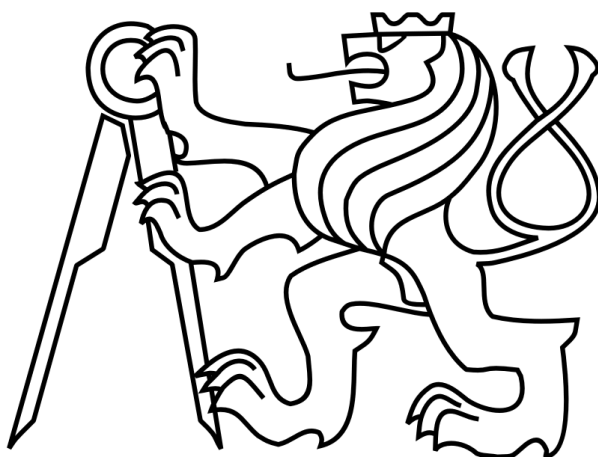


**České vysoké učení technické v Praze**  
**fakulta elektrotechnická**  
**katedra mikroelektroniky**



**Diplomová práce**  
**Měřič ionizujícího záření**

**Autor:** Bc. Václav Lukšan

**Vedoucí práce:** Ing. Pavel Máša, Ph.D.

**2015**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. LUKŠAN Václav**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Obor: Elektronika

Název tématu: **Měřič ionizujícího záření**

### ***Pokyny pro vypracování:***

Navrhněte mobilní měřicí přístroj pro měření nízkých úrovní ionizujícího záření. Zařízení má zobrazovat naměřené hodnoty v přehledné podobě na bodovém displeji. Nastavení přístroje má umožňovat změnu měřicí doby. Součástí přístroje bude vlastní napájecí zdroj. Vítaná je možnost propojení s chytrým telefonem pomocí technologie Bluetooth. Realizujte funkční vzorek tohoto zařízení.

- 1) Proved'te rozbor problematiky.
- 2) Proved'te návrh zařízení.
- 3) Zařízení prakticky realizujte a ověřte jeho činnost.
- 4) Zhodnot'te dosažené výsledky.

### ***Seznam odborné literatury:***

- [1] KNOLL, G. F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Willey, 2010. ISBN: 978-0470131480
- [2] MATOUŠEK, D. a BRTNÍK, B. Mikroprocesorová technika - Práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4 - ATXmega16. Praha: BEN-Technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-4.
- [3] GERNDT, J. a PRŮŠA, P. Detektory ionizujícího záření. Praha: ČVUT v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04710-1.

Vedoucí: **Ing. Pavel Máša, Ph.D.**

Platnost zadání: 31. 8. 2016

L.S.

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 2. 2. 2015

# Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci „Měřič ionizujícího záření“ zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a používal jsem pouze literaturu uvedenou na konci práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 11. 5. 2015.

Václav Lukšan

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Mášovi, Ph. D. za ochotu kdykoli pomoci s řešenými problémy, poskytnuté cenné rady, trpělivost a pomoc při zpracování diplomové práce.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá návrhem a realizací přístroje pro detekci ionizujícího záření, včetně výběru komponent. Při výběru je přihlédnuto k ekonomickému hledisku. Nejdříve jsou obecně přiblíženy základní typy ionizujícího záření, včetně stručného mechanismu rozpadu radionuklidů. Následně jsou rozebrány a diskutovány všechny základní typy detektorů záření, včetně principu funkce jednotlivých typů. Poté je diskutovaný výběr základních komponent s přihlédnutím k ceně a funkčním požadavkům na kompletní zařízení. V dalších kapitolách je rozebírána konkrétní realizace zadaného přístroje a to z hlediska hardware i software. Na závěr je popsán obslužný program na PC.

## **Abstract**

This work deals with the design and implementation of device for detection of ionizing radiation, including component selection. The selection process is done on the basis of economic aspect. First, basic types of ionizing radiation are broadly introduced, including a brief description of nuclear decay mechanism. Next, all the basic types of radiation detectors are analyzed and discussed, including the operational principles of each type. Then, the selection of core components is discussed with regard to price and function requirements for the entire device. In following chapters particular realization of the given device is discussed in terms of hardware and software. Finally, program for the PC is described.

## **Klíčová slova**

Geiger Müllerova trubice, dozimetr, ionizující záření, radiometr, detektor záření, ATXMega32A4U

## **Keywords**

Geiger Müller tube, dosimeter, ionizing radiation, detection of radiation, ATXMega32A4U

# Obsah

Úvod.....	1
1. Ionizující záření .....	3
1.1. Alfa záření.....	3
1.2. Beta záření .....	4
1.2.1. Záření $\beta^-$ .....	4
1.2.2. Záření $\beta^+$ .....	5
1.3. Elektromagnetické záření .....	6
1.3.1. Nízkoenergetické elektromagnetické záření .....	6
1.3.2. Gamma záření .....	7
2. Výběr komponent .....	9
2.1. Požadavky na zařízení .....	9
2.2. Výběr detektoru .....	9
2.2.1. Plynové detektory .....	9
2.2.2. Scintilační detektory .....	13
2.2.3. Polovodičové detektory .....	14
2.2.4. Vyhodnocení.....	14
2.3. Výběr řídicí logiky.....	15
2.4. Výběr krabičky .....	17
2.5. Výběr displeje.....	17
3. Hardware.....	18
3.1. Napájecí bloky .....	18
3.1.1. VN zdroj .....	18
3.1.2. Zdroj 12V.....	21
3.1.3. Zdroj 3,3V.....	22
3.2. Mikropočítač.....	23
3.2.1. Zapojení pinů MCU .....	23
3.2.2. Programování MCU.....	24
3.3. Zpracování signálu z trubice.....	25
3.4. Displej.....	27
3.5. Flash paměť .....	28
3.6. Akumulátor .....	29

3.6.1. Detektor podbití .....	29
3.6.2. Nabíječ akumulátoru .....	31
3.7. USB a Bluetooth .....	32
3.8. Deska plošných spojů a EMC .....	33
4. Software .....	34
4.1. Hlavní program .....	35
4.1.1 Měřicí smyčka.....	35
4.1.2. Přerušovací rutina pro tlačítka .....	38
4.1.3. Konfigurační smyčka .....	39
4.2. Inicializace procesoru a periférií.....	46
4.3. Vytvořené knihovní soubory .....	49
4.3.1. Soubor SSD1305.....	49
4.3.2. Soubor FLASH .....	54
4.3.3. USB.....	58
4.3.4. Bluetooth.....	62
4.4. Bootloader.....	64
5. Výpočet intenzity záření .....	65
Závěr .....	66
Literatura.....	67
Seznam zkratk .....	69
Příloha č.1. Schéma zapojení.....	70
Příloha č.2. Seznam součástek .....	71
Příloha č.3. Výkres vrchní strany DPS .....	74
Příloha č.4. Výkres spodní strany DPS .....	75
Příloha č.5. Osazovací plán vrchní strany DPS .....	76
Příloha č.6. Výkres krabičky.....	77
Příloha č.7. Výkres čelního skla .....	78
Příloha č.8. Nálepka na krabičku .....	79

# Seznam ilustrací

Obr. 1.1. Schéma alfa rozpadu.....	3
Obr. 1.2.1. Schéma beta- rozpadu.....	4
Obr. 1.2.2. Schéma beta+ rozpadu.....	5
Obr. 2.2.1. Závislost počtu sebraných iontů na napětí na detektoru [3] .....	10
Obr.3. Kompletní blokové schéma měřicího přístroje.....	18
Obr. 3.1.1. Schéma spínaného měniče s transformátorem.....	19
Obr. 3.1.2. Schéma zapojení zdroje 12V .....	21
Obr. 3.1.3. Schéma zapojení obvodu MCP1253.....	22
Obr. 3.3. Schéma zapojení vstupní části měřicího přístroje .....	26
Obr. 3.4. Schéma zapojení OLED displeje .....	27
Obr. 3.5 Schéma zapojení Flash paměti .....	28
Obr. 3.6.1 Schéma zapojení komparátoru.....	30
Obr. 3.6.2 Diagram komparátoru, převzato z [8].....	30
Obr. 3.6.2 Schéma zapojení nabíječe.....	31
Obr. 3.7 Schéma zapojení Bluetooth modulu .....	33
Obr. 4.1. Vývojový diagram hlavní smyčky.....	35
Obr. 4.1.1.a. Měřicí obrazovka .....	36
Obr. 4.1.1.b. Vývojový diagram Měřicí smyčky .....	37
Obr. 4.1.2. Vývojový diagram přerušovací rutiny .....	39
Obr. 4.1.3.a. Obrazovka konfiguračního módu .....	39
Obr. 4.1.3.b. Vývojový diagram konfigurační smyčky .....	40
Obr. 4.1.3.c. Vývojový diagram pro posun kurzoru .....	41
Obr. 4.1.3.1. Ilustrace proměnné selected_row .....	42
Obr. 4.1.3.2. Seznam bitmap menu.....	43
Obr. 4.1.3.3.a. Ilustrace funkce proměnné menu_okno .....	45
Obr. 4.1.3.3.b. Obsah paměti video_RAM .....	45
Obr. 4.2. Vývojový diagram inicializace MCU.....	46
Obr. 4.3.1.1.a. Vývojový diagram inicializace displeje.....	51
Obr. 4.3.1.1.b. Pohyb adresového ukazatele v horizontálním režimu, převzato z [11]..	52
Obr. 4.3.1.8. Dialogové okno.....	54
Obr. 4.3.2.3. Schéma čtení dat z Flash paměti, převzato z [13] .....	56
Obr. 4.3.2.4. Schéma zápisu jednoho bajtu do flash, převzato z [13] .....	56



Obr. 4.3.2.6. Schéma zápisu s automatickou inkrementací [13] .....	57
Obr. 4.3.3.1.a Vývojový diagram přijímání znaku .....	59
Obr. 4.3.3.1.b Vývojový diagram dekódování příkazu .....	59
Obr.4.3.3.2.a. Obrázek dialogového okna PC aplikace .....	61
Obr.4.3.3.2.b. Vývojový diagram PC Aplikace.....	62

## Seznam tabulek

Tab. 3.2.1. Výstupní porty MCU .....	24
Tab. 4.1.1. Knihovní soubory vytvořené speciálně pro měřicí přístroj. ....	34
Tab. 4.1.2. Použité knihovní soubory od firmy Atmel. ....	34
Tab. 4.1.3.1. Seznam proměnných.....	42
Tab. 4.3.1. Seznam funkcí v souboru SSD1305 .....	50
Tab. 4.3.2. Seznam funkcí v souboru FLASH.....	55
Tab. 4.3.3.1. Seznam příkazů v tabulce „command table“ .....	60
Tab. 4.3.4. Seznam funkcí v souboru bluetooth .....	63

# Úvod

Předkládaná Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací přenosného a citlivého přístroje pro detekci ionizujícího záření. Přístroj umožňuje určit intenzitu ionizujícího záření procházejícího detektorem. Jedná se tedy o komplexní zařízení obsahující detektor záření, převodník signálu a vyhodnocovací logiku s výstupem naměřených dat. V dnešní době je naprostá většina těchto přístrojů založena na plně elektrickém principu, kdy je možné naměřený signál bez jakéhokoli převodu zpracovat na moderních výpočetních prostředcích.

Na trhu existuje řada přenosných přístrojů pro detekci ionizujícího záření. Jejich cena se pohybuje ve velkém rozpětí od několika tisíc korun až do desítek tisíc dle měřicích možností, které zahrnují. Tato práce je zaměřena na realizaci cenově nenáročného zařízení, proto budou výsledky porovnané s přístroji v oblasti jednotek až jedné desítky tisíc korun. Přístroje spadající do této cenové relace jsou výhradně nespektrometrického typu. Je možné tedy určit typ ionizující částice a její četnost. Nelze určit spektrum, tedy přesnou energii zachycené částice.

Z přístrojů spadajících do této kategorie je na místním trhu k dostání nejlevnější možné zařízení Voltcraft-Gamma-Check A za maloobchodní cenu 4600 Kč. Nabízí měření gamma záření v rozsahu 0,01 až 999,9 mSv/h s přesností  $\pm 10\%$ . Tento přístroj je však vybaven miniaturní skleněnou Geiger Müllerovou trubicí (bude popsáno později) s označením SI25G, ve které dochází průměrně ke čtyřem detekcím za minutu v normálním prostředí. Při takto nízkém počtu detekcí však extrémně vzrůstá chyba měření, proto je tento přístroj pro nízké úrovně záření nepoužitelný.

Další v řadě je přístroj Gamma Scout za maloobchodní cenu 12000 Kč nabízí možnost měření alfa, beta a gamma záření. Přístroj je opět vybaven Geiger Müllerovou trubicí tentokrát se slídivým okénkem umožňující přístup  $\alpha$  záření. Vkládáním clon pak lze získat citlivost buď na  $\alpha + \beta + \gamma$  nebo  $\beta + \gamma$  nebo samotné  $\gamma$  záření. Přitom citlivost detektoru na záření gamma je udávána jako 95 impulzů při 1  $\mu$ Sv/h, což odpovídá přibližně deseti impulzům v normálním prostředí. Přístroj obsahuje mnoho užitečných funkcí jako je možnost propojení a stažení naměřených dat do PC.

Cílem této práce je navrhnout a realizovat ekonomicky výhodný, avšak na rozdíl od předchozích, citlivý přenosný měřicí přístroj pro detekci nízkých úrovní ionizujícího záření typu gamma. Kladen je důraz také na přehlednost číselné reprezentace výsledků měření a jednoduchou obsluhu přístroje včetně nastavení. Dále je při návrhu počítáno s možnostmi záznamu dat popřípadě exportu a zpracování výsledků na osobním počítači. Další výhodnou vlastností může být propojení a možnost odesílání naměřených dat do chytrého telefonu pomocí technologie Bluetooth.

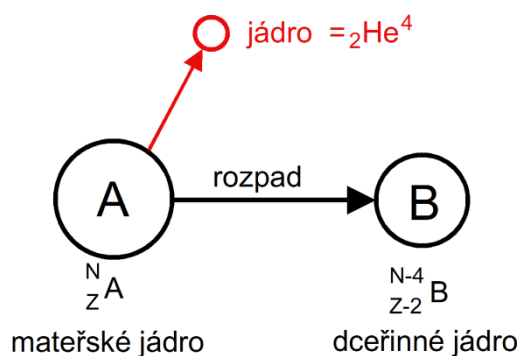
# 1. Ionizující záření

Ionizující záření je tok vysokoenergetických částic, schopných ionizovat ostatní látky. Způsobuje tedy, díky své energii, rozpad atomu na iontový pár, záporný a kladný iont. Ionizující záření může být přírodní nebo umělé. Přírodní vzniká rozpadem přírodních radionuklidů, nebo dopadem záření z kosmu. Umělé záření vzniká činností člověka, jeho zdrojem může být například rozpad uměle vytvořených radionuklidů, diagnostické přístroje jako rentgen, urychlovač částic, jaderná energetika aj.

Mimo uměle vytvořených vysokoenergetických elektromagnetických vln vzniká záření výhradně radioaktivním rozpadem nestabilních jader atomu. Definice radioaktivity citovaná ze zdroje [4]: „Radioaktivita je jev, kdy dochází k samovolné vnitřní přeměně složení nebo energetického stavu atomových jader, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření. Jádra vykazující tuto vlastnost se nazývají radionuklidy.“ Radioaktivní rozpad lze rozdělit na několik typů podle druhu částic, které rozpadem vznikají.

## 1.1. Alfa záření

Při radioaktivním rozpadu typu alfa dochází k vyzáření  $\alpha$  částice z jádra mateřského atomu. Částicí je zde jádro hélia  ${}^2_2\text{He}^4$ . K rozpadu dochází u těžších prvků, kdy je v jádru velký počet nukleonů a přitažlivé pole silných interakcí není na okrajích jádra dostatečně silné, aby překonalo odpudivé síly mezi protony. Dochází k formování menších jader (hélia), s pevnějšími vazbami, které díky Tunelovému kvantovému jevu překonají přitažlivé síly jádra a opustí ho. Schéma přeměny je patrné na obrázku 1.1. Číslo N zde symbolizuje počet nukleonů v jádře a Z symbolizuje protonové číslo.



Obr. 1.1. Schéma alfa rozpadu

Při rozpadu mateřské jádro ztratí dva protony a dva neutrony tedy čtyři nukleony čímž se posune v Mendělejevově periodické tabulce, o dva prvky, směrem doleva. Po rozpadu následuje vyrovnaní vnitřních energetických stavů v dceřiném jádru což má za následek emisi gamma záření (Podrobněji bude popsáno v kapitole gamma záření).

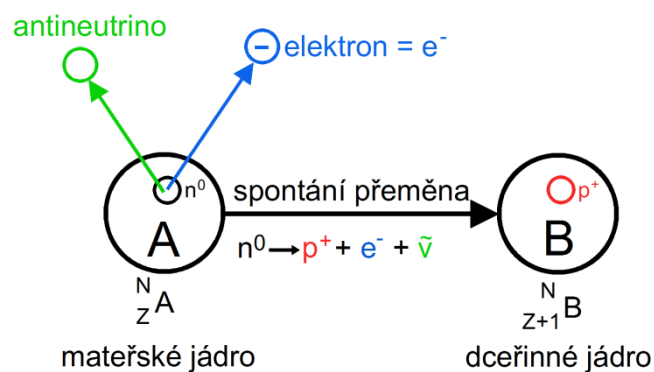
Jádro hélia je nejtěžší vyzářenou částicí při radioaktivním rozpadu. Jádro dosahuje mezi všemi druhy ionizujícího záření největších ionizačních účinků, jeho energie se pohybuje v rozmezí 4 až 9 MeV. Vzhledem ke své vysoké hmotnosti však při průchodu hmotným prostředím dochází k ionizaci a postupné ztrátě energie. V případě šíření vzduchem, částice naráží na molekuly a vytváří ionizací pár elektron a kationt. Každou srážkou ztratí částice část své energie, přibližně 32eV. Z toho lze vyvodit dolet částice, který se pohybuje ve vzduchu kolem několika centimetrů. V případě tuhých látek je vzdálenost ještě kratší.

## 1.2. Beta záření

Při radioaktivním rozpadu typu  $\beta$  dochází k emitování  $\beta$ -částice s vysokou rychlostí z mateřského jádra. Beta záření se dělí na dva nejdůležitější případy,  $\beta^-$  kdy z jádra vylétají záporně nabitě částice (elektrony) a  $\beta^+$ , kdy z jádra vyletují kladně nabitě částice, takzvané pozitrony.

### 1.2.1. Záření $\beta^-$

Při tomto radioaktivním rozpadu je z jádra emitovaná vysokou rychlostí částice  $\beta^-$ , tedy elektron. V jádru dochází k přeměně volného neutronu na proton elektron a antineutrino. Schéma přeměny je znázorněné na obrázku 1.2.1.



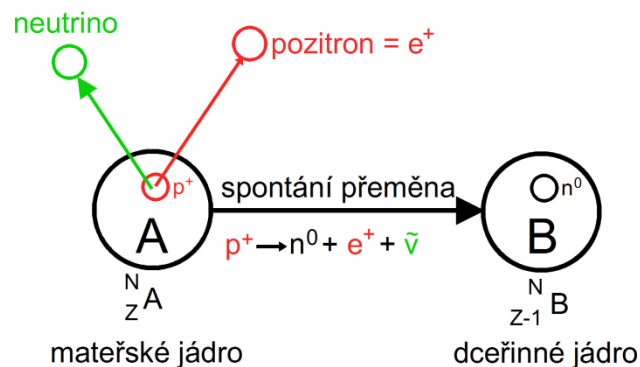
Obr. 1.2.1. Schéma beta- rozpadu

Jak je patrné, dochází k přeměně neutronu na proton, tedy nukleonové číslo se nezmění, zatímco protonové číslo stoupne o jeden proton. To znamená, že se z prvku stane složitější prvek, posune se tedy v Mendělejevově tabulce směrem doprava.

Samotná přeměna je založena na nestabilitě volného neutronu, který má sám o sobě velice krátkou dobu života v řádu sekund. Pokud neutron není vázaný silnou interakcí k protonu, nedochází mezi nimi k paritní neutron-protonové přeměně a dochází k jeho rozpadu dle zmíněného schématu. Lze tedy říci, že k  $\beta^-$  rozpadu dochází v jádru s přebytkem neutronů. Energie vyzářeného elektronu je menší než 1,16 MeV. Spektrum vyzářeného elektronu je spojitě neboť energie 1,16 MeV se rozloží mezi elektron a antineutrino dle Fermiho teorie beta rozpadu. Následná emise gamma záření je opět spojena s vyrovnáváním jádra do klidového stavu.

### 1.2.2. Záření $\beta^+$

Při tomto radioaktivním rozpadu je z jádra emitovaná vysokou rychlostí částice  $\beta^+$ , která se nazývá pozitron. Tato částice je antičásticí elektronu, tedy má stejnou klidovou hmotnost, ale opačný náboj. Při rozpadu dochází v jádru k přeměně protonu na neutron pozitron a neutrino. Schéma přeměny je znázorněné na obrázku 1.2.2.



Obr. 1.2.2. Schéma beta+ rozpadu

Dochází k přeměně protonu na neutron, tedy nukleonové číslo zůstává opět stejné, zatímco protonové číslo klesne o jeden proton. Prvek se posune v Mendělejevově periodické tabulce o jednu pozici směrem doleva. K  $\beta^+$  přeměně dochází, pokud je v jádru přebytek protonů. V takovém případě zabírají protony vyšší energetické hladiny než neutrony. K vyrovnání energetických stavů dochází přeměnou protonu na neutron, který zaujme nižší energetickou hladinu.

### 1.3. Elektromagnetické záření

Ionizující elektromagnetické záření je záření s tak vysokou energií (frekvencí), že dokáže nepřímo ionizovat jiné látky. Tedy interakcí záření s látkou vznikají iontové páry. Energie záření zde závisí na frekvenci záření a odpovídá vztahu 1. Kde  $E$  je energie záření v eV,  $h$  je Planckova konstanta o hodnotě  $6,6267 \cdot 10^{-34}$  J.s,  $c$  je rychlost světla,  $\lambda$  je vlnová délka záření a  $e$  je elementární náboj o hodnotě  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

$$E = \frac{h c}{\lambda} \cdot \frac{1}{e} \quad (1)$$

Elektromagnetické záření podléhá takzvanému korpuskulárně-vlnovému dualismu, kdy se elektromagnetická vlna chová jednak jako vlna a jednak jako částice. Přitom při nízkých frekvencích převládají vlastnosti vln (ohyb, interference, rozptyl, lom) a při vysokých frekvencích typicky rentgenové a gamma záření převládají vlastnosti částic. (fotoefekt, tvorba nových částic či interakce). Zde se vlna šíří jako takzvaná fotonová kvanta.

#### 1.3.1. Nízkoenergetické elektromagnetické záření

Mezi měkká elektromagnetická záření patří záření s nízkou energií typicky 100 eV až 200 keV. Patří sem zejména ultrafialové záření, dále jen UV, a rentgenové záření. Tento typ záření vzniká převážně uvnitř elektronového obalu přeskoky mezi energetickými hladinami.

Energetické hladiny v atomu jsou reprezentované oběžnými drahami elektronu (tzv. kvantovými hladinami), kdy každý elektron obíhá po stabilní dráze, jejíž obvod je celistvým násobkem vlnové délky elektronu. Přitom rozložení energetických hladin je charakteristické pro každý prvek. Obecně lze říci, že v blízkosti jádra je energetický rozdíl mezi jednotlivými kvantizačními hladinami větší než na vzdálených orbitech. Přitom energie jednotlivých hladin se zvyšuje s hmotnostním číslem atomu, tedy počtem nuklidů v jádru. V klidu elektrony obsazují nejnižší neobsazené hladiny, tedy v blízkosti jádra. Pokud je elektronu dodána nějaká energie, např. interakcí s fotonem, dochází k přeskoku elektronu na vyšší energetickou hladinu, dochází k takzvané excitaci elektronu. Pokud dochází k excitaci na vyšších energetických hladinách, je třeba nižší energie než na nižších energetických hladinách.

K vyzáření fotonového kvanta dochází při „zpětném seskoku“ elektronů z vyšších energetických hladin do nižších, takzvané deexcitaci. Vyzářený foton si pak podle zákona o zachování energie odnáší energetický rozdíl mezi hladinami. Vzhledem k tomu, že elektron nabývá diskretních energetických hladin je jasné, že rozdíl mezi hladinami bude také diskretní a tedy i spektrum vyzářeného fotonu bude nabývat diskretních hodnot.

UV záření vzniká deexcitací elektronu ve středních částech elektronového obalu, energie fotonů se pohybuje v rozmezí přibližně 4 až 100 eV. Rentgenové záření má kratší vlnové délky, tedy vyšší energii, než UV záření. Energie fotonů se zde nejčastěji pohybuje v rozmezí přibližně 1 až 200 keV. Vzniká buď při přeskokách elektronů mezi vnitřními energetickými hladinami těžších atomů, nebo jako brzdné záření v rentgenkách při dopadu a prudkém zabrzdění elektronů, urychlených napětím v řádu desítek kilovoltů.

### **1.3.2. Gamma záření**

Gamma záření má nejkratší vlnovou délku z celého spektra elektromagnetického záření. Její hodnota je přibližně  $10^{-10}$  m a kratší. Vlnová délka odpovídá frekvencím v řádu  $10^{20}$  Hz. Energie gamma fotonu se na zemském povrchu pohybuje v rozmezí desítek keV až jednotek MeV, v případě kosmického záření může dosahovat hodnot až  $10^{20}$  eV.

Záření  $\gamma$  má opět diskretní spektrum a vzniká zejména při deexcitaci vybuzených energetických hladin v atomových jádrech při radioaktivním rozpadu. Při radioaktivním rozpadu je z jádra emitováno buď jádro hélia, v případě alfa rozpadu, nebo elektron v případě beta rozpadu. Vzniklý prostor po uvolněných nukleonech je následně velmi rychle zaplněn protony a neutrony z vyšších energetických hladin, jinými slovy, v jádru dojde k vyrovnání energetických stavů. Rozdíl energií při deexcitaci je opět vyzářen v podobě fotonového kvanta. V případě jádra je mezi hladinami velký energetický rozdíl v řádu stovek keV až jednotek MeV proto má vyzářený foton vlnovou délku odpovídající  $\gamma$  záření.

Některé radionuklidy s nízkým počtem nukleonů se mohou při rozpadu přeměnit přímo na základní stav dceřiného jádra. V takovém případě dochází pouze k emisi  $\alpha$  či  $\beta$  bez doprovodu  $\gamma$  záření. Takových materiálů je však v přírodě pouze malé množství



například: tritium  $^3\text{H}$  nebo uhlík  $^{14}\text{C}$ . Většina radionuklidů při rozpadu vyzařuje kombinaci  $\alpha$  a  $\gamma$  nebo  $\beta$  a  $\gamma$ .

Druhá možnost vzniku  $\gamma$  záření je urychlením elektronu v elektrickém poli o velikosti několik MV. Následným prudkým zbrzděním elektronu je uvolněn foton o energii odpovídající rozdílu kinetické energie elektronu.

## 2. Výběr komponent

### 2.1. Požadavky na zařízení

Hlavními požadavky, kterými se řídí výběr jednotlivých součástí a komponent je dostatečná citlivost přístroje, tedy schopnost měřit nízké úrovně záření jako je přírodní pozadí, a mobilita korespondující s přijatelnými rozměry přístroje. Mobilní přístroj musí být dále vybavený vlastním napájecím zdrojem s dostatečnou výdrží, alespoň 12 hodin. Pro zobrazování výstupních údajů je požadovaný grafický displej s rychlou odezvou a širokými pozorovacími úhly. Konfigurační menu přístroje musí být schopné nastavit základní parametry měření.

Rozšiřující funkce mohou být: propojení s PC pomocí USB rozhraní, s možností přenosu naměřených dat, dále propojení s mobilním telefonem, kde je možné zobrazit naměřené údaje, a konečně možnost rozšíření, použitím druhého externího detektoru.

### 2.2. Výběr detektoru

Detektor ionizujícího záření je obecně zařízení, které detekuje ionizující částici (foton) procházející detektorem, resp. převádí část nebo celou její energii na elektrický signál.

Detektory ionizujícího záření se dělí do několika skupin podle funkčního principu. Jedním je rozdělení na spektrometrické detektory a nespektrometrické detektory. Nespektrometrické detektory detekují pouze interakci s obecnou ionizující částicí v určitém čase, nelze však s nimi určit energii částice. Spektrometrické detektory mají proti tomu schopnost určit energii částice na základě jejich ionizačních účinků. Lze tedy rozeznat, o jakou částici se jedná.

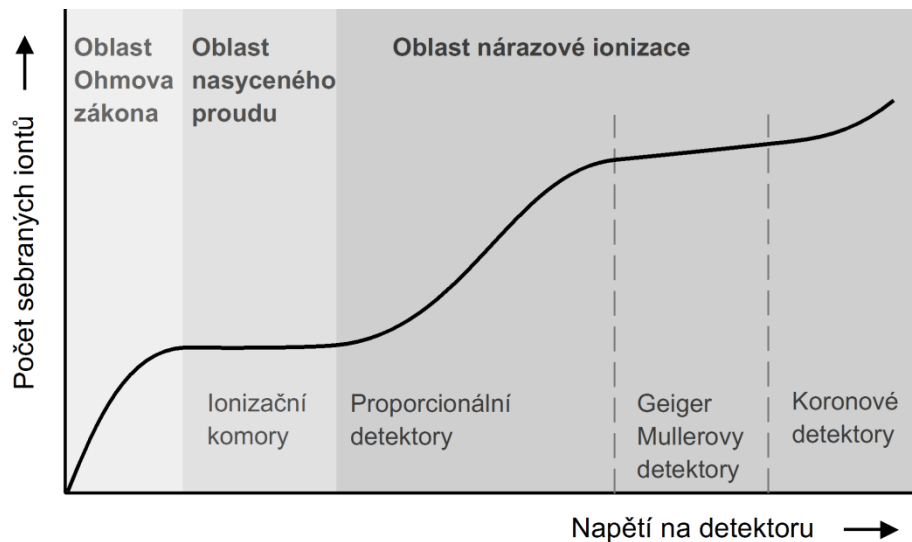
Dále se detektory dělí do skupin podle principu funkce. Jednou velkou skupinou jsou plynové detektory, do druhé velké skupiny patří scintilační detektory a poslední významnou skupinu tvoří polovodičové detektory.

#### 2.2.1. Plynové detektory

Tyto detektory pracují na principu ionizace plynu. Tedy plyn zde funguje za normálních podmínek jako izolant mezi elektrodami, na nichž je elektrické napětí. Při interakci plynové molekuly s ionizující částicí (fotonem) se molekula rozpadne na kladný iont a

elektron, kdy kladný iont je posléze přitahován katodou a elektron anodou. Dojde k vzniku elektrického proudu, tedy elektrického signálu.

Do skupiny plynových detektorů patří: ionizační komory, proporcionální detektory, Geiger Müllerovy detektory a korónové detektory, kdy se jednotlivé typy od sebe liší především rozsahem ionizace vnitřního plynu při interakci s ionizující částicí.



Obr. 2.2.1. Závislost počtu sebraných iontů na napětí na detektoru [3]

Na obr. 2.2.1, je závislost počtu sebraných iontů elektrodami plynového detektoru na napětí na elektrodách, při konstantním toku ionizujících částic. Je patrné, že při zvyšování napětí dochází při interakci s ionizující částicí ke vzniku více iontů, přičemž na charakteristice vzniká několik ploch s různou směrnici, které jsou navzájem odlišné mechanismem ionizace uvnitř detektoru a jejím rozsahem.

### 2.2.1.1. Ionizační komory

Pokud zvyšujeme na detektoru napětí od nuly, pohybujeme se kolem počátku charakteristiky na obr. 2.2.1, Dochází ke vzniku elektrického pole, které ovšem není dostatečné k oddělení produktů ionizace. Tedy při interakci plynu s ionizující částicí (fotonem) dochází sice k rozpadu molekuly na kladný iont a elektron, ale elektrické pole není natolik silné, aby tyto produkty od sebe včas oddálilo, dochází tedy ke zpětné rekombinaci. Tato oblast se jmenuje „Oblast Ohmova zákona“. Při zvyšování napětí roste rychlost iontů a klesá pravděpodobnost rekombinace. Od určitého napětí je elektrické pole dostatečné ke 100% oddělení iontů a vzniku proudu, tedy volné ionty nestačí rekombinovat a všechny se podílí na vedení proudu. Zde je „Oblast nasyceného

proudu“, ve které se nachází pracovní oblast ionizačních komor. Elektrické pole zde není dostatečné k vytváření sekundárních iontů, proto je proud nezávislý na přiloženém napětí a sebraný náboj z elektrod odpovídá ionizačním účinkům interagujících částic. Proud při interakci s částicí se zde pohybuje v řádu  $10^{-12}$  A a je velice náročné tento proud detekovat.

### **2.2.1.2. Proporcionální detektory**

Při zvyšování napětí nad pracovní oblast ionizačních komor, dospějeme do bodu, kdy je elektrické pole mezi elektrodami natolik silné, že dojde k takovému urychlení produktů ionizace, že při srážce s neutrální molekulou dochází k její ionizaci. Tyto nově vzniklé ionty jsou posléze také urychlovány a vytvářejí další ionty. Tím pádem dochází ke vzniku laviny, která se šíří od bodu primární ionizace ve směru elektrického pole. Jeden iont zde tedy způsobí zažehnutí iontové laviny, která se projeví výrazným navýšením proudu. Zavádí se zde tedy pojem plynové zesílení, které udává poměr mezi vybuzeným proudem a ionizačními účinky částice. Plynové zesílení závisí na přiloženém napětí a u tohoto typu dosahuje řádově hodnot  $10^3$ . K vyhasnutí laviny zde dojde samovolně, aniž by se rozšířila do celého objemu detektoru.

### **2.2.1.3. Geiger Müllerova trubice**

Pokud se bude napětí dále zvyšovat nad pracovní oblast proporcionálních detektorů, dostaneme se do pracovní oblasti Geiger Müllerova detektoru. Intenzita elektrického pole je zde natolik vysoká, že produkty ionizace mohou mimo nárazové ionizace excitovat elektrony či molekuly do vyšších energetických hladin. Při jejich zpětné deexcitaci dochází k uvolnění fotonu. Tento foton se může šířit všemi směry, a pokud dopadne na katodu, může dojít k uvolnění fotoelektronu, který způsobí opět lavinu šířící se směrem k anodě. Tím pádem se v tomto detektoru rozšíří ionizace, za několik  $\mu$ s po primární ionizaci, do celého objemu detektoru. Uhašení ionizovaného plynu musí být uskutečněno snížením intenzity elektrického pole detektoru. Plynové zesílení tohoto typu detektoru dosahuje hodnot  $10^6$  až  $10^{10}$ , tudíž ho předurčuje pro detekci slabě ionizujících částic, zároveň ovšem rozsah ionizace znemožňuje udržení informace o ionizačních účincích interagující částice, tím pádem je tento typ detektoru nespektrometrický.

Geiger Müllerovy detektory se dále dělí na samozhášecí a nesamozhášecí. Historicky starší jsou nesamozhášecí. Jako plynová náplň je zde použitý čistý inertní

plyn, tvořící pouze kladné ionty, nejčastěji argon. V tomto případě se lavina uhasí pouze snížením napájecího napětí. Samozhášecí detektory mají proti tomu v plynové náplni příměs látky jejíž ionizační potenciál je nižší a molekulární struktura složitější, než základního plnicího plynu. Při interakci s částicí se z molekuly argonu vytvoří kladné ionty a elektrony. Ve vzniklé lavině pak dochází k excitaci molekul. Fotony vzniklé deexcitací poté interagují, místo s katodou, s těžkými molekulami zhasčecího plynu v blízkosti prvotní ionizace. Ionizace se tedy nerozšiřuje rovnoměrně v celém objemu díky fotoelektronům, jako je tomu u nesamozhášecích trubíc, ale šíří se poměrně malou rychlostí od místa prvotní ionizace. Kladné ionty přitom vykonají řadu srážek převážně s molekulami zhasčecího plynu. Vzhledem k tomu, že je ionizační potenciál zhasčecího plynu nižší než potenciál argonu, přenesení kladný iont svůj náboj na molekuly zhasčecího plynu. Ke katodě poté pokračuje molekula zhasčecího plynu. Při jejich následovné neutralizaci na katodě se uvolněná energie využije s daleko větší pravděpodobností k disociaci jejich složitých molekul než k uvolnění elektronu z povrchu katody. Tím pádem nedojde ke vzniku dalších lavin a výboj je uhašen. V některých případech ovšem mohou vznikat falešné impulzy objevující se s odstupem za pravými impulzy. Tyto impulzy jsou způsobeny situací, kdy kladný iont argonu nepředá svůj náboj zhasčecímu plynu a dostane se až ke katodě, kde dojde k uvolnění elektronu a zapálení další laviny.

Jako zhasčecí náplň se původně používaly alkoholové páry. Tyto páry ovšem postupem času degradovaly a ztratily svoji zhasčecí funkci. To je způsobeno tím, že již disociované molekuly zhasčecího plynu nejsou schopny regenerace v původní molekuly. Životnost detektoru byla tímto omezena na  $10^8$  detekovaných impulzů. Později byly nahrazeny páry alkoholu za halogeny, které mají schopnost navrácení disociovaných molekul do neutrálního stavu. Tím pádem už se zhasčecí směs vlivem detekce neopotřebovávala. Nevýhodná vlastnost je vysoká reaktivita halogenů, kdy je třeba ošetřit pasivací stěny detektoru, aby nedocházelo k reakci s plynem. Po určité době se ovšem halogenové molekuly přesto navážou na stěny detektoru, čímž se zředí zhasčecí náplň a neplní správně svoji funkci.

#### **2.2.1.4. Koronové detektory**

Při zvyšování napětí nad oblast Geiger Mülletrova detektoru dochází k zapálení korony. Při zápalném napětí, vykazuje téměř nulový proud, který se zvyšujícím se napětí plynule roste, až po mez, kdy se zapálí doutnavý výboj. Intenzita elektrického pole je natolik vysoká, že dochází k uvolňování elektronů z katody a tím k zapalování mnoha

lavin, které se navenek chovají jako nepřetržitý výboj. Výboj se jeví jako světélkující oblak obklopující celou plochu anody.

Při interakci detektoru s ionizující částicí (fotonem) dojde uvnitř detektoru opět ke vzniku laviny, která ovšem mezi mnoha lavinami koronového výboje nelze rozeznat. Detekce je tedy možná pouze u částic s vyššími ionizačními účinky, které způsobí vznik mnoha lavin, čímž výstupní proud vzroste nad práh šumu. Tento fakt předurčuje detektor pro detekci velmi silně ionizujících částic.

### **2.2.2. Scintilační detektory**

Scintilátor je obecně látka, která převádí ionizující záření na záblesky ultrafialového až viditelného světla. Obecný mechanismus převodu lze vysvětlit tím, že energie ionizujícího záření je absorbovaná materiálem excitací molekul či elektronů do vyšších energetických hladin. Při zpětné deexcitaci je pak uvolněn foton s mnohem menší energií, než mělo původní ionizující záření. Typicky, frekvence uvolněného fotonu spadá do viditelného spektra, energeticky v rozmezí 1,6 až 3,5eV.

Fotonové záblesky vzniklé deexcitací jsou poté detekovány různými typy optických detektorů. V devatenáctém století se k detekci využíval mikroskop a pozorovatel svým subjektivním vjemem vyhodnocoval viditelný počet záblesků. Další zásadní pokrok nastal až v roce 1944, kdy byl v Los Alamos poprvé použit scintilační detektor ve spojení s fotonásobičem. Zde se jednotlivé fotony zesilují na kaskádě fotokatod, až vzniká silný elektrický signál, který má dostatečnou úroveň pro další zpracování. Výsledná úroveň výstupního napětí je pak úměrná energii částic. Hlavní nevýhoda této aparatury spočívá ve značných rozměrech a křehkosti fotonásobiče, proto není možné tento systém využít pro přenosný měřicí přístroj.

V poslední době, kdy došlo k rozmachu polovodičové techniky, bylo možné v některých případech nahradit vakuový násobič polovodičovými detektory. Pro vysoké úrovně záření, kdy dochází ve scintilátoru ke generování velkého množství fotonů je možné využívat fotoodpor, fotodiodu nebo fototranzistor. Výhodou je přibližně lineární převodní charakteristika. Při nízkých úrovních záření, kdy je třeba detekovat jednotlivé záblesky (jednotlivé fotony) se využívá takzvaná lavinová APD dioda. Zde je PN přechod závěrně polarizovaný vysokou intenzitou elektrického pole, napětí se zde pohybuje v rozsahu desítek až stovek voltů. V případě dopadu fotonu dochází

k lavinovému průrazu. Zesílení takového systému je až  $10^6$ , podobně jako u Geiger Müllerova detektoru. Stejným způsobem jako u GMT se provádí i uhašení laviny, tedy zapojením sériového zhasacího rezistoru. Tímto řešením jsou ovšem ztraceny všechny výhody scintilačního detektoru tedy především proporcionalita.

### 2.2.3. Polovodičové detektory

S rozvojem polovodičové techniky se vyvinulo i odvětví polovodičových detektorů. Mechanismus detekce je zde stejně jako u jiných polovodičových senzorů založený na ionizaci PN přechodu. Jednotlivé přechody jsou pak složeny do matice a tvoří plošný detektor. Orientace přechodů může být buď vertikální, pro detekci silného gamma záření, nebo horizontální, vytvořená planární technologií, s okénky pro měkká záření. V dřívějších dobách bylo jako základní materiál využívané germánium. Tento materiál ovšem vykazuje za pokojové teploty příliš vysoký šum, proto musí být chlazen na teplotu 77 K. V dnešní době se proto k výrobě detektorů využívají moderní materiály, jako je Si nebo GaAs.

Výhoda polovodičových detektorů proti plynovým detektorům spočívá v potřebě nižší energie  $w$  pro vznik páru elektron – kationt, tedy nosiče náboje. Zatímco v případě plynových detektorů se střední energie pohybuje okolo  $w \approx 30$  eV/pár, v případě polovodičových detektorů je potřebná energie pouze  $w \approx 3$  eV/pár. Tedy pro stejnou intenzitu záření je v polovodičovém detektoru generovaný desetinásobek nosičů náboje než v plynových detektorech. To je způsobeno malou šířkou zakázaného pásu PN přechodu, typicky jednotky eV. Nevýhodná je cena detektorů, která se pohybuje v řádu jednotek až desítek tisíc korun.

### 2.2.4. Vyhodnocení

Hlavními požadavky na celé zařízení jsou vysoká citlivost, mobilita a nízká cena. Z těchto důvodů byl jako typ detektoru zvolen Geiger Müllerův detektor, který je výhodný z hlediska svého plynového zisku, přijatelných rozměrů a nízké ceny. Konkrétní typ SBM-19. Jedná se o trubici s kovovým obalem, která je určena pro detekci gama a beta částic. Trubice je koncepčně starší, jedná se o nesamozhášecí typ, tudíž bude zapotřebí elektrického zhasení. Její nezvratnou výhodou je ovšem větší životnost, protože v trubici nedochází k degradaci zhasacího plynu ať už opotřebením či stářím jako je tomu u samozhášecích trubic. Navíc v trubici nevznikají falešné impulzy.

Citlivost trubice vychází z jejích rozměrů, které jsou 22 x 200 mm, dosahuje průměrně 120 detekcí za minutu v normálním prostředí. S rozměry trubice je nutné počítat při výběru vhodné konstrukční krabice.

### **2.3. Výběr řídicí logiky**

Další z otázek je, jakým obvodem budou zpracována data z GM trubice. Vzhledem k tomu, že je intenzita záření určena četností záblesků v trubici a tedy i četností napěťových impulzů na vyhodnocovacím obvodu, je velice výhodné využít ke zpracování dat čítač. Pro zobrazení a zpracování dat je pak vhodné využít složitější číslicový systém. Při výběru výpočetní logiky připadají v úvahu dva číslicové systémy, které vycházejí z odlišných koncepcí. Jsou jimi programovatelná hradlová pole a mikropočítače.

Programovatelná hradlová pole vycházejí z integrace mnoha logických buněk, které se pomocí programovatelných propojovacích polí spojují do velkých logických celků, čímž je realizována výsledná logická funkce. Hradlová pole procházela postupem času velkým vývojem, dříve vyráběné kombinační obvody s polem OR a AND se vyvinuly ve složité sekvenční obvody s řadou integrovaných periférií. V úvahu přichází obvod FPGA, kterými lze realizovat rozsáhlé logické funkce převyšující potřeby této aplikace. Základem tohoto obvodu jsou konfigurovatelné logické bloky, které se skládají z několika logických buněk a konfigurační logiky. Každá logická buňka obsahuje konfigurovatelnou nonvolatilní paměť, paměťový člen a řídicí logiku. Jednotlivé logické bloky mohou být různě propojeny globální propojovací maticí. Každý I/O pin je připojen ke konfigurovatelnému vstupně/výstupnímu bloku. Ten obsahuje záchytné registry a konfigurovatelné budiče sběrnice. FPGA mohou dále obsahovat mnoho periferních obvodů, od čítačů, řadičů externí paměti, blokovou paměť RAM až po Ethernetové transceivery. Vzhledem k tomu, že je funkce vytvořena propojováním fyzických velmi rychlých logických buněk, je obvod určen pro práci ve stovkách MHz, což se odráží v jeho vysoké ceně.

Proti tomu mikropočítače vycházejí z koncepce složitěho stavového automatu, kterému předepisuje chování program uložený v programové paměti. Mikropočítač obsahuje vše potřebné pro svoji funkci, tedy programovou paměť, procesor, výstupní porty a řadu podpůrných periférií, uvnitř jednoho pouzdra. V dnešní době je na trhu



mnoho typů těchto počítačů lišící se ve výpočetním výkonu, velikosti integrované paměti, počtu integrovaných periférií, od čehož se odvíjí jejich cena. Tyto obvody jsou výrobci určeny pro řízení drobných elektrických zařízení, automatizaci, měření a další. Tedy jsou určeny pro široké využití, proto jsou navrženy tak, aby byly univerzální. Díky své univerzálnosti mohou být obvody vyráběny ve velkých sériích, což se příznivě podepisuje na jejich ceně.

Jako řídicí logika byl zvolen jednočipový mikropočítač od firmy Atmel. Jedná se o typ ATXmega32A4U vycházející z rodiny Xmega. Tato řada navazuje na starší řadu Mega. Jedná se tedy opět o 8-mi bitovou architekturu s redukovanou instrukční sadou. V tomto případě ovšem vývojáři implementovali podporu operací s 16 a 32 bitovými čísly v jednom strojovém cyklu, což vedlo ke zvýšení výpočetního výkonu při práci s formáty integer a long. Dále je zde rozšířen adresovatelný prostor na 24bit a je implementovaná násobička s podporou desetinných čísel s pevnou řádovou čárkou. Další z výhod je možnost taktování jádra procesoru až do frekvence 32MHz s použitím interního fázového závěsu (PLL) a externího krystalu pracujícího na frekvenci 16MHz. Díky tomu vzrostl proti předchozí řadě výkon na 32MIPS. Protože je kmitočet na 32MHz násoben vnitřně, je snížena elektromagnetická emise na vyšších kmitočtech. V neposlední řadě tento procesor přešel na napájecí napětí 3,3V čímž byla snížena spotřeba.

Dále mikropočítač obsahuje řadu užitečných periférií, mimo DMA řadiče, který sdílí adresní sběrnici s jádrem, obsahuje tzv. událostní systém, kterým je možno spojovat jednotlivé periferie mezi sebou bez zásahu procesoru. Tento systém obsahuje 8 kanálů, z nichž každý může být připojen na jednu vstupní událost a libovolný počet výstupních událostí. Vstupní událostí je zde myšleno například přetečení čítače, výstupní událost pak například hodinový signál čítače. V katalogovém listu je pak u každé z periférií uveden seznam vstupních a výstupních událostí, které lze spojovat. Také je možné, libovolným z kanálů, přerušovat procesor s libovolnou úrovní priority.

Další z výhod tohoto MCU jsou velice pokročilé vstupně/výstupní porty. Zde je možné nastavit chování jednotlivých pinů nezávisle na sobě. Tato vlastnost je vykoupena větší složitostí konfigurace, kdy je třeba nastavit u každého pinu vlastní konfigurační registr. Samozřejmostí je možnost připojení k událostnímu systému, kde je možné nastavení vyvolání události při sestupné, náběžné nebo obou hranách, nebo

logických úrovních. Dále je možné u každého z portů nezávisle nastavit dva vektory přerušení, z nichž každý může být maskovaný svým registrem a může mu být přiděleno libovolné ze tří úrovní přerušení. Samotné výstupní budiče obsahují mimo běžných funkcí jako je pull up nebo pull down rezistor, také sofistikované chování výstupních tranzistorů jako je funkce AND nebo OR, kterými lze napodobit například chování výstupních budičů mikropočítače s jádrem 8051. V neposlední řadě jsou porty vybaveny řízením rychlosti přeběhu, čímž může být eliminována nežádoucí elektromagnetická emise.

MCU také obsahuje mnoho periferních obvodů, jako je SPI, USART, high speed 10-bit ADC, pokročilé 8/16bit čítače/časovače, komparátory, přesnou napěťovou referenci Band gap a dále pak modul USB pracující do rychlosti full speed. Procesor byl vybrán také s přihlédnutím k ceně, která se pohybuje v maloobchodním prodeji okolo 88Kč.

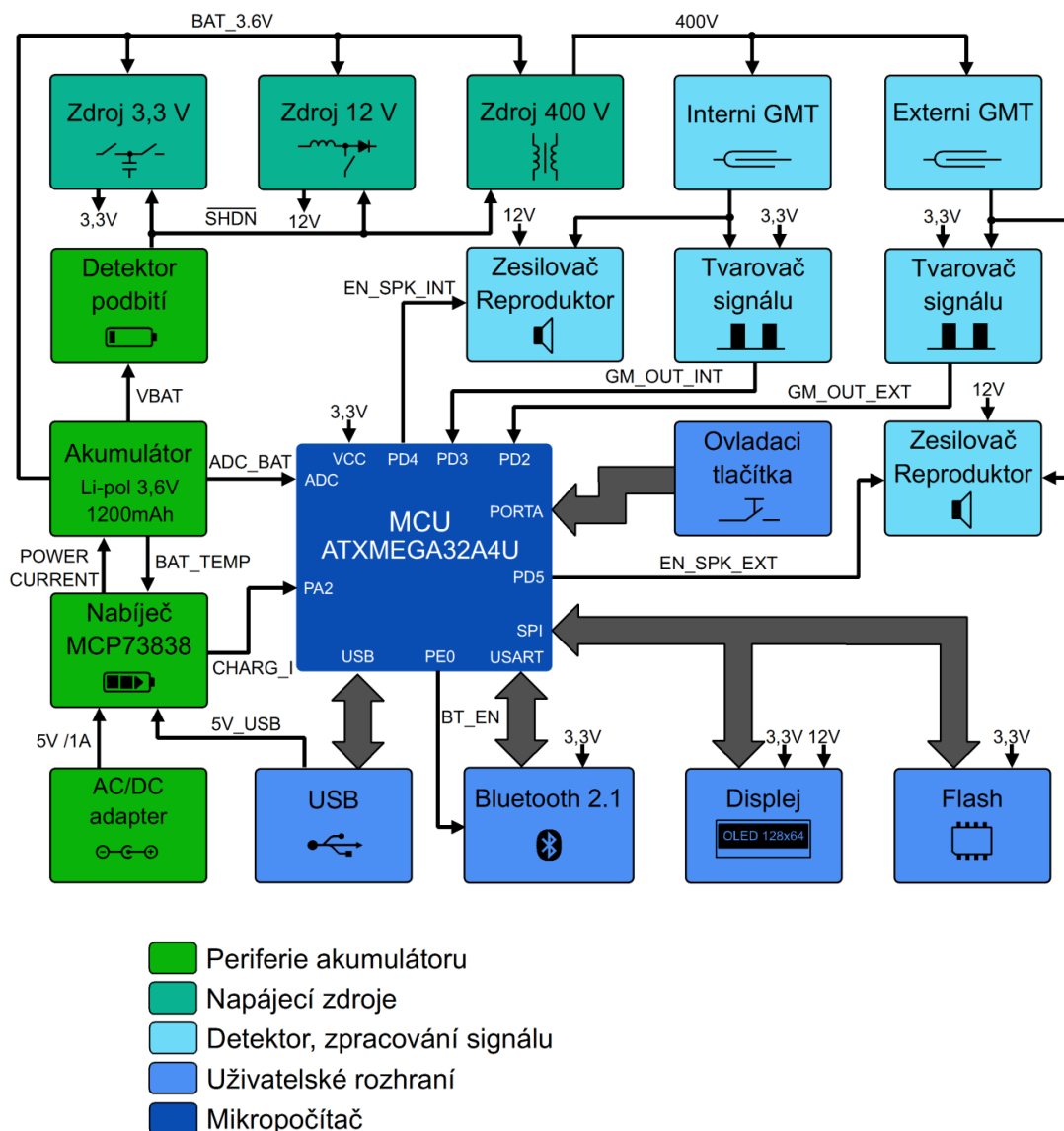
## **2.4. Výběr krabičky**

Především z rozměrových požadavků GM trubice byla zvolena krabice od výrobce Hammond Manufacturing s označením 1553T. Tato krabice je přímo předurčena pro přenosné přístroje obsahující displej. Její rozměrový výkres je v příloze.

## **2.5. Výběr displeje**

S výběrem vhodného displeje je spojeno, mimo požadavku rychlé odezvy a širokého rozsahu pozorovacího úhlu, také jeho rozměry ve vztahu ke konstrukční krabičce. Je tedy nutné tyto dvě položky vybírat společně. Konstrukční krabička s označením 1553T má výřez pro displej o rozměrech 83 mm x 63 mm, přitom jsou v krabičce připraveny distanční sloupky s rozpětím 82 mm x 40 mm. Displej je tedy nutné přizpůsobit těmto rozměrům. Zvolen byl displej od firmy Raystar s označením RET012864CYPP3N00000. Jedná se o monochromatický displej, s rozlišením 128x64 bodů, technologie OLED, který má velmi krátkou časovou odezvu a velmi dobrý pozorovací úhel přesahující v obou osách 160°. Displej je vybaven vlastním řadičem s označením SSD1305. Jeho předností je možnost výběru komunikace ať už paralelní s označením 8080 nebo 6800, které se využívají u většiny univerzálních LCD displejů, tak i sériové rozhraní SPI nebo I2C.

## 3. Hardware



Obr.3. Kompletní blokové schéma měřicího přístroje

### 3.1. Napájecí bloky

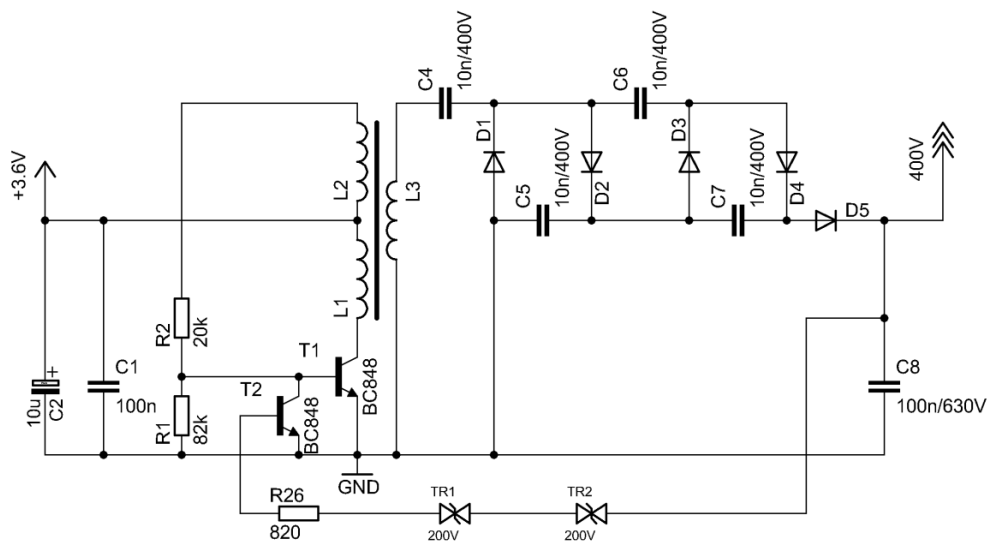
#### 3.1.1. VN zdroj

Pracovní oblast Geiger Müllerovy trubice je v napěťovém rozsahu 360 V až 460 V. Napájecí akumulátor přitom dosahuje jmenovitého napětí pouze 3,6 V. Je tedy nutný návrh zvyšujícího měniče z 3,6 V na pracovní napětí trubice. V dnešní době se ke zvýšení napájecího napětí využívají spínané měniče s indukční cívkou typu Step-up, které vynikají dobrou účinností, nízkým počtem součástek a poměrně velkým přenášeným výkonem, který se pohybuje řádově v desítkách wattů. V tomto případě je

ovšem násobící poměr větší než 100, což je pro měnič s indukční cívkou příliš vysoká hodnota. K dosažení takto vysokého násobícího poměru by bylo třeba indukční cívku s vysokou jakostí. Dále by měnič musel pracovat v oblasti téměř stoprocentního činitele plnění (duty cycle) při značné frekvenci pro minimalizaci ztrát. Vzhledem ke konečným spínacím časům tranzistorů a době zotavení usměrňovací diody je tato možnost ekonomicky nerealizovatelná. Proto byl zvolen jako typ měniče spínaný zdroj s transformátorem.

Jako materiál jádra byl zvolen běžně dostupný typ N22, který dosahuje saturace 300mT při magnetické intenzitě 170A/m. Přitom maximální pracovní frekvence se pohybuje kolem 1MHz. Pokud je uvažována symetrická střída spínání, předpokládá se ve spektru převaha třetí a páté harmonické složky, z čehož vyplývá, že maximální frekvence první harmonické složky je tímto materiálem omezena přibližně na 200kHz.

Transformátor je možné budít integrovaným obvodem, který obsahuje vše potřebné v jednom pouzdru, tedy omezení budícího proudu, PWM zpětnovazební regulaci výstupního napětí, nastavení pracovního kmitočtu a mnohdy obsahuje i spínací tranzistor s ochranami proti přepětí. Cena nejlevnějších obvodů však neklesne v maloobchodním prodeji pod 50 Kč. Vzhledem k tomu, že impulzní odběr trubice je přibližně 40uA při napětí 400V, není třeba využívat složité a mnohdy stále cenově nevýhodné integrované obvody určené pro vyšší výkony. Pro tuto aplikaci postačí samokmitající transformátorový oscilátor se zavedenou silnou zápornou zpětnou vazbou tedy  $\beta A > 1$ . Schéma zapojení měniče je na obrázku 3.1.1.



Obr. 3.1.1. Schéma spínaného měniče s transformátorem

Tranzistor T1 spíná primární vinutí L1. Vinutí L2 zde tvoří zpětnovazební vinutí, které otáčí fázi o 180°, čímž je splněna jedna z podmínek vzniku oscilací. Druhou podmínku  $\beta A > 1$  definuje počet závitů zpětnovazební vinutí společně s rezistory R1 a R2. Tranzistor T2 blokuje tranzistor T1 ve chvíli, kdy napětí na výstupním kondenzátoru C5 dosáhne napětí 400V, tedy napětí překlene bariérové napětí obou transilů TR1 a TR2 se jmenovitou hodnotou 200V zapojených sériově.

Převodní poměr transformátoru je volen tak, aby při vybitém akumulátoru bylo výstupní napětí vyšší než 400V. Akumulátor je typu Li-pol, proto jeho napětí nesmí klesnout pod 3V. Tato mez je tedy uvažována jako spodní hranice napájecího napětí. Poměr mezi výstupním a vstupním napětím bude minimálně  $U_{out}/U_{in} = 134$ . Pokud by byl na transformátor nárokován převodní poměr 134, bylo by potřeba navinout vysoký počet sekundárních závitů, což by se promítlo na velikosti transformátoru. Proto byl obvod doplněn o násobič napětí s násobícím poměrem 4x. Výsledný převodní poměr transformátoru je tedy minimálně  $N_2/N_1 = 34$ .

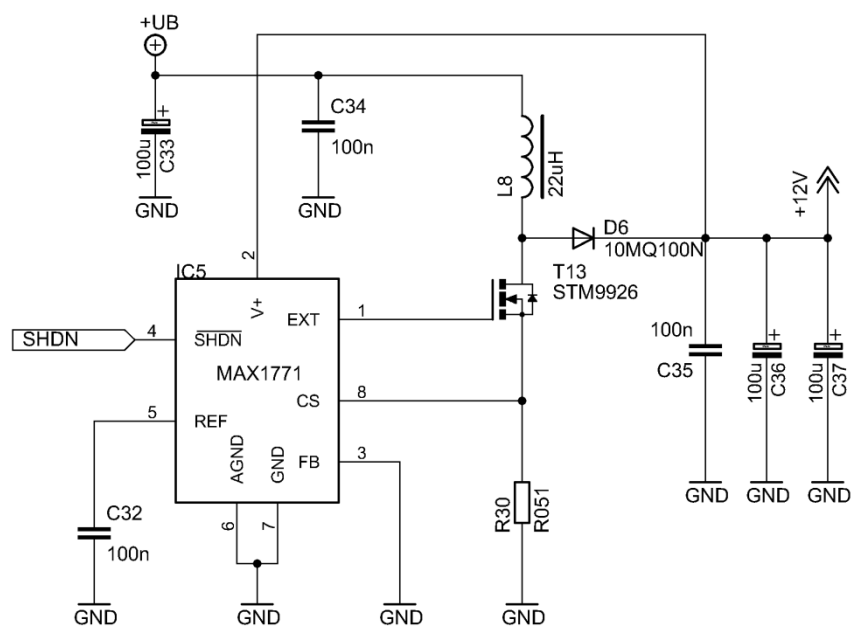
Jádro transformátoru bylo zvoleno typu EE, s rozměry 18 mm x 24 mm x 4mm a průřez středového sloupku 16 mm<sup>2</sup>. Střední délka siločáry je zde 58 mm. Jádro bylo voleno větší, než je třeba pro přenášený výkon a to z důvodu velikosti mezery pro závit. Magnetická intenzita je určena s rezervou  $H = 100$  A/m, aby docházelo k co nejmenším ztrátám v objemu jádra. Rezervu je možné si dovolit vzhledem k předdimenzování objemu jádra. V tento okamžik je možné spočítat sycení A/závit.

$$I \cdot N = H \cdot l_e = 100 \cdot 0,058 = 5,8 \text{ A/z} \quad (2)$$

Hodnota 5,8 A/z je pro náš přenášený výkon naprosto nevyužitelná, vzhledem k velmi nízkým proudům, které se pohybují řádově v desítkách mA a nedostatečnému prostoru pro namotání odpovídajícího počtu závitů. Počet závitů byl proto zvolen tak, aby drát zaplnil celý objem mezery, při stylu vinutí závit vedle závitu a prokládáním izolace mezi jednotlivými vrstvami. Přitom drát byl zvolen tak, aby zaručoval při vinutí dostatečnou mechanickou pevnost a nedošlo k jeho přetržení, byl zvolen průměr 0,05 mm. Konečný počet závitů je 15 závitů primární vinutí, 15 závitů zpětnovazební vinutí a 600 závitů sekundární vinutí.

### 3.1.2. Zdroj 12V

Displej, reproduktory a signalizační sirénka v měřicím přístroji jsou napájeny z napětí 12V. Ve všech třech případech se jedná o výkonové prvky, u nichž se předpokládá nejvyšší odběr, proto je nutné pro minimalizaci odběru proudu z akumulátoru v tomto případě použít měnič s co nejvyšší účinností. Za tímto účelem byl implementován spínaný měnič s cívkou typu Step-up. Integrovaný obvod byl zvolen od firmy Maxim Integrated s označením MAX1771. Tento obvod se vyznačuje vyšší pracovní frekvencí, tím pádem menší indukčností transformační cívky a vynikající účinností pohybující se kolem 85%. Schéma zapojení vychází z katalogového doporučení a je na obrázku 3.1.2.

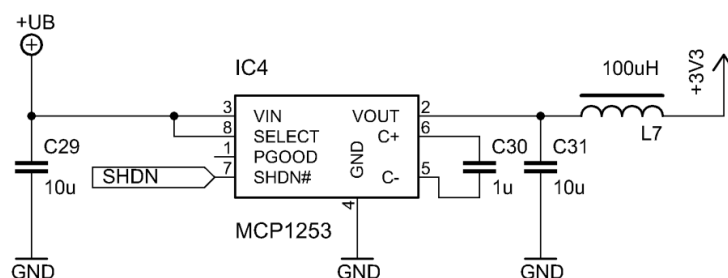


Obr. 3.1.2. Schéma zapojení zdroje 12V

Obvod je zde zapojený v takzvaném „Bootstrapped módu“, kdy je obvod napájen z vlastního výstupu. Výhoda spočívá v tom, že je obvod schopen pracovat s vysokou účinností i při malém napájecím napětí konkrétně 2 V. V tomto módu slouží zároveň napájecí pin i jako zpětná vazba, která je interně nastavena na 12 V, proto je pin FB připojen na zem. Obvod dále potřebuje pro svoji funkci externí spínací tranzistor. Vybrán byl typ STM9926, který vyniká svým nízkým prahovým napětím, malými rozměry a nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu. Rezistor R30 slouží k omezení spínacího proudu. Obvod je vybaven signálem SHDN, který slouží k uspaní obvodu při vybití akumulátoru.

### 3.1.3. Zdroj 3,3V

V přístroji je použit akumulátor Li-pol se jmenovitým napětím 3,6 V. Napětí akumulátoru se tedy pohybuje v pracovním rozsahu 3 V až 4,2 V. Jak je patrné, výstupní napětí zdroje 3,3 V je položeno v intervalu pracovního rozsahu napětí akumulátoru. Napětí akumulátoru v průběhu provozu tedy může být vyšší i nižší než 3,3 V. Proto není možné pro stabilizaci použít běžný lineární stabilizátor nebo snižující či zvyšující měnič. Je třeba použít obvod typu Buck-boost, který obsahuje kombinaci zvyšujícího a snižujícího měniče. V nabídce výrobců lze najít měniče s indukční cívkou nebo nábojové pumpy. Mezi měniče s indukční cívkou patří například obvody TPS63001 od firmy Texas Instruments nebo LTC3443 od Linear Technology. Obvody mají obvykle vstupní napětí v rozsahu 2,4 V až 5,5 V a výstupní proud se pohybuje okolo stovek mA. Jejich rysem je vysoká pracovní frekvence a vynikající účinnost pohybující se v celém rozsahu vstupního napětí kolem 95 %. Tyto vlastnosti se ovšem odrážejí na ceně, která je 140 Kč za LTC3443 a 85 Kč za TPS63001. Proti tomu nábojové pumpy se vyznačují nízkou pořizovací cenou, ale podstatně horší účinností. Obvod MCP1253 v ceně 35 Kč je Buck-boost nábojová pumpa s pevně daným výstupním napětím 3,3 V a vstupním napětím v rozsahu 2 V až 5,5 V. Účinnost obvodu je závislá na okamžité hodnotě vstupního napětí a pohybuje se od 50 % do 90 %. V průměru kolem 65 %. V měřicím přístroji se počítá s průměrným odběrem pro 3,3 V nepřesahujícím 30 mA, proto není snížená účinnost obvodu závažný nedostatek. Zvolen byl tedy obvod MCP1253 s přihlédnutím k jeho nízké ceně. Další výhodou tohoto obvodu je nízký počet externích součástek. Vyžadovány jsou pouze tři keramické kondenzátory. Proti tomu měniče s indukční cívkou se neobejdou bez již zmiňované indukční cívky, která se navíc projevuje nežádoucí elektromagnetickou emisí, schotkyho diody a kondenzátorů s nízkým ESR, jejichž cena je také nezanedbatelná. Schéma zapojení obvodu MCP1253 je na obrázku 3.1.3.



Obr. 3.1.3. Schéma zapojení obvodu MCP1253

Obvod potřebuje pro svoji funkci minimální počet součástek, pouze jeden externí kondenzátor a jeden nabíjecí kondenzátor na vstupu a na výstupu. Doporučené jsou kondenzátory keramické s dielektrickým materiálem typu X7R. Kondenzátory jsou na desce plošných spojů rozmístěny tak, aby byly v těsné blízkosti integrovaného obvodu, čímž je minimalizovaná indukčnost vodivých cest. Pinem „Select“ se vybírá výstupní napětí, připojením na vstupní napětí je výstup 3,3 V, připojením na zem 5 V.

## **3.2. Mikropočítač**

### **3.2.1. Zapojení pinů MCU**

Použitý mikropočítač je typ ATXMega32A4U v pouzdře TQFP-44, které je určené pro SMD montáž. Pouzdro obsahuje trojici napájecích pinů, které je nutné ošetřit blokačními kondenzátory. Použita je kombinace keramických kondenzátorů o jmenovitých hodnotách 1 nF, pro vyšší kmitočty, a 100 nF, pro nižší kmitočty. Kondenzátory jsou typu SMD, velikosti 0805 a 1206. Materiál dielektrika je výhradně X7R. MCU také obsahuje oddělené napájecí piny pro integrovaný AD převodník. Napájení je zde oddělené od zbytku procesoru proto, aby rušení vznikající rychlým spínáním tranzistorů, nepronikalo do přesných napěťových referencí, od kterých se odvíjí výsledek převodu ADC. Proto je nutné napájecí napětí převodníku filtrovat. Pro filtraci je použita tlumivka L6 s indukčností 10uH a trojicí kondenzátorů C26 až C28 s kapacitami 100 nF, 10 nF a 1 nF.

Hodinový kmitočet procesoru je odvozen od frekvence oscilátoru s externím krystalem 16MHz. Krystal je dle katalogového listu blokován kondenzátory 22pF. Frekvence je vnitřně násobena fázovým závěsem (PLL) na hodnotu 32MHz. Tím pádem je výkon procesoru pro jednocyklové instrukce 32MIPS.

Mikropočítač obsahuje 3 úplné vstupně/výstupní porty (PA, PC, PD) a dva neúplné (PB a PE). Propojení jednotlivých pinů s okolními obvody je provedeno s ohledem na rozmístění součástek po DPS tak, aby se nekřížily jednotlivé vodivé cesty. V tabulce 3.2.1 je seznam všech IO pinů a k nim přiřazených signálů.



Tab. 3.2.1. Výstupní porty MCU

<i>port</i>	<i>signál</i>	<i>port</i>	<i>signál</i>
PA0	Rezervováno	PC4	CS_SPI_CON
PA1	ADC_BAT	PC5	MOSI_FLASH
PA2	CHARG_INF	PC6	MISO_FLASH
PA3	ALARM	PC7	CLK_FLASH
PA4	SW_LEFT	PD0	CS_FLASH
PA5	SW_UP	PD1	OLED_VPP
PA6	SW_RIGHT	PD2	GM_OUT_INT
PA7	SW_ENTER	PD3	GM_OUT_EXT
PB0	SW_DOWN	PD4	EN_SPK_INT
PB1	SW_rezervováno	PD5	EN_SPK_EXT
PB2	OLED_CS	PD6	USB_D-
PB3	OLED_RES	PD7	USB_D+
PC0	OLED_D/C	PE0	BT_EN
PC1	OLED_CLK	PE1	BT_rezervováno
PC2	rezervováno	PE2	BT_RX
PC3	OLED_DATA	PE3	BT_TX

### 3.2.2. Programování MCU

ATXMega32A4U je možno naprogramovat dvěma způsoby. Pomocí rozhraní PDI, nebo pomocí tzv. Bootloaderu. V prvním případě se jedná o novou programovací sběrnici od firmy Atmel probíhající po dvou vodičích. Rozhraní PDI umožňuje přepis veškerých pamětí i debugging procesoru.

Bootloader je jakási zaváděcí část programu, která je napsaná tak, aby byla sama schopná pomocí určeného periferního komunikačního rozhraní (USART, USB) uložit program do určené paměti. V tomto typu procesoru je navíc Bootloader aktualizovatelný. To znamená, že oproti starší verzi procesoru, kde byl zaváděcí program uložený v paměti ROM, zde je umístěný ve stejné Flash paměti, ve které je program a lze ho tedy změnit nebo úplně smazat. V tomto konkrétním typu je Bootloader umístěný před aplikační částí programové paměti a má velikost 4kB. Bootloader je možné uvést do činnosti dvěma způsoby. První možnost je vynulováním

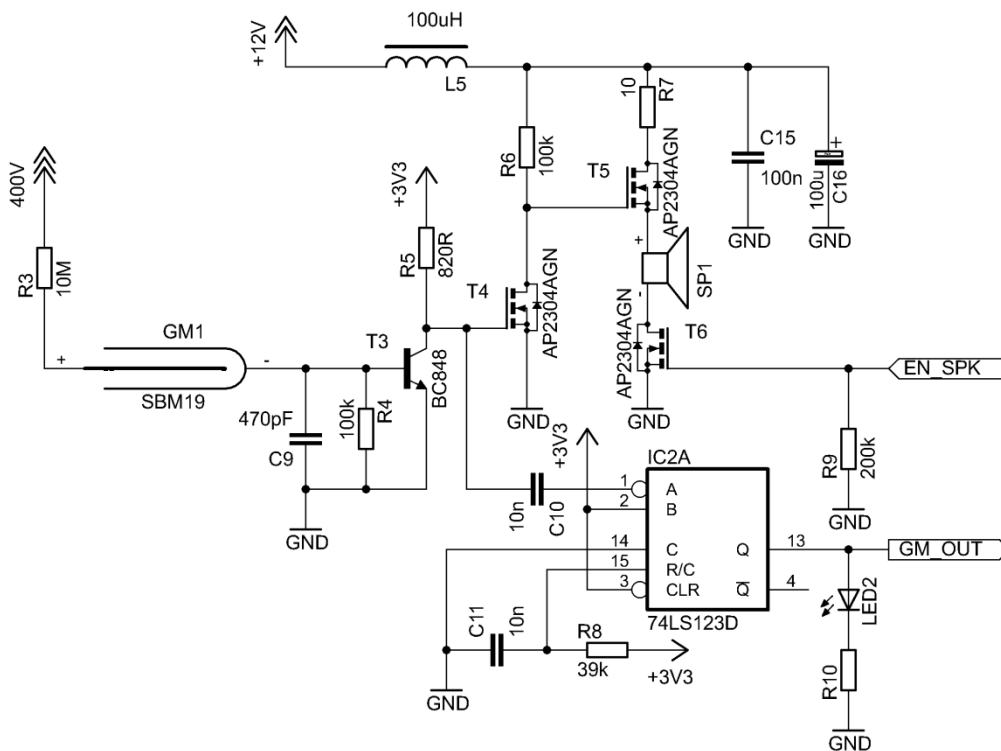
fusebitu BOOTRST. Programový čítač pak bude ukazovat po resetu procesoru, místo na začátek aplikační sekce (nastaveno defaultně) na začátek sekce Bootloaderu. Druhá možnost je využití softwarového resetu s referencí na začátek sekce Bootloaderu. Tímto způsobem lze spustit Bootloader přímo při běhu aplikační části programu.

V případě tohoto projektu byl zvolen Bootloader dodávaný výrobcem, který využívá k přenosu dat USB. Program je třeba při prvním programování procesoru nahrát do paměti pomocí PDI programátoru. Také je nutné nastavit fusebit BOOTRST na hodnotu BOOTLDR. Tím pádem po resetu začne program na začátku sekce Bootloaderu, kde je umístěný test pinu PC3. Pokud je jeho hodnota logická nula, vykoná se Bootloader, pokud logická jedna, program skočí na začátek aplikační sekce. Je tedy možné pinem PC3 rozhodnout, jestli bude po resetu spuštěný Bootloader nebo Aplikační program. Pin je proto opatřený zkratovací propojkou, která ho uzemní a tím spustí Bootloader. Pin PC3 je ovšem také využit jako jeden z řídicích signálů displeje a kdyby byl uzemněný zkratovací propojkou s téměř nulovým odporem, došlo by k jeho zničení. Proto je v sérii se zkratovací propojkou zapojený rezistor s takovým odporem, který při inicializaci bezpečně stáhne signál do hodnoty logické nuly, ale nevádí při provozu pinu v roli výstupního portu.

### **3.3. Zpracování signálu z trubice**

Zpracování signálu z trubice zahrnuje bloky GMT, Tvarovač signálu, Zesilovač reproduktor. Schéma zapojení je na obrázku 3.3.

Na anodu Geiger Müllerovy trubice je přivedeno přes rezistor R3 10Mohm napájecí napětí 400V. Rezistor zde funguje jako elektrické zhášení trubice. Principiálně se jedná o mechanismus, kdy trubice tvoří s rezistorem dělič napětí. V klidu, když trubice není ionizovaná, má mnohem větší odpor než je 10Mohm, všechno napětí je tedy na trubici. Při interakci s ionizující částicí (fotonem), dojde v trubici k prudké ionizaci a obvodem začne téct proud, který je vyhodnocen tranzistorem T3, dojde k jeho sepnutí. Zároveň ovšem prudce klesne odpor trubice a tím klesne i její napětí, čímž dojde k „uhašení“ laviny. Rychlost uhašení laviny je dána sériovým odporem a kapacitou trubice, která je 22pF. Pro tuto konfiguraci činí 250us.



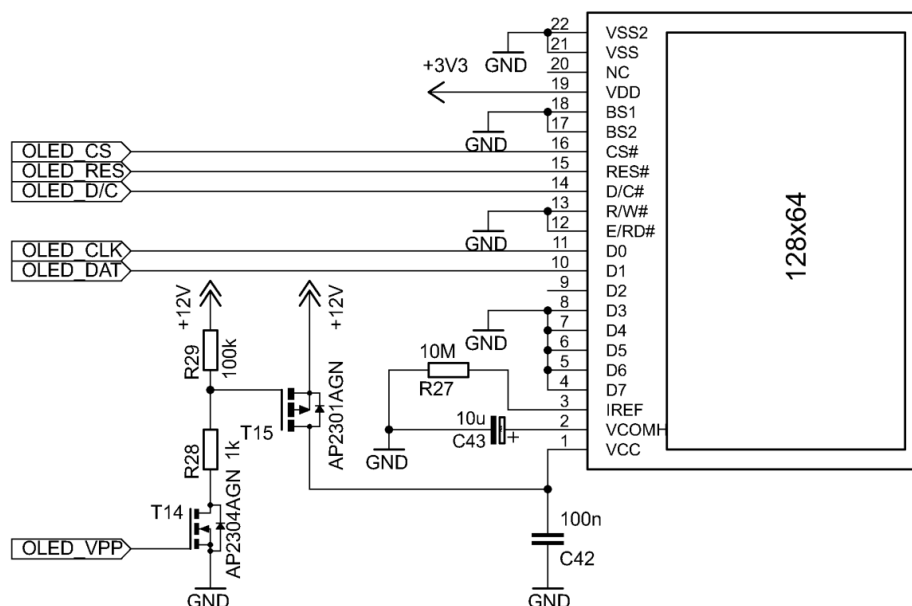
Obr. 3.3. Schéma zapojení vstupní části měřicího přístroje

Napěťový impulz z tranzistoru T3 je přivedený jednak přes vazební kondenzátor do tvarovače signálu a jednak přes tranzistor T4 do audio zesilovače a reproduktoru. Tvarovač je realizovaný monostabilním klopným obvodem s označení 74HC123. Jedná se o dvojitý monostabilní klopný obvod kompatibilní s technologií CMOS. Časovou konstantu tvoří kondenzátor C11 a rezistor R8. Je nastavena tak, aby překlenula zážecí interval trubice, kde se mohou vyskytovat různé zákmity, zvolen byl proto čas 250 $\mu$ s. Na výstupu monostabilního obvodu je indikační LED dioda a dále signál pokračuje na vstup mikroprocesoru, kde je spojen s interním čítačem.

Zesilovač je tvořen dvojicí tranzistorů T4 a T5 kdy T4 je zapojený jako zesilovač se společným sourcem. Slouží zde především ke zpětnému převrácení fáze signálu ze snímacího tranzistoru T3. T5 je zapojený jako zesilovač se společným drainem a je určený k impedančnímu přizpůsobení k nízké impedanci reproduktoru. Tranzistor T6 je využitý pro možnost zapnutí nebo vypnutí reproduktoru a je spojený signálem „SPK EN“ na port mikropočítače.

### 3.4. Displej

Napájení OLED displeje je realizováno dvojím napětím, 3,3 V pro logické obvody a 12 V pro napájení OLED panelu. Výrobce dále uvádí přesný postup připojování napájecích napětí k displeji. Nejdříve je nutné připojit napájení logické části, tedy 3,3V a až po uplynutí 100ms napájení OLED panelu tedy 12V. Napětí 12V je tedy spínáno řídicím signálem „OLED\_VPP“ řízeného mikroprocesorem. V mikroprocesoru se poté v rámci inicializace provede patřičný postup. Dvojice tranzistorů T14 a T15 zde slouží k oddělení dvou napájecích hladin tedy 12V a 3,3V. Proud jednotlivými body OLED panelu a tedy i jas se nastavuje signálem  $I_{REF}$ . Výrobce doporučuje pro zachování garantované životnosti OLED připojit rezistor 10M $\Omega$ .



Obr. 3.4. Schéma zapojení OLED displeje

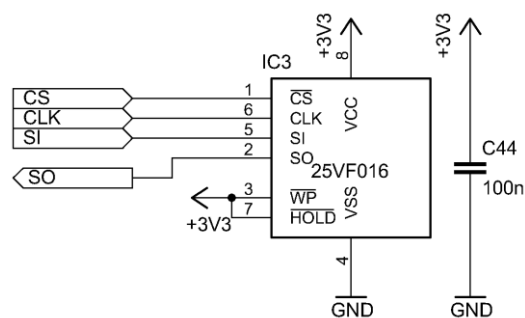
Komunikace mezi displejem a řídicí logikou lze realizovat několika způsoby, buď paralelní propojení (standarty 8080, 6800) nebo sériově pomocí I2C nebo SPI. Zvoleno bylo rozhraní SPI, které poskytuje dobrý poměr mezi rychlostí komunikace a počtem signálových vodičů. Použité rozhraní je nutné nastavit signály BS1 a BS2, v tomto případě jejich připojením na nízkou logickou úroveň. Kromě standardních pinů SPI sběrnice jako je SD (sériová data), CLK (hodinový signál) a CS (chip select), vyžaduje OLED ještě resetovací pin nazvaný RES a pin D/C určený k výběru mezi daty a příkazy. Sériový kanál je připojen na hardwarový SPI modul v mikropočítači.

### 3.5. Flash paměť

Pro uložení naměřených dat je přístroj vybaven pamětí flash SST25VF016B o kapacitě 16Mbit. Technologie Flash byla zvolena vzhledem k její vyšší hustotě záznamu oproti technologii EEPROM. Její nevýhodou je však menší počet zapisovacích cyklů, který je pro tento model typicky 100 000. Typická hodnota EEPROM paměti je o jeden řád vyšší, tedy jeden milion. Z toho důvodu je třeba navrhnout software tak, aby k mazání paměti docházelo co možná nejméně.

Integrovaný obvod SST25VF016B obsahuje mimo samotné paměti také řídicí logiku, která předává data z SPI sběrnice do příslušných adresových registrů, popřípadě datové sběrnice. Tento řídicí obvod obsahuje mimo jiné i status registr, ve kterém jsou uloženy významné příznaky jako je WEL, který povoluje zápis do paměti, nebo BUSY, který signalizuje zaneprázdnění obvodu nejčastěji mazáním paměti. Dále jsou zde bity BP0 až BP3 jejichž kombinací lze nastavit ochranu proti zápisu pro jednotlivé bloky dat.

Zápis do paměti, čtení, zápis do status registru se provádí pomocí předem definovaných funkcí v řídicí logice, které se volají pomocí operačních kódů. Tyto operační kódy se vysílají vždy jako první bajt při zahájení dané operace. Poté se odesílá adresa popřípadě data. Schémata datových přenosů pro jednotlivé operační kódy jsou popsány v [13]. Některé z nich budou rozebrány v kapitole software.



Obr. 3.5 Schéma zapojení Flash paměti

Paměť je připojena k perifernímu obvodu mikrokontroléru SPI\_C. Tedy modulu SPI umístěného na portu C. Paměť pracuje v režimu slave, využity jsou signály SCK, SO, SI, CE. Signál HOLD je určený k přerušení SPI přenosu, signál WP slouží k hardwarovému povolení zápisu do určité části paměti. Oba dva signály zde nejsou využity.

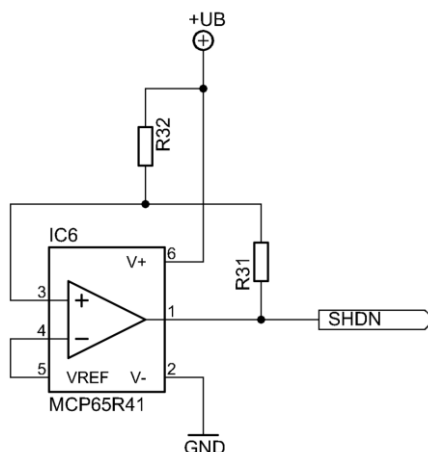
## 3.6. Akumulátor

Jeden ze základních požadavků na přístroj je mobilita. Proto je přístroj vybaven vlastním napájecím zdrojem. Vybraný byl lithium-polymerový článek s kapacitou 1200mAh, který je dostatečný k zaručení provozu na dobu 20 hodin. Tato doba se odvíjí od spotřeby přístroje, která je v základním módu, s vypnutým modulem Bluetooth 50mA. V dozimetrickém módu, kdy se počítá průměrná aktivita za delší časový úsek, není třeba mít stále aktivní displej, proto se může v nepotřebný okamžik vypnout a tím ještě rapidně snížit spotřebu. Maximální odběr přístroje při maximálním jasu displeje a zapnutých všech spotřebičích je potom až 110mA.

Lithium polymerový článek sice nabízí vysokou měrnou energii, typicky 150Wh/kg, na druhou stranu je velice citlivý na přebití nebo podbití, tedy vychýlení svého napětí mimo pracovní rozsah, který je typicky 3 až 4,2 V. V případě nedodržení tohoto rozsahu dochází k degradaci akumulátoru a jeho nevratnému poškození. Článek je proto třeba chránit odpovídajícími obvody. Dále je nutné při nabíjení nepřekračovat maximální nabíjecí proud udaný výrobcem. Pokud by byl nabíjecí proud příliš vysoký, mohlo by dojít k nadměrnému přehřívání článku a zažehnutí exotermní chemické reakce, což by mohlo vyústit v roztržení článku a v následný požár způsobený vysokou reaktivitou lithia na vzduchu.

### 3.6.1. Detektor podbití

V první řadě je nutné zajistit, aby napětí na článku nekleslo pod 3 V. Toho je docíleno blokem, v blokovém diagramu na obr. 3, nazvaným „Detektor podbití“. Tento obvod při poklesu napětí pod hlídanou mez resetuje signál SHDN a tím uvede všechny napájecí zdroje v přístroji do režimu shutdown. Odběr z akumulátoru poté klesne na typickou hodnotu v řádu  $\mu\text{A}$ . Schéma zapojení je patrné na obrázku 3.6.1. Pro hlídání napětí je použit komparátor MCP45R41 zapojený jako neinvertující komparátor s hysterezí. Tento obvod se vyznačuje svými malými rozměry a integrací napěťové reference spolu s komparátorem v jednom pouzdře.

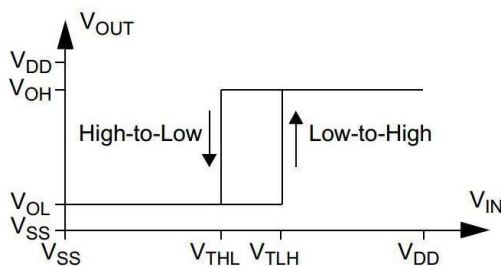


Obr. 3.6.1 Schéma zapojení komparátoru

Rezistory R31 a R32 jsou voleny dle vzorců (3) a (4) citované z katalogového listu obvodu [8]. Vypínací napětí je nastaveno na 3V, hystereze má šířku 0,2 V.

$$V_{TLH} = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_{32}}{R_{31}} \right) - V_{OL} \left( \frac{R_{32}}{R_{31}} \right) \quad (3)$$

$$V_{THL} = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_{32}}{R_{31}} \right) - V_{OH} \left( \frac{R_{32}}{R_{31}} \right) \quad (4)$$

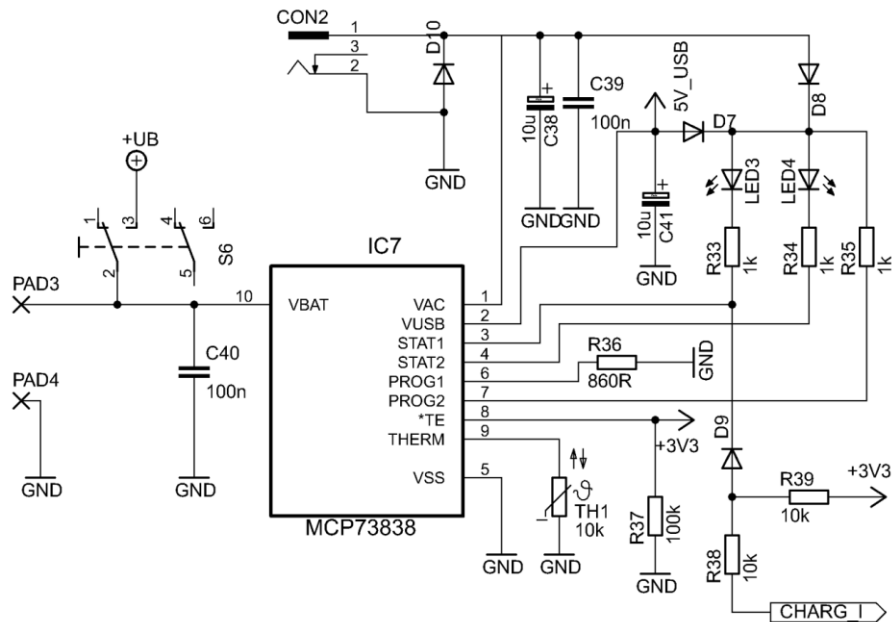


Obr. 3.6.2 Diagram komparátoru, převzato z [8]

Kde  $V_{THL}$  je vstupní napěťová úroveň, kdy obvod překlápí z vysoké logické úrovně do nízké a  $V_{TLH}$  je napěťová úroveň kdy překlápí z nízké do vysoké.  $V_{OL}$  je napětí výstupu při nízké logické úrovni a  $V_{OH}$  je napětí výstupu při vysoké logické úrovni.

### 3.6.2. Nabíječ akumulátoru

Jak bylo řečeno je nutné akumulátor nabíjet konstantním proudem a přitom nepřekročit maximální napětí 4,2 V. O to se stará blok nazvaný „Nabíječ“, schéma zapojení je na obr. 3.6.2.



Obr. 3.6.2 Schéma zapojení nabíječe

Základem nabíjecího bloku je obvod MCP73838. Tento obvod je přímo určený pro nabíjení lithiových článků a to ze dvou možných zdrojů, USB nebo síťový adaptér. Přitom vyšší prioritu má síťový adaptér. Tedy pokud je akumulátor nabíjen z USB a následně se připojí síťový adaptér, obvod přepne svůj vstup na síťový adaptér. Maximální napětí pro oba vstupy je přitom 6 V. Nabíjecí proud lze nastavit pro síťový adaptér od 10mA až do 1A, pomocí rezistoru R36 připojeného na pin PROG1. Proud se vypočítá ze vztahu citovaného z [9]:

$$I_{REG} = \frac{1000 V}{R_{36}} \quad (5)$$

Nabíjecí proud z USB lze volit pinem PROG2 připojením k nízké logické úrovni 100mA nebo k vysoké logické úrovni 500mA. Obvod dále obsahuje vnitřní tepelnou ochranu, která při přehřátí snižuje nabíjecí proud. Jak se ukázalo při měření obvodu, odvod tepla z pouzdra na desku plošných spojů je nedostatečný a docházelo k jeho přehřívání, proto byl obvod opatřen z vrchu malým měděným křídélkem.



Obvod dále obsahuje kontrolu teploty akumulátoru využívající NTC termistor TH1 s odporem 10 k $\Omega$  při 20 °C. Termistor musí být v těsném kontaktu s akumulátorem. Při zvyšování teploty dochází opět k omezování nabíjecího proudu.

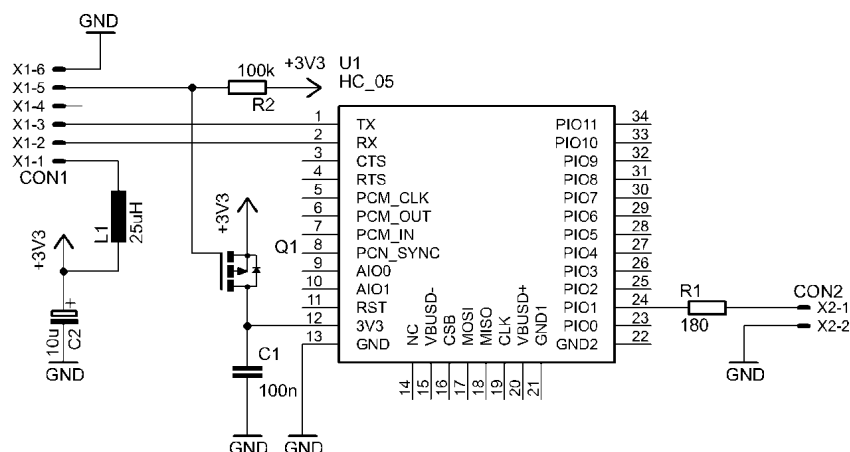
Další z výstupů jsou piny pro indikaci stavu nabíjení, kdy signál STAT1 je aktivní, když probíhá nabíjení akumulátoru a signál STAT2 je aktivní, když je akumulátor nabitý. Tyto signály jsou přivedeny na diody LED3 a LED4, které indikují červenou barvou probíhající nabíjení a zelenou barvou ukončené nabíjení. Dále je signál STAT1 přiveden na pin mikropočítače, aby bylo možné stav nabíjení zobrazit na displeji. Zde dioda D9 s rezistorem R39 slouží k převodu logických úrovní na 3,3 V logiku.

### **3.7. USB a Bluetooth**

Mikropočítač je interně vybaven USB modulem pracujícím s rychlostmi Low-Speed (1.5 Mbit/s) a Full-Speed (12 Mbit/s). Přitom pro funkci modulu není třeba dodávat žádné externí součástky. Datové signály USB jsou vedeny od MCU souběžně, aby netvořily smyčky a nemohlo tím docházet k modulaci rušivých signálů. Přitom jsou přizpůsobeny k impedanci DPS pomocí rezistorů 45 $\Omega$ . Výstupní konektor je ošetřený proti elektrostatickému výboji obvodem USB6B1RL. Obvod zachytí kontaktní výboj do výše 8 kV a bezkontaktní výboj do výše 15 kV v souladu s normou IEC 1000-4-2. Maximální ztrátový výkon obvodu je 500W po dobu 20 $\mu$ s.

Přístroj je dále vybaven modulem Bluetooth EGBT-045MS. Jedná se o modul určený k vytvoření bezdrátového sériového obousměrného kanálu pro rozhraní USART. Tento modul je vybaven vlastní anténou vyleptanou na desce plošných spojů. Vysílač je kompatibilní se standardem IEEE 802.11 a využívá standardní protokol v2.0 + EDR. Modul má uživatelsky definovatelnou přenosovou rychlost v rozsahu 1200 až 115200 baud/s. Výchozí nastavení je 9600 baud/s. Dále je možné konfigurovat heslo a ID zařízení.

Napájení modulu je 3,3 V, vstupně/výstupní porty jsou TTL tolerantní. Spotřeba modulu se pohybuje od 5 do 30 mA. Při navázaném spojení průměrně 8 mA. Schéma zapojení modulu k MCU je na obrázku 3.7.



Obr. 3.7 Schéma zapojení Bluetooth modulu

Konektor CON1 je určený k propojení se základní deskou, respektive pomocí USART s MCU. Napájecí napětí je přivedeno na pin 1, kde je filtr L1 a C2. Pin 2 a pin 3 jsou signály RX a TX. Pinem 5 se pak přes tranzistor Q1 může v případě nepotřeby celý modul vypnout (odpojit od napájecího napětí) a tím snížit odběr z akumulátoru. Konektor CON2 slouží k připojení signalizační LED diody, která je fyzicky přivedena pod displej.

### 3.8. Deska plošných spojů a EMC

Deska plošných spojů je vyrobená z ovrstvené oboustranné Cuprexitové desky o tloušťce 1,5 mm. Tloušťka měděné vrstvy je 35 µm. Deska je navržena s přihlédnutím k vnitřním rozměrovým dispozicím konstrukční krabičky 1553T. Rozmístění součástek a spojů je realizované tak, aby respektovalo metody pro maximální omezení elektromagnetické emise. Veškeré součástky jsou typu SMD a jsou umístěny na vrchní straně DPS. Na vrchní straně je také většina vodivých cest. Na spodní straně je měděný polygon spojený se zemí, určený k odstínění elektromagnetického rušení. Spoje jsou vedeny po nejkratších možných cestách a jsou vedeny tak, aby netvořily smyčky. V opačném případě by smyčky mohly fungovat jako smyčkové antény a zvyšovat emisi popřípadě citlivost na elektromagnetické rušení. Spínané měniče jsou umístěny tak, aby byly součástky co možná nejbližší u sebe a přitom, aby výkonové vývody, především drayny výkonových tranzistorů, netvořily dlouhé cesty. Layouty měničů jsou inspirované aplikačními layouty šířené výrobcem. Dlouhé napájecí cesty jsou blokovány keramickými kondenzátory. Datové konektory jsou ošetřeny proti ESD podle normy IEC1000-4-2 (ČSN EN 61000-4-2), viz kapitola 3.7.

## 4. Software

Software pro MCU je napsaný v jazyce C, pomocí vývojového prostředí Atmel Studio distribuovaného zdarma výrobcem použitého mikrokontroléru. Jedná se o prostředí realizované na překladači GCC, jehož grafické rozhraní je převzaté z vývojového prostředí Visual Studio od společnosti Microsoft.

Zdrojový kód je z důvodu větší přehlednosti rozdělen do více souborů. Dělí se na hlavní soubor „main.c“, ve kterém je realizovaná hlavní smyčka programu, a na další knihovní soubory, jejichž název je odvozen od periferie, kterou obsluhují. V tabulce č. 4.1.1 je seznam knihovních souborů. Všechny soubory uvedené v tabulce 4.1.1. byly vytvořeny speciálně pro tento projekt a obsahují pouze funkce využívané programem.

Tab. 4.1.1. Knihovní soubory vytvořené speciálně pro měřicí přístroj.

Název souboru	Popis
SSD1305.c	Soubor funkcí pro řízení OLED displeje s řadičem SSD1305.
FLASH.c	Soubor funkcí pro práci s Flash pamětí SST25VF016B.
bluetooth.c	Soubor funkcí pro komunikaci s Bluetooth modulem.
menu.c	Soubor funkcí využívaných v Konfigurační smyčce.
measuring.c	Soubor funkcí využívaných v Měřicí smyčce.
interrupt_vect.c	Soubor vektorů přerušení využívaný v programu.
bitmaps.h	Soubor bitmap uložených v konstantních polích.
fonts.h	Soubor fontů uložených v konstantních polích.

Další použité soubory jsou univerzální knihovní soubory od firmy Atmel. Všechny z těchto souborů jsou šířeny volně. Seznam převzatých knihovních souborů je v tabulce 4.1.2.

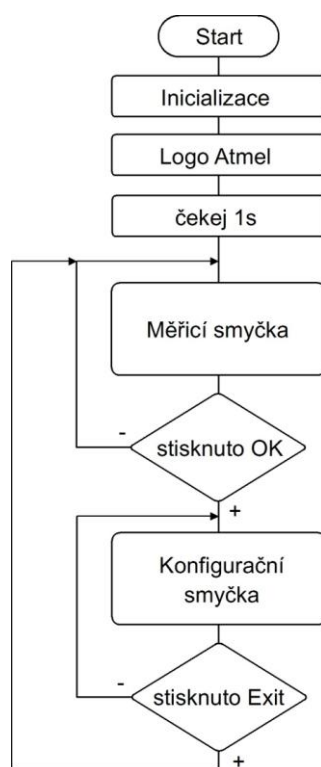
Tab. 4.1.2. Použité knihovní soubory od firmy Atmel.

Název souboru	Popis
pgmspace.h	Umožňuje práci s programovou pamětí (vyčítání konstant).
interrupt.h	Podpora přerušení, definice vektorů a konfiguračních registrů.
EEPROM.h	Práce s integrovanou EEPROM pamětí.
io.h	Informace o použitém procesoru.
ASF.h	Podpora Atmel Software Framework knihoven.

V případě podpory USB je použita kolekce souborů, z knihovny aplikace Atmel Software Framework, pro vytvoření virtuálního sériového kanálu přes rozhraní USB. Všechny knihovní soubory pro podporu USB jsou uloženy ve složkách ASF a config.

## 4.1. Hlavní program

Hlavní soubor „main.c“ obsahuje hlavní funkci `void main(void)`. Funkce začíná inicializací přístroje a pak pokračuje na dvě smyčky nazvané Měřicí a Konfigurační. V Měřicí smyčce je MCU uzavřen v případě měření. V konfigurační smyčce se program nachází, pokud je spuštěno konfigurační menu, kde jsou nastavovány parametry přístroje. Vývojový diagram hlavního programu je na obrázku č. 4.1.



Obr. 4.1. Vývojový diagram hlavní smyčky

### 4.1.1 Měřicí smyčka

V měřicí smyčce se program točí za normálního běhu přístroje. Tedy pokud přístroj měří a zaznamenává hodnoty o záření. Také jsou zde zobrazovány všechny potřebné údaje na displej, případně odesílány přes Bluetooth nebo USB.

Na obrázku 4.1.1.a je příklad obrazovky přístroje v měřicím módu. Nachází se zde údaj o naměřené intenzitě záření zobrazený největšími číslicemi 16x8. Zkratka

CPM zde znamená „Count per minute“ a vyjadřuje počet zachycených interakcí za minutu. Řádek pod tím je informace o časovém průběhu měření nového vzorku. První číslice před lomítkem symbolizuje uběhnutý čas v sekundách. Číslice za lomítkem udává nastavený měřicí čas pro jeden vzorek. Na dalším řádku se pak nachází číselný stav čítače impulzů. Ve spodní obrazovce je umístěna informační lišta, na které se zobrazuje, zleva, napětí akumulátoru na dvě desetinná místa. Obrázek elektrické vidlice symbolizuje probíhající nabíjení akumulátoru, zkratka USB symbolizuje spojení s PC pomocí USB, zkratka BLT symbolizuje zapnutý modul Bluetooth a zkratka REC symbolizuje zapnuté zaznamenávání hodnot. Vpravo je pak zobrazen čas měření.

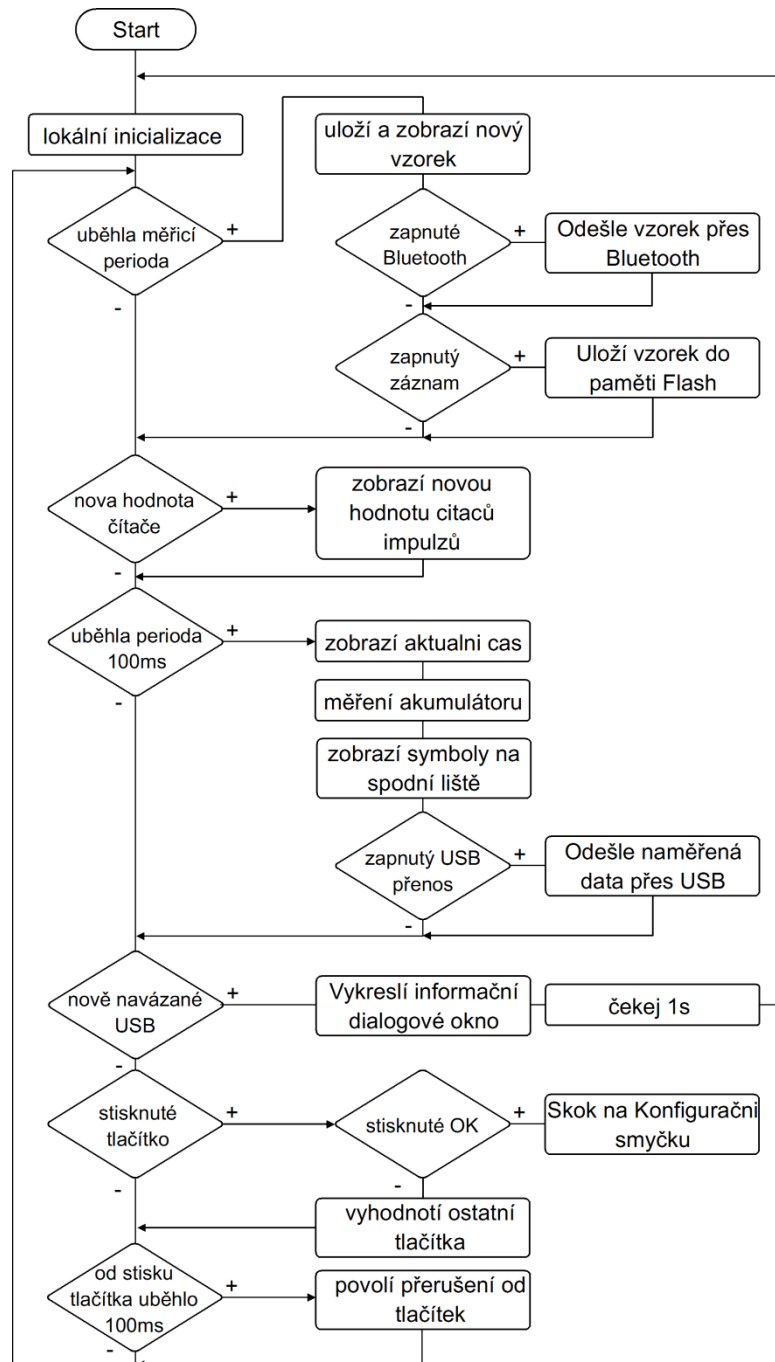
```
Measuring...  
  
CPM: 124c/min  
progres: 7/25sec  
counter: 42354  
BAT:4.030V USB BLT 0:13:21
```

*Obr. 4.1.1.a. Měřicí obrazovka*

Na obrázku 4.1.1.b. je k dispozici vývojový diagram Měřicí smyčky. Po startu je provedena lokální inicializace, která obnáší smazání displeje a vykreslení statických bitmap na displej. Poté se provede zápis počátečních číselných hodnot. Následně se program dostane do uzavřené smyčky, ve které vykonává všechny potřebné procedury v rámci Měřicího módu.

Na začátku Měřicí smyčky je testována perioda měření, na základě které se provede výpočet intenzity záření. Časová základna je generovaná obsluhou přerušování čítače TCC0. Každých 100 ms je tedy inkrementována paměťová buňka a po dosažení stejné hodnoty jako buňka s nastavenou periodou měření se provede výpočet intenzity záření na základě počtu impulzů přijatých za měřicí periodu. Výsledek je následně vztažen k jedné minutě. Pokud je zapnutý modul Bluetooth odešle přes něj data. Pokud je zapnutý mód ukládání vzorků, uloží naměřený vzorek spolu s časovým údajem do paměti.

V další fázi je testovaná hodnota čítače, jestli nedošlo ke změně od posledního výpisu dat. Pokud došlo, zobrazí se nová data na displej.



Obr. 4.1.1.b. Vývojový diagram Měřicí smyčky

Následuje blok, který se z důvodu úspory procesorového času vykonává jednou za 100ms. Vykonání bloku je podmíněno nastavením příznaku v přerušení od čítače TCC0, jehož perioda je 100 ms. Na konci bloku se pak příznak vynuluje. V bloku se provede vykreslení času měření, změření napětí akumulátoru a překreslení informačních symbolů na spodní liště. Na závěr bloku se otestuje, jestli je aktivní USB přenos a pokud ano jsou odeslána data s naměřenými hodnotami.

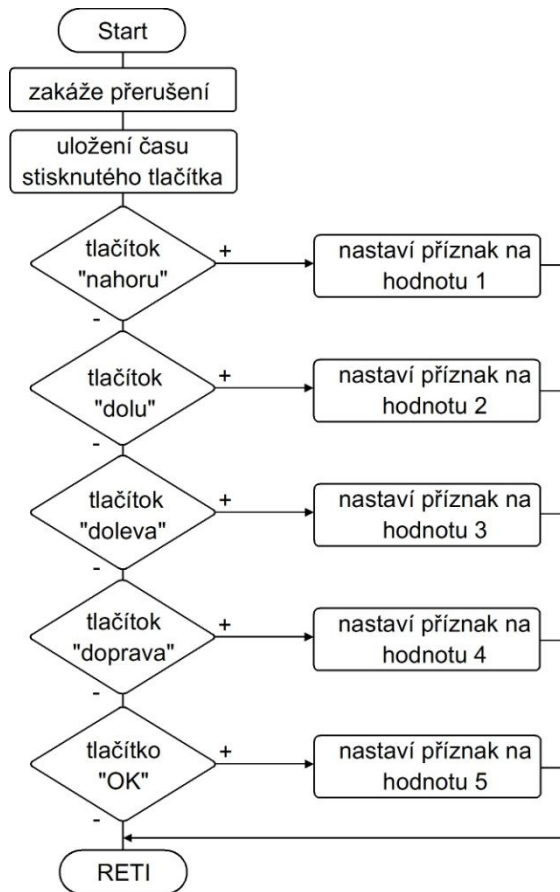
Další ve smyčce je kontrola nově navázaného spojení s USB. Po připojení kabelu se v inicializaci USB nastaví příznak informující o navázaném spojení. Tento příznak je zde testován a v případě jeho nenulové hodnoty se vypíše informační dialogové okno o navázání spojení. Následně se vynuluje příznak a čeká se 1 sekundu. Poté se program vrátí na lokální inicializaci této smyčky, aby vymazal obrazovku a následně na ni znovu zapsal naměřené hodnoty.

Nakonec se testují stisknutá tlačítka. Při stisku tlačítka se v přerušení nastaví příslušný příznak. V případě stisku tlačítek doleva, doprava, nahoru, nebo dolů se provede rychlé zapnutí funkce, kterou tlačítko zaujímá v měřicím módu, například rychlé vypnutí nebo zapnutí reproduktoru. V případě stisku tlačítka OK je vyžádáno spuštění Konfiguračního módu, proto je zde uvedený skok na začátek Konfigurační smyčky.

Poslední podmínka slouží k povolení přerušení od tlačítek. Přerušení je povoleno po době delší než 100ms od posledního stisku tlačítka.

#### **4.1.2. Přerušovací rutina pro tlačítka**

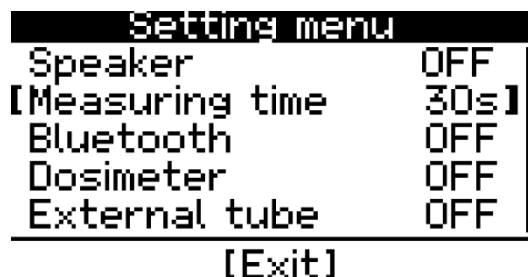
Ošetření zákmitu tlačítek je realizované vložení znečitlivujícího intervalu po reakci na stisknuté tlačítko. Délka intervalu je zvolena tak, aby překlenula dobu zakmitávání tlačítka. V intervalu je počítáno i s budoucím zhoršením zakmitávání vlivem oxidace kontaktů. Zvolena byla proto prodleva trvající 100 ms. Prodleva je vytvořena tak, aby nezatěžovala procesor. Využité je proto externí přerušení, které je citlivé na sestupnou hranu, čímž zachytí stisk tlačítka. Znečitlivění je provedené zakázáním přerušení v samotné obsluze přerušení. Přerušení je pak následně povoleno až po uplynutí doby nejméně 100 ms po stisku tlačítka. Při stisku tlačítka je zaznamenána aktuální hodnota čítače. K opětovnému povolení přerušení dochází až v hlavní smyčce, po uplynutí 100 ms od stisku posledního tlačítka. V přerušení rovněž probíhá nastavení příznaku stisknutého tlačítka. Pokud tlačítko stisknuté nebylo, je příznak nulový, pokud ke stisku došlo, nastaví se na hodnotu od jedné do pěti podle přiděleného identifikačního čísla tlačítka.



Obr. 4.1.2. Vývojový diagram přerušovací rutiny

### 4.1.3. Konfigurační smyčka

Konfigurační smyčka představuje výběrové menu s kompletním seznamem parametrů, které je možno v přístroji modifikovat. Náhled obrazovky konfiguračního módu je na obrázku 4.1.3.a.

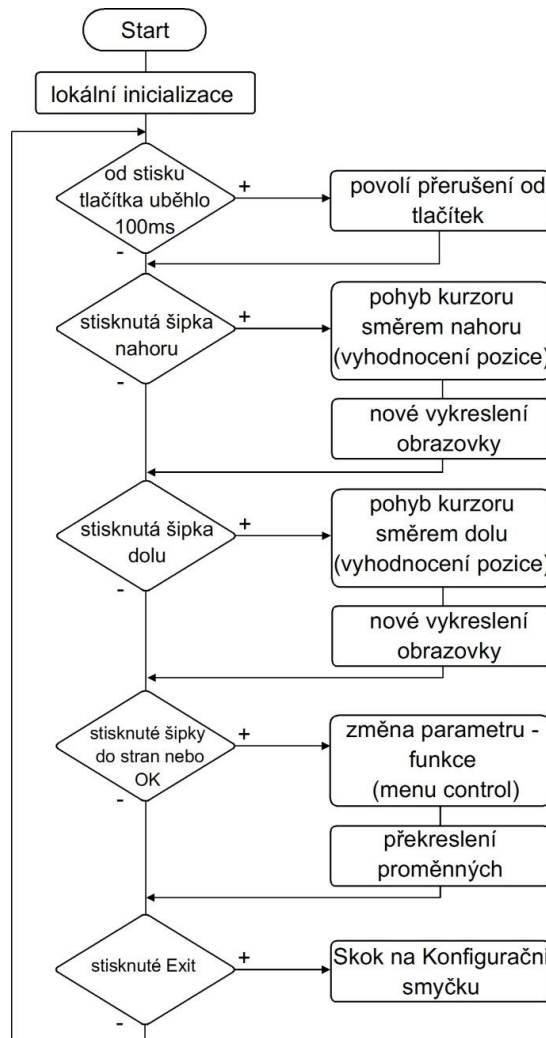


Obr. 4.1.3.a. Obrazovka konfiguračního módu

Menu je zde ohraničeno statickým vrchním panelem s textem „Setting menu“. Pod ním se zobrazuje pět položek ze seznamu konfigurovatelných parametrů, resp. v levé části název parametru a v pravé části hodnota příslušného parametru. Pohyblivý kurzor je zde reprezentovaný hranatými závorkami po stranách seznamu. Dále je zde

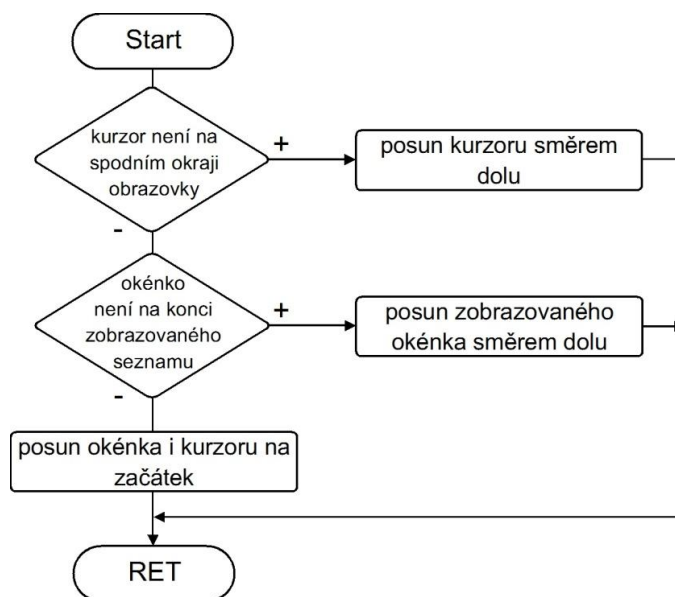


umístěna boční posuvná lišta tzv. „*scrollbar*“, která zde udává polohu obrazovky v seznamu konfigurovatelných parametrů. Ve spodu obrazovky je pak oddělené čarou tlačítko „*Exit*“, které ukončí konfigurační menu a program přejde zpět do měřicí smyčky. Na obrázku 4.1.3.b. je vývojový diagram konfigurační smyčky.



Obr. 4.1.3.b. Vývojový diagram konfigurační smyčky

Lokální inicializace zde opět vymaže obrazovku a vykreslí počáteční hodnoty konfigurační tabulky. Následně se program dostane do uzavřené smyčky, ve které se kontroluje stisknutí tlačítek. Nejdříve se testuje stisk šipek nahoru a dolů. Pokud byla stisknuta šipka dolů, příznak stisku tlačítka byl nastaven na hodnotu 2. To je příkaz k posunu kurzoru dolů. Před samotným posunem je však třeba ještě otestovat, kde se kurzor v seznamu nachází. Tento proces přibližuje vývojový diagram na obrázku 4.1.3.c.



Obr. 4.1.3.c. Vývojový diagram pro posun kurzoru

Pokud je kurzor na začátku seznamu (tedy nahoře na obrazovce) nic nebrání jeho posunu o řádek níže. Pokud je ovšem kurzor na spodním řádku obrazovky, je třeba posunout celé zobrazované okénko o řádek níže. Pokud je okénko na konci seznamu, přesune se kurzor i okénko na začátek seznamu, tedy na první řádek. Po vyhodnocení pohybu se překreslí část obrazovky, tedy seznam parametrů, kurzor a scrollbar na nové hodnoty. Na konci obsluhy je pak nulovaný příznak stisknutého tlačítka. Obdobným způsobem je řešeno i stisknutí tlačítka nahoru.

Dále jsou testovány stisknuté šipky do stran nebo tlačítko OK. Všechna tato tlačítka jsou svázána pod jednu podmínku, protože při jejich stisku dochází ke změně nastavovaného parametru. Respektive při stisku dochází k volání funkce „*menu\_control*“, která změní parametr, na jehož řádku se nachází kurzor. Při návratu z funkce se překreslí seznam parametrů a vynuluje se příznak stisknutého tlačítka.

Ve smyčce se opět provádí povolení přerušení od tlačítek, po uplynutí 100 ms od posledního stisku tlačítka.

#### 4.1.3.1. Funkce *menu\_control*

Funkce „*menu\_control*“ provádí změnu konfigurovatelných parametrů na základě stisknutého tlačítka. Vstupní parametr funkce je proměnná „*select\_row*“ jejíž hodnota odpovídá číslu řádku, na kterém se nachází kurzor. Na obrázku č. 4.1.3.1. je ilustrovaný význam proměnné pro hodnotu 4.

```

Brightness
Speaker
Measuring time
Bluetooth
[ Dosimeter ]
External tube
Recording
USB export
Battery info
About

```

↑  
selected\_row = 4  
↓

Obr. 4.1.3.1. Ilustrace proměnné *selected\_row*

Uvnitř funkce „*menu\_control*“ se nachází instrukce „*switch*“, jejímž vstupním parametrem je právě proměnná „*selected\_row*“. V jednotlivých blocích tohoto přepínače se nacházejí rutiny pro změnu parametru na daném řádku seznamu. Respektive změnu proměnné symbolizující daný parametr. V tabulce 4.1.3.1 je seznam proměnných odpovídající seznamu parametrů.

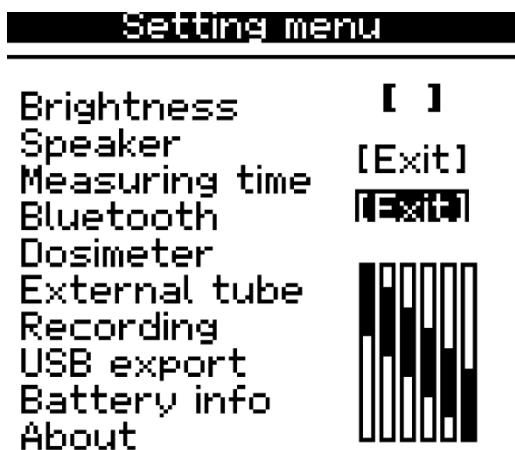
Tab. 4.1.3.1. Seznam proměnných

Název	Popis	Hodnota
brightness_set	Proměnná pro nastavení jasu	0 až 100
speaker_enable	Proměnná povolení reproduktoru	0, 1
measuring_time	Proměnná s nastavitelnou dobou měření	5 až 240
bluetooth_enable	Proměnná povolení modulu bluetooth	0, 1
dosimeter_enable	Proměnná pro spuštění módu dosimetru	0, 1
recording_enable	Proměnná povolení záznamu vzorků	0, 1
ext_tube_enable	Proměnná povolení externí trubice	0, 1
USB_export_enable	Proměnná povolení USB exportu dat	0, 1

V konečném důsledku tedy funkce provede změnu té proměnné, podle toho, na kterém řádku v seznamu je nastavený kurzor. Změna hodnoty proměnné se provede v závislosti na její povaze. V případě, že se jedná o parametr ON/OFF nastavuje se proměnná skrývající se za parametrem do hodnot jedna nebo nula. Zde se šipkou doleva funkce vypne a šipkou doprava zapne. V případě, že se jedná o číselné nastavení, např. jasu, ukládá se do proměnné konkrétní hodnota. Zde se stiskem šipky doleva hodnota proměnné dekrementuje a stiskem šipky doprava inkrementuje.

### 4.1.3.2. Vykreslování prvků v menu

Realizace obrazovky „*Setting\_menu*“ (konfigurační mód) je řešena výhradně použitím bitmapových obrázků uložených v programové paměti. V některých případech se jedná o statické nápisy jako je lišta „*Setting menu*“ a v některých případech se jedná o proměnné bitmapy, kdy jsou v jedné tabulce uloženy vedle sebe všechny varianty zobrazení. Příkladem může být „*scrollbar*“ nebo tlačítko „*Exit*“. Všechny použité bitmapy pro tvorbu „*Setting menu*“ jsou ilustrovány na obrázku 4.1.3.2. Konstantní pole jsou uložena opět v souboru *bitmaps.h*.



Obr. 4.1.3.2. Seznam bitmap menu

Pro vykreslování jednotlivých prvků slouží funkce uložené v souboru „*menu.c*“ ve tvaru *Print\_menu\_nazev()*, kde „název“ udává prvek, který funkce vykreslí. Například funkce *Print\_menu\_HorniLista()* vykreslí statickou horní lištu s textem „*Setting menu*“. Ve většině případů funkce obsahují dvojitý for-cyklus, kdy jeden cyklus adresuje x-ovou osu a druhý y-ovou. Přitom data jsou načítána z programové paměti. Jednotlivé funkce se pak od sebe liší v rozměrech a pozici vykreslované plochy.

### 4.1.3.3. Vykreslování seznamu parametrů

Složitější funkce je potřebná pro vykreslování seznamu konfigurovatelných parametrů. Zde je nutné vykreslovat na displej pouze pět řádků textu a navíc je nutné se v seznamu pohybovat směrem nahoru a dolů. Pro zobrazení těchto parametrů je použit standardní font 5x7 bodů. Pokud je ovšem tento font v několika osmi-bitových řádcích nad sebou, vzniká mezi řádky mezera o velikosti 1 bod. Při pohledu na seznam poté řádky splývají a jsou špatně čitelné. Proto byly v tomto případě rozestupy řádků zvětšeny o jeden bod,

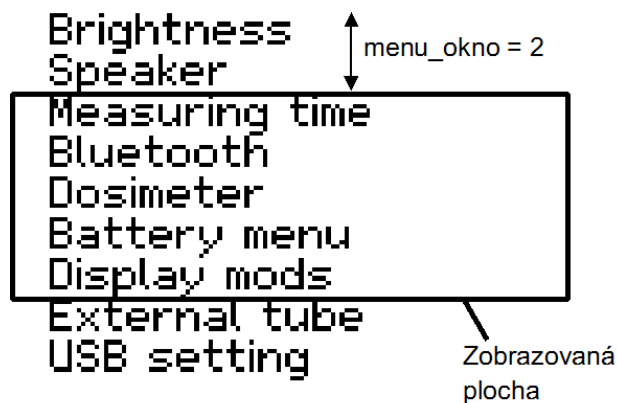
tím pádem vznikla mezera mezi řádky 2 body. To sebou ovšem přineslo řadu komplikací, které budou popsány níže.

Vykreslování dat na displeji probíhá po řádcích o velikosti osm obrazových bodů, což odpovídá šířce datové sběrnice. Zde ovšem přidáním jednoho bodu navíc mezi řádky vnikl řádek o velikosti 9 bodů, kdy jeden bod tedy přečnívá do spodního osmibodového řádku na displeji. V případě několika řádkového textu se pak přesah kumuluje, až v pátém řádku vzniká přesah pěti bodů.

Stejným způsobem jsou data uložena i v tabulce konstant. Tedy kompletní seznam je uložený v tabulce konstant jako celistvý obrázek, kdy mezi řádky už jsou rozestupy dva body. V případě, že jsou data zobrazována od prvního řádku seznamu, probíhá zobrazování správně. Problém nastává, když se obrazovka posune na spodní řádky. Zde se projeví odlišný posun řádků textu vůči 8-mi bitovým řádkům na displeji (resp. v paměti MCU) a data jsou zobrazována nesprávně, konkrétně chybí horní část prvního řádku textu. Proto je třeba data vyzvednutá z tabulky konstant ještě před odesláním na displej patřičným způsobem rotovat a to v závislosti na poloze obrazovky v seznamu. Konkrétně ve funkci *Print\_menu\_text()* je řešení následovné:

```
for (i=0;i<72;i++)
{
  for (j=0;j<6;j++)
  {
    video_RAM[j][i] =(pgm_read_byte(&seznam_menu[j+menu_okno][i])>>menu_okno
    | (pgm_read_byte(&seznam_menu[j+1+menu_okno][i])<<(8-menu_okno));
  }
}
```

Data jsou nejprve zpracována do paměťového prostoru nazvaného „*video\_RAM*“ a až poté je už připravený seznam pěti řádků odeslán na displej. Ukládání do *video\_RAM* probíhá opět ve dvojitém for-cyklu kdy index „*i*“ udává x-ovou souřadnici a index „*j*“ udává y-ovou souřadnici. Je patrné, že se výpis pěti řádků o devíti bodech musí na displeji zobrazovat na 6 řádcích o osmi bodech. Proměnná „*menu\_okno*“ zde udává polohu zobrazovaného okénka v seznamu parametrů. V případě, že jsou zobrazované položky od prvního do pátého řádku je hodnota nulová, při zobrazování od druhého do šestého řádku má pak proměnná hodnotu jedna. Ilustrativní obrázek pro přiblížení funkce proměnné je patrný na obrázku 4.1.3.3.a.

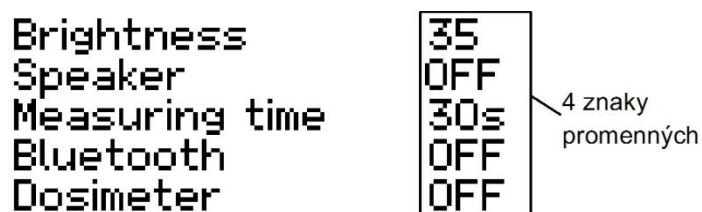


Obr. 4.1.3.3.a. Ilustrace funkce proměnné `menu_okno`

Příprava dat do `video_RAM` je řízená právě polohou zobrazovacího okénka, tedy proměnnou `menu_okno`, kdy je celý blok pěti řádků při vykreslování rotovaný směrem nahoru právě o hodnotu v proměnné `menu_okno`. Tím je kompenzovaná kumulovaná chyba přesahu jednotlivých řádků. V tuto chvíli zobrazení probíhá správně pro libovolnou pozici okénka v seznamu.

Když je seznam konfigurovatelných parametrů připravený v paměti `video_RAM`, zpracují se do pravého sloupce číselné hodnoty parametrů. Tyto hodnoty odpovídají hodnotám proměnných z tabulky 4.1.3.1.

Při zobrazování číselných hodnot na displej je nutné převést hodnotu proměnné na text. V případě „enable“ parametrů se zobrazuje text ON nebo OFF, v případě nastavitelných parametrů pak číselné hodnoty. Seznam všech proměnných je převeden do textové podoby v bufferu „`menu_buffer_vrbl[9][4]`“, kde v každém řádku je čtyřznakový text odpovídající jedné proměnné.



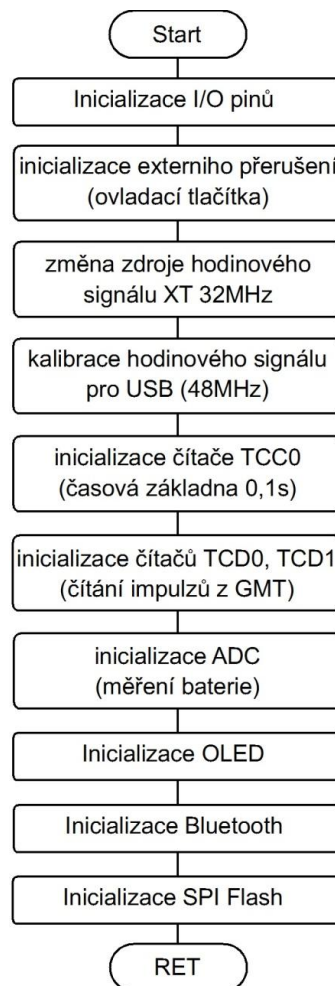
Obr. 4.1.3.3.b. Obsah paměti `video_RAM`

Následně se proměnné překreslí v rozsahu dle parametru „`menu_okno`“ do `video_RAM` na pozice vpravo od názvů parametrů. I v tomto případě je třeba zvětšit mezery mezi jednotlivými řádky o jeden bod, proto se provádí rotace dat znaků

obdobně jako při vykreslování seznamu parametrů. Následný stav *video\_RAM* odpovídá obrázku 4.1.3.3.b.

## 4.2. Inicializace procesoru a periférií

Pro inicializaci mikrokontroléru slouží funkce *device\_initialization()* umístěná v souboru „*main.c*“. Funkce inicializuje všechny potřebné periferie, výstupní porty, zdroje hodinových signálů, zdroje přerušeni, spojuje události v událostním systému. Jednotlivé inicializační kroky jsou ve funkci rozděleny pomocí komentářů do bloků a jednotlivé bloky jsou nazvány podle funkce, kterou vykonávají. Názvy korespondují s názvy bloků ve vývojovém diagramu na obrázku 4.2.



Obr. 4.2. Vývojový diagram inicializace MCU

V první fázi se rozdělí I/O porty na vstupní nebo výstupní, podle toho, které zařízení je k danému portu, resp. pinu, připojeno. Zde se zapisuje do registru DIR. Poté je třeba nastavit citlivost vstupních pinů pro vyvolání události. U rodiny procesorů

Xmega má každý pin vlastní událostní logiku, která se spouští při určitém jevu na pinu. Tento jev lze nastavit a je možné vybírat z citlivosti na sestupnou hranu, náběžnou hranu, obě hrany, nebo logické úrovně. Parametr se nastavuje pro každý pin zvlášť a je uložen v registru PINxCTRL, kde x udává číslo pinu. Výstup této logiky je možné pak připojit buď k řadiči přerušení, nebo k libovolnému pinu sběrnice Událostního systému. Zároveň se v registru PINxCTRL nastavuje připojení pull-up, pull-down rezistoru.

Dále inicializace pokračuje nastavením přerušení. U rodiny Xmega se přerušení od jednotlivých periférií kofiguruje registrem INTCTRL. Tento registr tedy obsahuje každá periferie, připojená k řadiči přerušení, a lze jím povolit přerušení a nastavit mu libovolnou ze tří úrovní. V tomto případě jsou povolena přerušení od tlačítek, kde je dále možné si vybrat ze dvou vektorů INT0 a INT1. Každému lze přidělit libovolnou úroveň a vlastní maskovací registr. Použitý je vektor INT0 kde jsou maskovacím registrem povoleny piny PA7, PA6, PA5, PA4, PB0, pro tlačítka a PA2 pro signalizaci nabíjení, přitom signalizace nabíjení je registrem PIN2CTRL nastavena tak, aby reagovala na náběžnou i sestupnou hranu.

Jako další je provedena inicializace hodinového signálu procesoru. Rodina Xmega má možnost měnit zdroj hodinového signálu za plného běhu procesoru. Je tedy možné i v plném běhu aplikace změnit zdroj například z externího krystalového oscilátoru na úsporný vnitřní oscilátor. Vždy je třeba ovšem spustit nový oscilátor počkat až se rozběhne a až poté připojit procesor k novému zdroji hodinového signálu. Výrobce pak garantuje, že přepnutí proběhne během dvou hodinových cyklů. V tomto případě je po resetu procesoru použitý výchozí RC oscilátor o frekvenci 2 MHz. V inicializaci se pak provádí přepnutí na oscilátor s vnějším krystalem s frekvencí 16MHz. Poté je do cesty ještě vřazen fázový závěs s násobícím koeficientem 2x. Výsledný kmitočet je poté 32MHz. V inicializaci se tedy nejdříve spustí krystalový oscilátor funkcí `OSC.CTRL |= OSC_XOSCEN_bm;` a poté se čeká na nastavení bitu „status“ který signalizuje správnou amplitudu oscilátoru. Funkcí `CLK.CTRL = CLK_SCLKSEL_XOSC_gc,` se poté připojí hodinový signál ke krystalovému oscilátoru. V druhé fázi se obdobným způsobem spustí PLL fázový závěs. Tedy čeká se na ustálení amplitudy, a pokud je vše v pořádku, procesor se připojí na výstup fázového závěsu.

Jako další je třeba nastavit hodinový signál pro modul USB. Tento signál je využíván pro správnou synchronizaci framů a je nutný kmitočet 48MHz. Kmitočet lze



získat v použitém MCU dvěma způsoby. První je využití fázového závěsu a předděličky k vytvoření správného kmitočtu s pomocí vnitřního RC oscilátoru. Druhý způsob je překalibrování přesného interního RC oscilátoru pracujícího ve výchozím nastavení na frekvenci 32 MHz. První způsob zde není možný, protože je fázový závěs využitý k násobení signálu z krystalového oscilátoru. Druhá možnost spočívá v překalibrování RC oscilátoru. RC oscilátor v tomto procesoru je nezvykle přesný a to díky tomu, že je každý kus výrobcem změřený a kalibrováný odpovídající hodnotou zapsanou do zvláštního registru. Tímto registrem respektive dvěma registry lze nastavit frekvenci oscilátoru v rozmezí od 20 MHz až do 50 MHz. Výrobce přitom připravil tabulku hodnot, které je třeba nakopírovat do těchto registrů, aby měl RC oscilátor frekvenci buď 32 MHz nebo 48 MHz. Tato tabulka je uložena přímo v procesoru v části paměti nazvané kalibrační paměť. Z této paměti je možné číst pomocí knihovny „pgmspace.h“.

Dále je nastaven čítač TCC0 jako generátor referenčního signálu o frekvenci 10 Hz. Nejdříve je v registru CTRLA nastaven dělicí poměr hodinového signálu na 256 poté je registrem CTRLB čítač nastaven do normálního režimu čítání. V tomto režimu čítá čítač vzestupně a po dosažení hodnoty v registru PER dochází k přetečení a vyvolání přerušení. Registrem INTCTRLA je nastavené přerušení při přetečení na nízkou úroveň a registrem PER je nastavena perioda čítání na hodnotu 12500. Pokud vezmeme tedy systémový kmitočet 32 MHz vydělíme ho poměrem děličky a periodou čítače získáme přerušovací kmitočet 10 Hz. Tento signál je dále použitý pro odměřování času a ošetření stisku tlačítek.

Jako další bod je provedena inicializace čítače impulzů přijatých z GM trubice. Je použitý čítač TCD0, jehož vstup je, pomocí registru CTRLA, připojený k událostnímu systému, ke kanálu CH4. Registrem CTRLB je nastaven normální režim čítání. Kanál 4 událostního systému je poté připojen k portu PD3, na který je externě připojen výstup z tvarovače signálu GM trubice. Poté je pomocí registru PINxCTRL nastavena citlivost pinu na náběžnou hranu.

Dále se provádí nastavení AD převodníku. V aplikaci je využit pro měření napětí akumulátoru. V tomto typu mikrokontroléru je pouze rychlý „Pipelined“ AD převodník, který je založený na vícestupňové odečítací struktuře. Jeho maximální vzorkovací frekvence je 2 MSPS. Rozlišení převodníku je možné nastavit na hodnotu 8 bit nebo 12 bit. V tomto případě byl nastaven pro přesnější výsledek na hodnotu 12bit. Jako zdroj

referenčního napětí je využita přesná napěťová band gap reference. Převodník je nastaven do „single ended“ modu, tedy napětí je měřeno od nuly do  $V_{ref}$ . Hodinový signál je dělen hodnotou 512. Vstupní multiplexor je nastaven na port A pin1.

Na závěr je provedena inicializace displeje bluetooth modulu a SPI rozhraní pro flash paměť. Tyto postupy budou popsány později.

## 4.3. Vytvořené knihovní soubory

V této kapitole budou postupně rozebírány knihovní soubory vytvořené speciálně pro tuto aplikaci. Seznam souborů je v tabulce 4.1.1.

### 4.3.1. Soubor SSD1305

V souborech *SSD1305.c* a *SSD1305.h* jsou všechny potřebné funkce pro řízení grafického OLED displeje s řadičem SSD1305.

Řadič SSD1305 obsahuje datovou paměť o velikosti 132x64 bodů, které jsou svázané vertikálně po osmi bodech do bytu. Velikost paměti je tedy 132 x 8 bajtů. Zápis do paměti může probíhat postupně s post inkrementem nebo náhodně, je třeba však vždy zapisovat celý bajt, tedy sloupec o velikosti osmi bodů. Přitom je možné si zvolit, zda má být inkrementovaná adresa sloupce či řádku. Je tedy možné vybírat, zda zápis probíhá po řádcích nebo po sloupcích. V případě potřeby je také možné přemapovat horizontálně či vertikálně signály spojující datovou paměť s fyzickými body displeje, což má za následek horizontální či vertikální převrácení displeje, přitom data v paměti se nemění. Další funkce řadiče jsou přehledně popsány v manuálu [11], v tabulce č.9.1 „Commad Table“ jsou pak vyjmenované všechny příkazy řadiče.

Spojení mezi SSD1305 a MCU je realizované jednosměrnou sběrnicí SPI. MCU je v roli master a SSD1305 v roli slave. SPI sběrnice zde zastupuje pouze datovou paralelní sběrnicí, pro řízení zápisu je třeba ještě bit D/C, kterým se vybírá mezi daty nebo příkazy. Při nastavování parametrů OLED je proto nutné pracovat i s tímto bitem.

Tab. 4.3.1. Seznam funkcí v souboru SSD1305

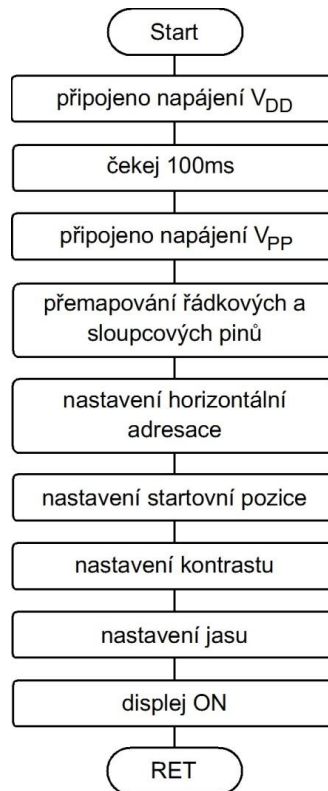
Název funkce
void oled_cmd (char cmd)
void oled_data (char data)
void oled_Init (void)
void oled_goto_xy (char x, char y)
void oled_clr (void)
void oled_clr_xy (char x, char y, char length, char width)
void bmp(const uint8_t image [8][128])
void print_nums_16x8 (char x, char y, char *text, char numbers)
void print_5x7(const char *s)
void print_nums_5x7(char x,char y,char *number,char digits)
void print_nums_3x5 (char x,char y,char *number)
void print_info_dialog (void)
void print_h_line(char x, char y,char length)

Základní funkce knihovny jsou *oled\_cmd()* a *oled\_data()*. Tyto funkce jsou využívány všemi následujícími funkcemi. Jejich úkolem je odeslání jednoho bajtu, předaného jako parametr, přes SPI sběrnici. Liší se tím, že *oled\_cmd()* vysílá příkazy a *oled\_data()* vysílá data.

#### 4.3.1.1. Inicializace displeje

Další v seznamu je funkce *oled\_Init()*. Tato funkce provede inicializaci řadiče SSD1305 dle postupu v dokumentaci [11]. Na obrázku 4.3.1.1.a je ilustrovaný vývojový diagram.

Jako první se počítá s přivedením napájecího napětí pro logickou část řadiče. Poté následuje reset displeje vynulováním a následným nastavením signálu OLED\_RES. Po resetu je na řadě krátká čekací smyčka s časovou prodlevou 100ms a připojení výkonového napájecího napětí pro OLED panel. Čekací doba mezi připojením napájení logiky a panelu je zvolena dle katalogového doporučení.



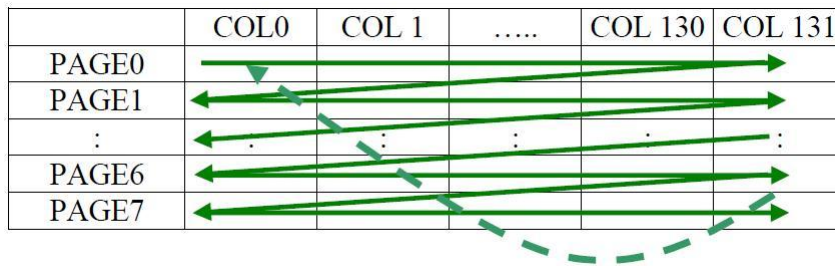
*Obr. 4.3.1.1.a. Vývojový diagram inicializace displeje*

Po resetování je řadič nastaven na výchozí hodnoty:

- OLED panel je vypnutý
- 132 x 64 mód displeje
- Normální adresování sloupců a řádků (SEG00 je mapovaný na adrese 00h, COM0 je mapovaný na adrese 00h)
- Data v posuvném registru SPI jsou smazána
- Řádkový i sloupcový čítač je vynulovaný
- Kontrast je nastaven na hodnotu 80h.
- Normální režim displeje (start na řádku 0)

Dalším krokem je přemapování pinů panelu. Displej je vzhledem k rozměrovým dispozicím do krabice namontovaný tak, že ve výchozím mapování leží adresa 00h v pravém dolním rohu. Aby mohl probíhat zápis dat na obrazovku standardním způsobem, tedy zleva doprava a shora dolů je provedeno horizontální a vertikální přemapování pinů. Přemapování probíhá v řadiči na úrovni mezi GRAM a fyzickými piny OLED, proto přemapování nemá vliv na data v GRAM.

Dále se nastaví postinkrementace adresového ukazatele v horizontálním směru. Pohyb ukazatele při zápisu je patrný z obrázku 4.3.1.1.b.



Obr. 4.3.1.1.b. Pohyb adresového ukazatele v horizontálním režimu, převzato z [11]

Nakonec je nastavena počáteční adresa na stránku 0 sloupec 0, a poté je nastaven jas a kontrast, obojí na maximální hodnotu tedy 0xFF. Poslední instrukce zapne displej.

#### 4.3.1.2 Základní operace

Pokud je třeba zapsat na určité místo na displeji, aniž by se přepisoval celý snímek, je výhodné využít funkci `oled_goto_xy(char x, char y)`. Tato funkce nastaví řádkový i sloupcový čítač na požadované souřadnice. Zápis pak probíhá od tohoto bodu doprava. Vstupními daty funkce jsou: poloha v ose x (v rozsahu 0 až 127) a poloha v ose y v rozsahu (0 až 7).

Ke smazání celého snímku slouží funkce `oled_clr()`. Zde se jedná o dvojitý for-cyklus, který postupně adresuje řádky v rozsahu 0 až 132 a sloupce v rozsahu 0 až 7 a na každou pozici zapíše nulový bajt.

Další možnost je smazání určité vymezené oblasti na displeji. K tomu slouží funkce `void oled_clr_xy(char x, char y, char lenght, char width)`. Zde parametry „x“ a „y“ udávají počáteční souřadnice mazané oblasti, tedy levý horní okraj. Parametr „lenght“ udává délku mazaného okénka v ose x, a parametr „width“ udává šířku okénka v ose y. Funkce je opět řešena dvojitým for-cyklem, kterému určují rozsah indexů parametry `lenght` a `width`. Pro nastavení počátku mazané oblasti je využita funkce `oled_goto_xy`.

Pro vtištění bitmapového obrázku na displej slouží funkce `void bmp(const uint8_t image [8][128])`. Obrázek musí být uložený v konstantním poli s rozměry [8][128]. Funkce obsahuje opět dvojitý for-cyklus v rozsahu x-ové osy 0 až 128 a y-ové osy 0 až 7. V každém průchodu cyklem je volána funkce `oled_dat(pgm_read_byte(&image[j][i]))`, kde i a j jsou indexy for-cyklů a „image“ je ukazatel na bitmapu. Funkce `pgm_read_byte()` je funkcí knihovny „`pgmspace.h`“, která je součástí základního balíčku knihoven v Atmel Studiu. Knihovna je určena pro práci s programovou pamětí. V tomto případě funkce vyčítá konstanty z programové

paměti. Předchází tomu ovšem správná definice tabulky konstant atributem „*PROGMEM*“, který je také definovaný v knihovně „*pgmspace.h*“. Příklad definice konstantního pole do programové paměti je naznačen níže:

```
const uint8_t PROGMEM Název[2][2] = {0x13, 0x7E, 0xAF, 0x7F};
```

#### **4.3.1.3. Font 5x7**

Pro zobrazení textu na displej fontem 5x7 slouží funkce *void print\_5x7(const char \*text)*. *\*text* je zde ukazatel na pole charů, v němž je uložený text k zobrazení. Funkce pak vypíše text, jehož délka je rovna velikosti pole. Před voláním funkce je výhodné zavolat funkci *oled\_goto\_xy*, která nastaví počáteční souřadnice.

Text je možné zapsat na libovolný z osmi řádků OLED displeje. Fonty jsou adresované standardní ASCII normou a jsou uloženy v konstantním poli nazvaném „font5x7“ jehož rozměry jsou [94] [5]. Obsahuje znaky v rozsahu od 32 (space) do 125 (}). Konstanty jsou vyčítány opět pomocí funkce *pgm\_read\_byte()*.

#### **4.3.1.5. Hlavní číslice**

Pro zobrazení hlavních číselných údajů měřicím přístrojem je použitý velký číselný font s pevnou šířkou znaků. Rozměry znaku jsou 16x8, Font je opět uložen v souboru „font.h“ v tabulce s názvem „fixednums8x16“. Každý znak je uložen v jedné řádce, nejprve horní polovina poté spodní polovina, tedy celkem 16 bajtů.

V tomto případě se opět jedná o speciální funkci, která je určena pouze pro výpis číselné hodnoty, s čímž je spojena fixace pozice poslední číslice na displeji. Konkrétní funkce se nazývá *void print\_nums\_16x8(char x, char y, char \*number, char digits)*, kde znaky „*x*“ a „*y*“ udávají opět počáteční pozici na displeji, „*\*text*“ je rovněž ukazatel na řetězec s textem (složený pouze z číslic) a parametr „*digits*“ udává počet zobrazovaných míst, tedy znaků.

Samotná funkce opět vykresluje číselný údaj po jednotlivých znacích. Protože se jedná o výpis číselné hodnoty, která se může libovolně měnit v počtu řádů, je nutné před samotným vykreslováním znát počet znaků, aby bylo možné spočítat pozici poslední číslice.

#### **4.3.1.6. Geometrické tvary**

Z geometrických tvarů je využita pouze rovná přímka, která slouží k podtržení nebo oddělení některých informací na displeji. Implementována je proto pouze jednoduchá funkce `print_h_line(char x, char y, char length)`, která vykreslí přímku na souřadnicích „x“ a „y“ o délce „length“.

#### **4.3.1.7. Složitě tvary**

Na displeji je použito několik složitějších tvarů, jako jsou tlačítka, banery, ikony, informační tabulky atd. Všechny tyto prvky jsou uloženy v programové paměti v podobě tabulky konstant a jsou vykreslovány jako bitmapy. Obslužný program vykreslování rovněž obsahuje dva for-cykly s indexy odpovídající rozměrům prvku. Tyto prvky jsou většinou vykreslovány na pevnou pozici na displeji, proto funkce neobsahují žádný vstupní parametr.

#### **4.3.1.8. Informační dialogové okno**

Jedním z vykreslovaných tvarů je dialogové okno. Jedná se informační okno, do jehož vnitřního prostoru lze zapsat libovolná zpráva například pomocí funkce `print_5x7`. Rozměry okna jsou 110 x 56 bodů a na displeji je pevně ukotveno nahoře s 9-ti bodovými mezerami po stranách.



*Obr. 4.3.1.8. Dialogové okno*

#### **4.3.2. Soubor FLASH**

Pro práci s Flash pamětí je určený soubor FLASH.c s hlavičkovým souborem FLASH.h. Oba soubory byly vytvořeny speciálně pro tuto aplikaci a obsahují všechny potřebné funkce pro nastavení a komunikaci s Flash. Soubory obsahují funkce z tabulky 4.3.2.

Tab. 4.3.2. Seznam funkcí v souboru FLASH

Název funkce
void SPIC_init(void)
void SPIC_send_byte( unsigned char data)
unsigned char SPIC_read_byte(void)
void FLASH_read_data(unsigned int address, unsigned char length)
void FLASH_erase_all(void)
void FLASH_write_byte(unsigned char data, unsigned int address)
void FLASH_write_data(unsigned char *buffer, unsigned int address, unsigned char length)
void FLASH_save_new_sample(unsigned char *sample)
void FLASH_read_all_table(void)

#### 4.3.2.1. Funkce SPI\_init

Funkce *SPI\_init()* je určena k nastavení SPI modulu uvnitř MCU. Nejprve jsou piny PC7, PC6, PC5, které využívá SPI modul, odpojeny od výstupního registru zápisem do konfiguračního registru OUTCTR. Tím dojde k přerušení vazby mezi výstupním pinem a výstupním registrem OUT. SPI modul je nastaven konfiguračním registrem SPIC.CTRL do režimu master, mód 0, kdy jsou platná data při náběžné hraně hodinového signálu. Formát dat je nastaven do módu „MSB first“. Hodinová frekvence je nastavena na 2 MHz. Této frekvence je docíleno použitím periferní předděličky konkrétně výstupu /16, který sníží systémový hodinový signál z frekvence 32 MHz na hodnotu 2 MHz.

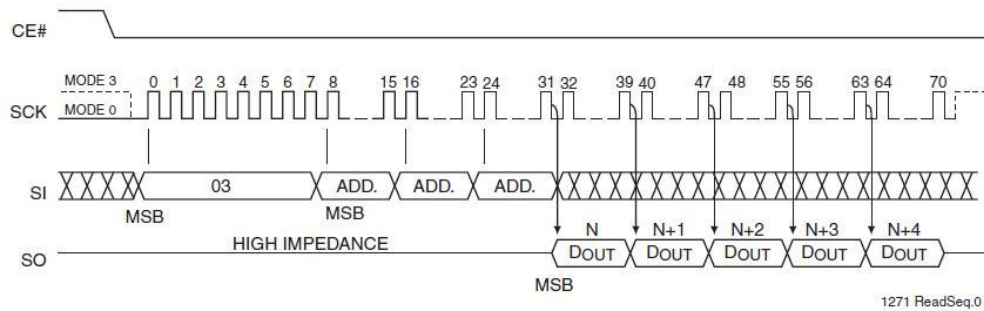
#### 4.3.2.2. Funkce SPI\_send\_byte a SPI\_read\_byte

Funkce *SPI\_send\_byte()* a *SPI\_read\_byte()* jsou základní funkce pro přenášení dat pomocí SPI. Tyto funkce odešlou popřípadě přijmou jeden byte po SPI sběrnici. Využívají se v dalších popisovaných funkcích.

#### 4.3.2.3. Funkce FLASH\_read\_data

Tato funkce je určena k načtení dat z paměti. Vstupní parametry jsou zde „address“, který udává počáteční adresu zápisu a parametr „length“, který udává délku načítaného slova. Výsledek se ukládá do bufferu `buffer_FLASH`, definovaného jako pole o velikosti 48 prvků. Lze tedy načíst maximálně 48 prvků. Čtení probíhá dle schématu na obrázku 4.3.2.3.





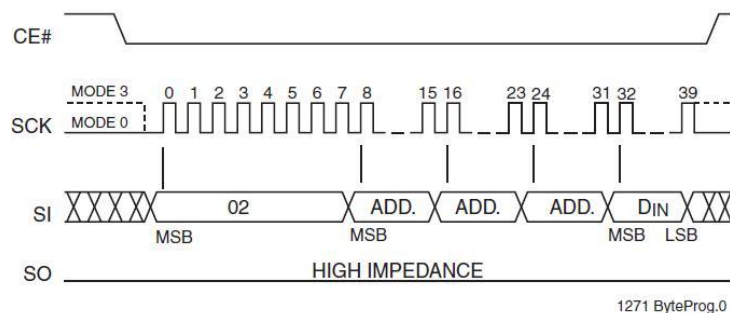
Obr. 4.3.2.3. Schéma čtení dat z Flash paměti, převzato z [13]

V první fázi se vynuluje signál CE (chip enable), který uvede obvod do činnosti. Následně se odešle operační kód odpovídající čtení z paměti, zde má hodnotu 03H. Další tři bajty jsou adresa pro začátek čtení v paměti. Odesílá se nejdříve MSB. Poté následuje příjem dat z flash. Jedná se o čtení dat s automatickou post inkrementací adresy, proto je možné sekvenčně načíst libovolný blok dat. Počáteční adresa odpovídá zadané adrese. Ukončení čtení se provede nastavením pinu CE, čímž se obvod uvede do nečinnosti.

#### 4.3.2.4. Funkce FLASH\_write\_byte

V případě zápisu dat je nutné ještě před započítím samotného zapisování povolit bit WEL umístěný ve Status registru. Zápis se provede pomocí operačního kódu s hodnotou 06H. Po každém zápisu se opět automaticky bit vynuluje a tím zakáže další zápis, proto je nutné před každým zápisem bit WEL nastavit.

Funkce *FLASH\_write\_byte (unsigned char data, unsigned int address)* zapíše jeden bajt „data“ na adresu „address“. Funkce opět vychází z implementace operačního kódu paměti Flash popsaného v [13]. Samotný zápis probíhá dle následujícího schématu.



Obr. 4.3.2.4. Schéma zápisu jednoho bajtu do flash, převzato z [13]

Obvod je opět uveden do činnosti pinem CE. Poté je odeslán operační kód odpovídající zápisu jednoho bajtu, tedy hodnota 02H. Poté je odeslána trojice bajtů s adresou a nakonec je odeslána hodnota zapisovaného bajtu dat.

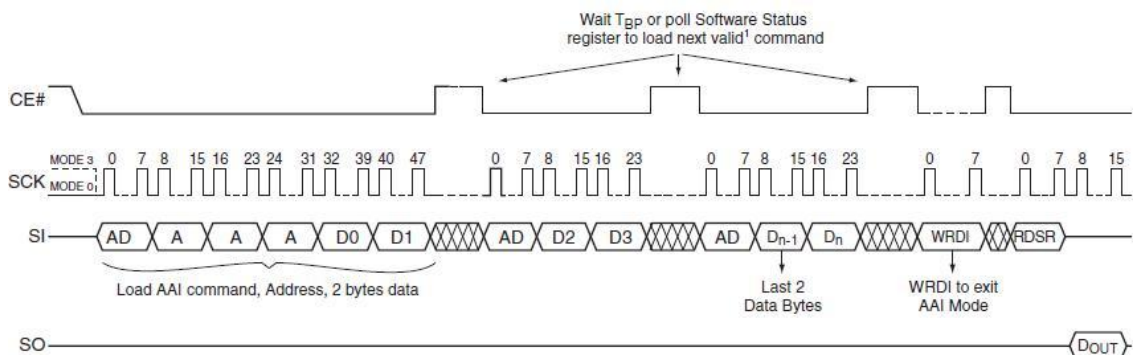
V tomto obvodu neprobíhá během zápisu automatické smazání paměťové buňky. V případě opětovného zápisu je tedy nutné provést před zápisem smazání paměti. Protože se jedná o paměť typu Flash je nutné provést smazání minimálně jedné stránky, která má velikost 4kB. Pro tento typ mazání je vyhrazen v IO operační kód 20H.

#### 4.3.2.5. Funkce *FLASH\_erase\_all*

Pro smazání celé paměti je určena funkce `void FLASH_erase_all(void)`. Proto, aby bylo možné smazat celou paměť, je třeba mít povolený zápis ve všech stránkách paměti. Kvůli tomu je nutné vynulovat bity BP0 až BP3 ve Status registru. Protože pro změnu těchto bitů neexistuje přímo operační kód, je nutné přepsat celý Status registr. Ve výchozím stavu obvodu ovšem není dovoleno přepisovat hodnotu Status registru, proto je nutné nejprve povolit zápis do Status registru pomocí operačního kódu 50H. Poté je možné přepsat registr pomocí operačního kódu 01H. V dalším kroku je nutné ještě znovu povolit zápis do paměti nastavením bitu WEL pomocí operačního kódu 06H. A následně lze teprve provést smazání celé paměti operačním kódem 60H.

#### 4.3.2.6. Funkce *FLASH\_write\_data*

Funkce `FLASH_write_data(unsigned char *buffer, unsigned int address, unsigned char length)` zapíše blok dat o délce „length“ uložený v proměnné „buffer“ na adresu „address“. V tomto případě se jedná o složitější funkci zápisu, která využívá automatickou adresovou post inkrementaci.



Obr. 4.3.2.6. Schéma zápisu s automatickou inkrementací [13]

V první fázi funkce je třeba opět nastavit bit WEL operačním kódem 06h. Poté následuje operační kód ADh jehož schéma je zobrazené na obrázku 4.3.2.6. V první fázi se odešle operační kód s hodnotou ADh, poté jsou odeslány tři bajty počáteční adresy. Poté se musí odeslat dva bajty dat a následně nastavit pin CE. Poté je bit CE opět nulován a následuje znovu operační kód s hodnotou ADh. V tuto chvíli je možné odeslat další dva bajty bez nutnosti zopakování adresy (adresa je uschována v řadiči). Následně je třeba opět nastavit bit CE. Takto lze pokračovat, dokud nebudou zapsaná všechna potřebná data. Jedinou podmínkou je dodržení sekvence: nulování CE => operační kód ADh => dva bajty dat => nastavení CE. Pokud je zapisován lichý počet dat je třeba jako poslední odeslat prázdný bajt. Celá sekvence zápisu s automatickou post inkrementací adresy se ukončí nulováním bitu WEL. Tedy operačním kódem nazvaným WRDI s hodnotou 04h.

### 4.3.3. USB

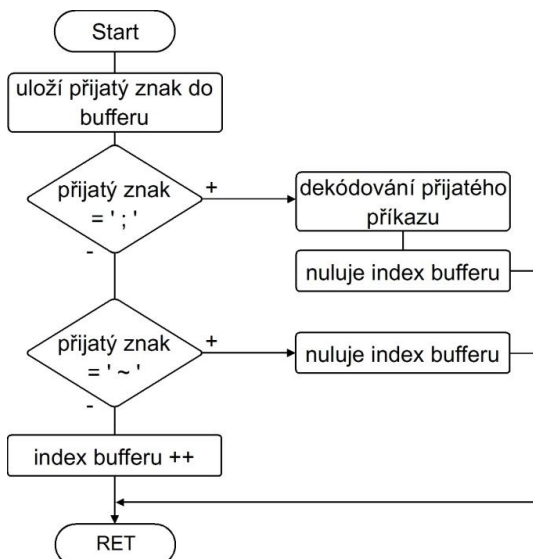
USB rozhraní je využité ke komunikaci s PC. Dochází zde k přenosu naměřených dat i řídicích příkazů týkající se zapnutí popřípadě vypnutí některých funkcí přístroje.

#### 4.3.3.1. Implementace v přístroji

Základem softwarové implementace USB je soubor ASF knihoven od firmy Atmel, ve kterém je obsažena veškerá podpora pro USB komunikaci. Metoda komunikace je řešena vytvořením virtuální sériové linky přes rozhraní USB s pomocí třídy CDC (Communications Device Class). Součástí podpory ASF je i USB ovladač pro platformu Windows, který v systému vytvoří nový virtuální COM port s přenosovými rychlostmi kolem 500 kbaud/s.

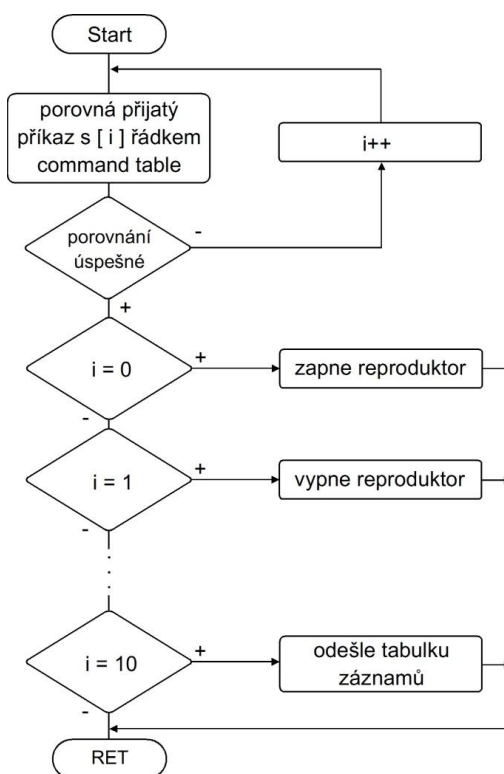
Z hlediska softwarové implementace v přístroji je nejdůležitější soubor USB\_vcom.c, který obsahuje funkce volané při vzniklé události týkající se USB přenosu. Jedna z využívaných funkcí, *bool main\_cdc\_enable (uint8\_t port)*, je volaná při vzniku CDC kanálu. Ve funkci je nastaven příznak o vzniku, na základě kterého je v hlavní smyčce vytištěno informační dialogové okno o připojení USB.

Další funkce, *void uart\_rx\_notify (uint8\_t port)*, je volaná ve chvíli přijetí znaku. Zde se provádí testování přijatého znaku a následné vyhodnocení dle vývojového diagramu na obrázku 4.3.3.1.a.



Obr. 4.3.3.1.a Vývojový diagram přijímání znaku

V první fázi se provede uložení znaku do vstupního bufferu na místo, na které ukazuje „*index bufferu*“. V další fázi se provede vyhodnocení přijatého znaku. Pokud byl přijat znak ‘ ; ’, znamená to zakončení příkazu a je volané dekódování příkazu. Pokud byl přijat znak ‘ ~ ’, znamená to příkaz k nulování bufferu. Vynuluje se index bufferu a následný zápis probíhá od začátku bufferu. Pokud byl přijat libovolný znak, mimo dvou předchozích, inkrementuje se index buffer.



Obr. 4.3.3.1.b Vývojový diagram dekódování příkazu

Dekódování příkazu probíhá v samostatné funkci nazvané „received command“. Vývojový diagram této funkce je patrný na obrázku č. 4.3.3.1.b. V první fázi se provádí smyčka, kdy je v každém cyklu přijatý příkaz postupně porovnáván s dalším příkazem v tabulce příkazů. Tato tabulka je nazvaná „command table“ a obsahuje veškeré příkazy používané při USB komunikaci. Seznam příkazů je ilustrovaný v tabulce 4.3.3.1.

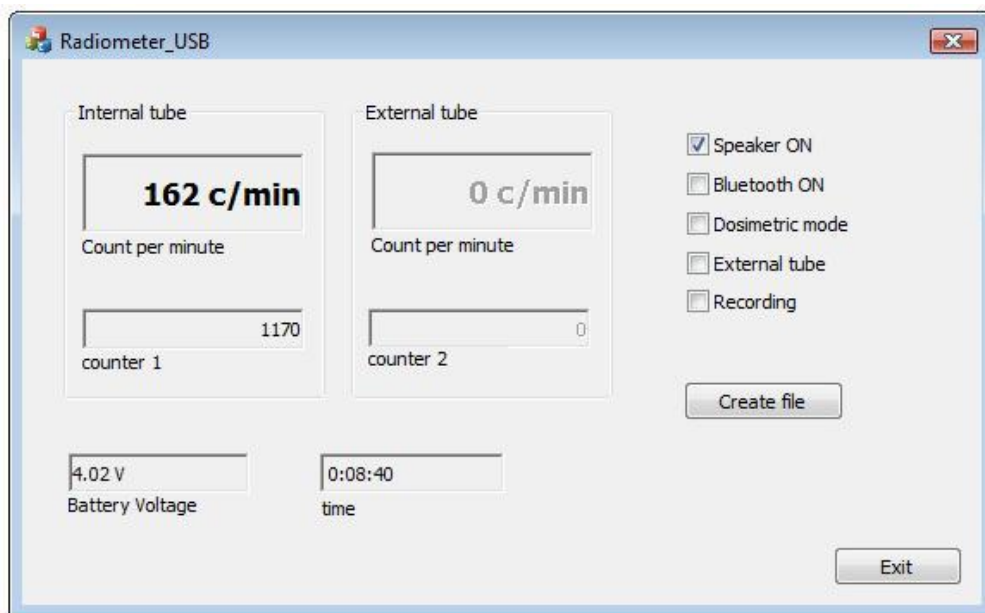
Tab. 4.3.3.1. Seznam příkazů v tabulce „command table“

<i>příkaz</i>	<i>popis</i>
spkron;	Zapne reproduktor
spkoff;	Vypne reproduktor
bltoon;	Zapne Bluetooth
bltoff;	Vypne Bluetooth
dosion;	Zapne dosimetr
dosoff;	Vypne dosimetr
extuon;	Zapne externí trubici
extoff;	Vypne externí trubici
recoon;	Zapne záznam vzorků
recoff;	Vypne záznam vzorků
sendtb;	Odešle zaznamenané vzorky

Konkrétně se jedná o pole v programové paměti s rozměry [11] [7], kdy první číslice udává počet příkazů a druhá udává délku jednoho příkazu. Parametr „i“ ve vývojovém diagramu značí ukazatel na jednotlivé příkazy v tabulce. Při shodě hodnota parametru i odpovídá řádku se shodným příkazem. Po nalezení shody se vyhodnotí parametr i a na základě jeho hodnoty se vykoná daný příkaz.

#### **4.3.3.2. Program pro PC**

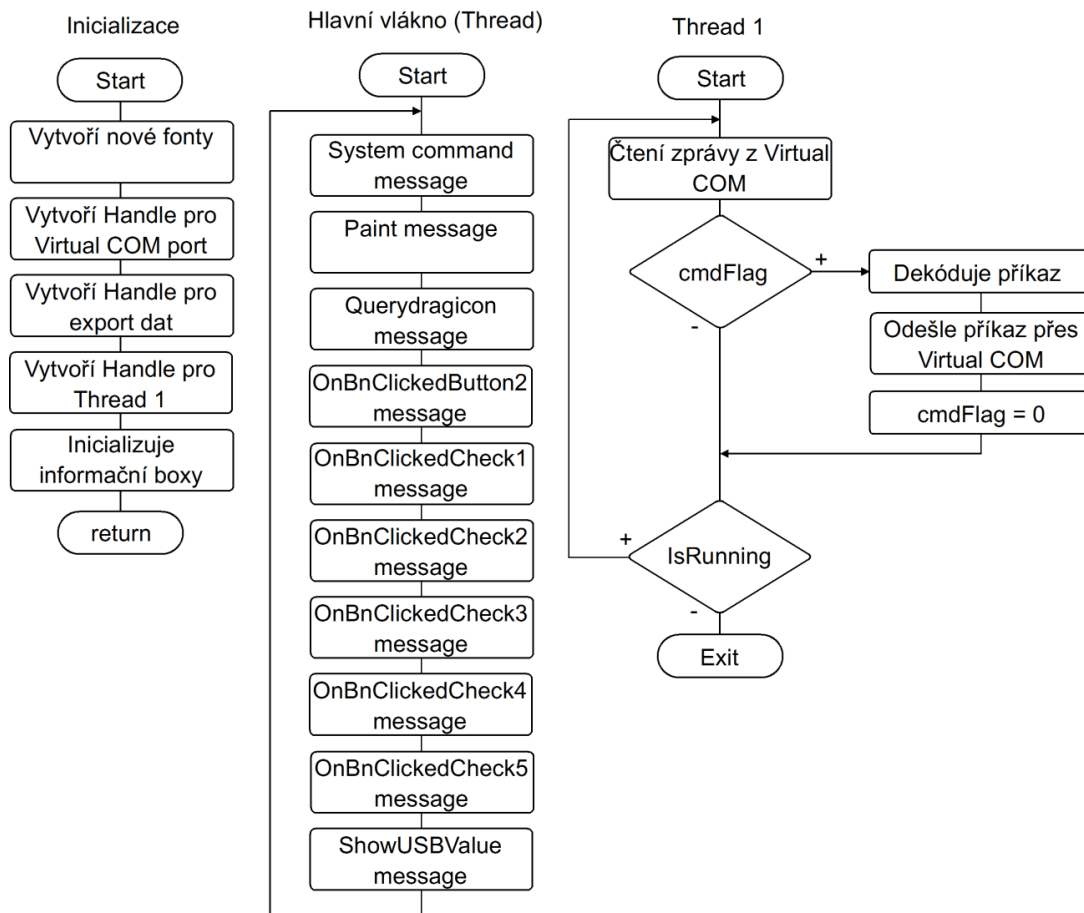
K přístroji byla vytvořena obslužná PC aplikace pro platformu Windows. Aplikace je vytvořena v prostředí Visual Studio 2010 Professional C++. Cílem bylo navrhnout jednoduchou aplikaci s grafickým rozhraním, která by umožňovala zobrazovat základní údaje o naměřených hodnotách, popřípadě, aby bylo možné naměřená data exportovat do textového souboru. Na obrázku 4.3.3.2.a. je k dispozici náhled na dialogové okno aplikace.



*Obr.4.3.3.2.a. Obrázek dialogového okna PC aplikace*

K tvorbě aplikace byla využita standardní knihovna MFC (Microsoft Foundation Class). Vývojový diagram aplikace je patrný na obrázku 4.3.3.2.b. V aplikaci pracují nezávisle na sobě dvě vlákna (thready), hlavní vlákno a thread 1, který je založen při inicializaci.

Přitom první (hlavní vlákno) kontroluje především funkci samotného dialogového okna. Při spuštění projde nejprve konstruktorem, inicializací a následně se uzavře do hlavní smyčky, kde kontroluje systémové a dialogové zprávy týkající se událostí ve spojení s dialogovým oknem. Při zaznamenání zprávy je pak volaná stejnojmenná obslužná funkce. Zpráva System command obsahuje zprávy o uživatelské změně v menu popřípadě stisku minimalizace či maximalizace či zavření okna. Zpráva Paint je volaná ve chvíli, kdy je třeba překreslit okno, například při změně rozměrů okna. QueryDragIcon definuje ikonu a kurzor. Následují zprávy vznikající při stisku jednoho z využitých tlačítek. Zpráva OnBnClickedButton2 je vyvolaná při stisku tlačítka pro vytvoření souboru s importovanými daty. Zprávy OnBnClickedCheckx, kde x značí číselný údaj od 1 do 5, jsou zprávy generované při stisku jednotlivých checkboxů, tedy zaškrtačích okének. Zde je nutné v rámci obsluhy nejdříve zjistit jestli je okénko zaškrtnuté nebo ne. Následuje zpráva ShowUSBValue. Tato zpráva je volaná ve chvíli kdy thread 1 přijme naměřená data z přístroje.



Obr.4.3.3.2.b. Vývojový diagram PC Aplikace

Thread 1 je založený v inicializaci. Slouží především ke čtení příchozích zpráv z virtuálního COM portu. Na základě přečtené zprávy z VCOM je pak vygenerovaná zpráva „*ShowUSBValue*“. Dále probíhá kontrola, jestli není nějaký příkaz k odeslání. Kontroluje se tedy příznak „*cmdFlag*“, jehož nenulová hodnota znamená stisk některého z tlačítek. Poté je příkaz zakódován pomocí stejné tabulky *command\_table*, jako je na straně měřicího přístroje. Příkazy jsou tedy shodné s tabulkou 4.3.3.1. Nakonec je příkaz odeslán. Thread 1 se ukončí při volání destrukturu, kdy se vynuluje parametr „*IsRunning*“ čímž vlákno narazí na příkaz „*ExitThread*“. Všechny vytvořené handle jsou zavřeny v destrukturu.

#### 4.3.4. Bluetooth

Soubor *bluetooth.c* obsahuje funkce pro komunikaci standardem Bluetooth s použitím modulu *EGBT-045MS*. Jak už bylo řečeno modul skrz Bluetooth kanál emuluje standardní obousměrnou sériovou linku. Soubor je velice jednoduchý, protože není třeba použít funkce pro navázání spojení nebo řízení přenosu dat. Navázání spojení je

řízeno hostitelským zařízením, v tomto případě tedy chytrým telefonem nebo PC vybaveným modulem bluetooth. Samotný modul obsahuje mimo rádiové části také řídicí logiku, která je schopná samostatně navázat spojení s hostitelským zařízením a to bez zásahu ze strany MCU. Při navazování spojení je modulem vyžadované přístupové heslo, které je nastavené ve výchozím stavu na hodnotu 1234. Modul se tedy stará o navázání spojení a úkolem MCU je pouze odesílat data s použitím asynchronního módu jednoho z modulů USART. V tabulce 4.3.4 je seznam funkcí obsažených v souboru bluetooth.c.

Tab. 4.3.4. Seznam funkcí v souboru bluetooth

Název funkce
void bluetooth_init(void)
void BtsendByte(unsigned char c)
void BtsendString(unsigned char *text)

Funkce *bluetooth\_init()* inicializuje modul USARTE0. Přenosová rychlost je nastavena parametrem BSEL nacházející se v registrech BAUDCTRLA a BAUDCTRLB. Vzorec pro výpočet hodnoty BSEL je převzatý z Aplikační poznámky AVR1307 [16]:

$$BSEL = \frac{f_{CLK}}{16 \cdot f_{baud}} - 1 = \frac{32 \cdot 10^6}{16 \cdot 9600} - 1 = 207 \quad (6)$$

Přenosová rychlost byla zvolena vzhledem k povaze přenášených dat na hodnotu 9600kbaud/s. Tato hodnota je nastavena jako výchozí i v Bluetooth modulu. Jako další je nastaven charakter přenosu, tedy 8 bitů na jeden znak plus jeden stop bit. Paritní znaky jsou vypnuty. Nakonec je povolený obousměrný přenos dat.

Funkce „*BtsendByte*“ odešle jeden bajt přes modul bluetooth, funkce „*BtsendString*“ odešle řetězec znaků. Funkce jsou využívány k odeslání dat po každé nové naměřené hodnotě a je možné je přijímat na straně chytrého telefonu buď s použitím terminálové aplikace, nebo je možné navrhnout aplikaci, která bude data zachytávat a zobrazovat je v rámci jedné aktivity do odpovídajících panelů.



## 4.4. Bootloader

Bootloader je využitý k zavedení programu do programové paměti procesoru pomocí rozhraní USB. Použitý typ MCU je vybaven 4kB sekci v programové paměti určené pro uložení vlastního bootladeru. Po výrobě je však programová i bootladerová část paměti prázdná, tudíž je bootlader nefunkční. Pro první programování procesoru je tedy nutné využít standardní programátor. Výrobce distribuuje k procesoru již hotový bootlader, který využívá pro přenos dat integrovaný USB modul. Blíže popsáný je v aplikační poznámce AVR:1916 [15]. Bootlader lze provozovat s obslužným počítačovým programem nazvaným Atmel Flip. Program umožňuje smazat, nahrát a verifikovat jak programovou tak datovou paměť, bez nutnosti použití programátoru.

## 5. Výpočet intenzity záření

Diskrétní signál je veden z GM trubice do tvarovače signálu. Upravený obdélníkový signál je přivedený na vstupní pin MCU. Zde je propojen událostním kanálem č. 4 do čítače TCD0. Čítač je nastaven na vzestupné čítání a s každou příchozí náběžnou hranou inkrementuje svoji hodnotu. Po uplynutí předepsané doby měření je hodnota z čítače vyzvednuta a vypočítá se z ní intenzita záření za uplynulý interval dle následujícího vzorce.

$$CPM = \frac{x(n) - x(n - 1)}{t} \cdot 60 = \frac{\Delta x}{t} \cdot 60 \quad (7)$$

Kde  $x$  je sebraný vzorek počtu impulzů v čítači a  $t$  je čas v sekundách. Výsledná hodnota je tedy počet impulzů za časový interval, což odpovídá intenzitě záření.

Výsledná naměřená hodnota udává počet zachycených rozpadů vztažený k časovému úseku jedné minuty. Značeno CPM (Count Per Minute). Tato hodnota byla zvolena z důvodu irelevantnosti ekvivalentního dávkového příkonu, jako je Sievert. Jednotka Sievert zohledňuje jak záření gamma tak záření beta i alfa a pro každý druh záření má vlastní váhovací koeficient podle škodlivosti pro lidský organismus. Tento měřicí přístroj, stejně jako většina přenosných přístrojů, detekuje pouze gamma záření tudíž nelze zjistit přítomnost dalších druhů záření. Z toho důvodu není korektní zobrazovat naměřené hodnoty v Sievertech.

V případě potřeby detekce jiných typů záření je možné použít externí GM trubici, odpovídajícího typu. Například vybavenou slídovým okénkem pro detekci Alfa záření. Jedinou podmínkou je, aby napájecí napětí 400 V spadalo do pracovní oblasti trubice.

## Závěr

Cílem práce bylo vyvinout přenosný měřič ionizujícího záření. Výsledné zařízení splňuje všechny zadané parametry. Zařízení umožňuje měření intenzity gamma záření v oblasti běžného prostředí, je možné detekovat i změny pozadí. Například lze detekovat, že v budově postavené z červených cihel je přibližně dvojnásobná úroveň gamma záření než v budově postavené z železobetonových panelů. Při měření okamžitých hodnot je možné nastavit dobu měření jednoho vzorku v rozmezí 5 až 240 sekund s krokem 5s. Výsledná hodnota měření je vždy vztažena k časovému intervalu jedné minuty.

Dále je možné přepnout přístroj do režimu „Dosimetr“ kdy měří průměrnou dlouhodobou hodnotu. Nastavení přístroje také umožňuje záznam naměřených hodnot, přenos dat technologií Bluetooth či USB, nebo zapnutí či vypnutí zvukové indikace.

Zobrazení hodnot přístrojem je uzpůsobené pro snadné vyčítání hodnot z displeje. Na displeji jsou dále zobrazené systémové údaje jako je stav baterie, doba měření, stav čítačů a postup v měření vzorků.

Při měření akumulátoru dochází i přes důkladné filtrování ke zvlnění naměřených hodnot v rámci 0,04 V. Při opakovaném měření se tak projevuje kolísáním naměřené hodnoty. Je to způsobeno především rušením od spínacích zdrojů, částečně pak i mikropočítačem. Vzhledem k již použitým filtrovacím součástkám zde přichází v úvahu jako nejekonomičtější řešení, hodnotu softwarově průměrovat metodou klouzavých průměrů. Je však třeba vytvořit softwarový kruhový zásobník, protože tento procesor hardwarový neobsahuje.

Cena součástek na výrobu jednoho prototypu se v maloobchodním prodeji pohybuje okolo 3100 Kč bez DPH. V případě velkoobchodního prodeje, při výrobě sto kusů, lze ve firmě TME dosáhnout přibližné ceny 2100 Kč/ks bez DPH. V případě použití LCD displeje (například DEM 128064K FGH-PW) namísto použitého OLED je možné snížit náklady na 1850 Kč/ks.

# Literatura

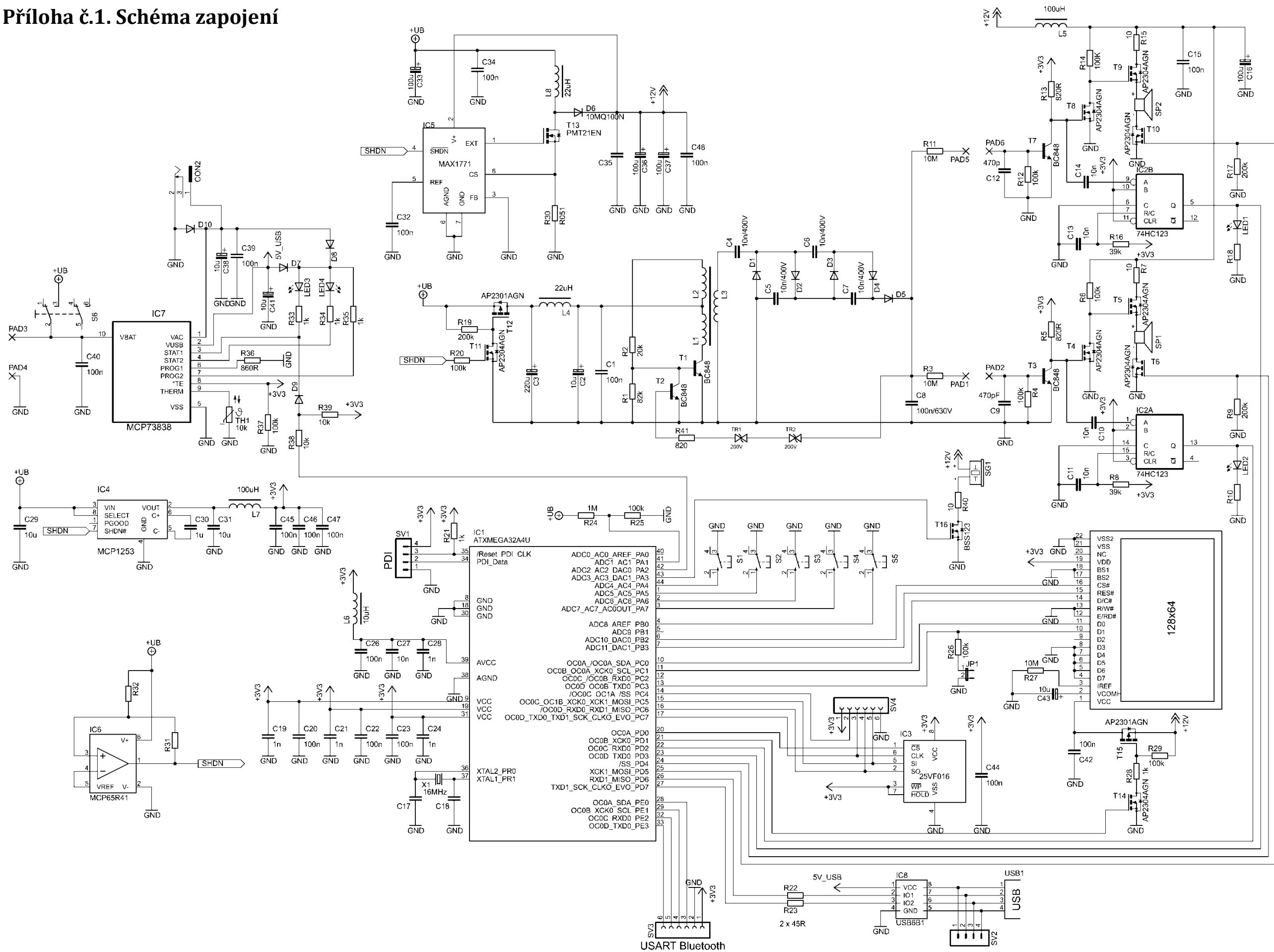
- [1] KNOLL, G. F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Willey, 2010. ISBN: 978-0470131480
- [2] Matoušek, D. – Brtník, B.: Mikroprocesorová technika - Práce s mikrokontroléry řady ATMEL AVR ATXmega A4 - ATXmega16, 2011. Praha: BEN-Technická literatura, (c)2011. ISBN 978-80-7300-4.
- [3] Gerndt, J. – Průša, P.: Detektory ionizujícího záření, 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, (c)2011. ISBN 978-80-01-04710-1.
- [4] Ullmann, V.: Jaderná a radiační fyzika [online]. [vid. 1.4.2015]. Dostupné z www: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika.htm#Elektromagnetismus>
- [5] Neuffus, S.: Přednáška k předmětu: *Radiometrické detektory pro LC*. ©2012. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/chemie/analchem/cabala/ke-stazeni/pokroky-v-modernich-separacnich-metodach/radiometricke-detektory-pro-lc/view>
- [6] Atmel: *Katalogový list ATXMEGA A MANUAL* [online]. 2012. [vid. 7.9.2014]. Dostupné z www: <http://www.atmel.com/Images/doc8077.pdf>
- [7] Atmel: *Katalogový list ATXMEGA AU MANUAL* [online]. 2012. [vid. 7.9.2014]. Dostupné z www: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8331-8-and-16-bit-AVR-Microcontroller-XMEGA-AU\\_Manual.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8331-8-and-16-bit-AVR-Microcontroller-XMEGA-AU_Manual.pdf)
- [8] Atmel: *Katalogový list ATXMEGA32A4U* [online]. 2012. [vid. 7.9.2014]. Dostupné z www: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8387-8-and-16-bit-AVR-Microcontroller-XMEGA-A4U\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8387-8-and-16-bit-AVR-Microcontroller-XMEGA-A4U_Datasheet.pdf)
- [9] Maxim Integrated: *Katalogový list MAX1771* [online]. 2002. [vid. 14.9.2014]. Dostupné z www: <http://pdfserv.maximintegrated.com/en/ds/MAX1771.pdf>
- [10] Microchip: *Katalogový list MCP1253* [online]. 2013. [vid. 15.9.2014]. Dostupné z www: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21752B.pdf>
- [11] Microchip: *Katalogový list MCP65R41* [online]. 2010. [vid. 7.2.2015]. Dostupné z www: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22269A.pdf>

- [12] Microchip: *Katalogový list MCP73838* [online]. 2007. [vid. 16.2.2015]. Dostupné z <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22071a.pdf>
- [13] ST Microelectronic: *Katalogový list USB6B1RL* [online]. 2007. [vid. 23.2.2015]. Dostupné z <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00001361.pdf>
- [14] Solomon Systech: *Katalogový list SSD1305* [online]. 2008. [vid. 3.3.2015]. Dostupné z: <http://www.allshore.com/pdf/SSD1305.pdf>
- [15] Atmel: *Aplikační poznámka Atmel AVR:1916 USB DFU Bootloader* [online]. 2012. [vid. 8.3.2015]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc8429.pdf>
- [16] Atmel: *Aplikační poznámka Atmel AVR:1307 Using the XMEGA USART* [online]. 2008. [vid. 18.4.2015]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc8049.pdf>
- [17] Microchip: *Katalogový list SST25VF016B* [online]. 2011. [vid. 17.3.2015]. Dostupné z <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25044A.pdf>
- [18] Jiráček, T. – *Materiály a komponenty pro lithno-iontové zdroje proudu*. 2010. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010.
- [19] Atmel: *AVR Libc Reference Manual* [online]. 2014. [vid. 24.11.2014]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/webdoc/AVRLibcReferenceManual/>

## Seznam zkratek

$\alpha$ .....	alfa záření
$\beta$ .....	beta záření
$\gamma$ .....	gama záření
DPS .....	deska plošných spojů
GMT.....	Geiger Müllerova trubice
I2C .....	sériový interface (Inter-Integrated Circuit)
LCD .....	displej s tekutými krystaly (Liquid Crystals Display)
MCU .....	mikrokontrolér
OLED.....	organický LED displej
PC.....	osobní počítač
SPI.....	sériový interface (Serial Peripheral Bus)
USB.....	univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)

# Příloha č.1. Schéma zapojení



## Příloha č.2. Seznam součástek

### Pasivní prvky

Rezistory SMD 1206		Kondenzátory SMD 1206	
<i>Označení součástky</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Označení součástky</i>	<i>Hodnota</i>
R1	82 kΩ	C1, C15, C20, C23, C25,	100 nF
R2	20 kΩ	C26, C32, C34, C35, C39	100 nF
R3,R11, R27	10 MΩ	C40, C42, C44, C47	100 nF
R4, R6, R12, R14, R20, R25	100 kΩ	C9,C12	470 pF
R26, R29, R37	100 kΩ	C10, C11, C13, C14	10 nF
R5,R13, R36	860 Ω	C17, C18	22 pF
R7, R15, R40	10 Ω	C19	1 nF
R8, R16	39 kΩ	Kondenzátory SMD 0805	
R9, R17,R19	200 kΩ	C21, C24	1 nF
R10, R18	180 Ω	C22, C25, C26, C46	100 nF
R21,R28, R33, R34, R35	1 kΩ	C27	10 nF
R22, R23	22 Ω	C30	1 uF
R24	1 MΩ	Tantalové kondenzátory SMD	
R38, R39	10 kΩ	C2, C3	10 uF / 16 V
R30	0,51 Ω	C16, C33, C36	100 uF / 16 V
Tlumivky SMD 1206		Fóliové kondenzátory	
L4	22 uH / 50 mA	C4, C5, C6, C7	10 nF / 400 V
L6	10 uH / 25mA	C8	100 nF / 630 V
Tlumivky výkonové		Krystaly	
L5, L7	100 uH / 300mA	X1	16 MHz
L8	22 uH / 1,55A	Transformátor	
		L1, L2, L3	



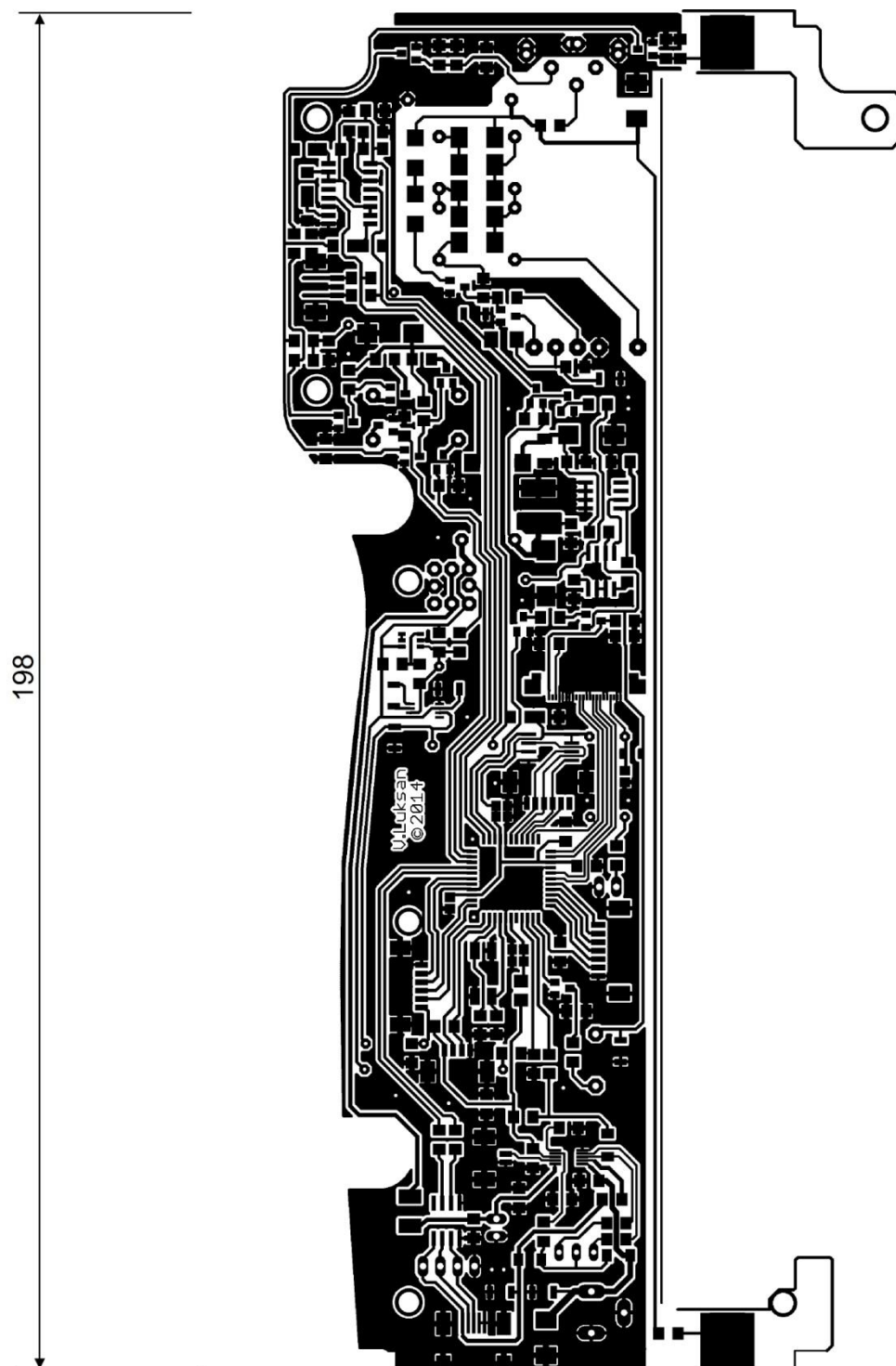
## Aktivní prvky

Diody		
<i>Označení součástky</i>	<i>Typ součástky</i>	<i>Pouzdro</i>
D1, D2, D3, D4, D5	SUF4007	MELF
D6	10MQ100N	D-64
D7,D8,D9	1N4148 SMD	MINIMELF
D10	1N4007	MELF
LED1,LED2	LED3528 RED	SMD 3528
LED3,LED4	L-59EGW-CA	5mm LED
Tranzistory		
T1, T2, T3, T7	BC848	SOT23
T4,T5,T6,T8,T9,T10,T11,T14	AP2304AGN	SOT23
T15,T12	AP2301AGN	SOT23
T13	STM9926	SO8
Integrované obvody		
IC1	ATXMEGA32A4U	TQFP-44
IC2	74HC123	SO16
IC3	SST25VF016B	SOIC8
IC4	MCP1253	MSOP8
IC5	MAX1771	SO8
IC6	MCP65R41	SOT23-6
IC7	MCP73838	MSOP10
IC8	USB6B1	SO8
Displej		
OLED	RET012864CYPP3N00000	-

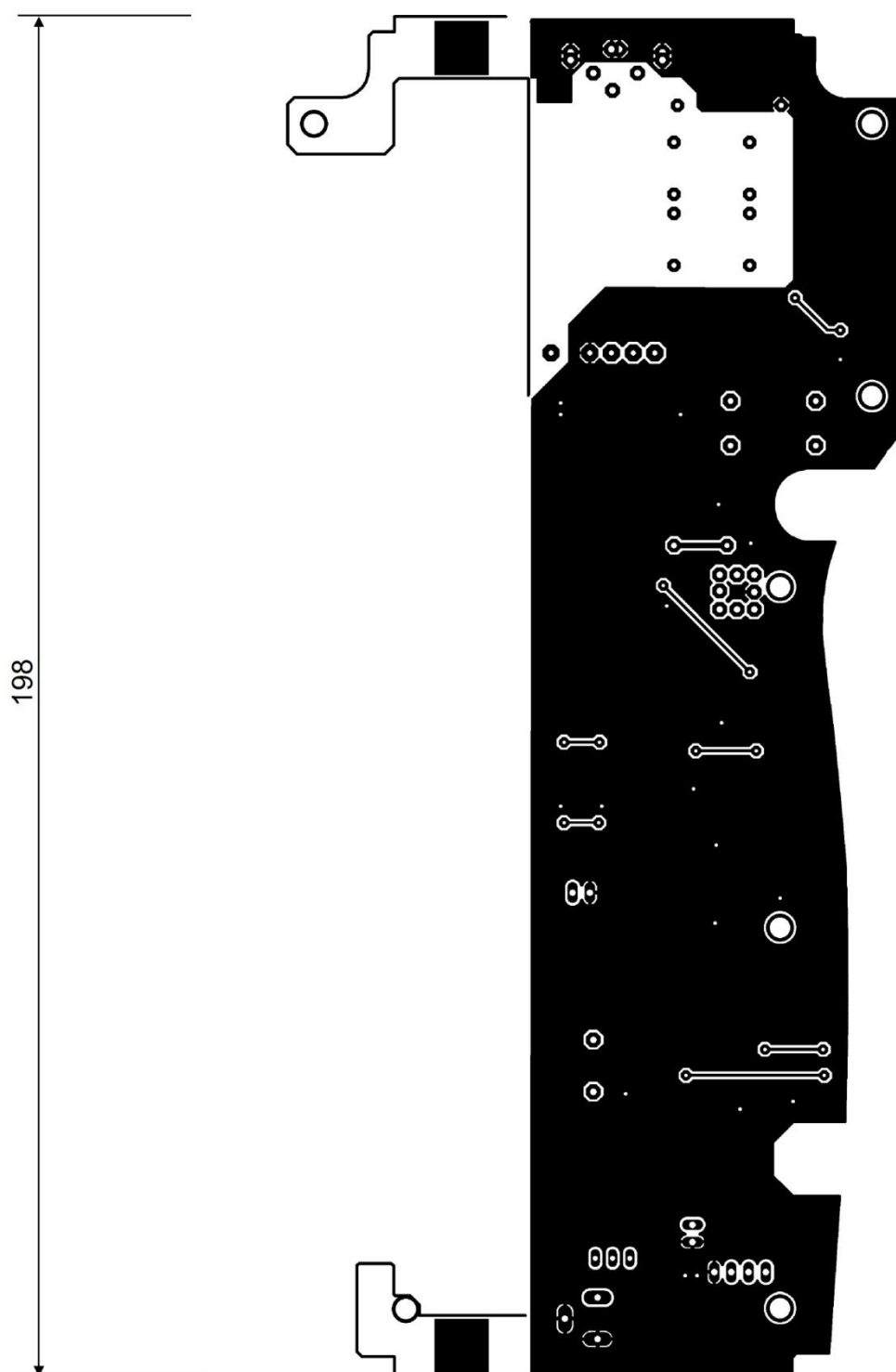
## Ostatní

Tlačítka S1 až S5	B3FS-1005	6 x 6 mm
Tlačítko S6	PB61302AL-3-101	10 x 10 mm
GM1	SBM19	196 x 22 mm
Reproduktor SP1, SP2	LP-12SP42	9 x 12 mm
SV1 až SV5	Konektory MOLEX MX-53398	Rastr 1,25 mm
Akumulátor	Li-pol 3,6 V 1200 mAh	62 x 30 x 9mm
Krabička	1553T	210 x 100 mm

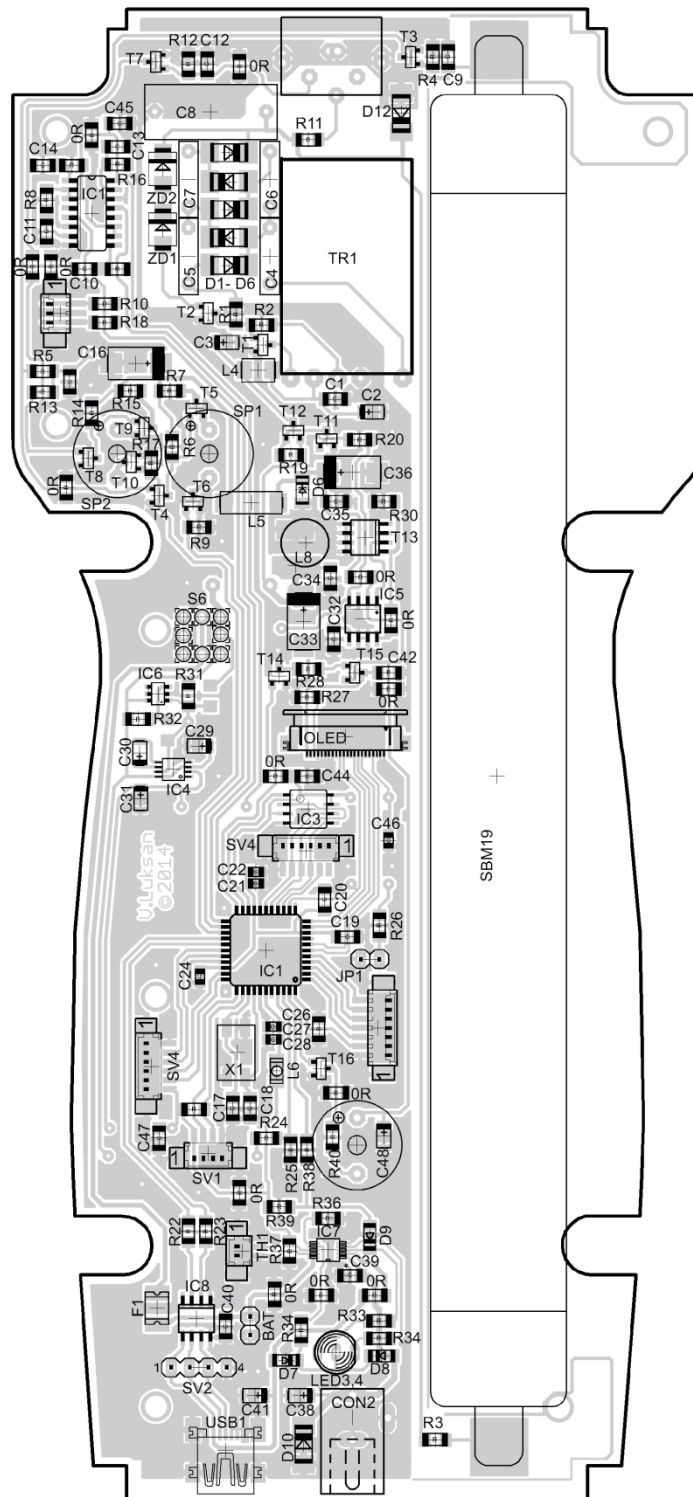
### Příloha č.3. Výkres vrchní strany DPS



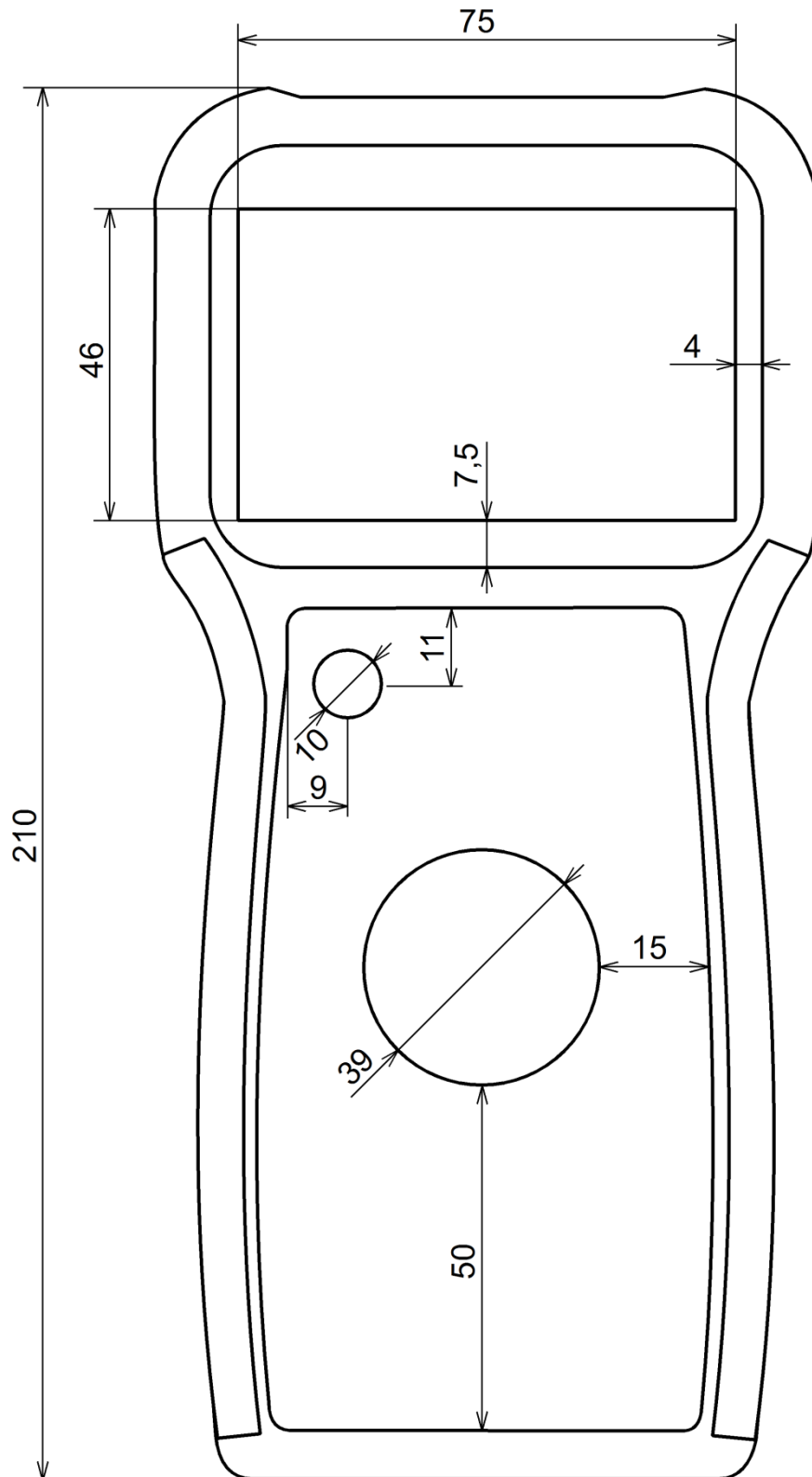
## Příloha č.4. Výkres spodní strany DPS



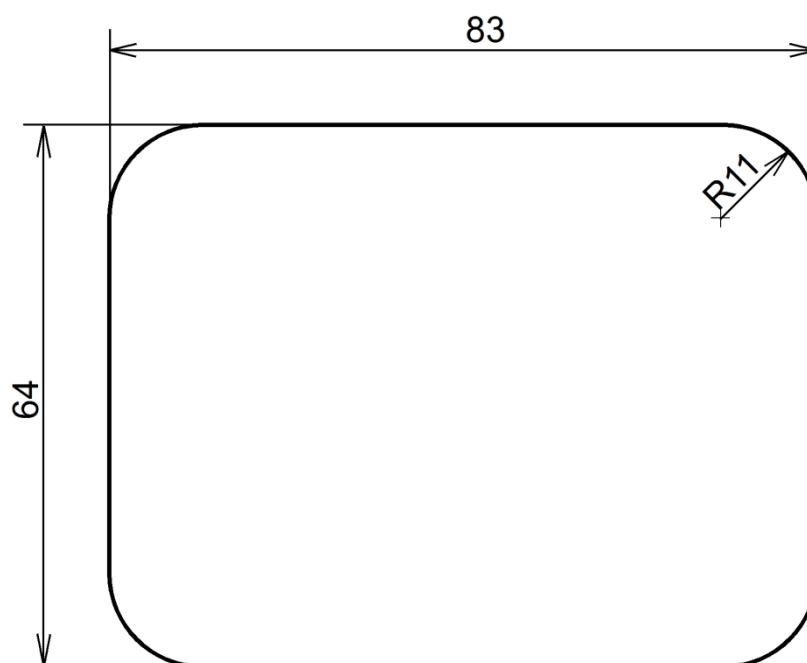
## Příloha č.5. Osazovací plán vrchní strany DPS



## Příloha č.6. Výkres krabičky



## Příloha č.7. Výkres čelního skla



## Příloha č.8. Nálepka na krabičku

