

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

**Detektor ionizujícího záření pro automatizovaný sběr
dat**

Květen 2015

**Diplomant:
Vedoucí práce:**

**Bc. Pavel Kovařík
Ing. Adam Bouřa, Ph.D.**

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci zpracoval sám s přispěním vedoucího práce a konzultanta a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé diplomové práce nebo její části se souhlasem katedry.

Datum: 11. 5. 2015

.....
Podpis diplomanta

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. KOVAŘÍK Pavel**
Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika
Název tématu: **Detektor ionizujícího záření pro automatizovaný sběr dat**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou ionizujícího záření a principy jejich detekce. Prostudujte metody komunikace senzorů s mikrokontroléry a s nadřazenou jednotkou.
2. Na základě získaných poznatků zvolte vhodnou metodu měření, která bude umožňovat programové nastavení parametrů a odeslání naměřených dat v digitální podobě.
3. Realizujte zařízení pro detekci ionizujícího záření s možností vzdáleného ovládní pomocí sběrnice.
4. Sestavte testovací pracoviště, proveďte měření a kriticky zhodnoťte dosažené parametry vašeho řešení. Na základě výsledků testování případně navrhněte další možná vylepšení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Gerndt, J.: Detektory ionizujícího záření. Vydavatelství ČVUT, Praha, 1996.
- [2] Vedral, J., Fischer, J.: Elektronické obvody pro měřicí techniku, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [3] Matoušek, D.: Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR AT mega 16, 4. díl, Praha 2006, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-174-8.
- [4] Mann, B.: C pro mikrokontroléry, 1. Vydání, Praha 2003, Nakladatelství BEN - technická literatura, ISBN 80-7300-077-6.

Vedoucí: **Ing. Adam Bouřa, Ph.D.**
Platnost zadání: 31. 8. 2016

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.

vedoucí katedry

děkan

V Praze dne 27. 1. 2015

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukcí měřícího přípravku pro měření přirozené radioaktivity při archeologických vykopávkách. Přípravek je rozdělen na dva samostatné moduly, z nichž jeden je vlastní detektor a druhý je emulátorem ovládání namísto řízení od robota, kde má být deska detektoru původně zabudována. Text také obsahuje nezbytnou teorii, kterou je nutné nastudovat, aby byl pochopen princip a cíle měření a také kvůli porozumění vlastní konstrukce. Tato práce má názorným způsobem představit základní problematiku radiačního měření.

Klíčová slova:

Ionizující záření, radioaktivita, poločas rozpadu, interakce, detekční trubice, geiger – müllerův čítač, zářič, mikropočítač, scintilátor, radiace, impuls, sběrnice, SPI, zdroj vysokého napětí, úprava impulsu, filtrace, četnost

Summary:

This thesis describes the design and construction of measurement for the measurement of natural radioactivity in an archaeological dig. The product is divided into two separate modules, one has its own detector and the second emulator is operating instead of the robot control, which should be originally built plate detector. The text also contains the necessary theory you need to learn to be understanding of the principles and objectives of the measure and also for understanding the structure. This work is a simple way to introduce basic problems of radiation measurements.

Index terms:

Ionizing radiation, radioactivity, half-life, interaction, detection tubes, Geiger - Muller counter, radiator, microcomputer, scintillator, radiation, pulse, bus, SPI, high voltage source, pulse treatment, filtration, rate

Seznam použitých zkratk:

1. **ACK** - Acknowledge; *potvrzovací bit*
2. **CCD** - Charged couple device; *nábojově vázaný senzor*
3. **CS** - Chip select, *aktivační vstup obvodu*
4. **Flash** - Energeticky nezávislá paměť; *zpravidla pro program*
5. **GND** - Ground; *společný zemnicí vodič*
6. **IC** - Integrated circuit, *integrováný obvod*
7. **ICSP** - In-Circuit Serial Programming; *programování v aplikaci*
8. **I²C** - Inter-Integrated Circuit; *sériová sběrnice I²C*
9. **IMP** - Impuls; *pojmenování vodiče*
10. **LED** - Light emitting diode; *svítivá dioda*
11. **MISO** - Master in, slave out; *vstupní datový vodič člena Master u SPI*
12. **MOSI** - Master out, slave in; *výstupní datový vodič člena Master u SPI*
13. **NMOS** - N-type metal-oxide-semiconductor; *polem řízený tranzistor s N vodivostí*
14. **PRE_IMP** - Neupravený impuls; *označení vodiče*
15. **ROM** - Read only memory; *paměť pouze pro čtení*
16. **SCK** - Serial clock; *označení vodiče*
17. **SCL** - Serial clock; *označení vodiče*
18. **SDA** - Serial data; *označení vodiče*
19. **SMD** - Surface mount device; *součástka pro povrchovou montáž*
20. **SP** - Speaker; *označení akustického indikátoru*
21. **SPI** - Serial Peripheral Interface; *sériová sběrnice SPI*
22. **SS** - Slave select; *aktivační vstup podřízeného obvodu*
23. **USB** - Universal serial bus; *univerzální sériová sběrnice*
24. **VN** - Vysokonapěťový; *označení zdroje*

Obsah

Obsah	1
Úvod	2
1 Problematika radioaktivního záření, principů detekce a komunikace senzorů	3
1.1 Ionizující záření	3
1.2 Radioaktivita	3
1.3 Typy radioaktivního rozpadu	4
1.3.1 Alfa záření	4
1.3.2 Beta záření	5
1.3.3 Gama záření	5
1.3.4 Rozpadový zákon	7
1.4 Princip detekce	9
1.5 Elektrické detektory	10
1.6 Scintilační detektory	25
1.7 Sběrnice I ² C	29
1.8 Sběrnice SPI	32
1.9 Sběrnice 1-wire	36
2 Metodika řešení a realizace	40
2.1 Výběr trubice	40
2.2 Vývoj dílčích části zapojení	42
3 Popis finální verze detektoru ionizujícího záření	47
3.1 Blokové schéma celého zařízení	47
3.2 Modul detektoru	48
3.2.1 Napájecí zdroj	48
3.2.2 Zdroj vysokého napětí	49
3.2.3 Obvody úpravy impulsů	52
3.2.4 Obvody řízení	54
3.3 Modul vyhodnocovací jednotky	58
3.4 Program modulu detektoru	60
3.5 Program vyhodnocovacího modulu	61
3.6 Konstrukce	63
4 Zkušební měření finálního zařízení	67
4.1 Měření pomocí radioaktivního zářiče	67
4.2 Měření dílčích části zapojení	69
4.3 Možné budoucí úpravy	73
5 Závěr	75
6 Použitá literatura a odkazy	77
7 Seznamy obrázků, tabulek a vztahů	79
8 Přílohy	81

Úvod

Práce se zabývá návrhem detektoru ionizujícího záření pro automatizovaný sběr dat. Samotný detektor s automatizovaným sběrem dat je zařízení, které může být umístěno například na měřicím ramenu automatizovaného robota, který zkoumá zbytkovou radiaci v různých usazených vrstvách zeminy. Tento robot může zkoumat vrstvy zeminy na stěně lomu. Robot by takto postupně mapoval ramenem celou výšku lomu. Měřicí rameno s popsaným detektorem zaznamenává zvýšenou radiaci, která je indikátorem toho, že se v daném místě může nacházet například nějaký fosilní pozůstatek. Toto zařízení je tak předurčeno k paleontologickým účelům.

Jelikož je modul detektoru ionizujícího záření ovládán skrze sběrnici přímo robotem, je v práci popsána také vyhodnocovací jednotka. Ta má za úkol nahradit rozhraní ze strany robota, který normálně tento modul ovládá. Vyhodnocovací jednotka tedy přímo komunikuje s detektorem a je také výstupem i vstupem informací ze strany uživatele. Jelikož jednotka není součástí detektoru, byla realizována zvlášť na vývojové desce. Vývojovou desku jsem zde použil z důvodu, protože vyhodnocovací jednotka slouží pouze k odzkoušení komunikace a testování detektoru. Pro účel pozdějšího začlenění do měřicího systému je definováno hardwarové a softwarové rozhraní pro vzdálenou obsluhu pro sběrnici.

Cílem této práce jsou tedy:

- Výběr vhodné detekční trubice (metody měření)
- Návrh vysokonapěťového napájecího zdroje pro trubici
- Návrh detektoru impulzů pocházejících z trubice
- Návrh vyhodnocovací jednotky s definovaným hardwarovým a softwarovým rozhraním pro vzdálenou obsluhu po sběrnici.

1 Problematika radioaktivního záření, principů detekce a komunikace senzorů

Kapitola popisuje základní teorii, kterou jsem nastudoval, abych porozuměl některým pojmům, nezbytným fyzikálním základům [1], funkci některých detektorů [2] a možnostem přenosu naměřených dat v rámci procesorového systému.

1.1 Ionizující záření

Ionizující záření je každé záření, které průchodem látkou dokáže zpolarizovat částice, ze kterých je látka složena. Dokáže tedy ovlivnit elektrickou neutralitu atomů látky a vytvořit tak kladné a záporné ionty (částice s nevyrovnaným počtem elektronů v obalu a protonů v jádře daného atomu). Ionizace látky se děje dvěma způsoby: **přímo** a **nepřímo**.

Přímá ionizace probíhá tak, že vlastní ionizační záření (tvořeno elektrony, či fotony) má dostatečnou energii k tomu, aby mohlo vyvolat **přímo** ionizaci atomu látky. **Nepřímá** ionizace probíhá interakcemi (srážkami) mezi atomy látkami, kdy jsou srážkami uvolňovány sekundární částice, které způsobují vlastní ionizaci. Srážky jsou vyvolány elektricky neutrálními částicemi (fotony, neutrony).

Zdrojem ionizujícího záření mohou být jednak některé nestabilní prvky (radionuklidy), které se časem rozpadají a generují tak vlastní záření. Radionuklidy jsou přírodního charakteru, nebo jsou vyrobeny uměle, většinou z důvodu vyšší efektivity, nebo z důvodu jistého požadavku na charakter generovaného ionizujícího záření. Druhým způsobem, jak takové záření vytvořit, je použití umělých generátorů, například urychlovačů částic, nebo Roentgenovy lampy.

1.2 Radioaktivita

Radioaktivitou se nazývá proces, kdy se rozpadá jádro atomu nestabilního prvku a tvoří se ionizujícího záření. Radioaktivní rozpad je způsoben tím, že ne každý počet protonů a neutronů v jádře je stabilní. Lehká jádra, která mají malý počet protonů v jádře (cca do 10 protonů), mají „vyrovnaný“ počet protonů a neutronů v jádře. To ale neznamená, že při počtu 10 protonů bude i 10 neutronů. „Vyrovnaný“ zde znamená, že počet neutronů bude

o něco vyšší. Nad počet 10 protonů/jádro se počet neutronů rapidně zvyšuje [1]. Zvýšením počtu neutronů se kompenzují odpudivé síly mezi protony, jelikož neutrony vytvářejí přitažlivou sílu a snaží se držet jádro pohromadě. Tento mechanismus kompenzování přitažlivých a odpudivých sil však funguje jen do určitého počtu protonů, kdy ještě přitažlivá síla neutronů „zvládá“ držet odpuzující se protony v jádře atomu. Hranicí stability tvoří dle literatury [1] izotop Bizmutu ${}_{83}^{209}\text{Bi}$, který se však již velmi pomalu samovolně rozpadá a generuje ionizující záření.

Radioaktivní rozpad lze také vyvolat uměle, kdy pomocí jaderné reakce změníme poměr počtu protonů a neutronů v jádře, což vede k porušení vyrovnaných přitažlivých sil neutronů a odpudivých sil mezi protony.

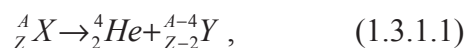
1.3 Typy radioaktivního rozpadu

Mezi nejdůležitější vlastnosti radioaktivního rozpadu dané látky patří:

- Změna chemické podstaty látky (dochází k transformaci prvku).
- Je zcela nezávislý na prostředí, nebo na vnějších podmínkách.
- Je vždy doprovázen emisí záření (alfa, beta, gama).

1.3.1 Alfa záření

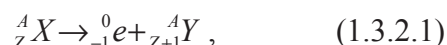
Je tvořeno jádrem hélia. Hmotnostní číslo **A** klesne o 4 a atomové číslo **Z** klesne o 2. Pokud máme tedy obecný prvek **X**, pak tedy je to matematicky vyjádřeno vztahem (1.3.1.1). Nový prvek **Y**, který vznikne rozpadem, bude o dvě místa vlevo, od prvku **X**.



Energie alfa záření je tím větší, čím rychleji se látka rozpadá. Alfa částice při ionizaci vyráží z atomů ionizované látky elektrony z elektronového obalu a tvoří tak kladné a záporné ionty. Částice alfa svou rychlost ztrácí velmi rychle a mají proto velmi malý dolet, což je dráha, kterou urazí, než svou rychlost ztratí (respektive svou energii odevzdají okolí).

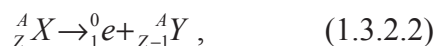
1.3.2 Beta záření

Ionizující záření je v β^- – rozpadu tvořeno elektronem. Protože se elektron nemůže uvolnit z rozpadu jádra (jelikož v jádře žádný elektron není), dojde k transformaci neutronu v jádře. Neutron se rozpadne na proton, elektron a antineutrino. Při tomto rozpadu se hmotnostní číslo A nezmění, atomové číslo Z vzroste o 1. Prvek Y , který vznikne rozpadem prvku X , najdeme v tabulce prvků vpravo, vedle prvku X (se tedy posune o jedno místo doprava). Opět lze matematicky vyjádřit vztahem (1.3.2.1).



Příklady β^- – rozpadu je například rozpad kobaltu, kdy je produktem nikl, nebo rozpad cesia, kdy se prvek transformuje na barium.

Existuje ještě jeden typ rozpadu beta, rozpad β^+ , kdy není generován elektron, ale jeho inverzní varianta – pozitron, neboli anti-elektron. Je naprosto stejný principem, jako β^- s tím rozdílem, že atomové číslo Z klesá. Tedy prvek se posunuje o jednu pozici doleva. Popsáno vztahem (1.3.2.2).



Tento typ rozpadu se v přírodě nevyskytuje a probíhá pouze u uměle vytvořených radionuklidů. Vzhledem k tomu, že toto záření je tvořeno (anti)elektrony, jsou částice velmi malé a lehké, proto dochází při průchodu hustou překážkou k minimálním ztrátám energie a jejich dráha tak skrze překážku může být dlouhá a chaotická. V řídkých materiálech prakticky tuto dráhu neovlivňuje chemické složení látky, jen její hustota. U rozpadu β^+ , pokud pozitron ztratí svou energii, spojí se s elektronem. Dojde k anihilaci obou částic, a vzniknou dva fotony záření gama.

1.3.3 Gama záření

Vzniká izomerním přechodem. Jádro atomu přechází z hladiny vysoké energie, do nízkenergetické hladiny a rozdíl energie je vyzářen v podobě γ – záření. Nedochozí ke změně hmotnostního, ani atomového čísla. Při tomto rozpadu může dojít ke dvou

variantám rozpadu. Produkt rozpadu je již stabilní a dál se nerozpadá (rozpad vlastního radioaktivního prvku), nebo produkt je stále radioaktivní a rozpad pokračuje dále (označuje se jako rozpadová řada prvků). Přírodně se vyskytují pouze 3 typy [1], které jsou schopny vyvolat rozpadovou řadu. Jde o prvky uranu $^{238}_{92}\text{U}$, aktinouranu $^{235}_{92}\text{U}$ a thoria $^{232}_{92}\text{Th}$. V každé řadě se dceřiný prvek rozpadá přes odlišné produkty na konečný stabilní prvek, který je všech případech olovo. Uměle se zatím (dle [1], str. 7) podařilo vytvořit rozpadovou řadu neptunia $^{237}_{93}\text{Np}$. Přírodní i uměle vytvořená rozpadová řada má hlavní společné vlastnosti, které ji charakterizují.

- Mateřské prvky (na začátku rozpadové řady) mají velmi dlouhý poločas rozpadu.
- Meziprodukty rozpadu jsou vždy izotopy těžkých prvků, kdy v polovině řady dojde i k rozpadu na plyn (většinou izotop radonu).
- Izotop plynu se rozpadá jak rozpadem α , tak i β^- (obvykle) s velmi krátkou dobou života.
- Rozpad řady je vždy ukončen stabilním prvkem. Většinou již zmíněným izotopem olova.

Co se týká rozpadu prvků, které se již při prvním rozpadu transformují na stabilní prvek (a nedochází tak k vytvoření rozpadové řady), tak mezi typické představitele patří izotopy stroncia, jódu, cesia a kobaltu. Obecně prvek, který je nestabilní, ale u kterého nedojde k rozpadové řadě, ale pouze k rozpadu, lze identifikovat tak, že má nestabilní poměr počtu protonů a neutronů ve svém atomovém jádře. Záření gama má obvykle velmi krátkou vlnovou délku a velmi ojediněle je vyzářeno zcela samostatně. Většinou jej doprovází výše zmíněné beta a alfa záření. Generované záření může mít pouze určité hladiny energií, které jsou charakteristické pro každou látku. Spektrum energií je tedy čárové a může nabývat jen určitých, konkrétních hodnot. Při průchodu látkou fotony beta záření svou energii předávají částicím hmoty, kterou procházejí. Částice jsou pak schopny ionizace a excitace. Jde tedy o nepřímo ionizující záření. Vyvolává tři interakce:

- **Fotoefekt** – foton svou energii (jednotky keV) odevzdá elektronu v obalu atomu dané látky. Je – li předaná energie větší, než výstupní energie daného elektronu, elektron se odpoutá z elektronového obalu. Prázdné místo po odpoutaném elektronu se obvykle zaplní elektronem z jiného vyššího orbitu, než ze kterého odpoutaný elektron vyletěl. Nástupní

elektron při změně orbity svou přebytečnou energii vyzáří v podobě fotonu. Záření je však pohlceno vlastní látkou, jelikož má vyzářený foton mizivou energii.

- **Comptonův rozptyl** – jde o srážku volného, nebo velmi slabě vázaného elektronu s fotonem. Princip je obdobný s fotoefektem s tím rozdílem, že fotoefektem označujeme kolizi fotonu s vázaným, nikoliv volným elektronem. Foton předá část energie elektronu, který změní svou dráhu. Foton pak po srážce pokračuje dále, odraženým směrem, se zmenšenou energií (neboli s vyšší vlnovou délkou).
- **Tvorba párů elektron-pozitron** – Tato interakce vzniká, pokud má foton velmi vysokou hladinu energie ($> 1,02$ MeV). Pak je při interakci s částicí látky zcela pohlcen v obalu jádra a dojde k vyzáření páru elektron-pozitron. Rozdíl energie mezi pohlceným fotonem a generovaným párem je vyjádřen kinetickou energií páru.

1.3.4 Rozpadový zákon

Rozpadový zákon popisuje jev, kdy v radionuklidu postupem času ubývá počet radioaktivních jader, které se rozpadají. Rozpadový zákon je popsán matematickým vztahem (1.3.4.1) a má exponenciální charakter. Mezi časem a počtem rozpadlých jader je přímá úměra.

$$n = n_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1.3.4.1)$$

Kde:

n_0počet atomů na začátku rozpadu ($t = 0$)

npočet atomů (zbývajících, nerozpadlých), v čase t

λpřeměnová konstanta (charakterizuje danou látkou)

Ze vztahu (1.3.4.1) můžeme vyjádřit zpětně přeměnovou konstantu λ , která charakterizuje rychlost rozpadu daného radionuklidu, konkrétně je to počet rozpadnutých atomů za sekundu. Matematicky je přeměnová konstanta λ vyjádřena vztahem (1.3.4.2). Jednotka je s^{-1} .

$$\lambda = -\frac{dn}{n_0 dt}, \quad (1.3.4.2)$$

Kde:

dnpočet rozpadlých částic

dtčasový interval kdy došlo k rozpadu částic v počtu dn

V praxi se ovšem setkáváme s odlišnou interpretací rozpadového zákona, ačkoliv v principu jde o tentýž mechanismus. Většinou se tato interpretace označuje jako poločas přeměny. Ta popisuje dobu, za kterou se rozpadne polovina množství dané látky. Poločas přeměny T dá se charakterizovat pomocí přeměnové konstanty, popsáno vztahem (1.3.4.3).

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}, \quad (1.3.4.3)$$

Poločas přeměny se v závislosti na prvku pohybuje od zlomků sekundy až po stovky miliónů let. Čím větší poločas rozpadu, tím déle trvá, než se daná polovina látky rozpadne. Dalším charakterizačním parametrem radionuklidu je jeho aktivita A . Matematicky je jeho závislost na přeměnové konstantě λ popsána vztahem (1.3.4.4).

$$A = -\frac{dn}{dt} = \lambda n, \quad (1.3.4.4)$$

Jednotkou aktivity A je Becquerel (Bq), která má rozměr s^{-1} . Aktivita A s časem exponenciálně klesá, dle vztahu (1.3.4.5).

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T} t}, \quad (1.3.4.5)$$

Kde:

A_0Počáteční aktivita látky v $t = 0$, (Bq)

A_tAktivita radionuklidu v čase t , (Bq)

TPoločas přeměny (s)

Aktivita radioaktivní látky závisí přímo úměrně na její hmotnosti, kdy počet atomů látky nahradíme její hmotností (vztah (1.3.4.6)):

$$A = \lambda n = \lambda \frac{m}{M} N, \quad (1.3.4.6)$$

Kde:

m.....hmotnost látky

M.....molární hmotnost látky

N.....Avogadrovo číslo ($6,023 \cdot 10^{26} \cdot \text{kilomol}^{-1}$)

1.4 Princip detekce

Metody měření a princip detekce je založen na vlastnostech ionizujícího záření a jeho interakcích s částicemi záření vystavených látek. Základní schéma detektoru je zobrazeno na obr. 1.4.1.



Obr. 1.4.1 – Základní schéma detekčního zařízení

V detekční části, která detekuje vlastní částice záření, dochází k předávání energie z ionizovaných částic do snímací struktury detektoru, která na to reaguje vytvořením slabého elektrického signálu. Ten je upraven (analogově zesílen, popřípadě frekvenčně upraven - filtrován) a následně je zpracován a jeho číslíková podoba může být uložena pro pozdější matematické zpracování, nebo zobrazení. Obecně jsou dva principy činnosti této aparatury. Buď aparatura počítá jednotlivé impulsy (využitý případ v praktické části práce) a tedy počítá jednotlivé zachycené částice, nebo měří střední hodnotu proudu, který teče vlastním detektorem. Tato obecná zařízení může sloužit k různým účelům, podle toho, co chceme měřit. Může to být:

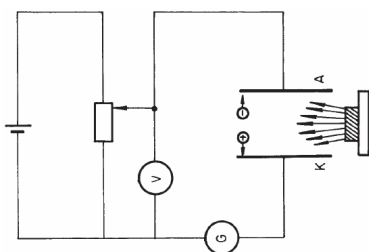
- Stanovení úrovně aktivity (Radiometrie)
- Měření energie ionizujícího záření (Spektrometrie)
- Měření vlastností materiálů pro průmyslové účely (Měřicí aparatura má i zdroj záření a můžeme pozorovat a měřit například stínící účinnost materiálu v radiacní ochraně).

Vlastní detekční struktura má obecné dva principy, na kterých pracuje. První je kontinuální, který podává informaci o okamžité hodnotě veličiny, kterou právě měří. Integrální detektor poskytuje přírůstek veličiny za jednotku času, což je vhodné pro měření dávky, nebo doby expozice. Integrální detektor má paměťovou vlastnost, po skončení ozařování si trvale pamatuje poslední hodnotu ozáření. Používají se v tzv. osobní dozimetrii, kdy pracovníci, kteří přicházejí do styku s radioaktivními látkami nosí speciální kartu, která při příliš velké dávce zčerná. Dává tak vědět, že dotyčný člověk již překročil bezpečnou denní dávku a musí opustit pracoviště. Podle principů detekce rozeznáváme tři hlavní principy detekce:

- **Elektrické detektory** – působením záření se mění elektrické vlastnosti (rezistivita, vodivost) snímací struktury. Patří sem ionizační komory, Geiger – Müllerovy a proporcionální počítače, polovodičové a krystalové struktury detektorů.
- **Scintilační detektory** – působením ionizujícího záření vzniká záření luminiscenční (světlo). Záblesky jsou posléze zachyceny (fotodiody, fotonásobič) a signály ze světelných senzorů jsou dále zpracovány.
- **Samostatné detektory** – nepotřebují žádné mezi úpravy detekce a zobrazují přímo. Jsou založeny na chemické bázi, na látkách, které působením záření mění své fyzikální vlastnosti (objem, barva, složení). Jsou výhradně integrální a patří sem například výše zmíněné prvky v osobní dozimetrii (karty, přívěšky).

1.5 Elektrické detektory

Jsou založeny na deskových, či válcových kondenzátorech koaxiálního uspořádání. Mezi elektrodami kondenzátorů začne procházet elektrický proud, v případě, že se mezi deskami nachází zdroj ionizujícího záření. Schéma základního zapojení elektrického detektoru je na obr. 1.5.1. Průchod proudu je zde měřen galvanometrem **G**. Kontrola deskového napětí, je prováděna voltmetrem **V** a nastavuje se potenciometrem.

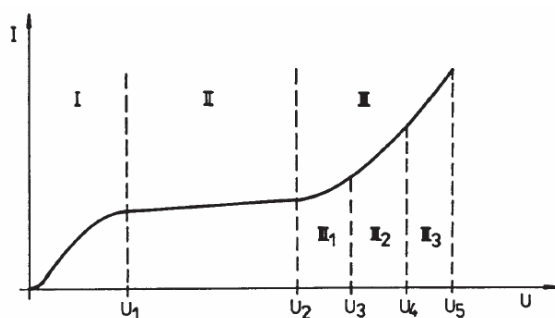


Obr. 1.5.1 – Základní zapojení elektrického detektoru [1]

Mohou nastat 3 případy, díky kterým může skrze detektor (tvořený kondenzátorem) protékat měřitelný proud:

- **Ionizace** – ionty, generované zdrojem záření se pohybují k deskám kondenzátoru, které mají opačný náboj, než samy ionty. Jelikož dochází ke změně přenášeného náboje za jednotku času, pohyb iontů můžeme brát jako elektrický proud.
- **Rekombinace** – sloučením dvou opačně nábojově orientovaných iontů vznikne neutrální atom. Čím se ionty rychleji pohybují (dáno velikostí intenzity el. pole, tedy napětím na kondenzátoru), tím je méně pravděpodobné, že se opačně nabitě ionty srazí.
- **Sekundární ionizace** – ionty s vysokou rychlostí (a tedy i energií) mohou vytvářet další ionty.

Ionizační proud, který teče skrze desky kondenzátoru, je závislý na přiloženém napětí, dle obr. 1.5.2.



Obr. 1.5.2 – Závislost ionizačního proudu na napětí mezi deskami [1]

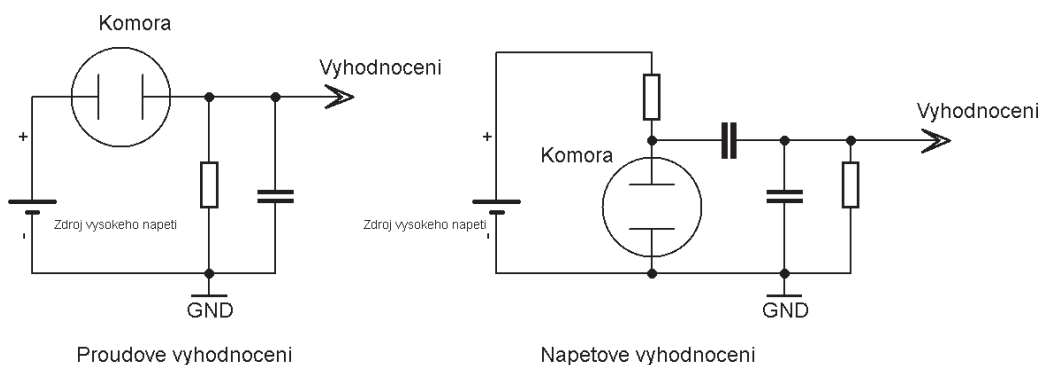
Charakteristika na obr. 1.5.2 se dělí do několika oborů:

- **Obor Ohmova zákona (I)** – Zde ionizační proud roste s napětím, protože při vyšším napětí se ionty pohybují rychleji a klesá pravděpodobnost rekombinace iontů. V praxi se nepoužívá.
- **Obor nasyceného proudu (II)** – Ionty se pohybují již tak rychle, že nedochází k rekombinaci (všechny pohybující ionty se tedy podílí na přepravě elektrického náboje, jsou tedy všechny považovány za proud). Zde již není proud závislý na napětí (změna rychlosti již možnost rekombinace neovlivní). Tento obor se používá pro ionizační komory.

- **Obor přídavné ionizace (III)** – Energie a rychlost iontů jsou tak velké, že jsou schopny při srážce s neutrální částicí vytvořit další ionty. Každý iont dokáže generovat určitý počet dalších iontů. Generovaný počet je dán koeficientem plynového zesílení (**K**). Obor přídavné ionizace se ještě dělí na:
 - Obor úplné proporcionality (III₁); proporcionální počítače
 - Obor částečné proporcionality (III₂); nevyužíván
 - Geiger – Müllerův obor (III₃); Geiger – Müllerovy počítače

1.5.1 Ionizační komory

Je tvořena kondenzátorem s deskovými, nebo válcovými elektrodami. Dielektrikum tvoří většinou vzduch. Napětí mezi deskami je 150 – 200 V (obor nasyceného proudu). Ionty detekovaného záření buď putují k opačně nabitým deskám, což vyvolá impuls ionizačního proudu (komory s konstantní ionizací), nebo pulsem napěťovým (impulsní ionizační komory). Proudové vyhodnocení je integrální [2], neměří tedy jednotlivé interakce, ale přírůstek (konkrétně střední hodnotu přírůstku). Vyhodnocení proudového režimu je analogové a tudíž náročnější na realizaci (kvůli velmi malým měřeným proudům). Impulsní vyhodnocení (napěťové) je o něco jednodušší. Počet napěťových pulzů je dán počtem srážek (interakcí) a velikost pulsu popisuje energii částice. Není zde nutno řešit kvalitní izolaci přívodů, kvůli parazitním proudům (ochranné prstence), ani jejich kompenzaci, jak je tomu v případě proudového měření. V obou případech je velmi důležitá rychlost odezvy komory (reakce na skokový signál), což ve většině případů ovlivňují parazitní kapacity a svody mezi deskami, přívody a okolním světem (zemí). Ionizační komory jsou používány v těžkých podmínkách, kde nelze použít ostatní detektory (vibrace, vysoké teploty). Zapojení je na obr. 1.5.1.1.



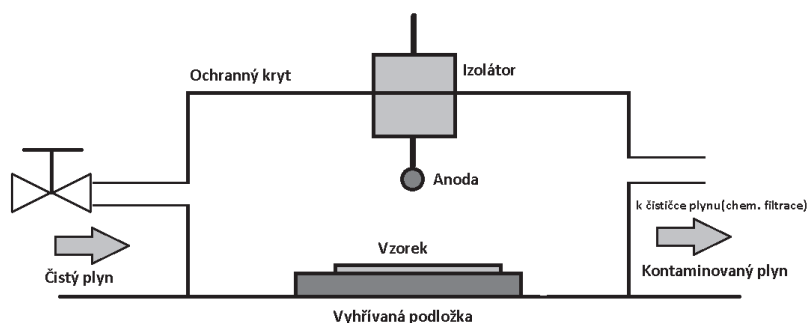
Obr. 1.5.1.1 – Dva druhy zapojení ionizační komory

V praxi se často stává, že pulzy z komory registrujeme i tehdy, kdy komora není vystavena zářiči. Registrovaný proud (nebo impulzy napětí) je projevem nedokonalostí konstrukce ionizační komory a bývá způsobován špatným stíněním, kosmickým zářením, příměsemi v pracovního plynu, popřípadě zbytkovou radiací po předchozím měření, kdy částice měřeného materiálu ulpěly například na stěnách komory. Tento jev se většinou nazývá pozadím (zde pozadí ionizační komory), jelikož nevzniká jen u ionizačních komor, ale projevuje se u všech detektorů, je nutno s tímto jevem počítat.

1.5.2 Proporcionální počítače

Pracují výhradně v napěťovém (impulsním) režimu. Využívá plynného zesílení K , se částice vlivem vnějšího el. pole pohybují tak rychle, že z původních elektricky neutrálních atomů plynu v trubici se vytváří další ionty (případně elektrony). Nově vytvořené elektrony (či ionty) jsou také vnějším elektrickým polem urychlovány a dosáhne-li jejich rychlost (a tedy i energie) určité velikosti jsou také schopny ionizovat další elektricky neutrální atomy, stejně jako původní částice, způsobující jejich vlastní ionizaci. Potřebná energie musí být větší, než ionizační energie neutrálního atomu plynu. Tak se podíl rychlých částic, schopných ionizace lavinovitě zvyšuje (tzv. Townsendova lavina [2]). Koeficient K (jednotka $V \cdot cm^{-1} \cdot atm$) se velmi liší od složení plynu a také jeho tlaku. Pohybuje v řádech desetitisíců pro směsi „obyčejných“ plynů (metan), po statisíce v směsích vzácných plynů (Helium). U těchto počítačů je třeba velmi stabilního napěťového zdroje, který vytváří el. pole v trubici. Jelikož je plynové zesílení K na tomto napětí velmi závislé, vlivem jeho kolísání by se koeficient K během měření měnil. Na rozdíl od ionizačních komor, kde je plnicím plynem většinou vzduch, zde se naopak používají plyny jako metan, propan, isobutan, argon, nebo helium (popřípadě jejich kombinace). Vzduch lze použít pro případ, kdy budou obě desky velmi blízko sebe, ale vzhledem k horším parametrům se toto řešení nepoužívá. U proporcionálních nám změna charakteru plynu značně ovlivňuje plynové zesílení K , což se projeví změnou amplitudy pulzů, nebo jejich deformací. Tento fakt se navíc zhoršuje se stoupajícím počtem detekovaných částic ionizujícího záření. Proto se u těchto detektorů nastavuje velikost napájení detektoru tak, aby rychlosti částic, vyvolávajících další ionizace v plynu byla co nejmenší (avšak stále schopná dostatečně elektrony urychlovat, aby se proces lavinové ionizace nezastavil). Jinak řečeno, snažíme se nastavit co nejmenší napětí (a tím co nejmenší plynové zesílení K), aby interakce zachycených částic ionizujícího záření byly zpracovávány obvody počítače ještě detekovatelné. Nedodržením tohoto doporučení dojde

ke ztrátě pulsů a vyřazení detektoru z činnosti, popřípadě ke ztrátě, či zhoršení rozlišovacích schopností. Obrázek takové aparatury je na obr. 1.5.2.1. Katodu tvoří vyhřívaná podložka a je vodivě spojena s krytem, který brání vniku cizích plynů a navíc tvoří stínění. Anoda musí být proto velmi dobře elektricky izolována, důraz je kladen na co nejmenší svody a parazitní kapacity. Výhodou je fakt, že mezi vzorkem a anodou není žádný materiál, nebo jiný konstrukční prvek, který by pohlcovал měřené částice ionizujícího záření. Proto se tento detektor používá pro slabé interakce alfa [2] záření. Jiné detektory, které mají různá okénka (pro oddělení vzorku od pracovního plynu, nebo celého detektoru od vzorku), by nešly vůbec použít. Oddělovací okénka a jiné přepážky by jádra hélia pohltily a detektor by nic nezaznamenal.



Obr. 1.5.2.1 – Uspořádání proporcionálního detektoru (překresleno dle [2])

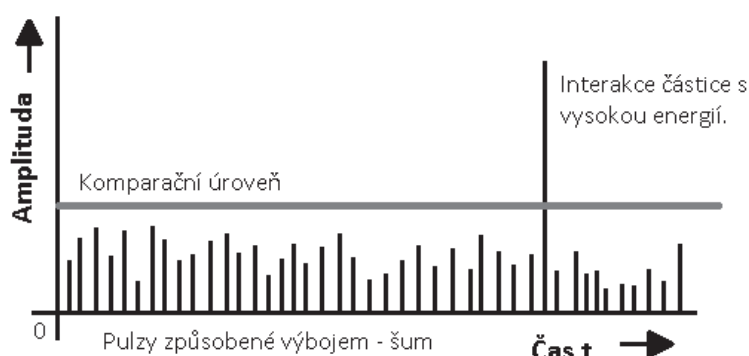
1.5.3 Korónové detektory

Svou funkcí jsou obdobné počítačům s předchozí kapitoly a navazují na Geigerovu oblast od U_5 (obr. 1.5.2). Jejich výboj je samostatný, trvalý a vzniká vlivem asymetrického rozložení elektrického pole v detektoru a určitého tlaku plynové náplně (100 – 1000 Pa). Asymetrického rozložení intenzity el. pole je dosaženo vhodnou geometrickou topologií elektrod (hrot nad rovinou, či koaxiální uspořádání, které je nejčastější). Podobně, jako u Geiger – Mülleroва počítače, je trubice tvořena tenkou anodou (pokud se bavíme o koaxiálním uspořádání), připojenou přes rezistor k vysokému napětí. Plášť opět tvoří katodu a je připojen k zemi, zároveň slouží jako stínění. Plynovou náplň tvoří vzácné plyny s absencí zhášecích přísad. Napájecí napětí musí být tak vysoké, aby elektrony z interakcí byly schopny vyvolat lavinovou ionizaci. Mezní velikost napětí je právě velikost U_5 , kdy výboj sice vzniká, ale je nestabilní, proto skutečně použitelné napětí musí být o něco málo vyšší. Stabilní výboj má dvě oblasti, **vnitřní** a **vnější**. **Vnitřní** část způsobuje plynové zesílení a je umístěná okolo anody a vlivem excitace atomů světélkuje. **Vnější** oblast je

díky menší hodnotě intenzity elektrického pole nemožné splnit Townsendova podmínku. Proto zde k ionizačním lavinám a excitaci nedochází. Jsou zde jen kladné ionty a díky absenci excitace nemůžeme pozorovat ani záření. Při dalším zvýšení anodového napětí dojde k protáhnutí vnitřní oblasti výboje ke katodě. Proud tekoucí trubicí při výboji je v podstatě nulový. Anodové napětí by se nemělo příliš zvyšovat nad mez, kdy je výboj stabilní. Přílišné zvýšení anodového napětí jednak vede k vyššímu protékajícímu proudu a navíc může vzniknout doutnavý výboj. Ten jednak může poškodit vlastní strukturu trubice a jednak i při nedestruktivním účinku vyřazuje trubicí z činnosti, protože v tomto režimu má trubice záporný diferenciální odpor (dle vztahu 1.5.3.1).

$$\frac{dU}{dI} < 0, \quad (1.5.3.1)$$

Trubice v tomto stavu není schopna detekovat interakce. Vzhledem k vysokému počtu lavin, které jsou spuštěny samotným výbojem, se lavina vyvolaná elektronem, který pochází od interakce nijak neprojeví a nejde ji ani zjistit. To je z důvodu toho, že pulzy jsou stejné a nezáleží, co lavinu vyvolalo, jestli vnější interakce, nebo lavina vytvořená **vnitřní** oblastí výboje. Impulzy tvořené výbojem jsou proto brány jako šum a mohou být registrovány pouze interakce velmi rychlých částic, které vytvoří dost svých lavin. To se projeví vysokým impulsem, který je zaregistrovatelný nad „trávou“ nízkých impulsů, způsobených výbojem (šumem). Graficky je situace znázorněna na obr. 1.5.3.1.



Obr. 1.5.3.1 – Odezva korónového detektoru

Tyto detektory se tak hodí pouze pro velmi silné interakce. Komparační úroveň (jinak zvaná diskriminační hladina) musí být nastavena tak, aby ji nepřesáhly ani nejsilnější

impulzy ze šumu. Zároveň musí být nastavena co nejnižší. Zápalné napětí je kolem 500 – 800 V a trubice jsou plněny vzácnými plyny; nejčastěji argonem. Amplituda výstupních pulzů je ovlivněna příměsími v plynu a také napětí a proudem, který udržuje korónový výboj. Tyto typy se používají zejména v reaktorech, nejsou citlivé na světelné záření. Korónový detektor má omezenou životnost, sice u něj časem nedegraduje plynová náplň a ani jeho životnost nedegradují samotné interakce, ale s postupem času začne ztrácet schopnost udržet vlastní výboj. Proto na rozdíl od samozhášecích Geiger-Müllerových počítaců, kde je životnost udána v počtu interakcí, zde je životnost udávána v hodinách (řádově 10^3 h).

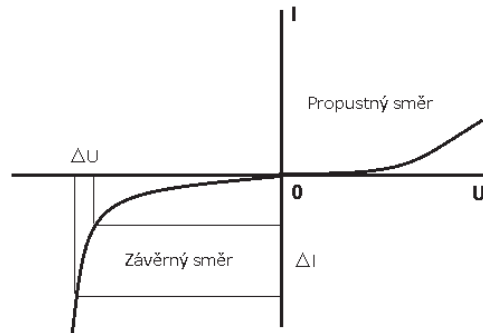
1.5.4 Polovodičové detektory

Vzhledem k tomu, že nízká hustota plynů výše uvedených typů detektorů má slabé brzdící schopnosti a tím malou pravděpodobnost interakce mezi ionizujícím zářením a molekulou plynu, byly hledány látky v pevném skupenství, které mají vyšší hustotu pracovního média, jelikož s vyšší hustotou roste pravděpodobnost srážky (interakce) a tím také jsme schopni zaregistrovat vyšší počet interakcí. Prvními detektory s pevnou látkou místo pracovního plynu jsou scintilační detektory, kterým bude věnována samostatná kapitola. Ty se ovšem vyznačují špatnou účinností, vzhledem ke složité konverzi zjištěné energie na výstupní signál, kdy je velká část energie „vyplývána“ (přeměněna na neúčinnou veličinu) při transformacích mezi různými veličinami. Teprve s rozvojem polovodičových součástek v druhé polovině 20. století, přišly na řadu polovodičové detektory radiačního záření. Perspektivním prvkem se ukázalo germanium (Ge). Ovšem výroba detektorů byla složitá, drahá a nerentabilní. S postupem času se však technologie zlepšila a bylo možné táhnout monokrystaly Germania pro výrobu detektorů se stále nižší koncentrací příměsí.

Schopnost zachycení interakce (dle její energie), které jsou tyto polovodičové detektory schopny zaznamenat, je dána zakázaným pásem. Pokud je energie (rychlost) částice dostatečná (alespoň stejná jako energie zakázaného pásu), vyvolá interakce tvorbu páru elektron – díra, případný nadbytek energie se vyzáří v podobě fotonu. Vzhledem k tomu, že energie zakázaného pásu je velmi malá (u Si a Ge to jsou jednotky eV, konkrétně cca 3 eV), dokáže tento detektor zachytit i velmi slabé interakce. Teoreticky jsou tedy schopny zachytit v případě Si a Ge interakci částic s energií alespoň 3 eV, což je naprosto neporovnatelné s elektrickými plynovými detektory, kde je potřeba energie až 10x vyšší

(30 eV). Navíc, energie potřebná pro generaci páru závisí jen na teplotě a materiálu, na rozdíl od plynových detektorů nám odpadají starosti se složením plynu a jeho tlakem. I zde je třeba vnější elektrické pole, které zabrání zpětné rekombinaci páru. Intenzita elektrického pole je v polovodičových detektorech volena tak, aby rychlost nosičů náboje byla satureovaná (co nejvyšší), jelikož v tomto stavu je prakticky nezávislá na teplotě. Díky dosažené rychlosti mají polovodičové detektory prakticky nejrychlejší odezvu ze všech uvedených druhů detektorů.

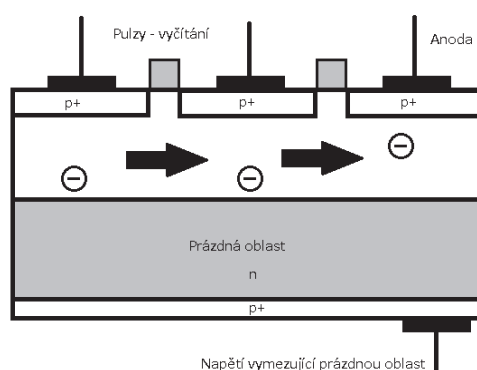
Činnost a vlastnosti polovodičových detektorů jsou dány fyzikálními vlastnostmi polovodičů, z nichž je detektor vyroben, mezi něž patří intrinsický, neboli vlastní polovodič. Ten neobsahuje příměsi a v krystalové mříži najdeme v uzlových bodech jen atomy jednoho prvku. Pokud bude mít krystal nenulovou teplotu, část tepelné energie využijí elektrony z posledního valenčního pásu, aby překonaly zakázaný pást a dostal se do pásu vodivostního. Na jeho místě zůstane prázdné místo (díra). Teplem tak vlastně generujeme pár elektron – díra. Je – li krystal připojen k napěťovému zdroji, vlivem elektrického pole se začnou páry elektron-díra pohybovat; vzniká tak elektrický proud, který protéká krystalem. Velikost protékajícího proudu závisí na teplotě, proto se v aplikačních situacích tyto čisté detekční struktury chladí tekutým dusíkem (zejména u germania). Chlazením se jednak snižuje protékající proud a jednak se zlepšují šumové vlastnosti. V pokojových teplotách by šum byl natolik velký, že rekonstrukce signálu by byla krajně problematická. Vlastní funkce polovodičového detektoru připomíná obyčejnou diodu, kdy se používá v závěrném směru. S tím souvisí nutnost počítat s kapacitou přechodu, která se tvoří ve vyprázdněné oblasti přechodu. Ke snížení kapacity (a tím zlepšení dynamických vlastností) se dělá detektor co nejtlustší (se vzdáleností obou elektrod s nahromaděným nábojem kapacita klesá) a dále se snažíme o co nejvyšší provozní napětí, čímž dosáhneme širší vyprázdněné oblasti a dalšího snížení kapacity. Musíme mít však na paměti, že překročení kritické intenzity elektrického pole, dojde k napěťovému průrazu (obr. 1.5.4.1) a ke zničení struktury detektoru. Toto napětí se liší díky technologickému provedení a dosahuje značného rozptylu. Většinou se nelze spoléhat jen na hodnotu udávanou výrobcem, ale je třeba si experimentálně změřit $V - A$ charakteristiku daného kusu samostatně.



Obr. 1.5.4.1 – Průraz polovodiče v závěrném směru

Nepředvídatelnost průrazného napětí je většinou ovlivněna poruchami krystalické mřížky a to je důvod, proč s určením průrazného napětí má potíže i výrobce. Jejich předpověď a dopad nelze nijak charakterizovat, proto je každý vyrobený kus do jisté míry originálem. Proto je použití těchto detektorů ztíženo nejen požadavky k jejich funkci (chlazení dusíkem), ale i jejich cenou. Ta se odvíjí od jejich tloušťky (čím tlustější, tím lepší jsou dynamické parametry, menší kapacita a možnost registrace i lehkých fotonů) a průrazného (resp. pracovního) napětí. Čím vyšší pracovní napětí, tím opět lepší dynamické vlastnosti. Ovšem tyto vlastnosti jsou vykoupeny náročnější výrobou a čistějšími materiály, protože každá porucha krystalové mřížky způsobená nečistotami, způsobí větší rozptyl již tak vysokého pracovního napětí polovodičového detektoru. Proto se obvykle dává přednost detektorům vyrobených na bázi křemíku, jednak kvůli levnějšímu materiálu a jednak nepotřebují nákladné chlazení, jako germaniové detektory a pracují spolehlivě i při pokojové teplotě. U křemíkového detektoru, je k detekci využíván buď obyčejný křemíkový PN přechod, nebo přechod polovodič – kov (Schottkyho přechod). Obyčejný polovodičový přechod již není zpravidla využíván a byl nahrazen iontovou implantací, která poskytuje větší výtěžnost výroby a menší rozptyl parametrů. U přechodu s kontaktem kov – polovodič se obvykle používá jako substrát polovodič typu n, na který je nanášena vrstva polovodiče typu p a na tento „sandwich“ je opatřený napařenou tenkou vrstvou zlata, nebo vzácněji hliníku. Vrstva kovu zároveň slouží jako okénko detektoru a jako ochrana před vlivy vnějšího světa. Detektor je zapouzdřen v uzavřené kovové trubce, spojené se zemí (a je tedy uzemněno i okénko – kovová vrstva). Anoda je na straně polovodiče. Většinou ji tvoří hliníkový pásek, nalisovaný přímo na polovodič, nebo pájený kontakt na předem připravenou, napařenou plošku z hliníku. Tato technologie poskytuje dobrou stabilitu parametrů a rovněž rozptyl parametrů každého kusu

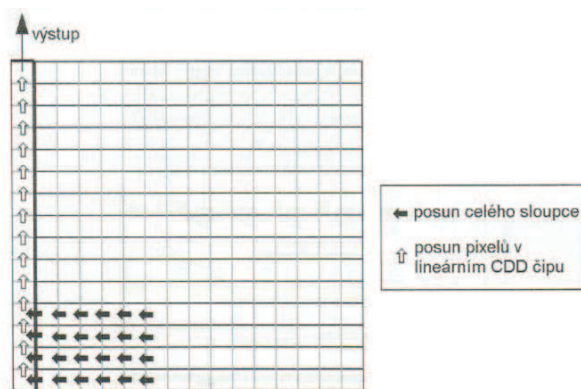
je malý i ve velkých sériích. Problémem je fakt, že okénko, tedy kovová vrstva, je vystavena okolnímu světu a je tedy náchylná na mechanické poškození, například poškrábání, které je neopravitelné a vede ke zničení detektoru. Dále jsou tyto detektory citlivé na světlo a musí pracovat v tmavém prostředí (což řeší trubka, ve které je detektor umístěn). Dalším problémem je těsnost ochranné trubice. Ta musí být provedena precizně, jinak hrozí, že některé plyny, které vniknou do trubice netěsností v jejím těle, mohou vdifundovat do polovodiče a změnit jeho vlastnosti. Proto tyto detektory většinou, ačkoliv jsou umístěny v ochranné trubici, pracují ve vakuu, kdy musíme dát pozor, aby vývěva sama vakuum neznečistila například parami olejů, které do vedení proniknou z pístového mechanismu vývěvy. Proto se mechanické ani rtuťové vývěvy pro tyto detektory nepoužívají. Vlastnost, pro kterou jsou ceněny, je rychlá reakce na interakce. Tvar, ani doba impulzu není závislý na interakci a je zpravidla ovlivněn jen nábojovým zesilovačem, který impulz bezprostředně z detektoru zpracovává. Stejně jako u germaniových detektorů, lze nežádoucí šum snížit jejich chlazením, ovšem chlazení nemá zlepšující vliv na detekční vlastnosti. V současné době jsou velmi rozšířeny nábojově vázané detektory s **CCD** (*Charged Coupled Devices*), které jsou spíše známy jako snímací prvky kamer, nebo fotoaparátů, nahrazující fotocitlivé, chemické filmy. Vzhledem k tomu, že detekují částice (fotony) běžného světla, jejich princip je neomezuje jen na spektrum viditelného záření. Jsou schopny zaregistrovat částice vzniklé interakcemi jaderného záření.



Obr. 1.5.4.2 – Struktura CCD detektoru (překresleno z [2])

Na obr. 1.5.4.2. je vidět struktura tohoto polovodičového detektoru (respektive jen pár buněk, které pak tvoří celý snímač). Detektor se principem neliší od toho, který najdeme jako snímací prvek kamery, nebo fotoaparátu. Princip je poměrně jednoduchý. Nejprve se celá oblast detektoru vyprázdní, všechny volné, zbylé, nebo tepelně excitované elektrony

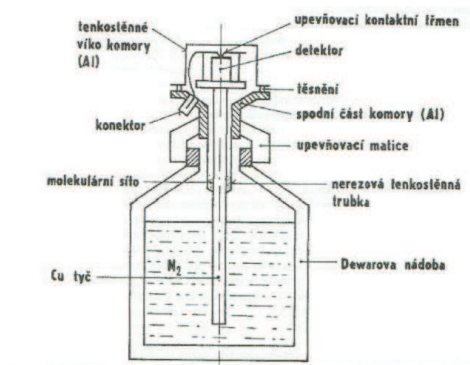
jsou odsáty, aby v aktivní oblasti bylo prázdné a elektrony se tvořily až vlastním ozářením. V další fázi, kdy je čip ozářen, se ve vyprázdněné oblasti tvoří elektrony, které se zachytávají pod vyčítacími elektrodami, v potenciálových jámách. Následně, až jsou všechny jámy zaplněny, se elektrony pomocí elektrod posouvají směrem k anodě, kde jsou vyčítány. Posun je ovlivněn signály, které jsou v přesném časovém okamžiku připojovány k vyčítacím elektrodám. Počet elektronů, zachycených v jámě pod elektrodou je úměrné ozáření dané oblasti, kdy každá elektroda, je brána jako jedna oblast – pixel. Pixely se vyčítají postupně, po řádcích. Skupiny jednotlivých buněk jsou sdružovány do matic, tvoří pak plošné detektory. Nejprve se čtou řádky (zpravidla zleva), sloupce se pak posouvají buď do pomocných buněk nebo jsou transportovány přímo do čtených řádků, kde jsou čteny rovněž jako řádky. Z toho vyplývá, že vyčítání plošného detektoru může trvat i několik vteřin. Doba čtení jednoho řádku je zhruba 10 μ s. I přes problémy, jako je možné ovlivňování mezi jednotlivými pixely, přeslechy signálů a problému (který jde do jisté míry ovlivnit vyhodnocovacím algoritmem, či zvýšenou rychlostí vyčítání), kdy zachycená interakce může být vyhodnocena dvěma pixely najednou, jde v současné době o velmi používaný typ detektoru.



Obr. 1.5.4.3 – Princip vyčítání CCD [2]

Na obr. 1.5.4.3. je ještě jednou zobrazeno vyčítání čipu CCD. Nejvíce používaná topologie je, že vlastní pixely tvoří řádek, neboli lineární čip (na obrázku je to sloupec, situace je o 90° otočena) a tyto početně znásobené řádky pak tvoří celou matici. Řádky (na obrázku tedy sloupce) si postupně předávají svůj obsah až k tomu krajnímu, který je připojen k anodě a vyčítán. Pro chlazení polovodičových detektorů, které to vyžadují, se obecně používají kryostaty. Speciální chladicí nádoby, ve kterých je detektor umístěn.

Detektor navíc chrání před kontaminací cizími látkami z okolního prostředí. Detektor své teplo předává měděné trubce a ta ho předává tekutému dusíku, umístěném v Dewarově nádobě. Řez příkladem kryostatu je na obr. 1.5.4.4.

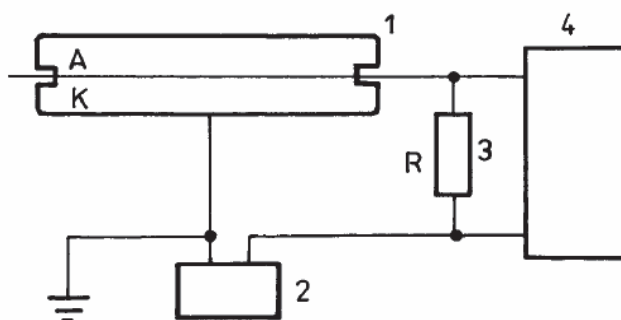


Obr 1.5.4.4 – Kryostat, pro chlazení polovodičových detektorů [2]

Jelikož jsou kryostaty finančně nákladné a vyžadují pravidelnou údržbu, někdy se nahrazují buď mechanickým chlazením. Mechanickým chlazením však nikdy nedosáhneme tak nízké teploty, jako s kapalným dusíkem a hodí se proto jen pro nenáročné aplikace. Navíc vibrace kompresoru škodí detektorům a na kompresory je nutno montovat silentbloky, a jejich přívody místo trubic připojovat hadicemi, což brání šíření otřesů skrze trubkový rozvod. Proto se v praxi spíše používá chlazení pomocí Peltierova článku, který je tichý, levný, nehlučí a netrpí vibracemi. Jednu nevýhodu však má, stejně jako kompresorové chlazení je totiž závislý na síti a na jejím výpadku. Je proto nutno, v případě výpadku zajistit náhradní přívod energie. V současné době se používá k chlazení kombinace jak Dewarovy nádoby s dusíkem, která detektor chladí v případě výpadku elektrické energie, tak chlazení Peltierovým článkem, které detektor při provozu chladí normálně.

1.5.5 Geiger – Müllerovy počítače

Jejich princip byl objeven již v roce 1928 [2] a pro své vlastnosti v porovnání s jejich cenou a konstrukční složitostí jsou velmi oblíbené pro nenáročné aplikace. Základní schéma tohoto počítače je na obr. 1.5.5.1.



Obr. 1.5.5.1 – Základní zapojení [1]

Kde:

- 1.....Trubice
- 2.....Zdroj detekčního proudu
- 3.....Zatěžovací rezistor
- 4.....Vyhodnocovací obvod (vyhodnotí proudový impuls výboje jako úbytek napětí na rezistoru R)

Princip je trochu podobný proporcionálním detektorům. Plynové zesílení je opět dáno lavinou ionizací. Ovšem elektrické pole není v trubici rozloženo stejně v celém objemu (je nehomogenní). Kombinace vhodného pracovního plynu a vyššího napájecího napětí povede k tomu, že bude energie (a tím i rychlost) urychlených částic natolik velká, že začne být schopna ionizovat i částice plynu. To vede ke vzniku dalších lavin, které se v řádu jednotek μs rozšíří v prostoru celé trubice. Vznikne tak výboj, a plynové zesílení **K** zde dosáhne svého maxima ($\mathbf{K} \approx 10^{10}$). Tento mechanismus je schopen spustit i jeden jediný elektron, který má dost vysokou energii pro vytvoření primární ionizace. V základním provedení není schopná trubice výboj sama uhasit a u prvních přístrojů to dokonce musela zajišťovat obsluha snížením napájecího napětí a zamezení tvorby (tzv. zhášení) další lavinové ionizace. Zhasnutí výboje je nutné z toho důvodu, že v této době není trubice schopna zaregistrovat další interakce detekovaných částic. Známe dva základní typy těchto trubic; **nesamozhášecí** a **samozhášecí**. **Nesamozhášecí** jsou historicky starší a jejich trubice byly plněny čistými vzácnými plyny (helium, argon). Zhášení těchto trubic prováděno buďto obsluhou, ale to bylo velmi nepohodlné a navíc to nepříznivě ovlivňovalo, či rovnou znehodnocovalo vlastní měření (přítomnost lidského faktoru). Proto se hledal způsob, jak snižovat napájecí napětí trubice automaticky.

Používalo se předřadného rezistoru o vysoké hodně odporu (desítky $M\Omega$), který na trubici snížil napětí o svůj úbytek, neboť při výboji v trubici jí začal protékat proud. Vysoká hodnota rezistoru spolu s kapacitou vlastní trubice a kapacitou vstupu vyhodnocovacích obvodů tvoří integrační obvod. Kapacita integračního obvodu se nabíjí díky velkému odporu velmi pomalu (čímž se i velmi pomalu vrací napětí na původní úroveň) a trubice má tak velkou mrtvou dobu, ve které neregistruje další interakce. Nicméně toto bylo jediné řešení, které se používalo, vzhledem k možnosti tehdejší elektroniky.

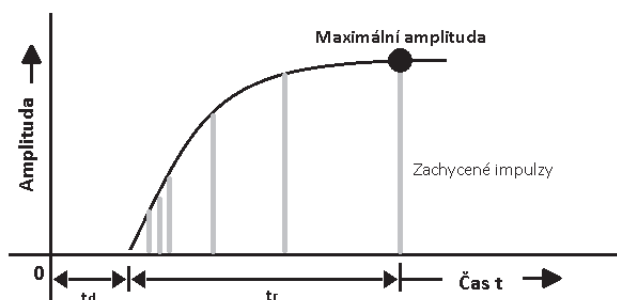
S rozvojem polovodičů přišly další metody, jak trubici zhášet, ale zároveň snížit mrtvou dobu trubice. Nejjednodušší z dalších metod se ukázalo impulsní napájení. Tedy vysoké napětí bylo k trubici připojeno s určitou střídou. Pokud během doby, při které bylo vysoké napětí na anodě přítomno, došlo k interakci, v trubici vznikl výboj, který byl následně uhašen přerušením napájení. Velmi jednoduché technické řešení negativně neovlivnilo dobu zotavení, ovšem přineslo jednu nevýhodu; totiž běhen vypnutého napájení trubice samozřejmě nemohla registrovat příchozí interakce. Vznikly také modifikace tohoto řešení, kdy se napětí neodpojovalo, ale pouze snižovalo pod U_4 (obr.1.5.2), protože pokles napětí pod Geiger – Müllerův práh znemožní urychlení elektronů na takovou úroveň, aby pokračovala sekundární ionizace; dojde k zhasnutí výboje. Asi nejdokonalejší metodou byla reverzace napájení, kdy v závislosti na tvaru detekovaného impulzu po interakci byl odvozen reverzační impulz, dle kterého se na určitou dobu obrátilo napájení. Výhodou je, že rychlé elektrony jsou sebrány na anodě mnohem rychleji, než pomalé kladné ionty, které jsou díky své malé rychlosti stále blízko anody, která se díky reverzaci stane katodou a ionty „odsaje“ v době, kdy rychlé elektrony jsou již dávno zaznamenány. Výhodou je zmenšení počítacích ztrát a rychlá doba zotavení. Nicméně v praxi se ani jedno z těchto řešení neujalo. Důvod je prostý; přílišná komplikace jednoduchého a spolehlivého zapojení. Proto se začaly hledat taková řešení, kdy ke zhášení není třeba externí elektronika, ale aby nastávalo na základě fyzikálních zákonitostí již přímo v trubici. Proto vznikly **samozhášecí** trubice, které nevyžadují k zhášení výboje žádný zásah zvenčí.

Samozhášecí detektory využívají procesu vnitřního samozhášení. Tento proces byl náhodou objeven v roce 1935 [2]. V podstatě tento proces byl vypořizován v tehdy běžném **nesamozhášivém** detektoru, jehož pracovní náplň vzácným plynem byla naředěna parami alkoholu. Těžké, složité molekuly alkoholu totiž brzdí tvorbu dalších sekundárních lavin. V průběhu měření interakcí se molekuly zhášecí příměsi rozkládají a nejsou schopny

se již regenerovat. Proto díky používání detektoru zhasací příměs degraduje a detektor má sníženou životnost. To je hlavní nevýhoda těchto detektorů. Degradaci navíc ovlivňuje i proud, který trubicí při výboji prochází. Ten by měl být proto co nejmenší, tedy musíme volit co největší předřadný rezistor. Ten je v praxi ovšem mnohem menší, než stejně zapojený rezistor v případě **nesamozhášecích** trubic (v praxi cca desítky k Ω). Problém nízké životnosti těchto detektorů se řeší nahrazením organických molekul alkoholu anorganickou náhradou, kdy se osvědčily příměsi halogenů, které při srážkách v sekundárních ionizacích nedegradují a detektor má tak neomezenou dobu používání. To je vykoupeno delší odezvou impulzů na interakci a vzhledem k chemické agresivitě halogenů je obtížná výroba těchto detektorů, zejména materiálem, který by agresivním příměsím odolal. Nepříjemnou vlastností těchto detektorů jsou falešné impulzy. Ty vznikají po „pravých“, ale již nejsou důsledkem měřených interakcí, ale ionizovanými částicemi plynové náplně, které při své neutralizaci poslali elektron na anodu místo aby jej pohltila zhasací náplň. Vyhodnocovací část samozřejmě nedokáže poznat původ elektronu, takže jej bere jako důsledek další interakce, což znehodnocuje měření. Tento jev se eliminuje vhodnou koncentrací plynu a zhasací příměsí. U obvyčejných **samozhášecích** detektorů se tento jev objevuje častěji s častějším používáním, na vině je již zmíněná degradace alkoholových molekul. U **samozhášecích** detektorů s příměsí halogenů by teoreticky k tomuto jevu docházet nemělo, jelikož halogeny používáním detektoru nedegradují. Ovšem v praxi se falešné impulzy nevyhýbají ani jim. Důvodem je vysoká reaktivita halogenů, které reagují například s povrchem trubice, čímž dojde k poklesu aktivních molekul zpomalovače plynu (jelikož některé molekuly jsou při reakci s kovem pohlceny).

Mezi nejdůležitější parametry těchto trubic patří mrtvá doba t_d a doba regenerace (zotavení) t_r . Mrtvá doba t_d je časový interval. Elektron, pocházející z interakce není elektrickým polem urychlen do té míry, aby spustil lavinovou ionizaci. Je to proto, že kladné ionty, které jsou soustředěny kolem anody trubice, snižují hodnotu intenzity elektrického pole. Kladné ionty se s postupem času od anody oddalují a intenzita elektrického pole roste, než překročí hodnotu, kdy je další elektron z interakce schopen zpustit nárazovou ionizaci (lavinu). Doba, za kterou se kladné ionty oddálí od anody natolik, že je elektron z registrované interakce schopen spustit ionizační lavinu, se nazývá mrtvá doba t_d . Během této doby trubice není schopna zaregistrovat žádnou interakci. Po uplynutí této doby již začíná trubice reagovat, ovšem impulzy jsou velmi malé a těžko se

tak vyhodnocují, jelikož jsou utopeny v šumu. Amplituda impulzů postupně roste, jelikož rozložení pole (díky oddalujícím se kladným iontům směrem od anody) dostává postupně do správné konfigurace, která je nutná pro správnou funkci. Doba, která uplyne od konce mrtvé doby, až po dobu, kdy je pole v původní konfiguraci (čímž máme impulzy o maximální amplitudě), nazýváme dobou zotavení t_r . Graficky jsou obě doby znázorněny na obr. 1.5.5.2.



Obr. 1.5.5.2 – Grafické vyjádření t_d a t_r

Mrtvá doba závisí nejvíce na napájecím napětí, kde se vzrůstajícím anodovým napětím klesá. Příklad závislosti t_d na napájecím napětí je uveden na straně 67, v [2]. Pro stanovení mrtvé doby se používají více-zářičové konfigurace nebo metody zářiče s krátkým poločasem rozpadu.

1.6 Scintilační detektory

Scintilační detektor převádí energii zachycené interakce na fotonové záření. Zachycená energie tedy koreluje s energií (rychlostí) generovaných fotonů. Generované záření leží v oblasti ultrafialového záření. První pokusy s těmito detektory byly na začátku 20. století a záblesky, vyvolané srážkou částice a stínítka byly počítány „ručně“. Počítal je pozorovatel, který záblesky sledoval mikroskopem. Taková měření mohlo provádět jen pár lidí, kteří měli výjimečné pozorovací schopnosti a výborný zrak. Práce s tímto zařízením, nazývaném Spintariskop, byla namáhavá a vyžadovala značný výcvik a hlavně disciplínu pozorovatelů. Ve třicátých letech byly Spintariskopy vytlačeny v té době již osvědčenými ionizačními komorami. O dekádu později se však scintilační detektory vrátily, jen lidského pozorovatele nahradily fotonásobiče (které mimochodem této aplikaci vděčí za svůj rychlý rozvoj). Vzhledem k jejich dobrým vlastnostem, jako je provozní nenáročnost, odolnost,

spolehlivost a kompaktnost se rozšířily do všech oblastí techniky, jako je průmysl, vojenství a konečně i do vědecké sféry. Je vhodné poznamenat, že vlastní detektor netvoří fotonásobič, ale **organická**, či **anorganická** látka, konvertující energii interakce na fotonové záření. Fotonásobič (který bývá občas nahrazen fotodiodou) jen detekuje záblesky fotonového záření a vlastně není k činnosti vlastního detektoru vůbec nutný, vlastní detektor je založen výhradně na chemickém principu přeměny formy energie. Činnost scintilačního detektoru jde rozepsat do tří hlavních částí:

- Absorpce měřeného záření:
- Scintilační proces převodu energie měřeného záření na energii fotonů
- Přenos generovaných fotonů na snímací prvek (fotonásobič, fotodiody)
- Převod detekovaných fotonů na elektrický signál (fotoelektrický jev, či generace páru elektron – díra u fotodiody)

Mechanismus přeměny energie zachycené interakce na energii fotonů (zachycený záblesk) se liší dle látky, která tato přeměnu převádí. Mezi nejběžnější rozdělení scintilátorů patří již zmíněné **organické** a **anorganické**. **Organické** scintilační detektory jsou založeny na molekulách benzenu. Emise fotonů, tedy vlastního detekčního ultrafialového záblesku zde souvisí s vazbami mezi molekulami organické látky. Tyto stavy nejsou ovlivněny skupenstvím látky, proto tento mechanismus probíhá u všech tří skupenství dané detekční látky. Energie výstupních fotonů je samozřejmě menší, než energie dodaná zachycenou interakcí, proto se u těchto detektorů uvádí i energetická účinnost. Naprostá většina vstupní energie je využita na ionizaci (**primární scintilační proces**) pracovního prostředí a na excitaci vazebních elektronů ve vazbách mezi molekulami benzenu. Tyto elektrony po své zpětné rekombinaci svou přebytečnou energii vyzáří právě ve formě fotonu, který pak tvoří kýžený ultrafialový záblesk (**sekundární scintilační proces**). Rekombinace může proběhnout buď skokově, tedy z hladiny s nejvyšší energií, do hladiny základní. Další možností je rekombinace postupná, tedy pozvolnou rekombinací přes všechny dostupné energetické hladiny, od nejvyšší hladiny. Postupná rekombinace však zvyšuje riziko, že přebytečná energie nebude předaná ve formě fotonu, ale ve formě tepla (což je ztrátová, nezářivá detekce). To tedy znamená, že reakce na interakci ve formě záblesku není 100 % zachytitelná fotonásobičem. Navíc, generování záblesku u **organických** scintilačních detektorů není věcí jednoho

mechanismu, generované fotony tak mají různé vlastnosti, například různou vlnovou délku. Mechanismy generující záření **organických** scintilačních detektorů jsou:

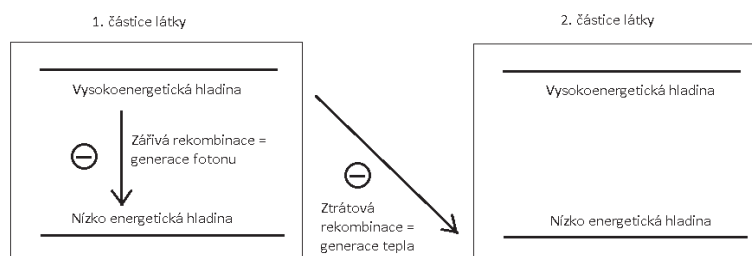
- Fluorescence
- Fosforescence
- Zpožděná Fosforescence

Fluorescence je nejrychlejším mechanismem přeměny energie zachycené interakce na záření. Vlnové délky generovaných fotonů jsou krátké. I přes přímou rekombinaci se však někdy místo fotonu generuje teplo. Dochází k určitému rozptylu vyzářené energie, což je způsobeno teplotními kmity částic. Tím se mění rychlost generovaných fotonů a to vede k jejich rozdílné vlnové délce.

Fosforescence vzniká nepřímou rekombinací vazebních elektronů benzenu, kdy elektron nerekombinuje přímo z nejvyššího stavu na stav s minimální energií, ale na základní hladinu rekombinuje z vyššího energetického pásu, který je však níže, než jen ten s nejvyšší energií. Vlnová délka je tak delší, protože generované fotony jsou pomalejší. Snížená rychlost je způsobena menším rozdílem energetických hladin pásů, kterými elektron při rekombinaci prochází. Ke **zpožděné fosforescenci** dochází v případě, že elektron nerekombinuje ze své hladiny na hladinu základní, ale excituje na hladinu s vyšší energií, kdy je excitován například teplem. Dále se **organické** scintilační detektory dělí dle skladby vlastního scintilátoru na:

- Jednosložkové – složeny z čistých organických krystalů, jako je antracen, nebo kapalné na bázi čistých roztoků, bez příměsí.
- Dvousložkové – většinou kapalné scintilátory, nebo dvousložkové krystalové scintilátory na bázi antracenu.
- Třísložkové – tří a vícesložkové systémy

Vícesložkové scintilátory se používají z důvodu zvýšení účinnosti. V jednoduchém, jednosložkovém scintilátoru totiž existuje zvýšené nebezpečí, že elektron svou přebytečnou energii bude odevzdávat právě ve formě tepla a nikoliv jako foton. Vyzáření přebytečné energie při rekombinaci vazebního elektronu teplem vyniká zejména v případě, že elektron prochází skrze energetické pásy v rámci několika atomů. Tedy přejde s vysokoenergetického pásu jedné částice do pásu s nižší energií druhé částice. Jev je znázorněn na obr. 1.6.1.



Obr. 1.6.1 – Zářivá vs. ztrátová rekombinace

Více složkové scintilátory se tomuto „útěku“ snaží zabránit a elektron je nucen svou rekombinaci provádět pouze v rámci jedné částice a tím je větší pravděpodobnost, že rozdíl energií při rekombinaci bude vyzářen právě ve formě fotonů. To vede k vyšší detekční účinnosti. V současné době se již s tímto jevem a celkově ztrátovou detekcí u dvou a tří složkových detektorů nesetkáváme. Třetí složka většinou slouží jen jako parametr, kterým ovlivňujeme charakter generovaného záření.

Scintilátory **anorganické** dělíme na:

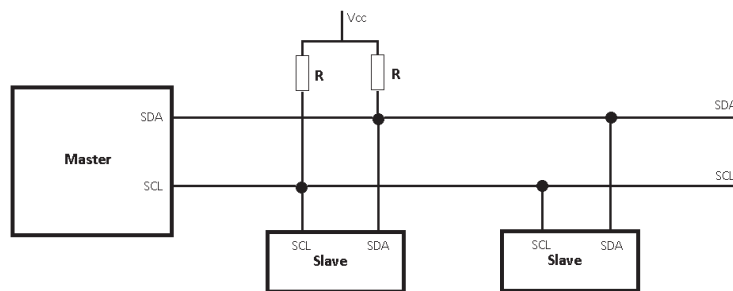
- Čisté monokrystaly
- Aktivované monokrystaly
- Samo aktivované a aktivované polykrystalické látky

Čisté monokrystaly alkalických halogenidů v některých případech ke své činnosti vyžadují chlazení dusíkem. Jejich konverzní účinnost je však malá, tedy jen velmi málo energie je využito ke generaci fotonů. Příliš často se nepoužívají.

Aktivované monokrystaly mají nejlepší vlastnosti a jsou také nejvíce využívány. Jsou perspektivní náhradou **organických** scintilátorů pro beta záření. V zásadě jsou obdobné první skupině, ale mají příměsi těžkých kovů (olovo, sodík, indium). Nevyžadují chlazení. Vzhledem k vysoké ceně jsou aktivované monokrystaly často vyráběny jako malé krystalky, které se v případě potřeby lisují do keramických substrátů (**polykrystalické látky**) a tvoří tak jeden celek s větší detekční plochou a nižší cenou. Postupně tak vytlačily anorganické scintilátory plynové, či skleněné, které jsou již dnes skoro historickým exponátem.

1.7 Sběrnice I²C

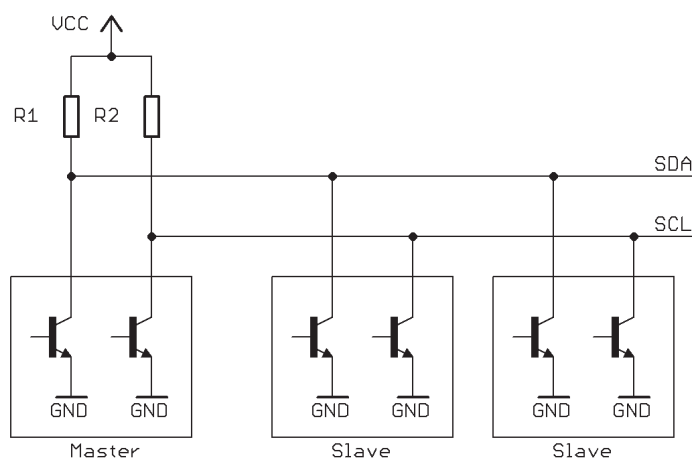
Sběrnice I²C, neboli **IIC** (*Inter - Integrated Circuit*) patří mezi nejpoužívanější komunikační sběrnice, spojující více procesorové systémy a velmi často se používá i v komunikaci mezi mikropočítačem a senzorem, který bývá dost často opatřen vestavěným integrovaným řídicím mikroprocesorem, zajišťujícím zpracovávání dat a jejich interpretaci pro další využití. Schéma sběrnice I²C je na obr. 1.7.1.



Obr. 1.7.1 – Schéma sběrnice I²C

Tato sběrnice používá sériovou komunikaci a je typu half duplex [3], tedy jeden člen vysílá, ostatní členové na sběrnici poslouchají a pak teprve jeden odpovídá. Sběrnice I²C má dva pracovní vodiče (plus společný zemnicí vodič **GND** (*GrouND*), který na obr. 1.7.1 není zakreslen). První vodič, **SDA** (*Serial DA*ta) slouží k obousměrnému přenosu dat mezi členy. Druhý vodič, **SCL** (*Serial C*lock) slouží k synchronizaci přenosu dat hodinovým signálem a také ovlivňuje rychlost přenosu. Jeden člen na této sběrnici je dominantní (**Master**) a řídí veškerou komunikaci na sběrnici. Generuje řídicí hodiny SCL pro ostatní členy na společné sběrnici. Ostatní, podřízené členové (**Slave**) pouze odpovídají na dotazy člena Master. Jinými slovy, veškerá komunikace musí jít vždy přes řídicí člen Master. Každý jedinec má přiřazenou svou jedinečnou identifikační adresu, pod níž se na sběrnici prezentuje ostatním. Jelikož komunikace na základě adres vyžaduje jistá pravidla, která nelze pokrýt hardwarovým řešením (míněno například vybírání cíle komunikace pomocí samostatného adresačního vodiče, jako v případě sběrnice SPI), je nutno dodržovat předepsaný komunikační protokol. Sběrnice I²C má charakter otevřeného kolektoru, proto potřebujeme pull-up rezistory **R**, které nám zajistí logickou úroveň 1. Díky charakteru otevřeného kolektoru dostaneme dvě výhody. První je, že můžeme připojovat další členy, bez zvyšování vodičů použitých v komunikaci a navíc, sběrnice je odolná vůči zkratu

signálového a hodinového vodiče proti zemi. Schéma zapojení otevřeného kolektoru je na obr. 1.7.2.



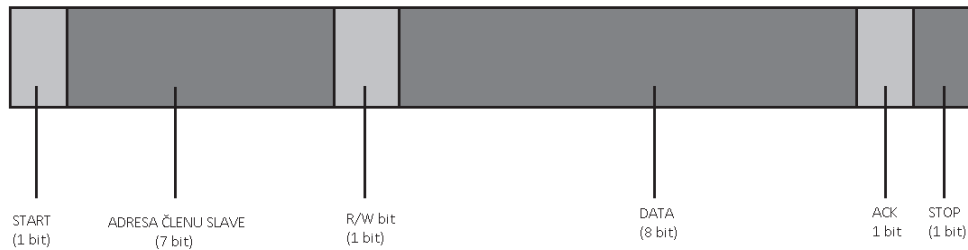
Obr. 1.7.2 – Otevřený kolektor vysílací části sběrnice I²C

Z toho vyplývá, že zařízení na sběrnici I²C „tahá“ klidovou úroveň log. 1 směrem k log. 0 (ke společnému zemnímu vodiči). Na obr. 1.7.2 je zachycena pouze vysílací část, kterou tvoří tranzistory s otevřeným kolektorem, s přijímací částí, která není zakreslena, nemá obrázek nic společného. Jak již bylo řečeno, komunikaci řídí dominantní člen, Master. Ten bývá na sběrnici obvykle jen jeden, multi-master topologie není úplně běžná a obvykle se v praxi nepoužívá, jelikož je zde reálné nebezpečí kolizí, kdy hrozí střet několika vysílajících jedinců v témže časovém okamžiku. Slave, je na rozdíl od Masteru zcela pasivní; nedokáže sběrnici řídit a nedokáže ani vyslat žádost o vyslání, nebo o příjmu dat. Data pouze poskytuje, o požadavek přenosu, přenos, nebo další operace s daty spojené se musí starat sám Master, který také komunikaci vždy zahajuje.

V zásadě máme dva typy komunikace na sběrnici I²C. Časově deterministické, kdy se master v pravidelných časových intervalech ptá na stav členů Slave. Tato metoda se nazývá polling. Někdy je zahájení komunikace masterem vyvolané přerušením z vnějšího zdroje, například senzoru. Není tedy pravidelné, jako v případě pravidelného polling dotazování, ale vyvolané náhodnou, nepravidelnou, zpravidla vnější událostí.

Pokud neprobíhá žádná komunikace a sběrnice je tak v klidu, oba vodiče (SCL i SDA) jsou na úrovni log. 1 (všechny vysílací tranzistory členů na sběrnici jsou uzavřeny a log.

úroveň zajišťují pull-up rezistory R). Tento stav trvá libovolně dlouho. Pokud je masterem detekovat požadavek na start komunikace (buď pravidelným dotazem polling, nebo přerušením), zahajuje Master komunikaci na sběrnici následujícím způsobem. Nejprve sníží úroveň na datovém vodiči SDA na log. 0 (jeho vysílací tranzistor připojený k vodiči SDA se otevře a stáhne tak log úroveň k zemi GND). Hodinový signál SCL je v tomto okamžiku stále v log. 1. Toto snížení úrovně na datovém vodiči SDA se nazývá start bit a slouží k identifikaci, co je na sběrnici připojeno. Po start bitu je odeslána adresa zařízení, se kterým se chce master spojit. Adresa je tvořena 7 nebo 10 bitovým číslem, které je pro každého člena stálé a jedinečné (většinou poskytnuté výrobcem, někdy lze adresu omezeně měnit). Po adrese je vyslán také směrový bit, který určuje směr toku informací (jestli master vysílá, nebo se ptá). Tento bit je někdy označován jako **R/W** (*Read/Write*, tedy volba čtení/zápis). Tato vyslaná adresa se porovná s implicitní adresou každého členu Slave. Člen, kterému adresa patří pak zpětně prokáže, že se na daném uzlu skutečně nachází. Potvrzení se provádí 9. bitem, který se pošle zpět řídicímu členu Master. Tento 9. bit má označení **ACK** (*Acknowledge*). Pokud je adresa správná, je odeslaný bit nulový. V opačném případě není slave s danou adresou dostupný, nebo není vůbec připojen. Každý bit je přečten s náběžnou hranou hodinového pulzu, která je volena tak, aby již přečtená hodnota bitu byla ustálená a nedocházelo tak k hazardním stavům, nebo chybně přečteným hodnotám a misinterpretacím. V případě 7 bitové adresy můžeme adresovat 128 (2^7) různých zařízení. V praxi je tento počet o něco menší, jelikož některé adresy jsou rezervovány pro speciální účely (např. hromadné příkazy pro všechny slave). V případě, že tento počet nedostačuje, můžeme použít sběrnici I²C v trochu odlišné konfiguraci, která dovolí používat 10 bitové adresy. Pak lze teoreticky adresovat až 1024 (2^{10}) členů. Obvykle jsou opět některé adresy rezervovány pro speciální funkce s více slave členy najednou. V praxi se příliš často 10 bitová adresa nepoužívá a také není podporována všemi výrobci obvodů nebo senzorů využívají sběrnici I²C. Pro přenos 10 bitové adresy jsou vyhrazeny některé speciální adresy, protože tak dlouhou adresu lze přenést pouze ve dvou bytech (v jednom 8 bitů, ve druhém bytu zbylé 2 bity). Tvar přenášeného rámce je na obr. 1.7.3. Sběrnice I²C může pracovat v několika módech s odlišnými přenosovými rychlostmi, které ovlivňují i velikosti pull-up rezistorů R a tak hodinového signálu (obvykle 100 – 400 kHz).



Obr. 1.7.3 – Tvar komunikace po I²C

Rychlost přenosu lze ovlivnit hodinovým kmitočtem ($100 \text{ kHz} \approx 100 \text{ kbps}$). Praktická přenosová rychlost je o něco menší, protože kromě samotných dat přenášíme i bity nutné pro funkci sběrnice. Sběrnice se většinou používá k propojení mikropočítačů, senzorů, nebo pamětí na delší vzdálenost, většinou však pouze v rámci desky plošného spoje či v rámci zapojení (mezi deskami plošných spojů) jednoho přístroje.

1.8 Sběrnice SPI

Sběrnice **SPI** [4] (*Serial Peripheral Interface*) je dalším populárním prostředkem pro spojení více mikropočítačů, v sensorové komunikaci se s ní příliš často nesetkáváme. Důvod je prostý. Na rozdíl od sběrnice I²C, zde s každým připojeným členem roste fyzická šířka sběrnice. To není výhodné, pokud máme zapojených více senzorů na společné sběrnici. Protože tomu tak v praxi často bývá, sběrnice SPI zůstává jako efektivní prostředek komunikace mezi mikropočítači nebo mezi více procesorovými systémy, obvykle se však používá ke komunikaci pouze mezi dvěma členy (z důvodů co nejmenší fyzické šířky sběrnice). V případě komunikace mezi dvěma členy máme sice oproti I²C 2x více vodičů (přesněji řečeno 4 vodiče, jejichž funkce a význam bude popsána za chvíli). Tato nevýhoda je vykoupena snadnějším ovládním z pohledu programu. Sběrnice SPI však nikdy nebude tak aplikačně pružná jako sběrnice I²C. Mezi výhody sběrnice SPI nepatří jen snadnější nastavení komunikace a vyšší uživatelská (tedy spíše programátorská) přívětivost, ale mezi další výhody patří i o něco vyšší rychlost komunikace, než je tomu v případě sběrnice I²C. Nelze proto říct, která z nich je lepší, pokud neznáme aplikační okolnosti. Obecně se lze říct, že pokud potřebujeme na společné sběrnici více členů a smíříme se s poněkud pomalejším přenosem dat, je sběrnice I²C lepší volba. Pokud je

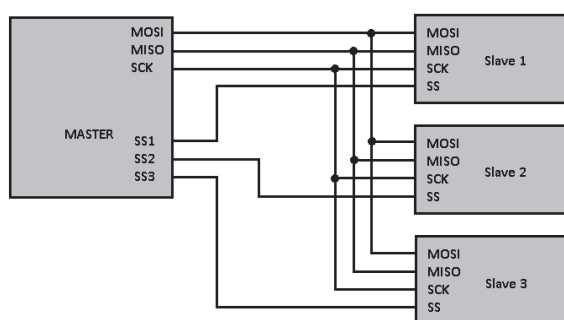
prioritou rychlost a jsme ochotni se smířit s vyšším počtem potřebných vodičů (a tím i více použitých pinů mikropočítače), je jasným favoritem sběrnice SPI.

Sběrnice SPI je stejně jako sběrnice I²C sériovou sběrnici s jedním dominantním, řídicím členem (Master). Je tedy sběrnici typu single Master. Ostatní, podřízené členové jsou opět Slave. Na rozdíl od sběrnice I²C je provoz plně obousměrný (full duplex), protože pro každý směr komunikace je použit nezávislý vodič. Sběrnice je také synchronizovaná hodinovým signálem, který je přenášen vodičem **SCK** (**S**erial **C**lock) mezi všechny členy na společné sběrnici. Je také generován členem Master, stejně jako v případě sběrnice I²C. Zkráceně lze říct, že obě sběrnice (I²C a SPI) se liší:

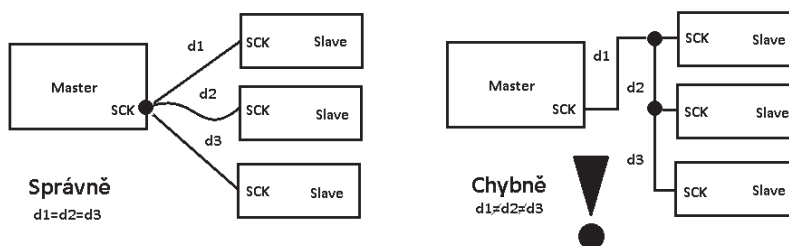
- Ve formě adresace podřízeného členu
- V obousměrné komunikaci, ve smyslu full duplex/half duplex.
- V přenosové rychlosti

Sběrnice SPI se skládá z několika vodičů (plus ještě společný zemnicí vodič GND, stejně jako v případě sběrnice I²C). Vodič SCK pro rozvod synchronizačního hodinového signálu, generovaný dominantním členem Master. Pro přenos dat jsou oproti I²C použity dva vodiče, což je také důvod, proč je tato sběrnice schopna plně obousměrného provozu a je to také jeden z důvodů, proč je sběrnice SPI rychlejší, oproti sběrnici I²C. Oba vodiče jsou společné pro všechny podřízené členy Slave. Pro přenos dat z obvodu Master k obvodům Slave se používá vodič **MOSI** (**M**aster **O**ut, **S**lave **I**n), pro přenos dat od dotazovaného členu Slave směrem k dominantnímu Master slouží vodič **MISO** (**M**aster **I**n, **S**lave **O**ut). Na rozdíl od I²C, kde se adresa Slave členu, se kterým chce Master komunikovat posílá po datovém vodiči SDA, tady máme místo adresy přímo vodič **SS** (**S**lave **S**elect), kterým si přímo vybíráme, se kterým podřízeným členem chce Master komunikovat. Každý Slave má svůj vlastní vodič. Odtud tedy plyne v začátku zmíněná nevýhoda, že s vyšším počtem členů na sběrnici roste i počet použitých vodičů. Všechny vodiče (SCK, MOSI, MISO, SS) jsou tedy vlastně jednosměrné, což vede k jednoduššímu obvodovému řešení i v rámci integrované struktury v mikropočítači. Je zřejmé, že nikdy nesmí být aktivováno více členů Slave naráz, došlo by ke kolizi. Zvlášť patrné to je v případě, kdy by začalo více členů Slave najednou vysílat svá data pro Master, došlo by ke kolizi na vodiči MISO. Aktivace daného členu Slave většinou dochází log. 0, je to zvyklost přejatá z aktivačních vstupů **CS** (**C**hip **S**elect), jiných obvodů, které se

přizemněním toho vstupu aktivují. Základní zapojení SPI sběrnice pro tři členy Slave je na obr. 1.8.1 (opět bez společné GND). Pracovní kmitočet synchronizačních hodin u sběrnice SPI je běžně 1 – 10 MHz, pokud sběrnice bude dostatečně krátká a spoje budou mít malou parazitní kapacitu, lze kmitočet zvýšit až na 70 MHz. Vzhledem k full duplex režimu lze tedy při hodinovém taktu 10 MHz přenést až 20 Mbitů za sekundu. Neexistuje zde žádný potvrzovací bit ACK, nelze tedy korigovat rychlost přenosu dle nejpomalejšího zařízení, jako je tomu u I²C. Je tedy kritická přesná synchronizace hodin, což je spojeno i s geometrií návrhu, cesty hodin ke všem členům Slave musí být stejně dlouhé (samozřejmě pokud použijeme pouze jeden člen Slave, situaci to zjednodušuje). Situace je znázorněna na obr. 1.8.2.



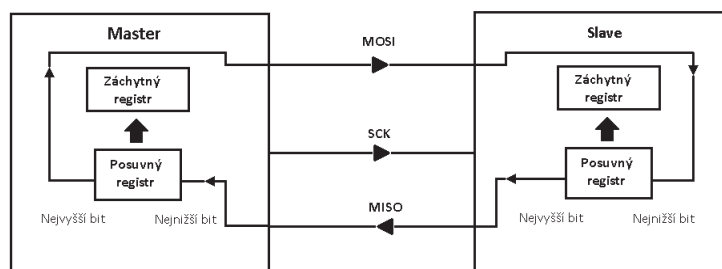
Obr. 1.8.1 – Základní znázornění SPI pro více členů (3) Slave



Obr. 1.8.2 – Reálné vedení hodin SCK u sběrnice SPI

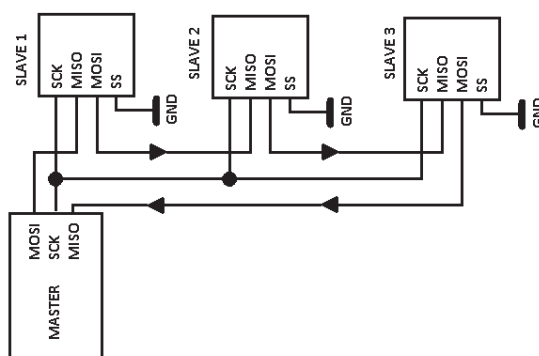
Synchronizaci pomocí hodin lze konfigurovat v několika módech. Lze si vybrat synchronizaci na volitelnou úroveň (log. 0 nebo log. 1), či na hranu signálu (vzestupnou nebo sestupnou). Ke čtení stavu však musí docházet již době ustálení a to ve všech případech. Propojení 2 členů (1 Master a 1 Slave) je nejjednodušší aplikace, zaslouží si podrobnější popis. Podrobnější zapojení je znázorněno na obr. 1.8.3. Posuvný registr

jednak slouží jako fronta pro zapamatování přijatých a ještě nezpracovaných dat a jednak slouží k jejich vysílání a příjmu.



Obr. 1.8.3 – Zapojení 1 Master 1 Slave

Posunem doprava se nejvyšší bit odešle a zároveň se načte jako nejnižší bit přijatý. Dochází tak zároveň k vyslání a příjmu jednoho bitu u každého členu (tedy jde o již několikrát zmíněný full duplexní přenos). Mechanismus je tedy stejný jak z pohledu členu Master i Slave. Odlišnost je jen to, že Master celý přesun řídí svými hodinami SCK, které generuje a které jsou využity k synchronizaci posuvu obou registrů. V této aplikaci teoreticky ztrácí smysl vodič SS volící Slave, jelikož máme jen jeden Slave, ovšem v praxi jeho vynechání může způsobit problémy. Ojedinele se také sběrnice SPI používá v zřetěženém módu (neboli daisy chain). V podstatě jde o kaskádní zapojení posuvných registrů jednotlivých členů Slave za sebe. Tvoří tak jeden dlouhý posuvný registr o velikosti součtu délky bitů jednotlivých registrů (délka je násobkem 8). Zřetěžený mód je na obr. 1.8.4.



Obr. 1.8.4 – Zřetěžený mód sběrnice SPI (dle [4])

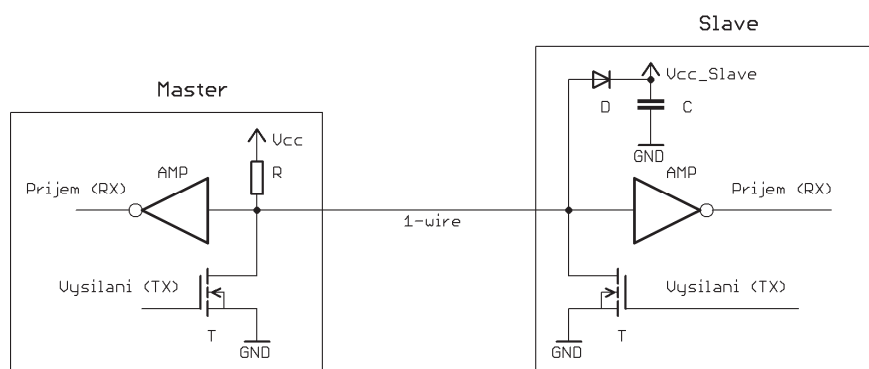
Každý Slave tak z celé řady bitů vidí jen těch 8 bitů, které má zapsány ve svém posuvném registru. Tímto bytem má dvě možnosti. Buď jej nechá být, beze změny, nebo jej modifikuje. Poté jej jednoduše předá dalšímu Slave, který je ve frontě. Toto řešení má výhodu, že nepotřebujeme vodič SS pro výběr Slave, jelikož všichni pracují najednou a předávají si postupně informaci. Ovšem daní je, že data z prvního Slave musí projít skrze všechny ostatní, tudíž pro načtení dat potřebuje Master generovat $n \cdot 8$ hodinových cyklů, kde n je počet Slave jedinců, což může ovlivnit rychlost přenosu. Další daní je fakt, že pokud dojde k funkčnímu výpadku jednoho členu Slave, dojde k rozpadu komunikace, protože fronta předávání je přerušena (Master neobdrží zpět žádná data). Proto se častěji používá klasická topologie, kde výpadkem jednoho členu není ovlivněna funkčnost členu ostatních. Na závěr shrnutí faktů sběrnice SPI vůči I²C:

- Možná vyšší přenosová rychlost
- Jednodušší ovládací protokol
- Vyšší počet vodičů navíc závislý na počtu zařízení Slave
- Komunikace na kratší vzdálenosti, než v případě I²C
- Důraz na časovou synchronizaci

1.9 Sběrnice 1-wire

Je méně rozšířenou sběrnici, než předchozí dva představené exempláře. Její devizou je, že pro přenos dat i napájení používá pouze 1 vodič [5]. K propojení periferie je tak snadné a levné. Samozřejmě je nutný i společný zemnicí vodič, ale vzhledem k tomu, že tento vodič často zastupuje kostra (pří)stroje, tak opravdu mnohdy nalezneme senzor připojený pouze jedním vodičem. Má jeden dominantní člen Master, je tedy typem single Master. Jelikož se informace přenáší jedním vodičem oběma směry, jde o half duplexní přenos. 1-wire je používána na delší vzdálenosti, kde se spokojíme s nižší přenosovou rychlostí a je funkcí podobná sběrnici I²C. Stejně jako sběrnice I²C je době klidu držena na vodiči vysoká úroveň log. 1 pomocí pull-up rezistoru R. Start přenosu je prováděn pomocí „stáhnutí“ datového vodiče SDA směrem k log. 0, pomocí tranzistorového budiče T. Jde tedy o analogii ke start bitu, jako je v případě I²C a tranzistorový budič T má také charakter otevřeného kolektoru. Místo start bitu zde však mluvíme o reset pulsu, i když mechanismus je podobný. Datový vodič je tímto reset impulsem „stažen“ k log. 0 na dobu 480 μs. Poté se tranzistorový budič T Mastera uzavře. Tím pomocí pull-up rezistoru R je

opět na datovém vodiči obnovena log. 1. Slave reaguje na tuto vzestupnou hranu jako pokyn k jeho identifikaci. Slave následně se zpožděním 15 – 60 μs pomocí svého vlastního tranzistorového budiče T opět stáhne datový vodič k log. 0 na dobu 60 – 240 μs . Po tomto ohlášení Master povolí komunikaci. Data jsou přenášena v úsecích o délce trvání 60 – 120 μs a k jejich fyzické úpravě slouží zesilovače AMP. Schéma sběrnice je na obr. 1.9.1.



Obr. 1.9.1 – Schéma sběrnice 1-wire

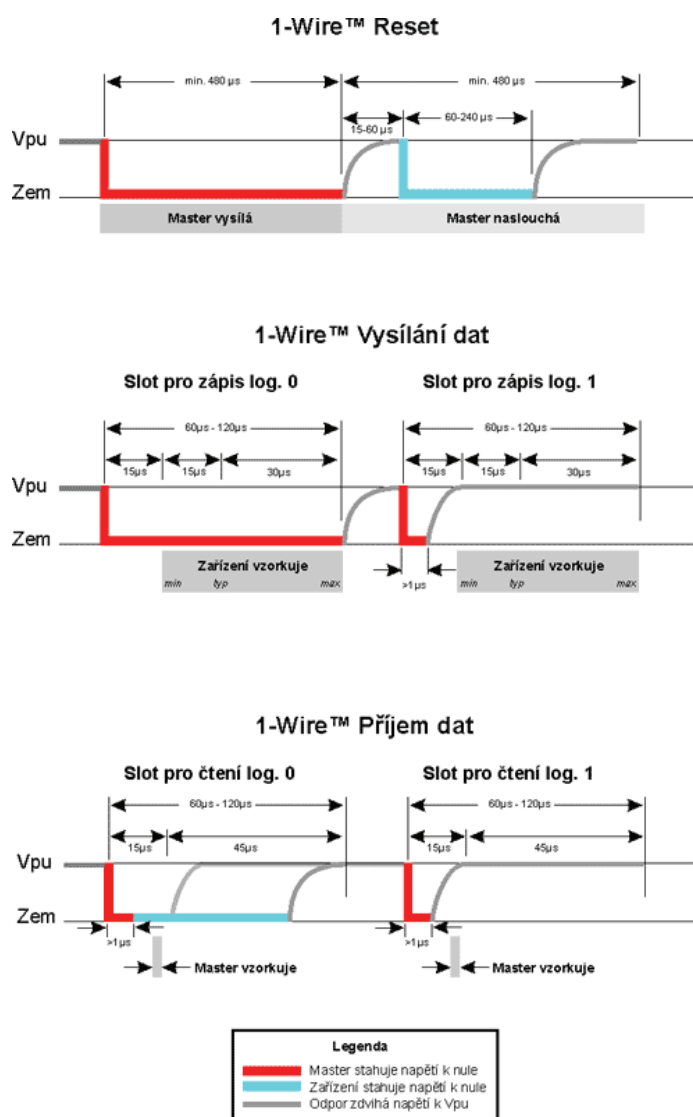
Zároveň se z datového vodiče pomocí diody **D** a kondenzátoru **C** odebrává část energie datového signálu pro napájení celého členu Slave. Dioda **D** zde funguje jako jednocestný usměrňovač a brání zpětnému vybíjení kapacity **C** do datové linky. Vzhledem k poměrně vysokým pracovním kmitočetům je kondenzátor **C** nabíjen s krátkou periodou a tudíž jeho kapacita může být malá. Zároveň však musí být alespoň tak velká, aby kondenzátor **C** zvládl napájet obvody členu Slave během komunikace, kdy je na lince po nějaký čas log. 0. Ačkoliv časový rámec 60 – 120 μs se zdá poměrně dlouhý, je během něj přenesen pouze 1 bit vlastních dat. Poté, co je tento 1 bit přenesen, je před odesláním dalšího rámce nutné počkat alespoň 1 μs . Pokud bychom pomocí osciloskopu sledovali komunikaci po sběrnici 1-wire, nemůžeme vyzorované úseky log. 0 a log. 1 interpretovat přímo jako posílané bity. Interpretace úrovní záleží na režimu čtení/zápis a na hodnotě bitu (0 nebo 1) a hodnota přenášeného bitu je prezentována časovými délkami log. 0 a log. 1 v rámci jednoho časového rámce. Celkem tedy máme 4 operační možnosti sběrnice 1-wire:

- Zápis bitu s hodnotou 1

Master nechá log. 0 v délce 1 – 15 μs z celého časového rámce. Zbytek je log. 1.

- Zápis bitu s hodnotou 0
Master nechá log. 0 stáhnoutou po celou dobu rámce.
- Čtení bitu s hodnotou 1
Master čtení zahajuje log. 0, trvající 1 μ s. Čtení je vlastně zahájeno pauzou mezi jednotlivými rámci. Po této pauze je bit s hodnotou 1 prezentována jako log. 1 po celou dobu trvání rámce.
- Čtení bitu s hodnotou 0
Master opět čtení zahajuje log. 0, trvající 1 μ s. Čtení bitu s hodnotou 0 je také zahájeno pauzou mezi jednotlivými rámci. Po této pauze je bit s hodnotou 0 prezentována jako log. 0 po celou dobu trvání rámce.

Situace je také znázorněna na obr. 1.9.2.



Obr. 1.9.2 – Grafické vyjádření čtení/zápis bitu s hodnotou 0/1 na sběrnici 1-wire [5]

Každé zařízení má v sobě uloženou svou jedinečnou adresu, stejně jako v případě sběrnice I²C. Adresa je nastavena již z výroby a je většinou uložena v paměti ROM jako 64 bitové číslo. Pokud je na společné sběrnici více zařízení, je nutno komunikaci doplnit o příkaz porovnávací jednotlivé adresy. V případě, kdy je na sběrnici 1-wire pouze 1 člen, nemá adresa praktický smysl a vystačíme si pouze s detekcí přítomnosti členu jako odezva na vzestupnou hranu změny z log. 0 na log. 1 po restartovacím pulzu.

2 Metodika řešení a realizace

Tato kapitola popisuje postup vývoje, který předcházela finální podobě zařízení, která je popsána v kapitole 3. Postup vývoje byl ovlivněn zejména rešerší teoretických možností v kapitole 1. Rešerše mi umožnila zvolit pro mě nejvýhodnější postup řešení zadání, který vedl k finální podobě zařízení. Postup řešení:

- Výběr vhodné detekční trubice (metody měření)
- Návrh vysokonapěťového napájecího zdroje pro trubici
- Návrh detektoru impulzů pocházejících z trubice
- Návrh obvodů řízení zajišťující mimo zpracování i přenos dat po sběrnici (včetně software)
- Návrh emulační vyhodnocovací jednotky (včetně software)

2.1 Výběr trubice

Vlastní konstrukce byla ovlivněna tím, jaký typ trubice jsem měl k dispozici. Kvůli jednoduchosti jsem preferoval obyčejnou Geiger-Müllerovu trubici (nejlépe nesamozhášivou). V tuzemsku je dostupných několik typů trubic, převážně sovětské výroby, jako je STS-5 a SBM-20 (vyjimku představoval nalezený americký scintilační detektor RCA 6217, který jsem však díky odlišnému principu nechtěl použít). Objevené typy STS-5 a SBM-20 (obr. 2.1.1) jsem použít nechtěl, jelikož jsou poměrně rozměrné.



Obr. 2.1.1 – Pohled na SBS-5 a SBM-20 [6]

Nicméně pak jsem byl upozorněn na stránku sparkfun.com, kde jsem našel trubici LND 712 [7] (obr. 2.1.2), která je v porovnání s výše uvedenými typy mnohem menší (obr. 2.1.3) a proto jsem ji použil místo výše zmíněných sovětských typů STS-5, SBM-20.



Obr. 2.1.2 – Pohled na LND 712 (s ochrannou krytkou) [8]



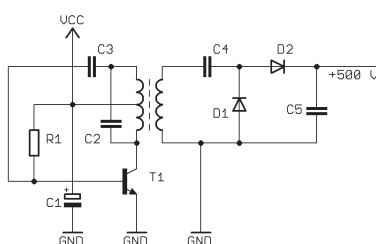
Obr. 2.1.3 – Srovnání několika typů G-M trubice (včetně orientační ceny v Eurech) [9]

Tuto trubici, LND 712, jsem si tedy vybral do řešení praktické části hlavně kvůli kompaktním rozměrům. Jde o Geiger-Müllerovu trubici plněnou směsí neonu a chloru. Pracovní napětí je v rozmezí 450 – 650, kdy návrh vysokonapěťového zdroje respektoval doporučené napájecí napětí 500 V. Trubice je vybavena slídovým okénkem, pro detekci slabých částic. Protože slída je křehká, je okénko opatřeno snímatelnou, červenou ochrannou krytkou. Katoda je vyrobena z oceli. V datasheetu trubice [7] je i doporučené zapojení, které bylo poněkud modifikováno změnou hodnot součástek. Důvod bylo snížení amplitudy pulzu pro další zpracování.

LND 712 je určena zejména do aplikací ručních přístrojů. Díky své malé velikosti (a tím i malé aktivní ploše) je určena spíše pro orientační měření, což pro zamýšlenou aplikaci mého detektoru plně postačuje.

2.2 Vývoj dílčích částí zapojení

V této kapitole bych rád nastínil vývoj celého přístroje. Prvním problémem se stala realizace vysokonapěťového zdroje, který je nutný k činnosti vybrané detekční GM trubice. První verze zapojení počítalo se samokmitajícím měničem a ručně navinutým transformátorem. Zapojení se mi líbilo z hlediska jednoduchosti, ale mělo podstatnou vadu. Tou bylo velmi nestabilní výstupní napětí, jehož velikost závisela snad na všech okolních parametrech. Důvodem je absence záporné zpětné vazby z výstupu, obvod tedy nereguluje výstupní napětí dle obdržené informace ze zpětné vazby. Jelikož trubice ke své dobré činnosti potřebuje napětí stabilní, byl tento princip opuštěn. Navíc bylo nutno zhotovovat transformátor na feritovém jádře. Jeho nutná realizace tak převážila další výhodu. Tou je schopnost pracovat i při nízkém napájení (v závislosti na použitém tranzistoru). Zapojení [10] je ideově naznačeno na obr. 2.2.1.

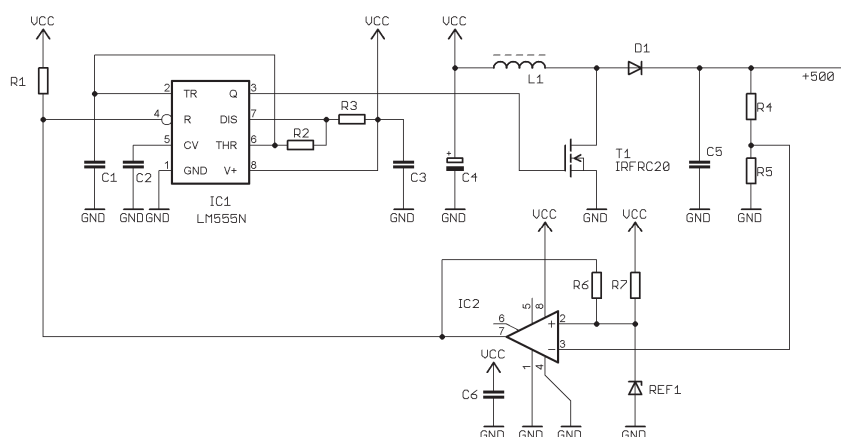


Obr. 2.2.1 – Samokmitající měnič s transformátorem

Zapojení využívá jednoduchého tranzistorového oscilátoru s kladnou zpětnou vazbou. Ta je zavedena skrze oddělovací kondenzátor C_3 (zabraňuje změně stejnosměrného pracovního bodu tranzistoru T_1 , který je nastaven rezistorem R_1). Tranzistor T_1 je zapojen se společným emitorem a obrací fázi signálu o 180° . Aby se zapojení rozkmitalo, potřebuje signál ještě jednou obrátit o 180° , než jej znovu zavedeme na bázi tranzistoru T_1 . To provedeme tak, že signál odebíráme z vhodného místa na vinutí transformátoru což je důvod, proč je transformátor napájen z odbočky. Zavedení kladné zpětné vazby vede k rozkmitání tranzistoru T_1 . Kondenzátor C_2 tvoří tak spolu s primárním vinutím rezonanční obvod. Smyslem toho zapojení je, že i když spínáme primární vinutí transformátoru tranzistorem T_1 proti zemi, ve spolupráci s kondenzátorem C_2 dostaneme na primárním vinutí obě půlvlny sinusovky. Transformátor tak nepracuje pouze s obdélníkovým signálem, ale s plnohodnotným harmonickým průběhem. Následně je napětí zvýšeno skrze převodní poměr transformátoru. Ve snaze ušetřit si motání závitů

sekundárního vinutí, byl za něj zapojen zdvojovač napětí, tvořený **D₁**, **D₂**, **C₄**, **C₅**. Ten funguje tak, že se v jedné půllně nabije skrze diodu **D₁** kondenzátor **C₄** a v druhé se jeho napětí sečte s napětím na sekundárním vinutím. Následně se filtrační kondenzátor **C₅** nabije skrze diodu **D₂** na součet napětí, které je na sekundárním vinutí a napětí na kondenzátoru **C₄**. Jelikož jsou obě napětí stejná, je kondenzátor **C₅** nabit na dvojnásobek napětí, které je na vlastním sekundárním vinutí.

Po zjištění popsaných neduhů tohoto zapojení jsem chtěl již zůstat u řešení, které bylo nakonec použito ve výsledku, tedy spínání jednoduché cívky a odebrání vysokonapěťových špiček při rozpínání proudu procházejícím cívkou. Následně pro tuto koncepci vzniklo několik zapojení. První z nich je na obr. 2.2.2.

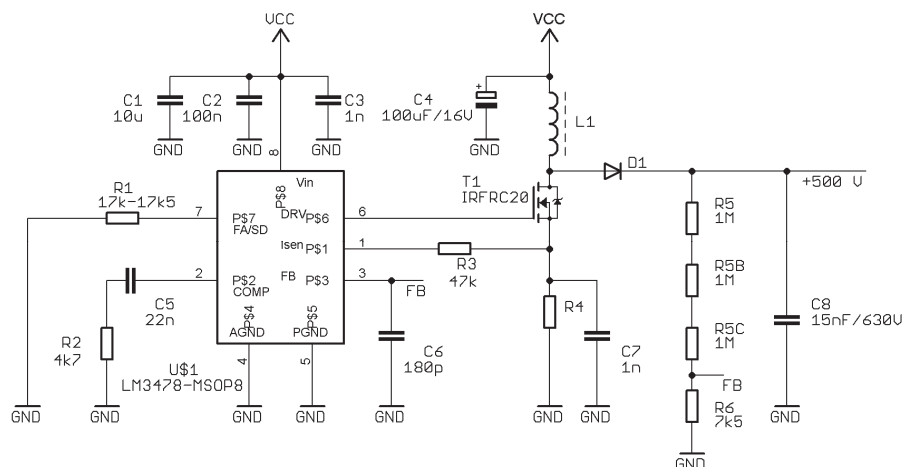


Obr. 2.2.2 – Měnič s 555

Zapojení je do jisté míry podobné tomu, co se nachází ve finálním zapojení. Toto zapojení je vlastně část integrovaného obvodu MC34063, je ovšem řešeno diskrétně. V podstatě jde o generátor pravoúhlého signálu s neměnnou frekvencí, tvořený astabilním klopným obvodem s časovačem 555 (**IC₁**). Ten svým signálem spíná tranzistor **T₁**. Tranzistor **T₁** přerušuje tok proudu do cívky **L₁**. Vznikají vysokonapěťové špičky, které se ukládají skrze diodu **D₁** v filtračním kondenzátoru **C₅**. Jakmile výstupní napětí dosáhne určité velikosti, která je určena převodním poměrem děliče **R₄** **R₅** a velikostí napěťové reference **REF₁**, dojde k překlopení komparátoru **IC₂**, který svým výstupem zablokuje činnost generátoru. Ustanou tak vysokonapěťové kmity a generátor se spustí až ve chvíli, kdy výstupní napětí spadne pod komparační úroveň **REF₁**. Pro zlepšení stability celé zpětnovazební soustavy je zavedena mírná hystereze, tvořená rezistorem **R₆**, takže

výstupní napětí musí spadnout ještě „kousek pod“ napětí tvořené REF_1 , aby opět došlo ke spuštění generátoru kmitů. Zapojení má však jednu nevýhodu, nehlídá proud tekoucí cívkou L_1 , což je velmi neefektivní. Jak je vidět v zapojení, cívkou teče vždy maximální proud (cívka při zapnutí T_1 de facto zkratuje napájení), bez ohledu, kolik energie odevzdává do další části obvodu. Proto jsem toto zapojení chtěl vylepšit. Navíc, jsem hledal řešení, které uvedené zapojení (vylepšené o snímání proudu) nabízí rovnou v integrované podobě, bez nutnosti připojování dalších podpůrných obvodů, s minimem externích součástek. Navíc plně integrované řešení jsem chtěl z důvodu maximální jednoduchosti návrhu plošného spoje.

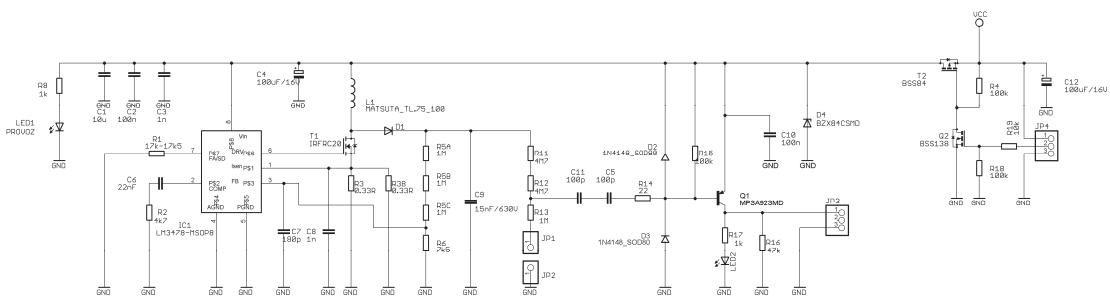
Následně jsem našel integrovaný obvod LM3478 [11], který mne velmi zaujal. Vyžadoval ke své činnosti minimum okolních součástek. Zapojení je na obr. 2.2.3.



Obr. 2.2.3 – Verze VN zdroje s LM3478

Obvod LM3478 měl integrované snímání hodnoty tekoucího proudu, stejně jako řídicí driver výkonového tranzistoru. Jednoduché nastavení pracovní frekvence jediným rezistorem. Nicméně jeho úskalí bylo v pracovní frekvenci. Ta byla mnohem vyšší, než u obvodu MC34063. Vysoká frekvence znamená možnost použití mnohem menších indukčností. Jenomže při použití obvodu LM3478 nastalo úskalí. Jeho pracovní frekvence nešla snížit pod kmitočty 100 kHz. Ovšem i tato frekvence je příliš vysoká pro cívky s vysokou indukčností (jednotky mH). Obvod byl pro tyto cívky i se svou nejnižší pracovní frekvencí příliš rychlý a cívka s velkou hodnotou indukčnosti nestíhala v sobě uložit magnetickou energii. Proto jsem musel použít cívky s nižší hodnotou indukčnosti a tento

handicap vyrovnat vyšším proudem, který bude po zapnutí cívkou protékat. Protože jsem se chtěl dostat na hodnotu 500 V, tento proud byl již značný. Docházelo k silnému rušení a ke kolísání napájecího napětí vlivem vysokého impulsního odběru. Odběr toho zdroje byl vyšší než 3 A. To je pro takovou aplikaci příliš mnoho. Samozřejmě tento obvod pracuje v režimu, kdy zvyšuje napětí obvykle jen o několik voltů. Do aplikace, kde požadujeme zvýšení výstupního napětí o stovky voltů se tedy vůbec nehodí. V nízkonapěťových zvyšujících aplikacích funguje velmi dobře proto, že potřebujeme zvýšit napětí jen o malou hodnotu, což při vysoké pracovní frekvenci pokryje i malá indukčnost a protože zvýšení je malé, tak i proud protékající cívkou nemusí být příliš velký (v závislosti na zátěži). S tímto zapojením jsem dlouho laboroval, ale došel jsem pouze k tomu, že vlivem vysoké pracovní frekvenci nemůžu použít cívky, které mají vyšší indukčnosti jak řádově stovky μH . S touto hodnotou jsem dostal požadované výstupní napětí s impulsním odběrem kolem 1,2 A. I tak rušení způsobené velkým odběrem však znemožňovalo funkci ostatních částí zapojení. S menší hodnotou indukčnosti strmě narůstal odběr pro dosažení požadovaného výstupního napětí. Navíc docházelo k přehřívání výkonového spínacího tranzistoru, který se uzavíral jen na krátký časový úsek. Zbytek spínací periody zůstal otevřený, kdy jím procházel značný proud v době, kdy docházelo k nabíjení magnetického obvodu cívky (ukládání energie do induktoru). Právě dlouhá doba, po kterou byl tranzistor otevřen je důvodem vysokého impulsního odběru zdroje. Na obr. 2.2.4 je schéma testovací verze vysokonapěťového zdroje s obvodem LM3478. Na této verzi bylo zkoumáno rušení zdroje na zbytek zapojení, zejména části detektoru (tvořeným Q_1). Výsledek ukazoval, že stále dochází k rušení, které ovlivňuje funkci zbytku zapojení. V této verzi se již také nachází ve výsledku použitá aktivace vysokonapěťového zdroje, která uvádí vysokonapěťový zdroj v činnost zapnutím jeho napájení a stejně je i zapojení detektoru.



Obr. 2.2.4 – Experimentální verze VN zdroje s LM3478

Jelikož mi nevadilo použít větší cívku a klíčovou podmínkou bylo snížení spotřeby zdroje, musel jsem použít nižší pracovní frekvenci, aby se dala použít i velká indukčnost. Té bude stačit menší pracovní proud a tak dojde ke snížení spotřeby a nižšímu rušení. Navíc, spínací tranzistor nebude tolik zatěžován a nebude to již vést k přehřívání zdroje, což mělo negativní vliv i na stabilitu výstupního napětí. Proto jsem obvod LM3478 opustil a vydal se laborovat s již osvědčeným a ve výsledku použitým obvodem MC34063. Ten dovoľoval použití i cívek s velkou indukčností, protože jeho pracovní frekvence jde nastavit od desítek Hz do stovky kHz.

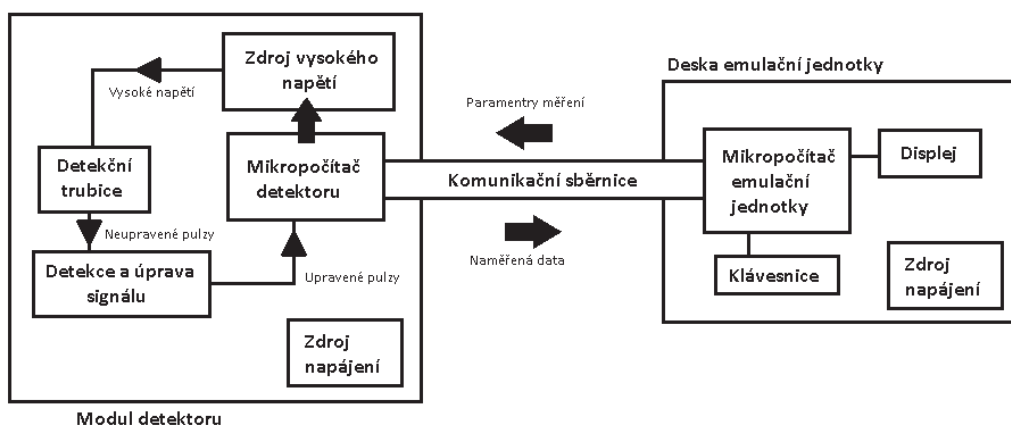
Detektor impulzů se během vývoje prakticky nezměnil, stejně tak aktivační obvod vysokonapěťového zdroje. Docházelo jen ke změně hodnot použitých součástek a u detektoru došlo k doplnění RC filtru a komparátoru citlivostního prahu. Co se týče procesorové části, ta fungovala již v první verzi, takže do finálního zapojení se dostala prakticky beze změn. To platí i o modulu vyhodnocovací jednotky. Jediné změny, které zbytek zapojení mohly ovlivnit byla dostupnost a počet jednotlivých vývodů, které se u jednotlivých procesorů liší. Použití vývojové desky s Atmega32 v roli vyhodnocovací jednotky totiž ze začátku nebylo uvažováno a byla navržena jednoúčelová deska s ATmega8. Z výše uvedených důvodů však pro roli vyhodnocovací jednotky byla následně zvolena právě vývojová deska EvB 4.3 s mikropočítačem ATmega32.

3 Popis finální verze detektoru ionizujícího záření

V této kapitole je popsána funkce a obvodové řešení finálního zařízení. Tato kapitola je výsledkem rešerše teoretických znalostí popsaných v kapitole 1 a ovlivněných poznatky získaných z postupného vývoje, popsaného v kapitole 2.

3.1 Blokové schéma celého zařízení

Blokové schéma zařízení popisuje celkový přístroj, tedy jak vlastní modul detektoru, tak i vyhodnocovací, emulační jednotku. Emulační jednotka zde používá rozhraní, které je zamýšleno pro ovládání vlastního detektoru v robotovi. Umožňuje tak modul detektoru vyzkoušet ještě dříve, než bude instalován do samotného robota. Svým způsobem tak emuluje příkazy od robota, které však zde zadává přímo uživatel. Blokové schéma je ukázáno na obr. 3.1.1.



Obr. 3.1.1 – Blokové schéma zařízení

Blokové schéma je rozděleno do dvou částí. První je modul samostatného detektoru, druhou je deska emulační jednotky. Obě části mezi sebou komunikují skrze obousměrnou sběrnici, obsluhovanou mikropočítači, kdy každá jednotka má svůj vlastní mikropočítač. Deska emulační jednotky obsahuje displej a tlačítka a slouží jako komunikační interface mezi zařízením a uživatelem. Její mikropočítač zpracovává přijatá data, obsluhuje displej a řídí komunikaci po sběrnici. Mikropočítač vlastního detektoru má 3 úkoly. Jednak ovládá zdroj vysokého napětí, jelikož vzhledem k vysokému statickému odběru zdroje vysokého napětí není vhodné, aby zdroj byl v činnosti i během doby, kdy není vyžadováno měření.

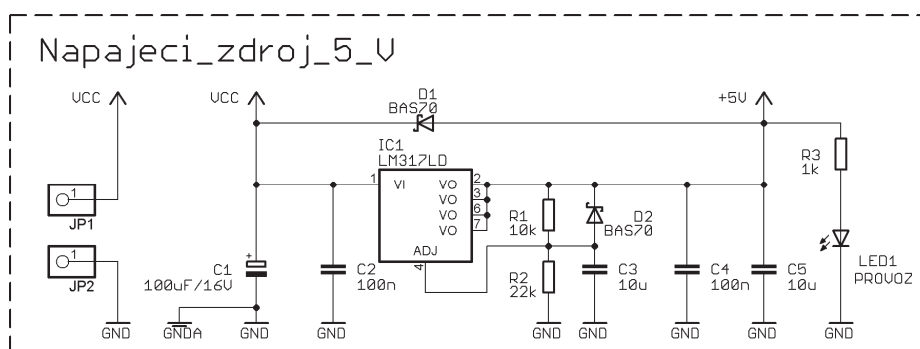
Druhý úkol je registrace zachycených pulzů, kdy základní úprava impulzů je zde prováděna fyzicky, nikoliv softwarově. Třetí úkol mikropočítače v modulu detektoru je odesílání dat na dotaz dominantní řídicí jednotky a příjem příkazu vlastního měření (typicky aktivace zdroje).

3.2 Modul detektoru

V této kapitole je podrobně popsán detektor dle všech funkčního bloků z blokového schématu uvedeného v kapitole 3.1.

3.2.1 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj slouží k zejména k napájení vyhodnocovací části nízkým napětím 5 V. Schéma zdroje je na obr. 3.2.1.1.



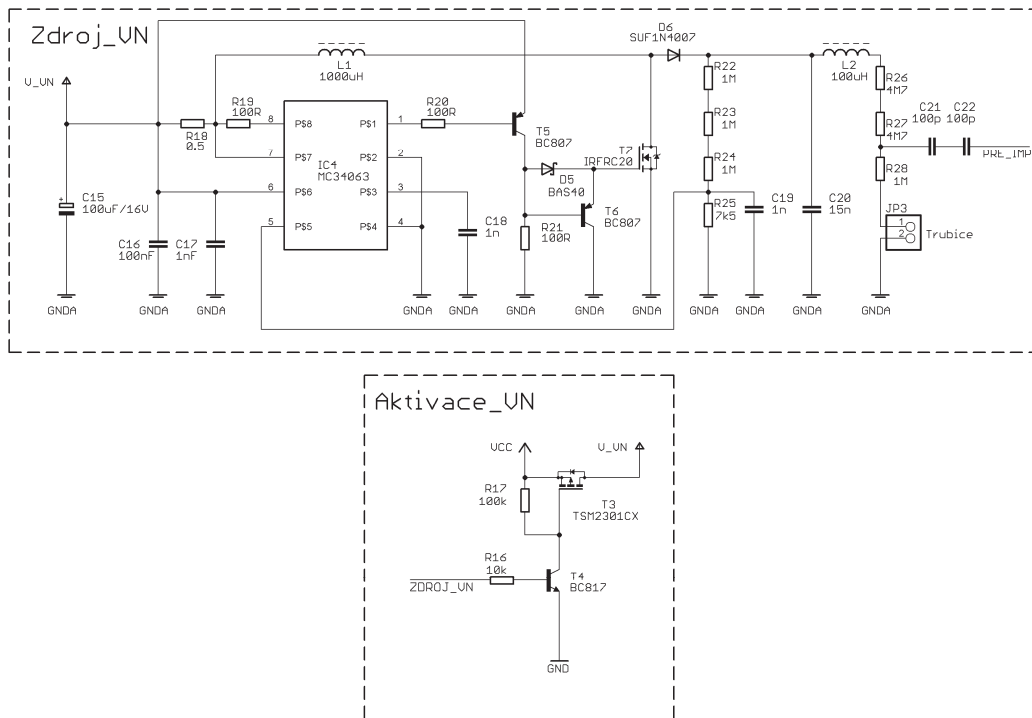
Obr. 3.2.1.1 – Napájecí zdroj 5V

Konektory **JP₁** a **JP₂** slouží k napájení celého modulu detektoru. Je z nich přímo odebráno napětí **V_{CC}** pro napájení vysokonapěťového zdroje. Napětí je filtrováno tantalovým kondenzátorem **C₁** a také je z toho napětí vyráběno přímo napětí 5 V pro procesor a ostatní části. Stabilizace napětí je prováděno obvodem **IC₁** pomocí LM 317 [12] v klasickém zapojení. Kondenzátory **C₂** a **C₄** zajišťují stabilitu obvodu **IC₁**, kondenzátor **C₃**, zlepšuje stabilitu výstupního napětí a filtruje nežádoucí šумы. Diody **D₁** a **D₂** jsou ochranné. Zabraňují zničení obvodu **IC₁**, ke kterému dojde, pokud bychom zkratovali napájecí konektory **JP₁** a **JP₂**. Pak by se kondenzátory, které jsou zapojeny na napájecí větví 5 V vybíjely zpětně skrze obvod **IC₁** a tímto proudem by jej zničily. Diody se v tomto případě otevřou a vybíjecí proud jde přes ně, ne přes obvod **IC₁**. Chrání jej tak

proti zničení. Ochrannou funkci plní hlavně dioda D_1 . Dioda D_2 je jen pojistka, aby obvod nemohl zničit vybíjející se kondenzátor C_3 . Výstupní napětí je nastaveno děličem R_1 a R_2 . C_5 tvoří doplňkovou filtraci a zajišťuje stabilitu napětí na výstupu, zejména pro zpětnou vazbu tvořenou rezistory R_1 a R_2 . Pro zajištění stability je zapojení doplněno dalšími filtračními kondenzátory v různých částech zapojení. Každý integrovaný obvod má svoje vlastní blokovací kapacity, umístěné co nejbližně vlastnímu pouzdru integrovaného obvodu. Provoz modulu svým svitem indikuje LED dioda LED_1 . V napájecím zdroji se také setkávají dva zemní vodiče. Vodič GND_A je společná země vysokonapětového zdroje a země GND je zem zbytku zapojení. Rozdělení zemí a spojení do jednoho bodu až u napájecího konektoru bylo provedeno z důvodu minimalizace rušení. Zdroj má poměrně vysoký odběr (200 mA) a není vhodné, aby tento vysoký pracovní proud tekla přes zemní část ostatních částí. Došlo by k vytvoření nežádoucích úbytků napětí na zemních sekcích, které by způsobovaly kolísání napájecího napětí, což by v případě mikropočítače mohlo vést k narušení jeho funkce a ke zhroucení chodu programu.

3.2.2 Zdroj vysokého napětí

Zdroj vysokého napětí je tvořen z dnešního pohledu již zastaralým obvodem MC34063 [13], který je však díky nízké ceně a minimem externích součástek nutných pro jeho funkci stále používán. Hodí se do nenáročných aplikací, pokud nepožadujeme velkou efektivitu. Obvod hlídá pomocí snímacího rezistoru proud tekoucí skrze cívku. Změnou frekvence oscilátoru, který řídí spínání cívky se tak snaží udržet plynulé ukládání energie do magnetického obvodu cívky v závislosti na zátěži. Výstupní napětí je regulováno komparátorem, který porovnává výstupní napětí (snížené napětovým děličem) s interní referencí. Pokud měřené napětí překročí svou hodnotou napětovou referenci, komparátor svým výstupem zablokuje výstup oscilátoru a ustane tím tak spínání cívky obdélníkovým signálem. Dlužno podotknout, že tento způsob přerušování budícího obdélníkového signálu má nevýhodu v silném rušení, které zdroj s tímto obvodem produkuje. To sebou nese nutnost odstínění celého zdroje a přináší tak další technické komplikace. Schéma zdroje (včetně ovládání jeho napájení) je na obr. 3.2.2.1.



Obr. 3.2.2.1 – Zdroj vysokého napětí + jeho aktivace

Celý zdroj vysokého napětí je umístěn na separátní desce s plošnými spoji. Díky tomu má tak zdroj vlastní lokální filtrační kondenzátor C_{15} . Stabilitu funkce integrovaného obvodu IC_4 zajišťují keramické kondenzátory C_{16} a C_{17} , umístěné co nejbližně napájecím vývodům obvodu IC_4 . Snímání proudu protékajícího indukčností L_1 zajišťuje rezistor R_{18} s hodnotou $0,5 \Omega$. Obvod IC_4 spíná tranzistor T_5 , který ovládá vysokonapěťový NMOS tranzistor T_7 , který spíná cívku L_1 proti zemi G_NDA . Při uzavření tranzistoru T_7 dojde ke vzniku napěťové špičky, která je přenesena přes diodu D_6 a „uložena“ ve filtračním foliovém kondenzátoru C_{20} . Tento kondenzátor má hodnotu 15 nF , což se zdá na první pohled docela málo. Jenže zdroj pracuje v podstatě skoro naprázdno, trvalý odběr představuje akorát zpětná vazba tvořená R_{22} , R_{23} , R_{24} , R_{25} (odběr trubice při zapálení výboje je zanedbatelný, zvlášť díky velkému odporu jejího předřadníku tvořeným R_{26} , R_{27} , R_{28}). Druhý důvod tak malé kapacity C_{20} je bezpečnost. Během provozu zdroje na této kapacitě poměrně vysoké napětí, zhruba 500 V . Kondenzátor s vysokou kapacitou, nabitý na takové napětí, je velmi nebezpečný a i letný dotyk by mohl způsobit smrt obsluze. Navíc, velká kapacita by zůstávala nabitá na smrtící napětí 500 V i po vypnutí celého vysokonapěťového zdroje a trvalo by dlouho, než by se vybila skrze rezistory $R_{22} - R_{25}$ tvořící vybíjecí obvod. Proto byl zvolen kompromis mezi zvlněním výstupního napětí a dobou, za kterou se kondenzátor po vypnutí vybijí. V daném zapojení se s uvedenými

součástkami kondenzátor C_{20} zcela vybije za méně jak 200 ms, což považuji za dostatečnou dobu, než se obsluha stihne dotknout vysokonapěťové části po vypnutí napájení. Rezistory R_{22} , R_{23} , R_{24} , R_{25} mají kromě funkce vybíjecího obvodu funkci i napěťové zpětné vazby, kdy tento napěťový dělič svým poměrem přizpůsobuje výstupní napětí vzhledem k napěťové referenci uvnitř integrovaného obvodu IC_4 , se kterou se výstupní napětí porovnává. Stabilitu zpětné vazby vylepšuje kondenzátor C_{19} , který eliminuje nežádoucí rušení. Pokud dojde k překročení výstupního napětí, ustanou kmity oscilátoru a obvod IC_4 čeká, než výstupní napětí klesne pod určitou úroveň, kdy oscilátor zase zapne. Výstupní napětí tak není konstantní, ale je zvlněné, což bude i dále měřeno. Vzhledem k vysokému pracovnímu napětí, je hodnota $3\text{ M}\Omega$ rozložena do třech samostatných rezistorů $1\text{ M}\Omega$, což zabraňuje nebezpečí napěťového průrazu. Pracovní kmitočet oscilátoru je nastaven kondenzátorem C_{18} a je poměrně nízký (v akustickém pásmu), jelikož cívka L_1 má poměrně vysokou indukčnost a velké indukčnosti obecně mají nízké rezonanční kmitočty. Součástky D_5 , T_6 a R_{21} zrychlují uzavírání tranzistoru T_7 , tím, že při uzavření tranzistoru T_5 , odvede T_6 zbytkový náboj kapacity hradla tranzistoru T_7 rychle k zemi. Tím se tranzistor T_7 rychleji uzavírá a to přispívá k vyššímu získanému výstupnímu napětí, protože indukované napětí je tím vyšší, čím je rychlejší změna protékajícího proudu v čase. Pokud byl v zapojení ponechán jen rezistor R_{21} , do kterého se vybíjela kapacita hradla tranzistoru T_7 , tranzistor je uzavíral o něco pomaleji a výstupní napětí spadlo asi o 18 V (změřeno na prototypu realizovaném na nepájivém kontaktním poli). Zapojení je tak jakousi náhradou za integrovaný driver, který dokáže kapacitu hradla rychle nabít a NMOS tranzistor se tak otevře velmi rychle. Zároveň dokáže driver tuto kapacitu velmi rychle vybit a tranzistor tak rychle zavřít. V době realizace však vhodný driver nebyl k dispozici, tak jsem se musel spokojit s touhle méně dokonalou, přesto ale funkční náhradou.

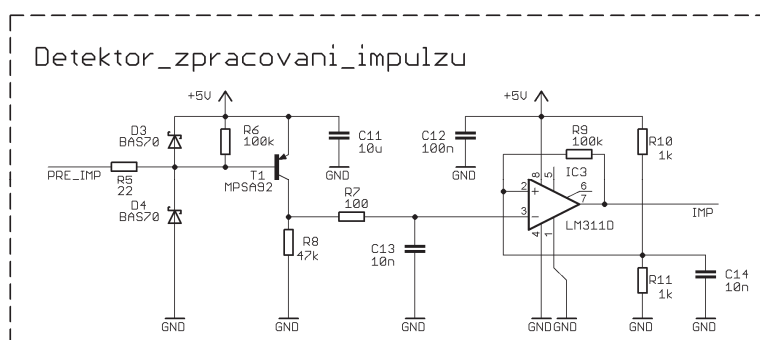
Výstup vysokonapěťového zdroje je opatřen filtrem (tvořeným cívkou L_2), který brání šíření rušení do dalších částí zařízení, skrze vyhodnocovací obvod trubice. Za filtrem je umístěn odporový předřadník $R_{26} - R_{28}$. Předřadník slouží k tomu, že pokud v trubici dojde k výboji a začne jí protékat proud, tak na předřadníku dojde k takovému úbytku napětí, že dojde k poklesu napětí na samotné trubici na takovou mez, kdy dojde k zhasnutí výboje v trubici. Trubice je tak opět připravena k použití. Předřadník navíc slouží jako dělič napětí pro přizpůsobení amplitudy impulzů do dalších částí obvodů. Záporné impulzy, indikující vzniklý výboj v trubici (a tím zachycenou interakci částice s trubicí)

jsou přeneseny přes oddělovací kondenzátory C_{21} a C_{22} . Ty jsou zdvojeny z důvodu, že nebyl dostupný kondenzátor 50 pF na tak vysoké napětí. Byly proto použity dva 100 pF kondenzátory v sérii. Jednak klesla jejich kapacita na polovinu a navíc, jsme získali bezpečnostní rezervu průrazného napětí (cca 2 kV). Následně jsou tyto prvotní impulzy (označeny na schématu jako PRE_IMP) předávány k dalšímu zpracování.

Jak již bylo řečeno, vysokonapěťový zdroj je ovládán z mikropočítače pomocí vodiče „ZDROJ_VN“. Pokud na port, ke kterému je tento vodič připojen, pošleme log. 1, sepne tak tranzistor T_4 , který otevře tranzistor T_3 . Tím je zdroj připojen k napájecímu napětí V_{CC} a vysokonapěťový zdroj tak může začít generovat vysoké napětí o velikosti 500 V pro trubici připojenou na konektor JP_3 .

3.2.3 Obvody úpravy impulzů

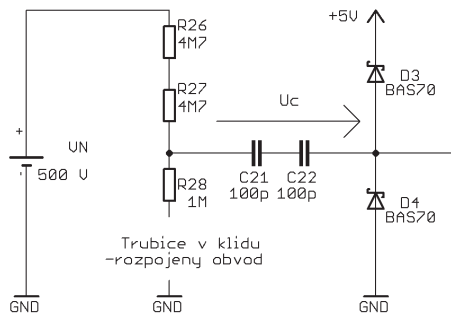
Tato obvodová část obvodově upravuje charakter impulzů, získaných z trubice. Tento funkční blok má zejména za úkol upravit amplitudy pulzů tak, aby šly mikropočítačem detektoru zpracovat a dále eliminuje některé rušivé vlivy, které by jinak mohly být brány jako další impulzy a docházelo by tak ke zkreslení počtu zachycených interakcí radioaktivního záření. Schéma zapojení je na obr. 3.2.3.1.



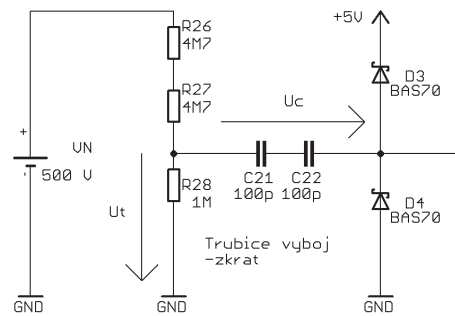
Obr. 3.2.3.1 – Obvod úpravy zachycených impulzů

Zachycené, neupravené impulzy, které pocházejí přímo od trubice prochází skrze ochranný rezistor R_5 na diodový omezovač amplitudy, který tvoří diody D_3 a D_4 . Impulzy mají zápornou amplitudu, která může dosahovat i stovky voltů a ovlivňuje ji zejména napětí, na které jsou nabitý vazební kondenzátory C_{21} a C_{22} v minulé kapitole 3.2.2. Situaci propojení popisuje obrázek 3.2.3.2 (klidový stav) a obr. 3.2.3.3 (výboj). Ochranný rezistor

R_5 není pro větší přehlednost zakreslen. Svou velikostí se ani neúčastní. Jeho úkolem bylo pouze chránit tranzistor T_1 před zničením, ke kterému mohlo dojít, pokud by byl uzel diod D_3 a D_4 (a tím i báze tranzistoru T_1) připojen(a) rovnou k zemi. Toto nebezpečí hrozilo u laboratorních vzorků, kde tato část byla realizována po dílčích částech na separátních plošných spojích). Nicméně R_5 ve finálním zapojení už zůstal. Pro jistotu.



Obr. 3.2.3.2 – Klidový stav



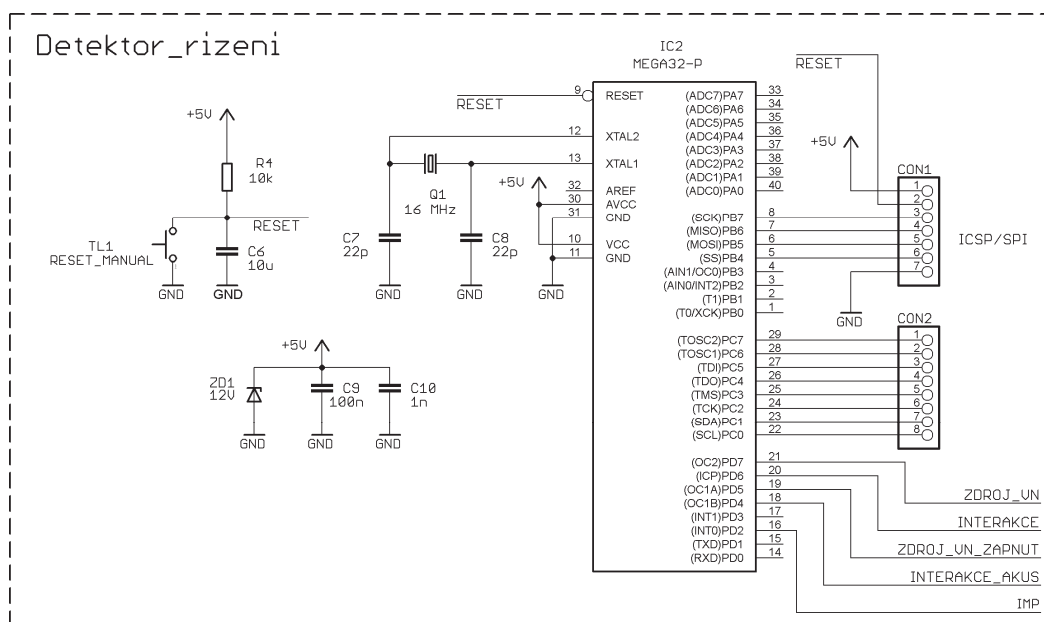
Obr. 3.2.3.3 – Stav při výboji

Pokud je obvod v klidu, nabije se dvojice kondenzátorů C_{21} a C_{22} skrze diodu D_3 a dvojici rezistorů R_{26} , R_{27} na napětí U_C , které je v konečném důsledku dáno pouze rozdílem napětí vysokonapěťového zdroje a napájením slaboproudé části. V případě výstupního napětí 500 V u vysokonapěťového zdroje a 5 V napájecí části jsou kondenzátory C_{21} a C_{22} nabity na napětí U_C o velikosti 495 V. Pokud dojde k výboji v trubici, přizemní se rezistor R_{28} . Vznikne na něm úbytek napětí U_t , který je dán součtem úbytku napětí na vlastním rezistoru R_{28} a úbytku napětí na vlastní detekční trubici. O tento úbytek U_t se sníží výsledné napětí U_C . Dle orientace napětí U_C vidíme, že katoda diody D_4 je na zápornějším potenciálu, než její anoda. Může se proto otevřít a zkratuje příliš vysoký záporný impuls k zemi **GND**. Zkráceně lze činnost amplitudového omezovače tvořeném diodami D_3 a D_4 popsat tak, že nepropustí impuls s vyšší amplitudou, než 5,3 V (5 V napájení + 0,3 V úbytek na Schottkyho diodě, které jsou zde na místě D_3 a D_4 použity). Amplituda s vyšší amplitudou, než 5,3 V je „uříznuta“ otevřením diody D_3 a zkratováním tak impulsu na napájecí větev. Pokud má impuls zápornější amplitudu, jak -0,3 V, je opět zkratován k zemi **GND** skrze diodu D_4 . Impulzy s nebezpečně vysokou kladnou amplitudou vznikají při zhášení trubice, kdy se vazební kondenzátory C_{21} a C_{22} nabíjejí, nebezpečné impulzy s příliš vysokou zápornou amplitudou vznikají právě při výboji v trubici, kdy se dvojice kondenzátorů C_{21} a C_{22} vybíjí. Omezovač amplitudy chrání

tak zvláště tranzistor T_1 před proražením. I tak je pro zvýšení spolehlivosti na místě T_1 použit vysokonapěťový typ, který má zvýšené průrazné napětí pro případ, že by došlo k selhání diodového omezovače. Tranzistor T_1 registruje zmenšené záporné impulzy a spolu s R_8 slouží jako převodník úrovní, kdy ze záporných impulzů s amplitudou 0 – (-0,3 V) tvoří kladné impulzy s amplitudou 0 – 5 V. Citlivost převodníku úrovní s T_1 je nastaven rezistorem R_5 . Napěťové impulzy kladných amplitud jsou tvořeny jako úbytek napětí na rezistoru R_8 . Následně je prováděna filtrace RC článkem, tvořeným R_7 a C_{13} , zejména eliminujeme impulzy, které nepochází od trubice, ale od rušení (například od vysokonapěťového zdroje). Komparátorem IC_3 [14] je realizován citlivostní práh detektoru, kdy vyfiltrované impulzy, které nemají dostatečnou amplitudu, nestačí k překlopení komparátoru a nejsou tak dále registrovány. Velikost citlivostního prahu, kdy je velikost amplitudy již dostatečně velká k překlopení komparátoru a tedy k dalšímu zpracování, je nastavena odporovým děličem tvořeným R_{10} a R_{11} a tvoří cca polovinu napájecího napětí. Komparátor má také zavedenou slabou hysterezi, tvořenou rezistorem R_9 , aby nedošlo k rozkmitání komparátoru během překlápění, kdy je snímaná amplituda velmi těsně blízko nastavenému prahu citlivosti. Důvod použití komparátoru IC_3 je snaha o eliminaci sekundárních impulzů, které vznikají při zhášení výboje v trubici a které mají poměrně malou amplitudu. Osciloskopická měření ukázala, že zařazením komparátoru jsme schopni se většiny těchto impulzů zbavit a zvýšit tak přesnost počítání zachycených interakcí. Výstup komparátoru je již přiveden na port (přesněji řečeno na externí přerušovací vstup INT0) mikropočítače ATmega32, k programovému zpracování.

3.2.4 Obvody řízení

Srdcem celého modulu detektoru je mikropočítač ATmega32 [15]. Má několik úkolů. Jednak počítá zachycené impulzy a také zajišťuje komunikaci s vyhodnocovacím modulem skrze sběrnici SPI. Mikropočítač dále ovládá (skrže tranzistor T_3 , uvedeno v kapitole 3.2.2) vysokonapěťový zdroj a rozhraní pro uživatele, které indikuje stav detektoru pomocí několika diod přímo na jeho desce. Dále je vybaven akustickou signalizací přijatého impulzu, pomocí piezo elektrického měniče (tvoří charakteristickou akustickou indikaci). Schéma řídicí části je na obr. 3.2.4.1.

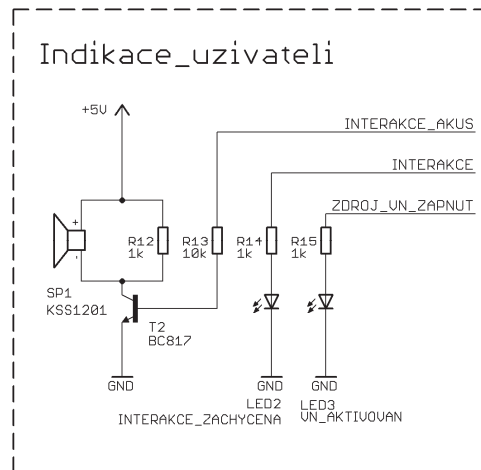


Obr. 3.2.4.1 – Schéma řídicí části

Vlastní mikropočítač IC_2 potřebuje ke své správné činnosti jen několik elementů zapojených externě. Jedna je jeho napájení filtrováno dvojicí kondenzátorů C_9 a C_{10} a dále je mikropočítač chráněn proti přepět'ovým špičkám, díky ZD_1 , která je svede bezpečně k zemi GND . Špatně vyfiltrované napájení, včetně napět'ových špiček má za následek riziko zatuhnutí jednočipového mikropočítače a vůbec snižuje spolehlivost a odolnost zapojení. Zapojení dále obsahuje restartovací obvod mikropočítače. Restart se provádí přizemněním vývodu „RESET“. To v tomto zapojení lze provést buď manuálně tlačítkem TL_1 , nebo pomocí RC článku, tvořeným rezistorem R_4 a kondenzátorem C_6 . Tento RC článek zajistí, že dojde k automatickému restartu mikropočítače, při připojení napájecího napětí, což snižuje riziko zatuhnutí mikropočítače IC_2 , během najíždění napájecího napětí. Běh programu je řízen vnitřním oscilátorem, jehož kmitočet je nastaven externím krystalem Q_1 na kmitočet 16 MHz. Kondenzátory C_7 a C_8 slouží k nastartování kmitů krystalového oscilátoru a jejich velikost je zvolena jako kompromis mezi spolehlivostí náběhu oscilací a stabilitou taktovacího oscilátoru. Mikropočítač IC_2 má vyvedeno několik bran, jejichž jednotlivé porty slouží k indikaci stavu uživateli, přenosu/čtení informací, nebo ovládání jiných částí zapojení. K čtení impulzů, ovládání stavových LED diod a ovládání VN zdroje slouží 5 portů, z brány D, označených jako PD0 – PD7. Čtyři z nich slouží jako výstupní (ovládání VN zdroje skrze PD7, 2 LED diod (PD6 a PD5) a 1 piezo elementu (PD4)). Poslední, přerušovací vstup INT0, slouží k registraci impulzů. Na

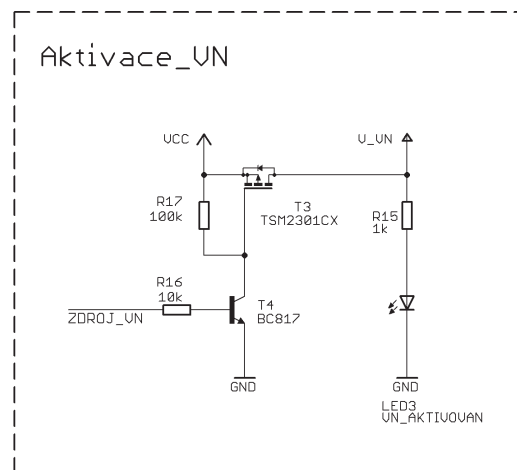
konektory, které slouží k propojení modulu s okolním světem (například s vyhodnocovací jednotkou), je vyvedena na konektory **CON₁** a **CON₂**. Na **CON₁** je vyvedena sběrnice SPI, která slouží k přenosu dat mezi moduly. Zároveň, datové vodiče sběrnice SPI, spolu s vyvedeným vodičem RESET se používají pro programování přímo v aplikaci, které se nazývá **ICSP** (*In Circuit Serial Programming*). ICSP má obrovskou výhodu v tom, že jde naprogramovat mikropočítač bez nutnosti jeho vyjmutí a vložení do programátoru. Jeho programování tak sestává pouze v připojení programovacího kabelu. **CON₁** má pro větší pohodlí vyvedeno i napájení 5 V a zem **GND**, tudíž při programování, můžeme přivést programovacím kabelem rovnou i napájení z programátoru, které je samozřejmě nutné pro chod mikropočítače při jeho programování. Navíc, toto řešení zajišťuje stejné napětí mezi programátorem a programovaným mikropočítačem. Pokud má programátor separátní napájení, stejně jako programovaný mikropočítač a společná bude pouze zem **GND**, hrozí, že napájecí napětí nebudou stejná. Pokud bude rozdíl napájecích napětí příliš velký, vyrovnávací proud může téct nejen zemí **GND**, ale i skrze datové vodiče. Pak může dojít k poškození jak programátoru, tak i programovaného mikropočítače. Proto jsem zvolil vyvedení napájecího napětí a možnost „vypůjčení“ si napájení od programátoru. Na **CON₂** je vyvedena celá osmice portů brány C. je zde vyvedena dvojice vodičů SDA a SCL sběrnice I²C, pro případné využití modulu detektoru na společné sběrnici, kde je I²C mnohem lepším řešením. Ostatní vývody **CON₂** mohou sloužit k rozšíření aplikace o nové funkce. Mikropočítač ATmega32 jsem zvolil z důvodu, že v aplikaci byl často laděn program a zrovna tento typ má od menších verzí vyšší počet dovolených přepsání vnitřní FLASH paměti pro program. Fyzicky, ačkoliv je použito programování ICSP, je vlastní mikropočítač **IC₂** umístěn v patici. Je to z důvodu možnosti jeho výměny v případě jeho „odchodu“.

S obvody řízení souvisí i indikace stavů detektoru. Ta je přímo buzena porty PD4 – PD6. V podstatě jde o dvojici indikačních LED a jednoho akustického indikátoru. LED dioda **LED₂**, která je připojena na port PD6, svým svitem oznamuje, že mikropočítač zaznamenal impuls pocházející z interakce. LED dioda **LED₃**, připojena na port PD5 svým svitem indikuje činnost VN zdroje a připomíná tak přítomnost nebezpečného vysokého napětí. Schéma je na obr. 3.2.4.2.



Obr. 3.2.4.2 – Indikační část

PD5 a PD7 jsou vlastně svým stavem vždy identické. Toto programové řešení (a využitím jednoho portu mikropočítače navíc, pro diodu **LED₃**) bylo použito proto, že to bylo jednodušší, než na první pohled mnohem jednodušší připojení diody **LED₃** přímo na napájecí větev zdroje V_{VN}, jak je ukázáno na obr. 3.2.4.3. Vzhledem k tomu, že byl použit jednostranný plošný spoj, je tento elektrický spoj komplikovanější a vede k nežádoucímu dělení zemnicího polygonu, při dodržení polohy LED diody **LED₃** na plošném spoji.



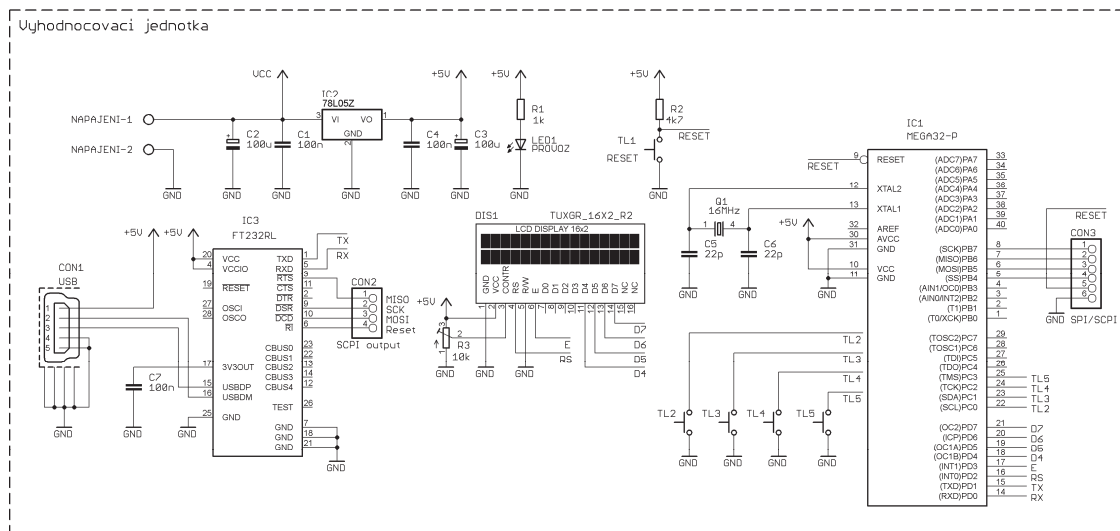
Obr. 3.2.4.3 – Ideové zapojení LED diody LED₃

Poslední indikační část modulu detektoru je akustická, skrze piezo měnič **SP₁**. Ten je ovládán skrze tranzistor **T₂** portem PD4 mikropočítače **IC₂**. Rezistor **R₁₂**, paralelně připojený k piezo měniči **SP₁**, slouží k vybíjení zbytkového náboje, který na měniči **SP₁**

zůstal po uzavření tranzistoru T_2 . Vybíjení je nutné, jelikož piezo měnič SP_1 má charakter kondenzátoru. Bez rezistoru R_{12} by se tak membrána piezo měniče nevracela do výchozí polohy, neboť by byla stále prohnuta díky zbytkovému náboji. Měníč by tak nebyl schopen reprodukce. Akustický měnič je použit jednoduchý, nesamokmitající, tón je tedy dán programově.

3.3 Modul vyhodnocovací jednotky

Pro tento modul byl použit vývojový modul EvB 4.3 firmy AND-TECH [16], [17] který má na jedné desce řadu periférií, včetně dvouřádkového displeje, který použijeme. Jednotlivé periferie jsou na desce zcela odděleny, společné je pouze napájení. Propojení mezi perifériemi a samotným mikropočítačem se realizuje pomocí propojovacích lišt a vodičů. Tento vývojový modul jsem použil proto, že celá tato jednotka je testovacím přípravkem modulu detektoru a není nutná k jeho samostatné funkci. Schéma zapojení je uvedeno na obr. 3.3.1.



Obr. 3.3.1 – Schéma zapojení vyhodnocovací jednotky

Tuto jednotku lze napájet ze dvou zdrojů, buď přímo z USB konektoru CON_1 , což je výhodné pro programování mikropočítače IC_1 , kdy napájení bereme právě z počítače, při programování. Druhá možnost je napájet modul ze separátní svorkovnice $NAPAJENI-1$ a $NAPAJENI-2$. Tato možnost je využívána v provozu, kdy je z této svorkovnice odebíráno napájení i pro vysokonapěťový zdroj v modulu detektoru (a zároveň se z něj

tvoří 5 V napájení pro tvarovací obvody a mikropočítač v tomto modulu). V tomto případě si potřebné napětí 5 V, nutné pro činnost mikropočítače **IC₁** vyrábíme monolitickým stabilizátorem 7805. Tento stabilizátor **IC₂** je opatřen blokovacími kapacitami **C₁ – C₄**, které filtrují napájení a zaručují stabilitu stabilizátoru při měnícím se zatížení. Zapnutí modulu indikuje svým svitem LED dioda **LED₁**. Tento modul, stejně jako modul detektoru obsahuje restartovací tlačítko **TL₁** se svým pull-up rezistorem **R₂**. Mikropočítač **IC₁** je použit opět ATmega32, pro který je také tato vývojová deska určena. Mikropočítač je opět řízen krystalem **Q₁** s frekvencí 16 MHz, stejně jako v případě modulu detektoru. Také má stejné rozběhové kondenzátory **C₅** a **C₆**. Mikropočítač **IC₁** má vyvedeny všechny brány na kontaktní lišty, ve schématu (obr. 3.3.1) je však zakresleno jen to, co je z vývojové desky používáno. Použita je polovina brány C, která slouží pro čtení 4 tlačítek **TL₂ – TL₅**. Tato tlačítka nemají externí pull-up rezistory, ty jsou aktivovány přímo v mikropočítači **IC₁**. Brána D slouží k řízení displeje **DIS₁** a také má vyvedenou sériovou linku RS 232 pro naprogramování mikropočítače **IC₁**. Z brány B je opět využita sběrnice SPI, která může sloužit zároveň i pro naprogramování mikropočítače skrze ICSP. Vývojová deska obsahuje i programátor, tvořený **IC₃**. Jedná se o převodník USB/SPI (mimo jiné), který je určen pro sběrnici USB jako konvertor pro jiné typy sběrnic. V této aplikaci je využit jak část s RS 232, tak část s SPI. Mikropočítač je spojen sběrnicí RS 232 přímo s programátorem, sběrnici SPI si musí uživatel připojit kabelem sám (spojí se **CON₂** a **CON₃**). Sběrnice SPI, která je z převodníku **IC₃** vyvedena, zde nemá (kromě programování mikropočítače **IC₁**) jiný význam, proto je označena jako ICSP a je využívána i pro programování mikropočítače v modulu detektoru. V případě programování skrze RS232 je nutný emulační software, který upraví chování sběrnice USB tak, aby se tvářila jako klasická sériová linka RS232 a je třeba nahrát skrze ICSP do mikropočítače zaváděcí program, bootloader. Převodník **IC₃** pak již jen přizpůsobuje signál ke standartům sběrnice SPI.

Pro ovládání modulu detektoru slouží 4 tlačítka, umístěná na tomto vyhodnocovacím modulu, dvě tlačítka jsou pro start/stop měření, další dvě slouží pro výběr typu měření. Jako zobrazovací jednotka je použit LCD displej 2×16 řádků, na kterém se zobrazuje jednak uživatelská nabídka před zahájením měření a jednak zobrazuje i počet zachycených impulzů.

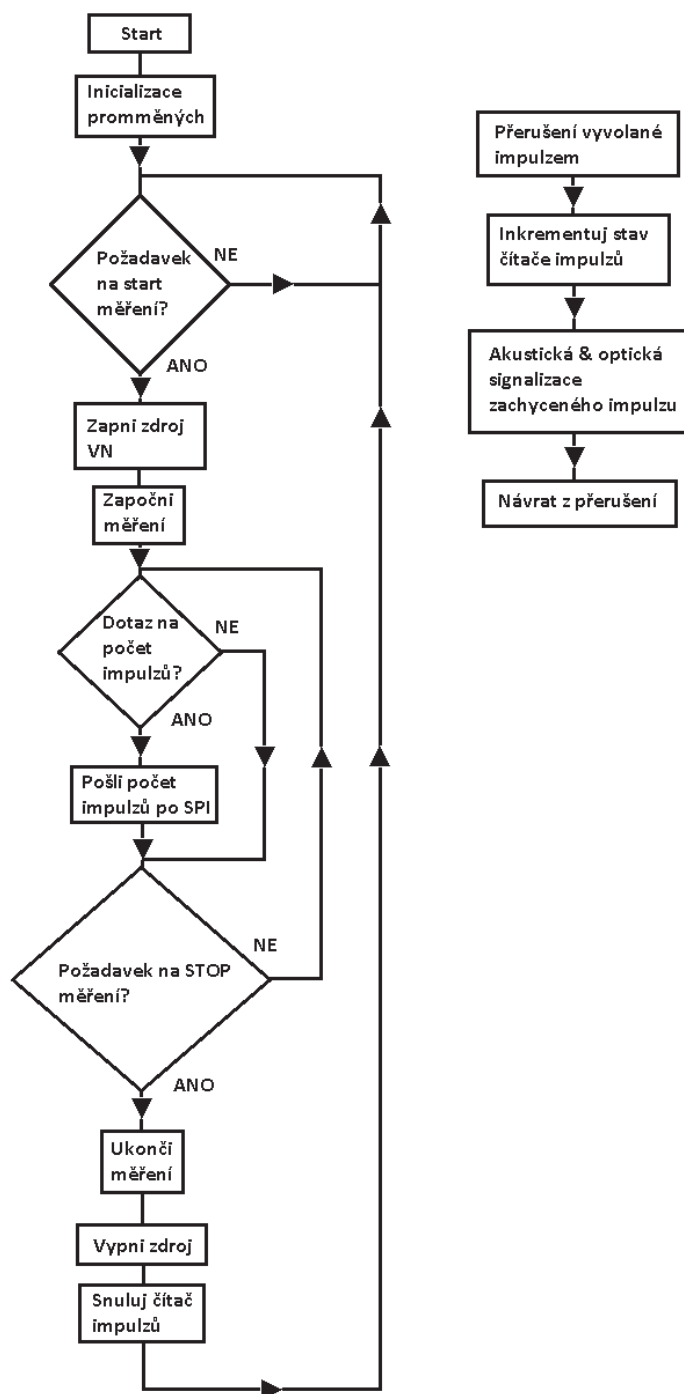
3.4 Program modulu detektoru

Program modulu detektoru je napsán v jazyce C, v mírné úpravě pro mikrokontroléry řady AVR (více v příkladech [18], [19], [20], [21]). Program definuje chování jednočipového mikropočítače jako Slave, z hlediska hierarchie sběrnice SPI. Chování celku je ve zkratce takové, že pouze reaguje na dotazy vyhodnocovací jednotky, která má roli dominantního členu (Master).

Modul detektoru rozeznává několik druhů příkazů, které jsou mu posílány skrze sběrnici SPI od vyhodnocovací jednotky Master. Na základě obdrženého příkazu pak vytvoří adekvátní odezvu. Odezva však není odesílána po SPI ve všech případech, kdy modul detektoru obdrží nějaký příkaz. Naopak, jedinou odeslanou odezvou skrze SPI je v základní funkci pouze počet zachycených impulzů. Zbytek tvoří odezvy, jako je zapnutí/vypnutí VN zdroje (hardwarová odezva), aktivace vlastního měřicího algoritmu (softwarová odezva). Řídící (vyhodnocovací jednotka v roli Master) tak může modulu poslat tři příkazy:

- Start měření
- Stop měření
- Dotaz na počet impulzů

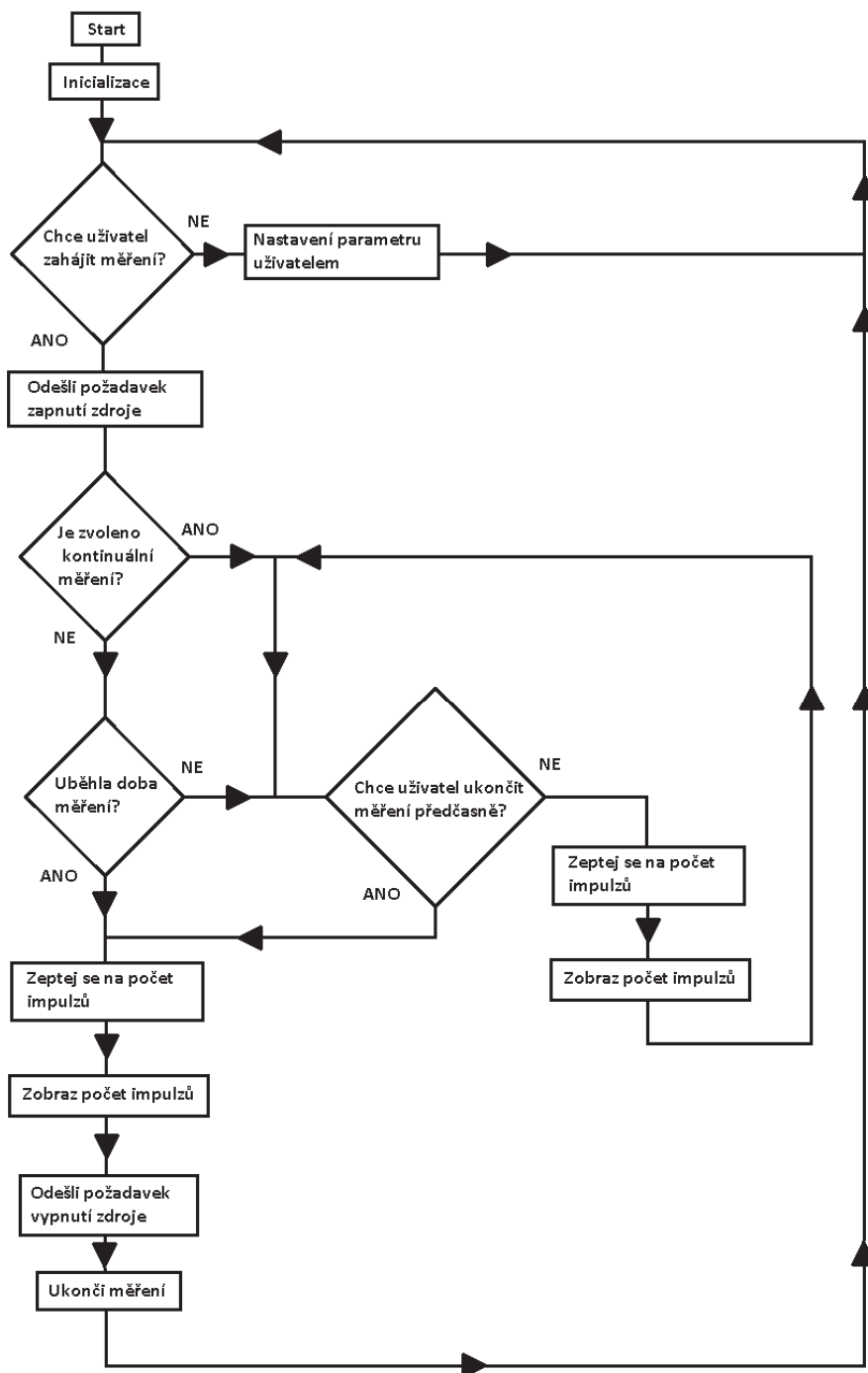
První dva příkazy aktivují/zastavují měřící smyčku a zároveň aktivují/deaktivují zdroj vysokého napětí. Jak již bylo řečeno v kapitole o samotném zdroji vysokého napětí, jeho činnost je vyžadována jen v době měření, jinak vzhledem k jeho energetické náročnosti není vhodné, aby byl aktivován trvale. Modul v hardwarově vyvolaném přerušení čítá impulzy. Přerušení je použito z důvodu co nejrychlejší reakce mikrokontroléru na registrovaný impuls, pokud se místo přerušení použije klasické kontrolování vstupního portu v pravidelných časových intervalech, bylo pozorováno u realizovaného vzorku mírně pomalejší odezvy. Zmíněné kontrolování splnění podmínky v pravidelných intervalech je použito pro kontrolu, jestli nebyl obdržen nějaký příkaz na SPI, nicméně i zde je výhodnější využít přerušení generované při aktivaci Slave (modulu detektoru), vodičem Slave Select. Podrobný diagram programu je na obr. 3.4.1. Ukázka kódu je uvedena v příloze.



Obr. 3.4.1 – Diagram programu modulu detektoru

3.5 Program vyhodnocovacího modulu

Stejně jako v předcházející kapitole je i tento program napsán v jazyce C, pro mikrokontroléry AVR. Funkční diagram je na obr. 3.5.1.



3.5.1 – Diagram programu vyhodnocovací jednotky

Na rozdíl od programu detektoru, který jen de facto přijímá příkazy a odpovídá na dotaz počtu impulzů, tento algoritmus celou komunikaci i řídí. Vyhodnocovací jednotka je tak v režimu Master. Tvoří požadavky zapnutí/vypnutí zdroje, zahájení/ukončení měření a posílá dotaz na počet impulzů, na který očekává odpověď.

Příkazy jsou tvořeny na základě interakce s uživatelem. Ten pomocí tlačítek zahajuje měření a vybírá čas pro měření. Stlačením tlačítka zahajujícím měřením se odešle příkaz k detektoru, který aktivuje jeho vysokonapěťový zdroj a dojde k zahájení měření. Pokud je vybráno kontinuální měření, vyhodnocovací jednotka se v pravidelných intervalech „ptá“ detektoru na aktuální počet zaznamenaných interakcí (počtu detekovaných impulzů) a detektor tento počet pravidelně poskytuje. Tento mód může být zastaven jen uživatelem který přeruší měření manuálně. Pokud je vybráno některé časově omezené měření, tak je ukončení vyvoláno automaticky, po uplynutí časového intervalu pro měření. Možnost ukončení měření dříve, tedy uživatelem, je zachována. Je to pro případ, že nechceme čekat tak dlouhou dobu, nebo chceme nastavit jiný režim měření. Při ukončení měření se zobrazuje aktuální počet impulzů a následně se vyšle příkaz pro vypnutí vysokonapěťového zdroje. Pak se měření ukončí a program vyhodnocovací jednotky se vrátí do čekací smyčky, kde si opět uživatel může volit druh měření a měření opět zahájit.

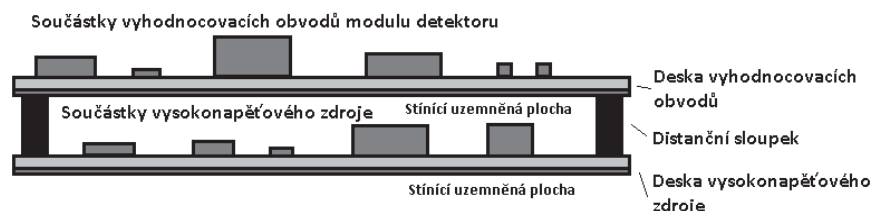
Vlastní tvar příkazů je číselný, tudíž každé číslo má přiřazeno nějakou funkci. Tento způsob byl použit proto, že příkazy jdou jen směrem od Mastera ke Slave a zpátky se vrací jen číslo, vyjadřující počet impulzů. Jelikož jsou pro oba směry použity separátní vodiče (MOSI, MISO), sběrnice SPI, je vzájemná komunikace velmi přehledná.

Spolu s tlačítky ke vzájemné interakci mezi přístrojem a uživatelem slouží i displej. Pokud není zahájeno měření, zobrazuje dostupné nabídky měření, ze kterých si uživatel vybírá. Vzhledem k tomu, že je použit poměrně malý displej, pouze s 2x16 znaky, je uživatelská nabídka poněkud strohá. Pokud je zahájeno měření, displej zobrazuje počet zaznamenaných impulsů. Je tedy vizuálním výstupem odezvy detektoru. Díky jednoduché, číselné formě příkazů a použité sběrnici SPI tak může být vyhodnocovací jednotka, tvořena vývojovou deskou, snadno nahrazena. To platí i pro pozdější využití modulu detektoru v praxi, kdy komunikaci emulační vyhodnocovací desky převezme například mikropočítač zmíněného výzkumného robota, na kterém bude modu detektoru umístěn. Ukázka vlastního kódu je uvedena v příloze.

3.6 Konstrukce

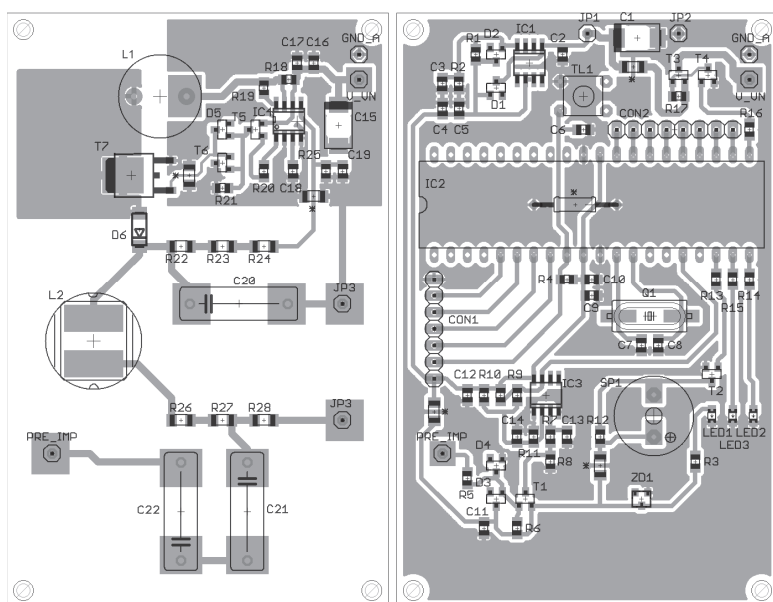
V této části bych rád nastínil konstrukci celého modulu detektoru. Popis konstrukce vyhodnocovací desky uvádět nebudu, ta je již dána výrobcem. Celý modul detektoru je

řešen prototypově, kdy byla pozornost věnována primárně jeho funkci. Modul detektoru je rozdělen na dvě desky plošného spoje, které jsou mechanicky spojeny do jednoho fyzického celku. Pohled z boku je znázorněn na obr. 3.6.1.



Obr. 3.6.1 – Mechanická konstrukce modulu detektoru

Modul je rozdělen na více deskovou koncepci z několika důvodů. V jedné z předchozích verzí, kde jsem se snažil i o celkové malé konstrukční rozměry, docházelo k problémům. V předchozí verzi byl vysokonapěťový zdroj i zbytek vyhodnocovací elektroniky na jedné desce plošných spojů. Vysokonapěťový zdroj však generoval rušení a to znemožňovalo funkci detekční části. Toto rušení se nedařilo odstranit ani filtry, ani zakrytím samotného vysokonapěťového zdroje uzemněným krytem. Částečně se rušení podařilo eliminovat úpravou zapojení (kapitola 2). Nicméně bylo pozorováno, že pokud je vysokonapěťový zdroj v delší vzdálenosti od zbytku elektroniky, detekční část již rušením není ovlivňována a může opět plnit svou funkci. Proto jsem se rozhodl tuto vyzkoušenou vlastnost využít a zapojení rozdělit mezi dvě separátní desky plošných spojů. Ty jsou spojeny krátkými distančními sloupky. Plošné spoje jsou navíc dvoustranné, spodní strana je využita jako stínící plocha. Tuto plochu jsem nechtěl nijak narušovat, aby rušení ze zdroje nemohlo ve spodní straně vedenými spoji opět proniknout do další části zapojení horní desky. Proto je vlastní zapojení realizováno pouze ve vrchní vrstvě a výhradně se součástkami povrchové montáže **SMD** (*Surface Mount Device*). Dokonce i pár vývodových součástek je z toho důvodu připájeno jako SMD součástka. Pokud by jejich vývody procházely skrz, jejich pájecí plošky z druhé strany (tedy ty, které nejsou spojeny se společnou zemí GND) by rovněž přerušovaly celistvost zemnicí plochy. Jelikož drátových součástek byla naprostá menšina, rozhodl jsem se, že jejich připájení tímto způsobem je „nutným zlem“, které je výhodné vzhledem k potlačení možného rušení.



Obr. 3.6.2 – Osazovací plán modulu detektoru

Na obr. 3.6.2 je osazovací plánek obou desek plošných spojů, tvořící modul detektoru. Vlevo je deska zdroje, vpravo deska vyhodnocovací části modulu detektoru. Číslování součástek odpovídá číslování ve schématu. Hvězdičkou jsou označeny rezistory 1206 (plus jeden vývodový), které mají nulovou hodnotu. Slouží jen jako spojky, pod nimiž je provedeno spojení sekcí společného zemnicího polygonu. Tyto rezistory tak tvoří vlastně drátové propojky a proto nejsou zakresleny jako rezistory ve schématu. Těmto propojkám se vzhledem k jednostrannému plošnému spoji nešlo na pár místech vyhnout. Většina součástky, jak již bylo řečeno, je typu povrchové montáže. Kromě zmíněné patice jsou vývodové i fóliové kondenzátory v části vysokonapětového zdroje, které se v uvedených hodnotách v požadovaném napětovém zatížení shánějí obtížně v provedení SMD. Tyto kondenzátory jsou ve výsledku umístěné naležato, aby světlá výška byla co nejmenší. Toto provedení, spolu s poměrně velkými izolačními mezerami na desce vysokonapětového zdroje způsobuje větší rozměry samotné desky. Jelikož obě desky jsou stejně velké, nemuselo se již na druhé desce s vyhodnocovací částí (RC filtr, komparátor, mikrokontrolér) šetřit místem. Obě desky jsou propojeny vodiči, které mají stejné označení, jako ve schématu („GND_A“, „PRE_IMP“, atd...). Deska vysokonapětového zdroje je umístěna pod deskou vyhodnocovací elektroniky, nejen z důvodu omezení rušení, ale také pro zamezení náhodného dotyku uživatele se součástkami vysokonapětového zdroje, zvláště pokud je přístroj v chodu (vývody nabitého filtračního kondenzátoru C₂₀).

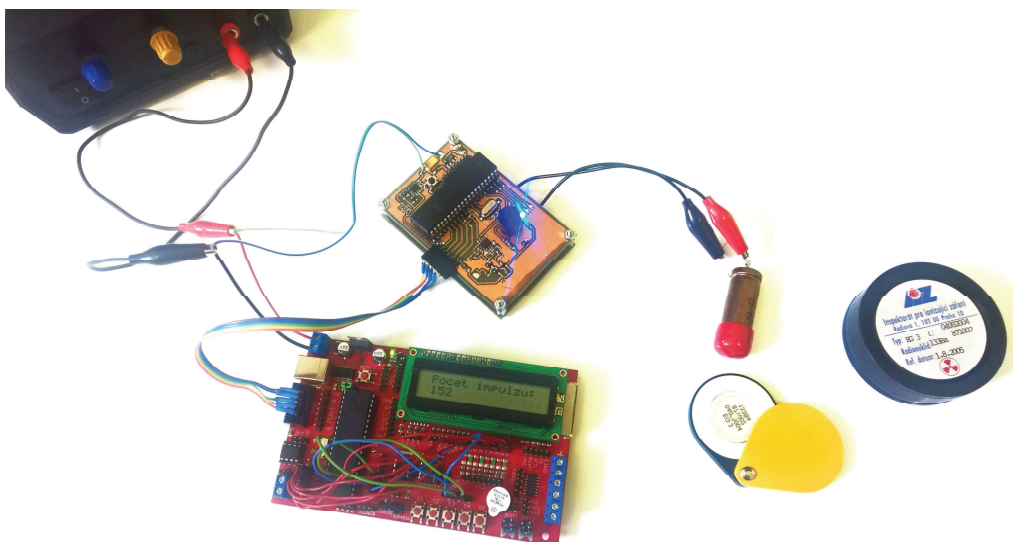
To je dalším důvodem, proč jsou vývodové kondenzátory osazeny jako součástky SMD. Pokud by byly osazeny klasicky, skrz desku, jejich vývody by byly dosažitelné z druhé strany. Pak by se sice uživatel nemohl dotknout ze shora, ale mohl by se dotknout nebezpečného napětí právě na prostupujících vývodech kondenzátorů skrze desku. V tomto provedení tak sklolaminát plošného spoje slouží i jako ochrana před dotykem ze spodní strany. Stejně jako deska vyhodnocovací elektroniky, je deska vysokonapěťového zdroje opatřena stínící uzemněnou vrstvou, snižující úroveň vyzařovaného rušení do okolí.

4 Zkušební měření finálního zařízení

Tato kapitola obsahuje měření radioaktivního zářiče, což je měření ověřující funkčnost finální verze zařízení. Pozorování chování zařízení za provozu a řešení případných problémů, které se vyskytnou, vedou k možnostem dalšího vylepšení a zlepšování funkce zařízení v budoucnosti. Také byl zkoumán vysokonapěťový zdroj a obvod detekce impulsu.

4.1 Měření pomocí radioaktivního zářiče

Zde je uvedeno jednoduché měření počtu zachycených interakcí v závislosti na vzdálenosti od zářiče (typ EG 3) na tomto zařízení. Cílem je ověření celkové funkčnosti finální verze zapojení. Pracoviště je zobrazeno na obr. 4.1.1.



Obr. 4.1.1 – Pohled na měřící pracoviště

Doba měření: 5 sekund, d – vzdálenost zářiče od detektoru (cm), p – počet interakcí (-)

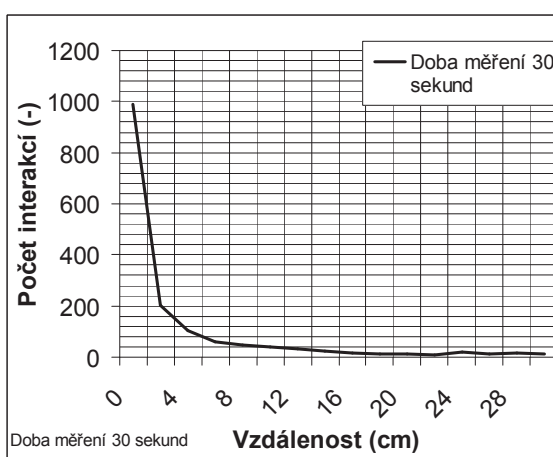
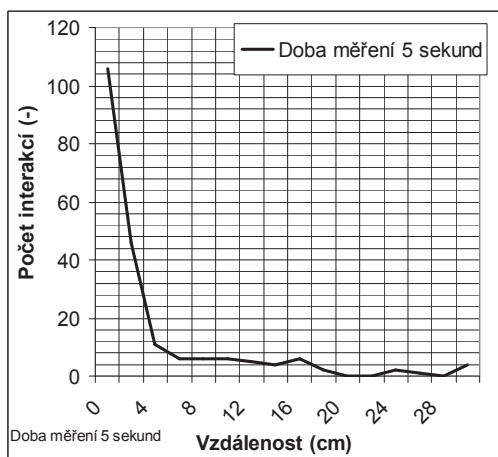
d	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
p	106	46	11	6	6	6	5	4	6	2	0	0	2	1	0	4

Tab. 4.1.1 – Počet interakcí v závislosti na vzdálenosti (doba měření 5 sekund)

Doba měření: 30 sekund, d – vzdálenost zářiče od detektoru (cm), p – počet interakcí (-)

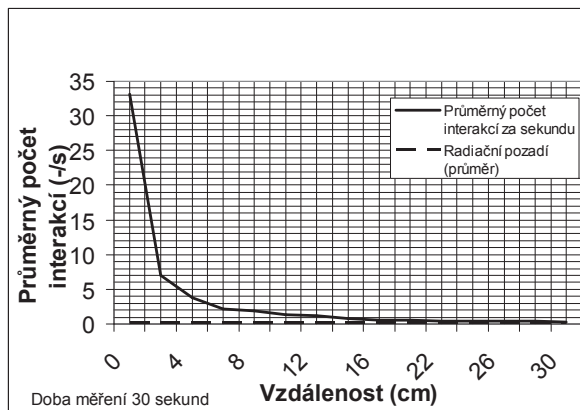
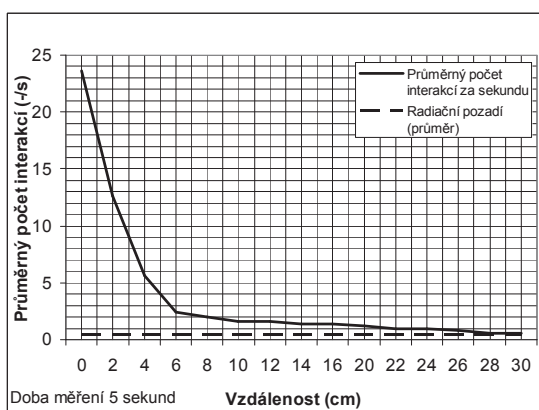
d	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
p	990	204	103	61	47	38	33	24	16	11	13	7	18	12	14	13

Tab. 4.1.2 – Počet interakcí v závislosti na vzdálenosti (doba měření 30 sekund)



Graf. 4.1.1 – Graficky znázorněné 1 měření počtu zachycených interakcí na vzdálenosti detektor - zářič

Pro věrohodnější výsledky je vhodné měření vícekrát opakovat a výsledek průměrovat. Průměrné počty interakcí jsou zobrazeny na grafu 4.1.2.

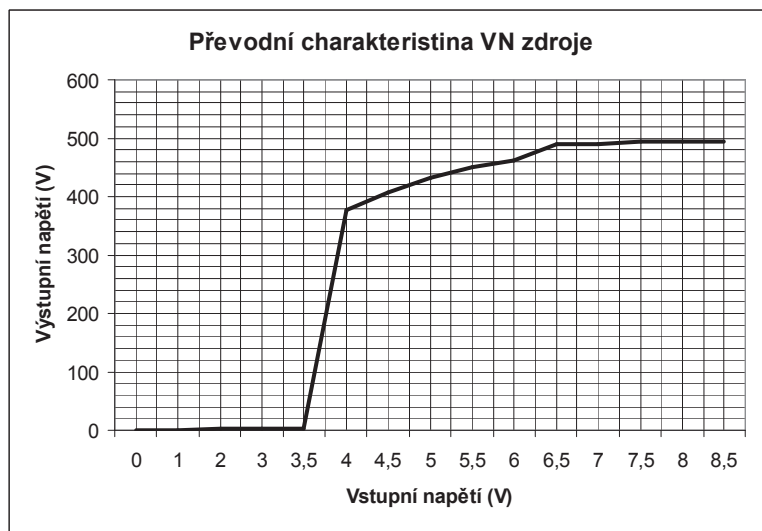


Graf. 4.1.2 – Graficky znázorněné průměrné měření počtu zachycených interakcí/sec

Radiační pozadí jsou registrované počty interakcí, pokud v okolí detektoru není umístěn zářič. Jde tedy o přirozenou radioaktivitu, která je konstantní. Detekční vzdálenost je taková vzdálenost, kde se křivka registrovaných interakcí protne s radiačním pozadím, nebo taková vzdálenost, kde se křivka radiačnímu pozadí přibližuje více, než je přípustné.

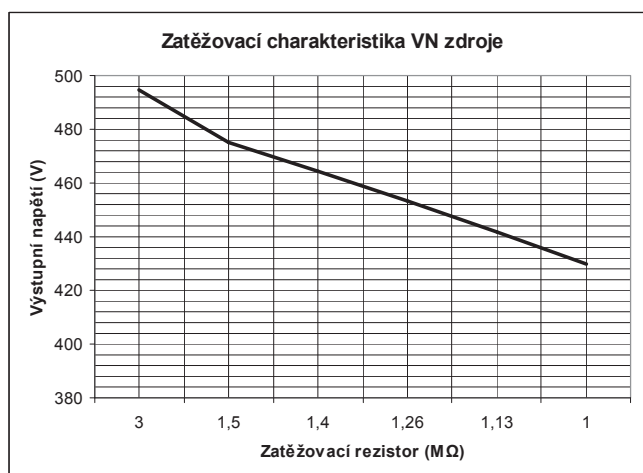
4.2 Měření dílčích částí zapojení

V této kapitole jsem zkoumal dílčí části zapojení, jako je VN zdroj a obvod detekce impulzů s komparátorem. První věc, co jsem zkoumal, bylo závislost výstupního napětí vysokonapěťového zdroje na vstupním napětí. Chtěl jsem zjistit, jak moc ovlivní výstup změna vstupního napětí, aby nedošlo k případnému zničení trubice přepětím, při příliš vysokém vstupním napětí. Změřená převodní charakteristika je na grafu 4.2.1.



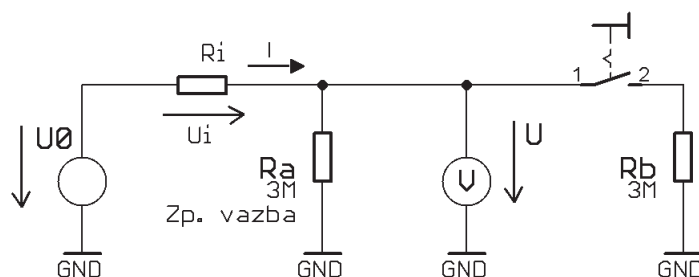
Graf 4.2.1 – Převodní charakteristika VN zdroje

Na charakteristice je vidět, že zdroj začíná plnit svou zvyšující funkci cca od 4 V. Od vstupního napětí 6,5 V již drží na výstupu 494,4 V. Další zvyšování na 8,5 V již nemá žádný účinek, zpětná vazba obvodu MC34063, se kterým je VN zdroj realizován, zvládá držet výstupní napětí na stejné úrovni. Ke zničení trubice přepětím při výkyvu napájení by tedy nemělo dojít. Dále jsem zkoumal proudovou tvrdost VN zdroje. Tento zdroj je trvale zatížen odporem 3 M Ω , který je součástí jeho zpětné vazby. Proto jsem postupně připojoval na výstup takové hodnoty rezistoru, aby se výsledný zatěžovací odpor dostal postupně k 1 M Ω . Na grafu 4.2.2 je zatěžovací charakteristika zdroje se zatěžovacím odporem v rozmezí 1 až 3 M Ω .



Graf 4.2.2 – Zatěžovací charakteristika VN zdroje

Můžeme také stanovit vnitřní odpor (R_i) vysokonapěťového zdroje. Teoreticky bychom jej mohli stanovit z poměru napětí naprázdno a proudu nakrátko. V tomto případě to nelze, zdroj je vždy zatížen alespoň děličem své zpětné vazby a měření proudu nakrátko by zase nejspíše zničilo samotný zdroj. Ale můžeme vyjít z hodnot měřených napětí a měřených při různých zatěžovacích odporech. Měřicí zapojení pro zjištění vnitřního odporu (R_i) VN zdroje je na obr. 4.2.1.



Obr. 4.2.1 – Zapojení pro měření vnitřního odporu VN zdroje

Účelem zapojení je změřit výstupní napětí zdroje ve dvou případech. Jednou pouze se zatížením zpětnou vazbou R_a (3 MΩ), ve druhé případě k tomuto zabudovanému rezistoru připneme paralelně další rezistor R_b s hodnotou 3 MΩ. Výstupní napětí U v obou případech měříme voltmetrem V . Dostaneme tak dvě různá napětí. Výstupní napětí U při zatížení pouze zpětnou vazbou bylo 494,4 V. Při připnutí druhého rezistoru R_b 3 MΩ paralelně, tedy výsledném zatěžovacím odporu $R_a \parallel R_b = 1,5$ MΩ, pokleslo napětí U na 475,0 V. Protože v obou těchto případech víme, jaká je hodnota zatěžovacího rezistoru

R_{zatez} a jaký je na tomto zatěžovacím rezistoru úbytek napětí, můžeme si dle Ohmova zákona stanovit proud, protékající tímto rezistorem. Jelikož zanedbáváme spotřebu vlastního měřicího voltmetru V , který má vysoký vnitřní odpor, ten samý proud musí téct i skrze vnitřní odpor zdroje R_i . Vnitřní odpor musí být pro oba případy zátěže stejný. Popsáno vztahem 4.2.1.

$$I = \frac{U}{R_{zatez}}, \quad (4.2.1)$$

Dosazením tedy zjistíme, že při zatížení zdroje pouze $R_{zatez} = R_a$ je proud I roven $165 \mu A$, v případě paralelní kombinaci $R_{zatez} = R_a \parallel R_b$ s výsledným odporem $1,5 M\Omega$ je proud I roven $317 \mu A$. Měřený pokles napětí U je daný úbytkem napětí U_i na vnitřním odporu R_i . Hodnota U_0 musí být pro obě hodnoty zatěžovacího rezistoru konstantní, jelikož se ze zátěží nemění. Platí tedy vztah (4.2.2).

$$U_0 = U_i + U = R_i \cdot I + U, \quad (4.2.2)$$

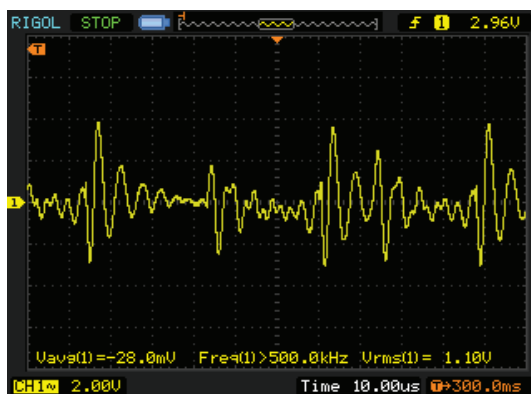
Jelikož je U_0 pro oba úřípady stejné, můžeme oba případy dát do rovnosti, dle vztahu (4.2.3).

$$U_0 = R_i \cdot 165 \cdot 10^{-6} + 494,9 = R_i \cdot 317 \cdot 10^{-6} + 475,0, \quad (4.2.3)$$

Ze vztahu pak již vyjádříme, že R_i je cca $131 k\Omega$ a U_0 je $516,4 V$. Z výpočtu vyplývá, že tento zdroj je velmi měkký. To odpovídá měření, kdy každá změna zatěžovacího rezistoru o $100 k\Omega$ vyvolá změnu výstupního napětí asi o $11 V$. Vzhledem k tomu, že zdroj pracuje de facto naprázdno, kdy odběr způsobuje v podstatě jen zpětná vazba, která je nutná k jeho správné funkci a s žádným jiným zatížením se nepočítá, tato okolnost zde není na závadu.

Na obr. 4.2.2 je ukázáno zvlnění vysokonapěťového zdroje za chodu, při zatížení $3 M\Omega$ (tedy VN zdroj je zatížen jen zpětnou vazbou $3 M\Omega$). Zvlnění je cca $1,1 V$, při DC výstupu $494,9 V$. Dále jsem zkoumal mrtvou dobu detekční trubice. Ta je dle jejího datasheetu [7] $90 \mu s$. Podle měření (obr. 4.2.3) se ukázalo, že vlastní vyhodnocovací obvod

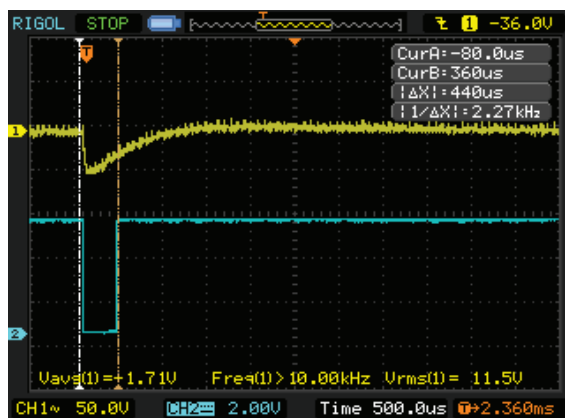
s komparátorem je mnohem pomalejší (440 μ s, než se vrátí zpět do klidové log 1, ukázáno na obr. 4.2.4). Tudíž vyhodnocovací obvod rychlost vyhodnocení zpomaluje daleko více, než samotná trubice.



Obr. 4.2.2 – zvlnění VN zdroje při zátěži



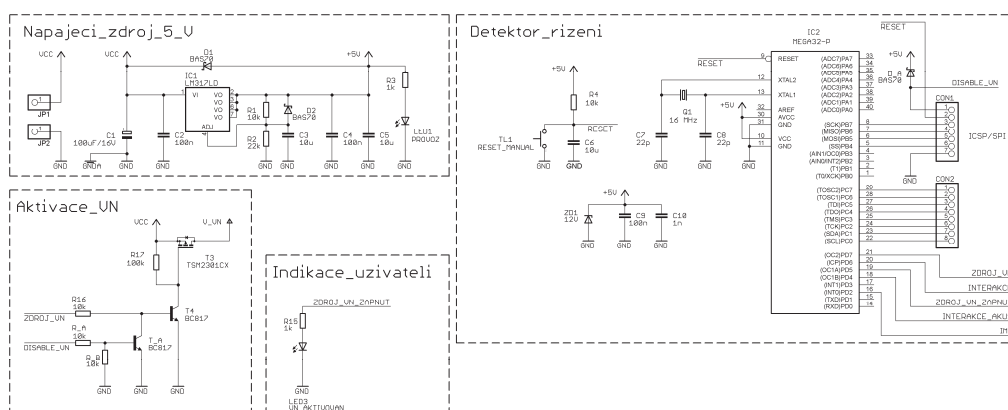
Obr. 4.2.3 – Mrtvá doba trubice LND 712



Obr. 4.2.4 – Šířka pulzu z komparátoru(obdélník) vs šířka impulsu trubice

4.3 Možné budoucí úpravy

V této kapitole bych rád nastínil některé poznatky, na které jsem přišel při testování finální verze a které by mohly být užitečné pro další vývoj této práce. První věc, na kterou jsem přišel při testování realizovaného prototypu, je fakt, že pokud desku vyhodnocovací jednotky použijeme jako programátor modulu detektoru, tak po přenosu programu si rovnou naprogramovaný modul detektoru můžeme otestovat, kdy si napájení bereme právě z vývojové desky, co je v roli programátoru. Což je naprosto normální. Problém jsem si uvědomil ve chvíli, kdy jsem aktivoval vysokonapěťový zdroj. Ten samozřejmě byl nyní napájen pouze z 5 V (protože celek je napájen z USB počítače, na který je při programování připojen). Protože je modul detektoru napájen při programování z CON_1 , teče napájecí proud k aktivovanému zdroji ne přímo z napájecí větve V_{cc} , ale nejprve z 5 V (směrem k V_{cc} a následně skrze otevřený T_3 do obvodů VN zdroje). Jednak by takto tekoucí proud zničil stabilizátor IC_1 a navíc zbytečně (napětí 5 V je příliš nízké na to, aby zdroj na výstupu dodal kýžených 500 V pro správnou činnost trubice) zatěžuje USB počítače. Stabilizátor IC_1 je před tímto závěrným proudem sice chráněn diodou D_1 , ale ta byla zamýšlena jen jako ochrana před proudem vybíjejících se filtračních kapacit C_5 a C_{11} , pokud by na původních napájecí svorkách JP_1 a JP_2 došlo ke zkratu. V tomto případě je však dioda D_1 namáhána proudem, který vysokonapěťový zdroj odebírá během své činnosti. Tento proud se nebezpečně přibližuje meznímu parametru diody D_1 . Pokud došlo k jejímu zničení, proud začne protékat skrze stabilizátor IC_1 v závěrném směru a také jej zničí. Proto jsem zapojení doplnil o součástky D_A , R_A , R_B , T_A , které zajistí hardwarové zablokování možnosti aktivace zdroje. Pokud je připojeno napájení z programátoru, skrze R_A se otevře tranzistor T_A a zkratuje bázi tranzistoru T_4 k zemi. Ten se tak nemůže za žádných okolností otevřít příchozím povelům z portu PD7 mikropočítače IC_2 . Pokud se neotevře T_4 , nemůže se otevřít ani T_3 a vysokonapěťový zdroj tak nemůže pracovat. Dioda D_A zajistí, že pokud je modul detektoru napájen z vývodu JP_1 , JP_2 (napětí 5 V tedy není odebíráno z programátoru, ale je vyráběno stabilizátorem IC_1), tak nedojde k nechtěnému zablokování možnosti aktivace zdroje. D_A tedy poskytuje hardwarovému „zámku“ aktivace rozlišení, odkud je bráno 5 V. Jinak řečeno, tato úprava nedovoluje aktivaci VN zdroje, pokud je modul napájen z ICSP. Pro plnou činnost musí být napájení přivedeno na konektor JP_1 JP_2 . Tím se tak chrání dioda D_1 a stabilizátor IC_1 před zničením způsobeným nadměrným proudem a špatným směrem jeho toku. Úprava je zobrazena obr. 4.3.1.



Obr. 4.3.1 – Možná úprava zapojení

Zde je výhoda separátně zapojené indikační **LED₃**, která svitem indikuje chod zdroje. Podle jejího svitu tak můžeme program odzkoušet i při napájení z programátoru. A vyzkoušet tak, jestli lze s novým programem zdroj příkazem po SPI vůbec aktivovat. V současné verzi, pokud budeme testovat programovou komunikaci a napájet modul detektoru z programátoru, museli bychom buď odpájet rezistor **R₁₆**, který do zapojení v ostrém provozu vrátíme, nebo při testování příkazu zapnutí zdroje simulovat zdroj pouze **LED₃** a aktivaci portu PD7 dodat do programu až nakonec, kdy máme program odladěný a detektor bude napájen klasicky. Z toho také plyne fakt, že modul detektoru je schopen své funkce jen v případě správného napájení. Protože bez aktivovaného VN zdroje a správné velikosti anodového napětí nemůže detekční trubice registrovat interakce.

Dlužno podotknout, že tato úprava je teoretická proto, že se mi prototyp bez této úpravy aktivací VN zdroje při napájení z programátoru zničit nepodařilo, kdy dioda **D₁** vydržela protékající proud do zdroje a nepřerušila se. Tím také nedošlo ke zničení stabilizátoru **IC₁**.

Dalším problémem, se kterým jsem se setkal, byla občasná disfunkce programu modulu detektoru. V jednom případě došlo k zatuhnutí programu, v druhém nedošlo k návratu z přerušení. Vliv odklonu zařízení od normální funkce bylo zřejmě způsobeno zakolísáním napájecího napětí, jelikož byla špatně nastaveno proudové omezení na zdroji. Přesto by bylo dobré zapojení obohatit o hlídací časovač, watchdog, restartující zacyklený mikropočítač. V závislosti na použitém mikrokontroléru lze tento watchdog buď aktivovat přímo v mikropočítači, nebo jej lze připojit externě, například jako pravidelně nulovaný čítač, který při nesnulování přeteče a restartuje tak celou jednotku

5 Závěr

V této práci jsem se měl nejprve seznámit s teoretickým základem problematiky ionizujícího záření, detektorů záření a základními typy sběrnic, používaných v sensorové a multiprocessorové komunikaci.

Na základě toho rozboru jsem vybral pro mě vhodný typ detektoru, což v mém případě byla Geiger – Müllerova trubice LND 712, od firmy LND, Inc. Pro komunikaci mezi modulem detektoru a vyhodnocovací jednotkou jsem si z prostudovaných typů sběrnic zvolil sběrnici SPI, která měla pro mě nejjednodušší implementaci. Na základě těchto dvou předpokladů jsem již mohl navrhnout zapojení.

Pro oba moduly jsem použil mikropočítače ATmega32. Zapojení modulu detektoru jsem rozdělil do samostatných částí, které jsem postupně řešil. Vysokonapětový zdroj, nutný pro provoz trubice jsem realizoval jako zvyšující měnič s cívkou, pomocí obvodu MC34063. Během vývoje se ukázalo, že jednoduchá detekce impulzů pomocí tranzistorového spínače nebude stačit a zapojení tak kromě tranzistorového spínače, coby detektoru a převodníku amplitudy pulzů, obsahuje zapojení i jednoduchý filtr a komparátor, který realizuje funkci nastavitelného citlivostního prahu. Samotné čítání a zpracování impulzů je řešeno softwarově, kdy pro počítání impulzů je používáno externí přerušování. Mikropočítač, který se stará o tuto funkci dále také zajišťuje komunikaci s modulem vyhodnocení, který simuluje rozhraní robota, kam bude později tento modul připojen.

Vyhodnocovací modul je realizován na vývojové desce, protože po připojení modulu detektoru do robota nebude mít vyhodnocovací modul význam a může být tak snadno rozebrán a vývojová deska tak může sloužit jiné aplikaci. Tento vyhodnocovací modul kromě ovládání podřízeného modulu detektoru také řídí komunikaci po sběrnici SPI a zajišťuje komunikaci mezi modulem detektoru a lidskou obsluhou. Pro obsluhu je výstupem displej, na kterém může obsluha vidět jednak nabídku měření, která sestává z několika možností, lišících se délkou měření. Dále zobrazuje zachycený počet impulzů. Pro nastavení měření a jeho ovládání slouží čtveřice tlačítek.

Funkčnost zařízení byla ověřena na experimentálním měření radioaktivního zářiče. Měření spočívalo v měření počtu interakcí v závislosti na vzdálenosti detekční trubice od vlastního zářiče. Při vlastním používání mě napadla úprava vyřazením aktivace vysokonapěťového zdroje, pokud je detektor napájen z programátoru a také zařazení hlídacího časovače, v případě zatuhnutí chodu programu vlivem rušení. Byl také zkoumán výstup zdroje, u kterého je podezření, že je původcem rušení. Pro zajímavost byly měřeny i některé dílčí části zapojení, například časová šířka impulzu z komparátoru.

Co se týče osobního přínosu, práce mě obohatila nejen teorií ionizujícího záření, ale hlavně praktickými věcmi, jako je úspěšné použití sběrnice SPI v mikropočítačové komunikaci, či zlepšení dovedností v jazyce C. Dále jsem poznal novou metodu programování mikropočítačů – programování přímo v aplikaci, skrze ICSP.

6 Použitá literatura a odkazy

- [1] Švec, J. : *Radioaktivita a ionizující záření*, 1. vydání, Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2005, 35 stran, ISBN: 80-86634-62-0
- [2] Gerndt, J., Průša, P. : *Detektory ionizujícího záření*, 2. přepracované vydání, Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2011, 182 stran, ISBN: 978-80-01-04710-1
- [3] Olejář, M.: *Stručný popis sběrnice I²C a její praktické použití*. [online]. [cit 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [4] Tišnovský, P.: *Externí sériové sběrnice SPI a I²C*. [online]. [cit 2015-03-18]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>
- [5] Malý, M.: *Sběrnice 1-wireTM*. [online]. [cit 2015-03-20]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/sbernice-1-wiretm.html>
- [6] sbm_20_sts_5_2_resized. [online]. [cit 2015-03-22]. Dostupné z: http://mightyohm.com/blog/wpcontent/uploads/2014/11/sbm_20_sts_5_2_resized.jpg
- [7] Datasheet detekční trubice LND 712 [online]. [cit 2015-02-10]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/LND-712-Geiger-Tube.pdf>
- [8] LND 712 picture [online]. [cit 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.sander-electronic.de/proding/LND712.jpg>
- [9] Sensors geiger tube [online]. [cit 2015-04-21]. Dostupné z: http://it.emcelettronica.com/files/u17676/Sensors_GeigerTubes.jpg
- [10] High voltage geiger counter supply [online]. [cit 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.next.gr/power-supplies/high-voltage/high-voltage-geiger-counter-supply-112277.html>
- [11] Datasheet LM3478. [online]. [cit 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3478q-q1.pdf>
- [12] Datasheet LM317. [online]. [cit 2015-04-2]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm117.pdf>
- [13] Datasheet MC34063. [online]. [cit 2015-04-2]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC34063A-D.PDF
- [14] Datasheet LM311. [online]. [cit 2015-04-2]. Dostupné z: http://physics.gac.edu/~huber/classes/phy270/SpecSheets/LM311_National.pdf
- [15] Datasheet ATmega32. [online]. [cit 2015-04-2]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2503.pdf>
- [16] Stránky firmy AND-TECH, vývojová deska EvB v4.3. [online]. [cit 2015-03-12]. Dostupné z: <http://and-tech.pl/produk-testowy/>
- [17] Český manuál k EvB v4.3. [online]. [cit 2015-04-2]. Dostupné z: http://shop.onpa.cz/download/EvB43_cz_manual_rev3.pdf

- [18] Basic I/O operations [online]. [cit 2015-04-10]. Dostupné z:
<https://iamsuhasm.wordpress.com/tutsproj/avr-gcc-tutorial/>
- [19] AVR external interrupt – c – programming [online]. [cit 2015-04-10]. Dostupné z:
<http://www.avr-tutorials.com/interrupts/avr-external-interrupt-c-programming>
- [20] The SPI of the AVR [online]. [cit 2015-04-10]. Dostupné z:
<http://maxembedded.com/2013/11/the-spi-of-the-avr/>
- [21] Ligo, G.: *Interfacing LCD with Atmega32 Microcontroller using Atmel Studio* [online]. [cit 2015-04-10]. Dostupné z:
<https://electrosome.com/interfacing-lcd-atmega32-microcontroller-atmel-studio/>

7 Seznamy obrázků, tabulek a vztahů

Seznam obrázků:

Obr. 1.4.1	-	Schéma obecného detekčního zařízení
Obr. 1.5.1	-	Zapojení elektrického detektoru
Obr. 1.5.2	-	Závislost ionizačního proudu
Obr. 1.5.1.1	-	Zapojení ionizačních komor
Obr. 1.5.2.1	-	Uspořádání proporcionálního detektoru
Obr. 1.5.3.1	-	Odezva korónového detektoru
Obr. 1.5.4.1	-	Průraz polovodiče
Obr. 1.5.4.2	-	Struktura CCD detektoru
Obr. 1.5.4.3	-	Vyčítání CCD detektoru
Obr. 1.5.4.4	-	Konstrukce kryostatu
Obr. 1.5.5.1	-	Zapojení Geiger – Müllerova počítače
Obr. 1.5.5.2	-	Grafické vyjádření mrtvé doby a doby zotavení
Obr. 1.6.1	-	Ztrátová vs. zářivá rekombinace
Obr. 1.7.1	-	Schéma sběrnice I^2C
Obr. 1.7.2	-	Vysílací část sběrnice I^2C
Obr. 1.7.3	-	Rámec dat sběrnice I^2C
Obr. 1.8.1	-	Uspořádání sběrnice SPI
Obr. 1.8.2	-	Vedení hodin u sběrnice SPI
Obr. 1.8.3	-	Zapojení Master a Slave
Obr. 1.8.4	-	Zřetězení u SPI
Obr. 1.9.1	-	Schéma sběrnice 1-wire
Obr. 1.9.2	-	Časové vyjádření bitů u sběrnice 1-wire
Obr. 2.1.1	-	Pohled na STS-5 a SBM-20
Obr. 2.1.2	-	Pohled na LND 712
Obr. 2.1.3	-	Srovnání několika druhů trubic
Obr. 2.2.1	-	Samokmitající měnič
Obr. 2.2.2	-	Měnič s obvodem 555
Obr. 2.2.3	-	Měnič s obvodem LM3478
Obr. 2.2.4	-	Testovací verze s obvodem LM3478
Obr. 3.1.1	-	Blokové schéma zařízení
Obr. 3.2.1.1	-	Napájecí zdroj 5 V
Obr. 3.2.2.1	-	Zdroj vysokého napětí
Obr. 3.2.3.1	-	Obvody úpravy impulzů
Obr. 3.2.3.2	-	Klidový stav
Obr. 3.2.3.3	-	Stav při výboji
Obr. 3.2.4.1	-	Obvody řízení modulu detektoru
Obr. 3.2.4.2	-	Indikační část
Obr. 3.2.4.3	-	Ideové zapojení indikační LED ₃

Obr. 3.3.1	-	Zapojení vyhodnocovací jednotky
Obr. 3.4.1	-	Diagram programu modulu detektoru
Obr. 3.5.1	-	Diagram programu vyhodnocovací jednotky
Obr. 3.6.1	-	Mechanická konstrukce modulu detektoru
Obr. 3.6.2	-	Desky plošných spojů modulu detektoru
Obr. 4.1.1	-	Měřicí pracoviště
Obr. 4.2.1	-	Měřicí zapojení vnitřního odporu
Obr. 4.2.2	-	Zvlnění VN zdroje
Obr. 4.2.3	-	Mrtvá doba trubice
Obr. 4.2.4	-	Šířka pulzu z komparátoru
Obr. 4.3.1	-	Možná úprava zapojení

Seznam tabulek:

Tab. 4.1.1	-	Závislost počet interakcí/vzdálenost (5 sec)
Tab. 4.1.2	-	Závislost počet interakcí/vzdálenost (30 sec)

Seznam vztahů:

(1.3.1.1)	-	Vyjádření rozpadu α
(1.3.2.1)	-	Vyjádření rozpadu β^-
(1.3.2.2)	-	Vyjádření rozpadu β^+
(1.3.4.1)	-	Rozpadový zákon
(1.3.4.2)	-	Přeměnová konstanta
(1.3.4.3)	-	Poločas rozpadu
(1.3.4.4)	-	Aktivita
(1.3.4.5)	-	Pokles aktivity v čase
(1.3.4.6)	-	Hmotnostní vyjádření aktivity
(1.5.3.1)	-	Záporný diferenciální odpor
(4.2.1)	-	Výpočet proudu
(4.2.2)	-	Výpočet U_0
(4.2.3)	-	Rovnost U_0 pro oba případy zátěže

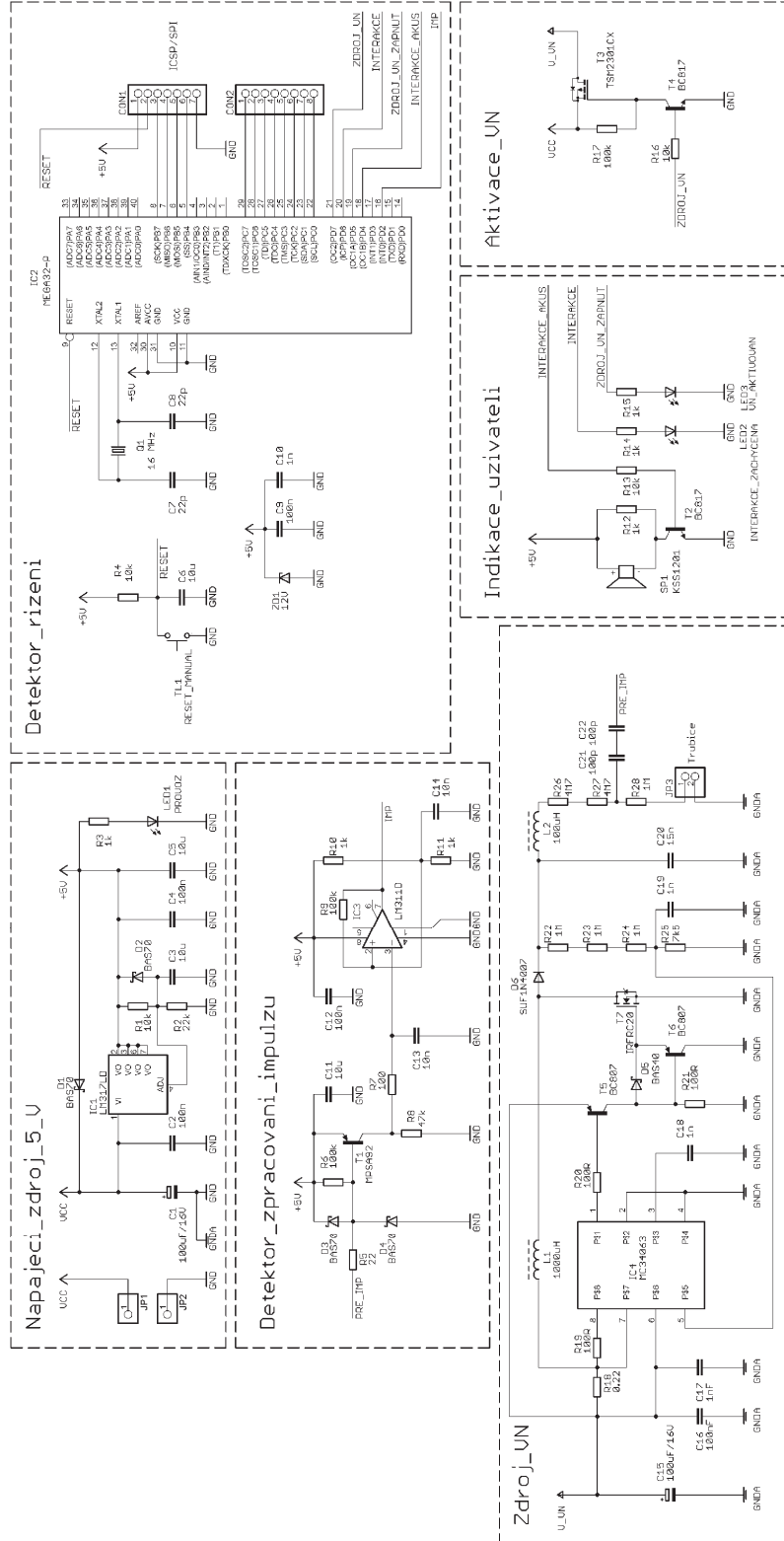
Seznam grafů:

Graf 4.1.1	-	1 měření interakcí
Graf 4.1.2	-	Průměrné měření interakcí
Graf 4.2.1	-	Převodní charakteristika VN zdroje
Graf 4.2.2	-	Zatěžovací charakteristika VN zdroje

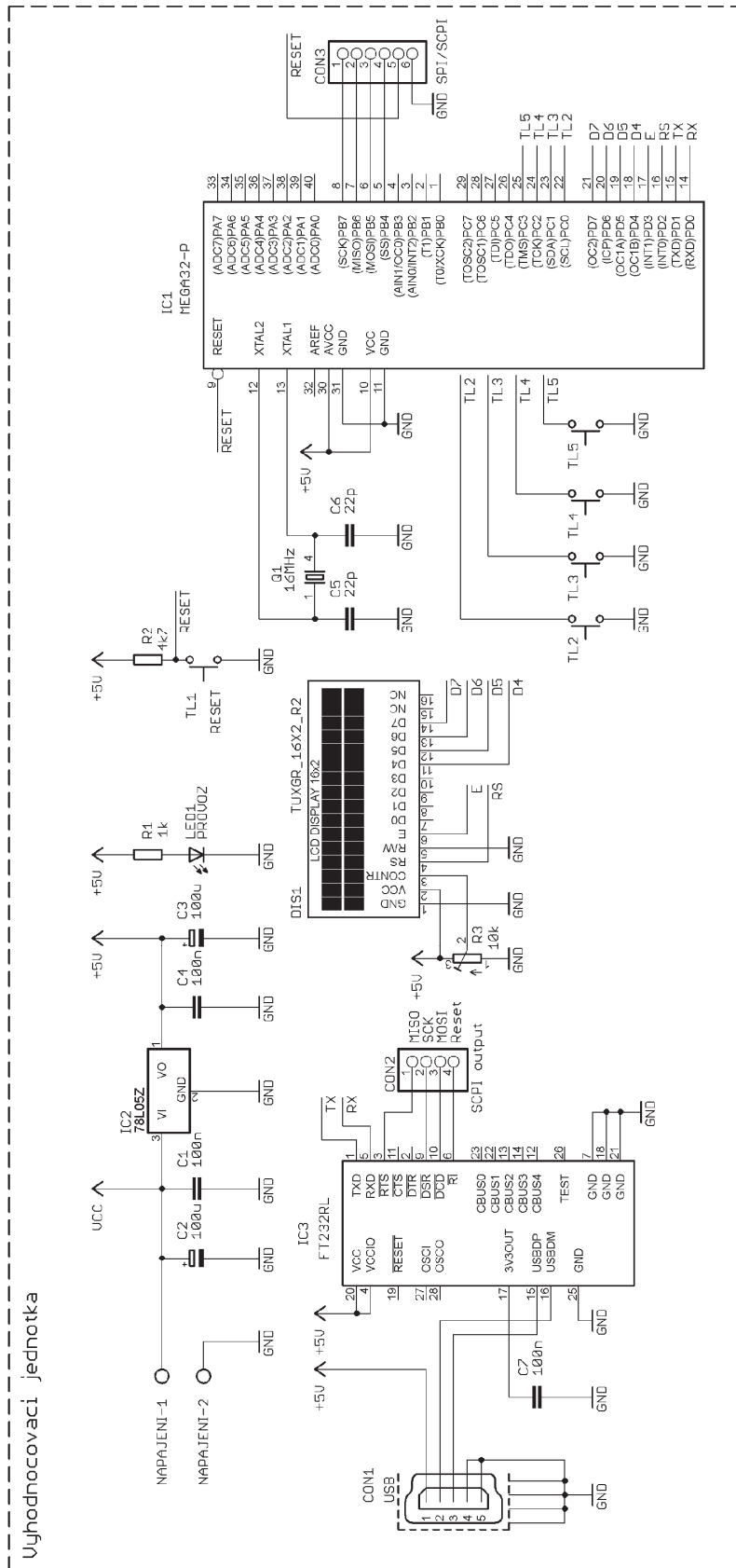
8 Přílohy

Obsahuje fotografie, schémata a různé další doprovodné materiály.

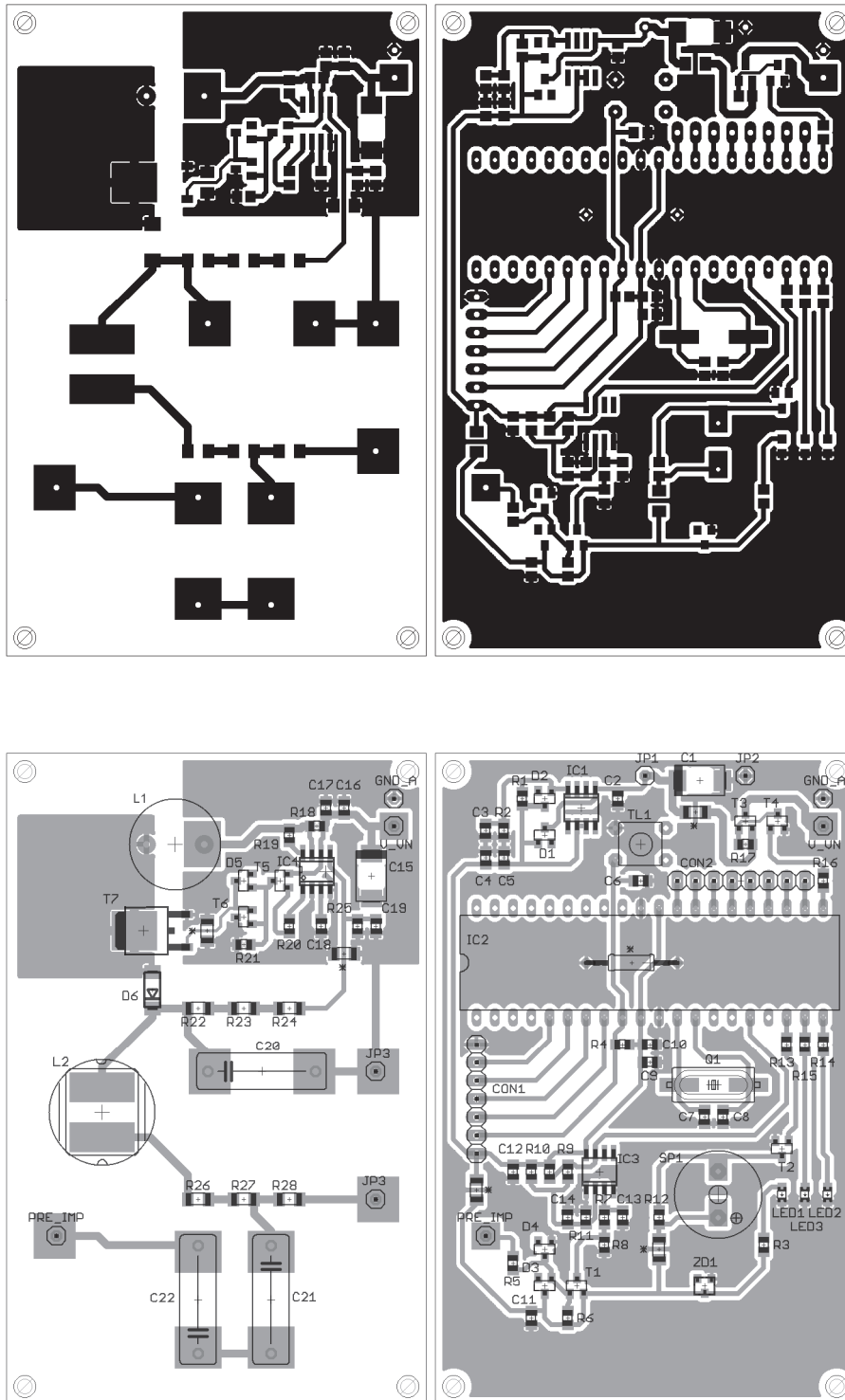
8.1 Celkové schéma modulu detektoru



8.2 Celkové schéma modulu vyhodnocovací jednotky

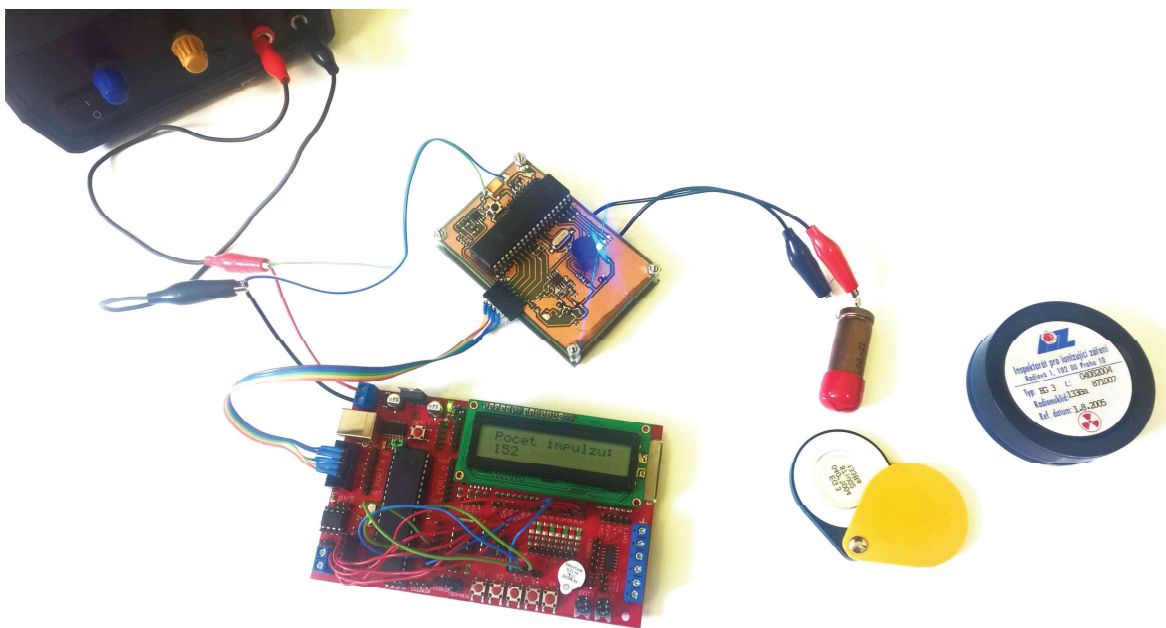


8.3 Plošný spoj modulu detektoru a jeho osazovací plán

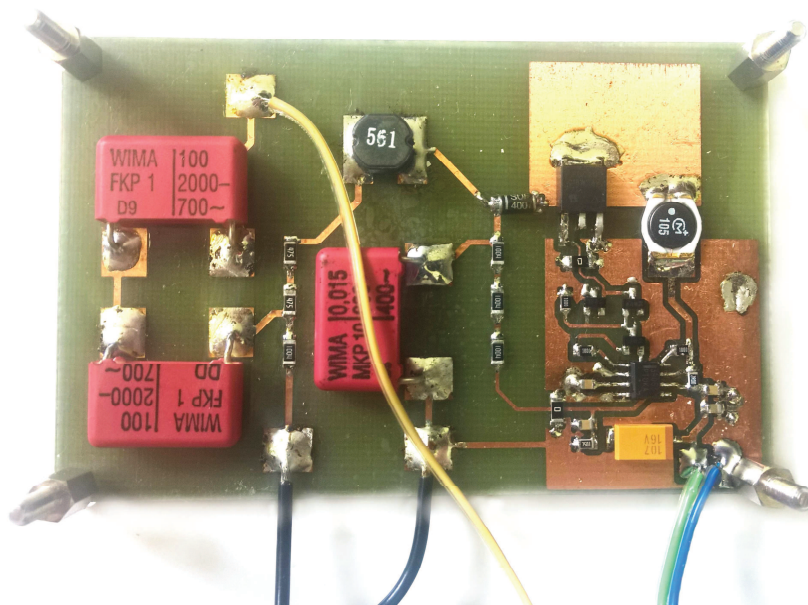


Vlevo je znázorněna deska vysokonapětového zdroje, vpravo je zbytek elektroniky modulu detektoru. Tedy řídicí mikropočítač ATmega32, obvody detekce a úpravy pulzu, napájecí zdroj nízkonapětové části.

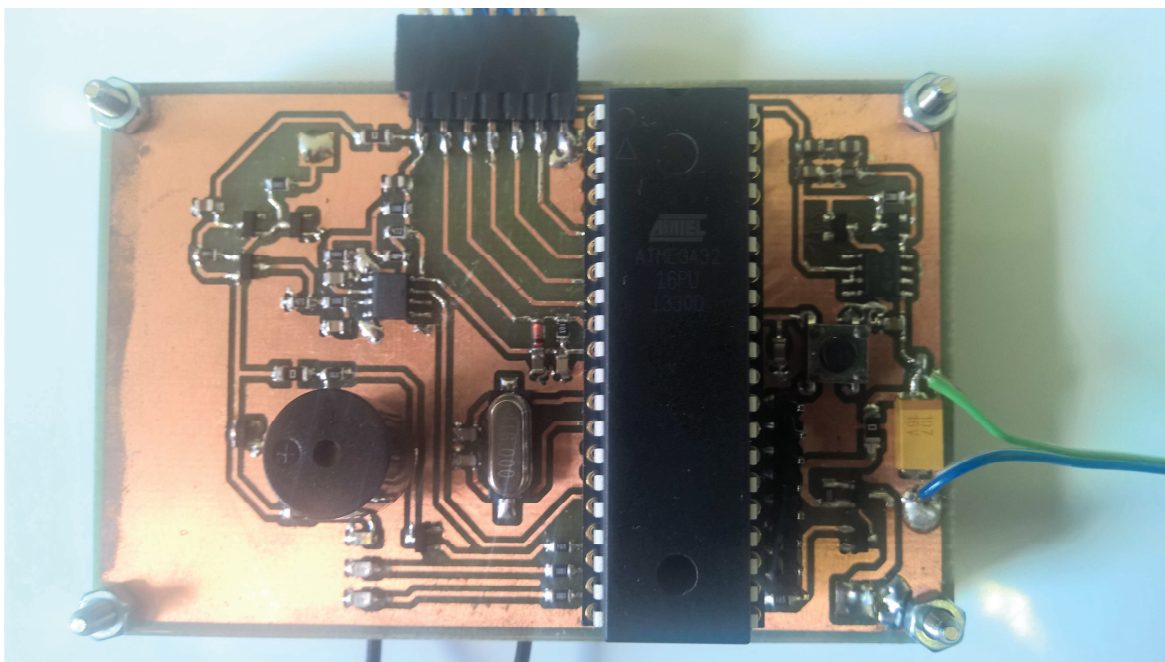
8.4 Fotografie



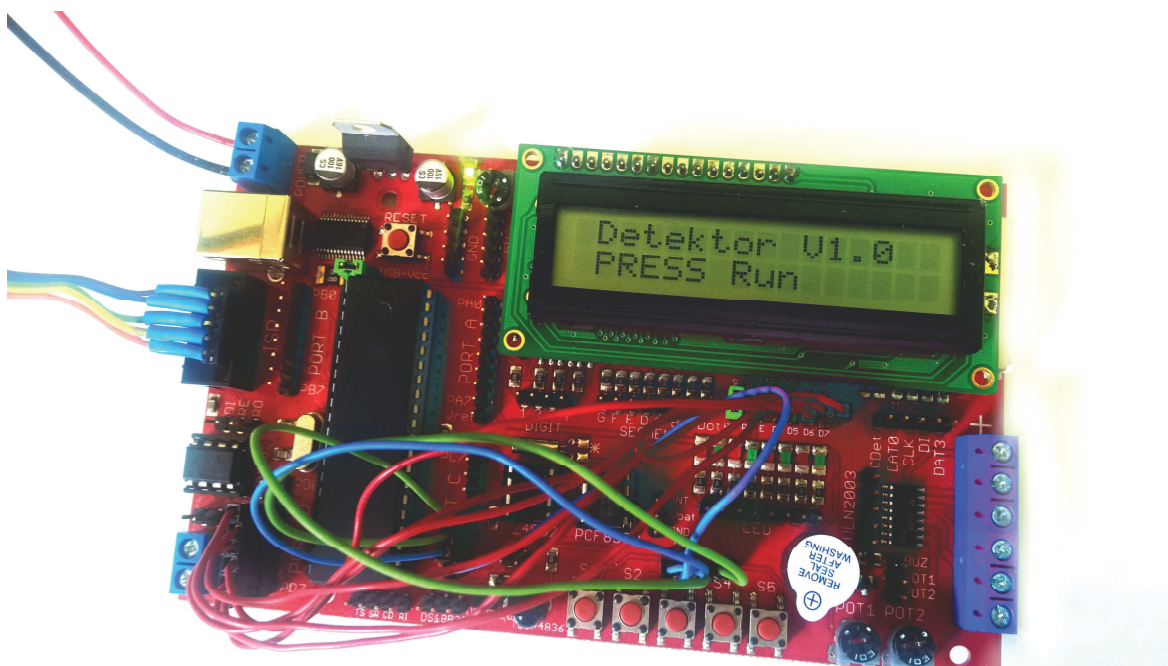
Fotografie celého přístroje, který tvoří vlastní modul detektoru a vyhodnocovací jednotka (realizovaná na vývojové desce EvB 4.3). Oboje je napájeno ze společného zdroje 8 V. U trubice LND 712 je umístěn radioaktivní zářič EG 3, spolu s jeho stínící krabičkou. Obě jednotky jsou propojeny skrze sběrnici SPI (plochý barevný kabel).



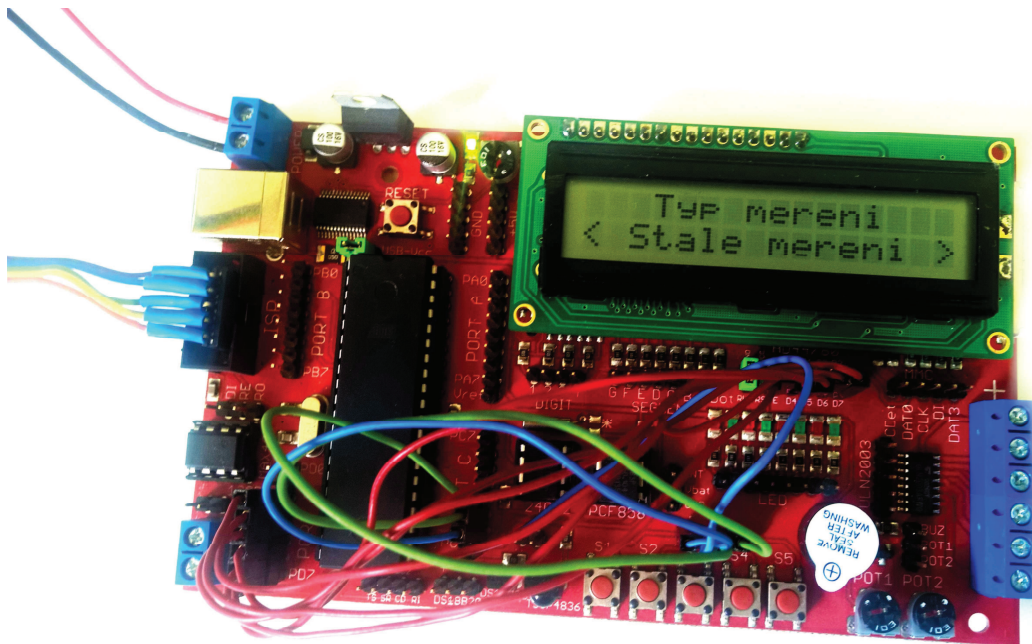
Spodní deska modulu detektoru – deska vysokonapěťového zdroje. Obsahuje i předřadník pro detekční trubici (černé vodiče) a oddělovací kondenzátory 2x 100 pF v sérii. Impulzy jsou vedeny žlutým vodičem k dalšímu zpracování (žlutý vodič má ve schématu označení „PRE_IMP“). Vpravo je umístěn spínaný zdroj s obvodem MC34063, cívkou 1 mH a výkonovým spínacím tranzistorem, který je umístěn na chladičím polygonu. Tomuto zdroji je přiváděno napájení zeleným a modrým vodičem z horní desky. Žlutý vodič je dlouhý kvůli servisu, horní deska jde tak snadno odklopit na stranu. Což bylo užitečné i v prvních verzích, kdy zdroj za chodu dost často „odešel“ a tudíž jej bylo nutno opravit.



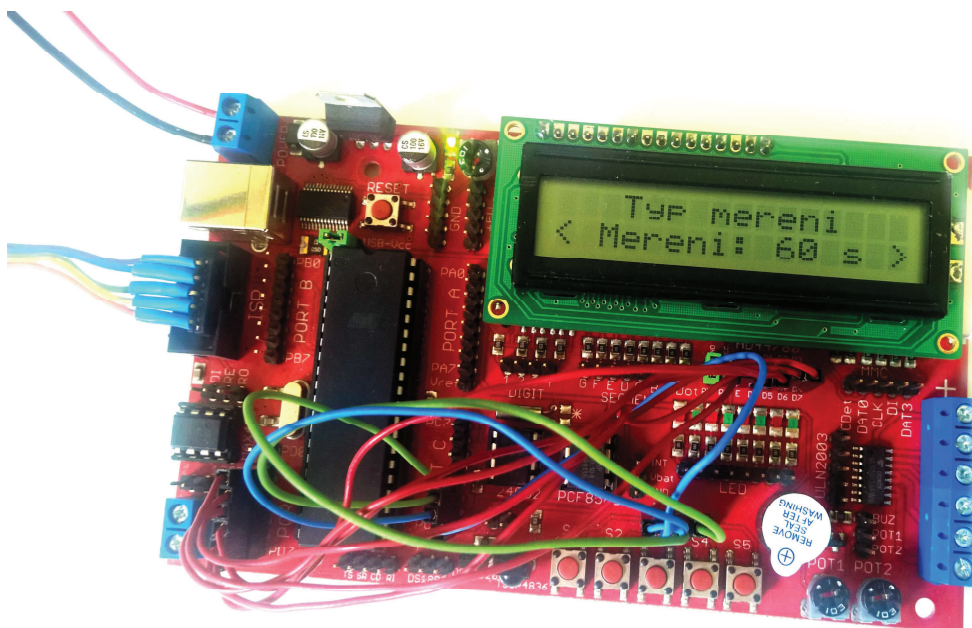
Horní deska modulu detektoru, obsahuje řídicí mikro počítač ATmega32, obvody úpravy impulzů (vlevo), indikační diody a akustickou indikaci. Nízkonapěťový stabilizátor 5 V s obvodem LM317 pro tyto obvody (umístěný vpravo nahoře) a spínač napájení vysokonapěťového zdroje (vpravo dole). Kromě krystalu je zde umístěno i restartovací tlačítko.



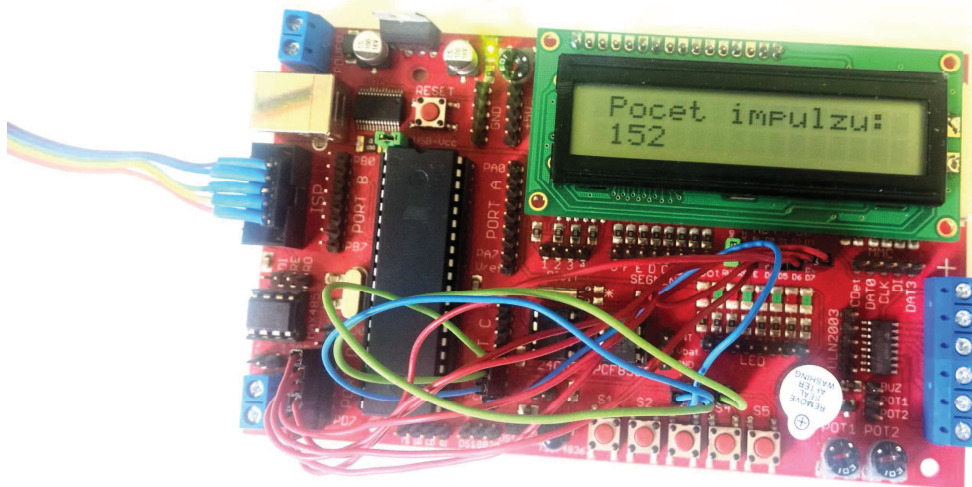
Vyhodnocovací jednotka při inicializaci – uvítací stránka. Tlačítka mají význam (zleva): STOP, OK/RUN(Start měření), VZAD, VPŘED (slouží k pohybu v nabídce měření).



Nabídka měřících módů, zde stálé, kontinuální měření. K výběru režimu měření slouží tlačítka VZAD a VŘED (označeno i na displeji šipkami).



Jiný vybraný typ měření, zde po dobu 1 minuty.



Vlastní počítadlo zachycených impulzů.

8.5 Ukázky kódu

Modul vyhodnocovací jednotky:

```
#define F_CPU 16000000UL
#endif
extern void itoa(int __val, char * __s, int __radix);
volatile char data[5]={0};
#define D4 eS_PORTD4
#define D5 eS_PORTD5
#define D6 eS_PORTD6
#define D7 eS_PORTD7
#define RS eS_PORTD2
#define EN eS_PORTD3
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include "lcd.h"
void spi_init_master (void) //inicializace SPI, nastaveni parametru (jako master, nastaveni hodin){
    DDRB = (1<<5)|(1<<7)|(1<<4);
    PORTB &= ~(0<<PB6);
    SPCR = (1<<SPE)|(1<<MSTR)|(1<<SPR0);}
unsigned char spi_tranceiver (unsigned int data) //poslani dat skrze SPI{
    SPDR = data;
    while(!(SPSR & (1<<SPIF)));
    return(SPDR);}
void display_uvitacka (void){
    unsigned char i=1;
    if(i==1){
        Lcd4_Clear();
        Lcd4_Set_Cursor(1,1);
        Lcd4_Write_String("Detektor V101");}
    _delay_ms(3000);
    i=0;}}
```

```

void display_ukonceni (void){
    unsigned char i=1;
    if(i==1){
        Lcd4_Clear();
        Lcd4_Set_Cursor(1,1);
        Lcd4_Write_String("Pocet impulzu:");
        Lcd4_Set_Cursor(2,1);
        Lcd4_Write_String(data);}
    _delay_ms(3000);
    i=0;}
int main(void){
    DDRD = 0xFF;
    DDRC=0b11110000;
    PORTC=0b11111111;
    unsigned int citac=0;
    unsigned int citac_pom=0;
    unsigned int citac_pomB=0;
    unsigned int casovac;
    char PORT_D;
    char mod_mereni=1;
    char mereni_stav = 1;
    char PORT_pom=0;
    char PORT_C;
    spi_init_master();
    Lcd4_Init();
    display_uvitacka();
    while(1){
        PORTB = 0<<PB4;
        PORT_D = PIND;
        PORT_C = PINC;
        if(PORT_pom ^ PORT_D) {Lcd4_Clear();} //pokud se zmenil udaj na LCD, prekresli jej
        if (PORT_C==0xFE){mereni_stav=1; Lcd4_Clear(); spi_tranceiver(0);} //cteni tlacitek
        if (PORT_C==0xFD){mereni_stav=0; Lcd4_Clear(); spi_tranceiver(1);}
        if (PORT_C==0xFB){mod_mereni++;}
        if (PORT_C==0xF7){mod_mereni--;}
        if (PORT_C==0xEF){}
        if(mod_mereni>5){mod_mereni=1;}
        if(mod_mereni<1){mod_mereni=5;}
        mod_mereni=mod_mereni*mereni_stav;
        if (mod_mereni==1){
            Lcd4_Set_Cursor(1,1); //realizace nabidky mereni
            Lcd4_Write_String(" Typ mereni");
            Lcd4_Set_Cursor(2,0);
            Lcd4_Write_String("< Stale mereni >");
            casovac=1600;}
        if (mod_mereni==2){
            Lcd4_Set_Cursor(1,1);
            Lcd4_Write_String(" Typ mereni");
            Lcd4_Set_Cursor(2,0);
            Lcd4_Write_String("< Mereni: 05 s >");
            casovac=64;}
        if (mod_mereni==3){
            Lcd4_Set_Cursor(1,1);
            Lcd4_Write_String(" Typ mereni");
            Lcd4_Set_Cursor(2,0);
            Lcd4_Write_String("< Mereni: 30 s >");
            casovac=371;}
    }
}

```

```

if (mod_mereni==4){
    Lcd4_Set_Cursor(1,1);
    Lcd4_Write_String(" Typ mereni");
    Lcd4_Set_Cursor(2,0);
    Lcd4_Write_String("< Mereni: 60 s >");
    casovac=742;}
if (mod_mereni==5){
    Lcd4_Set_Cursor(1,1);
    Lcd4_Write_String(" Typ mereni");
    Lcd4_Set_Cursor(2,0);
    Lcd4_Write_String("< Mereni: 90 s >");
    casovac=1091;}
if(mod_mereni == 0){ //merici smycka
    if(casovac<1500){casovac--;}
    Lcd4_Set_Cursor(1,1);
    Lcd4_Write_String("Pocet impulzu:");
    citac = spi_tranceiver (2);
    if(citac==255){citac_pom=citac_pom+255; citac=0;}
    citac_pomB=citac_pom+citac;
    itoa(citac_pomB, data, 10);
    Lcd4_Set_Cursor(2,1);
    Lcd4_Write_String(data);}else {
    citac_pom=0;
    citac_pomB=0;
    citac=0; }
PORT_pom = PORT_D;
_delay_ms(10);
if(casovac==0){ //ukonceni merici smycky, vypnuti zdroje...
    mereni_stav=1;
    spi_tranceiver(0);
    _delay_us(4);
    display_ukonceni ();}}}

```

Modul detektoru:

```

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#define F_CPU 16000000UL
#include <util/delay.h>
volatile int citac;
#define DataPortPORTD //Ukladani stavu portu pri preruseni
#define DataDDR DDRD
void spi_init_slave (void){
    DDRB=(1<<6);
    SPCR=(1<<SPE);}
unsigned char spi_tranceiver (unsigned int data){
    SPDR = data;
    while(!(SPSR & (1<<SPIF) ));
    return(SPDR);}
ISR(INT0_vect){
    unsigned int stav, i;
    _delay_ms(5);
    citac++;
    stav = DataPort;
    DataPort = 1<<PD6;
    _delay_ms(2);
    DataPort = 0<<PD6;
    for(i = 0; i<50; i++){
        DataPort = 1<<PD4;
        _delay_us(100);
    }
}

```

```

        DataPort = 0<<PD4;
        _delay_us(250);}
    DataPort = stav; }
int main(void){
    spi_init_slave();
    citac = 0;
    DDRD = 1<<PD2;
    PORTD = 1<<PD2;
    DDRD = 0<<PD7;
    PORTD = 0<<PD7;
    DDRD = 0<<PD5;
    PORTD = 0<<PD5;
    GICR = 1<<INT0;
    MCUCR = 1<<ISC01 | 1<<ISC00;
    sei();
    unsigned int povel_detektor;
    povel_detektor = 0;
    while(1){
        switch (povel_detektor){
            case 0: PORTD = (0<<PD5);
                    PORTD = (0<<PD7);
                    citac = 0;

                    break;
            case 1:

                    PORTD = (1<<PD5);
                    PORTD |= (1<<PD7);

                    break;
            default:
                break;}
        povel_detektor = spi_tranceiver(citac);}
        _delay_us(10);}

```

8.6 Doprovdné CD

Na CD umístěném na zadní straně papírové formy práce je umístěna elektronická verze celého textu a další materiály.