopen detekovat částice s energiemi v rozsahu 60 – 1300 keV [46]. Funkční vzorek byl společně s UART-USB převodníkem umístěn na čelo referenčního měřidla, v době měření referenčním měřidlem byl však odejmut. Funkční vzorek byl napájen jednočlávkovým Li-Pol akumulátorem o kapacitě 1050 mAh. Výstupní data byla zaznamenávána prostřednictvím USB do připojeného počítače do souboru CSV v podobě detekovaných píků za sekundu a jejich průměrné amplitudě za různé časové úseky s obnovovací frekvencí 10 Hz.

Měřicí sestava je na Obr. 42, na čele referenčního detektoru je umístěn funkční vzorek sensorového modulu. Referenční detektor je zafixován na pevné základně vlevo pomocí laboratorních stojanů z důvodu zachování souososti s olověným kolimátorem a kalibračním zářičem, který je umístěn na posuvné základně v pravé části obrázku. Kolimátor je součástí měřicí soustavy z důvodu fokusace záření z kalibračních zářičů a ochrany přítomných osob, které byly z bezpečnostních důvodů vybaveni integračními dozimetry pro zjištění obdržené ekvivalentní dávky za dobu měření.



Obr. 42: Měřicí sestava pro kalibraci funkčního vzorku sensorového modulu.

Postupně byly naměřeny referenční hodnoty příkonu ekvivalentní dávky pro každý z kalibračních radionuklidů v tabulce Tab. 7. Pro pokrytí rozsahu hodnot této veličiny daného stupni nebezpečí definovanými v tabulce Tab. 6 byla využita posuvná základna s umístěným radionuklidem, a to vzhledem k tomu, že s druhou mocninou vzdálenosti klesá počet dopadajících částic na plochu detektoru, v důsledku čehož stejnou měrou klesá i příkon ekvivalentní dávky.

Nejprve byla zjištěna referenční hodnota příkonu ekvivalentní dávky pomocí detektoru Thermo ESM FH 40 G pro ^{241}Am , a to ve vzdálenostech 20, 15 a 10 cm mezi radionuklidem a čelem detektoru. Při vzdálenostech větších než 20 cm již nebyl detekován příkon ekvivalentní dávky, který by převyšoval hodnotu přirozeného pozadí, a nebylo tak třeba provádět měření pro větší vzdálenosti. Následně byl získán 20minutový záznam počtu detekovaných piků a jejich průměrné velikosti pomocí funkčního vzorku sensorového modulu, a to pro každou ze tří vzdáleností. Vzhledem k tomu, že je ^{241}Am především α zářič a pouze část jím emitovaných částic jsou relativně nízkoenergetické částice γ záření, byly dlouhodobé záznamy pro získání vypovídajících dat nezbytné.

Stejným způsobem měření byla získána data pro radionuklid ^{137}Cs , jenž emituje větší počet γ částic s výrazně vyšší energií, než předchozí zářič. Z toho důvodu proběhlo měření pro více vzdáleností mezi zářičem a detektorem, konkrétně pro 100, 70, 50, 30, 20, 15, 10 a 5 cm, díky čemuž byl získán široký rozsah referenčního příkonu ekvivalentní dávky. Pro vzdálenost 100 cm byl naměřen 15 minut dlouhý záznam u funkčního vzorku pro získání vypovídajících dat z kvůli relativně nízkému počtu dopadajících částic. S klesající vzdáleností se však tento počet rapidně zvyšoval a nebylo třeba pořizovat takto dlouhodobé záznamy, tudíž byla jejich délka postupně snižována, a to až na dobu 3 minut v případě vzdálenosti 5 cm.

Nakonec byl měření podroben radionuklid ^{60}Co , který byl z použitých zářičů nejsilnější. Emituje výhradně vysokoenergetické částice γ záření a měřením ve vzdálenostech 100, 70, 58, 40, 30, 20, 15, 10 a 5 cm mezi zářičem a detektorem byl získán širší rozsah hodnot referenčního příkonu ekvivalentní dávky. Z důvodu vysokého počtu detekovaných částic nebylo opět nutné pořizovat dlouhodobé záznamy dat z funkčního vzorku a kromě vzdáleností 100 a 70 cm, kde byla délka záznamu 5 minut, byly záznamy dlouhé 3 minuty.

Kromě záznamů počtu detekovaných částic a jejich průměrné amplitudy za časový interval 1 sekunda byly v rámci kontroly správné funkce funkčního vzorku získány i záznamy nezpracovaného digitalizovaného signálu ze zesilovacího obvodu sensorového modulu. Signál byl zaznamenáván do souboru CSV po dobu 5 minut s frekvencí 15 kHz, a to při měření zářičů ^{60}Co a ^{137}Cs při vzdálenostech v rozsahu 100 – 5 cm s krokem 5 cm.

Veškerá naměřená data byla předána pracovníkům SÚJCHBO, kteří na jejich základě provedli kalibraci funkčního vzorku a vytvořili kalibrační list. Záznamy digitalizovaného signálu ze sensorového modulu jsou v kapitole 4 Výsledky a v příloze 5 (A, B), jejich popis a interpretace v kapitole 4 *Výsledky*. Kalibrační list pro funkční vzorek s pracovním označením Symod-rad-r67 je v příloze 6.

Po kalibraci funkčního vzorku byla ověřena jeho funkčnost v rámci medicínského dohledového systému, zejména pro zjištění jeho provozních vlastností a odolnosti vůči ztíženým podmínkám.

3.6.3 Ověření funkčního vzorku sensorového modulu v rámci medicínského dohledového systému

Pro ověření odolnosti a funkčnosti ve ztížených podmínkách v rámci medicínského dohledového systému byl vzniklý funkční vzorek podroben sadě pilotních měření ve výcvikovém polygonu typu FOK (FlashOver kontejner) útvaru HZS ve Zbirohu.

V průběhu měření nebyla kromě přirozeného radiačního pozadí očekávána přítomnost vnějších zdrojů ionizujícího záření. Měření tudíž nesloužilo pro ověření odezvy sensorového modulu na ionizující záření, ale pro ověření jeho provozních vlastností a odolnosti vůči teplotnímu a vlhkostnímu zatížení a mechanickému namáhání.

Výcvikový polygon slouží členům HZS k nácviku zásahu, zejména zdolávání požárů. K jejich simulaci jsou v polygonu spalovány dřevěné hraničky či propan, a to v otevřených či uzavřených prostorách pro simulaci požáru bytů, sklepních prostor, garáží, viz Obr. 43:



Obr. 43: Výcvikový polygon FOK HZS Zbiroh.

Měření probíhalo v rámci testování bezdrátového dohledového systému FlexiGuard vyvíjeného na Společném biomedicinském pracovišti Albertov [3]. Pro integraci vzniklého funkčního vzorku sensorového modulu detekce ionizujícího záření do tohoto dohledového systému byl sensorový modul zapouzdřen pomocí Soft-Case krabičky od firmy OKW. Ta poskytuje sensorovému modulu krytí třídy IP 54 [43], která byla rozšířena dodatečným zatěsněním pomocí silikonu. Pro bezdrátovou komunikaci v rámci dohledového systému byl sensorový modul vybaven bezdrátovým modulem AP2 od firmy ANT fungujícím na frekvenci 2,4 GHz [44]. Pro nezbytné odstínění před vnějším elektromagnetickým rušením byl sensorový modul opět obalen hliníkovou folií. Celá sensorická jednotka byla napájena jednočláňkovým plochým Li-Pol akumulátorem o kapacitě 1050 mAh. Pohled do takto připravené sensorické jednotky je na Obr. 44.



Obr. 44: Zkompletovaná senzorická jednotka s funkčním vzorkem sensorového modulu detekce ionizujícího záření, bezdrátovým modulem a napájecím akumulátorem.

Takto sestavená senzorická jednotka byla následně umístěna na jednoho z členů HZS. Ten byl následně vybaven standardní hasičskou výzbrojí a výstrojí, senzorická jednotka se tak nacházela pod vrstvou termoprádla a nomexové žáruvzdorné blůzy. Hasič byl kromě této senzorické jednotky vybaven senzory teploty a vlhkosti, viz Obr. 45.



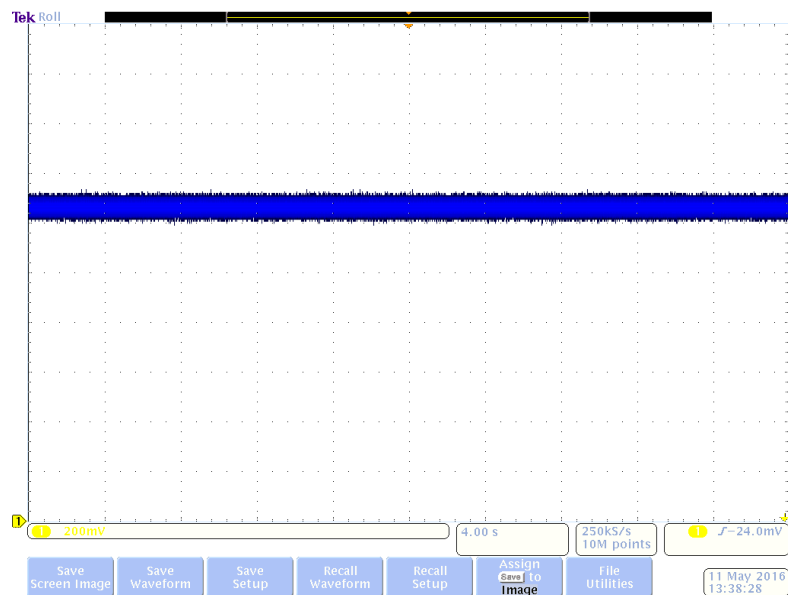
Obr. 45: Člen HZS vybavený senzorickými jednotkami detekce ionizujícího záření, teploty a vlhkosti a vysílací jednotky pro bezdrátovou komunikaci s centrální jednotkou.

Takto vybavený člen HZS se následně zúčastnil standardního nácviku zásahu zahrnujícího hašení požáru. Během něho byly ze senzorické jednotky detekce ionizujícího záření prostřednictvím centrální jednotky dohledového systému FlexiGuard zaznamenávány hodnoty detekovaných částic ionizujícího záření a jejich amplituda.

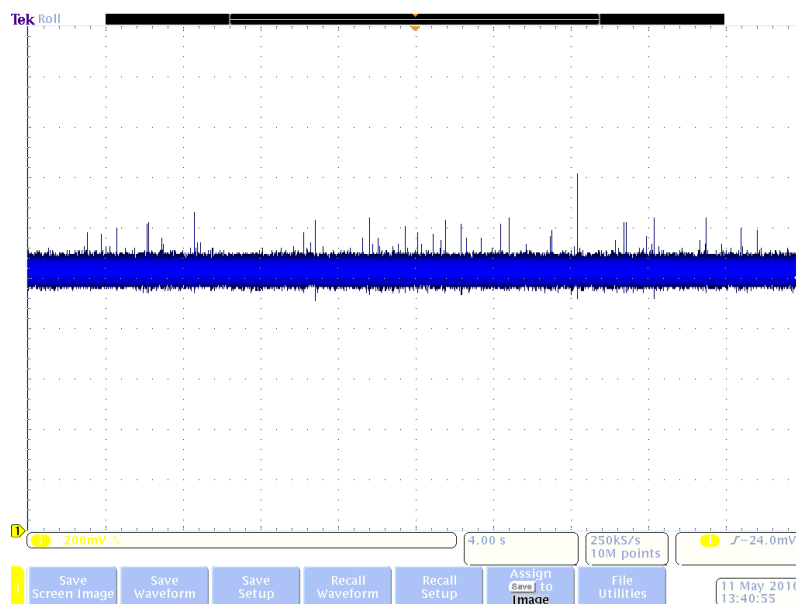
4 Výsledky

V rámci této diplomové práce byl proveden kompletní návrh a realizace sensorového modulu detekce ionizujícího záření pro osobní medicínské dohledové systémy, včetně naprogramování firmwaru řídicího mikrokontroléru pro sběr a analýzu signálu získaného z detekčního čidla. Vývoji výsledného funkčního vzorku sensorového modulu předcházely návrh a realizace několika testovacích modulů pro ověření možnosti detekce ionizujícího záření fotodiodou a ladění zesilovacího obvodu. Získaná data z těchto modulů jsou uvedena v kapitole 3.2 *Ladění dílčích prvků konceptu sensorového modulu*

Pro ověření správnosti základních funkcí funkčního vzorku sensorového modulu byl proveden sběr výstupního analogového signálu zesilovacího obvodu prostřednictvím osciloskopu. Ten byl nastaven na stejnosměrnou (DC) vazbu, časové rozlišení na 4 s a amplitudové na 200 mV na dílek Signál bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření a jeho podoba v přítomnosti zdroje ionizujícího záření (uranové sklo) jsou na Obr. 46 a Obr. 47.

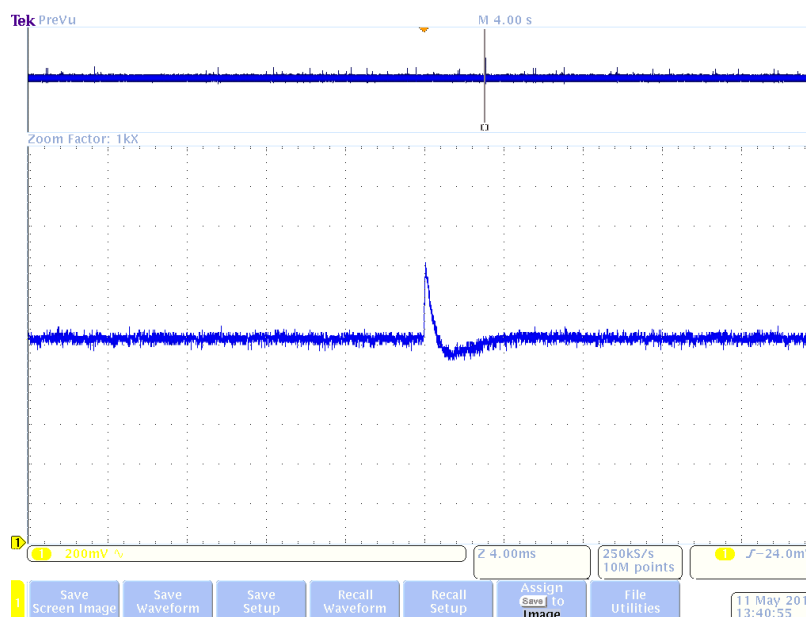


Obr. 46: Výstupní signál zesilovacího obvodu funkčního vzorku bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření.



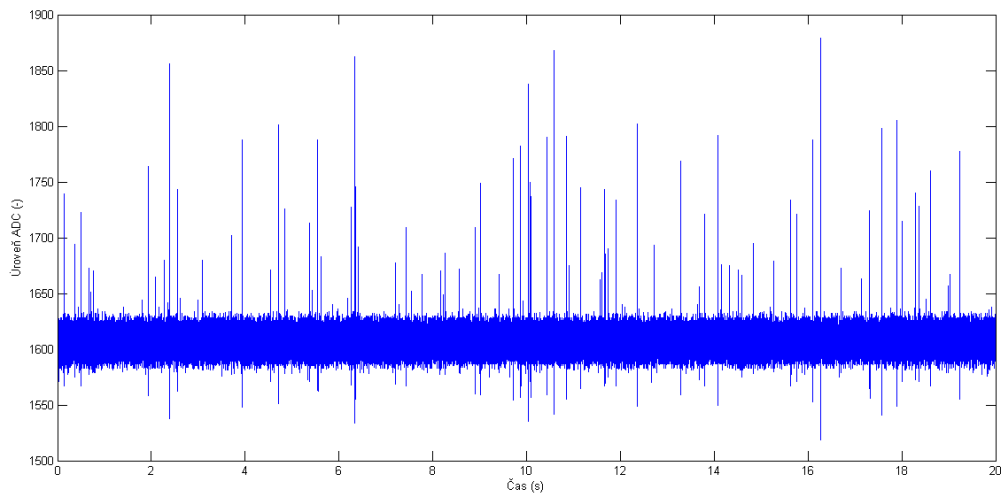
Obr. 47: Výstupní signál zesilovacího obvodu funkčního vzorku po přiložení uranového skla.

V analogovém signálu na Obr. 47 jsou jasně patrné píky indikující absorpci částice ionizujícího záření z uranového skla, které v klidovém signálu na Obr. 46 chybí. Amplituda píků se pohybuje v řádu několika desítek až stovek mV nad úroveň šumu, přičemž hodnota amplitudy píku je závislá na energii absorbované částice. Amplitudový rozsah šumu v signálu (špička-špička) je přibližně 100 mV. Detail napětového píku se zvětšením časového měřítka 1000x je na OBR.

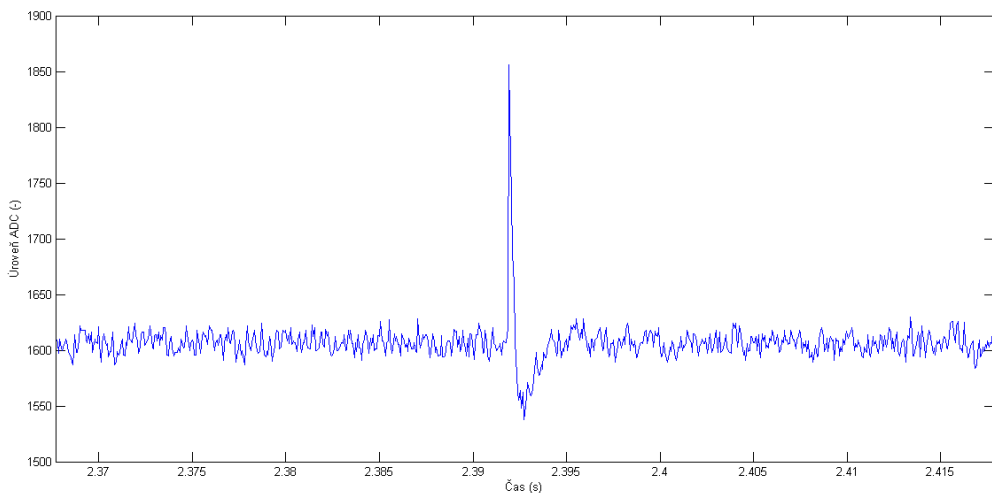


Obr. 48: Napětový pík výstupního signálu způsobený absorpcí částice ionizujícího záření fotodiodou.

Z detailu napěťového píku na Obr. 48 je patrná velikost jeho amplitudy, která je v tomto případě 370 mV. Změřená délka tohoto pulzu počítaná od počátku svého strmého nárůstu až po návrat na úroveň stejnosměrné složky, tedy před zákmitem pod její úroveň, je 800 μ s. Rozsah délek několika dalších analyzovaných napěťových píků je 400 – 1000 μ s. Pro vzorkování těchto napěťových pulzů byla proto zvolena vzorkovací frekvence 15 kHz. Její dostatečnost byla ověřena 20 sekundovým záznamem vzorkovaného signálu ze zesilovacího obvodu, který je na Obr. 49. Detail vzorkovaného napěťového píku je na Obr. 50.



Obr. 49: Vzorkovaný signál z AD převodníku v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.



Obr. 50: Detail vzorkovaného signálu z AD převodníku - pík při absorpci částice fotodiodou.

Ze vzorkovaných signálů na Obr. 49 a Obr. 50 je patrné, že zvolená vzorkovací frekvence 15 kHz je dostačující k zachycení napěťových píků indikujících absorpci částice ionizujícího záření. Na základě porovnání analogového píku na Obr. 48 a jeho vzorkované formy na Obr. 50 lze usoudit, že digitalizací napěťového signálu nedošlo k jeho významnému zkreslení. Řídicí mikrokontrolér umožňuje díky navrženému firmwaru tyto píky detekovat, určit jejich amplitudu a tyto hodnoty sumovat, respektive průměrovat přes volitelný časový úsek. Pro ověření této funkce byla tato data z funkčního vzorku zaznamenávána, a to bez a v přítomnosti zdroje ionizujícího záření (uranové sklo). Počet detekovaných píků a jejich průměrná amplituda pro 100 ms, 1 s a 3 s dlouhý časový úsek jsou zaznamenány v Tab. 8 a Tab. 9.

Tab. 8: Průměrné hodnoty počtu detekovaných píků a jejich průměrné amplitudy za časový úsek získané z 3 minutového záznamu výstupních dat funkčního vzorku s přiloženým uranovým sklem.

Časový úsek (s)	Počet detekovaných píků za časový úsek (-)	Průměrná amplituda píku za časový úsek (mV)
0,1	1,24	8,63
1	12,43	35,68
3	37,54	37,34

Tab. 9: Průměrné hodnoty počtu detekovaných píků a jejich průměrné amplitudy za časový úsek získané z 3 minutového záznamu výstupních dat funkčního vzorku bez přítomného zdroje ionizujícího záření.

Časový úsek (s)	Počet detekovaných píků za časový úsek (-)	Průměrná amplituda píku za časový úsek (mV)
0,1	0,02	0,36
1	0,18	3,23
3	0,54	7,88

Porovnáním zaznamenaných hodnot v Tab. 8 a Tab. 9 lze usoudit, že je funkční vzorek sensorového modulu schopen vyhodnocovat signál získaný ze zesilovacího obvodu, detekovat píky a určovat jejich amplitudu, respektive počet absorbovaných částic a jejich energii. V tabulkách lze také pozorovat rozprostření sledované veličiny přes volitelný časový úsek, kdy v důsledku použití kruhových zásobníků dochází k součtu detekovaných pulzů v daném časovém úseku a výpočtu průměrné amplitudy těchto pulzů. V případě nepřítomného zdroje ionizujícího záření nejsou naměřené hodnoty v Tab. 9 nulové z důvodu absorpce částice kosmického záření.

V rámci kalibračního měření na SÚJCHBO bylo z funkčního vzorku sensorového modulu získáno velké množství dat. Pro samotnou kalibraci sensorového modulu, tedy stanovení vztahu mezi ekvivalentním dávkovým příkonem získaným z referenčního měřidla a počtem detekovaných pulzů a jejich průměrné amplitudy získaných ze senzoru, byla tato data zpracována. Byly z nich získány hodnoty počtu detekovaných píků, respektive částic za sekundu a průměrná amplituda detekovaných pulzů, a to vyjádřená počtem kvantizačních úrovní AD převodníků a v napětí v mV.

Všechny tyto hodnoty byly vypočítány jako průměry z naměřených dlouhodobých záznamů, a to pro každou ze vzdáleností mezi zářičem a detektorem, pro kterou byla data naměřena. Vypočtené hodnoty pro všechny tři kalibrační zářiče jsou uvedeny v Tab. 10, Tab. 11 a Tab. 12, které zároveň sloužily pracovníkům SÚJCHBO jako podklady ke kalibraci funkčního vzorku.

Tab. 10: Naměřené referenční hodnoty ekvivalentního dávkového příkonu H ($\mu\text{Sv/h}$) a hodnoty získané z funkčního vzorku sensorového modulu: počet detekovaných pulzů za sekundu N (pulzy/s), směrodatná odchylka δ (pulzy/s) veličiny N , průměrná velikost detekovaných pulzů A_{ADC} (úroveň ADC) a průměrná amplituda detekovaných pulzů A (mV) pro jednotlivé vzdálenosti l (cm) mezi kalibračním zářičem ^{241}Am a detektorem.

l (cm)	20	15	10
H ($\mu\text{Sv/h}$)	2,1	3,3	9
N (pulzy/s)	0,26	0,55	0,88
δ (pulzy/s)	0,55	0,66	0,85
A_{ADC} (úroveň ADC)	3,76	3,83	6,50
A (mV)	3,01	3,06	5,20

Tab. 11: Naměřené referenční hodnoty H ($\mu\text{Sv/h}$) a hodnoty získané z funkčního vzorku sensorového modulu: N (pulzy/s), δ (pulzy/s), A_{ADC} (úroveň ADC) a A (mV) pro jednotlivé vzdálenosti l (cm) mezi kalibračním zářičem ^{137}Cs a detektorem.

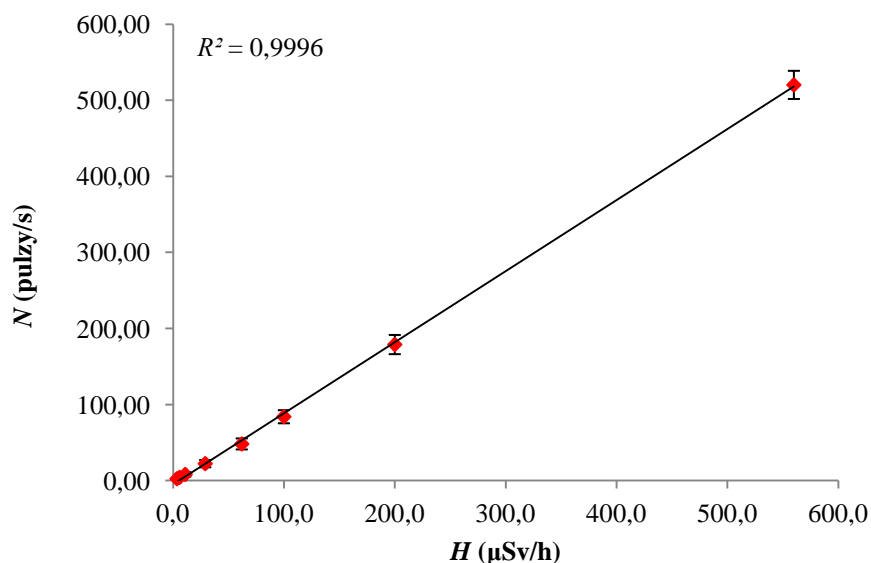
l (cm)	100	70	50	30	20	15	10	5
H ($\mu\text{Sv/h}$)	3,5	6,0	11,0	29,0	62,0	100,0	200,0	560,0
N (pulzy/s)	2,53	4,41	8,26	22,42	48,31	84,10	178,98	520,39
δ (pulzy/s)	1,68	2,24	3,11	4,85	7,25	8,61	12,63	18,51
A_{ADC} (úroveň ADC)	31,31	42,20	43,82	43,37	39,43	34,89	27,57	14,73
A (mV)	25,05	33,76	35,06	34,70	31,54	27,91	22,06	11,78

Tab. 12: Naměřené referenční hodnoty H ($\mu\text{Sv/h}$) a hodnoty získané z funkčního vzorku sensorového modulu: N (pulzy/s), δ (pulzy/s), A_{ADC} (úroveň ADC) a A (mV) pro jednotlivé vzdálenosti l (cm) mezi kalibračním zářičem ^{60}Co a detektorem.

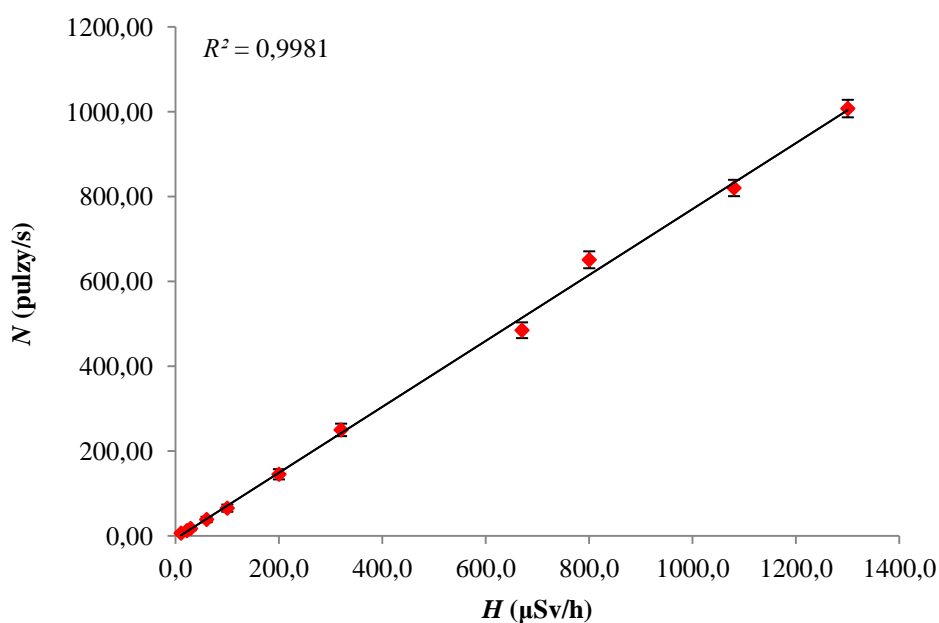
l (cm)	100	70	58	40	30	20	15	10	8	6,5	5
H ($\mu\text{Sv/h}$)	10,6	22,0	29,0	60,0	100,0	200,0	320,0	670,0	800,0	1080,0	1300,0
N (pulzy/s)	6,03	11,89	16,98	38,13	64,86	144,76	249,39	484,31	650,41	819,64	1006,89
δ (pulzy/s)	2,57	3,44	4,39	6,45	8,43	12,07	14,70	18,61	19,95	19,25	20,65
A_{ADC} (úroveň ADC)	60,59	64,87	66,85	66,12	60,62	48,89	37,85	26,61	23,36	22,71	21,94
A (mV)	48,47	51,90	53,48	52,90	48,50	39,11	30,28	21,29	18,69	18,17	17,55

Na základě výše uvedených podkladů byla pracovníky z Laboratoře osobní dozimetrie a monitorování SÚJCHBO provedena kalibrace funkčního vzorku sensorového modulu s pracovním názvem Symod-rad-r67. Na základě provedených měření v rámci kalibrace byla potvrzena silně lineární závislost mezi dávkovým příkonem a odezvou funkčního vzorku sensorového modulu. Kalibrační list vydaný SÚJCHBO je v příloze 6.

Závislost počtu pulzů za sekundu N (pulzy/s) detekovaných funkčním vzorkem na referenční hodnotě ekvivalentního dávkového příkonu H ($\mu\text{Sv/h}$) včetně směrodatných odchylek δ (pulzy/s) a vložených aproximačních přímek s jejich hodnotou spolehlivosti R^2 pro kalibrační zářiče ^{137}Cs a ^{60}Co jsou vyneseny v grafech na Obr. 51 a Obr. 52.



Obr. 51: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na referenční hodnotě ekvivalentního dávkového příkonu H pro ^{137}Cs .

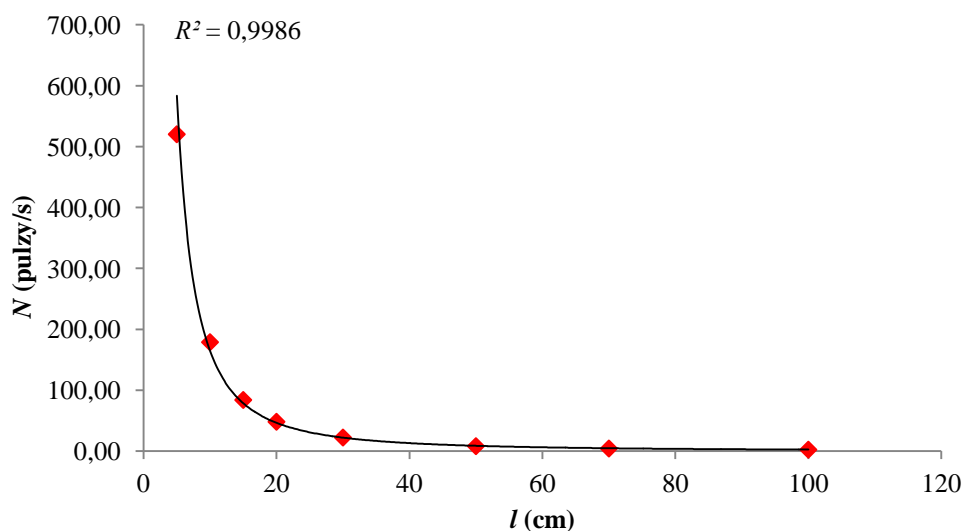


Obr. 52: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na referenční hodnotě ekvivalentního dávkového příkonu H pro ^{60}Co .

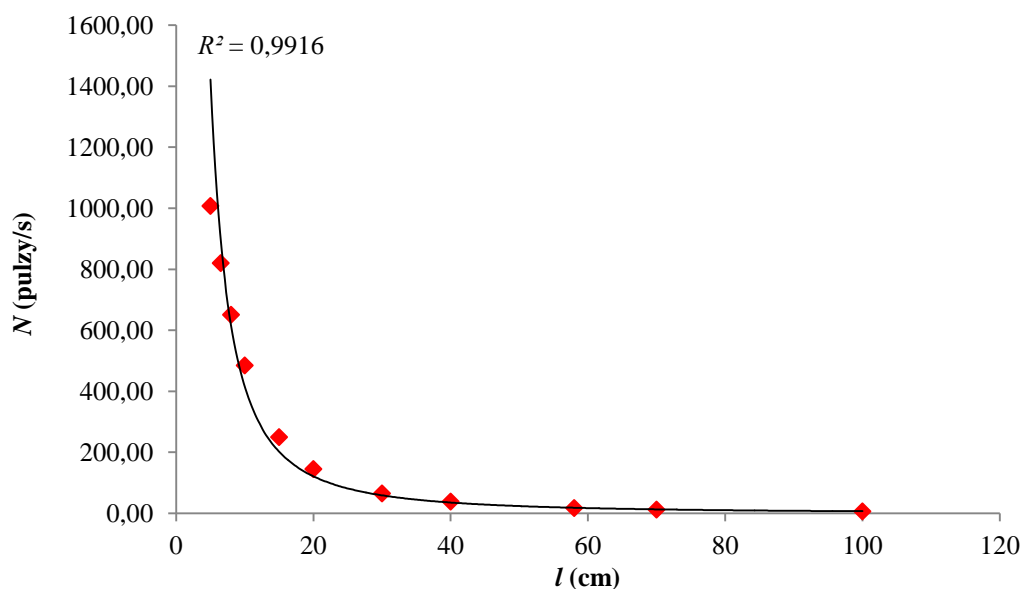
Pro stanovení vztahu mezi referenční veličinou a výstupní hodnotou funkčního vzorku, tedy detekovaného počtu částic záření je žádoucí lineární závislost mezi těmito veličinami. To v případě naměřených dat pro zářiče ^{137}Cs a ^{60}Co platí, a to se spolehlivostí 99,9 %, respektive 99,8 %. V případě radionuklidu ^{241}Am nelze brát tuto závislost jako relevantní pro kalibraci, ale pouze pro ověření schopnosti sensorového

modulu detekovat i slabé zdroje ionizujícího záření, jejichž ekvivalentní dávkový příkon se příliš neliší od hodnot přirozeného radiačního pozadí.

Závislost počtu pulzů za sekundu N (pulzy/s) detekovaných funkčním vzorkem na vzdálenosti mezi zářičem a detektorem l (cm) včetně vložených mocninných aproximačních křivek s jejich hodnotou spolehlivosti R^2 pro kalibrační zářiče ^{137}Cs a ^{60}Co jsou vyneseny v grafech na Obr. 53 a Obr. 54.



Obr. 53: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na vzdálenosti l mezi zářičem a detektorem pro ^{137}Cs .



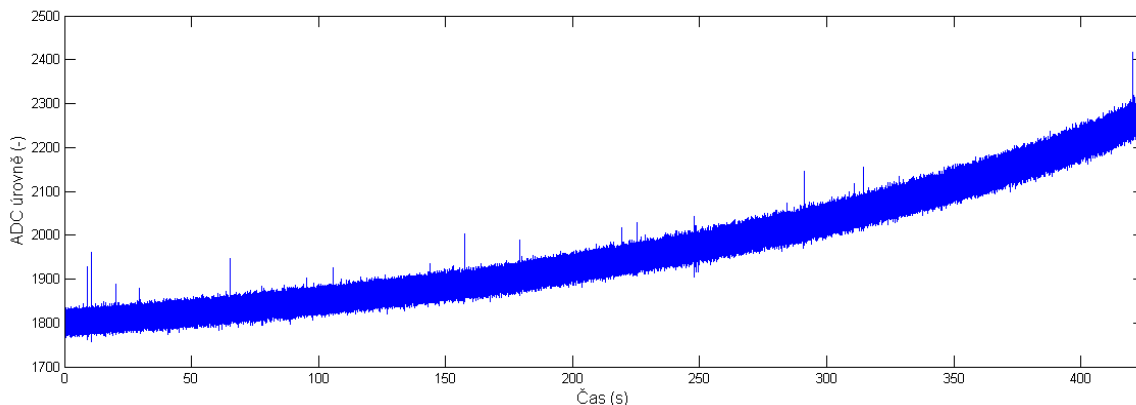
Obr. 54: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na vzdálenosti l mezi zářičem a detektorem pro ^{60}Co .

Očekávaná závislost počtu detekovaných částic na vzdálenosti mezi zářičem a detektorem je mocninného charakteru, tedy počet detekovaných částic klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Důvodem je zákon převrácených čtverců, jenž platí i v případě zdrojů ionizujícího záření. V případě radionuklidů ^{137}Cs a ^{60}Co byl tento předpoklad potvrzen, a to se spolehlivostí 99,9 a 99,2 %, viz Obr. 53 a Obr. 54. Tuto závislost nebylo v případě ^{241}Am možno vynést ze stejného důvodu jako v případě závislosti referenčních hodnot ekvivalentního dávkového příkonu na počtu detekovaných částic.

Ověření funkčnosti a odolnosti vzniklého funkčního vzorku sensorového modulu v rámci medicínského dohledového systému proběhlo na výcvikovém polygonu HZS ve Zbirohu. Sensorový modul byl připevněn na jednoho z členů HZS a byl tak vystaven teplotnímu zatížení vlivem přítomného požáru, vlhkostnímu zatížení vlivem hašení požáru a pocení zasahujícího člena HZS a mechanickému namáhání vlivem výrazných pohybových aktivit zasahujícího člena HZS.

Vzhledem k tomu, že byl sensorový modul umístěn pod žáruvzdorným oděvem zasahujícího člena HZS, nebyl přímo vystaven vysokým teplotám požáru. Avšak i navzdory ochraně před přímým žářem se teplota v okolí sensorového modulu během zásahu značně zvýšila, a to až k hodnotě 45 °C.

Odezva sensorového modulu byla zvýšením teploty ovlivněna, konkrétně střední hodnota stejnosměrné složky vzorkovaného signálu ze zesilovacího obvodu. Vlivem rostoucí teploty docházelo k jejímu zvyšování, čímž se získávaný signál posouval k horní hranici rozsahu AD převodníku, viz Obr. 55. Na vzorkovaném signálu na Obr. 55 jsou taktéž pozorovatelné pulzy způsobené přirozeným radiačním pozadím, které byl však detektor schopen zaznamenávat i při zvýšené teplotě.



Obr. 55: Zaznamenaný vzorkovaný signál ze zesilovacího obvodu sensorového modulu; zachycena postupná změna teploty z 38,1 °C na 43,7 °C.

Relativní vlhkost vzduchu v okolí sensorového modulu, jenž se vlivem hašení požáru vodou a pocení zasahujícího člena HZS velmi rychle vyšplhala na hodnotu 100 %, neměla na odezvu sensorového modulu žádný vliv. Důvodem bylo důkladné zapouzdrění sensorového modulu krabičkou s vysokým stupněm krytí. Stejně tak nemělo na provoz sensorového modulu jeho mechanické namáhání a byl tak provozuschopný po celou dobu zásahu.

Kromě odolnosti vůči ztíženým podmínkám během provozu v medicínském dohledovém systému byla zároveň ověřena jeho energetická úspornost. Proudový odběr sensorového modulu při maximální taktovací frekvenci 120 MHz řídicího mikrokontroléru se pohyboval kolem 72 mA při napájecím napětí 3,7 V, kdy nejvyšší spotřebu způsoboval právě řídicí mikrokontrolér. Spotřeba samotné detekční fotodiody a zesilovacího obvodu byla kolem 800 μ A. S napájecím akumulátorem o kapacitě 1050 mAh byl sensorový modul schopen nepřetržitého provozu po dobu 10 hodin.

5 Diskuze

Funkční vzorek sensorového modulu detekce ionizujícího záření, jenž byl v rámci této práce navržen a realizován, je na základě jeho kalibrace schopen spolehlivé detekce ionizujícího záření, určení dávkového příkonu a včasného upozornění na přítomnost nebezpečné úrovně ionizujícího záření. Na základě ověření funkčního vzorku v rámci bezdrátového dohledového systému FlexiGuard byla potvrzena jeho připravenost na použití a integraci do bezdrátových dohledových systémů, zejména z důvodu jeho nízké spotřeby energie, kompaktních rozměrů a odolnosti vůči ztíženým podmínkám.

Funkční vzorek díky použitému principu detekce radiace schopen kromě počtu dopadajících částic ionizujícího záření rozlišovat mezi jejich energiemi a díky tomu poskytnout přesnější informaci o detekovaném ionizujícím záření, avšak v průběhu kalibrace v SÚJCHBO byl zjištěn nedostatek v návrhu firmwaru řídicího kontroléru. Na záznamu vzorkovaného signálu z kalibračního měření zářičů ^{60}Co a ^{137}Cs , které jsou v příloze 5 (A, B), je zřetelná zvyšující se amplituda jednotlivých napěťových pulzů, která je způsobena metodou kalibračního měření - tedy postupným zmenšováním vzdálenosti mezi zářičem a detektorem a s tím souvisejícím zvyšováním dávkového příkonu. V důsledku zvyšujícího se celkového počtu částic dopadajících na detektor je tak zvýšen i počet částic s vysokou energií, které sensorový modul detekuje a tím pádem se tak zvyšuje i amplituda detekovaných pulzů. Průměrná amplituda detekovaných pulzů za jednotku času získaná pomocí vyhodnocovacího algoritmu firmwaru však s klesající vzdáleností mezi zářičem a detektorem klesá, ačkoli by tomu mělo být přesně naopak. Příčinou této chyby je algoritmus pro vyhodnocení signálu ze zesilovacího obvodu, jenž pravidelně určuje střední hodnotu jeho stejnosměrné složky pro filtraci šumu, prahování, detekci pulzů a určení jejich amplitudy. Při detekci nízkého počtu pulzů se tento nedostatek neprojeví a vypočítaná střední hodnota tak skutečně odpovídá střední hodnotě stejnosměrné složky analogového signálu ze zesilovacího obvodu. S rostoucím počtem pulzů v tomto signálu však jejich vlivem dochází ke zkreslení vypočítané střední hodnoty, což má za následek i zkreslení výpočtu amplitudy detekovaných pulzů.

Pro odstranění tohoto nedostatku vyhodnocovacího algoritmu je zapotřebí upravit způsob určení střední hodnoty stejnosměrné složky signálu, a to tak, aby její výpočet proběhl jednorázově při spuštění sensorového modulu a bez přítomnosti ionizujícího záření.

Se střední hodnotou stejnosměrné složky tohoto signálu souvisí i její teplotní závislost, která byla zjištěna během ověřování odolnosti sensorového modulu vůči ztíženým podmínkám ve výcvikovém polygonu HZS Zbiroh. Bylo zaznamenáno, že s rostoucí teplotou okolního prostředí dochází ke zvyšování i střední hodnoty. Důvodem je obecná teplotní závislost polovodičových prvků použitých v sensorovém modulu, zejména pak zesilovacího obvodu. Ačkoli vlivem růstu střední hodnoty stejnosměrné složky signálu nedošlo k potlačení pulzů vznikajících při detekci částice ionizujícího záření, je zapotřebí vliv teploty vhodně kompenzovat. Možným řešením je integrace teplotního čidla do sensorového modulu, které by poskytovalo průběžné informace o okolní teplotě. Podle nich by pak byla střední hodnota stejnosměrné složky patřičně kompenzována, avšak na základě předchozího zjištění charakteru závislosti těchto veličin.

Během měření ve výcvikovém polygonu HZS Zbiroh byl rovněž zjištěn příkon sensorového modulu, jenž se pohyboval kolem 260 mW. Příčinou této relativně vysoké spotřeby je vysoký takt řídicího mikrokontroléru, který byl z důvodů vývoje a ladění nastaven pevně na 120 MHz. Empiricky bylo totiž zjištěno, že s každým zvýšením taktovací frekvence použitého mikrokontroléru o 1 MHz dojde ke zvýšení proudového odběru o 0,5 mA. Při taktovací frekvenci 120 MHz tak činí proudový odběr samotného mikrokontroléru kolem 60 mA. Proudový odběr periferních obvodů sensorového modulu je tak okolo 12 mA, přičemž odběr zesilovacího obvodu s detekční fotodiodou tvoří méně než desetinu této hodnoty.

Pro snížení celkové spotřeby sensorového modulu je tak zapotřebí snížit zejména spotřebu řídicího mikrokontroléru snížením jeho taktovací frekvence. Při snižování taktu mikrokontroléru je však potřeba provádět průběžné ladění jeho firmwaru a nalézt tak nejnižší taktovací frekvenci, při kterém není narušen běh firmwaru a zároveň je dosažena nejnižší možná spotřeba mikrokontroléru.

Při ověřování základních funkcí sensorového modulu pomocí osciloskopu byla zjištěna přítomnost šumu v signálu. Ta může být kromě přítomného temného proudu detekční fotodiody způsobena i použitým 12V spínaným napájecím zdrojem. Byl zvolen stejnosměrný regulátor s frekvencí spínání 155 kHz, která se ve výstupním napětí projeví i při řádném filtrování. Vzhledem k tomu, že je zesilovací obvod napájen z tohoto zdroje, mohla se tato frekvence promítnout i do jeho výstupního signálu. Ačkoli jsou prvky zesilovacího obvodu koncipovány jako aktivní pásmové propusti s

horní mezní frekvenci 10 kHz a tudíž by měly vliv rozkmitaného napájecího napětí s frekvencí 155 kHz odfiltrovat, nejedná se o ideální filtry se strmou frekvenční charakteristikou. Jejich frekvenční odezva je pozvolná a mohou tak propustit i vyšší než horní mezní frekvence.

Pro odstranění tohoto nedostatku byly navrženy testovací moduly pro výběr vhodnějšího napájecího spínaného zdroje pro zesilovací obvod a fotodiodu. Byla provedena rešerše v oblasti stejnosměrných spínaných zdrojů typu Step-Up, na jejíž základě byly zvoleny čtyři integrované obvody s vysokou frekvencí spínání v řádu jednotek MHz. Zároveň byla navržena schémata zapojení a desky plošných spojů testovacích modulů pro ověření jednotlivých spínaných zdrojů, které jsou rovněž v příloze 7 (A - C). Realizace takto navržených testovacích modulů a jejich ověření již nebylo provedeno v rámci této práce, očekává se však významné snížení šumu výstupního signálu zesilovacího obvodu z důvodu zvýšení frekvence spínání napájecího zdroje nad frekvenční rozsah použitých operačních zesilovačů.

Z hlediska konstrukce je funkční vzorek sensorového modulu koncipován jako jednotné zařízení, veškeré hardwarové komponenty tak sdílejí jednu DPS. Tento způsob návrhu může být více náchylný k zarušení analogového signálu ze zesilovacího obvodu potenciálními zdroji elektromagnetického rušení, kterými jsou mikrokontrolér a spínané napájecí zdroje. Souvisejícím nedostatkem je pak potřeba odstínění celého sensorového modulu před vnějším elektromagnetickým rušením, což komplikuje jeho zapouzdření a omezuje jeho konektivitu.

Řešením těchto nedostatků je návrh oddělených DPS pro analogovou část se zesilovacím obvodem a detekční fotodiodou a digitální část s mikrokontrolérem, napájecími zdroji a ostatními periferními obvody. To by umožňovalo samostatné odstínění analogové části, která by tak byla chráněna i před rušením z digitálních a spínaných komponent. Zároveň by bylo možné k odstínění DPS s analogovou částí použít některé z komerčně dostupných stínících pouzder, což bylo v případě dosavadního funkčního vzorku sensorového modulu znemožněno atypickým rozměrem jednotné DPS.

Navržený a realizovaný sensorový modul je schopen spolehlivé detekce ionizujícího záření a zároveň je integrovatelný do medicínského dohledového systému. Nabízí však v určitých oblastech prostor pro zlepšení, což bylo zjištěn v průběhu ověřování a kalibrace zhotoveného funkčního vzorku. Jedná se o nedostatky firmwaru řídicího mikrokontroléru, spotřeby mikrokontroléru, ve výběru napájecího zdroje, teplotní závislosti a konstrukčního uspořádání. Způsoby jejich odstranění byly nastíněny výše a ve všech případech se jedná o realizovatelná řešení, jejichž implementace však nebyla cílem této práce.

Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh, realizace a ověření funkce detektoru ionizujícího záření pro medicínské dohledové systémy.

Nejprve byla provedena analýza současných principů detekce ionizujícího záření, na jejímž základě byla zvolena metoda detekce prostřednictvím křemíkové PIN fotodiody. Následně byl navržen koncept sensorového modulu detekce ionizujícího záření využívajícího zvoleného principu detekce. Pro ověření a ladění dílčích komponent navrženého konceptu bylo vytvořeno několik testovacích modulů, na kterých byl založen následný vývoj vlastního sensorového modulu detekce ionizujícího záření.

Bylo navrženo schéma zapojení jednotlivých komponent a deska plošných spojů sensorového modulu ve vývojovém prostředí EAGLE s ohledem na omezení daná zvoleným principem detekce ionizujícího záření. Na základě těchto návrhů byly vytvořeny technologické podklady pro zhotovení desky plošných spojů, která byla následně ručně osazena veškerými součástkami.

Pro oživení vzniklého sensorového modulu byl navržen firmware řídicího mikrokontroléru v programovacím jazyce C++ s využitím objektově orientovaného programování. Úkolem vytvořeného firmwaru je sběr, zpracování a vyhodnocení signálu získaného z detekční fotodiody pro určení úrovně přítomného ionizujícího záření.

Po ověření základních funkcí vzniklého funkčního vzorku sensorového modulu byla provedena jeho kalibrace ve Státním úřadě jaderné, chemické a biologické ochrany. Ta prokázala silně lineární závislost mezi odezvou sensorového modulu a referenční hodnotou dávkového příkonu. Byla tak ověřena schopnost korektní detekce ionizujícího záření vzniklého funkčního vzorku sensorového modulu.

Jeho funkčnost v rámci medicínského dohledového systému byla ověřena provedením sady pilotních měření ve výcvikovém polygonu hasičského záchranného sboru. Funkční vzorek byl zkušebně integrován do bezdrátového dohledového systému FlexiGuard, vystaven ztíženým podmínkám při simulaci hasičského zásahu a tím byla ověřena jeho odolnost.

Všechny zadané cíle této práce tak byly splněny. Vzniklý funkční vzorek sensorového modulu splňuje na základě provedené kalibrace a ověření v rámci medicínského dohledového systému všechny na něj kladené požadavky. Nad rámec diplomové práce se počítá s některými modifikacemi sensorového modulu v oblasti firmwaru i hardwaru, které umožní další rozšíření jeho vlastností z hlediska detekce ionizujícího záření a provozních vlastností.

Reference

- [1] LI, Shiping, Xiufeng XU, Hongrui CAO, Shibiao TANG, Baogang DING a Zejie YIN. A novel compact real time radiation detector. *Applied Radiation and Isotopes* [online]. 2012, 70(8), 1667-1670 [cit. 2016-04-19]. DOI: 10.1016/j.apradiso.2012.05.010. ISSN 09698043. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0969804312003314>
- [2] BECKER, E.M. a A.T. FARSONI. Wireless, low-cost, FPGA-based miniature gamma ray spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2014, 761, 99-104 [cit. 2016-03-17]. DOI: 10.1016/j.nima.2014.05.096. ISSN 01689002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900214006494>
- [3] VESELÝ, Tomáš. *Návrh, realizace a experimentální ověření osobní biotelemetrické monitorovací jednotky pro členy IZS*. Kladno, 2012. Diplomová práce. ČVUT FBMI. Vedoucí práce Ing. Pavel Smrčka.
- [4] *Tracerco PED-IS: Intrinsically Safe Personal Electronic Dosimeter* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: http://www.laurussystems.com/products/products_pdf/LS-PED-Intrinsically-safe-radiation-dosimeter.pdf
- [5] *PM1610; PM1610A; PM1610-01; PM1610A-01: CONTINUOUS AND PULSE X-RAY AND GAMMA RADIATION PERSONAL DOSIMETERS* [online]. [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: http://www.polimaster.com/files/downloads/PM1610_01_A_A01_brochure_eng.pdf
- [6] *RADOS RAD-60: Personal Alarm Dosimeter* [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z: http://www.laurussystems.com/products/products_pdf/Dosimeters/RAD60_CATALOG.pdf
- [7] *RDS-30: Radiation Survey Meter* [online]. [cit. 2016-04-11]. Dostupné z: http://www.landauernordic.se/_resources/File/RDS30.pdf

- [8] GHOSH, Saibal K, Suryadip CHAKRABORTY, Anagha JAMTHE a Dharma P. AGRAWAL. Comprehensive monitoring of firefighters by a Wireless Body Area Sensor Network. In: *2013 Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)* [online]. IEEE, 2013, s. 1-6 [cit. 2016-03-01]. DOI: 10.1109/WOCN.2013.6616245. ISBN 978-1-4673-5999-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6616245>
- [9] YU BU, WEI WU, XIANYI ZENG, Lidovic KOEHL a Guillaume TARTARE. A wearable intelligent system for real time monitoring firefighter's physiological state and predicting dangers. In: *2015 IEEE 16th International Conference on Communication Technology (ICCT)*[online]. IEEE, 2015, s. 429-432 [cit. 2016-04-02]. DOI: 10.1109/ICCT.2015.7399874. ISBN 978-1-4673-7004-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7399874>
- [10] ŠVEC, Jiří. *Radioaktivita a ionizující záření: doplňující učební text pro předměty Bakalářská fyzika, Aplikovaná fyzika, Ochrana před zářením*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005. ISBN 8086634620.
- [11] SMITH, Hastings A. a Marcia LUCAS. Gamma-Ray Detectors. *Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials* [online]. , 46-64 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <https://www.physics.rutgers.edu/grad/506/detectors-00326398.pdf>
- [12] *An Introduction to the Silicon Photomultiplier* [online]. Sense Light [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20-%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>
- [13] TALPALARIU, Cornel, Jeni TALPALARIU, Corina MATEI, et al. Radiations monitoring system with miniature radiometers based on semiconductor detectors. In: *2010 IEEE 16th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* [online]. IEEE, 2010, s. 229-232 [cit. 2016-04-06]. DOI: 10.1109/SIITME.2010.5653121. ISBN 978-1-4244-8123-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5653121>
- [14] *Detection of X-ray and Gamma-ray Photons Using Silicon Diodes* [online]. Detection Technology, Inc., Micropolis, Finland [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://lens.unifi.it/ew/dwl.php?dwl..mtyp=application/pdf>
- [15] EMIRHAN, Erhan a Cenap S. OZBEN. *PIN Photodiode Based X and γ Ray Detectors* [online]. Istanbul, Turkey: Istanbul Technical University, Faculty of Science and Letters, Department of Physics [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://www.sciencemadness.org/talk/files.php?pid=313842&aid=28433>

- [16] SLYSZ, W., L. RYC a M. WEGRZECKI. High-resistivity silicon p-i-n diodes for detection of ionising radiation. In: *ASDAM 2000. Conference Proceedings. Third International EuroConference on Advanced Semiconductor Devices and Microsystems (Cat. No.00EX386)* [online]. IEEE, 2000, s. 461-464 [cit. 2016-04-27]. DOI: 10.1109/ASDAM.2000.889545. ISBN 0-7803-5939-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=889545>
- [17] RAKO, Paul. *Photodiode Amplifiers: Changing Light to Electricity* [online]. National Semiconductor [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://in.ncu.edu.tw/ncume_ee/datasheet/photodiode_amp0-nationalsemicon.pdf
- [18] ABRAMOVITCH, Joshua. *Development of a Silicon PIN Diode X-Ray Detector* [online]. Southern Methodist University, 2014 [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: http://digitalrepository.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1031&context=upjournal_research
- [19] KIM, Han Soo, Manhee JEONG, Young Soo KIM, Jang Ho HA a Seong Yeon CHO. Effect of temperature on silicon PIN photodiode radiation detectors. *Journal of the Korean Physical Society* [online]. 2014, 64(5), 651-654 [cit. 2016-04-05]. DOI: 10.3938/jkps.64.651. ISSN 0374-4884. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.3938/jkps.64.651>
- [20] *BPW34, BPW34S: Silicon PIN Photodiode* [online PDF]. [cit. 2016-04-04]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>
- [21] BRISEBOIS, Glen. *Low Noise Amplifiers for Small and Large Area Photodiodes* [online]. Linear Technology, 2006 [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/design-note/dn399f.pdf>
- [22] BELZA, Jaroslav. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-060-1.
- [23] *Characteristics and use of Charge Amplifier: Technical Information* [online]. Hamamatsu Photonics, Solid State Division [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/charge_amp_kacc9001e.pdf
- [24] WANG, Tony a Barry ERHMAN. *Compensate Transimpedance Amplifiers Intuitively: High-Performance Linear Products*[online]. Texas Instruments, 1993 [cit. 2016-04-13].
- [25] *TLC272, TLC272A, TLC272B, TLC272Y, TLC277: LinCMOS PRECISION DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS* [online PDF]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/tlc272.pdf>

- [26] *Improved Radiation Meter: Counter for alpha, beta and gamma radiation* [online]. Elektor, 2011, 2011(11) [cit. 2016-04-28]. ISSN 1757-0875. Dostupné z: <https://www.elektormagazine.com/magazine/elektor-201111/19753>
- [27] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [28] *Silicon Photodiodes and Charge Sensitive Amplifiers for Scintillation Counting and High Energy Physics* [Catalog #KOTH0002E02]. Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, 1993 [cit. 2016-04-20].
- [29] SCHILLAGALIES, Marc Oliver. *SILICON PHOTODIODES FOR GAMMA RAY DETECTION* [online]. First Sensor, 2011 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/gamma-ray-detection.pdf>
- [30] *X-Ray Detectors* [online]. Hamamatsu Photonics, Solid State Division [cit. 2016-04-27]. Dostupné z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e09_handbook_xray_detectors.pdf
- [31] *First Sensor PIN PD Data Sheet: Part Description PS100-7 SMD* [online PDF]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/ps100-7-smd-501317-501288-fd_0.pdf
- [32] Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. *NIST Physical Measurement Laboratory* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.nist.gov/pml/data/xraycoef/index.cfm>
- [33] *X-Ray attenuation & absorption calculator* [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: http://web-docs.gsi.de/~stoe_exp/web_programs/x_ray_absorption/index.php
- [34] *LPC1759/58/56/54/52/51: Product data sheet* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LPC1759_58_56_54_52_51.pdf
- [35] TPS6300, TPS63001, TPS63002: TPS6300x High-Efficient Single Inductor Buck-Boost Converter With 1.8-A Switches [online PDF]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63000.pdf>
- [36] *LT1301: Micropower High Efficiency 5V/12V Step-Up DC/DC Converter for Flash Memory* [online PDF]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/lt1301.pdf>

- [37] *First Sensor PIN PD Data Sheet: Part Description X100-7 SMD* [online PDF]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.first-sensor.com/cms/upload/datasheets/X100-7_SMD_501401.pdf
- [38] *BF545A; BF545B; BF545C: Product data sheet* [online PDF]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BF545A_BF545B_BF545C.pdf
- [39] TPS3820, TPS3823, TPS3823A, TPS3824, TPS3825, TPS3828: TPS382x Voltage Monitor With Watchdog Timer [online PDF]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps3824-30.pdf>
- [40] *CMOS VOLTAGE DETECTOR IC with Delay Time Circuit: BD52XXG/FVE; BD53XXG/FVE* [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?id=187324&part-number=BD5231
- [41] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [42] *Vyhláška č. 307/2002 Sb., o radiační ochraně, ze dne 13. 6. 2002*
- [43] *OKW Soft-Case* [online]. [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: <http://datasheet.octopart.com/A9150118-OKW-Enclosures-datasheet-5348000.pdf>
- [44] *AP2 RF Transceiver Module* [online]. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: <https://www.thisisant.com/resources/ant-ap2-transceiver-module-datasheet/>
- [45] LTC4054-4.2/LTC4054X4.2: Standalone Linear Li-Ion Battery Charger with Thermal Regulation in ThinSOT [online PDF]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/405442xf.pdf>
- [46] *FH 40 G/GL Digital Survey Meter, FHT 6020 Display Unit* [online]. LAURUS Systems, Inc. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.laurussystems.com/products/products_pdf/LS_thermo_FH-40.pdf

Seznam obrázků

Obr. 1: Graf závislosti počtu detekovaných částic na vzdálenosti senzoru od zdroje [6].	5
Obr. 2: Zapouzdřený funkční vzorek detektoru ionizujícího záření s Geiger-Müllerovým čítačem (vpravo) [1].	6
Obr. 3: Energetické spektrum ^{137}Cs získané z funkčního vzorku spektrometru MiniSpec [2].	9
Obr. 4: Zhotovený funkční vzorek spektrometru pro ionizující záření MiniSpec [2].	10
Obr. 5: Záznam napěťového pulzu získaného sensorovým modulem při detekci částice [13].	13
Obr. 6: Napěťový signál ze sensorového modulu při ozáření zářičem ^{60}Co [18].	14
Obr. 7: Napěťový pulz ze sensorového modulu indikující absorpci částice ze zdroje ^{60}Co [18].	15
Obr. 8: Závislost výstupního napětí detektoru (Voltage) na vzdálenosti od zdroje záření ^{60}Co (Distance from Source) [18].	15
Obr. 9: Naměřené spektrum zářiče ^{133}Ba fotodiodou o rozměrech 3×3 mm pro teploty 24,6 °C (černá křivka), 14,4 °C (červená křivka), 4,2 °C (zelená křivka) a -4,0 °C (modrá křivka) [19].	16
Obr. 10: Naměřené spektrum zářiče ^{133}Ba fotodiodou o rozměrech 5×5 mm pro teploty 24,1 °C (černá křivka), 15,5 °C (červená křivka), 3,5 °C (zelená křivka) a -6,7 °C (modrá křivka) [19].	17
Obr. 11: Naměřené spektrum zářiče ^{133}Ba fotodiodou o rozměrech 10×10 mm pro teploty 24,7 °C (černá křivka), 14,7 °C (červená křivka), 4,2 °C (zelená křivka) a -7,4 °C (modrá křivka) [19].	17
Obr. 12: Blokové schéma ilustrující uspořádání sensorické jednotky bezdrátového dohledového systému.	21
Obr. 13: Blokové schéma ilustrující uspořádání sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření.	22
Obr. 14: Schéma zapojení testovacího modulu pro ověření detekce záření pomocí fotodiody [18][17][21].	24
Obr. 15: Frekvenční odezva aktivního filtru prvního řádu typu horní propust - zesílení (Voltage Gain) v závislosti na frekvenci zesilovaného signálu (Frequency) [21].	27
Obr. 17: Zdroj slabého ionizujícího záření použitý pro ozařování testovacích sensorových modulů - sklo obarvené uranovým barvivem.	29
Obr. 18: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření.	29
Obr. 19: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.	29
Obr. 20: Schéma zapojení testovacího modulu s modifikovaným zesilovacím obvodem [26]-upraveno.	30
Obr. 21: Zhotovený testovací sensorový modul pro ladění zesilovacího obvodu.	32

Obr. 22: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu bez přítomnosti zdroje ionizujícího záření.	33
Obr. 23: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.....	33
Obr. 24: Závislost pravděpodobnosti interakce částice ionizujícího záření (Interaction probability) a energie dané částice (X-ray energy) pro různé tloušťky křemíkového substrátu[30]	35
Obr. 25: Závislost kapacitance PN přechodu PIN fotodiody (Diode Capacitance) BPW-34 na velikosti závěrného napětí (Reverse Voltage) [20].....	36
Obr. 26: Závislost temného proudu (Dark Current) na velikosti závěrného napětí (Reverse Bias) pro fotodiodu PS-100 [31].	36
Obr. 27: Závislost temného proudu (Dark Current) na okolní teplotě (Ambient Temperature) pro fotodiodu BPW-34 [20].	37
<i>Obr. 28: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu osazeného PIN fotodiodou BPW-34 v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.</i>	<i>39</i>
Obr. 29: Zaznamenaný výstupní signál z testovacího sensorového modulu osazeného PIN fotodiodou PS-100-7 v přítomnosti zdroje ionizujícího záření.	39
Obr. 30: Pravděpodobnost detekce částice fotodiodou X-100-7 v závislosti na energii částice [37].....	44
Obr. 31: Blokové schéma zapojení a vzájemných vztahů hlavních komponent sensorového modulu.	46
<i>Obr. 32: Rozmístění funkčních prvků sensorového modulu v rámci horní strany DPS.</i>	<i>48</i>
Obr. 33: Rozmístění funkčních prvků sensorového modulu v rámci spodní strany DPS.	48
Obr. 34: Zhotovená DPS neosazená součástkami - horní strana.	50
Obr. 35: Zhotovená DPS neosazená součástkami - spodní strana.	50
Obr. 36: Zkompletovaný sensorový modul osazený veškerými součástkami - horní strana.	51
Obr. 37: Zkompletovaný sensorový modul osazený veškerými součástkami - spodní strana.	51
Obr. 38: Zkompletovaný sensorový modul odstíněný hliníkovou folií.....	52
Obr. 39: Blokové schéma hierarchického uspořádání vrstev firmwaru.....	54
Obr. 40: Proces zpracování a analýzy vzorkovaného signálu, určení počtu pulzů a jejich průměrné amplitudy za časový úsek 100 ms.	57
Obr. 41: Programátor J-Link pro nahrávání zkompileovaného firmwaru do mikrokontroléru.	59
Obr. 42: UART-USB převodník FTDI FT232RL.	60
Obr. 43: Měřicí sestava pro kalibraci funkčního vzorku sensorového modulu.....	64
Obr. 44: Výcvikový polygon FOK HZS Zbiroh.....	67

Obr. 45: Zkompleťovaná senzoričká jednotka s funkčním vzorkem senzoričho modulu detekce ionizujícího záření, bezdrtovm modulem a napájecím akumulátorem.	68
Obr. 46: len HZS vybaven senzoričmi jednotkami detekce ionizujícího záření, teploty a vlhkosti a vysílací jednotky pro bezdrátovou komunikaci s centln jednotkou.	69
Obr. 47: Výstupní signál zesilovcho obvodu funkčního vzorku bez ptomenosti zdroje ionizujícího záření.....	70
Obr. 48: Výstupní signál zesilovcho obvodu funkčního vzorku po ploen uranového skla.	71
Obr. 49: Napeov pk výstupního signálu zpsoben absorpcí částice ionizujícího záření fotodiodou.	71
Obr. 50: Vzorkovan signál z AD převodníku v ptomenosti zdroje ionizujícího záření.	72
Obr. 51: Detail vzorkovaného signálu z AD převodníku - pk p absorpci částice fotodiodou.....	72
Obr. 52: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na referenční hodnotě ekvivalentního dávkového pikonu H pro ^{137}Cs	77
Obr. 53: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na referenční hodnotě ekvivalentního dávkového pikonu H pro ^{60}Co	77
Obr. 54: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na vzdálenosti l mezi zričem a detektorem pro ^{137}Cs	78
Obr. 55: Závislost počtu pulzů N detekovaných funkčním vzorkem za jednu sekundu na vzdálenosti l mezi zričem a detektorem pro ^{60}Co	78
Obr. 56: Zaznamenan vzorkovan signál ze zesilovcho obvodu senzoričho modulu; zachycena postupn změna teploty z 38, 1 °C na 43,7 °C.....	80

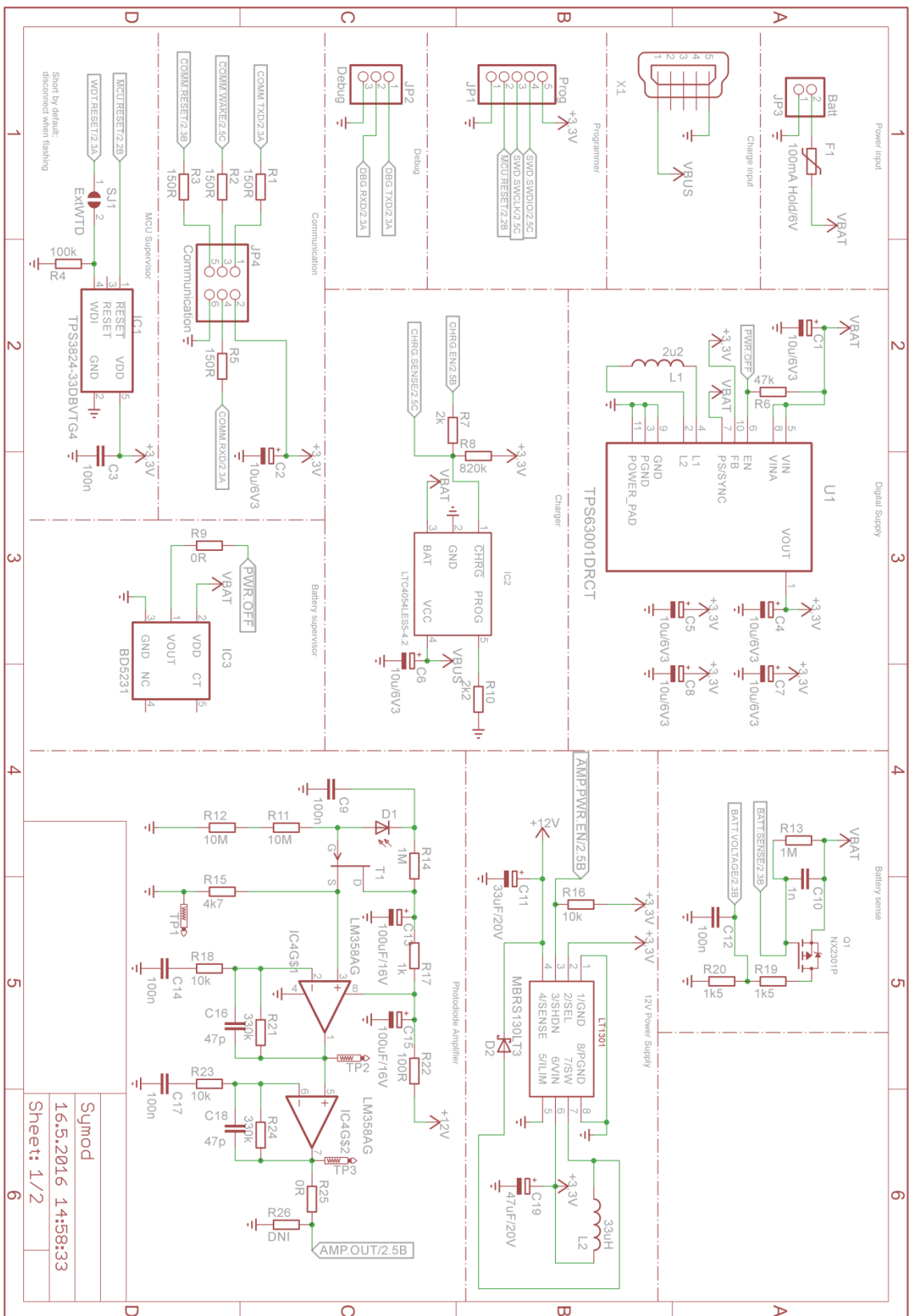
Seznam tabulek

Tab. 1: Výběr parametrů použitého mikrokontroléru LPC1759 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [34].....	42
Tab. 2: Výběr parametrů stejnosměrného měniče TPS63001DRCT relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [35].	43
Tab. 3: Výběr parametrů stejnosměrného měniče LT1301 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [36].....	43
Tab. 4: Výběr parametrů PIN fotodiody X-100-7 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [37].....	44
<i>Tab. 5: Výběr parametrů operačního zesilovače TLC-272 relevantních k návrhu sensorového modulu pro detekci ionizujícího záření [25].....</i>	<i>45</i>
Tab. 6: Prahové hodnoty příkonu ekvivalentní dávky H ($\mu\text{Sv/h}$) pro jednotlivé stupně nebezpečí.	63
Tab. 7: <i>Parametry zdrojů ionizujícího záření použitých ke kalibraci funkčního vzorku.</i>	<i>63</i>
Tab. 8: Průměrné hodnoty počtu detekovaných píků a jejich průměrné amplitudy za časový úsek získané z 3 minutového záznamu výstupních dat funkčního vzorku s přiloženým uranovým sklem.	73
Tab. 9: Průměrné hodnoty počtu detekovaných píků a jejich průměrné amplitudy za časový úsek získané z 3 minutového záznamu výstupních dat funkčního vzorku bez přítomného zdroje ionizujícího záření.	73
Tab. 10: Naměřené referenční hodnoty ekvivalentního dávkového příkonu H ($\mu\text{Sv/h}$) a hodnoty získané z funkčního vzorku sensorového modulu: počet detekovaných pulzů za sekundu N (pulzy/s), směrodatná odchylka δ (pulzy/s) veličiny N, průměrná velikost detekovaných pulzů A_{ADC} (úroveň ADC) a průměrná amplituda detekovaných pulzů A (mV) pro jednotlivé vzdálenosti l (cm) mezi kalibračním zářičem ^{241}Am a detektorem.	75
Tab. 11: Naměřené referenční hodnoty H ($\mu\text{Sv/h}$) a hodnoty získané z funkčního vzorku sensorového modulu: N (pulzy/s), δ (pulzy/s), A_{ADC} (úroveň ADC) a A (mV) pro jednotlivé vzdálenosti l (cm) mezi kalibračním zářičem ^{137}Cs a detektorem.	75
Tab. 12: Naměřené referenční hodnoty H ($\mu\text{Sv/h}$) a hodnoty získané z funkčního vzorku sensorového modulu: N (pulzy/s), δ (pulzy/s), A_{ADC} (úroveň ADC) a A (mV) pro jednotlivé vzdálenosti l (cm) mezi kalibračním zářičem ^{60}Co a detektorem.	76

Seznam příloh

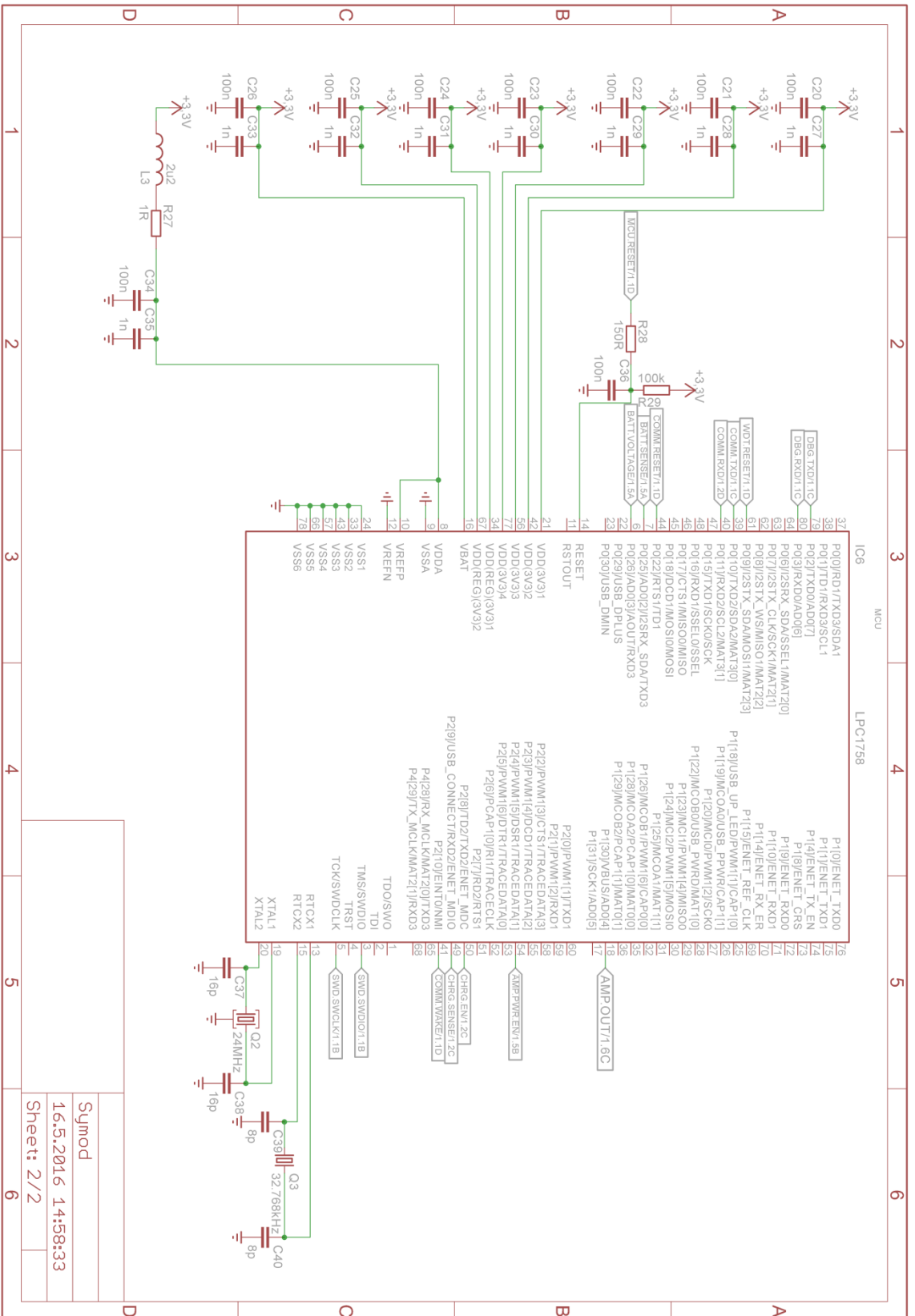
Příloha 1 (A, B).....	Schéma zapojení sensorového modulu
Příloha 2 (A - D)	Vodivé vrstvy DPS sensorového modulu
Příloha 3 (A, B).....	Potiskové vrstvy DPS sensorového modulu
Příloha 4.....	Zdrojový kód algoritmu pro zpracování signálu
Příloha 5 (A, B).....	Vzorkované signály z měření pro ^{137}Cs a ^{60}Co
Příloha 6.....	Kalibrační list pro sensorový modul Symod-rad-r67
Příloha 7 (A - C)	Schémata zapojení a vodivé vrstvy DPS pro testovacímoduly DC/DC měničů
Příloha 8.....	Seznam souborů na CD

Příloha 1A



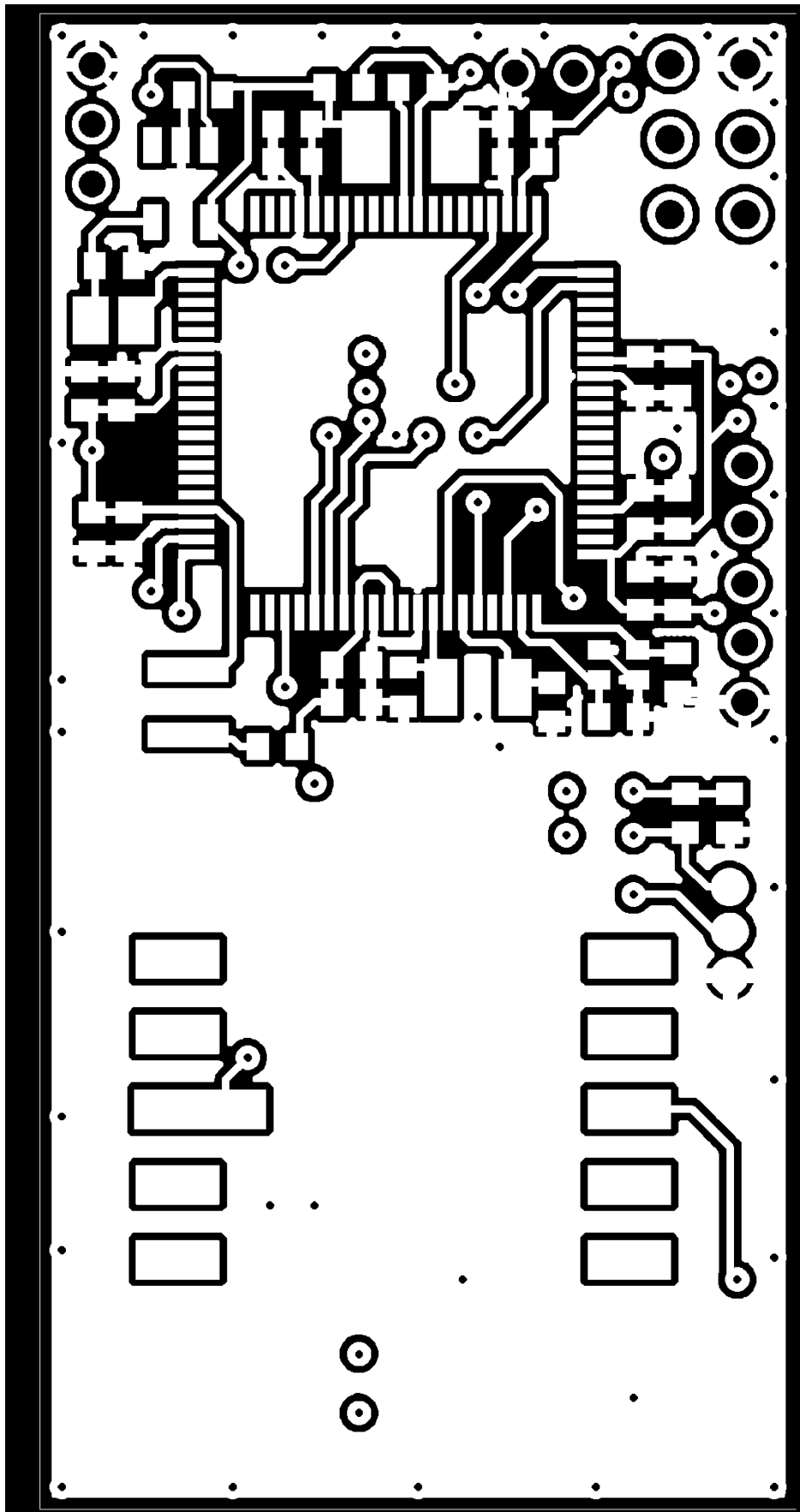
Symod
16.5.2016 14:58:33
Sheet: 1/2

Příloha 1B

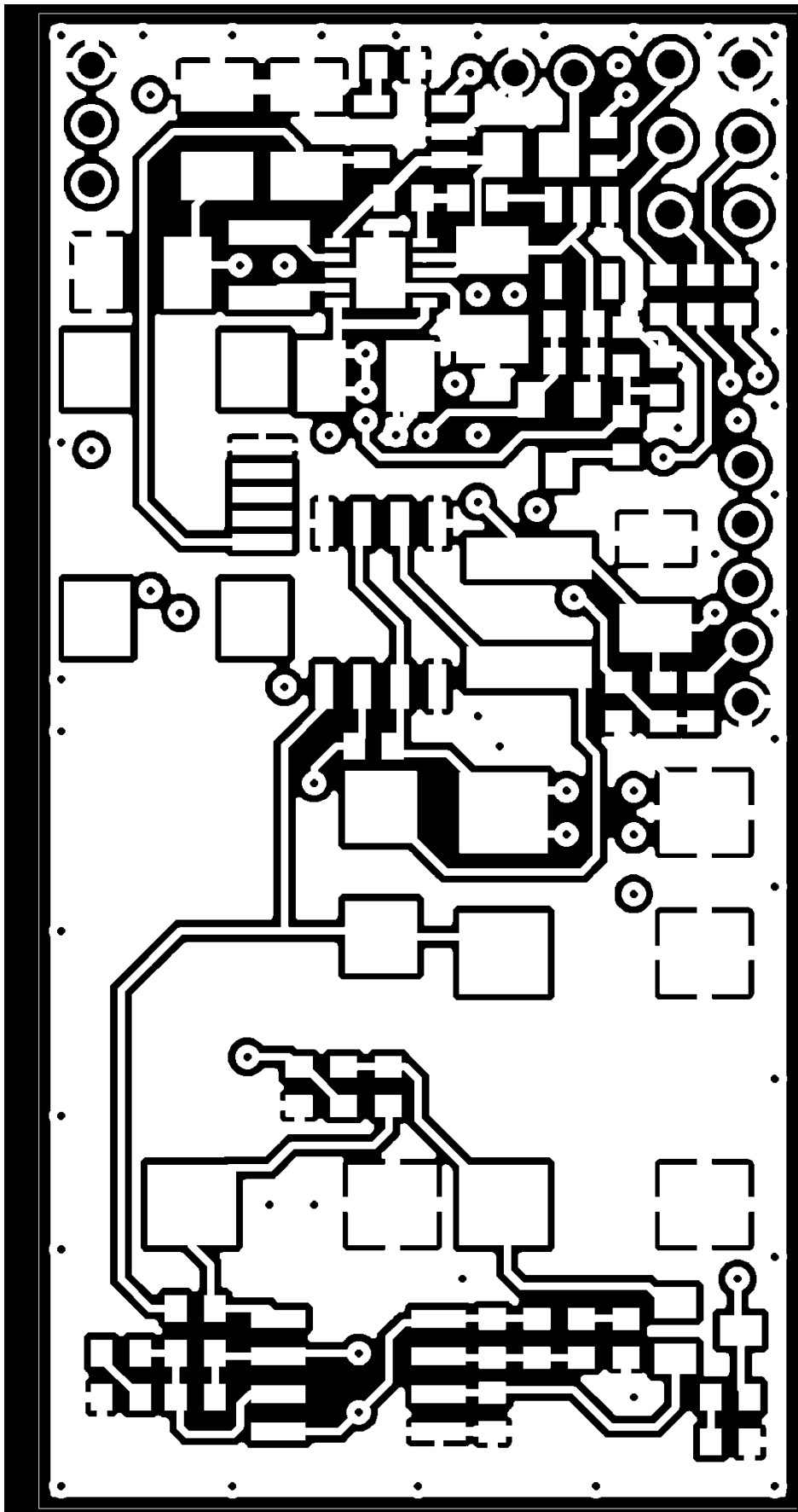


Symod
16.5.2016 14:58:33
Sheet: 2/2

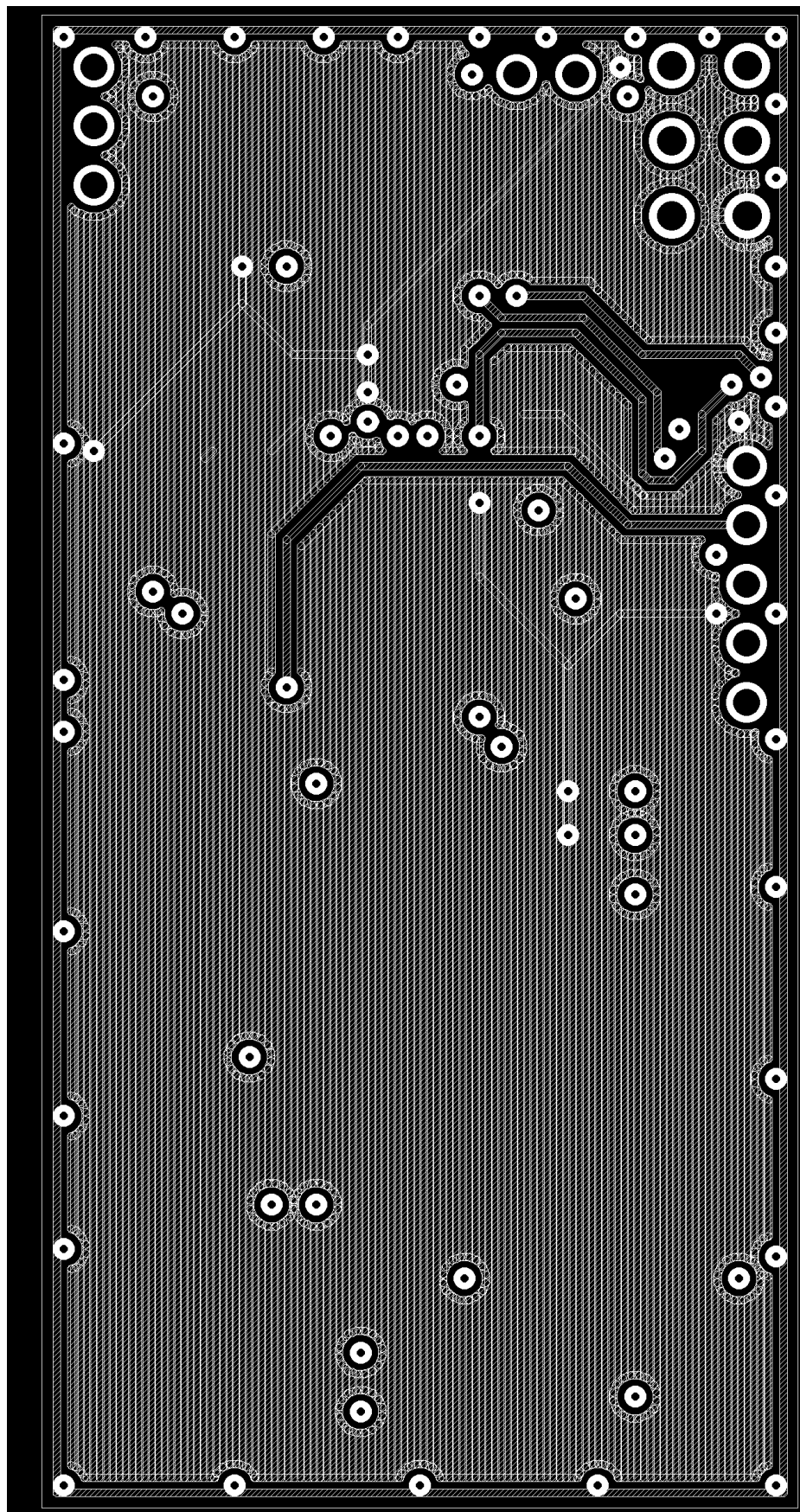
Příloha 2A



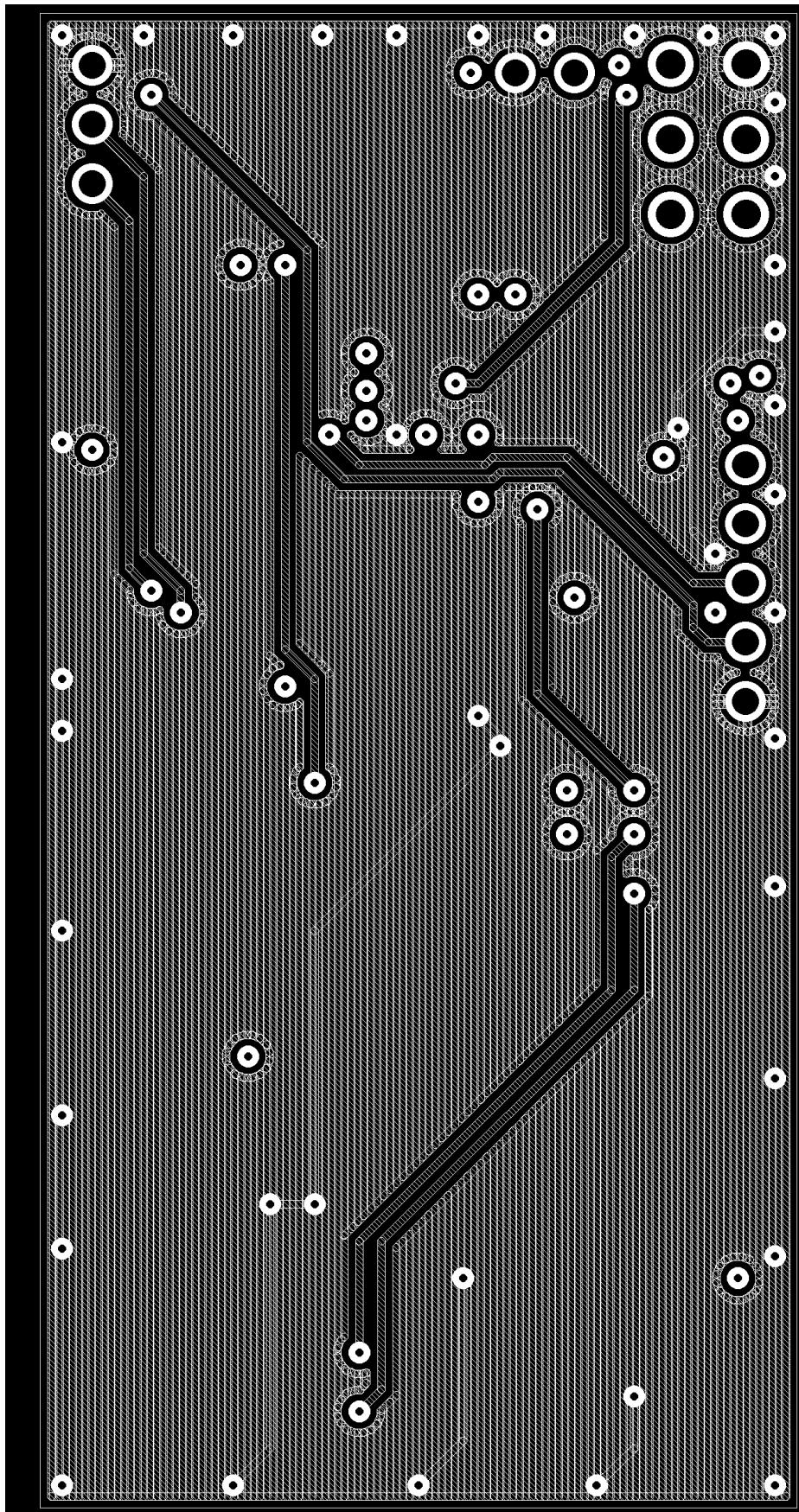
Příloha 2B



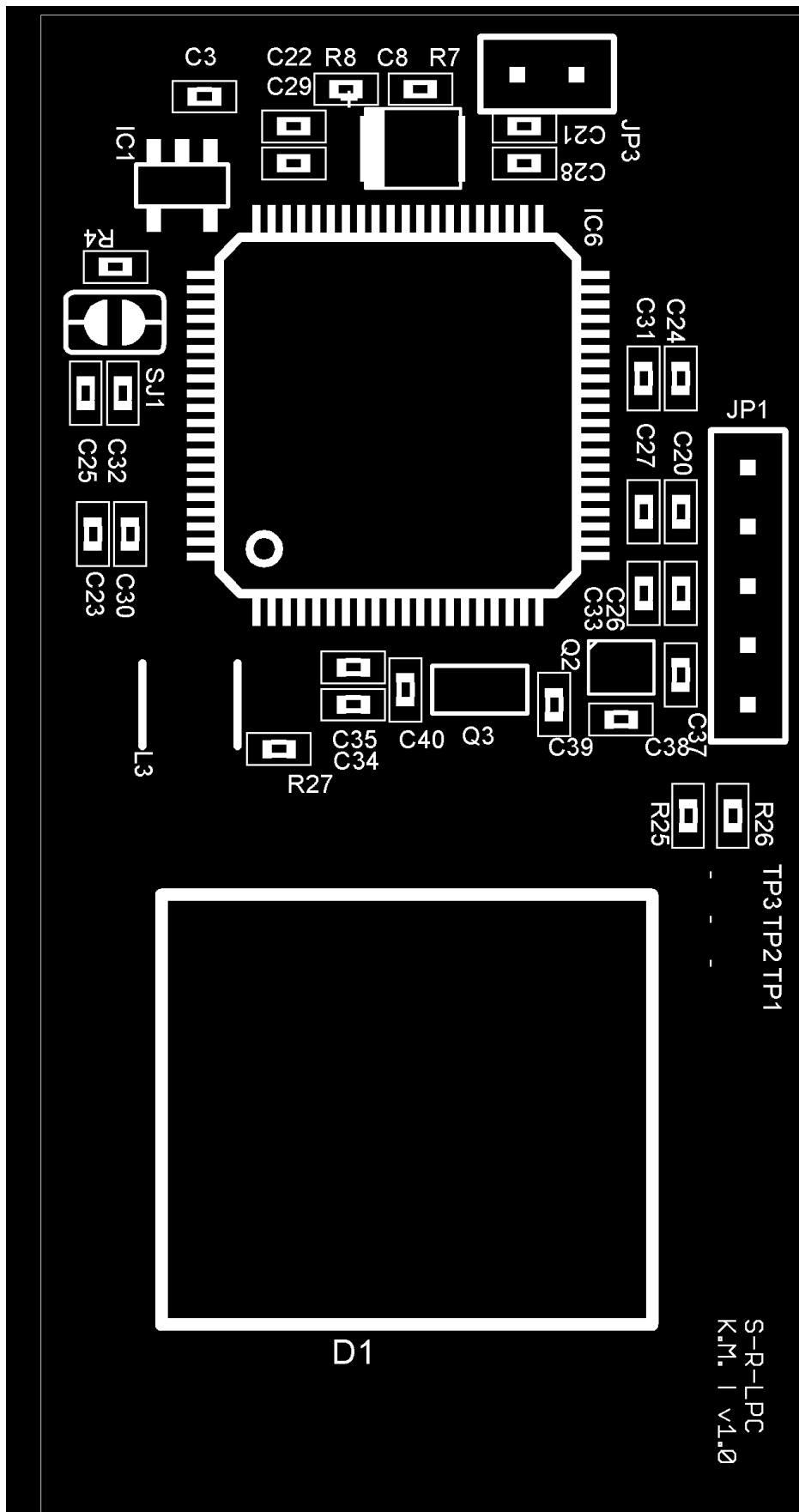
Příloha 2C



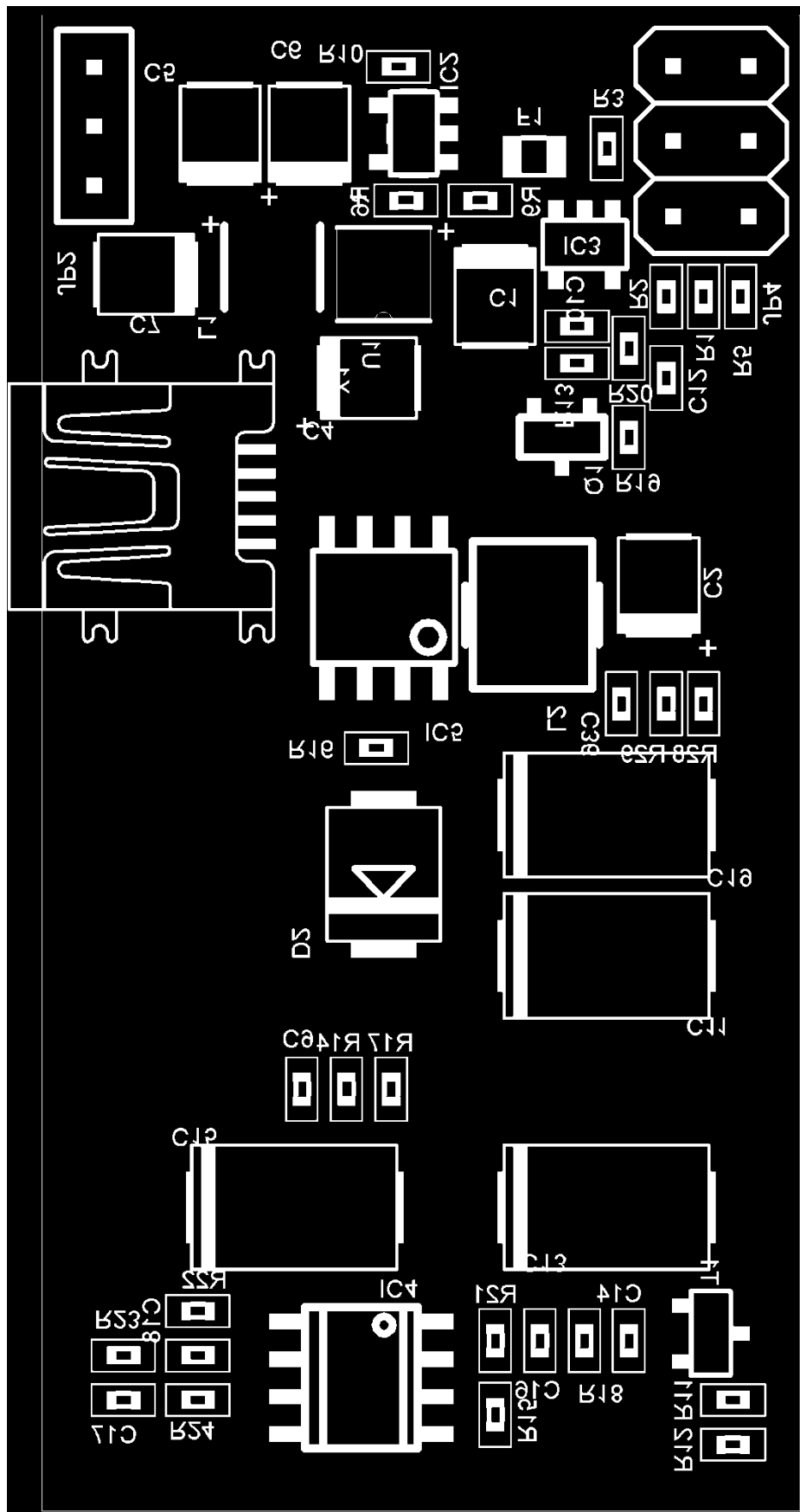
Příloha 2D



Příloha 3A



Příloha 3B



Příloha 4

```
try
{
    uint32_t sample = this->GetADCValue( Albertov::SymodDevice::Radiation::Configuration::GetSensorChannel() );

    //dump signal
    if ( enableSignal )
    {
        System::FixedSizeArray< uint8_t, 5 > bytes;

        //convert sample to byte array
        bytes[3] = '0' + sample % 10;
        sample = ( sample / 10 );

        bytes[2] = '0' + sample % 10;
        sample = ( sample / 10 );

        bytes[1] = '0' + sample % 10;
        sample = ( sample / 10 );

        bytes[0] = '0' + sample;
        bytes[4] = '\r';

        //dump array
        Albertov::SymodDevice::Radiation::Application::GetInstance().DebugBytes( bytes );
    }

    //process signal
    else
    {
        //put sample to buffer
        if ( signalBufferIndex < signalBufferSize )
        {
            signalBuffer[signalBufferIndex] = sample;
            signalBufferIndex++;
        }

        //buffer is full, get average, count peaks
        else if ( signalBufferIndex == signalBufferSize )
        {
            //get sum
            for ( uint16_t i = 0; i < signalBufferSize; i++ )
            {
                signalBufferAverage += signalBuffer[i];
            }

            //get average
            signalBufferAverage = signalBufferAverage / signalBufferSize;

            //calculate threshold
            pulseThreshold = signalBufferAverage * noisePercent;

            //remove average value from whole buffer
            for ( uint16_t i = 0; i < signalBufferSize; i++ )
            {
                signalBuffer[i] = signalBuffer[i] - signalBufferAverage;
            }

            //check whole buffer for pulses
            for ( uint16_t i = 0; i < signalBufferSize; i++ )
            {
                //sample bigger than noise = pulse detected
                if ( signalBuffer[i] > pulseThreshold )
                {
                    //sample bigger than previous sample and bigger than next sample = pulse peak, get pulse height
                    if ( ( signalBuffer[i] > signalBuffer[i - 1] ) && ( signalBuffer[i] > signalBuffer[i + 1] ) )
                    {
                        //increase pulse count
                        signalBufferPulseCount++;

                        //get height of current pulse
                        signalBufferPulseHeight = signalBuffer[i] - pulseThreshold;

                        //add height of current pulse to sum of heights of detected pulses
                        signalBufferPulseHeightAverage += signalBufferPulseHeight;
                    }
                }
            }

            //get average height of detected pulses
            signalBufferPulseHeightAverage = signalBufferPulseHeightAverage / signalBufferPulseCount;
        }
    }
}
```

```

//add pulse count and average height to 100 ms buffer
secondBuffer.Enqueue( System::Tuple< uint32_t, int32_t >( signalBufferPulseCount,
signalBufferPulseHeightAverage ) );

//add pulse count and average height to 1000 ms buffer
thirdBuffer.Enqueue( System::Tuple< uint32_t, int32_t >( signalBufferPulseCount,
signalBufferPulseHeightAverage ) );

//add pulse count and average height to 1000 ms buffer
fourthBuffer.Enqueue( System::Tuple< uint32_t, int32_t >( signalBufferPulseCount,
signalBufferPulseHeightAverage ) );

//reset signal average, buffer index, pulse count, average height of detected pulses
signalBufferAverage = 0;
signalBufferIndex = 0;
signalBufferPulseCount = 0;
signalBufferPulseHeightAverage = 0;

//reset signal buffer
for ( uint16_t i = 0; i < signalBufferSize; i++ )
{
    signalBuffer[i] = 0;
}

processedBuffers++;

if ( processedBuffers == 10 )
{
    uint32_t pulsesCount = 0;
    int32_t averageHeight = 0;

    auto lambda = System::LambdaFactory< void, const System::Tuple< uint32_t, int32_t >& >::Create( [&](
        const System::Tuple<uint32_t,int32_t>& tuple
    )
    {
        pulsesCount += tuple.Item1;
        averageHeight += tuple.Item2;
    } );

    System::StringBuilder builder( 256 );

    //get sum of counts per 100 ms,
    secondBuffer.ForEach( lambda );
    averageHeight /= pulsesCount;

    builder.Append( ';' );

    //add counts, average height per 100 ms
    builder.Append( pulsesCount ).Append( ';' );
    builder.Append( averageHeight ).Append( ';' );

    //get sum of counts per 1000 ms
    pulsesCount = 0;
    averageHeight = 0;
    thirdBuffer.ForEach( lambda );
    averageHeight /= pulsesCount;

    //add counts, average height per 1000 ms
    builder.Append( pulsesCount ).Append( ';' );
    builder.Append( averageHeight ).Append( ';' );

    //get sum of counts per 3 000 ms,
    pulsesCount = 0;
    averageHeight = 0;
    fourthBuffer.ForEach( lambda );
    averageHeight /= pulsesCount;

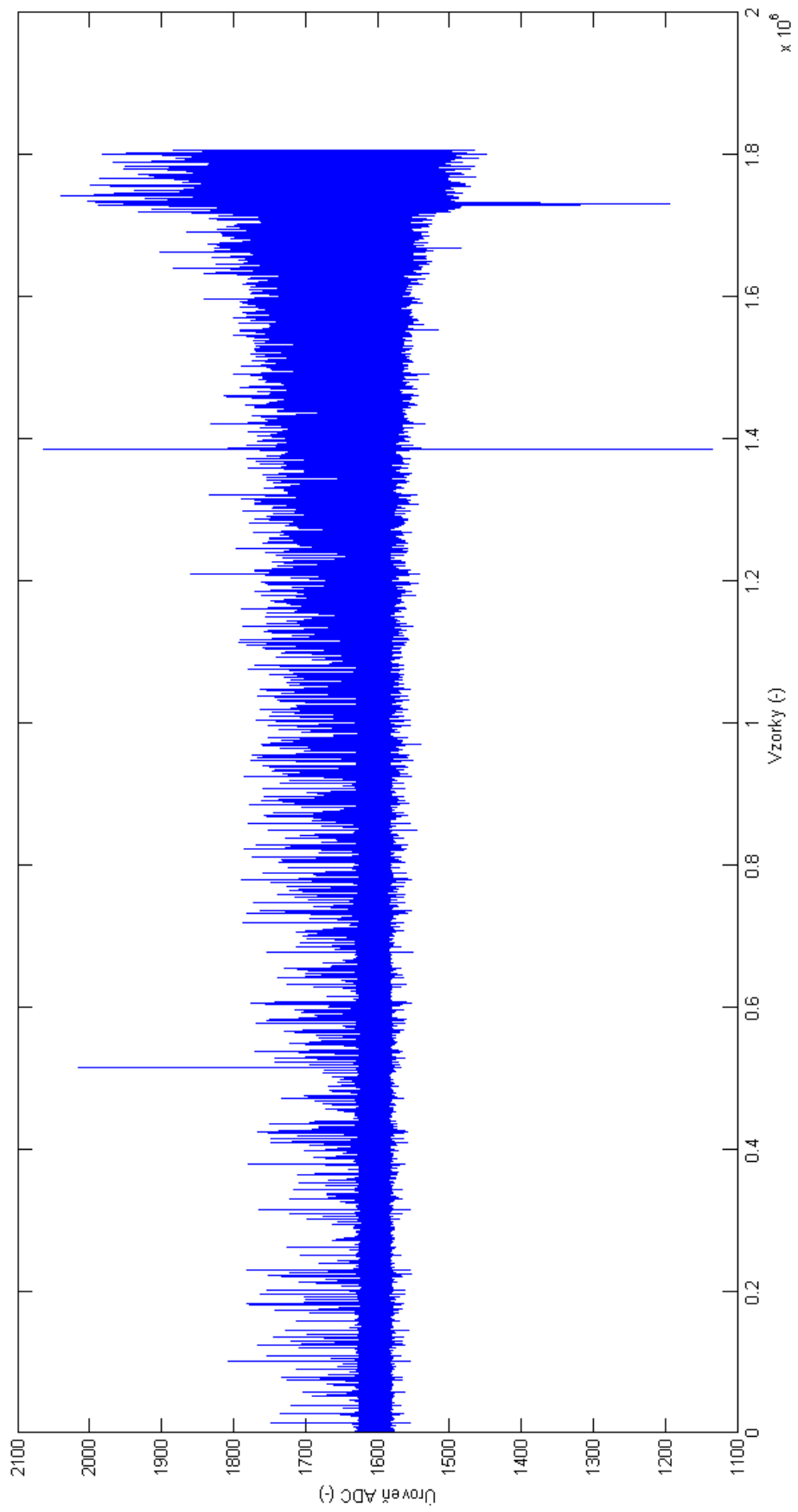
    //add counts, average height per 3 000 ms
    builder.Append( pulsesCount ).Append( ';' );
    builder.Append( averageHeight );

    //dump whole string to serial
    System::Diagnostics::Debug::WriteLine( builder.Build(), System::Diagnostics::MessageCategory::Info );

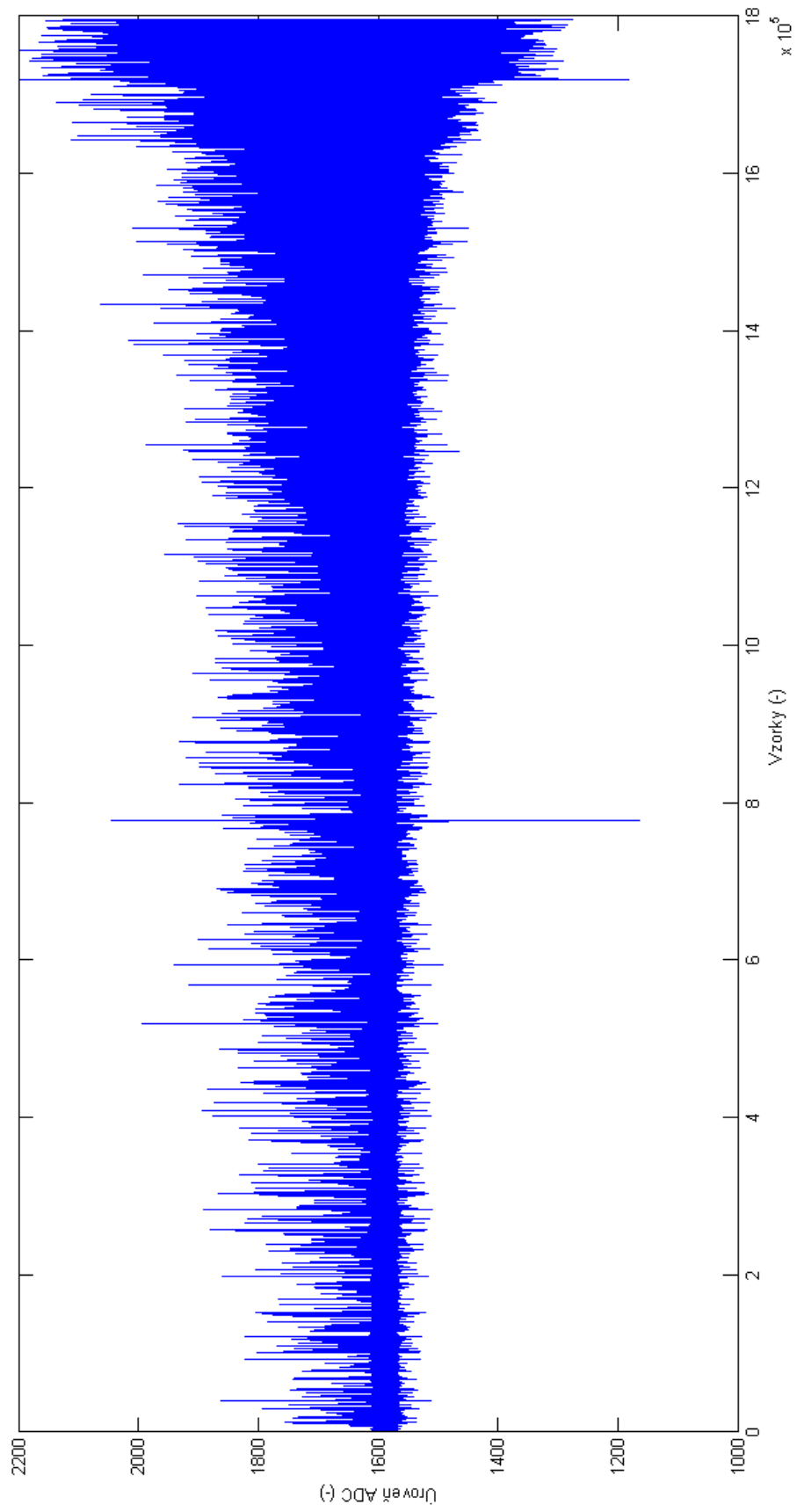
    //reset processed buffers counter
    processedBuffers = 0;
}
}

```

Příloha 5A



Příloha 5B



Příloha 6



STÁTNÍ ÚSTAV JADERNÉ, CHEMICKÉ A BIOLOGICKÉ OCHRANY, v.v.i.

KAMENNÁ 71, 262 31 MILÍN

Tel: 318 600 200

Fax: 318 626 055

IČO: 70565813

www.sujchbo.cz

PROTOKOL o kalibraci Symod-rad-r67

Stanovení závislosti odezvy detektoru na hodnotě dávkového příkonu

Zakázka přijata dne:	12. 5. 2016					
Zadavatel zakázky						
Název / <i>práv.os./</i> jméno, příjmení / <i>fyzická os./</i> :	ČVUT - FBMI					
Sídlo firmy nebo adresa bydliště:	Sportovců 2311, 272 01 Kladno					
Za zadavatele měření přítomen:	Mgr. Zdeněk Hon, Ph.D., Bc. Kryštof Minář, Ing. Lukáš Kučera					
Zhotovitel zakázky						
Pracoviště, které provedlo měření:	Laboratoř osobní dozimetrie a monitorování SÚJCHBO, v.v.i.					
Datum měření:	12. 5. 2016					
Měření provedl/i:	Mgr. Michaela Kozlovská, Mgr. Petr Otáhal, Ph.D.					
Datum vystavení protokolu:	16. 5. 2016					
Protokol zpracoval:	Mgr. Petr Otáhal, Ph.D.					
Výtisk č.	1	Rozdělovník:	výtisk č. 1	zadavatel	Celkem počet stran protokolu:	5
Počet výtisků:	2		výtisk č. 2	LDMR		



STÁTNÍ ÚSTAV JADERNÉ, CHEMICKÉ A BIOLOGICKÉ OCHRANY, v.v.i.

KAMENNÁ 71, 262 31 MILÍN

Tel: 318 600 200

IČO: 70565813

Fax: 318 626 055

www.sujchbo.cz

Použité metody měření:

Na základě požadavků zadavatele bylo provedeno srovnání odezvy přístroje Symod-rad-r67 a hodnoty dávkového příkonu stanoveného pomocí ověřeného, stanoveného měřidla FH 40G. Výstupem z přístroje Symod-rad-r67 byl počet impulsů registrovaný fotodiodou za daný časový úsek.

Použité přístroje a zařízení:

Přístroj	výr.č.	ověřovací/kalibrační list	platnost ověření do:
FH 40G	016649	J 61.ETE.15.OLR.0150	14.9.2017

Jako zdroje ionizujícího záření byly užity laboratorní zdroje ^{241}Am , ^{137}Cs a ^{60}Co . Základní charakteristiku zářičů prezentuje tabulka 1.

Tabulka 1: Charakteristika kalibračních zářičů

Radionuklid	Typ radioaktivní přeměny	Energie emitovaných nabitých částic	Energie emitovaných fotonů
^{241}Am	alfa	5,49 MeV	59,5 keV
^{137}Cs	beta	0,51 MeV	662 keV
^{60}Co	beta	0,31 MeV	1,173 MeV, 1,333 MeV

PROTOKOL o kalibraci Symod-rad-r67

Výtisk č.:	1	Počet stran protokolu celkem:	5	strana	2
------------	---	-------------------------------	---	--------	---



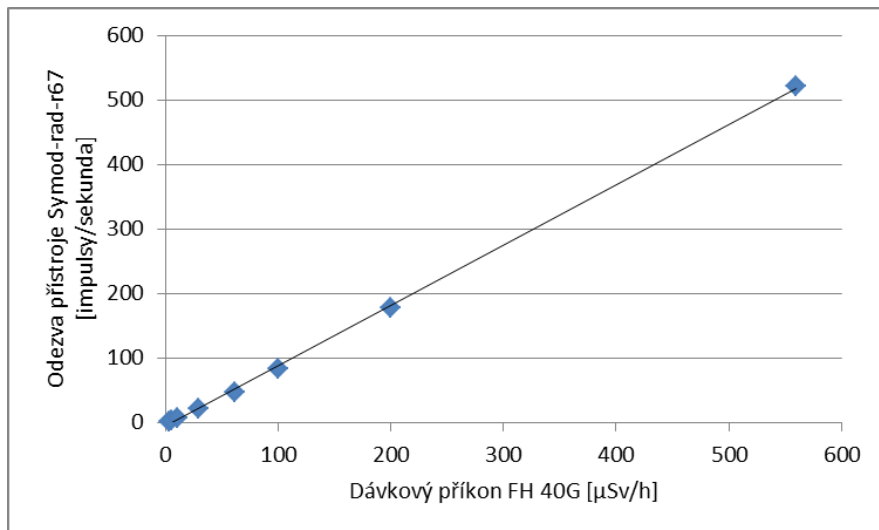
STÁTNÍ ÚSTAV JADERNÉ, CHEMICKÉ A BIOLOGICKÉ OCHRANY, v.v.i.
KAMENNÁ 71, 262 31 MILÍN

Tel: 318 600 200
IČO: 70565813

Fax: 318 626 055
www.sujchbo.cz

Výsledky měření:

Komentované grafické a tabelované výsledky prezentují následující grafy a tabulky:



Obrázek 1: Odezva Symod-rad-r67 na ^{137}Cs

Tabulka 2: Odezva Symod-rad-r67 na ^{137}Cs

Vzdálenost [cm]	100	70	50	30	20	15	10	5
Referenční dávkový příkon [µSv/h]	3,5	6,0	11,0	29,0	62,0	100,0	200,0	560,0
Získaný průměrný počet impulsů [impulsy/s]	2,53	4,41	8,26	22,42	48,31	84,10	178,98	520,39

PROTOKOL o kalibraci Symod-rad-r67

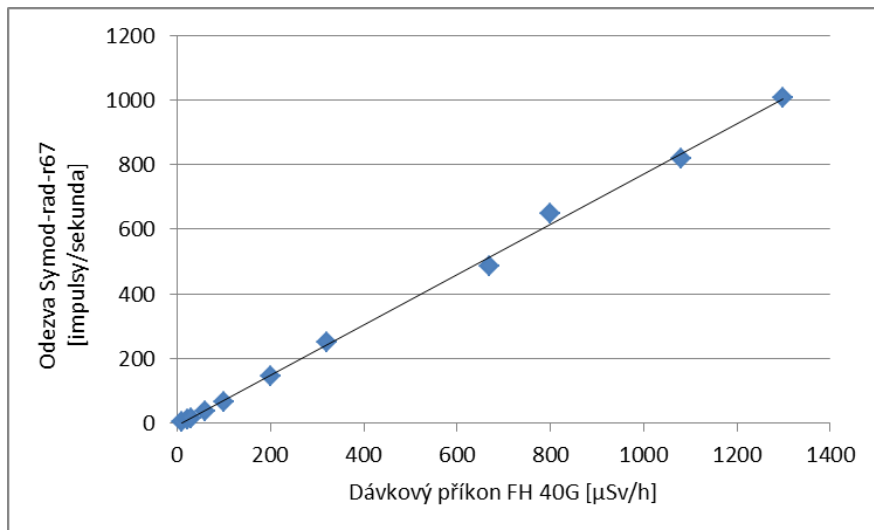
Výtisk č.:	1	Počet stran protokolu celkem:	5	strana	3
------------	---	-------------------------------	---	--------	---



STÁTNÍ ÚSTAV JADERNÉ, CHEMICKÉ A BIOLOGICKÉ OCHRANY, v.v.i.
KAMENNÁ 71, 262 31 MILÍN

Tel: 318 600 200
IČO: 70565813

Fax: 318 626 055
www.sujchbo.cz



Obrázek 2: Odezva Symod-rad-r67 na ^{60}Co

Tabulka 2: Odezva Symod-rad-r67 na ^{60}Co

Vzdálenost [cm]	100	70	58	40	30	20	15	10	8	6,5	5
Referenční dávkový příkon [µSv/h]	10,6	22,0	29,0	60,0	100,0	200,0	320,0	670,0	800,0	1080,0	1300,0
Získaný průměrný počet impulsů [impulsy/s]	6,03	11,89	16,98	38,13	64,86	144,76	249,39	484,31	650,41	819,64	1006,89

PROTOKOL o kalibraci Symod-rad-r67

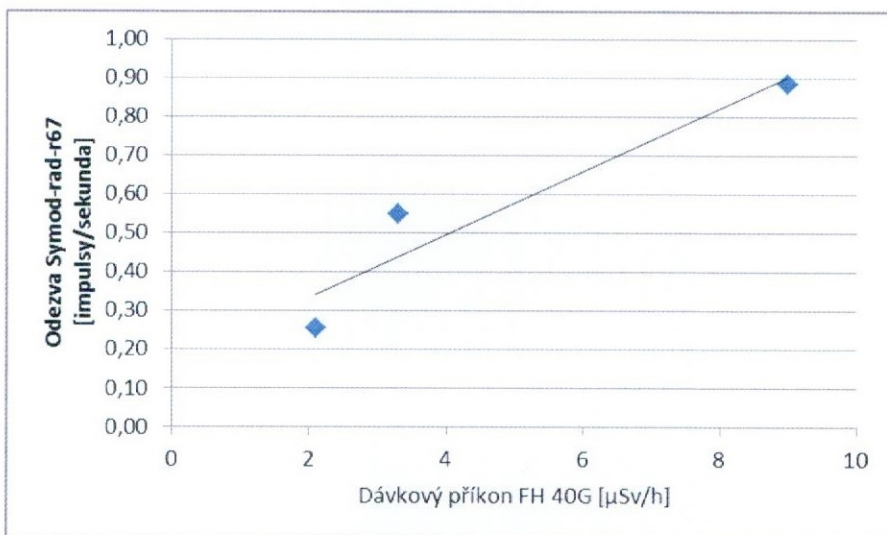
Výtisk č.:	1	Počet stran protokolu celkem:	5	strana	4
------------	---	-------------------------------	---	--------	---



STÁTNI ÚSTAV JADERNÉ, CHEMICKÉ A BIOLOGICKÉ OCHRANY, v.v.i.
KAMENNÁ 71, 262 31 MILÍN

Tel: 318 600 200
IČO: 70565813

Fax: 318 626 055
www.sujchbo.cz



Obrázek 3: Odezva Symod-rad-r67 na ^{241}Am

Tabulka 2: Odezva Symod-rad-r67 na ^{241}Am

Vzdálenost [cm]	20	15	10
Referenční dávkový příkon [µSv/h]	2,1	3,3	9
Získaný průměrný počet impulsů [impulsy/s]	0,26	0,55	0,88

Z regresní analýzy provedených experimentů vyplývá energetická závislost odezvy sledovaného přístroje na energii emitovaných fotonů ze zdroje záření. U ^{60}Co a ^{137}Cs byla potvrzena silná lineární závislost mezi dávkovým příkonem a odezvou. Užití zvoleného typu stínění (hliníkový obal) zkreslilo výsledky u nízkoenergetického fotonového zářiče ^{241}Am .

Mgr. Michaela Kozlovská
Měření provedl

STÁTNI ÚSTAV JADERNÉ, CHEMICKÉ
A BIOLOGICKÉ OCHRANY, v.v.i.
Kamenná 71, 262 31 Milín

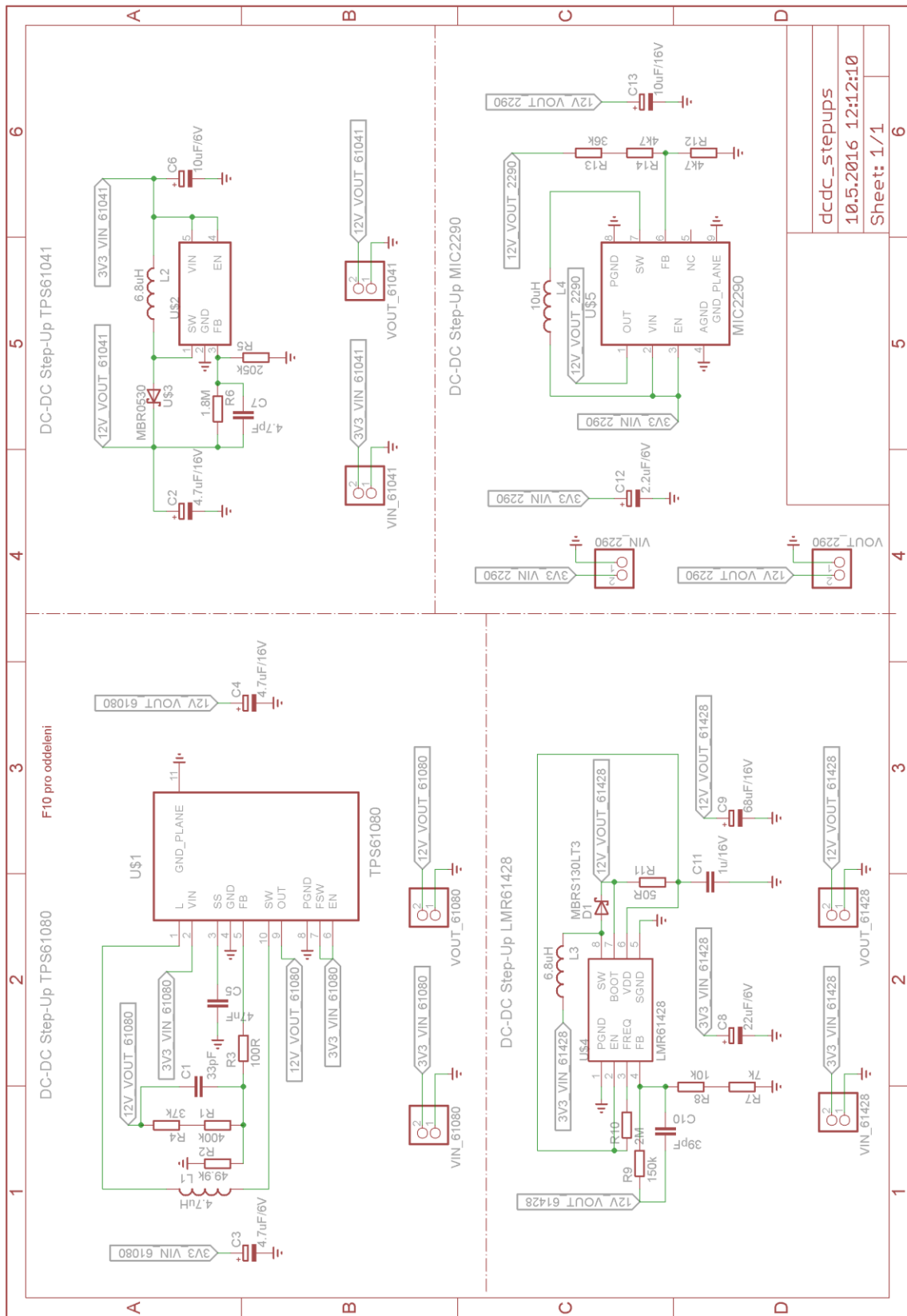
Mgr. Petr Otáhal, Ph.D.
Vedoucí OJO

Výsledky zkoušek se týkají jen předmětu těchto zkoušek. Bez písemného svolení LDMMR se nesmí protokol reprodukovat jinak než celý.

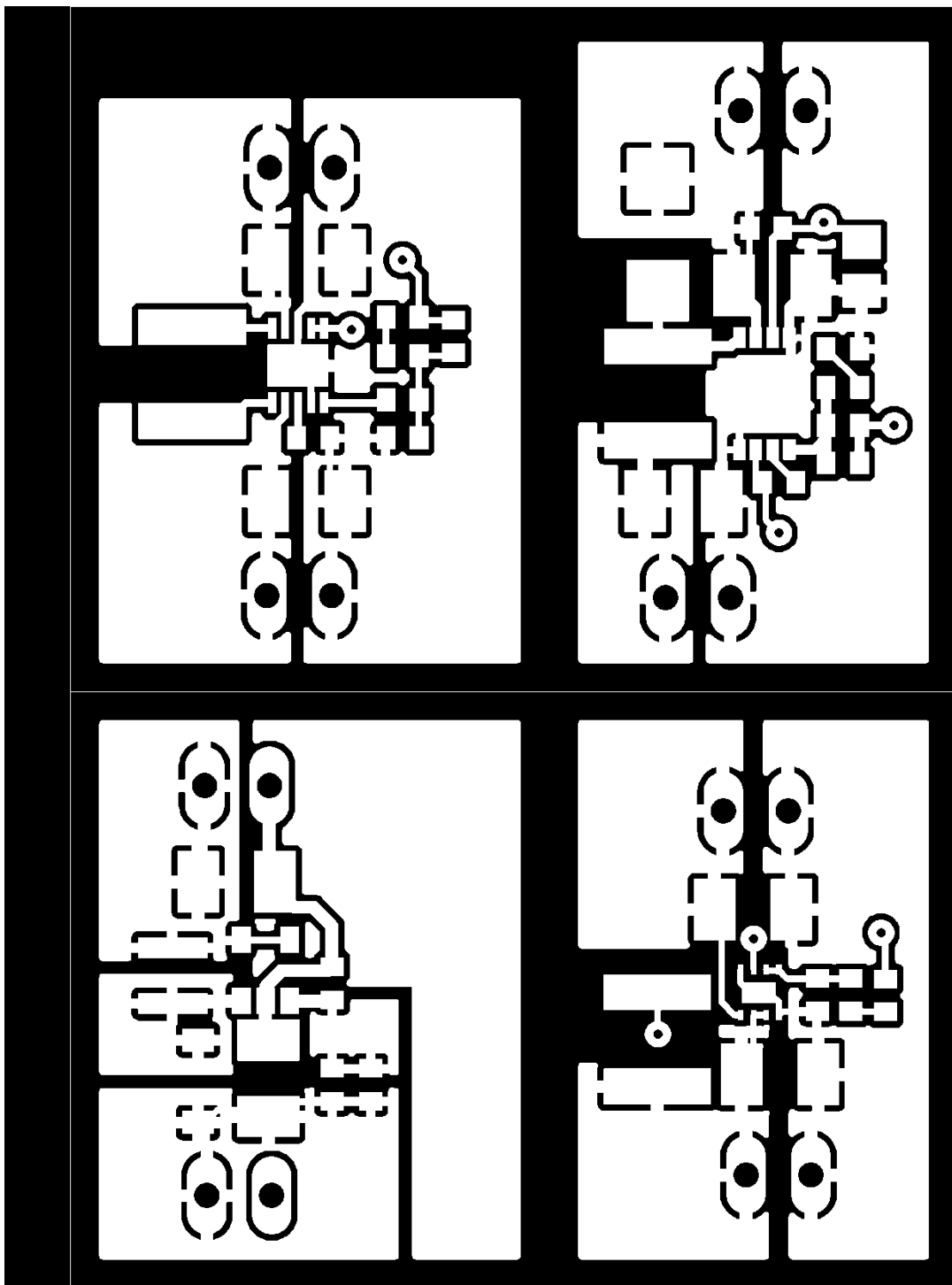
PROTOKOL o kalibraci Symod-rad-r67

Výtisk č.: 1 Počet stran protokolu celkem: 5 strana 5

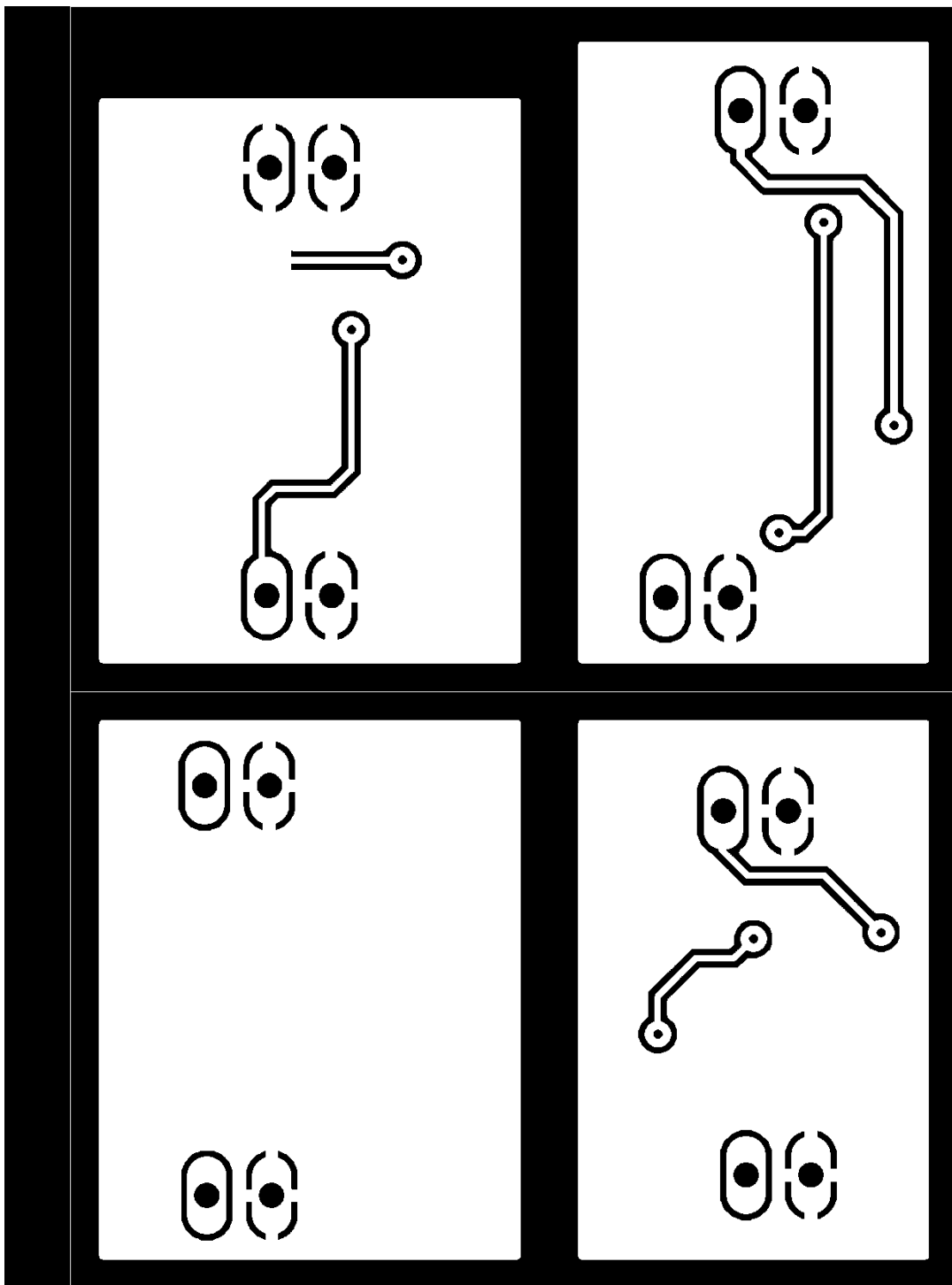
Příloha 7A



Příloha 7B



Příloha 7C



Příloha 8

Adresář	Popis
/	Kořenový adresář s elektronickou verzí zadání DP, Abstraktu DP (CZ, AJ), klíčových slov, samotné DP a kalibračního listu
/Firmware	Binární soubory zkompilevaného firmwaru
/Gerber_DPS	Technologické podklady Gerber pro výrobu DPS
/Hardware_DPS	EAGLE soubory DPS a schématu zapojení
/Zdrojove_kody	Nezkompilevané zdrojové kódy firmwaru