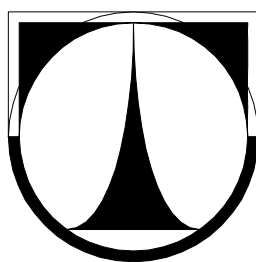


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Liberec 2012

Marek Pavka

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: B2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 1802R022 – Informatika a logistika

**Příruční dozimetr s Geigerovou-Müllerovou trubicí a
mikrořadičem**

**Hand-held dosimeter with Geiger-Müller tube and
microcontroller**

Bakalářská práce

Autor: **Marek Pavka**

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Doležal, CSc.

V Liberci 15.5.2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek Pavka**
Osobní číslo: **M09000029**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Informatika a logistika**
Název tématu: **Příruční dozimetr s Geigerovou-Müllerovou trubicí a mikrořadičem**
Zadávající katedra: **Ústav mechatroniky a technické informatiky**

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

1. Seznamte se s podstatou, veličinami, metodami měření a snímači ionizujícího záření.
2. Seznamte se s parametry Geigerových-Müllerových (GM) trubic.
3. Proveďte rešerši obvodových řešení GM dozimetrů a modulů dostupných na trhu.
4. Nastudujte možná řešení zdrojů vyššího napětí pro napájení GM trubic.
5. Vyberte vhodný mikrořadič a způsob připojení k PC.
6. Navrhněte, zapojte a oživte obvody dozimetru a zabudujte je spolu s GM trubicemi do vhodné krabičky.
7. Navrhněte a odlaďte firmware pro zpracování impulzů z GM trubic a zobrazení časové dávky, celkové akumulované dávky, dávky za zvolený čas a statistických veličin na displeji, světelný a zvukový alarm překročení předvolené úrovně, přepínání rozsahů, kontrolu stavu baterie apod.
8. Dozimetr zkalibrujte.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: cca 30–40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] Kovář Z. et al.: Pokroky dozimetrie ionizujícího záření. Academia, Praha 1984.
- [2] Geiger Müller tubes.
<http://www.centronic.co.uk/downloads/Geiger_Tube_theory.pdf>.
- [3] Krejčířík A.: Napájecí zdroje I. BEN, Praha 1997. 2. vyd. ISBN 80-86056-02-3.
- [4] Faktor Z.: Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. BEN, Praha 2002, ISBN 80-86056-91-0.
- [5] Mann B.: C pro mikrokontroléry. BEN, Praha 2003. ISBN 80-7300-077-6.
- [6] Datové listy GM trubic.
- [7] Datový list použitého mikrořadiče na webu výrobce.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Ivan Doležal, CSc.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2011
Termín odevzdání bakalářské práce: 18. května 2012


prof. Ing. Václav Kopecký, CSc.
děkan




doc. Ing. Petr Tůma, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 14. října 2011

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mojí bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

V Liberci dne:

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Ivanu Doležalovi, CSc. za ochotu, trpělivost a cenné rady při psaní této práce. Velké díky patří i Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D. za odbornou pomoc.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům a přátelům za toleranci, podporu a pomoc potřebnou pro zvládnutí studia.

Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je návrh a vytvoření osobního dozimetru, který by byl schopen alespoň částečně nahradit funkci podstatně dražších, komerčních přístrojů. V teoretické části práce je shrnuta podstata a veličiny související s ionizujícím zářením. Pozornost je také věnována metodám měření a snímačům, včetně Geiger-Müllerových trubic použitých při výrobě. V krátkosti jsou představeny i různé typy dozimetrů. Praktická část popisuje realizaci elektroniky a vývoj programu pro desku Arduino Nano s mikrořadičem ATmega 328. Výsledný výrobek je poté kalibrován pomocí stronciového zářiče a referenčního dozimetru Gamma-Scout. V úplném závěru práce je provedeno měření spotřeby a radiačního pozadí v areálu Technické univerzity v Liberci.

Klíčová slova: Dozimetr, Geigerova-Müllerova trubice, Ionizující záření, Mikrořadič

Abstract

The subject of this thesis is a proposition and a creation of a personal dosimeter, which would be (at least partially) able to substitute functions of the considerably more expensive, commercial devices. In the theoretical part, the essence and values of ionising radiation are summarised. The paper also focuses on sensors and methods of measuring, including Geiger-Müller's tubes, used in the process of production. Furthermore, different types of dosimeters are briefly presente. The practical part of the thesis describes realisation of electronics and the development of the software for the board Arduino Nano with microcontroller Atmega 328. Then, the final product is calibrated by a strontium emitter and a reference dosimeter Gamma-Scout. In conclusion, the measure of usage and the radiation background in the campus of Technical University in Liberec is conducted.

Klíčová slova: Dosimeter, Geiger-Muller tube, Ionizing radiation, Microcontroller

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Seznam symbolů, zkratk a termínů	10
1. Úvod.....	11
2. Teoretický rozbor.....	12
2.1 Podstata ionizujícího záření	12
2.2 Rozdělení ionizujícího záření	13
2.3 Veličiny a jednotky ionizujícího záření	15
2.3.1 Veličiny charakterizující zdroje záření	15
2.3.2 Veličiny charakterizující působení záření na látku.....	16
2.3.3 Veličiny charakterizující působení záření na člověka	17
2.4 Metody měření a snímače ionizujícího záření	19
2.4.1 Elektrické detektory	21
2.4.2 Ionizační komory	22
2.4.3 Polovodičové detektory	23
2.4.4 Scintilační detektory	24
2.4.5 Filmová dozimetrie	24
2.4.6 Termoluminiscenční dozimetrie	25
2.5 Geiger-Müllerova trubice	26
2.5.1 Popis parametrů Geiger-Müllerovy trubice	27
2.5.2 Mrtvá doba Geiger-Müllerovy trubice.....	30
2.6 Amatérsky vyráběné dozimetry	30
2.6.1 Dozimetr Marcose Yarza a Davida Gascona.....	30
2.6.2 Kopie ruského dozimetru RKS-20.....	32
2.6.3 Dozimetr Jeffa Keyzera z projektu MightyOhm	33
2.7 Osobní dozimetr Gamma-Scout a další	34
3. Návrh a realizace hardware.....	36
3.1 Výběr vhodných Geiger-Müllerových trubic	37
3.2 Měnič pro Geiger-Müllerovy trubice.....	38
3.3 Napájecí zdroj pro mikrořadič, displej a další komponenty	40
3.4 Zesílení a úprava pulzů	41
3.5 Výběr a popis mikrokontroléru.....	42
3.5.1 Arduino Nano	43
3.5.2 Atmega 328.....	44
3.5.3 Vstupně výstupní piny	44
3.6 Zabudování dozimetru do krabičky	45
4. Vývoj firmware.....	46
4.1 Arduino IDE 1.0	46
4.2 Vývojový diagram firmware.....	47
4.3 Externí knihovny a časovač Arduina	48
4.4 Výpočet časové dávky	49
4.5 Kontrola stavu baterie	50
4.6 Ukládání dat do paměti EEPROM.....	50
4.7 Posílání dat do PC.....	52
4.8 Uživatelské rozhraní	52
5. Kalibrace a testování dozimetru	53

5.1 Kalibrace trubice Vniitfa Si-29bg.....	53
5.2 Kalibrace trubice Zelta Si-25g.....	54
5.3 Měření spotřeby	55
5.4. Měření pozadí v areálu TUL.....	55
6. Závěr	56
Seznam použité literatury	57
Seznam příloh	63
PŘÍLOHA A	64
PŘÍLOHA B	65
PŘÍLOHA C	66
PŘÍLOHA D	67
PŘÍLOHA E.....	68
PŘÍLOHA F	69
PŘÍLOHA G	70
PŘÍLOHA H	71
PŘÍLOHA I.....	72

Seznam obrázků

- 1 – Mezinárodní výstražný symbol označující zdroj ionizujícího záření a nový doplňkový výstražný symbol
- 2 – Penetrace ionizujícího záření materiály
- 3 – Závislost proudu na napětí elektrod při konstantním záření
- 4 – Schéma ionizační komory
- 5 – Schéma polovodičových detektorů
- 6 – Schéma scintilačních detektorů
- 7 – Filmový dozimetr
- 8 – Prstový termoluminiscenční dozimetr
- 9 – Vnitřní schéma Geiger-Müllerovy trubice
- 10 – Grafické znázornění a výpočet sklonu plošiny
- 11 – Modul pro Arduino s trubicí North Optic (The Libelium Team)
- 12 – Kopie ruského dozimetru RSK-20 na nepájivém poli
- 13 – Sestavený dozimetr Jeffa Keyzera (včetně průhledného pouzdra)
- 14 – Dozimetr Gamma-Scout
- 15 – Průběh pulzu Geiger-Müllerovy trubice Vniitfa Si-29bg
- 16 – Schéma zapojení MAX 1674 pro výstupní napětí 5 V
- 17 – Zapojení operačního zesilovače jako invertující komparátor s hysterezí
- 18 – Průběh pulzu z trubice a výstupního napětí komparátoru
- 19 – Popis Arduina Nano s procesorem ATmega 328
- 20 – Dozimetr TUL-IL zabudovaný v krabici
- 21 – Vývojový diagram firmware dozimetru
- 22 – Data přijímaná počítačem z mikrořadiče

Seznam tabulek

- 1 – Veličiny charakterizující zdroje záření
- 2 – Veličiny charakterizující působení záření na látku
- 3 – Radiační váhový faktor
- 4 – Tkáňový váhový faktor
- 5 – Příklady různých dávek
- 6 – Popis parametrů Geiger-Müllerovy trubice SBM-20
- 7 – Srovnání dalších osobních dozimetrů
- 8 – Parametry Geiger-Müllerovy trubice Zelta Si-25g
- 9 – Parametry Geiger-Müllerovy trubice Vniitfa Si-29bg
- 10 – Rozpis pinů a jejich funkce
- 11 – Porovnání naměřených hodnot přístroje s dozimetrem Gamma-Scout
- 12 – Naměřené hodnoty spotřeby

Seznam symbolů, zkratk a termínů

bajt	množina osmi bitů
bit	nejmenší jednotka informace, rozlišuje dva stavy (ANO/NE)
EEPROM	elektronicky programovatelná paměť, která k uchování dat
firmware	programové vybavení, které je integrální součástí elektroniky
hardware	popisuje fyzicky existující technické vybavení
instrukce	příkaz k ovládání mikroprocesoru
LED	polovodičová součástka vyzařující světlo (light emitting diode) nepotřebuje napájení
mikroprocesor	integruje výpočetní část do jednoho obvodu
pin	nejmenší jednotka mikroprocesorového kanálu
rozhraní	ovládací a zobrazovací prvky, které slouží ke komunikaci programu s uživatelem
sběrnice	jeden nebo více vodičů určených k podobné nebo stejné funkci
SRAM	druh paměti umožňující zápis i čtení, vyžaduje napájení
syntaxe	pravidla zápisu programovacího jazyka

1. Úvod

O měření ionizujícího záření se začalo více diskutovat až po havárii jaderné elektrárny Černobyl. Kvůli ní byly na trh uvedeny první jednoduché osobní dozimetry, které měly kompaktnější rozměry. Sloužily k mnohdy nedostatečně přesnému měření kontaminace v potravinách nebo půdě. Neměly žádnou zobrazovací část, člověk musel sám z periody pulzů usoudit, zda je hodnota radiace v pořádku, či nikoliv.

Po několika letech se na tuto ukrajinskou pohromu nedozírných následků takřka zapomnělo. Podle toho vypadal i vývoj dozimetrů v letech 1995 – 2005, který se zaměřoval spíše pro laboratorní nebo průmyslové účely. Zlom nastal ve chvíli, kdy vlna tsunami zaplavila fukušimské reaktory v Japonsku. Unikající césium a jóď, ale především obrovská medializace katastrofy způsobila paniku, která vytvořila nikým nečekanou poptávku po přenosných detektorech záření.

Na ní reagovalo paralelně několik různých prodejců, kteří začali nabízet staré ruské detektory, které ležely i desítky let ve skladech – nutno ovšem dodat, že stáří nemá na funkci Geiger-Müllerových trubíc pravděpodobně vliv. Ještě než byla vážnost nehody překvalifikována na stupeň sedm, bylo na internetu již několik různých projektů, které z těchto starých trubíc vytvářely buď již hotové dozimetry nebo stavebnice, které si uživatel dá do provozu sám.

Nad stavbou osobního dozimetru jsem přemýšlel už začátkem roku 2011. Chybou bylo, že jsem v tu dobu senzor nezakoupil. O čtyři měsíce později byly ceny téměř dvojnásobné a sehnat kvalitní a citlivou trubici byl nelehký úkol. Nakonec se mi všechny potřebné díly sehnat podařilo. Bakalářská práce tedy popisuje realizaci mého osobního dozimetru pojmenovaného TUL-IL.

2. Teoretický rozbor

2.1 Podstata ionizujícího záření

Ionizujícím zářením se souhrnně označuje záření, jehož kvanta mají dostatečnou energii k tomu, aby přímo či nepřímo odtrhovaly (ionizovaly) podél své dráhy elektrony z elektronového obalu atomů či molekul, čímž vznikne z dané molekuly kladný iont. Elektron, který se uvolnil, reaguje s dalším atomem nebo molekulou a vytváří záporný iont. Tím vznikne tzv. iontový pár. K ionizaci je třeba, aby částice, které dopadají, měly jistou minimální energii, která je označována jako ionizační potenciál. Jeho hodnoty se pro různé druhy částic liší. [5], [6]

Samo ionizující záření vzniká nabitými částicemi (částice α , β , elektrony, pozitrony). Ty mají dostatečnou kinetickou energii, aby mohly vyvolat ionizaci. Nepřímo ionizující záření je tvořeno nenabitými částicemi (fotony, neutrony, záření γ), které při interakcích s prostředím uvolňují sekundární, přímo ionizující částice. Samy v prostředí ale neionizují. Ionizace je způsobena až sekundárními částicemi. [1], [5]

Ne všechny kombinace počtu protonů a neutronů tvoří stabilní jádra, proto se prvky s nestabilními jádry samovolně přeměňují na jádra jiných prvků. Tento rozpad a přeměna se nazývá radioaktivita. Za radioaktivní atomy jsou považovány ty, jejichž jádra nejsou časově stabilní a samovolně se přeměňují na jiná – ať už stabilní nebo dále radioaktivní. Snahou radioaktivní přeměny je dosažení stability atomu.

Přeměna nestabilních jader, které v sobě mají nadbytek energie, je doprovázena zachycením elektronu z elektronového obalu, emisí částice nebo kvanta elektromagnetického záření. Tyto procesy nelze nijak chemicky ani fyzikálně ovlivňovat, protože probíhají v jádrech atomů. Všechna těžší jádra jsou nestabilní a samovolně se rozpadají na jádra lehčí, což je považováno za tzv. přirozenou radioaktivitu. Umělá radioaktivita se od ní liší pouze tím, že nestabilita atomového jádra je vyvolána uměle, například jadernou reakcí. [1], [5], [7]

Radioaktivní přeměna mění chemickou podstatu látky, přičemž přeměnou změní složení atomového jádra. Tím dochází k transformaci jednoho nuklidu na druhý. Například radium $^{226}_{88}\text{Ra}$ se přeměňuje na radon $^{226}_{86}\text{Rn}$ nebo uran $^{238}_{92}\text{U}$ na thorium $^{234}_{88}\text{Th}$. Přeměna je nezávislá na tlaku, vlhkosti, teplotě nebo jakýchkoliv jiných vnějších podmínkách. Je doprovázena vyzařováním jednoho nebo více typů záření – α (jádra

helia), β (elektrony), γ (fotony) – kterým působí fyzicky na okolí (ionizace, fluorescence,...). [5]



Obr. 1: Mezinárodní výstražný symbol označující zdroj ionizujícího záření a nový doplňkový výstražný symbol

2.2 Rozdělení ionizujícího záření

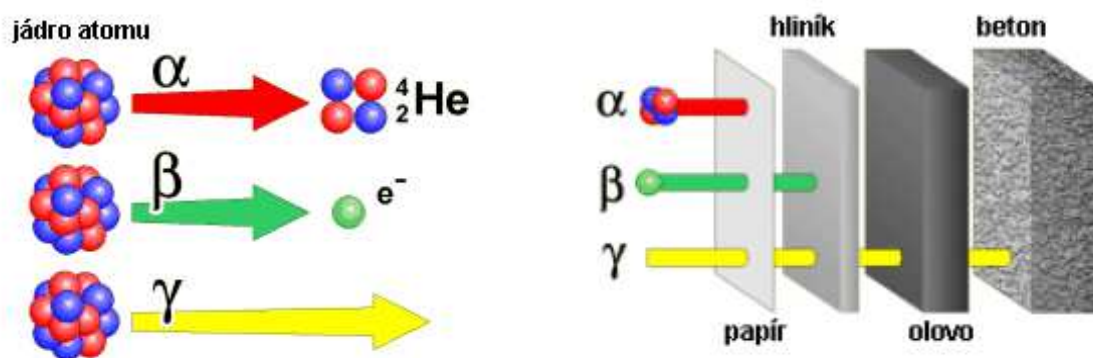
Záření α se skládá ze dvou protonů a dvou neutronů, jedná se tedy o jádro helia. Tato částice má velkou hmotnost (4 nukleony) a nese velký elektrický náboj. Ztráta energie způsobená průchodem absorbujícího prostředí je obrovská. Dolet těchto částic ve vzduchu při energii okolo 10 MeV je přibližně 10 cm. Odstínit je lze i listem papíru. Jejich silné ionizační účinky jsou negativní při vnitřní kontaminaci organismu, neboť se jejich velká energie absorbuje v malém objemu tkáně. [5], [9]

Záření β je tvořeno rychlými elektrony nebo pozitrony, jejichž maximální energie je pro každý radionuklid charakteristická, od nuly spojitá. Elektrony jsou z jádra vyzařovány při samovolné transformaci jaderného neutronu na proton, elektron a antineutrino. Ve srovnání se zářením alfa mají elektrony menší náboj i hmotnost, proto jejich dolet může být při maximální energii 2 MeV přibližně 8 m ve vzduchu, 1 cm ve vodě nebo 4 mm v hliníku. Při průchodu prostředím jsou elektrony rozptylovány jen s malou ztrátou jejich energie, proto může být jejich dráha hodně zakroucená. Skutečná dráha tedy může být několikanásobně delší než jejich dolet. Záření beta proniká pod kůži do hloubky několika centimetrů. [5], [8]

Záření γ je pronikavé elektromagnetické záření (proud fotonů) s velmi krátkou vlnovou délkou řádu 10^{-11} až 10^{-13} metru. Pro porovnání, ultrafialové světlo začíná na vlnové délce 10^{-8} metru. Prvků, které emitují pouze gama záření je velmi málo, obvykle je doprovázeno i alfa nebo beta zářením (případně obojím). Spektrum záření je pro každý radionuklid specifické, emitují se fotony pouze určitých energií od zhruba desítek keV až po jednotky MeV. Při průchodu prostředím uvolňují fotony elektricky nabitě částice, kterým předají část energie potřebné k ionizaci prostředí – jedná se o nepřímou interakci. Dosah záření v závislosti na jeho energii může být až několik desítek metrů. Za účinné stínění je považováno olovo nebo železobeton. Lidským tělem pronikne velmi snadno, nicméně ionizace je v tkáních nepoměrně nižší než u záření alfa i beta – záleží na energii (čím vyšší je, tím menší je hustota ionizace). [1], [5]

Rentgenové záření je, stejně jako gama, zářením elektromagnetickým. Vlnová délka se pohybuje v intervalu od 10^{-9} až 10^{-13} metrů. Vzniká zbrzděním rychle letících elektronů těžkými kovy. Využívá se především ve specializovaném oboru lékařství – radiologii. [5], [10]

Neutronové záření vzniká při jaderných reakcích a spontánním štěpením atomů. Tato částice bez náboje se chová různě v závislosti na energii, kterou má. Při srážce s jádry vodíku dochází v prozařované hmotě k sekundární ionizaci, jež je způsobená vybuzením vodíkových jader. Ke stínění se používá voda, korek, organické umělé hmoty nebo parafín. [1], [5]



Obr. 2: Penetrace ionizujícího záření materiály

2.3 Veličiny a jednotky ionizujícího záření

Problematika ionizujícího záření se vztahuje na nějaký zdroj, který do svého okolí vyzařuje ionizující záření, které působí nějak na látky a nějak (jinak) na člověka a živé organismy. Je tedy třeba veličin, které popisují zdroje záření, působení záření na látky a působení záření na člověka. [12]

2.3.1 Veličiny charakterizující zdroje záření

Mezi veličiny, které charakterizují zdroje záření, patří:

- **Poločas rozpadu** – doba, za kterou se přemění polovina celkového počtu atomů radionuklidu.
- **Rozpadová konstanta** – předpokládaná rychlost rozpadu radionuklidu. [12]
- **Aktivita** – počet radioaktivních rozpadů za čas. 1 Bq se rovná aktivitě radioaktivní látky, při které dojde k rozpadu jednoho atomového jádra za sekundu. Pro praxi je tato jednotka velmi malá, používají se násobky – kBq, MBq a větší. Aktivita není časově konstantní a závisí též na hmotnosti radionuklidu. Starší jednotka curie odpovídala aktivitě 1 gramu ^{226}Ra . [11], [13]
- **Energie vyzařovaných částic** – díky této energii lze jednoznačně určit, který radionuklid je zdrojem emitace. Závisí na ní úroveň ionizace i dolet. Jednotkou je joule (J), ale častěji se používá elektronvolt (eV) a jeho násobky (keV, MeV). 1 eV se rovná energii, kterou získá elektron při proběhnutí el. pole s potenciálem 1 V. [11], [14]

Tabulka 1: Veličiny charakterizující zdroje záření [11], [12], [14]

Název	Značka	Jednotka	Jiná jednotka	Převodní konstanta
Poločas rozpadu	T	s (sekunda)	–	–
Rozpadová konstanta	λ	s^{-1}	–	–
Aktivita	A	Bq (becquerel)	Ci (curie)	1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq
Hmotnostní aktivita	a_m	$Bq \cdot kg^{-1}$	$Ci \cdot kg^{-1}$	–
Plošná aktivita	a_s	$Bq \cdot m^{-2}$	$Ci \cdot m^{-2}$	–
Objemová aktivita	a_v	$Bq \cdot m^{-3}$	$Ci \cdot m^{-3}$	–
Energie vyzařovaných částic	E	eV (elektronvolt)	J (joule)	1 eV = $1.602 \cdot 10^{-19}$ J

2.3.2 Veličiny charakterizující působení záření na látku

Mezi tyto veličiny patří:

- **Absorbovaná dávka** – Jeden gray odpovídá energii záření jednoho joulu absorbované jedním kilogramem látky. Dávkový příkon je definován jako změna dávky za čas. Obě veličiny se dají použít jen pro přímo ionizující záření. Pro měření nepřímo ionizujícího záření se používá kerma a expozice. [13]
- **Kerma** – za podmínky rovnováhy nabitých částic se kerma rovná absorbované dávce. Přesná definice podle [11] zní: „*Součet počátečních kinetických energií všech nabitých částic uvolněných nenabítenými ionizujícími částicemi v uvažovaném objemu látky o hmotnosti m.*“ Kermový příkon je přírůstek kermy za čas. [11]
- **Expozice** – je definována dle [11] jako: „*Poměr celkového elektrického náboje iontů jednoho znaménka vzniklých ve vzduchu při úplném zabrzdění všech elektronů a pozitronů, které byly uvolněny fotony v objemovém elementu vzduchu o jednotce hmotnosti.*“

Tabulka 2: Veličiny charakterizující působení záření na látku [11], [13]

Název	Značka	Jednotka	Jiná jednotka	Převodní konstanta
Absorbovaná dávka	D	Gy (gray)	rad	1 rad = 0,01 Gy
Dávkový příkon	D	$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	–
Kerma	K	Gy	rad	–
Kermový příkon	K	$\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	–
Expozice	X	$\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$ (coulomb/kilogram)	R (rentgen)	1 R = 258 $\mu\text{C/kg}$
Expoziční příkon	X	$[\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}]$	$\text{A} \cdot \text{kg}^{-1}$ (amper/kilogram)	Jednotky jsou totožné

2.3.3 Veličiny charakterizující působení záření na člověka

Veličiny vycházejí z absorbované dávky, ale berou v úvahu, že každý druh záření působí na člověka odlišně a každý orgán má různou citlivost na radioaktivitu.

- **Ekvivalentní dávka** v tkáni nebo orgánu (H) počítá se tak, že střední dávka záření se vynásobí radiačním váhovým faktorem příslušným k danému záření. Jednotkou ekvivalentní dávky je sievert [Sv]. Radiační váhový faktor vystihuje účinnost různých typů záření vzhledem k fotonovému. [11], [12]

Tabulka 3: Radiační váhový faktor [12]

Záření a energie	Váhový faktor
Fotonové záření	1
Beta záření	1
Neutrony (< 10 keV)	5
Neutrony (> 10 keV a < 100 keV)	10
Neutrony (> 100 keV a < 2 MeV)	20
Neutrony (> 2 MeV a < 20 MeV)	10
Neutrony (>20 MeV)	5
Alfa záření	20

Účinky záření beta i gama jsou totožné. Dvacetinásobek dávky beta záření se vyrovná hodnotě alfa záření.

- **Efektivní dávka** v tkáni nebo orgánu (E) – součet vážených středních hodnot ekvivalentních dávek v tkáních a orgánech lidského těla. Tkáňový váhový faktor reflektuje zdravotní újmy způsobené rovnoměrným ozářením celého těla. [11]

Tabulka 4: Tkáňový váhový faktor [12]

Orgán nebo tkáň	Váhový faktor
Pohlavní žlázy	0,2
Střevo, plíce, červená kostní dřeň, žaludek	0,12
Močový měchýř, prs, játra, jícen, štítná žláza, mléčná žláza	0,05
Povrch kostí a kůží	0,01

Zásadní výhodou efektivní dávky je schopnost vyjádřit při nerovnoměrném ozáření celkovou radiační zátěž organismu. V lékařství i jiných oborech se rovnoměrné ozáření vyskytuje pouze výjimečně, proto se výpočet efektivní dávky považuje za mnohem přesnější a lépe vypovídající o potenciálním riziku spojeném s expozicí. [11], [12]

- **Osobní dávkový ekvivalent** ($H_p(d)$) – používá se ke stanovení radiační zátěže pracovníků se zářením. Měří se dávkový ekvivalent v daném bodě pod povrchem těla (v měkké tkáni). Hloubka je závislá na pronikavosti záření. [13]

Ionizující záření má vliv na všechny živé organismy. Avšak člověk je vůči účinkům radiace nejméně imunní. Hmyz a mikroorganismy jsou schopny odolat dávkám až 1000 Gy. Rostliny dokonce desetinásobku – 10 kGy. Nicméně panika způsobená dočasně zvýšenou hodnotou efektivní dávky je mnohdy zbytečná. V tabulce (viz níže) jsem uvedl ekvivalentní dávky na rozličných příkladech. Přirozené pozadí je radiace z kosmického záření. [3]

Tabulka 5: Příklady různých dávek [15], [16]

Příklad	Ekvivalentní dávka
Sněžení jednoho banánu	0,1 μ Sv
Průměrná dávka z přirozeného pozadí za 1 den	10 μ Sv
Let z New Yorku do Los Angeles	40 μ Sv
Roční dávka z draslíku uvnitř našeho těla	390 μ Sv
Roční limit (EPA) pro běžného občana ¹	1 mSv
Rentgen hlavy	2 mSv
Průměrná dávka běžného obyvatele za rok	4 mSv
Maximální povolená roční dávka pro pracovníky jad. elektr.	50 mSv
Roční dávka prokazatelně zvyšující riziko rakoviny	100 mSv
Limit pro pracovníky v případě pohotovosti – ochraně života	250 mSv
Dávka způsobující příznaky nemoci z ozáření	400 mSv
Lehká nemoc z ozáření (10% úmrtnost po 30 dnech)	1 – 2 Sv
Vážná nemoc z ozáření (50% úmrtnost po 30 dnech)	2 – 6 Sv
Akutní nemoc z ozáření (téměř 100% úmrtnost po 30 dnech)	více než 6 Sv

¹ EPA je federální vládní agentura USA. Do limitu se nepočítají přírodní zdroje (kosmické záření) ani ozáření rentgenem u lékaře.

2.4 Metody měření a snímače ionizujícího záření

Měření ionizujícího záření pracuje na různých principech, které jsou založeny na chemických reakcích, fyzikálních změnách a dalších procesech – vznik fotoluminiscence, změna barvy, teploty, vodivosti atd. Z výsledných hodnot pak lze zjišťovat kvalitativně nebo kvantitativně vlastnosti zdroje ionizujícího záření (míru působení, dávku, aktivitu a další). Obvykle je potřeba zjistit vliv záření na objekt, látku nebo organismus, což je složitější než samotné zjištění hodnoty získané měřením. Lze je dělit následovně: [5]

Podle způsobu měření:

- kontinuální – výstupem kontinuálních detektorů je průběžná informace o okamžité hodnotě. Po ukončení expozice ionizujícího záření je na výstupu nula (respektive hodnota přirozeného pozadí).
- integrální – tyto dozimetry svůj výstup po ukončení expozice nenulují, s časem se hodnota výstupu zvyšuje. Informace o intenzitě záření je trvalá.

Podle způsobu vyhodnocování:

- v reálném čase – osobní elektronické dozimetry měří, zpracovávají a informují o záření v reálném čase.
- po expozici – filmové nebo termoluminiscenční detektory lze vyhodnotit až v odděleném měřicím nebo registračním zařízení.

Podle účelu měření:

- radiometry – jejich úkolem je stanovení úrovně radioaktivity (dávkových příkonů nebo dávky) v prostoru s povrchovou kontaminací. Obvykle nepodávají informaci o energii záření.
- spektrometry – pomocí nichž lze stanovit aktivitu nebo energii ionizujícího záření.
- radiometrická zařízení – slouží zpravidla k průmyslovým aplikacím. Radionuklidy jsou použity k měření tloušťky, vlhkosti, výšky hladiny atp.

Podle principu detekce:

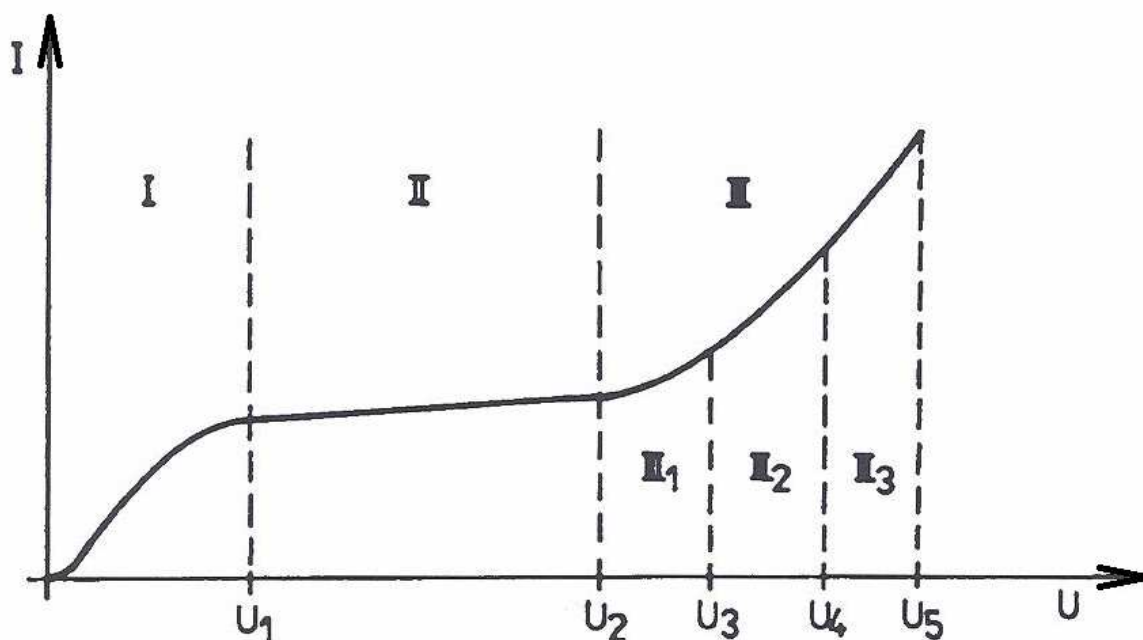
- elektrické detektory – vystavení se ionizujícímu záření způsobí změnu některé z elektrických vlastností (napětí, proud, vodivost). Řadí se mezi ně nejen polovodičové a krystalové detektory, proporciální a Geiger-Müllerovy počítáče, ale také ionizační komory
- scintilační detektory – principem je měření luminiscenčního záření, které vzniká působením záření na danou scintilační látku. Světelný signál se může poté převádět na signál elektrický, a ten dále zpracovávat.
- samostatné detektory – jsou to obvykle látky, které dlouhodobě mění barvu, objem nebo složení působením ionizujícího záření. Zpravidla to jsou detektory integrální. [5], [11]

2.4.1 Elektrické detektory

Konstrukce elektrických detektorů připomíná válcové či deskové kondenzátory, ke kterým po připojení zdroje napětí na jejich elektrody (přerušené objemem plynu) začne protékat proud. V případě, že je mezi elektrodami zdroj záření, může začít docházet k těmto jevům:

- **ionizace** – ionty vytvořené ionizujícím zářením směřují k opačně nabitým elektrodám, což v obvodu vytvoří proud, který se označuje jako ionizační.
- **rekombinace** – pokud se záporný a kladný iont střetnou, může vzniknout nový neutrální atom nebo molekula. S rostoucím napětím, a tudíž rostoucí rychlostí iontů klesá pravděpodobnost, že se tak stane.
- **sekundární ionizace** – pokud je v důsledku rychlosti iontů jejich energie větší než ionizační energie plynu mezi deskami, mohou být nárazovou ionizací vytvořeny další ionty.

V závislosti na napětí mezi elektrodami lze pozorovat při konstantní hodnotě ionizujícího záření různě velký protékající proud (viz obrázek níže).



Obr. 3: Závislost proudu na napětí elektrod při konstantním záření

Oblast I (oblast Ohmova zákona) – Ionty, které vzniknou primární ionizací, spolu rekombinují. Ionizační proud roste úměrně s napětím (rekombinace klesá v důsledku zvyšujícího se napětí). V této části se ionizující záření neměří, protože sběr iontů není dokonalý.

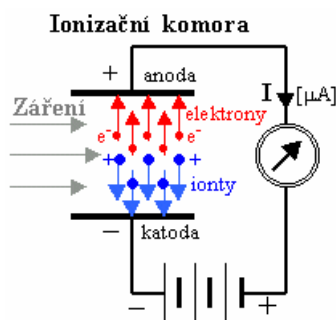
Oblast II (oblast nasyceného proudu) – Velikost ionizačního proudu není závislá na velikosti napětí mezi elektrodami, jež stačí k shromáždění všech iontů vytvořených primární ionizací. Rekombinace se projevuje jen výjimečně. V této oblasti pracují ionizační komory.

Oblast III (oblast přídatné ionizace)

- **Oblast III₁ (oblast úplné proporcionality)** – V této oblasti pracovního napětí dochází k vytváření dalších iontových párů (při nárazové ionizaci), kde každý urychlený iont vytváří k-násobky sekundárních iontů (k je označován jako koeficient zesílení). V tomto pásmu pracují proporcionální detektory.
- **Oblast III₂ (oblast částečné proporcionality)** – K detekci se tato oblast nepoužívá, protože velikost náboje může a nemusí záviset na počáteční ionizaci.
- **Oblast III₃ (oblast Geiger-Müllerova)** – Oblast napětí mezi U_4 a U_5 bývá označována jako provozní rozpětí pro Geiger-Müllerovy trubice. [5], [11]

2.4.2 Ionizační komory

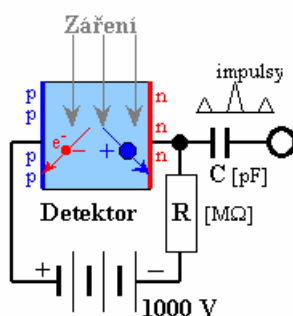
Ionizační komory pracují v oblasti nasyceného proudu, což je zhruba 150 V – 200 V. Jsou tvořeny dvěma elektrodami, které jsou uloženy v plynu. Ten je bez zdroje ionizujícího záření nevodivý. Když mezi elektrody pronikne záření, obvodem začne protékat proud, který je přímo úměrný intenzitě radiace. Komory se používají hlavně pro stanovení dávky a expozice ve vzduchu, ale mohou se použít i pro předměty, které se do komor umísťují. Jejich teplotní odolnost je jedinečná, proto jsou ionizační komory v hutích, válcovnách a podobných provozech, kde jiné detektory být nemohou. [5], [11]



Obr. 4: Schéma ionizační komory

2.4.3 Polovodičové detektory

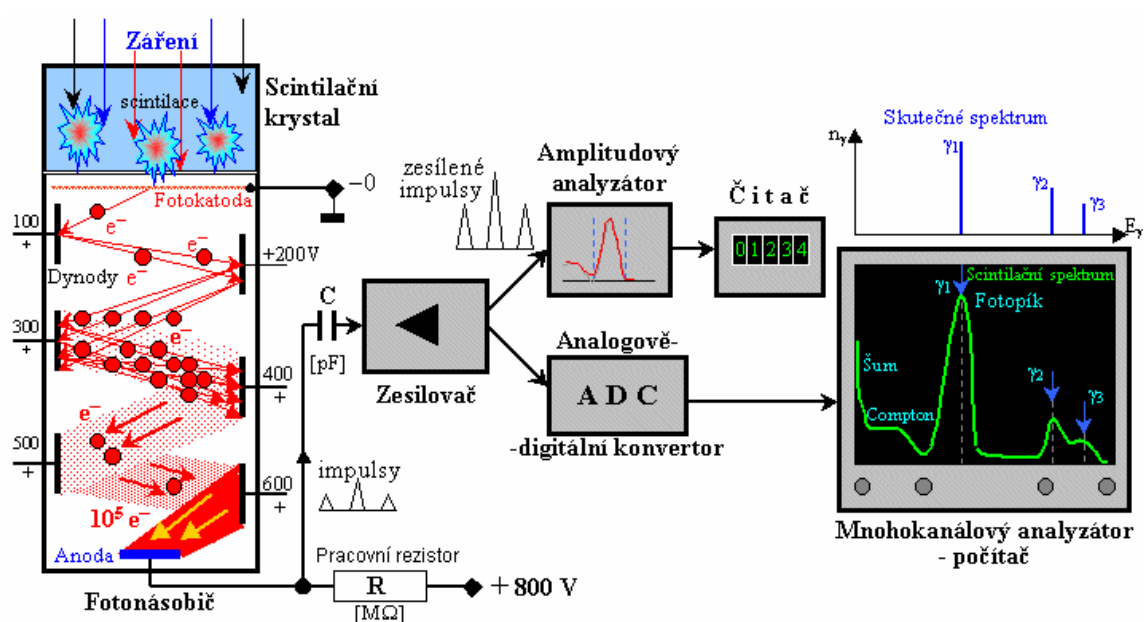
Polovodičové detektory jsou založeny na principu ionizace v pevných látkách. Proniknutím do polovodiče vzniká ionizací pár elektron-díra. Většina elektronů má velkou energii, tudíž způsobuje nárazovou ionizaci, jejíž četnost je závislá na energii částice. Po připojení napětí se pod vlivem elektrického pole pár elektron-díra dá do pohybu ve směru napětí a v obvodu vznikne impuls. Energie dopadající částice se dá vyhodnotit velikostí pulzu. Velkou nevýhodou polovodičových detektorů je skutečnost, že k jejich provozu musí být přítomna velmi nízká teplota (zhruba $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$). [5], [11]



Obr. 5: Schéma polovodičových detektorů

2.4.4 Scintilační detektory

Scintilační detektory patří mezi nejpoužívanější detektory ionizujícího záření. Nalézají uplatnění při detekci gama záření, jelikož pro něj mají nejlepší účinnost. Detektor převádí ionizační energii na viditelné nebo ultrafialové světlo. Velkou výhodou je, že zde nefiguruje žádná mrtvá doba, takže lze provádět spojitá měření, která jsou potřeba například při měření interakce radioaktivních částic s hmotou. Základní schéma i s detekcí ukazuje obrázek níže. [5], [11]

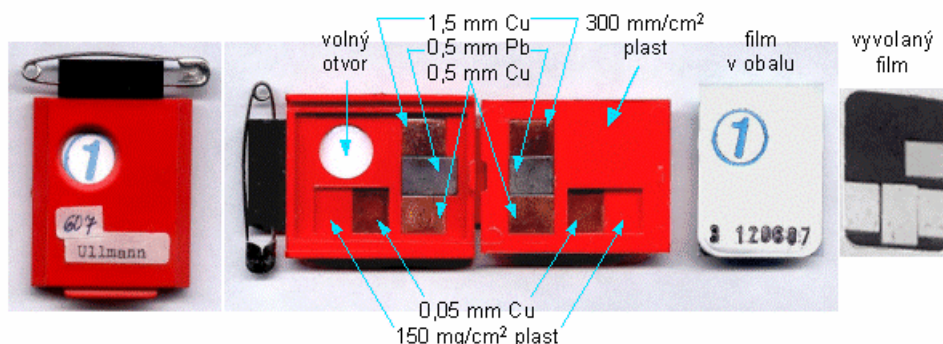


Obr. 6: Schéma scintilačních detektorů

2.4.5 Filmová dozimetrie

Působením ionizujícího záření vzniká záznam obrazu na film, kterým lze po vyvolání určit nejen směr záření a jeho časové rozložení, ale i druh a energii záření. Dozimetrický film má v sobě uloženo několik druhů filtrů. Obvykle to jsou měděné filtry tloušťky 0,05 mm, 0,6 mm a 1,6 mm, plastický 0,05 mm, místo bez filtru (všechny k měření beta a rentgenového záření) a kombinace olova a cínu 0,6 mm (stanovení velikosti záření gama). Místo měděného filtru 0,6 mm lze použít kadmiový k měření tepelných neutronů. Vyhodnocování se provádí podle zčernání pod jednotlivými filtry i nestíněnou plochou. Informace mohou být zkresleny při vystavení

kazety vysoké teplotě, vlhkosti nebo chemikáliím. Velkým problémem může být u některých aplikací citlivost na světlo. [5], [11]



Obr. 7: Filmový dozimetr

2.4.6 Termoluminiscenční dozimetrie

Vystavení radiaci zapříčiní u některých látek vybuzení valenčních elektronů do vodivostního pásu. Tam jsou zachyceny v záchytných centrech. Po zahřátí (z velmi nízké teploty) se elektronům dostane energie, která postačuje k opuštění záchytného centra a zároveň k emitaci viditelného světla či ultrafialového záření. Vhodné materiály k výrobě jsou například fluorid lithný, fluorid vápenatý, síran vápenatý a další. Každá látka má jinou citlivost a energetickou závislost pro různé druhy záření. Vyhodnocení se provádí ve fotonásobiči. Poměr vyzářené energie vůči pohlcené energii z ionizujícího záření je shodný. Dozimetry tohoto typu jsou citlivé na světlo, což je staví do stejných problémů jako dozimetrie filmovou. Oproti ní ale mají termoluminiscenční senzory možnost jejich opakovaného použití a je možné měřit velmi přesně odezvu. Dobrá je i jejich chemická odolnost a možnost sterilizace. Běžné je použití těchto dozimetrů jako prstýnku umístěného na prstě pracovníků. [1], [5], [17]



Obr. 8: Prstový termoluminiscenční dozimetr

2.5 Geiger-Müllerova trubice

Geiger-Müllerovu trubici vytvořil v roce 1908 Hans Geiger. Walther Müller, jehož jméno nese také, spolupracoval s Geigerem až na jejím dalším vývoji. Senzor se řadí mezi plynné ionizační detektory.

Uvnitř trubice je velmi nízký tlak, přibližně 0,01 MPa a celý její objem je vyplněn inertním plynem (helium, neon, argon s možnými příměsemi halogenových plynů nebo organické páry). Jsou zde dvě elektrody, mezi kterými je rozdíl napětí v řádu stovek voltů, ale neprotýká mezi nimi žádný proud. [18], [19]

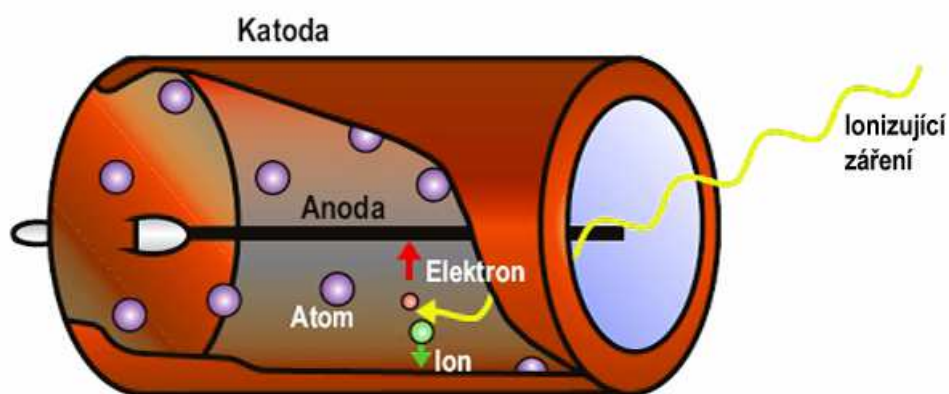
Při průchodu ionizujícího záření stěnou trubice jsou některé z molekul plynu ionizovány, čímž vytvoří kladně nabitě ionty a elektrony. Silné elektrické pole, které je v trubici vytvořené, urychlí směr iontů ke katodě a tok elektronů k anodě. Iontové páry získají dostatečnou energii k ionizaci molekul plynu, čímž spustí lavinu nabitých částic. To má za následek krátký, ale intenzivní proudový impuls. Trubice sama o sobě nerozlišuje typ záření. Toho je možno docílit například stíněním trubice.

Pokud je napětí mezi anodou a katodou dostatečné, je při průchodu záření ionizován veškerý plyn v trubici. V opačném případě může být lavinový efekt pouze částečný, čímž lze podle velikosti vytvořeného pulzu určit iniciační ionizující energii a díky tomu vytvořit proporcionální čítač. Při přepětí dochází k nepřetržitému doutnavému výboji, při němž nedochází k detekci záření. Rozsah provozního napětí je pro každý typ trubice jiný. Záleží na výrobci, typu plynu uvnitř, velikosti trubice a dalších aspektech. Napětí mezi elektrodami by nemělo kolísat, jelikož se od něj odvíjí počet pulzů, které trubice při konstantní intenzitě záření generuje. Čím vyšší je provozní napětí (v rámci jeho rozmezí), tím vyšší je i citlivost senzoru. Obecně jsou trubice citlivější na záření s menší energií.

Moderní trubice mají na jednom konci okno, kterým může ionizující záření snadno proniknout. Na druhém konci jsou umístěny elektrody. Okno může být buď skleněné nebo slídové. Skleněným oknem sice neprojde alfa záření, ale výroba takové trubice je levnější. Trubice se slídovým oknem je také mnohem křehčí. Většina trubic detekuje záření beta a gama. Pro lepší detekci gama záření je potřeba těžších vzácných plynů jako jsou xenon nebo krypton, protože bez nich projde většina gama fotonů kvůli nízké hustotě plynu bez interakce. Detekovat neutronové záření mohou pouze některé typy trubic s borem nebo fluoridem boritým, kterým je potažena jejich vnitřní stěna.

Neutrony reagují s jádry boru, při čemž se vytváří záření alfa, které spustí běžnou lavinu nabitých částic.

Při výboji, který vznikne lavinovým efektem hrozí, že vytvoří stálý proud, který by znemožnil další detekci a též by mohl poškodit elektrody nebo náplň. Proto se uvnitř vyskytuje příměs par metylalkoholu nebo bromu, které vytvoří zhášedlo. To omezí trvání výboje na několik (desítek) mikrosekund. Detektor není schopen zaznamenat částice, které přicházejí za sebou v intervalu kratším než je samotná délka výboje. Po ionizaci jednou částicí je trubice jistou dobu necitlivá – obvykle se značí jako mrtvá doba trubice. Jestliže se nezahrne do výpočtu, nastává u vyšších intenzit záření k nezanedbatelné chybě v měření. [4], [19]



Obr. 9: Vnitřní schéma Geiger-Müllerovy trubice

2.5.1 Popis parametrů Geiger-Müllerovy trubice

Při výběru vhodných Geiger-Müllerových trubic se vyskytl problém s nedostatečnou dostupností jejich přesných specifikací. Vzhledem k tomu, že jedním z hlavních faktorů při výběru byla cena, množina vhodných senzorů se zúžila především na starší trubice ruské výroby, jejichž dokumentace je většinou psaná azbukou.

V cenově dostupnějších kapesních dozimetrech k detekci beta a gama záření se po havárii v Černobylu používal nejčastěji typ SBM-20, jehož technické specifikace popisuje následující tabulka.

Tabulka 6: Popis parametrů Geiger-Müllerovy trubice SBM-20 [20]

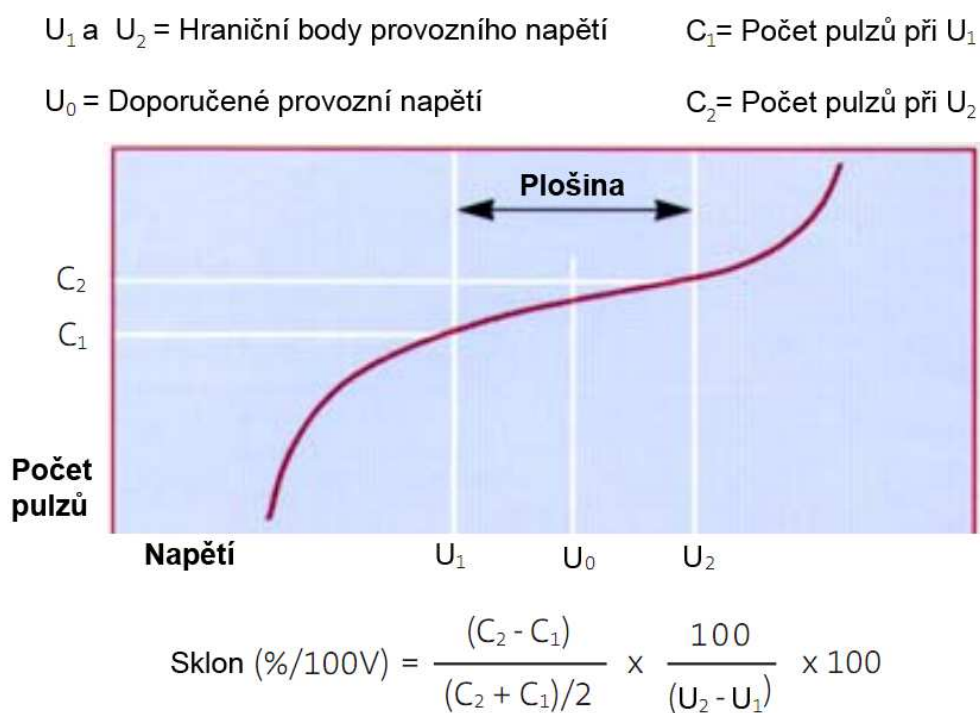
Parametry:	Geiger-Müllerova trubice – SBM-20
Složení plynu	neon, brom, arzen
Detekce záření	gama, beta
Materiál katody	nerezová ocel
Délka	108 mm
Efektivní délka	91 mm
Průměr	11 mm
Efektivní průměr	10 mm
Rozsah pracovních teplot	-60 °C až +70 °C
Hmotnost	10 gramů
Plošná hustota stěny	40 mg / cm ²
Tloušťka stěny trubice	0,05 mm
Minimální předřadný odpor	1,0 MΩ
Doporučený předřadný odpor	5,1 MΩ
Provozní rozsah napětí	350 V – 475 V
Doporučené provozní napětí	400 V
Prahové napětí	260 V – 320 V
Délka sedla	více než 100 V
Stoupání sedla	0,1 % / 1 V
Mrtvá doba při napětí 400 V	190 μs
Pracovní rozsah	0,004 μR/s – 40 μR/s (0,14 – 1440 μSv/hod)
Citlivost na gama záření Ra ²²⁶	29 pulzů za sekundu při intenzitě mR/hod
Citlivost na gama záření Co ⁶⁰	22 pulzů za sekundu při intenzitě mR/hod
Počet impulsů způsobených pozadím	60 pulzů za minutu
Kapacita trubice	4,2 nF
Životnost	více než 2·10 ¹⁰ pulzů

Některé z parametrů nemusí být obecně známy, proto se pozastavím nad jejich podrobnějším vysvětlením.

Počet impulsů způsobených pozadím – Udává maximální počet pulzů způsobených vlivem vnějšího prostředí – například kosmického záření. Měří se uvnitř komory s olověným pláštěm silným přibližně 5 cm, jež je lemován hliníkem.

Prahové napětí – Nejnižší napětí, při němž trubice začíná reagovat minimálním počtem pulzů na radioaktivitu.

Stoupání sedla – Stoupání sedla je definováno jako procentuální změna citlivosti v závislosti na změně provozního napětí v rámci délky sedla (rozsahu provozního napětí). [22]



Obr. 10: Grafické znázornění a výpočet sklonu plošiny

Mrtvá doba trubice – kapitola viz níže.

2.5.2 Mrtvá doba Geiger-Müllerovy trubice

Tento poměrně důležitý parametr je často přehlížen, proto mu věnuji samostatnou kapitolu. Mrtvá doba trubice je doba, po kterou je senzor mezi předchozím a následujícím pulzem necitlivý. Tento čas by se měl zohledňovat při výpočtu celkového počtu pulzů za minutu, jelikož při vyšších intenzitách záření se podílí na velké nepřesnosti měření.

Příklad výpočtu: Na trubici bylo detekováno během jedné minuty 6540 pulzů. Kolik pulzů bylo při mrtvém času trubice 190 μ s ztraceno?

Řešení:

Celkový počet pulzů = obdržené pulzy za sekundu / 1 – (obdržené pulzy za sekundu · mrtvá doba)

Celkový počet pulzů = 109 / 1 – (109 · 0,000190) = 111,305 pulzů za sekundu.

Při dané hodnotě radiace bude vlivem mrtvého času trubice **ztraceno přibližně 2 % pulzů**. [21]

2.6 Amatérsky vyráběné dozimetry

Ceny osobních dozimetrů jsou, i přes jejich relativně jednoduchou konstrukci, dosti vysoké. Zatímco jednoduchý přístroj k měření napětí a proudu stojí pár set korun, u měřiče ionizujícího záření to je zhruba desetinásobek a více. Proto se několik různých nadšenců rozhodlo (stejně jako já) postavit si svůj tzv. „DIY“ (Do It Yourself) dozimetr. V následujících podkapitolách stručně rozeberu tři volně dostupné projekty.

2.6.1 Dozimetr Marcose Yarza a Davida Gascona

Internetový portál cooking-hacks, který patří pod The Libelium Team vytvořil nástavbu pro systém Arduino Uno jako reakci na nehodu v japonské Fukušimě. Má sloužit k individuálnímu měření radiace nejen v Japonsku. Autory jsou Marcos Yarza a David Gascon.

Celý projekt je volně dostupný jak po stránce hardwarové, tak i softwarové. Napájecí napětí pro trubici lze měnit v rozsahu 400V – 1000V, tudíž je možno použít více druhů trubic. Oficiálně jich je podporovaných zhruba deset. Informace o aktuální hodnotě radiace je zobrazena na LCD displeji. K dispozici je i pět diod, které se rozsvítí při překročení volitelné hranice radiace. Reproduktor signalizuje každý přijatý pulz. Celý systém se napájí 5 V.

Software na zpracování je velmi jednoduchý, psaný v jazyce pro Arduino a šiřitelný pod GNU licencí. Program počítá pouze časovou dávku z pulzů přijatých za dobu deseti vteřin. Tento interval je konstantní při jakýchkoli dávkách a nijak se nepočítá s mrtvým časem trubice. Hodnoty jsou zasílány i po sériové lince, takže lze data přijímat a případně dále vyhodnocovat.

Celý systém nelze koupit jako stavebnici. Je možné zakoupit již osazenou desku buď bez trubice (75 EURO) nebo s čínskou trubicí od firmy North Optic, která detekuje záření beta a gama (115 EURO). Vzhledem k velikosti je doporučován americký detektor LND 712, který je bohužel od incidentu v Japonsku nedostatkovým zbožím.

Na stránce je i popsána zajímavá modifikace, která přidává modulu podporu ZigBee, GPRS, GPS a k napájení používá Lithiovou baterii o kapacitě 24 Wh. Při použití vícero modulů lze takto pokrýt třeba celou oblast jaderné elektrárny a sbírat data na dálku bezdrátově. [18]



Obr. 11: Modul pro Arduino s trubicí North Optic (The Libelium Team)

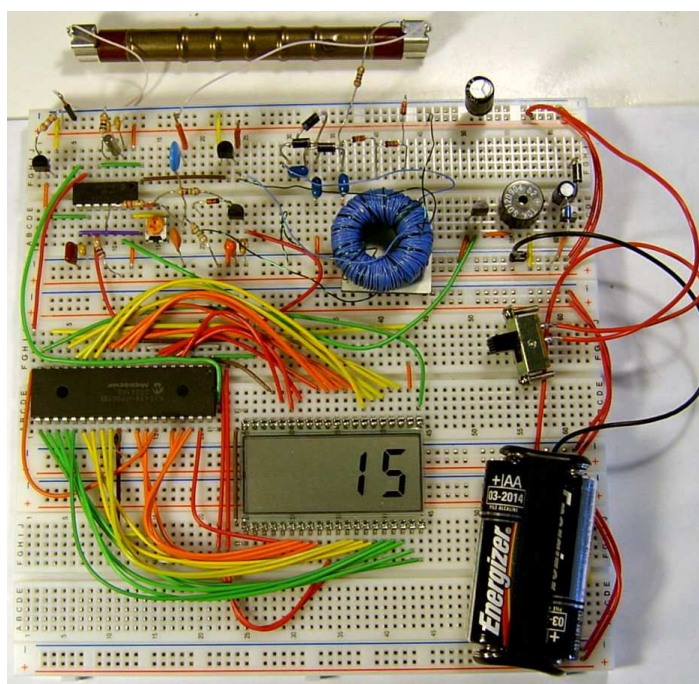
2.6.2 Kopie ruského dozimetru RKS-20

Informace jsem čerpal z anglického přepisu článku ruského magazínu Radio, který byl publikován roku 2010 v číslech 11 a 12. Přesné autory se mi bohužel nepodařilo zjistit. Tento dozimetr je založen na modelu RKS-20, který se vyráběl v Rusku.

Nejedná se o uživatelem modifikovatelný obvod určený pro více druhů trubic. Hardware i software je navržen primárně pro trubici SBM-20. Systém je napájen dvěma tužkovými bateriemi. Podle informací z časopisu je průměrný proudový odběr 0,5 mA, takže zařízení dokáže bez výměny napájení fungovat více než 1000 hodin.

Dozimetr zobrazuje data na čtyřmístném sedmi segmentovém displeji, který je řízen jednouúčelovým řadičem Microchip AY0438, jenž je přímo pro danou operaci naprogramován výrobcem. Jako výpočetní procesor byl použit Microchip PIC16F684. Výpočet časové dávky pracuje na principu klouzavého průměru vytvořeného ze třiceti hodnot. Každý zachycený pulz je též přehrán reproduktorem a signalizován LED diodou.

Celý projekt je pravděpodobně volně šiřitelný (jak nebo pod jakou licencí není nikde napsáno), protože na stránkách je ke stažení zdrojový kód v Assembleru nebo rovnou HEX soubor, nákres schématu v programu EAGLE a původní článek v ruštině. [23]



Obr. 12: Kopie ruského dozimetru RSK-20 na nepájivém poli

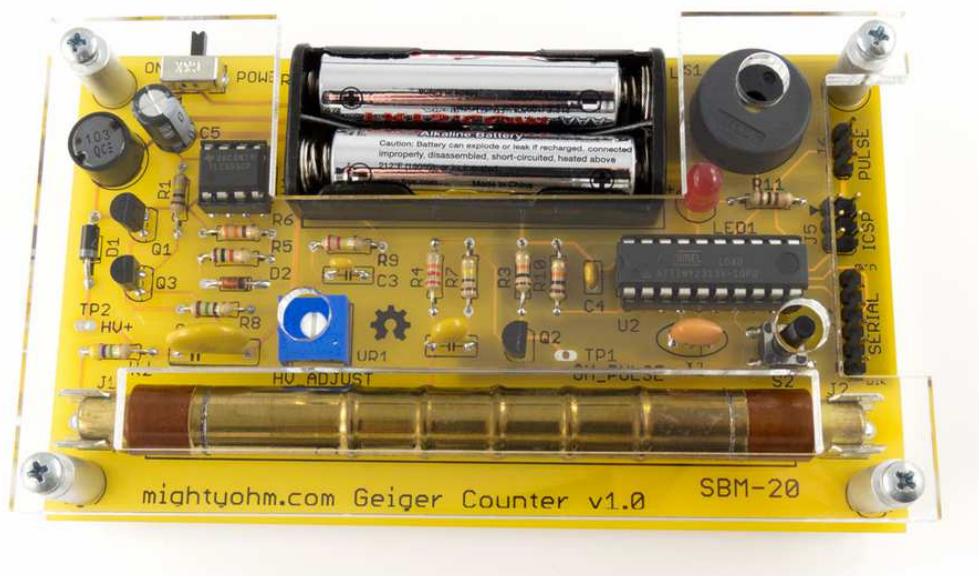
2.6.3 Dozimetr Jeffa Keyzera z projektu MightyOhm

Jeff Keyzer, který je autorem stránek projektu MightyOhm, nabízí mimo dalších produktů i svoji verzi Geigerova čítače. Stejně jako první projekt, byl vytvořen až po havárii ve Fukušimě.

Projekt je volně ke stažení, dostupné jsou návrhy plošného spoje i software (psaný v jazyce C) pro mikrokontrolér. Pro detekci lze použít tři ověřené druhy trubice – SI-3BG, SI-1G a SBM-20. Vzhledem k tomu, že napětí je regulovatelné potenciometrem od 300 V do 600 V, bude možno použít i jiné trubice. Signalizace je zvuková (piezo reproduktor, který lze vypnout) a grafická – LED dioda. Napájí se pomocí dvou tužkových baterií.

Mozkem je mikroprocesor Atmel ATtiny 2313, který zajišťuje komunikaci po sériové lince – detektor lze připojit k PC, kde zobrazuje počet pulzů za minutu a ekvivalentní časovou dávku. Ta je počítána opět klouzavým průměrem, ale pouze z 5 hodnot. Mrtvá doba trubice není nijak řešena. Na tištěném spoji je konektor pro ICSP, kterým lze do procesoru nahrát program. Také jsou zde piny, na které se posílá mikroprocesorem upravený výstup z trubice (obdélníkové pulzy). Ty lze pak dále zpracovávat.

Na stránkách je přímo formulář k nákupu, který lze provést přes systém PayPal, což považuji za velkou výhodu. Kit k sestavení včetně trubice SBM-20 a pěkného průhledného pouzdra lze zakoupit za \$114.90. Bez trubice je cena \$39.95. Zakoupit lze i samotný tištěný spoj, který stojí \$14.95. Již sestavený kit zakoupit nelze. [24]



Obr. 13: Sestavený dozimetr Jeffa Keyzera (včetně průhledného pouzdra)

2.7 Osobní dozimetr Gamma-Scout a další

Dozimetr Gamma-Scout je hojně rozšířeným přístrojem díky své obrovské výdrži na baterii, detekci všech druhů záření, a také možnosti připojení k počítači přes USB port. Je určen ke zjišťování všech možných rizik ionizujícího záření – z potravin, stavebnin atp. Pomocí stínění lze omezit detekci záření na beta + gama nebo pouze gama.

Technické specifikace:

Rozsah měření dávkového ekvivalentu za časovou jednotku: 0,01 – 1000 $\mu\text{Sv/h}$

Rozsah měření kumulovaného dávkového ekvivalentu: 0,01 μSv – neomezeno

Přesnost měření v daném rozsahu: $\pm 5\%$

Rozsah energie zachyceného gama záření: od 30 keV

Rozsah energie zachyceného beta záření: od 200 keV

Rozsah energie zachyceného alfa záření: od 4 MeV

Rozměry: 165 x 72 x 30 mm

Hmotnost: 130 gramů

Rozsah pracovních teplot: -40 až $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$

Napájení: lithium-chloridová baterie

Výdrž při běžném radiačním pozadí: 10 let

Typ senzoru: G-M trubice LND 712

Přibližná cena v ČR: 10.860 Kč

Mezi další funkce přístroje patří: Zvukový alarm při překročení volitelné dávky, možnost připojení k počítači a zobrazení až 32 000 hodnot z předchozích měření.

Na displeji je krom číselného vyjádření hodnoty také logaritmická stupnice pro lepší grafickou názornost.

[25], [26]



Obr. 14: Dozimetr Gamma-Scout

Tabulka 7: Srovnání dalších osobních dozimetrů [27], [28], [29], [30]

Název dozimetru	TERRA-P MKS-05	RADEX 1503+	PM1208
			
Dávkový ekvivalent	0,1 – 999 $\mu\text{Sv/h}$	0,05 – 9,99 $\mu\text{Sv/h}$	0,1 – 4000 $\mu\text{Sv/h}$
Kumulovaný ekvivalent	0,001 – 9999 mSv	–	0,001 – 9999 mSv
Přesnost měření	$\pm 25 \%$	$\pm 15 \%$ + 6/právě měřená hodnota	$\pm 25 \%$
Rozsah energie beta	500 keV – 2 MeV	250 keV – 3,5 MeV	–
Rozsah energie gama	50 keV – 2 MeV	100 keV – 1,25 MeV	60 keV – 1,5 MeV
Rozměry	120 x 52 x 26 mm	105 x 60 x 26 mm	50 x 45 x 20 mm
Hmotnost	150 gramů	90 gramů	90 gramů
Rozsah pracovních teplot	–10 až 50 °C	–40 až +75 °C	0 až 45 °C
Napájení	2 ks AAA baterií	2 ks baterií AA	1 ks lithiové bat.
Délka provozu na baterii	6000 hodin	500 hodin	8760 hodin
Typ senzoru	trubice SBM-20	trubice SBM20-1	neznámý
Přibližná cena	11.820 Kč	6.000 Kč	23.000 Kč
Další funkce	Zvukový alarm při překročení nastavené hranice, hodiny.	Zvukový alarm při překročení volitelné dávky.	Informace o aktuálním čase, odolnost vůči vodě do 100 metrů, budík.

3. Návrh a realizace hardware

Práci na návrhu jsem si rozdělil do několika dílčích celků. Nejprve bylo potřeba vybrat senzor ionizujícího záření. Od začátku bylo více méně jasné, že se bude jednat o Geiger-Müllerovu trubici. Ta vyžaduje zdroj napětí v řádech stovek voltů (v závislosti na typu a výrobci). Pulzy vyvolané zářením jsou poměrně slabé, proto bylo potřeba je zesílit a nějakým způsobem indikovat (zvukově, světelně). Zároveň byla nutná úprava pulzů do podoby, kterou je schopen přijmout mikrořadič. Jeho správné zvolení bylo též důležité, jelikož jsou od něj vyžadovány poměrně složité výpočty a také zobrazování dat na dvouřádkovém grafickém displeji.

Vzhledem k přenositelnosti je přístroj napájen dvěma tužkovými bateriemi. Ty nelze považovat za stabilizovaný zdroj. Lze s nimi napájet měnič pro trubice, ale mikrořadič, displej a další obvody nikoliv. Proto bylo potřeba zvolit vhodný zvyšující měnič. Mým cílem bylo též zajistit, aby přístroj vydržel co nejdéle na jednu sadu baterií. Toho jsem docílil oddělením signalizační a výpočetně-zobrazovací části. Není vždy nutné znát přesnou hodnotu radiace. Obvykle je potřeba ji měřit přesněji až při zjištění nějaké abnormality. Proto je na výběr možnost detekce se všemi statistickými údaji (se zapnutým mikropočítačem a displejem) nebo bez nich (v provozu vše kromě části s mikropočítačem, podstatně nižší příkon). Druhou možnost detekce lze uplatit také při připojení k počítači, kdy je řadič napájen z USB portu.

Po dokončení vývoje na zkušebním nepájivém poli jsem se rozhodoval, zda budu navrhovat i plošný spoj. Jelikož v budoucnu nepředpokládám realizaci dalších přístrojů stejného nebo podobného typu, rozhodl jsem se součástky naletovat pouze na tzv. prototype board, což je obyčejné pájivé pole. To se ukázalo jako velmi nepraktické při výrobě krabičky. I přesto, že jsem se snažil umisťovat součástky na co nejmenší prostor, byl by rozměr plošného spoje určitě menší a uchycení ke krabičce snazší.

Původní předpoklad o umístění trubic přímo do krabičky vedle plošných spojů se ukázal jako nepříliš vhodný. Trubice mají detekční plochy na celé ploše válce, tudíž by byly z jedné strany stíněny jinými součástkami. Proto jsou uloženy do samotné krabičky a k hlavní části dozimetru připojeny pomocí krátkého kabelu s nízkou kapacitou drátů. Vzhledem k možnosti detekovat i velmi vysoké hodnoty záření se mi tato volba jeví jako velmi praktická. Z důvodu velikosti není blokové schéma přímo v samotné práci, ale je zakresleno v příloze A.

3.1 Výběr vhodných Geiger-Müllerových trubíc

V souvislosti s havárií jaderné elektrárny ve Fukušimě, ke které došlo 11. března 2011, vznikla poměrně velká jaderná panika. Poptávka po dozimetrech a senzorech ionizujícího záření všeho druhu vzrostla tak, že prodejci nabízeli dozimetry i Geiger-Müllerovy trubice za mnohem vyšší ceny než kdy dříve. Trubici jsem začal shánět v květnu 2011, což nebylo ideální.

Moje požadavky byly především nízká cena, malé rozměry, vysoká citlivost a možnost odebrat pouze jeden kus. Na různých internetových stránkách byla vychvalována trubice LND 712, kterou vyrábí americký výrobce LND. Jako senzor ji používá například dozimetr Gamma-Scout. Většina prodejců, kteří se zaměřují na měřicí techniku ionizujícího záření, bohužel nechce slyšet o zasílání zboží do Evropy, natož pak České republiky. A pokud ano, je minimální odběr 10 a více kusů.

V některých českých obchodech byly Geiger-Müllerovy trubice nabízeny také, ale jejich cena byla vysoká a citlivost dost nízká. Nakonec mě napadlo podívat se na aukční server eBay, kde byla nabídka velká, takže jsem zde detektor nakonec koupil. I když jsem zprvu chtěl trubici s detekcí alfa záření, kvůli vysoké ceně jsem od této myšlenky ustoupil. Prodejce mi nabídl, že za mírný poplatek mi k zakoupené trubici Vniitfa Si-29bg přidá ještě Zeltu Si-25g s nízkou citlivostí, o kterou není žádný zájem.

Za cenu \$50 jsem tedy získal dva senzory. Vzhledem k této skutečnosti mě napadlo vytvořit dozimetr s dvěma trubicemi a přepínáním rozsahů, což není moc běžné. Některé měřicí systémy sice obsahují dvě trubice, ale ty jsou stejné a slouží pouze ke zvýšení citlivosti a přesnosti měření. Parametry trubice Vniitfa Si-29bg popisuje tabulka č. 9. O trubici Zelta Si-25g se mi nepodařilo najít příliš mnoho údajů, všechny zjištěné informace jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tabulka 8: Parametry Geiger-Müllerovy trubice Zelta Si-25g [31]

Parametry	Trubice ZELTA Si-25g
Provozní rozsah napětí	370 – 410 V se sklonem plošiny 0,25 % / 1 V
Minimální předřadný odpor	3 MΩ
Rozměry a hmotnost	60 mm x 10 mm x 10 mm, 15 gramů
Maximální časová dávka	2 Sv / hod

Tabulka 9: Parametry Geiger-Müllerovy trubice Vniitfa Si-29bg [32]

Parametry	Trubice Vniitfa Si-29bg
Detekce záření	gama, beta s vysokou energií
Rozsah energie záření gama	54 keV – 1,25 MeV
Délka	55 mm
Průměr	11 mm
Rozsah pracovních teplot	–60 °C až +70 °C
Hmotnost	10 gramů
Minimální předřadný odpor	3 MΩ
Provozní rozsah napětí	360 V – 440 V
Doporučené provozní napětí	400 V
Prahové napětí	250 V – 320 V
Délka sedla	více než 100 V
Stoupání sedla	0,125 % / 1 V
Mrtvá doba při napětí 400 V	190 μs
Pracovní rozsah	0,001 μR/s – 40 μR/s (0,036 – 1,44 mSv/hod)
Citlivost na gama záření Co ⁶⁰	14 pulzů za sekundu při intenzitě 1 mR/hod
Počet impulsů způsobených pozadím	30 pulzů za minutu

Informace o rozsahu energie záření gama a citlivosti na Co⁶⁰ pochází z popisu aukce na nákupním portálu ebay.com. Stránka již není k dispozici, údaje tedy nelze považovat za příliš důvěryhodné.

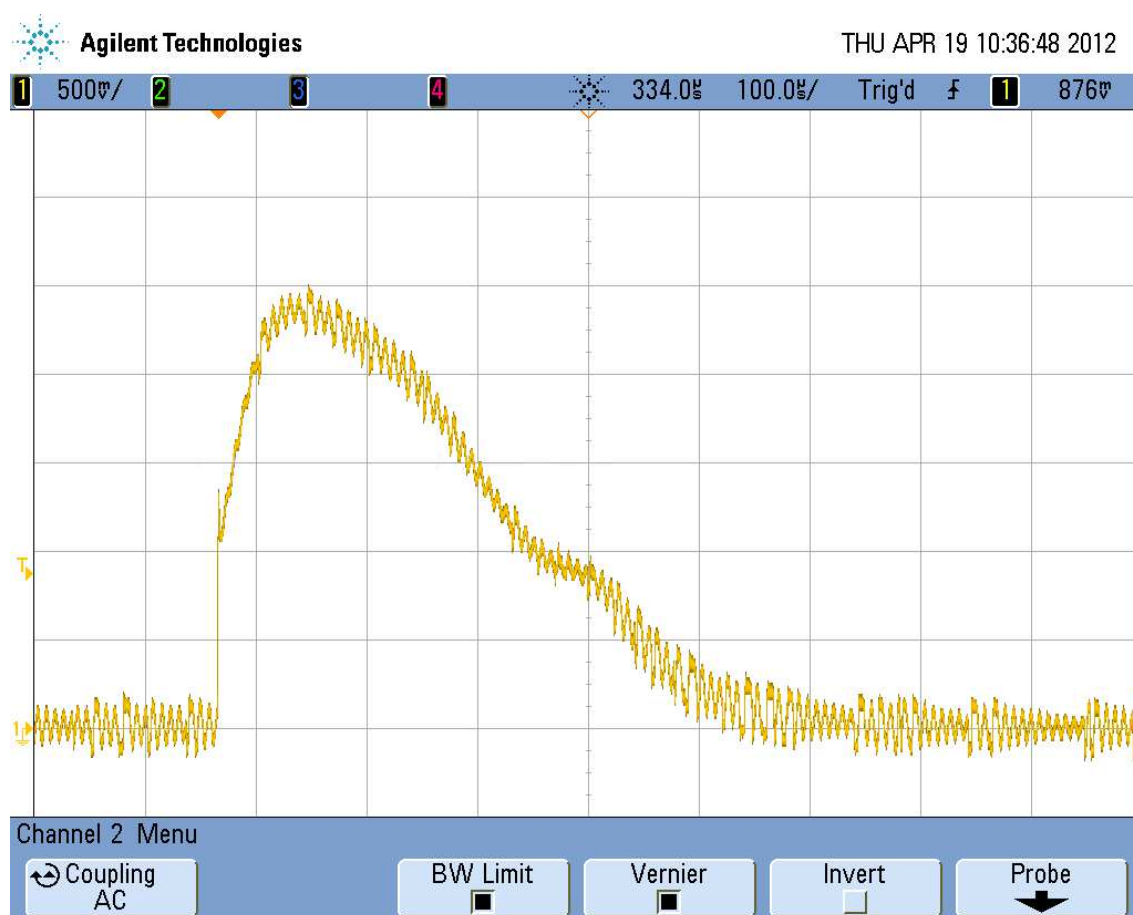
3.2 Měnič pro Geiger-Müllerovy trubice

Z tabulek parametrů je vidět, že ideální napájecí zdroj pro obě trubice by měl mít napětí v rozmezí 370 až 410 voltů, ideálně rovných 400. Nejprve jsem se snažil najít nějaké vhodné zapojení v archivech časopisu Amatérské rádio. Bohužel jsem nacházel spíše výkonové zdroje, které nejsou pro napájení trubic vhodné. Začal jsem tedy hledat na internetu, kde jsem našel poměrně jednoduchý měnič se zpětnou vazbou a paralelní regulací určený přímo pro napájení Geiger-Müllerových trubic. [33] Schéma zapojení tak, jak jsem ho použil a upravil já, je vyobrazeno v příloze B.

Výsledné napětí 400 V je získáno měničem se dvěma tranzistory. T1 budí transformátor a T2 funguje jako zpětná vazba. Primární vinutí je upraveno na 2x 15 závitů s šířkou drátu 0,3 mm. Sekundární vinutí má 1000 závitů. Transformátorem by bylo možné dodat rovnou napětí 400 V, ale použití násobiče sníží ztráty v jádře (menší amplituda napětí, kapacitní ztráty atp.). Když napětí na kondenzátoru C5 přesáhne napětí 400 V, začne Zenerovými diodami protékat proud, což způsobí omezení střídavy oscilátoru. I přes svou jednoduchost je výstupní napětí stabilní a průběh poměrně hladký (viz příloha C).

Frekvence spínání není vzhledem k takto realizované zpětné vazbě pevně daná, proto nelze efektivně odstranit šum způsobený oscilací. Dobře je viditelný na obr. 15, který zobrazuje průběh pulzu trubice Vniitfa Si-29bg. Výboj druhé trubice je zobrazen na druhém snímku přílohy C.

Obr. 15: Průběh pulzu Geiger-Müllerovy trubice Vniitfa Si-29bg



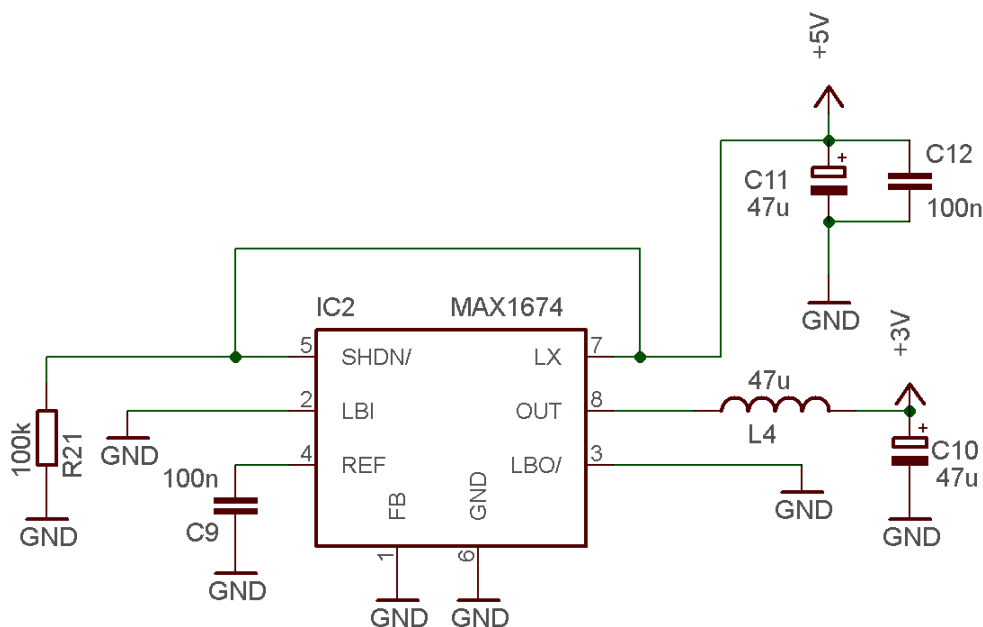
3.3 Napájecí zdroj pro mikrořadič, displej a další komponenty

Některé součástky vyžadují stabilizovaný zdroj, proto bylo nutné vybrat vhodný zvyšující měnič na 5 V. Očekávaný proudový odběr na tomto napětí neměl, ani při pesimistickém odhadu, přesáhnout 200 mA. Požadovaný rozsah vstupního napětí odpovídal napájení pomocí dvou tužkových baterií, tedy 2,0 – 3,6 V.

Jako ideální pro danou potřebu mi přišel integrovaný obvod Maxim MAX1674, který zmiňované požadavky splňuje. Vstupní napětí může být v rozsahu 1,1 – 5,5 V. Při odběru 1 – 200 mA dosahuje obvod účinnosti více než 90 %. Maximální možný proud je 1 A, kterého lze dosáhnout jen při vstupním napětí 3,6 V a vyšším. Při vstupním napětí 2,0 V je maximální proudová zatížitelnost 250 mA. Maximální proud závisí také na tlumivce L4 [34], která by měla mít co nejmenší odpor a největší maximální proud.

Průběhy výstupního napětí zobrazuje příloha D. Schéma zapojení pro výstupní napětí 5 V a vypnutou detekci nízkého napětí vstupu viz obr. 16. [35]

Obr. 16: Schéma zapojení MAX 1674 pro výstupní napětí 5 V

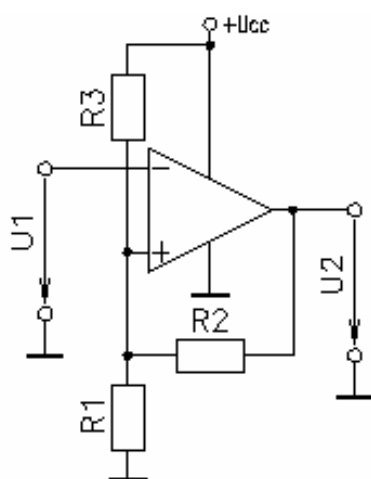


Jediný problém s realizací této části nastal ve chvíli, když mi tento obvod dorazil v pouzdře MSOP8 a ne SOP8, jak jsem předpokládal. Řešení spočívalo v jiné redukci na DIP, kterou se mi naštěstí podařilo sehnat.

3.4 Zesílení a úprava pulzů

Výstupy z trubic bylo potřeba převést na logické úrovně, abych je mohl snadno detekovat mikrořadičem. Byla zde možnost využít k detekci integrované A/D převodníky mikrokontroléru, to mi ale přišlo jako špatné řešení (detekce A/D převodem je velmi pomalá). Proto jsem raději použil integrovaný obvod LM2903, který obsahuje dva operační zesilovače (každý pro jednu trubic). Nevyžaduje symetrické napájení a doba odezvy je 1 μ s. Kladné saturační napětí U_{S+} se při napájecím napětí $U_{CC} = 5$ V rovná 4,75 V, záporné saturační napětí U_{S-} je pak 0,25 V. Operační zesilovač jsem kvůli šumu zapojil jako invertující komparátor s hysterezí a nesymetrickým napájením, viz obr. 17. [36], [37]

Obr. 17: Zapojení operačního zesilovače jako invertující komparátor s hysterezí



$$U_{p+} = U_{cc} \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3} + U_{S+} \frac{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}}{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2}$$

$$U_{p-} = U_{cc} \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3} + U_{S-} \frac{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}}{\frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} + R_2}$$

Ze snímků pořízených osciloskopem jsem určil u první trubice horní překlápěcí napětí U_{p+} na přibližně 2,15 V a dolní překlápěcí napětí U_{p-} na 1,6 V. U druhé trubice jsem hodnoty nastavil na 1,05 V a 0,55 V. Podle vzorců z obr. 17 připadají hodnoty rezistorů u první trubice na: $R_1 = 1,6$ k Ω , $R_2 = 12$ k Ω , $R_3 = 12$ k Ω ; u druhé trubice na: $R_1 = 1,6$ k Ω , $R_2 = 8$ k Ω , $R_3 = 3$ k Ω . Na obr. 18 je zobrazen průběh napětí pulzu na trubici Vniitfa Si-29bg spolu s výstupním napětím komparátoru. V příloze E je znázorněna stejná dvojice průběhů, ovšem pro trubicí Zelta Si-25g. Též je vyobrazen prudký pokles pulzu a časové zpoždění při změně stavu komparátoru.

Obr. 18: Průběh pulzu z trubice a výstupního napětí komparátoru

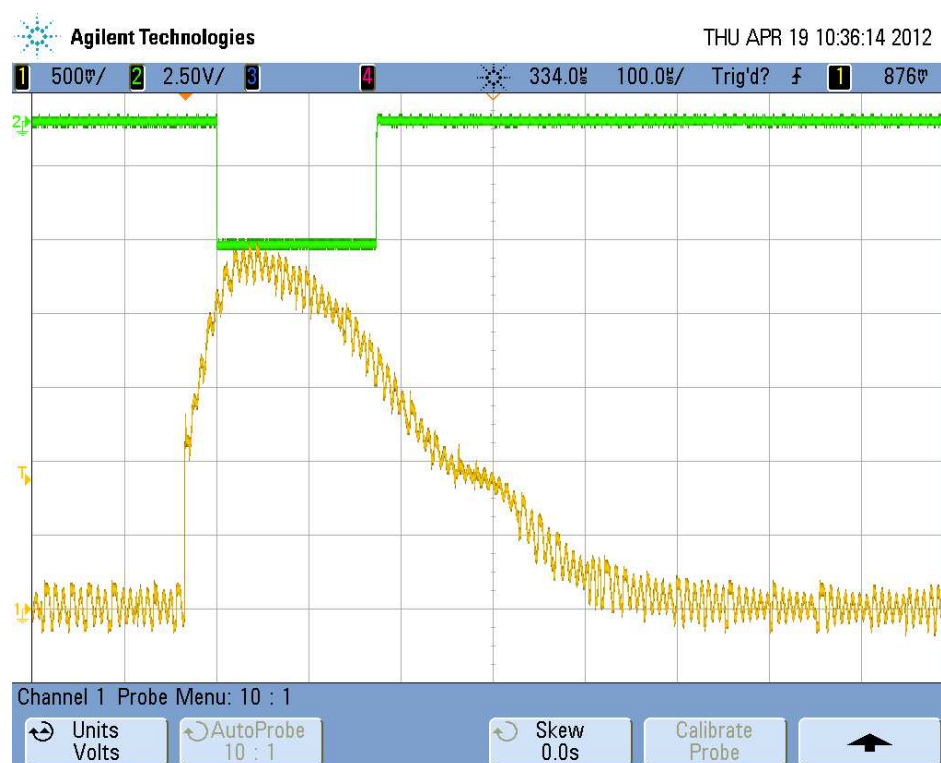


Schéma zesilovače pulzů spolu s komparátory je v příloze F. Přepínačem se vybírá trubice, jejíž vygenerované pulzy se zesilují PNP tranzistorem (v zapojení se společným emitorem s uzavřením obvodu pro střídavé pulzy), přehrávají reproduktorem a zobrazují LED diodou. Jako spínače jsou použity unipolární tranzistory, protože nesnižují napětí o přechod báze-emitor. Pro případ, že by se z trubic naindukovalo vyšší napětí, umístil jsem do obvodu Zenerovu diodu v závěrném směru, která napětí nad 5,6 V svede na zem.

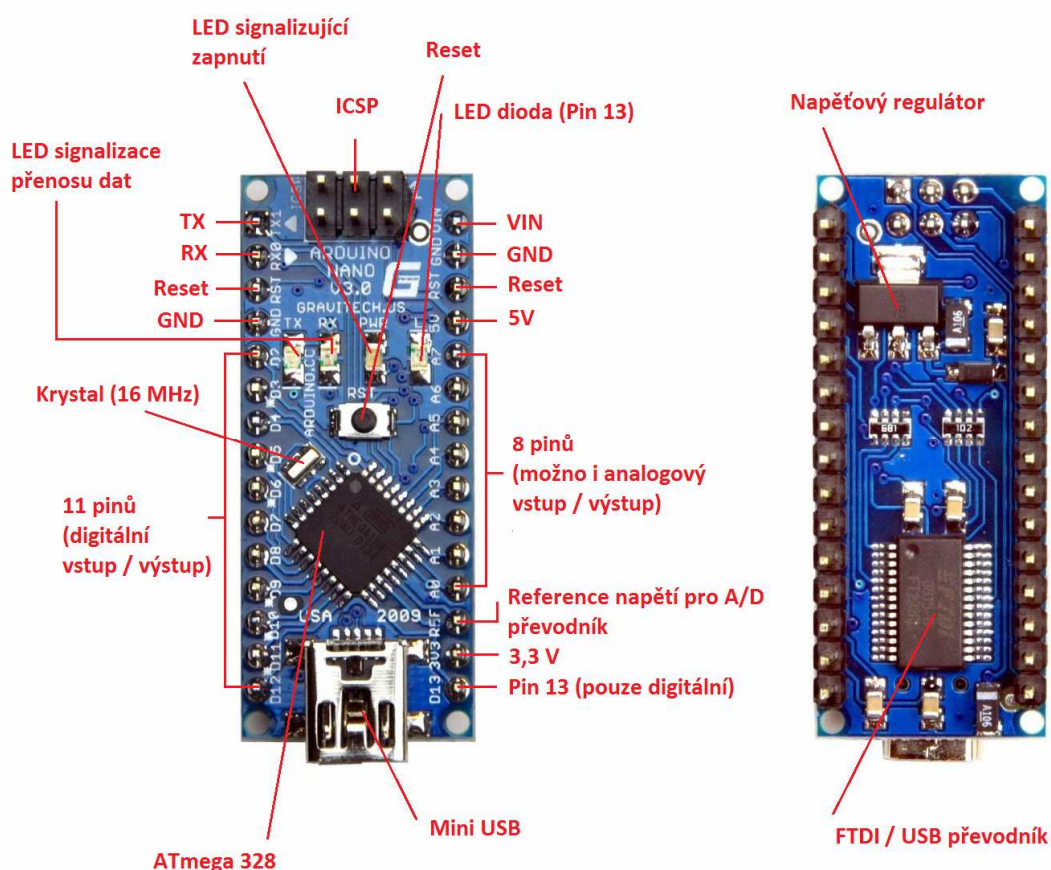
3.5 Výběr a popis mikrokontroléru

Výběr mikrořadiče byl svým způsobem hodně omezený, protože jsem chtěl procesor programovat ve vývojovém prostředí Arduina, k čemuž je do procesoru potřeba nahrát speciální bootloader. List kompatibilních procesorů bohužel není příliš velký a je omezen pouze na mikrokontroléry Atmel ATmega. Já si nakonec vybral místo samotného mikrořadiče rovnou celou vývojovou desku Arduino Nano, která je vhodná i pro testování na nepájivém poli. Je zde napěťový regulátor a převodník pro komunikaci přes USB, kterým lze zároveň desku také napájet.

3.5.1 Arduino Nano

Celý projekt Arduino je volně dostupný jak po softwarové, tak i hardwarové stránce. Všechny druhy vývojových desek si lze oficiálně zakoupit již hotové nebo jako stavebnici. Kromě toho existuje další skupina prodejců (především z Číny), kteří tvoří podstatně levnější klony, jejichž funkce je totožná s originálem. Toho jsem využil a za zhruba třetinovou cenu oficiálního výrobku zakoupil Arduino Nano v.3, které obsahuje mikroprocesor ATmega328, jež by měl pro realizaci firmware dozimetru stačit.

Obr. 19: Popis Arduina Nano s procesorem ATmega 328



Deska obsahuje napěťový regulátor s možností použití 5 V a 3,3 V výstupů, což může vyvolat otázku, k čemu mám v obvodu zvyšující měnič MAX 1674. Nepodařilo se mi totiž zjistit přesný typ regulátoru (nápis je záměrně poškozen), tedy nevím ani jeho přesnější parametry. Podle různých diskuzí (již bohužel nejsou dostupné) je navíc jeho účinnost velmi špatná. V opačném případě bych přivedl napětí z 9 V baterie na vstup VIN (rozsah 7 – 12 V), výstupem 3,3 V napájel měnič pro trubice a 5 V například komparátor. [38]

3.5.2 Atmega 328

Jak jsem se již zmínil v minulé kapitole, srdcem Arduina Nano je mikrokontrolér ATmega 328 se speciálním bootloaderem, který se po spuštění stará o základní nastavení interních časovačů, rozhraní USART a dalšího včetně nízkoúrovňového programování fuse bajtů.

Tento osmibitový mikrořadič firmy Atmel umožňuje využít až 32 osmibitových pracovních registrů. Program se nahrává do paměti FLASH s kapacitou 32 kB. Jelikož jsou instrukce vykonávány v jediném cyklu hodin, dosahuje propustnost 1 MIPS na 1 MHz. Pro data je zde 2 kB SRAM. K trvalému uchovávání slouží 1 kB EEPROM s možností data přepsat až stotisíckrát. Maximální operační frekvence je 20 MHz.

Na čipu jsou integrovány A/D převodníky s 10 bitovou rozlišovací schopností. Je možno použít integrovanou referenci napětí nebo si na pin AREF přivést vlastní. Povolená odchylka je $\pm 2\%$. Převodník dokáže pracovat rychlostí 15000 vzorků za vteřinu. [39]

3.5.3 Vstupně výstupní piny

V Arduinu se piny nerozdělují do portů, jsou pouze odlišeny digitální od analogových. Konkrétně pro ATmegu 328 to je 12 digitálních pinů (značeno D2 – D13) a 6 – 8 (podle typu pouzdra) analogovo/digitálních pinů (značeno A0 – A7). Maximální proud je omezen na 40 mA pro každý z nich, dohromady nesmí proudový odběr překročit hranici 400 mA. Rozpis pinů je v tabulce 10, schéma zapojení pak v příloze G.

Tabulka 10: Rozpis pinů a jejich funkce

Pin	Popis	Pin	Popis	Pin	Popis
D0	Rx – příjem dat	D7	RS – LCD displej	A0	Zelená LED dioda 1
D1	Tx – odesílání dat	D8	E – LCD displej	A1	Zelená LED dioda 2
D2	Trub. ZELTA Si-25g	D9	D4 – LCD displej	A2	Oranžová LED dioda
D3	Trub. Vniitfa Si-29bg	D10	D5 – LCD displej	A3	Červená LED dioda
D4	Tlačítko 1	D11	D6 – LCD displej	A4	Měření napětí baterie
D5	Tlačítko 2	D12	D7 – LCD displej	A5	Piezo reproduktor
D6	Tlačítko 3	D13	Nepoužito (LED)	A6,7	Nepoužito

3.6 Zabudování dozimetru do krabičky

Po ověření funkce hardware na nepájivém poli jsem komponenty vměstnal do dvou krabiček. Oddělil jsem část s trubicemi od zbytku, aby v případě měření vysoce radioaktivních bodových zdrojů docházelo k co nejmenší kontaminaci částí lidského těla. Původně jsem chtěl k propojení použít kabel o čtyřech žílách a délce přibližně 150 cm. Kvůli kapacitě kabelu jsem byl nucen jej zkrátit na 40 cm. Při délce více než jeden metr také docházelo k indukci z jednoho kabelu na druhý, což se projevovalo jako další slabý pulz druhé (v tu chvíli neaktivní) trubice, který sice nezachytil komparátor, ale zesilovač pulzů pro signalizaci ano. Při aktuální délce kabelu se ani jen z negativních efektů neprojevuje.

Krabička je bohužel bez samostatného otvoru pro baterie. K jejich výměně je tedy nutné odšroubovat 4 křížové šrouby. Původně připravený panel pro ovládání se při realizaci ukázal jako nepoužitelný, bylo proto potřeba ho kompletně předělat. Protože jsem nesehnal lištu na displej, která by seděla správně, zakoupil jsem dvě, z nichž jsem udělal jednu "prodlouženou". Místo čtyřech dvoupolohových tlačítek jsem použil dvě dvoupolohové a jedno třípolohové. Tištěný spoj je přichycen na spodní desce spolu s bateriemi. Na horní desce je usazen LCD displej, ovládací panel a spínače s reproduktorem. Arduino Nano a komparátory jsou umístěny ve vyjímatelných patičkách. Vpravo byl vytvořen otvor pro vložení USB kabelu. Dozimetr jsem k lepší identifikaci pojmenoval TUL-IL.

Obr. 20: Dozimetr TUL-IL zabudovaný v krabičce



4. Vývoj firmware

Moje dosavadní zkušenosti programování jednočipových počítačů nebyly velké. Měl jsem možnost zkusit si v rámci výuky na střední škole programovat řadič PIC 16F877A v assembleru i C pro mikrokontroléry, ale jednalo se pouze o základní nekomplexní programy. Proto mě zaujalo vývojové prostředí Arduino, které naprostou většinu příkazů zjednodušuje a případná složitější nastavování udělá za uživatele samo. Nevýhodou je poněkud zvýšená náročnost jazyka na paměť programu, ale podobný problém se vyskytuje i u jiných prostředí, kde se zdrojový kód nepíše přímo v assembleru nebo strojovém kódu, ale je do něj nejdříve překládáno. Syntaxe v Arduino je podobná C# či Javě, takže je mi dobře známá.

4.1 Arduino IDE 1.0

Oficiální verze prostředí vyšla 30. listopadu 2011, do té doby byly vydávány pouze testovací alfa verze, které ale byly plně funkční. K běhu aplikace je vyžadována JAVA, prostředí lze spustit ve Windows, MAC OS X i Linux. Zajímavé je, že není potřeba žádná instalace, program běží dobře například i z paměťové karty.

Po připojení Arduina Nano k počítači se vytvoří virtuální sériový port, který je nutný zvolit v nastavení – stejně tak jako typ desky, která je připojena. Nápověda není obsažena přímo v programu, ale přesměruje uživatele na webové stránky. V prostředí je integrován Serial monitor, který slouží k monitorování sériové linky. Pro úplné začátečníky je dobré, že si mohou vybrat z již hotových příkladů, které jsou opravdu podrobně zdokumentovány.

Každý program musí mít minimálně dvě funkce – *setup* a *loop*. Funkce *setup* se provádí pouze jednou, a to při spuštění. Poté se ve smyčce provádí instrukce z funkce *loop*. K jednoduchému použití periférií nebo SPI rozhraní slouží knihovny. Ty je možné si buď naprogramovat svépomocí nebo lze použít jedno z předpřipravených řešení.

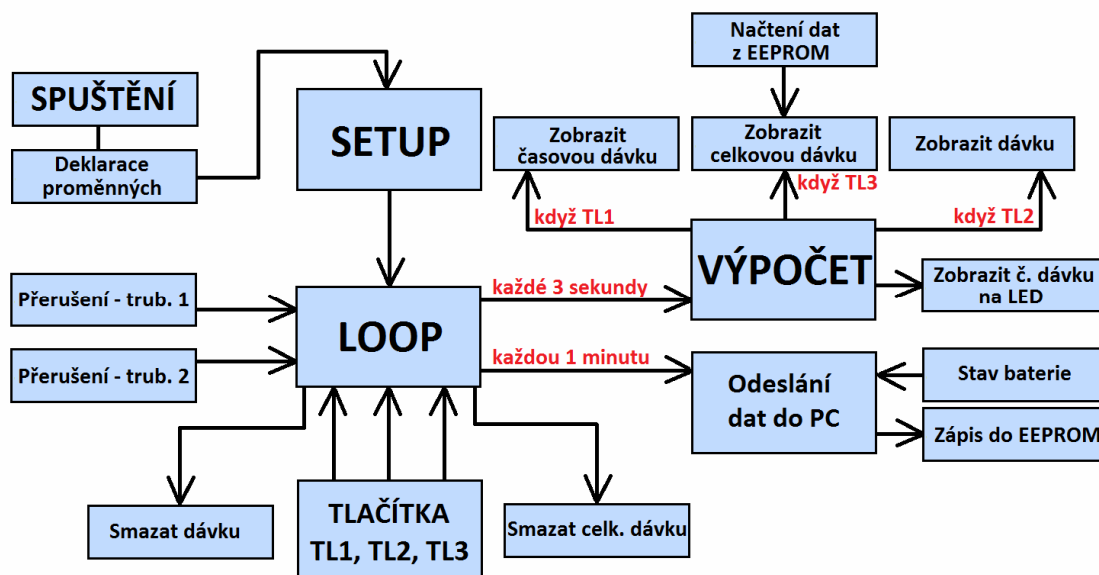
Hotový program se musí nejprve zkompileovat a až poté ho lze nahrát do hardware. Při kompilaci se kromě syntaxe kontroluje také velikost výsledného binárního souboru, existence deklarovaných pinů nebo přístup do EEPROM se správnou adresou.

4.2 Vývojový diagram firmware

Firmware dozimetru jsem se snažil nastínit v obr. 20. Obě trubice vytváří svými pulzy externí přerušení, kterým se počítá počet pulzů během třívteřinového (pro výpočet a zobrazení) nebo šedesátivteřinového (pro odeslání do PC) intervalu. Tlačítka se vybírá funkce (časová dávka, dávka obdržená od zapnutí přístroje a celková akumulovaná dávka), případně se jimi maže obdržená dávka nebo i celková akumulovaná dávka (uchovává se i po vypnutí přístroje).

Ve výpočetní funkci se z obdržených pulzů obou trubic spočítají všechna potřebná čísla. Z nich se podle relevance (míry záření) vybírá hodnota, která se poté zobrazuje na LCD displeji a čtyř LED diodách. Jednou za minutu se počítají data za druhý časový interval. Kromě zaslání informací do počítače se kontroluje stav baterie, a také se do paměti EEPROM zapisuje aktualizovaná celková akumulovaná dávka.

Obr. 21: Vývojový diagram firmware dozimetru



Kvůli velmi pomalému překreslování LCD displeje je přepisován každé tři vteřiny bez ohledu na to, zda bylo nebo nebylo stisknuto tlačítko volby. Překreslení se provádí až ve chvíli, kdy jsou vypočítána všechna potřebná data.

4.3 Externí knihovny a časovač Arduina

Obsluha časovače je u Arduina realizována pomocí funkcí *millis()* a *micros()*. Na základě přetečení 16 bitového časovače se inkrementuje vnitřní proměnná funkce *millis()*. U funkce *micros()* je nejmenší rozlišovací hodnota závislá na taktu mikroprocesoru, pro frekvenci 16 MHz to jsou 4 μ s. Obě vnitřní proměnné jsou typu *unsigned long*, tedy 32 bitové. K přetečení tedy dojde za přibližně padesát dní (*millis()*), respektive 70 minut (*micros()*). Pro odměření času tří vteřin tedy stačí nadeklarovat proměnnou typu *unsigned long*, ve funkci *setup* jí přiřadit hodnotu z funkce *millis()*, a pak jen ve funkci *loop()* porovnat *if(millis()==promenna+3000)*.

V programu používám dvě hlavičkové knihovny. První je *LiquidCrystal.h* a druhá *EEPROM.h*. Vkládají se na úplný začátek pomocí příkazu *#include*. Jak už vypovídá z názvů, první knihovna slouží k zobrazování dat na LCD displejích založených na řadiči Hitachi HD44780, který se používá nejčastěji. Knihovna podporuje připojení přes čtyři nebo osm datových linek (+ RS a E). Popis všech funkcí přístupných přes tečkovou notaci je v referencích na oficiálních stránkách Arduina [38].

Knihovna pro EEPROM paměť má jen dvě funkce – *read()* a *write()*. Čtení probíhá například takto: *hodnota_bytu_na_pozici_adresa = EEPROM.read(adresa);* Zápis je stejně jednoduchý. Stačí napsat: *EEPROM.write(adresa, hodnota);*

Ukázka zápisu na displej:

```
#include <LiquidCrystal.h> // hlavičkový soubor pro příkazy LCD displeje
LiquidCrystal lcd(12, 11, 10, 9, 8, 7); // definování pinů LCD (RS, E, D4, D5, D6, D7)
unsigned float pi = 3.14159265;
```

```
void setup() { // proběhne jen jednou, při spuštění
  lcd.begin(16,2); // definice počtu znaků a řádků použitého displeje
  lcd.setCursor(0,0); // nastavení kurzoru na první znak prvního řádku
  lcd.clear(); // smazání displeje
  lcd.print("Hodnota čísla pi je: ") // zápis textu na displej
  lcd.setCursor(0,1); // nastavení kurzoru na druhý řádek
  lcd.print(pi, 2); // výpis čísla pi na displej s přesností na 2 desetinná místa
}
```

```
void loop() { // probíhá stále dokola, může být prázdná
}
```

4.4 Výpočet časové dávky

K výpočtu časové dávky používám konstantu, která udává počet pulzů za minutu při časové dávce $1 \mu\text{Sv/hod}$. Podle [21] přísluší trubici Vniitfa Si-29bg hodnota 102,0. V rámci testování jsem ji považoval za dostatečně věrohodnou, i když toto číslo nebylo ničím podloženo. Časová dávka je počítána průměrem z osmi třívteřinových vzorků, čímž se sníží odchylky v rámci jednotlivých úseků. To má za následek, že při prudkém nárůstu nebo poklesu radiace se přesná hodnota zobrazí až za 24 vteřin. Přemýšlel jsem jak tento problém vyřešit.

Jednou z možností by bylo zkrácení bufferu nebo jeho kompletní nahrazení pouze jednou (aktuální) hodnotou. Při testování jsem ale zjistil, že i v jednotlivých třísekundových blocích je při vystavení zářičem s hodnotou stonásobku běžného pozadí velký rozptyl v řádech jednotek až desítek procent (k rozpadu částic dochází náhodně s určitou pravděpodobností, viz kapitola 2.3.), což by při zobrazování působilo divně.

Druhá možnost, zkrácení časového úseku například na jednu vteřinu, není možná kvůli displeji, kterému dlouho trvá překreslení dat. Proto jsem se nakonec rozhodl neměnit velikost bufferu ani čas sběru dat. K orientační hodnotě aktuální hodnoty záření mohou posloužit čtyři LED diody, které vždy vycházejí pouze z výsledků posledního vzorku.

Příklad výpočtu časové dávky:

```
buffer[prvek_buffer] = pocet_pulzu_za_usek
// každé tři vteřiny mám uložen počet pulzů za tento časový interval

buffer_cpm[prvek_buffer] = float((buffer[prvek_buffer])/3.0);
// převedu si do proměnné typu float a vydělím třemi k získání počtu pulzů za sekundu

buffer_cpm[prvek_buffer] = (60.0*((buffer_cpm[prvek_buffer])/(1.0-
(buffer_cpm[prvek_buffer]*0.0002))))); // zohledním mrtvou dobu trubice
// (viz kapitola 2.5.2) a vynásobím šedesáti (k získání počtu pulzů za minutu)

for(int i=0; i<=7; i++){
    cpm_celkem = cpm_celkem+ buffer_cpm_a[i];
}
cpm_celkem = cpm_celkem / 8.0;
// sečtu čísla z bufferů a udělám průměr počtu pulzů za minutu

vysledna_casova_usv = cpm_celkem / 102.0
// počet pulzů pak už jen pomocí konstanty přepočítám na časovou dávku a zobrazím
```

4.5 Kontrola stavu baterie

Baterii kontroluji pomocí A/D převodníku na pinu A4. Výstupem je hodnota od 0 do 1023 (10 bitů). V Arduino lze nastavit typ reference pomocí příkazu *analogReference()*. Výchozí nastavení ji ponechává na velikosti napájecího napájení (5V). Lze ji přepnout na interní referenci, která je rovna 1,1 V. Rozmezí napájecího napětí je přibližně 2,0 – 3,6 V, proto jsem nechal referenci ve výchozím nastavení.

Odchylka měření $\pm 2\%$ je tedy ekvivalentní odchylce napětí $\pm 0,1$ V. To mi přišlo jako docela velké číslo. Zkusil jsem vyzkoušet přesnost v praxi. Ze 100 naměřených hodnot byla odchylka pouze $\pm 0,05$ V, což je lepší a především použitelnější výsledek. Ve firmware probíhá kontrola stavu baterie každou minutu. Za nízké napětí baterií považuji 2 V.

Při zapnutí přístroje je velikost napětí zobrazována na displeji. V signalizačním módu (bez zapnutého mikrokontroléru) indikace nízkého napětí není. Měnič pro trubice funguje i při cca 1,5 V.

Podprogram pro zjištění napětí baterie:

```
float stav_baterie(){ // detekce slabé baterie a zobrazení napětí

    float napeti = 0.0;
    int hodnota_AD = analogRead(MERENI_NAPETI);
    // zjistím z 10b AD převodníku hodnotu která přísluší napětí (5 V = 1023)
    // tj 1 V je přibližně 205

    napeti = (hodnota_AD/205.0);
    return napeti; // návratová hodnota z funkce se rovná napětí baterie
}
```

4.6 Ukládání dat do paměti EEPROM

K uchování informace o celkové akumulované dávce používám integrovanou paměť EEPROM, která má omezený počet zápisů na buňku paměti (podle [39] je to 100.000) a poměrně malou rychlost přístupu (zápis jednoho bytu trvá podle [38] celkem 3,3 ms). Vzhledem k jednoduché (respektive až skoro primitivní) práci, např. se zápisem dat na displej, jsem očekával, že i obsluha EEPROM bude stejně jednoduchá a budou k dispozici usnadňující funkce, které budou řešit opotřebení paměti (i za cenu zmenšení její kapacity) nebo třeba zápis a načtení vícebajtových datových typů.

Nic z toho bohužel obsaženo není, knihovna umožňuje pouze načítání a zápis jednoho bajtu. K aktualizaci hodnot celkové dávky dochází jednou za minutu, proto by došlo po zhruba 69 dnech soustavného používání ke znehodnocení buněk paměti. Vytvořil jsem si tedy množinu 7 bajtů. V prvním je uložena relativní adresa bloku, v dalších dvou je počet přepsání paměti (maximální hodnota 65.535) a zbylé čtyři bajty slouží k uchování proměnné typu *unsigned long* k uložení celkové dávky.

Při každém zapsání do paměti inkrementuji počet přepsání o jedničku. Pokud zde hodnota překročí 60.000, vynuluji počet přepsání a inkrementuji relativní adresu, čímž posunu umístění používaného bloku paměti o sedm bajtů dál. Nakonec zapíšu na nové umístění hodnotu celkové dávky. Původní místo je potřeba smazat, tedy nahrát číslo 255 (prázdná paměť má hodnotu 0xFF nikoliv 0x00). Při načítání hodnot pak stačí najít začátek bloku projítím celé EEPROM paměti a hledat v buňkách jiné číslo než 255. Díky tomu se původních 69 dnů provozu zvýšilo na 16,6 let.

Podprogram pro zápis do paměti EEPROM:

```
void zapis_eeprom(){ // zapsání dat do EEPROM
    pocet_zapsani_eeprom++; // inkrementuji počet zapsání

    // Rozřezání 4 B proměnné do čtyř jednobajtových
    byte Data1 = ((celkova_davka_eeprom >> 0) & 0xFF);
    byte Data2 = ((celkova_davka_eeprom >> 8) & 0xFF);
    byte Data3 = ((celkova_davka_eeprom >> 16) & 0xFF);
    byte Data4 = ((celkova_davka_eeprom >> 24) & 0xFF);

    // Rozřezání 2 B proměnné do dvou jednobajtových
    byte Poc1 = ((pocet_zapsani_eeprom >> 0) & 0xFF);
    byte Poc2 = ((pocet_zapsani_eeprom >> 8) & 0xFF);

    // Všechny Bajty zapíšu do EEPROM
    EEPROM.write(adresa_eeprom+1, Poc1);
    EEPROM.write(adresa_eeprom+2, Poc2);
    EEPROM.write(adresa_eeprom+3, Data1);
    EEPROM.write(adresa_eeprom+4, Data2);
    EEPROM.write(adresa_eeprom+5, Data3);
    EEPROM.write(adresa_eeprom+6, Data4);

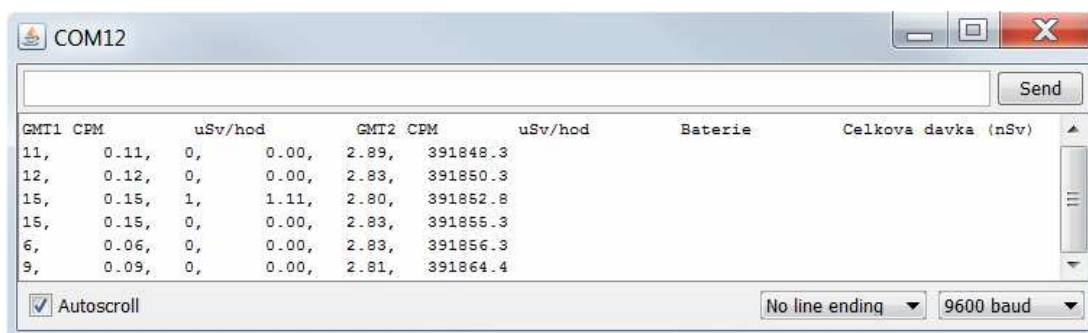
    // Nechám probliknout červenou diodu a pípnout akustické A na 100ms
    digitalWrite(LED_CTVRTA,HIGH);
    tone(PIEZOSPEAKER, 440, 100); // tone zde figuruje jako delay()
    digitalWrite(LED_CTVRTA,LOW);
}
```

4.7 Posílání dat do PC

Firmware jednou za minutu odesílá naměřená data do počítače. Zasílají se informace o počtu pulzů za minutu, časové dávce (pro obě trubice), dále pak napětí baterie a celková akumulovaná dávka. Protokol je vytvořen tak, aby šly informace bez problémů importovat a dále zpracovávat např. v tabulkových procesorech.

Komunikace probíhá rychlostí 9600 baudů/s. Tato rychlost je pro Arduino Nano doporučována, použít však lze rychlost až 115200 baudů/s. Ke komunikaci se používá sada funkcí Serial. Všechny příkazy spolu s nastavením připojení například v HyperTerminalu lze najít v dokumentaci na [38]. Vývojové prostředí má integrovanou vlastní verzi monitoringu sériové linky, kde stačí nastavit pouze rychlost přenosu.

Obr. 22: Data přijímaná počítačem z mikrořadiče



4.8 Uživatelské rozhraní

Při návrhu jsem se snažil vytvořit rozhraní s co nejmenším počtem ovládacích prvků. Firmware se ovládá pomocí tří tlačítek, které mají následující funkci:

Stisk levého tlačítka: zobrazení časové dávky

Stisk prostředního tlačítka: zobrazení dávky za čas / časové dávky za čas

Stisk pravého tlačítka: zobrazení celkové akumulované dávky

Souběžný stisk levého a prostředního tlačítka: smazání dávky za čas

Souběžný stisk všech tří tlačítek: smazání celkové akumulované dávky + restartování

Při stisknutí tlačítka se ozve tón, který dává uživateli zpětnou vazbu. Výpočet a překreslení displeje není totiž okamžité. Na displeji je zvolená funkce napsána. Více k ovládání dozimetru je v návodu k použití v příloze I.

5. Kalibrace a testování dozimetru

K testování a kalibraci jsem používal stronciový zářič (^{90}Sr), který byl dodáván ke starému ruskému dozimetru Radiometr RN 2. Bohužel se mi nepodařilo dohledat, jak silný by zdroj měl být. Na zářiči je pouze vyražen nápis „PL IBL, Sr-90Nr7 33“. Vzhledem ke stáří zářiče a poločasu rozpadu izotopu ^{90}Sr by uvedená hodnota stejně neměla příliš vypovídající hodnotu (poločas rozpadu je pro tento izotop 28,8 let [40], ale zdroj by mohl být i více než 40 let starý). Jako referenční měřicí přístroj jsem používal dozimetr Gamma-Scout, detailněji rozebraný v kapitole 2.7.

I když je izotop ^{90}Sr pouze beta zářič, má dostatečně velkou energii k tomu, aby prošel velmi tenkým plechem trubice Vniitfa. Podle [32] je stěna trubice stejně silná jako u typu SBM-20, který detekuje beta záření od energie 500 keV. Stroncium emituje elektrony s energií 546 keV.

5.1 Kalibrace trubice Vniitfa Si-29bg

Jak jsem se již zmínil v kapitole 4.4, k výpočtu používám převodní konstantu, která uvádí počet pulzů za minutu při konstantním záření $1\text{ }\mu\text{Sv/hod}$. Její hodnotu pro trubici Vniitfa jsem sice našel, ale informace nebyla ničím podložena. Rozhodl jsem se tedy pro ověření správnosti porovnáním naměřených hodnot se zkalibrovaným přístrojem Gamma-Scout.

Měření je pochopitelně pouze orientační, protože zářič je bodový zdroj. Abych dosáhl přesnějších čísel, musely by oba dozimetry být po dobu měření na stejném místě, což je nemožné. Takže jsem měl na výběr mít buď dozimetry vedle sebe nebo je měřit po jednom. Zvolil jsem druhou možnost, protože snímací plocha je u mého dozimetru poměrně velká, takže by Gamma-Scout byl na kraji, kde je záření slabší (bodové zdroje vyzařují ve tvaru kužele).

Abych minimalizoval odchylky způsobené pravděpodobností rozpadu, měřil jsem dávku po dobu jedné minuty, ze které jsem poté spočítal dávku časovou. Při měření pozadí byly oba dozimetry vedle sebe po dobu 30 minut. Protože kalibrovaný dozimetr měří i záření alfa, nastavil jsem přepínačem jeho stínění. I tak je ale Gamma-Scout citlivější pro záření beta s nízkou energií.

Tabulka 11: Porovnání naměřených hodnot přístroje s dozimetrem Gamma-Scout

Vzdálenost od zářiče	Dozimetr Gamma-Scout	Dozimetr TUL-IL
Běžné pozadí (bez zářiče)	0,19 $\mu\text{Sv/hod}$	0,186 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 1 (~ 40 cm)	0,77 $\mu\text{Sv/hod}$	0,95 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 2 (~ 30 cm)	1,94 $\mu\text{Sv/hod}$	2,41 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 3 (~ 20 cm)	6,51 $\mu\text{Sv/hod}$	6,85 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 4 (~ 15 cm)	14,39 $\mu\text{Sv/hod}$	15,63 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 5 (~ 10 cm)	57,25 $\mu\text{Sv/hod}$	52,30 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 6 (~ 5 cm)	120,2 $\mu\text{Sv/hod}$	127,5 $\mu\text{Sv/hod}$
Vzdálenost 7 (~ 1 cm)	2,325 mSv/hod	2,715 mSv/hod

Z naměřené hodnoty běžného pozadí je vidět, že koeficient nalezený na internetu je zvolen opravdu správně. Všechny další hodnoty v tabulce je potřeba brát skutečně s rezervou. U poslední měřené hodnoty se Gamma-Scout po pěti vteřinách vždy sám vypnul, proto jsem ho přepnul do režimu časové dávky, kde zobrazil číslo napsané v tabulce (a opět se vypnul). Rozsah tohoto přístroje je pouze do 1 mSv/hod, takže se divím, že takto vysoké hodnoty vůbec zobrazoval. Trubice Vniitfa má také podle technických parametrů měřit pouze do 1,4 mSv/hod. Zde se pravděpodobně projevilo přičítání mrtvých pulzů (více v kapitole 2.5.2).

5.2 Kalibrace trubice Zelta Si-25g

Pro méně citlivou trubici Zeltra jsem na internetu nenašel převodní konstantu. O tomto modelu není celkově moc informací (a pokud jsou, tak psané azbukou). Na stránkách Danyka [33] je článek, kde srovnává čtyři druhy trubic, mezi kterými je i tato Zelta. Jako referenční používá dozimetr RBGT-62a. Při časové dávce 4 $\mu\text{Sv/hod}$ byl počet pulzů 4,9 za minutu. Z toho jsem odvodil, že převodní konstanta bude menší nebo rovna 1,2 (při takto nízkých počtech pulzů za minutu není ještě závislost na velikosti ionizujícího záření lineární). To se při následném testování ukázalo jako pravdivé.

Při porovnávání hodnot s Gamma-Scoutem byly všechny hodnoty o přibližně třicet procent vyšší. I v porovnání s Vniitfou byla čísla nadhodnocena. Postupným

upravováním převodní konstanty, dalšími měření a porovnáváním s Gamma-Scoutem a první trubicí, jsem nakonec zvolil převodní konstantu 0,9 pulzů za minutu/ $\mu\text{Sv/hod}$.

Kromě toho jsem také nastavil přepínání rozsahů na 500 $\mu\text{Sv/hod}$, protože více pulzů generovaných první trubicí poskytne lepší přesnost (7,5 pulzů za sekundu ze Zelty nebo 850 pulzů z Vniitfy). Při silnějším záření by se už příliš projevovala mrtvá doba.

5.3 Měření spotřeby

Důležitou vlastností dozimetru je dlouhá výdrž při provozu na baterie. Osobnímu dozimetru Gamma-Scout v tomto ohledu nemůžu v žádném případě konkurovat. Výrobce garantuje, že při měření běžného pozadí vydrží v provozu 10 let. Bohužel nevím, nakolik je tato hodnota reálná, i když je fakt, že tento dozimetr nemá vůbec vypínací/zapínací tlačítko. Běží v provozu stále. Spotřebu mého dozimetru jsem si ale spočítal.

K napájení používám dvě tužkové baterie, které mají napětí 1,2 V a kapacitu 2500 mAh. K měření spotřeby jsem dozimetr napájel stabilizovaným zdrojem 3 V.

Tabulka 12: Naměřené hodnoty spotřeby

Stav	Spotřeba	Přibližná délka provozu
Signalizační mód, běžné pozadí	19 mA / 3 V	100 hodin
Běžné pozadí se zapnutou ATmegou	66 mA / 3 V	30 hodin
Č. dávka 10 $\mu\text{Sv/hod}$ s ATmegou	133 mA / 3 V	15 hodin
Č. dávka 1000 $\mu\text{Sv/hod}$ s ATmegou	190 mA / 3 V	10,5 hodin
Č. dávka 1000 $\mu\text{Sv/hod}$ (sign. mód)	80 mA / 3 V	28,5 hodin

5.4. Měření pozadí v areálu TUL

Pro zajímavost jsem si udělal test měření pozadí v různých místech Technické univerzity. Vždy jsem měřil po dobu jedné hodiny. Na budově A, v chodbě před místností EL2 bylo poměrně vysokých 0,222 $\mu\text{Sv/hod}$ (pravděpodobně kvůli uranovému podloží, alfa záření radonu ani jedna z trubic detekovat nemůže). V menze na Husově ulici 0,121 $\mu\text{Sv/hod}$, v pokoji A114 na kolejích Harcov 0,121 $\mu\text{Sv/hod}$ a v menze na Harcově 0,135 $\mu\text{Sv/hod}$. Hodnoty byly naměřeny 11. května 2012.

6. Závěr

Vytvoření návrhu osobního dozimetru a jeho následná realizace byla úspěšná. V průběhu práce se vyskytlo několik hardwarových problémů, které se mi podařily vyřešit ještě ve fázi vývoje na nepájivém poli. Nejnáročnější částí z mého pohledu bylo vytvoření krytu pro dozimetr, protože jsem s tímto úkonem neměl vůbec žádné zkušenosti. Vývoj programu v jazyku Arduino mě zaujal především díky velkému množství jednoduše přístupných funkcí.

Dozimetr TUL-IL, který je produktem mé práce, mi přijde jako konkurence schopný vůči komerčním dozimetřům nižší cenové kategorie (do zhruba 8.000 Kč). Oproti nim disponuje nejen poměrně ojedinělým přepínáním rozsahů pomocí dvou různě citlivých senzorů, ale i nepříliš často viděnou možností zasílání naměřených dat do PC. Běžně prodávané přístroje mají řádově větší výdrž při provozu na baterie, protože používají úspornější komponenty, mnohdy vytvořené přímo na míru. Bohužel jsem nemohl provést přesnější kalibraci. Použití bodového zářiče o neznámé intenzitě a reference v podobě dozimetru střední třídy, není úplně ideální.

Některé vlastnosti dozimetru by bylo jistě možné vyřešit lépe. Patří mezi ně například displej. Použitý dvouřádkový zobrazovač by mohl být nahrazen podstatně větším grafickým, třeba i barevným displejem. Na něm by mohl být například jednoduchý graf vyjadřující hodnotu dávky v čase.

Použité Geiger-Müllerovy trubice jsou sice docela citlivé, ale nedetekují záření alfa. Jejich výměna za moderní trubice se slídovým oknem by umožnila měřit například i v poslední době často diskutovaný radon. Popsanými úpravami by ale určitě stoupla výsledná cena, která byla pro výrobu dozimetru TUL-IL důležitá.

Seznam použité literatury

- [1] Kovář Z. et al.: Pokroky dozimetrie ionizujícího záření. Academia, Praha 1984. 1. vydání.
- [2] Krejčíř A.: Napájecí zdroje I. BEN, Praha 1997. 2. vydání. ISBN 80-86056-02-3.
- [3] VAŠÍČKOVÁ, Jana. *Vliv ionizujícího záření na člověka*. Brno, 2007. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA. Vedoucí práce Mgr. Jiří Šibor, Ph. D.
- [4] Geiger Müller tubes. [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: http://www.centronic.co.uk/downloads/Geiger_Tube_theory.pdf
- [5] Základní fyzikální poznatky o ionizujícím a neionizujícím záření, jeho detekce a dozimetrie. *Radiobiologie* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola.html>
- [6] Ionizující záření. *Fyzika v moderním lékařství* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://cz7asm.wz.cz/fyz/index.php?page=iozar>
- [7] Záření a zdraví. *Lékařská fakulta Masarykovy univerzity v Brně* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.med.muni.cz/dokumenty/pdf/zareni.pdf>
- [8] Záření beta. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_beta
- [9] Alfa částice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Alfa_%C4%8D%C3%A1stice

- [10] Rentgenové záření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Paprsky_X
- [11] Detekce ionizujícího záření. *Veličiny a jednotky* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.radioaktivita.cz/jednotky.html>
- [12] Radioaktivita a ionizující záření. *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství* [online]. Ostrava, 2005 [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://webs.zcu.cz/fel/kee/JB/JB.pdf>
- [13] EAmos. *Zdroje ionizujícího záření* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch01.htm
- [14] Energie. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Energie>
- [15] Radiation Dose Chart. *XKCD* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://xkcd.com/radiation/>
- [16] Acute radiation syndrome. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_sickness
- [17] Prstový termoluminiscenční dozimetr. *Osobní dozimetrie* [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.dozimetrie.cz/prstovy-termoluminiscencni-dozimetr>
- [18] Geiger Counter - Radiation Sensor Board for Arduino. *Cooking Hacks* [online]. [cit. 2012-05-02]. Dostupné z: <http://www.cooking-hacks.com/index.php/documentation/tutorials/>

- [19] Geiger–Müller tube. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online].
San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger_tube
- [20] SBM-20-1 Parameters and characteristics. *Russian tubes directly from Russia* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <http://gstube.com/data/3019/#circuit> - SBM-20
- [21] The Effect of "Dead Time" on Counts. *DIYGeigerCounter* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <https://sites.google.com/site/diyeigercounter/gm-tubes-supported>
- [22] Gas-Filled Radiation Detectors: Geiger-Mueller Tubes. *TGM Detectors* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <http://www.oilandgas.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGoilandgas/Documents/Detectors/Detectors-GeigerMueller-Tubes.pdf>
- [23] Radiation dosimeter. *Electronics Projects* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <http://mcs.uwsuper.edu/sb/Electronics/Geiger/>
- [24] Geiger Counter. *MightyOhm: Join the resistance* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <http://mightyohm.com/blog/products/geiger-counter/>
- [25] Gamma-Scout Hand-Held Geiger. *Gamma-Scout* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <http://www.gammascout.com/products.html>
- [26] DOZIMETR GAMMA-SCOUT. *Detektory záření, dozimetry* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: http://www.dozimetry.eu/product.php?id_product=29
- [27] MKS-05 TERRA-P dosimeter-radiometer. *TERRA-P: your radiation safety* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z: <http://www.terra-p.com/global/eng/dosimeter/page/31/>

- [28] Портативный дозиметр радиации "Радэкс 1503". V812 [online].
[cit. 2012-05-02].
Dostupné z: http://www.v812.ru/dozimetry-radiacii/portativnyjj-dozimetr-radiacii-radjeks-1503_s.php
- [29] PM1208 Wrist Gamma Indicator. *Polimaster: Innovating radiation detection technologies since 1992* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z:
http://www.polimaster.com/products/electronic_dosimeters/personal/pm1208/
- [30] Dosimeter-radiometer TERRA-P. *Alibaba: Global trade starts here* [online]. [cit. 2012-05-02].
Dostupné z:
http://www.alibaba.com/product-free/104804718/Dosimeter_radiometer_TERRA_P.html
- [31] Si-25g: Parameters and characteristics. *GS Tube: Russian tubes directly from Russia* [online]. [cit. 2012-05-08].
Dostupné z: <http://gstube.com/data/3414/>
- [32] Si-29bg: Parameters and characteristics. *GS Tube: Russian tubes directly from Russia* [online]. [cit. 2012-05-09].
Dostupné z: <http://gstube.com/data/2484/>
- [33] Kapesní detektor radioaktivity. *Danyk elektro* [online]. [cit. 2012-05-09].
Dostupné z: http://danyk.wz.cz/gm_ind.html
- [34] Radiální tlumivka DSZ 8/47uH/1,2-V. *GES Electronics* [online].
[cit. 2012-05-09]. Dostupné z:
<http://www.ges.cz/cz/radialni-tlumivka-dsz-8-47uh-1-2-v-GES05503303.html>
- [35] MAX1674. *MAXIM IC* [online]. [cit. 2012-05-09].
Dostupné z: <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX1674-MAX1676.pdf>

- [36] Komparátory s operačními zesilovači. [online]. [cit. 2012-05-10].
Dostupné z: <http://www.samoweb.wz.cz/elektronika/opzes3/opzes3.htm>
- [37] Texas Instruments. *DUAL DIFFERENTIAL COMPARATORS* [online].
[cit. 2012-05-11].
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm193.pdf>
- [38] Arduino Nano. *Arduino* [online]. [cit. 2012-05-11].
Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- [39] ATmega328. *Atmel* [online]. [cit. 2012-05-11].
Dostupné z: <http://www.atmel.com/devices/atmega328.aspx?tab=overview>
- [40] Strontium-90. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online].
San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2012-05-13].
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Strontium-90>

Zdroje obrázků

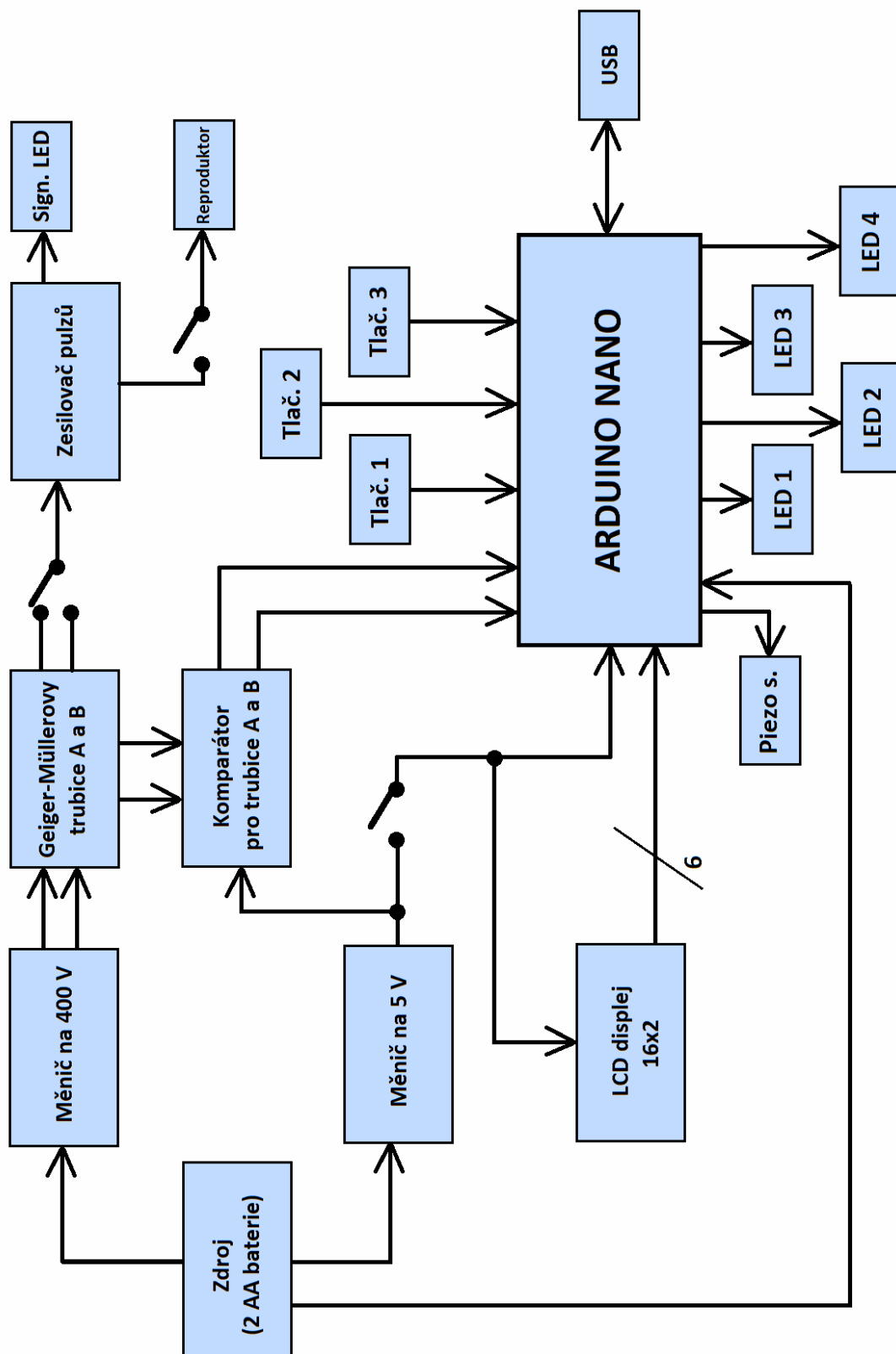
- 1.) Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Radioaktivita>
- 2.) Dostupné z:
http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.5.2
- 3.) Dostupné z: <http://webs.zcu.cz/fel/kee/JB/JB.pdf>
- 4.) Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- 5.) Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/161.html>
- 6.) Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- 7.) Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/1-kapitola/16/162.html>
- 8.) Dostupné z: <http://www.dozimetrie.cz/prstovy-termoluminiscenci-dozimetr>
- 9.) Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Soubor:Geigeruv_pocitac.png
- 10.) Dostupné z:
<http://www.oilandgas.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGoilandgas/Documents/Detectors/Detectors-GeigerMueller-Tubes.pdf>
- 11.) Dostupné z:
http://www.cooking-hacks.com/index.php/documentation/tutorials/geiger-counter-arduino-radiation-sensor-board#types_of_radiation
- 12.) Dostupné z: <http://mcs.uwsuper.edu/sb/Electronics/Geiger/>
- 13.) Dostupné z: <http://mightyohm.com/blog/products/geiger-counter/>
- 14.) Dostupné z: http://www.dozimetry.eu/product.php?id_product=29
- 17.) Dostupné z: <http://www.samoweb.wz.cz/elektronika/opzes3/opzes3.htm>

Seznam příloh

- Příloha A** – Blokové schéma dozimetru
- Příloha B** – Schéma zapojení Geiger-Müllerových trubic
- Příloha C** – Průběh napětí 400 V z měniče a průběh pulzu trubice ZELTA Si-25g
- Příloha D** – Průběh výstupního napětí zvyšujícího měniče MAXIM MAX1674
- Příloha E** – Průběh napětí pulzu na trubici ZELTA Si-25g spolu s výstupním napětí komparátoru a časové zpoždění při změně stavu komparátoru.
- Příloha F** – Schéma zapojení komparátorů a zesilovače pulzů
- Příloha G** – Schéma zapojení Arduina Nano
- Příloha H** – Obsah přiloženého CD
- Příloha I** – Návod k použití Dozimetru TUL-IL

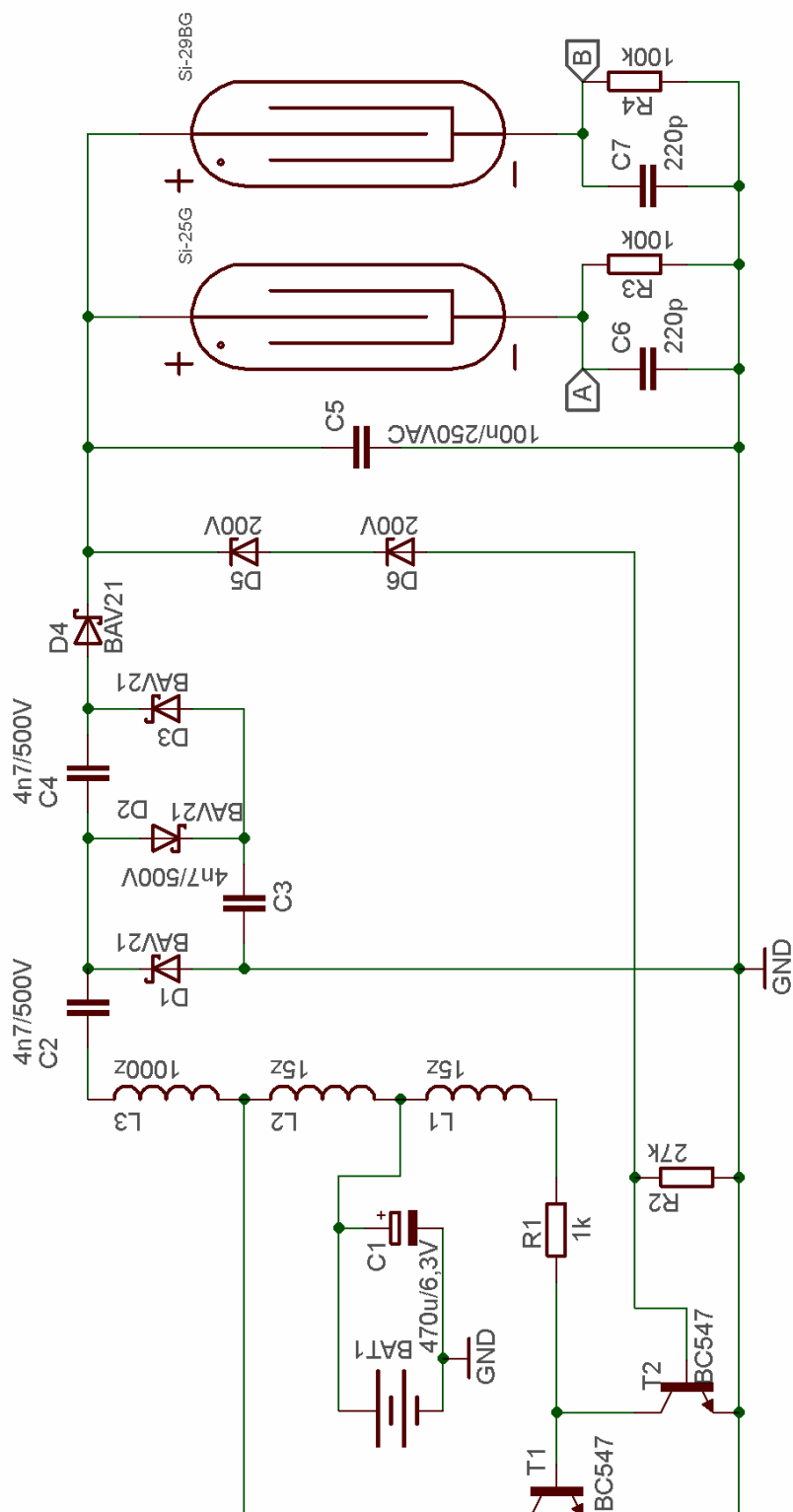
PŘÍLOHA A

Blokové schéma dozimetru



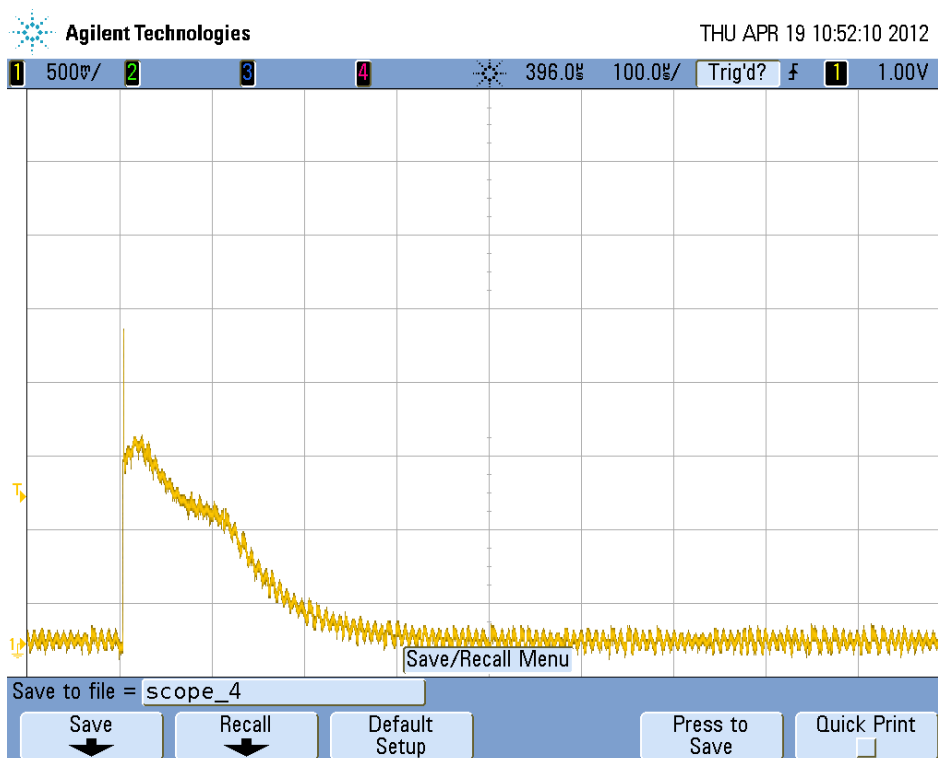
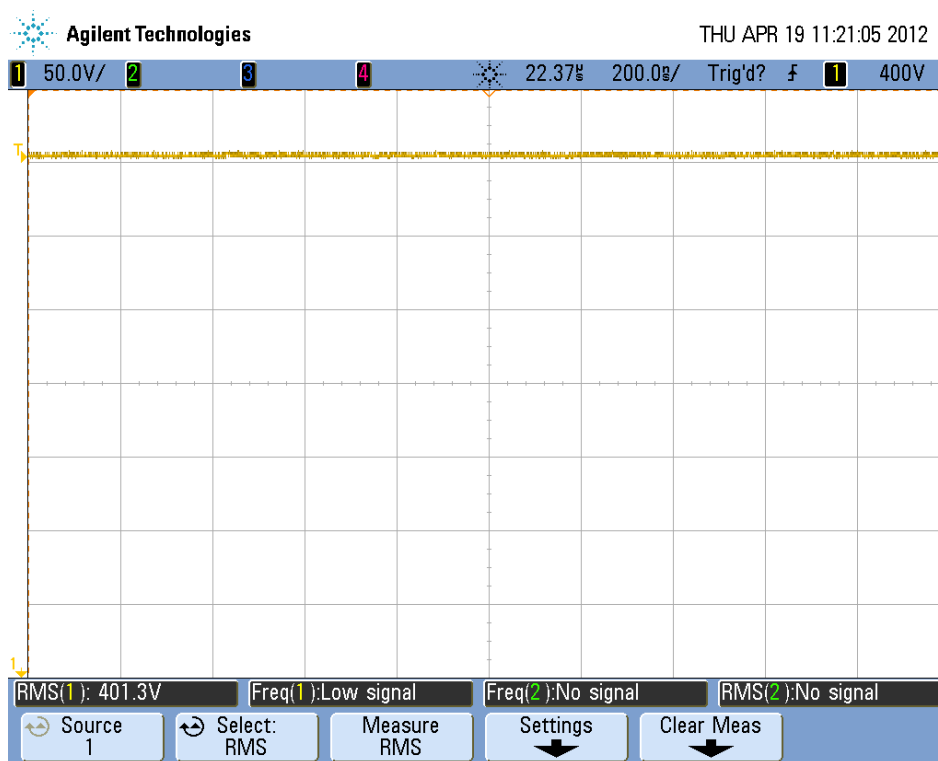
PŘÍLOHA B

Schéma zapojení Geiger-Müllerových trubic



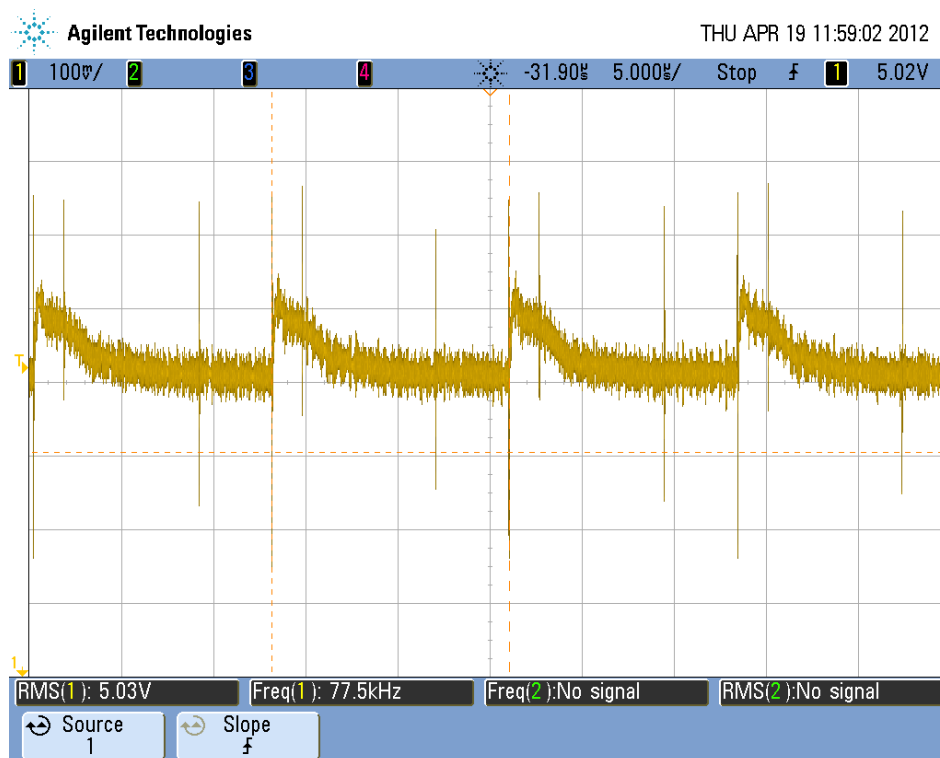
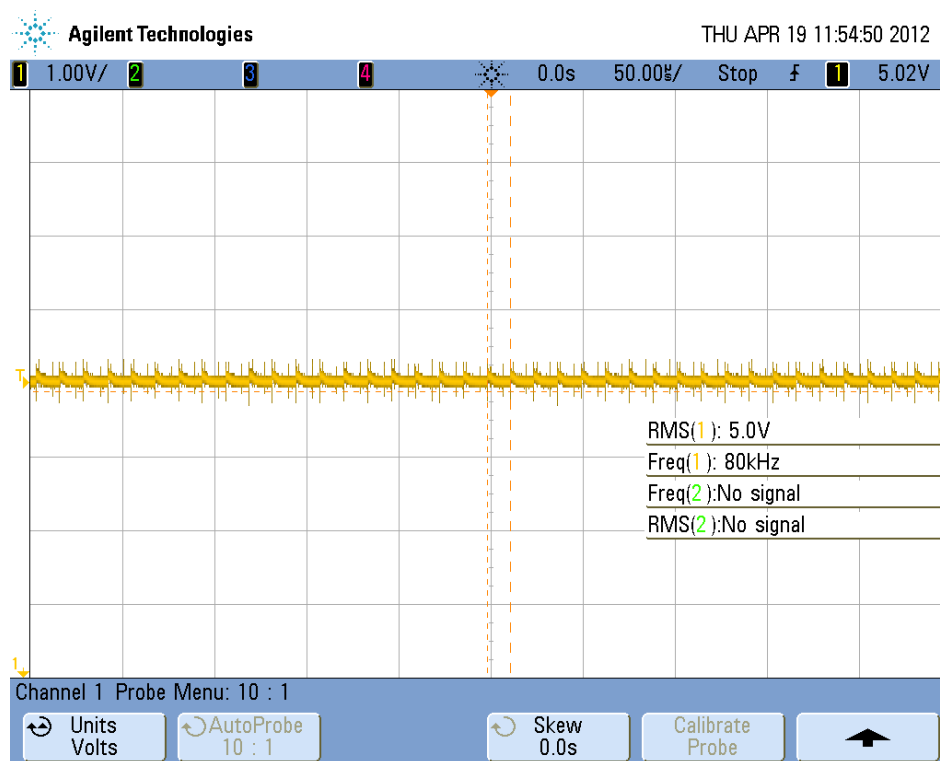
PŘÍLOHA C

Průběh napětí 400 V z měniče a průběh pulzu trubice ZELTA Si-25g



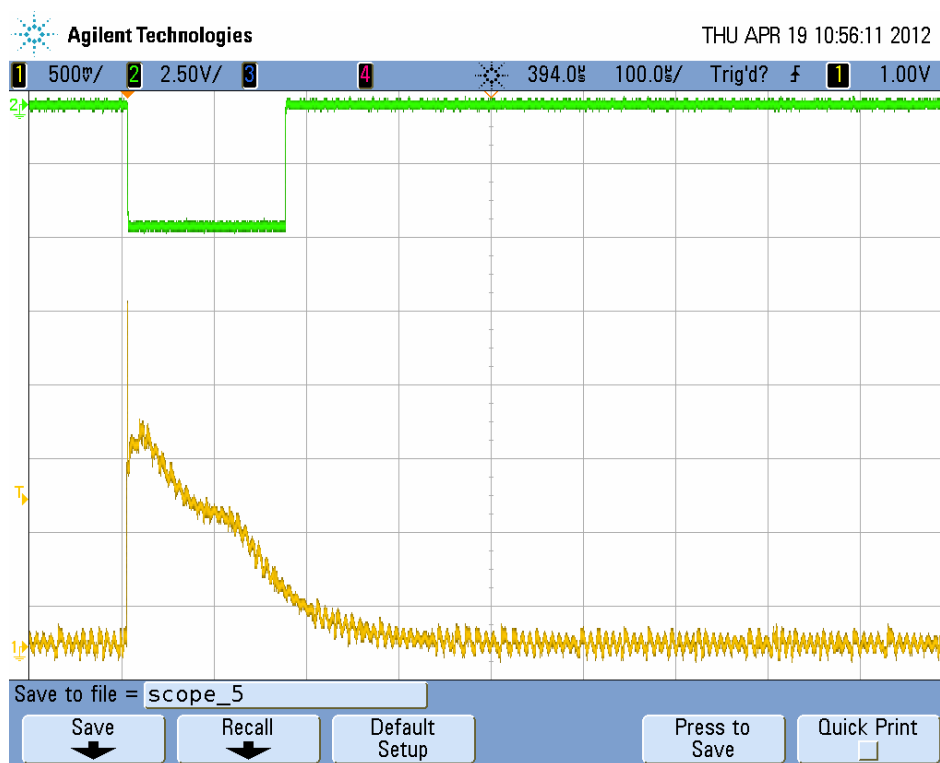
PŘÍLOHA D

Průběh výstupního napětí zvyšujícího měniče MAXIM MAX1674



PŘÍLOHA E

Průběh napětí pulzu na trubici ZELTA Si-25g spolu s výstupním napětí komparátoru a časové zpoždění při změně stavu komparátoru.



PŘÍLOHA F

Schéma zapojení komparátorů a zesilovače pulzů

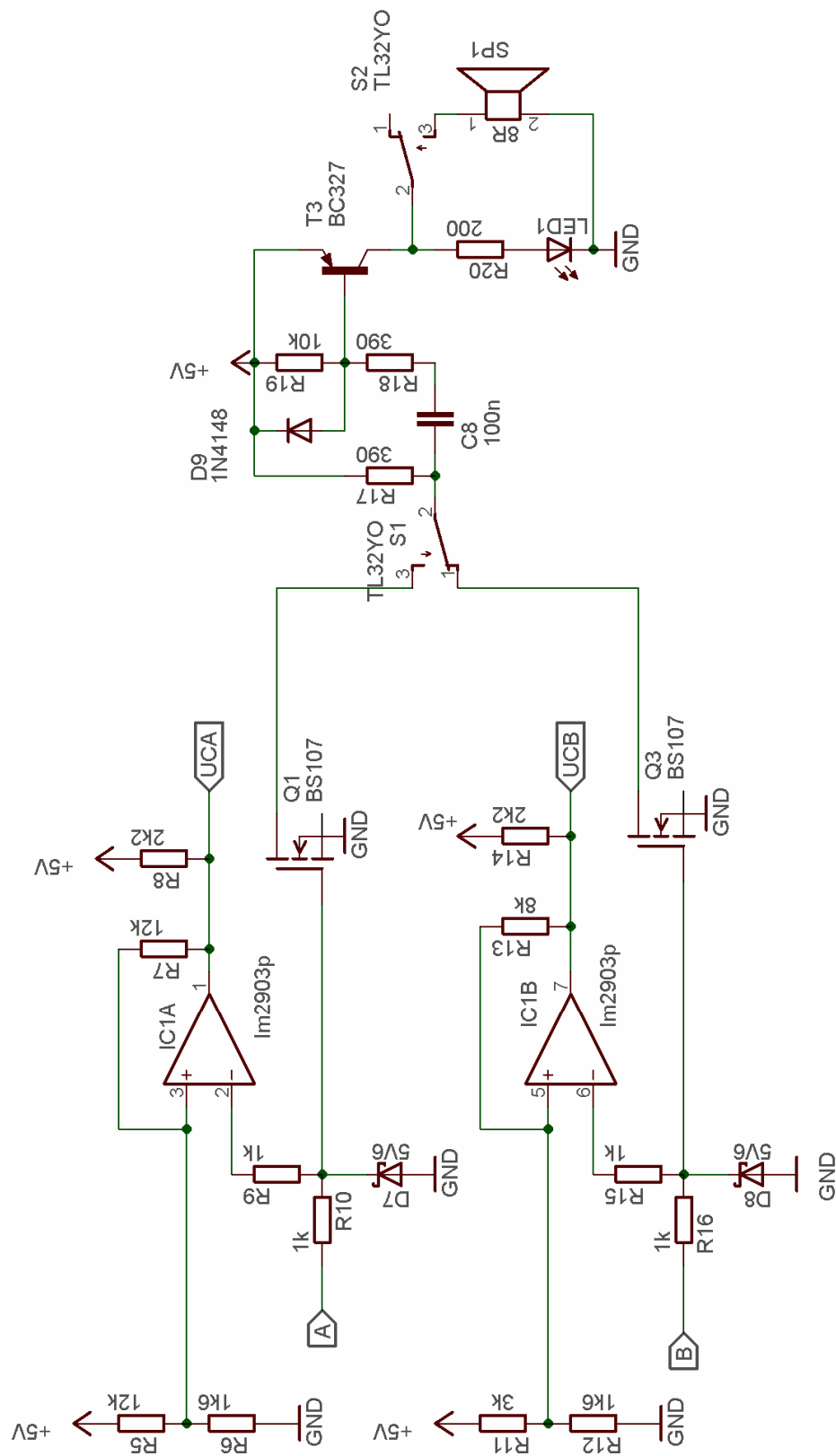


Schéma zapojení Arduina Nano



PŘÍLOHA H

Obsah přiloženého CD

– Bakalářská práce

- + **Katalogové listy** – Technická dokumentace k hardwaru
- + **Dokument** – Text práce ve formátu DOC, PDF
- + **Firmware** – Zdrojové soubory programu
- + **Hardware** – Schéma zapojení dozimetru

PŘÍLOHA I

Návod k použití Dozimetru TUL-IL

Osobní dozimetr TUL-IL slouží k identifikaci ionizujícího záření typu gama a beta. Díky senzoru odděleného od těla přístroje lze přesněji měřit i bodové zdroje. Přístroj je možno připojit k počítači přes rozhraní USB, kam se automaticky zasílají informace, vhodné k dalšímu zpracování.

Bezpečnostní informace

Část přístroje pracuje pod stejnosměrným napětím 400 V, které není schopno dodat větší než bezpečný proud (dle ČSN 33 2000-4-41). Při doteku s živou částí by ovšem mohlo dojít k sekundárním úrazům způsobeným např. úlekem. Proto by přístroj neměl být uváděn do provozu, jestliže do něj vnikla kapalina nebo vykazuje jiné viditelné poškození.

Technické specifikace dozimetru:

Rozsah měření dávkového ekvivalentu za časovou jednotku:	0,06 μ Sv/h – 1000 mSv/h
Rozsah měření kumulovaného dávkového ekvivalentu:	0,1 nSv – 10 mSv
Rozsah měření celkové kumulované dávky:	0,1 nSv – 400 mSv
Rozsah energie zachyceného gama záření: ¹	54 keV – 1,25 MeV
Rozsah energie zachyceného beta záření: ¹	od 500 keV
Rozměry přístroje:	168 x 83 x 57 mm
Rozměry odděleného detektoru:	85 x 59 x 23 mm
Délka propojovacího kabelu:	40 cm
Hmotnost: ²	350 gramů (včetně baterií)
Napájení:	2 AA baterie
Výdrž při běžném radiačním pozadí: ³	100 hodin / 30 hodin
Typ Geiger-Müllerovy trubice:	Si-29bg a Si-25g

¹ Uvedené rozsahy energií platí pouze při hodnotě časové dávky do 500 μ Sv/h

² Měřeno s nabíjecími bateriemi, při použití alkalických se může hmotnost lišit

³ Za běžné pozadí je považována časová dávka do 0,2 μ Sv/h. První hodnota označuje výdrž v signalizačním, druhá ve výpočetně-zobrazovacím módu.

Popis částí přístroje:



Funkce napravo umístěného přepínače:

Prostřední poloha	Přístroj je vypnutý
Dolní poloha	Přístroj je v signalizačním režimu
Horní poloha	Přístroj je ve výpočetně-zobrazovacím režimu

Funkce dvojice přepínačů umístěných více vlevo:

Levý přepínač, dolní poloha	Vyšší citlivost pro signalizační režim
Levý přepínač, horní poloha	Nížší citlivost pro signalizační režim
Pravý přepínač, dolní poloha	Akustická signalizace vypnuta
Pravý přepínač, horní poloha	Akustická signalizace zapnuta

Světelná a zvuková signalizace pulzů je aktivní v signalizačním i výpočetně-zobrazovacím režimu. V signalizačním režimu není v provozu mikropočítač, displej ani světelná signalizace časové dávky. Pokud se zvuková nebo světelná signalizace pulzů přemění z nespojitě na spojitou, je možné přepnout rozsah levým z dvojice přepínačů nalevo. V jistých případech může být zvuková signalizace nežádoucí. Vypnout ji lze přepnutím pravého z dvojice přepínačů nalevo do dolní polohy. Pro přesnější měření je lepší zapnout výpočetně-zobrazovací režim, který vyjadřuje úroveň radiace číselně.

Popis výpočetně-zobrazovací části

Při zapnutí dozimetru TUL-IL do výpočetně-zobrazovacího režimu se nejprve zobrazí úvodní obrazovka s názvem přístroje a napětím baterie. Také se provede diagnostika všech LED diod (postupné probliknutí) a zapípá integrovaný reproduktor. Přístroj přibližně po pěti vteřinách od zapnutí přejde k měření časové dávky.

Měření časové dávky je automaticky zvoleno při zapnutí přístroje. Jinak se volí stiskem levého ovládacího tlačítka. Pokud je na posledním znaku prvního řádku zobrazena hvězdička, není ještě měření úplně přesné, protože přístroj neměl dostupná data z předchozích měření (obvykle ihned po zapnutí přístroje). Znak zmizí do 30 vteřin od zapnutí přístroje. Hodnota na displeji je počítána vždy z několika časových úseků. Při náhlých změnách radiace nejsou data zobrazovaná na displeji přesná ihned. Proto je aktuální časová dávka právě měřeného úseku vyjádřena také pomocí LED diod. Ty signalizují okamžitou časovou dávku neohledě na zvolenou funkci dozimetru. Zjištění abnormální časové dávky je také oznámeno alarmem.

Poslední dva znaky druhého řádku jsou vyhrazeny pro informaci o aktuálně zvolené citlivosti (senzor). K přepínání dochází ve výpočetně-zobrazovacím režimu automaticky.

Nastavené hranice signalizace časové dávky a zvukových alarmů

Časová dávka	Aktivní diody (PIN)	Alarm
> 100 $\mu\text{Sv/hod}$	všechny čtyři	4 kHz po dobu 500 ms
< 100 $\mu\text{Sv/hod}$	spodní tři	2 kHz po dobu 350 ms
< 10 $\mu\text{Sv/hod}$	spodní dvě	1 kHz po dobu 200 ms
< 1 $\mu\text{Sv/hod}$	spodní	žádný
< 0,1 $\mu\text{Sv/hod}$	žádná	žádný

Měření dávky za zvolený čas je přístupné po stisknutí prostředního tlačítka. Na prvním řádku displeje je zobrazen uplynulý čas (ve formátu hodiny:minuty:sekundy). Druhý řádek střídavě zobrazuje obdrženou dávku a ekvivalentní časovou dávku (v rámci časového úseku zobrazeného na prvním řádku). Stisknutím levého a prostředního tlačítka současně lze data vymazat. Je tak učiněno i při vypnutí přístroje. Poslední dva

znaky druhého řádku jsou i zde vyhrazeny pro informaci o aktuálně zvolené citlivosti (senzoru). K přepínání dochází automaticky. Pokud od začátku měření uplyne více než 100 hodin, dojde k vynulování času i dávky za zvolený čas. K vyresetování těchto hodnot dojde i při dávce větší než 10 mSv.

Měření celkové akumulované dávky probíhá nepřetržitě bez závislosti na právě aktivním programu. K aktualizaci hodnoty, přístupné po stisknutí pravého tlačítka, dochází jednou za minutu. Na displeji je kromě dávky zobrazeno i kolik procent z ročního limitu již bylo vyčerpáno. Limit je nastaven na dávku 1 mSv, která odpovídá limitu EPA pro běžného občana. Po vypnutí přístroje se celková akumulovaná dávka nesmaže, zůstává uchována v paměti. Její vymazání je možné stisknutím všech tří tlačítek najednou (dojde ke smazání dat a restartování přístroje). Pokud celková dávka přesáhne hodnotu 400 mSv, dojde automaticky k vynulování hodnot.

Kontrola stavu baterie se provádí každou minutu. Pokud hodnota napětí klesne pod 2 V, spustí se opakovaný zvukový i světelný alarm, který je identický s diagnostikou při zapnutí přístroje a na displeji se zobrazí výzva k výměně baterií. K výměně baterií je potřeba vyšroubovat čtyři šrouby (jsou umístěny ve spodní části dozimetru) a celou horní část odklopit opatrně nahoru. Pokud při zapnutí přístroje do výpočetně-zobrazovacího režimu začne problikávat displej bez zobrazení úvodní obrazovky a proběhnutí diagnostiky, vypněte přístroj a vyměňte v něm baterie. Pravděpodobně kleslo napětí pod hodnotu 0,6 V / článek.

Připojení k počítači se provádí připojením kabelu s koncovkou mini USB do pravého horního rohu na pravém boku přístroje. Dozimetr musí být před připojením vypnutý a po připojení k počítači zapnut pravým přepínačem do dolní polohy. Jinak nemusí být zaručeno správné vytvoření virtuálního COM portu potřebného ke komunikaci. Dozimetr TUL-IL posílá každou minutu data, která jsou potřeba zachytávat například pomocí programu Hyperterminál.

Nastavení portu pro sériovou komunikaci:

Bity za sekundu	9600
Datové bity	8
Parita	žádná
Stop-bity	1
Řízení toku	žádné

Zasílány jsou informace o počtu pulzů za měřený interval jedné minuty a z nich spočtená ekvivalentní časová dávka (pro oba senzory). Kromě toho také stav baterie a celková akumulovaná dávka. Data lze přímo importovat a dále zpracovávat tabulkovými procesory.