

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Stavba koincidenčního detektoru

Bakalářská práce

Ing. Jan Pěnkava

Vedoucí práce: Mgr. Marcel Fuciman, PhD.

České Budějovice 2022

Bibliografické údaje

Pěnkava, J., 2022: Stavba koincidenčního detektoru. [Development of coincidence detector. Bc. Thesis, in Czech.] – 69 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

The bachelor's thesis deals with the design and practical construction of a coincidence detector using Geiger-Müller detectors. In the theoretical part, there was a study of materials on the topic of Geiger-Müller detectors, cosmic rays and their detection, coincidence detectors and statistical data processing. In the practical part, the hardware design of the coincidence detector based on the STM32 processor was carried out, whose basis the coincidence detector was assembled. Operating software was developed and debugged. Verification of the detector characteristics and test measurements took place.

Koincidenční detektor je uložen na Katedře fyziky Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne 07.12.2022

Jan Pěnkava

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Marcelu Fucimanovi za cenné informace, nápady a připomínky, které byly v maximální míře využity při stavbě detektoru. Dále děkuji své rodině za podporu.

Obsah

Seznam zkratk.....	1
1 Úvod	2
1.1 Cíle práce	2
2 Teoretická část	3
2.1 Plynem plněné detektory	3
2.1.1 Geiger-Müllerovy detektory	5
2.1.2 Mrtvá doba a doba zotavení	7
2.1.3 Elektrické zapojení GM-detektorů	8
2.2 Kosmické záření	9
2.2.1 Primární složka kosmického záření	9
2.2.2 Sekundární složka kosmického záření	9
2.3 Využití GM-detektorů v oblasti detekce kosmického záření	10
2.3.1 Měření s jedním detektorem	11
2.3.2 Koincidenční detektory	11
2.3.3 Měření Rossiho křivky	14
2.4 Statistické zpracování naměřených dat	16
3 Praktická část.....	19
3.1 Celková koncepce.....	19
3.2 Popis zapojení.....	20
3.2.1 Blok vstupních obvodů.....	20
3.2.2 Blok vyhodnocování koincidencí.....	21
3.2.3 Blok procesoru	23
3.2.4 Periferie	25
3.2.5 Napájecí zdroje 5 V a 3,3 V	25

3.2.6 Napájecí zdroj 400 V	27
3.2.7 Sondy s GM-detektory	28
3.3 Deska plošných spojů.....	29
3.3.1 Propojky a konektory na DPS	29
3.4 Programové vybavení	30
3.4.1 Popis základních funkcí	30
3.4.2 Použité nástroje a knihovny	31
3.4.3 Konfigurace procesoru	31
3.4.4 Hlavní smyčka programu	34
3.4.5 Algoritmus vyhodnocování koincidencí	36
3.4.6 Moduly programu.....	38
3.4.7 Formát výstupních souborů.....	40
3.5 Mechanická konstrukce	41
4 Testování	44
4.1 Parametry koincidenčního detektoru	44
4.2 Příklad měření koincidenčním detektorem	46
5 Závěr	47
6 Seznam literatury	48
Seznam obrázků.....	50
Seznam tabulek.....	52
Příloha A – Schéma zapojení.....	53
Příloha B – Seznam součástek	56
Příloha C – Návrh DPS	59
Příloha D – Katalogový list SBM-20	62
Příloha E – Návod k obsluze detektoru	63

Seznam zkratek

A/D	analogově-digitální
ARM	typ architektury procesorů
CPU	centrální procesorová jednotka
DIP	dvouřadé pouzdro integrovaných obvodů
DMA	přímý přístup do paměti
DPS	Deska plošných spojů
EEPROM	Elektricky Vymazatelná Paměť pouze pro čtení
FLASH	elektricky programovatelná paměť
GM	Geiger-Müllerův
I2C	multi-masterová počítačová sériová sběrnice
LED	světelná dioda
RISC	procesory s redukovanou instrukční sadou
RTC	Hodiny reálného času
SDIO kartou	rozšířený formát SD umožňující práci s jiným zařízením než paměťovou
SPI	sériové periferní rozhraní
SRAM	statická paměť
SWD	sběrnice založená ladicí architektura
USART	Synchronní / asynchronní sériové rozhraní
USB	univerzální sériová sběrnice

1 Úvod

Předkládaná bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací koincidenčního detektoru. S využitím dostupných Geiger-Müllerových trubic lze vyvinout i ve skromných podmínkách experimentální aparaturu, umožňující provést základní demonstrativní experimenty v oblasti výzkumu kosmického záření.

Motivací k napsání bakalářské práce na výše uvedené téma byla potřeba aparatury, která by umožnila provádět v rámci fyzikální praktika nové experimenty, spočívající v detekci kosmického záření a měření Rossiho křivek.

Práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. V teoretické části je nutné se seznámit s podklady k tématice Geiger-Müllerových detektorů, kosmického záření a jeho detekce, koincidenčních detektorů a statistického zpracování dat.

V praktické části se předpokládá využití poznatků získaných v rámci teoretické části. Bude proveden návrh koincidenčního detektoru, vývoj obslužného softwaru sestavení a zprovoznění koincidenčního detektoru. Práce bude zakončena prověřením funkčnosti koincidenčního detektoru, například provedením vybraného experimentu.

1.1 Cíle práce

V rámci zadání byly stanoveny následující cíle:

- Návrh a stavba koincidenčního detektoru s využitím Geiger-Müllerových trubic
- Proměření a vyhodnocení parametrů sestavy detektoru
- Příprava sestavy pro použití v úloze měření kosmického záření, popř. Rossiho křivky do fyzikálních praktik.

2 Teoretická část

2.1 Plynem plněné detektory

V případě působení přímo ionizujícího záření na atomy, respektive molekuly elektricky neutrálního plynu dochází k ionizaci plynu. Přitom vznikají z neutrálních částic plynu kladně nabití ionty a odštěpují se elektrony.

V případě působení nepřímo ionizujících částic na atomy, respektive molekuly plynu dochází též k ionizaci plynu, ovšem působením sekundárních nabitých částic.

Díky přítomnosti kladně nabitých iontů a elektronů v plynovém prostředí roste jeho vodivost. Tento jev je principem tzv. plynem plněných detektorů.

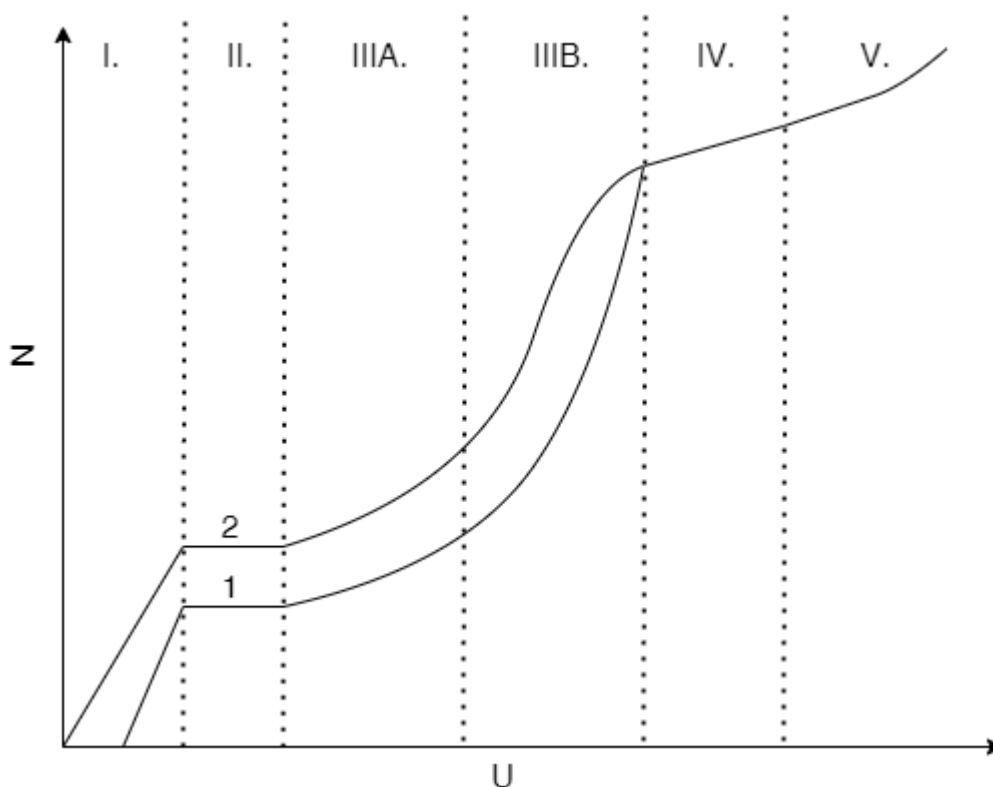
Plynem plněný detektor je tvořen elektrodami, podobně jako kondenzátor, sloužícími ke sběru vzniklého náboje v plynu v prostoru mezi elektrodami. Na elektrodách detektoru je přiložené napětí U , vyvolávající uvnitř detektoru elektrické pole. Elektrické pole způsobuje pohyb iontů a elektronů, vytvořených v plynu, směrem k elektrodám detektoru.

Konkrétní konstrukční uspořádání detektoru se velmi liší podle způsobu práce detektoru, podle účelu, k jakému je detektor určen a podle mnoha dalších hledisek.

Na Obr. 1 je znázorněna obecná charakteristika plynem plněného detektoru, tj. závislost počtu iontů, resp. elektronů N , nashromážděných a sebraných na elektrodách detektoru, na velikosti připojeného napájecího napětí U . Na základě průběhu závislosti lze odlišit různé pracovní režimy (oblasti) plynového detektoru. Křivka 1 odpovídá částici, která v detektoru vytvořila menší množství iontových párů, než částice odpovídající křivce 2.

Oblast I. – oblast rekombinační, oblast platnosti Ohmova zákona – intenzita elektrického pole v detektoru je nízká, v důsledku čehož dochází k rekombinaci vzniklých iontových párů

Oblast II. – oblast nasyceného proudu, nasycená oblast - rychlost vzniklých iontů se zvyšující se intenzitou el. pole také zvyšuje a rekombinace se přestává uplatňovat. Počet sebraných iontů se rovná počtu iontů vzniklých ionizací.



Obr. 1: Závislost počtu sebraných iontů na napájecím napětí detektoru

Oblast IIIA – oblast plné proporcionality - počet sebraných iontů je vyšší než počet iontů vzniklých ionizací. Kromě přímé ionizace se uplatňuje i ionizace nárazem. Konstanta úměrnosti závisí pouze na napájecím napětí detektoru a nazývá se plynové zesílení detektoru.

Oblast IIIB – oblast omezené proporcionality – plynové zesílení detektoru začíná být závislé i na počtu vzniklých iontů

Oblast IV – Geiger-Müllerova oblast – počet sebraných iontů nezávisí na počtu iontů vzniklých ionizací. Závislost počtu sebraných iontů na napájecím napětí je nízká. Napětí, při kterém detektor vstupuje do Geiger-Müllerovy oblasti, se nazývá Geigerův práh.

Oblast V – oblast samovolného koronového výboje – v důsledku dalšího zvyšování napájecího napětí dochází v prostoru detektoru ke vzniku samovolného koronového výboje. Pokud zvyšování napájecího napětí dále pokračuje, dochází ke vzniku doutnavého výboje v celém pracovním objemu detektoru.

Plynové detektory se rozdělují do následujících skupin:

- Ionizační komory – pracovní oblast II

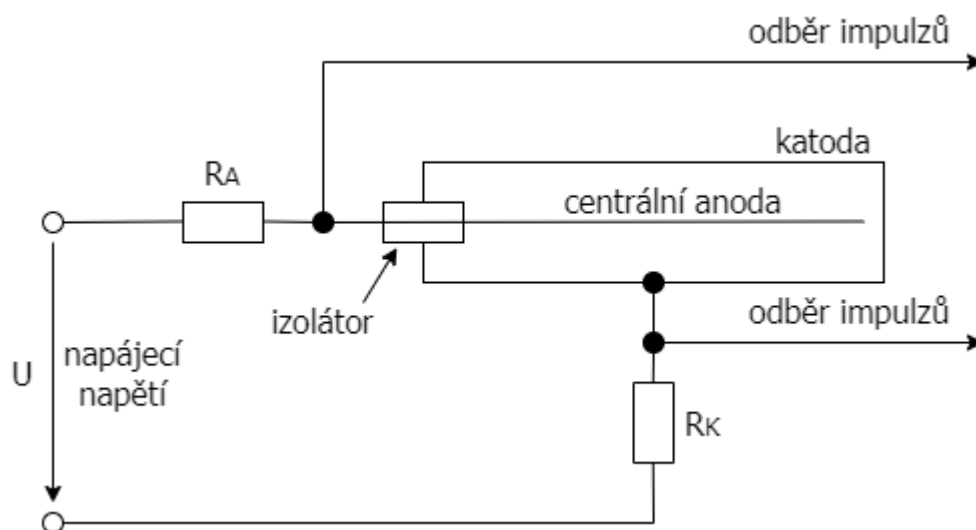
- Proporciální detektory – pracovní oblast IIIA
- Geiger-Müllerovy detektory – pracovní oblast IV
- Koronové detektory – pracovní oblast V

Uvedené skupiny detektorů se od sebe liší geometrickým uspořádáním, dále rozložením a velikostí intenzity elektrického pole, napájecím napětím, druhem a tlakem pracovního plynu.

Podrobný popis plynem plněných detektorů je uveden v pramenech [1] a [2].

2.1.1 Geiger-Müllerovy detektory

Geiger-Müllerovy detektory patří mezi nejstarší typy detektorů. Díky své prosté konstrukci, nízké ceně a jednoduchosti použití jsou hojně využívány i v současnosti. Pomocí Geiger-Müllerových detektorů lze registrovat částice α , částice β , rentgenové i γ záření.



Obr. 2: Zjednodušené schéma GM-detektoru

Geiger-Müllerův detektor je tvořen hermeticky uzavřeným objemem plynové náplně se dvěma elektrodami (anoda, katoda). Elektrody mají obvykle koaxiální uspořádání, anoda je tvořena tenkým vodičem v ose detektoru, katodu představuje elektricky vodivá trubice. Plynová náplň se sestává ze vzácného plynu, nejčastěji z argonu, často s příměsí par organických látek, případně ještě halogenů. Zjednodušené schéma uspořádání detektoru je na Obr. 2.

Spolu s proporcionálními detektory využívají tzv. plynového zesílení ke znásobení náboje, uvolněného vznikem iontových párů v trajektorii ionizující částice. V proporcionálním detektoru každý původní elektron vyvolá interakci s plynovou náplní lavinu elektronů, která je nezávislá na jiných lavinách, vyvolaných ostatními elektrony, vzniklými v trajektorii ionizující částice. Protože jednotlivé laviny jsou téměř identické, je sebraný náboj na elektrodách proporcionálního detektoru úměrný počtu elektronů vzniklých ionizací.

V Geiger-Müllerově detektoru se vlivem silnějšího elektrického pole zvyšuje i intenzita vznikajících lavin (jsou urychlovány). Od jisté hodnoty napájecího napětí, které se nazývá prahové napětí Geiger-Müllerovy oblasti, budou v oblasti anody elektrony lavin natolik urychlovány, že kromě nárazové ionizace mohou i excitovat atomy příp. molekuly plynové náplně.

Deexcitaci atomů, resp. molekul plynové náplně provází emise fotonů v ultrafialové nebo viditelné oblasti spektra. Fotony vzniklé deexcitací mohou dopadnout na katodu a pokud je jejich energie vyšší než výstupní práce kovu na povrchu katody, dojde k emisi fotoelektronu.

Fotoelektrony, vzniklé na katodě, se působením el. pole pohybují k anodě a v jejím okolí způsobí vznik dalších lavin a celý proces se opakuje. Díky tomu se výboj rozšíří z původního místa do celé oblasti detektoru (tzv. Geiger-Müllerův výboj). Plynové zesílení tak dosáhne řádově hodnoty až 10^{10} .

Vznikající kladné ionty postupně obalují anodu po celé její délce. To způsobí postupný pokles intenzity el. pole, elektrony přestávají excitovat plynovou náplň, ustává tvorba deexcitačních fotonů, na katodě ustává tvorba fotoelektronů a tím ustává i výboj v detektoru.

Vrstva kladných iontů, tvořící trubici okolo anody se pohybuje ke katodě detektoru, kam doputuje po uplynutí tzv. doby sběru, a na povrchu anody se ionty postupně neutralizují záchytem elektronu. I při tom se také uvolňuje energie, a je-li dostatečná, může dojít k emisi elektronu z katody. Emitovaný elektron cestou k anodě spustí tzv. sekundární lavinu a celý proces se opakuje. Detektor pak nepřetržitě generuje další a další pulzy.

Vznik sekundárních lavin je nežádoucí a lze mu předejít pomocí tzv. zhášení detektoru. Detektory se proto dále dělí na nesamozhášecí a samozhášecí.

Náplň nesamozhášecího detektoru je tvořena čistým vzácným plynem. U nesamozhášecích detektorů je zhášení zajišťováno externě, například elektricky, pomocí vnější aparatury, připojené k elektrodám detektoru. Princip zhášení detektoru spočívá v krátkodobém snížení napájecího napětí detektoru bezprostředně po registraci pulzu, čímž dojde k útlumu a k zániku sekundárních lavin.

Samozhášecí detektory využívají speciálních „zhášecích“ příměsí v plynové náplni detektoru. Nejčastěji se používají alkoholové páry nebo halogeny. Zhášecí příměsí vynikají schopností absorbovat fotony vznikající deexcitací atomů (molekul) plynové náplně.

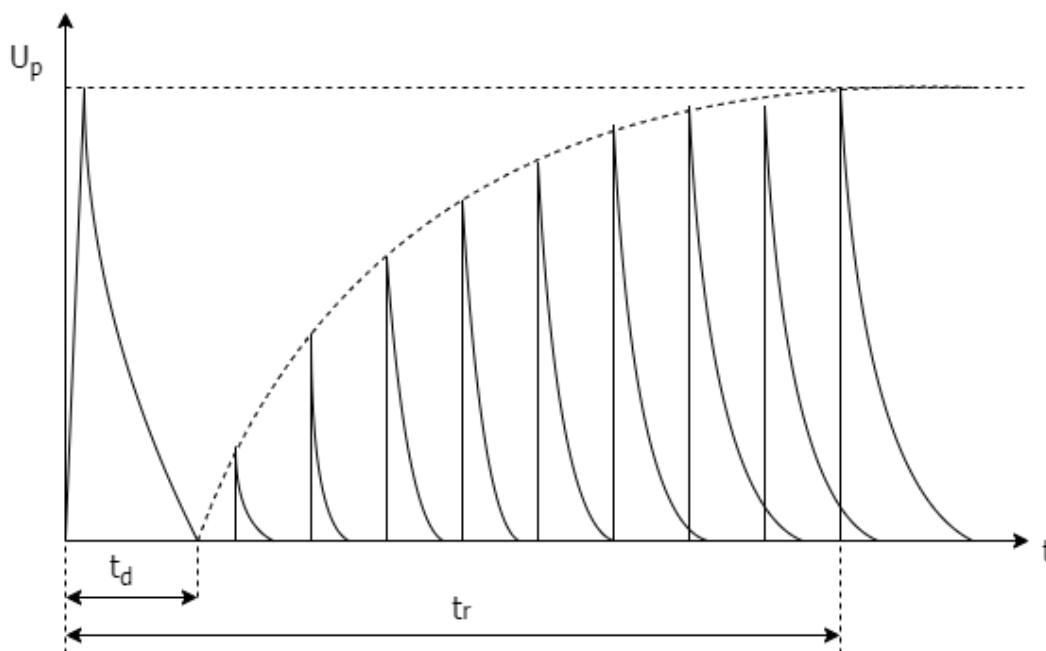
Amplituda signálu z detektoru nezávisí na počtu primárně vzniklých elektronů, a tedy ani na energii částice, která způsobila ionizaci náplně detektoru.

2.1.2 Mrtvá doba a doba zotavení

Vrstva kladných iontů, tvořící trubici okolo anody, snižuje intenzitu el. pole v okolí anody natolik, že elektrony pocházející z dalších interakcí ionizujícího záření nevytvoří laviny. Tento stav trvá do doby, než kladné ionty dorazí k anodě na takovou vzdálenost, aby se el. pole v jejím okolí nezvýšilo na takovou intenzitu, kdy je opět možné tvoření lavin. Tento časový interval se nazývá mrtvá doba t_r . Po dobu trvání mrtvé doby je detektor necitlivý k ionizujícímu záření.

Po skončení mrtvé doby se amplituda impulzu U_p postupně zvyšuje, až dosáhne maximální hodnoty. Časový interval mezi okamžikem náběhu prvního impulzu a okamžikem dosažení maximální amplitudy se nazývá doba zotavení t_r .

Situaci ilustruje Obr. 3.



Obr. 3: Mrtvá doba a doba zotavení

2.1.3 Elektrické zapojení GM-detektorů

Způsob a parametry elektrického zapojení detektoru mají zásadní vliv na to, jak kvalitně bude daný detektor pracovat. V případě nevhodných parametrů zapojení detektoru může být až znemožněna jeho správná činnost. Hlavní příčinou problémů jsou především různé parazitní kapacity, vznikající na vedení el. signálu.

Rozlišují se dva způsoby zapojení GM-detektoru, podle toho, ze které elektrody jsou odebírány elektrické impulzy (Obr. 2):

1. Odběr impulzů z katody

Při tomto způsobu zapojení jsou el. impulzy odebírány z rezistoru R_K , zapojeného mezi katodu detektoru a záporný pól napájecího zdroje. Výhodou tohoto způsobu je, že příliš neovlivňuje charakteristiky detektoru a tvar výstupního impulzu z detektoru.

2. Odběr impulzů z anody

Při tomto způsobu připojení jsou el. impulzy odebírány z anody detektoru. V tomto případě je detektor velmi náchylný na parazitní kapacity vedení. Dochází ke zkreslení tvaru výstupního impulzu z detektoru, které může být velmi různorodého

charakteru a nelze odstranit. Tento způsob zapojení bývá nejčastěji použit u přístrojů, kde je detektor nutné připojit k vyhodnocovací jednotce pomocí stíněného kabelu.

2.2 Kosmické záření

Pod pojmem kosmické záření se rozumí záření, dopadající na Zemi z kosmického prostoru. Z hlediska původu záření rozeznáváme primární a sekundární složku kosmického záření.

2.2.1 Primární složka kosmického záření

Primární složka kosmického záření je pozorována za hranicemi zemské atmosféry. Skládá se převážně z protonů, částic α . V menší míře jsou zastoupena jádra lehkých prvků, fotony, elektrony a pozitrony. S rostoucí energií částic klesá poměr protonů a roste poměr těžších jader.

Nabitě částice vlétající do magnetického pole Země se pohybují po spirálách podél siločar magnetického pole Země. Vzniká tzv. šířkový efekt, tzn. že je intenzita kosmického záření vyšší na pólech než na rovníku.

Dále je pozorována tzv. východo-západní anomálie. Projevuje se tak, že záření přicházející ze západního směru je intenzivnější než ze směru východního. Tento efekt souvisí s tím, že počet kladných částic v kosmickém záření je vyšší než počet částic záporných.

2.2.2 Sekundární složka kosmického záření

Částice primárního kosmického záření se při vstupu do atmosféry srážejí s atomy a jádry atmosféry. Při těchto srážkách jsou vyraženy elektrony z atomových obalů a nukleony z jader a vznikají i další částice. Vzniká tzv. sekundární složka kosmického záření, mající původ v zemské atmosféře.

Vysokoenergetický proton ztrácí od vstupu do atmosféry svou energii jednak srážkami s elektrony v obalech atomů, čímž se tyto atomy ionizují a uvolňují se elektrony. Dále dochází ke srážkám protonů s jádry atomů. Při srážce protonu s jádry vznikají nabitě

částice (fragmenty jader), mezony $\pi^\pm$, protony a neutrální částice jako neutrony a mezony π^0 .

Neutrony se zpomalují srážkami s jádry a jsou absorbovány jádry dusíku



Mezony π^0 se rozpadají na dva fotony γ a tyto fotony jsou počátkem tzv. **elektromagnetické kaskády neboli spršky**. V poli atomových jader fotony konvertují na elektron-pozitronové páry, pohybující se přibližně stejným směrem jako původní fotony. Pohybující se elektron a pozitron mohou vyžářit v poli jádra brzdný foton. Brzdný foton může opět konvertovat na elektron-pozitronový pár, má-li dostatečnou energii. Zmenšování energie částic ve spršce probíhá pomalu, a proto počet částic lavinově roste až do doby, kdy energie jednotlivých částic klesne natolik, že se začnou pohlcovat v obalech atomů a molekul. Počet částic ve spršce závisí na energii primární částice. Fotony, elektrony a pozitrony, které jsou součástí elektromagnetické spršky, tvoří elektronovou komponentu sekundárního kosmického záření.

Podobným mechanismem vznikají i spršky jiného typu, vyvolané nukleony a nabitými mezony

2.3 Využití GM-detektorů v oblasti detekce kosmického záření

Detekce kosmického záření na profesionální úrovni obvykle probíhá pomocí složitých a nákladných aparatur. Taková zařízení jsou jen těžko dostupná školám a univerzitám.

Geiger-Müllerovy detektory, pro svou jednoduchost použití a příhodnou cenu, nachází široké uplatnění ve všech oblastech lidské činnosti, souvisejících s ionizujícím zářením (bezpečnost a ochrana zdraví při práci, zdravotnictví, jaderná energetika, věda a výzkum, těžba nerostných surovin atd.). Jak se ovšem lze dočíst v člancích [3], [4] a [5], lze i s pomocí jednoduchých aparatur s GM-detektory úspěšně realizovat experimenty spočívající v různých způsobech detekce kosmického záření.

2.3.1 Měření s jedním detektorem

Nejjednodušším experimentem, proveditelným pomocí jednoho GM-detektoru, je měření dlouhodobých časových změn intenzity kosmického záření na povrchu Země. Změny intenzity kosmického záření jsou způsobeny mnoha faktory, souvisejícími se stavem Slunce, zemskou atmosférou a prostředím ve Vesmíru.

Častým předmětem zkoumání je tzv. barometrický efekt. Zde dochází ke změnám intenzity kosmického záření v důsledku změny atmosférického tlaku. Změna atmosférického tlaku má za následek změnu hustoty atmosféry a tím dochází i ke změně absorpce kosmického záření v atmosféře. V rámci experimentu hledáme korelaci mezi atmosférickým tlakem a počtem detekovaných impulzů.

Časové změny velikosti toku kosmického záření závisí nejen na stavu zemské atmosféry, ale také na sluneční aktivitě. Dalším předmětem zkoumání proto může být srovnávání naměřených změn v počtu detekovaných impulzů s údaji profesionálních měřících stanic, například v době tzv. Forbushova poklesu. Jde o náhlý rychlý pokles intenzity kosmického záření. Často provází magnetické bouře. Je způsoben oblakem zmagnetizovaného plazmatu vyvrženým ze Slunce při velké sluneční erupci. Magnetické pole oblaku zastiňuje Zemi před nízkonoenergetickým kosmickým zářením.

Dále je možné sledovat periodické změny v intenzitě kosmického záření ve zvolených periodách (11 let, 1 rok, 27 dní, 1 den), analyzovat data a hledat závislosti.

2.3.2 Koincidenční detektory

Probíhá-li měření pomocí jednoho samostatného detektoru, nelze identifikovat směr přilétající částice. Ovšem použitím dvou a více detektorů se lze významně posunout, vytvoříme-li tzv. koincidenční detektor. Jeho podstata spočívá v tom, že vyhodnocuje impulzy z dvou a více GM-detektorů a dokáže identifikovat okamžik, kdy došlo k současnému zásahu dvou či více GM-detektorů jednou ionizující částicí, s využitím operace logického součinu. V tomto případě hovoříme o tzv. pravých koincidencích.

Vlivem konečné délky impulzů z GM-detektorů a doby zpracování impulzů v elektronické aparatuře mohou být detekovány také tzv. nepravé (falešné) koincidence,

a to v případě částečného překrytí impulzů z různých GM-detektorů. Četnost nepravých koincidencí N_s lze vypočítat podle vzorce

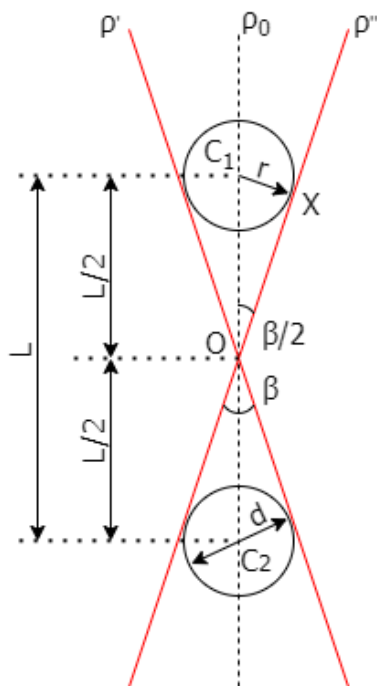
$$N_s = p \tau_0^{p-1} \prod_{i=1}^p N_i$$

(1)

kde p je počet GM-detektorů pracujících v koincidenci, τ_0 je šířka impulzu z detektoru, a N_i je průměrná četnost impulzů registrovaných v i -tém detektoru. Pro dva detektory v koincidenci vychází $N_s = 2 \tau_0 N_1 N_2$.

Koincidenční detektory jsou velmi často využívány pro zkoumání kosmického záření. Tím, že detekují částice přilétající pouze v určitém směru, je možné vhodným orientováním detektorů změřit závislost intenzity kosmického záření na astronomické výšce h a azimutu A .

Prostor, ze kterého je dvojice GM-detektorů schopna detekovat částice je charakterizován úhlem β , tzv. aperturou. Apertura závisí na průměru a vzájemné vzdálenosti GM-detektorů. S klesající aperturou bude klesat i množství zachycených koincidencí, ale poroste přesnost „zaměření“ GM-detektorů do prostoru. Situace je znázorněna na Obr. 4.



Obr. 4: Apertura dvou GM-detektorů

Zde jsou v řezu znázorněny dva válcové detektory se středy C_1 a C_2 . Vzdálenost mezi osami detektorů je rovna L . Poloměr detektoru je označen r , průměr d . Apertura detektorů je vymezena rovinami ρ' a ρ'' . V prvním přiblížení neuvažujeme délku detektorů. Pak lze velikost apertury jednoduše vypočítat z pravoúhlého trojúhelníku C_1 -X-O.

Bude platit, že

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{r}{\frac{L}{2}} = \frac{d}{L}$$

Pro aperturu pak vyjde

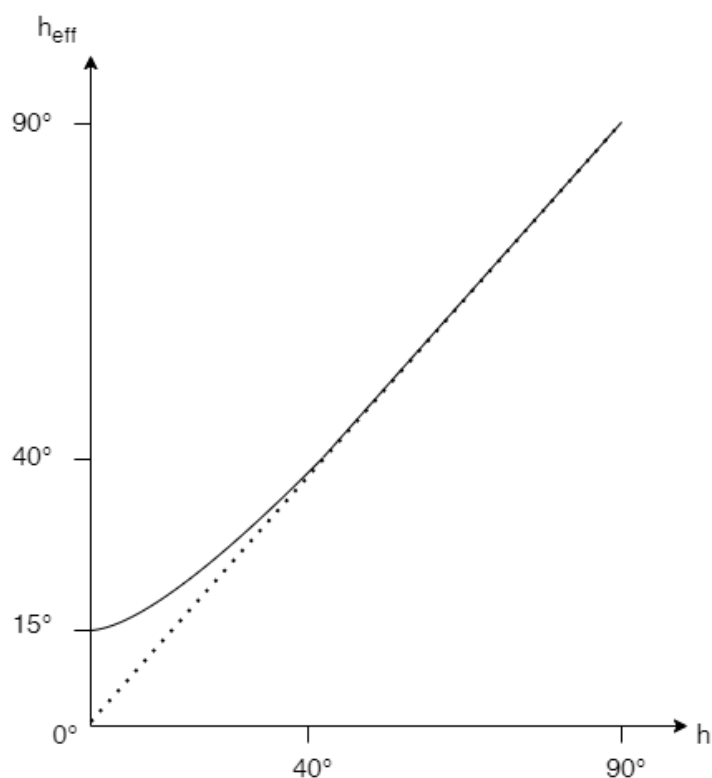
$$\beta = 2 \arcsin \frac{d}{L} \quad (2)$$

Teoretická závislost počtu detekovaných koincidencí na astronomické výšce h odpovídá funkci

$$N \approx \sin^2 h \quad (3)$$

Jak však ukázala simulace metodou Monte Carlo [3], zohledňující konkrétní geometrii detektorů a jejich konečné rozměry, je potřeba ještě zavést tzv. efektivní astronomickou výšku h_{eff} . Mezi efektivní astronomickou výškou h_{eff} a nominální astronomickou výškou h (tj. skutečným úhlem mezi rovinou ρ_0 GM-detektorů a horizontem) je obecně nelineární závislost. Pro případ detektorů o průměru 20 mm a délce 90 mm byly výsledky simulace prezentovány v článku [3] a pro představu je zjištěná závislost načrtnuta na Obr. 5.

Na rozdíl od závislosti četnosti koincidencí na astronomické výšce, je závislost počtu koincidencí na azimutu při konstantní astronomické výšce nevýznamná.



Obr. 5: Korekce na konečné rozměry detektorů

2.3.3 Měření Rossiho křivky

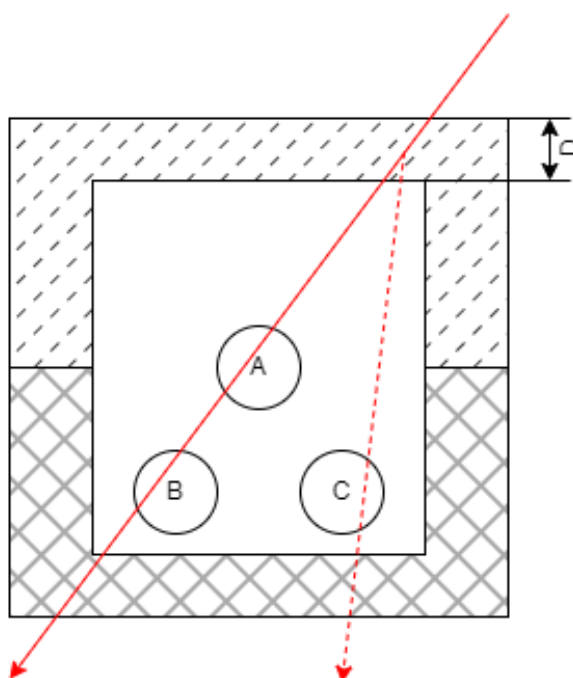
Průlomové experimenty v oblasti výzkumu kosmického záření a elektromagnetických spršek navrhl a provedl vědec italského původu jménem Bruno Rossi ve 30. letech 20. století.

Jedním z Rossiho experimentů, mimochodem jednoduše realizovatelným i v prostředí školní laboratoře, je tzv. měření Rossiho křivky. Uspořádání experimentu je schematicky v řezu znázorněno na Obr. 6. Pomocí tří GM-detektorů (označených A, B a C), umístěných do trojúhelníku, byly měřicí aparaturou zachycovány trojné koincidence. Detektory byly umístěny v prostoru pod olověným stíněním tloušťky D .

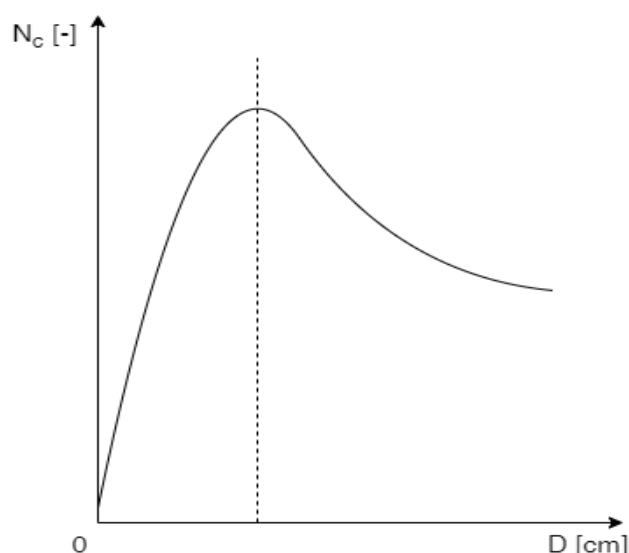
V rámci experimentu byla postupně zvyšována tloušťka stínění přidáváním dalších destiček z olova a byla zaznamenávána četnost trojných koincincí N_c . Rossi pozoroval počáteční nárůst četnosti trojných koincincí s rostoucí tloušťkou olověného stínění nad detektory. Teprve s dalším zvyšování tloušťky stínění došlo k postupnému poklesu

četnosti koincidencí, podle původních předpokladů. Závislost četnosti koincidencí na tloušťce stínícího materiálu se nazývá Rossiho křivka. Je schématicky znázorněna na Obr. 7.

Vzhledem k tomu, že jedna primární částice, přilétající ke trojici GM-detektorů, nemůže vyvolat trojnou koincidence, je jediným vysvětlením vzniku trojných koincidencí tvorba sekundárních částic v olověném stínění, a to interakcí primární částice kosmického záření s materiálem stínění. Nárůst četnosti trojných koincidencí je způsoben tvorbou sekundárních částic v materiálu stínění. Následný pokles četnosti koincidencí s rostoucí tloušťkou stínění je způsoben rostoucím stínícím efektem zvětšující se masou materiálu.



Obr. 6: Uspořádání Rossiho experimentu



Obr. 7: Rossiho křivka

2.4 Statistické zpracování naměřených dat

Protože radioaktivní rozpad je náhodný proces, není možné přesně určit okamžik přeměny. Lze určit pouze pravděpodobnost přeměny. Proto je jakékoliv měření částic, vzniklých radioaktivním rozpadem, zatíženo jistou mírou statistických fluktuací. Tyto fluktuace jsou zdrojem nejistoty měření. Proto je nutné v rámci radiačních měření (včetně měření kosmického záření) provádět také odhad nejistoty měření pomocí vhodných statistických modelů.

Statistickým modelem, nejlépe charakterizujícím radioaktivní rozpad a s ním související jevy, je binomické rozdělení. Z praktických důvodů se však dává přednost rozdělení Poissonovu, případně Gaussovu.

Poissonovo rozdělení [6] je aproximací rozdělení binomického, pro případ velkého počtu pokusů n

$$n \rightarrow +\infty$$

a malé pravděpodobnosti p výskytu sledovaného jevu v jednom pokusu

$$p \rightarrow 0$$

Pravděpodobnostní funkce Poissonova rozdělení $P(x)$ má tvar

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!}; \quad x \in \mathbb{N}_0; \quad \lambda \in \mathbb{R}^+$$

(4)

kde x je hodnota náhodné veličiny X a λ je parametr, pro který platí

$$\lambda = np$$

Průměrný počet výskytů zkoumaného jevu v daném úseku jednotkové délky je roven parametru λ . Pro střední hodnotu platí

$$\bar{x} = \sum_{x=0}^n xP(x) = \lambda$$

(5)

Pro rozptyl (nebo též střední kvadratickou odchylku) platí rovnost

$$\sigma^2 = \sum_{x=0}^n (x - \bar{x})^2 P(x) = \lambda$$

(6)

a směrodatná odchylka je tudíž rovna

$$\sigma = \sqrt{\lambda}$$

Často je nutné stanovit směrodatnou odchylku veličin vypočtených z naměřených počtů impulzů (četnosti, součty nebo rozdíly počtu impulzů, střední hodnoty atd.). Pak je nutné dbát pravidel pro výpočet směrodatných odchylek, shrnutých stručně v Tab. 1. Vzorce jsou podrobně odvozeny např. v knize [2], zde jsou uvedeny bez důkazu.

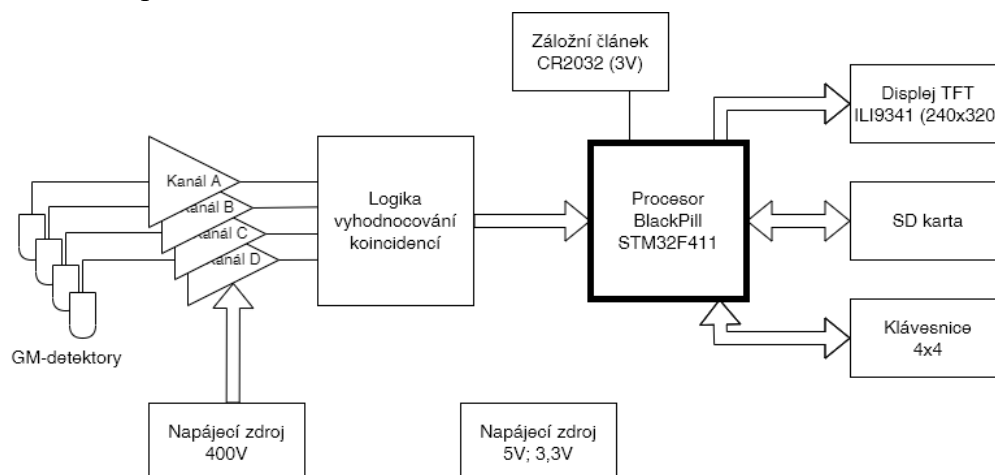
Případ	Vzorec	Směrodatná odchylka
Součet nebo rozdíl počtu impulzů	$u = x \pm y$	$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$
Násobení nebo dělení počtu impulzů konstantou	$u = Ax$ $u = \frac{x}{B}$	$\sigma_u = A \sigma_x$ $\sigma_u = \frac{\sigma_x}{B}$
Násobení nebo dělení počtu pulzů	$u = xy$ $u = \frac{x}{y}$	$\sigma_u = \sqrt{y^2 \sigma_x^2 + x^2 \sigma_y^2}$ $\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{1}{y}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(-\frac{x}{y^2}\right)^2 \sigma_y^2}$
Střední hodnota počtu impulzů (počet stejně dlouhých měření je N)	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$	$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\bar{x}}{N}}$

Tab. 1: Vzorce pro výpočet směrodatné odchylky

3 Praktická část

3.1 Celková koncepce

Na Obr. 8 je znázorněno blokové schéma koincidenčního detektoru, jehož stavba byla předmětem této práce.



Obr. 8: Principiální schéma

Koincidenční detektor umožňuje zpracovávat impulzy až ze čtyř GM-detektorů současně. GM-detektory jsou připojeny ke vstupním kanálům A až D, které zajišťují napájení GM-detektorů napětím 400 V a dochází zde pomocí Schmittových klopných obvodů řady 74HC k úpravě tvaru a délky impulzů z GM-detektorů. Výstupem z kanálů jsou pravoúhlé negativní impulzy volitelně nastavitelné šířky 13,5 μ s nebo 1,23 μ s. Šířka impulzů byla zvolena co nejmenší, s ohledem na ještě přijatelné hodnoty časovacích kapacit a spolehlivou funkci.

Upravené impulzy ze vstupních kanálů A až D jsou vedeny do bloku logiky vyhodnocování koincidence. Zde jsou hardwarově logickými hradly OR řady 74HC vyhodnocovány koincidence mezi impulzy z GM-detektorů, čímž vznikají koincidenční signály.

Jádrem detektoru je destička WeAct Black Pill V3.0, osazená procesorem STM32F411. Podrobný výčet parametrů desky, schéma zapojení a další informace byly čerpány ze zdroje [7].

Procesor, pracující na frekvenci 100 MHz, zpracovává vstupní signály z detektorů, signály koincidence a dále obsluhuje všechny periferie. Všechny vstupní signály

z detektorů a signály koincidencí jsou v procesoru zpracovávány na úrovni přerušení s nejvyšší prioritou. Minimální detekovatelná šířka impulzu, vyvolávající přerušení, činí 10 ns, čemuž plně vyhovují šířky impulzů, generované ve vstupních kanálech. Pro komunikaci s uživatelem slouží TFT displej a klávesnice. Naměřená data jsou zaznamenávána v textové formě na microSD kartu.

Procesor obsahuje blok reálného času RTC, fungující jako zdroj přesného času a data. Data z bloku RTC jsou využívána při všech měřeních. Proto, aby nedocházelo k nežádoucímu vymazání bloku reálného času při vypnutí přístroje, je procesor připojen k záložní baterii, tvořené článkem CR2032.

Celý přístroj je napájen ze síťového adaptéru, potřebná napětí se získávají pomocí lineárních integrovaných stabilizátorů. Napájení GM-detektorů je zajištěno měničem z 9 V na 400 V.

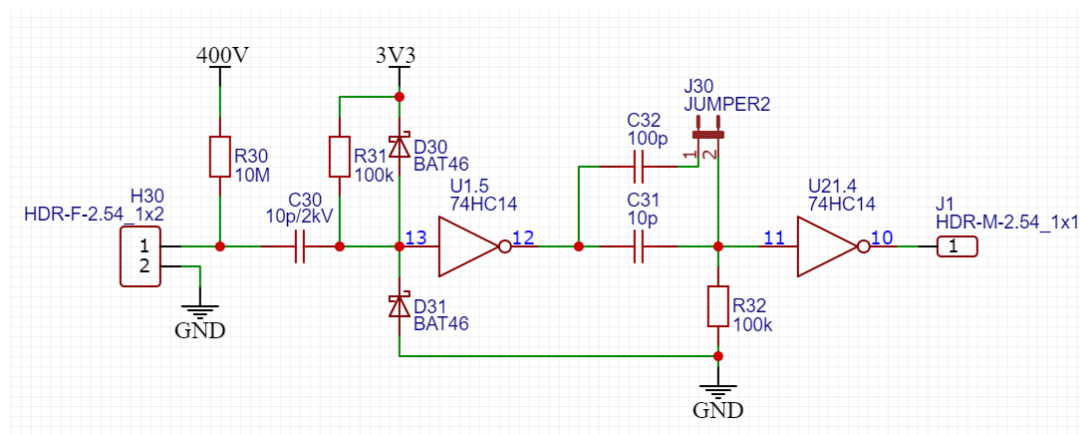
Vše, kromě síťového adaptéru a GM-detektorů, je vestavěno do univerzální plastové skříňky. Všechny ovládací a zobrazovací prvky jsou umístěny na předním panelu.

GM-detektory jsou připojeny pomocí koaxiálních kabelů délky jeden metr, zakončených BNC konektory.

Za účelem pohodlného provedení experimentů popsaných v teoretické části, byly vyrobeny dva dřevěné stojany k fixaci GM-detektorů ve zvolené poloze.

3.2 Popis zapojení

3.2.1 Blok vstupních obvodů



Obr. 9: Vstupní obvod

V každém vstupním kanále detektoru jsou za účelem získání vhodného průběhu signálu použity dva Schmittovy klopné obvody z obvodu 74HC14. Schéma jednoho vstupního kanálu (A) je znázorněno na Obr. 9. Schéma zbylých kanálů (B až D) je analogické. Schmittovy klopné obvody jsou napájeny stabilizovaným napětím 3,3 V.

Přes rezistor R30 je zajištěno napájení GM-detektoru napětím +400 V. Negativní pulz z GM-detektoru se přenáší přes vazebný kondenzátor C30 na vstup prvního

Schmittova klopného obvodu. Schottkyho diody D30, D31 slouží jako ochrana vstupu klopného obvodu před příliš vysokým/nízkým napětím. Na výstupu z prvního klopného obvodu se objeví pozitivní puls o šířce odpovídající šířce vstupního pulzu z GM-detektoru. Předpokládaná šířka pulzu na výstupu z prvního klopného obvodu je 30 μ s.

Druhý Schmittův klopný obvod spolu s kondenzátorem C31 a rezistorem R32 tvoří monostabilní klopný obvod, generující pulsy konstantní šířky. Časová konstanta je rovná hodnotě 1,23 μ s.

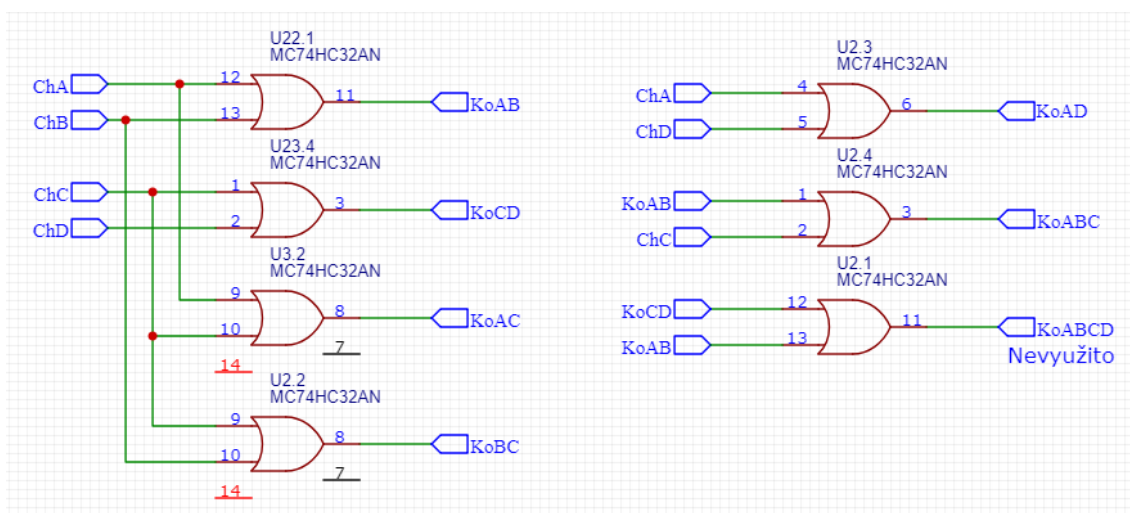
V případě instalace propojky J30 se zvýší časová konstanta monostabilního klopného obvodu na hodnotu 13,5 μ s, tedy přibližně 11 krát.

Výstupem vstupního kanálu jsou tedy negativní pulzy konstantní šířky, odpovídající vstupním pulzům z GM-detektoru.

Signály na výstupu ze všech čtyřech kanálů jsou vedeny na vstupy procesoru a také do bloku vyhodnocování koincidencí.

3.2.2 Blok vyhodnocování koincidencí

Blok vyhodnocování koincidencí (Obr. 10) je sestaven z hradel OR obvodů 74HC32. Protože impulzy z bloku vstupních obvodů mají negativní logiku, je pro vyhodnocení koincidencí v negativní logice potřeba použít právě hradla OR. Pravdivostní tabulka OR hradla je v Tab. 2.



Obr. 10: Blok vyhodnocování koincidencí

A	B	Y	Koincidence (v negativní logice)
0	0	0	Ano
0	1	1	Ne
1	0	1	Ne
1	1	1	Ne

Tab. 2: Logika OR hradla

Z bloku vstupních obvodů přicházejí do bloku vyhodnocení koincidencí impulzy kanálů A, B, C a D, ze kterých vznikají signály dvojných koincidencí KoAB, KoBC, KoCD, KoAC, KoAD, signál trojné koincidence KoABC a signál čtyřnásobné koincidence KoABCD.

Signál čtyřnásobné koincidence KoABCD není připojen k procesoru z důvodu omezeného množství vstupů do procesoru a vzhledem k tomu, že nenašel praktické uplatnění.

Signály koincidencí na výstupu z bloku jsou přivedeny na vstupy procesoru.

Zpoždění průchodu signálu hradlem OR obvodu 74HC32 je dle údajů výrobce rovno 6 ns. Tato doba je naprosto zanedbatelná v porovnání s délkou impulzů, přicházejících z bloku vstupních obvodů, proto nebude dále uvažována.

Blok vyhodnocování koincidencí je napájen stabilizovaným napětím 3,3 V.

3.2.3 Blok procesoru

Blok procesoru představuje deska WeAct Black Pill V3.0 s procesorem STM32F411CEU6 (na schématu označená U90), konektory pro připojení periferních zařízení (J92 až J94), piezoelektrický bzučák (XT90), záložní baterii (B90) a propojovací vodiče. Schéma bloku procesoru je v příloze na Obr. 30.

Na vstupy procesoru jsou přivedeny signály ze vstupních kanálů a také signály koincidence. Dále jsou k procesoru připojena periferní zařízení (displej, klávesnice a adaptér microSD karty). Pro zvukovou signalizaci je k jednomu z výstupů procesoru připojen piezoelektrický bzučák.

Deska WeAct Black Pill V3.0

Jedná se o desku o rozměrech 53x22 mm se 40 připojovacími piny. Rozteč pinů odpovídá standardnímu 40-ti pinovému DIP pouzdru. Výhodou desky jsou její malé rozměry, snadná montáž do DPS a také její samostatná funkčnost, neboť obsahuje všechny potřebné podpůrné obvody pro činnost procesoru. Deska je v současnosti na trhu dobře dostupná a svým výkonem naprosto dostačující pro použití v koincidenčním detektoru. Proto byla zvolena.

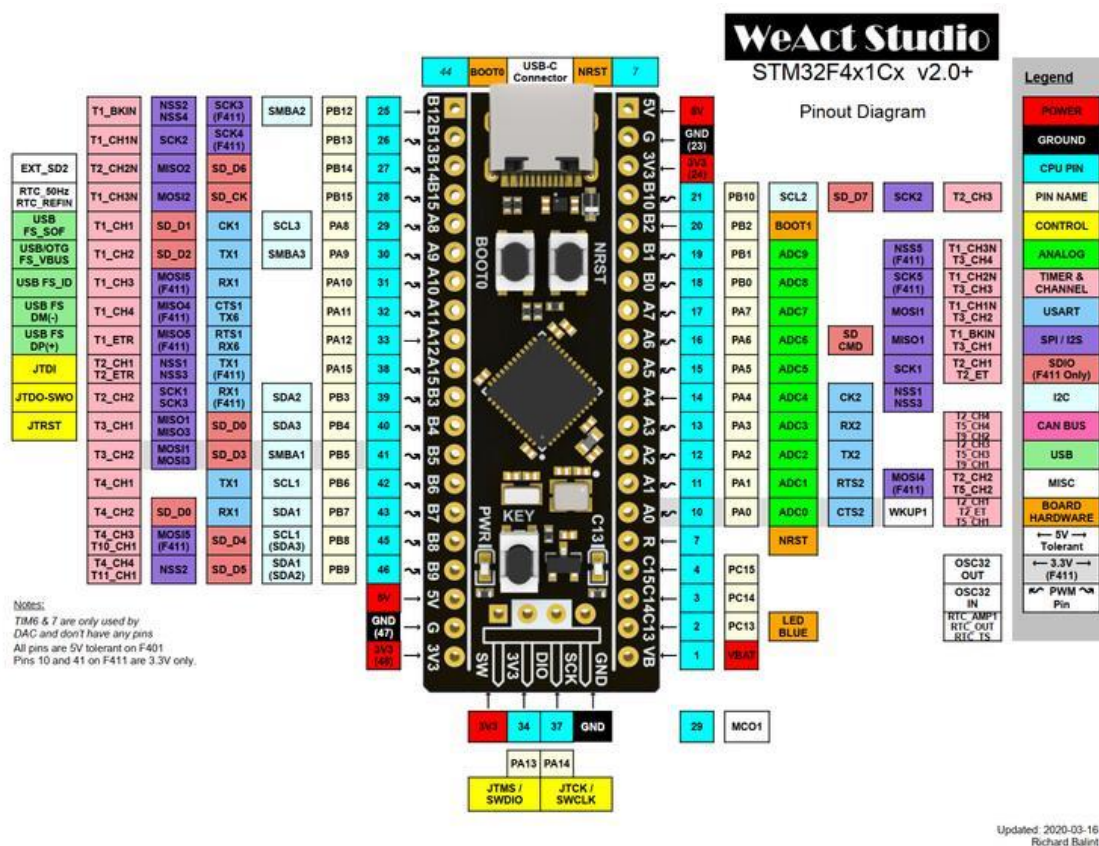
Deska je osazena procesorem STM32F411CEU6 a dalšími pomocnými obvody. Kromě procesoru se na desce nachází lineární stabilizátor 3,3 V, krystal 25 MHz pro CPU, krystal 32,768 kHz pro RTC, 3 tlačítka (reset procesoru, BOOT0 a uživatelské tlačítko), USB-C konektor, SWD konektor, a dvě LED (signalizace napájení a uživatelská LED).

Programování procesu se provádí pomocí programátoru ST-Link V2, který se připojuje pomocí čtyř vodičů k SWD konektoru.

Deska umožňuje v případě potřeby osazení externí paměti EEPROM.

Napájení desky je možné několika způsoby. První možností je napájení z konektoru USB-C, dále lze desku přímo napájet stabilizovaným napětím 3,3 V, případně lze využít vestavěného stabilizátoru. V případě použití stabilizátoru je povolené přivedené napětí v rozsahu 3,52V až 5,25V.

Půdorys desky včetně popisu jednotlivých pinů je znázorněn na Obr. 11, převzatém z [7].



Obr. 11: Deska WeAct BlackPill V3.0

Procesor STM32F411CEU6

Jedná se o 32bitový RISC procesor s jádrem ARM Cortex-M4.

Procesor spadá do rodiny procesorů s architekturou ARM. Pro ARM procesory je charakteristický vysoký výpočetní výkon při nízké spotřebě energie, dále použití jednoduché, vysoce optimalizované sady strojových instrukcí (tzv. RISC architektura). Je využívána metoda zřetězení instrukcí (tzv. pipelining), což znamená, že jsou současně prováděny různé části několika strojových instrukcí.

Architektura jádra Cortex-M4 je harwardská, tudíž je oddělena paměť programu (FLASH 512 kB) od paměti dat (SRAM 128 kB). Maximální frekvence hodin je 100 MHz. Strojové instrukce jsou zpracovávány ve třech řezech.

Procesor navenek disponuje velkým množstvím periférií, jako např. 12-ti bitový A/D převodník, 8 časovačů, rozhraní I2C, SPI, USART, USB 2.0, SDIO, dále obsahuje obvod reálného času RTC a možnost využití až 16 streamů DMA.

3.2.4 Periferie

Displej

Byl použit barevný TFT displej o velikosti 2,2" s rozlišením 240x320 pixelů. Displej je vybaven řadičem ILI9341. Barevná hloubka displeje je 6 bitů, tudíž je možno rozlišit 262144 barev. Komunikace s displejem probíhá sériově pomocí SPI rozhraní. Displej lze napájet napětím 3,3 V nebo 5 V. Displej je podsvícen pomocí LED.

Klávesnice

Byla použita maticová tlačítková klávesnice se 4x4 tlačítka. Rozměr klávesnice je 70x70 mm. Odpor tlačítka při sepnutí je 65 až 650 Ω . Klávesnice je s procesorem spojena pomocí osmi vodičů – 4 vodiče pro řádky, 4 vodiče pro sloupce.

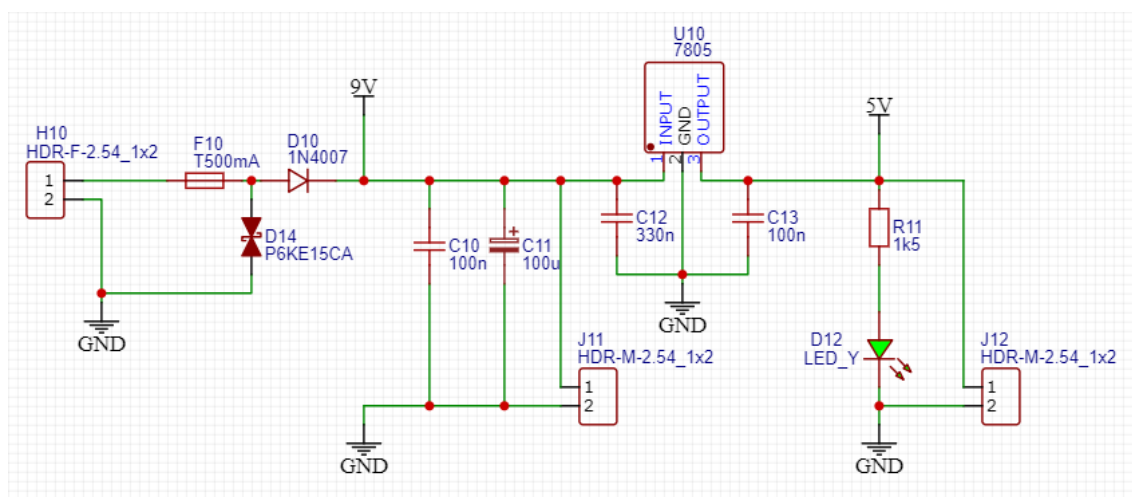
microSD karta

Jako paměťové médium pro ukládání naměřených dat je použita microSD karta. MicroSD karta se zasouvá do modulu, umožňujícího její připojení k procesoru. Komunikace probíhá sériově pomocí SPI rozhraní. Modul je použitelný pro microSD karty s kapacitou do 2 Gb nebo microSDHC karty s kapacitou do 32 Gb.

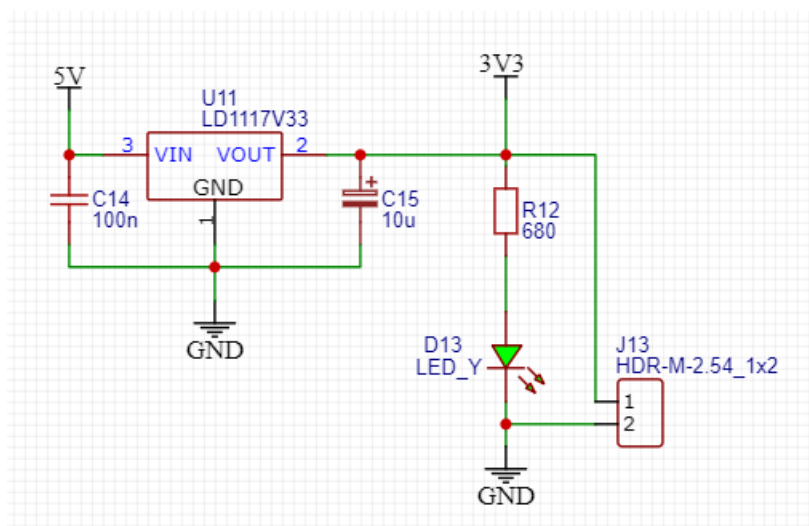
3.2.5 Napájecí zdroje 5 V a 3,3 V

Napájení přístroje je zajištěno síťovým adaptérem 9 V. Schéma napájecího zdroje je na Obr. 12. Na vstupu napájecího napětí z adaptéru je zapojena trubičková pojistka F10 a dále transil D14 s otevíracím napětím 15 V. Při překročení napájecího napětí 15 V dojde k otevření transilu D14 a k přerušení pojistky F10. Dioda D10 chrání přístroj před přepólováním. Následují filtrační kondenzátory C10, C11. Pro kontrolu napájecího napětí je instalována kolíková lišta J11.

Na výstupu stabilizátoru U10 vzniká sběrnice 5 V. Z sběrnice 5 V je napájena destička procesoru U90 a piezokeramický měnič XT90. Pro kontrolu napájecího napětí je instalována kolíková lišta J12. Na sběrnici 5 V je napojen stabilizátor U11.



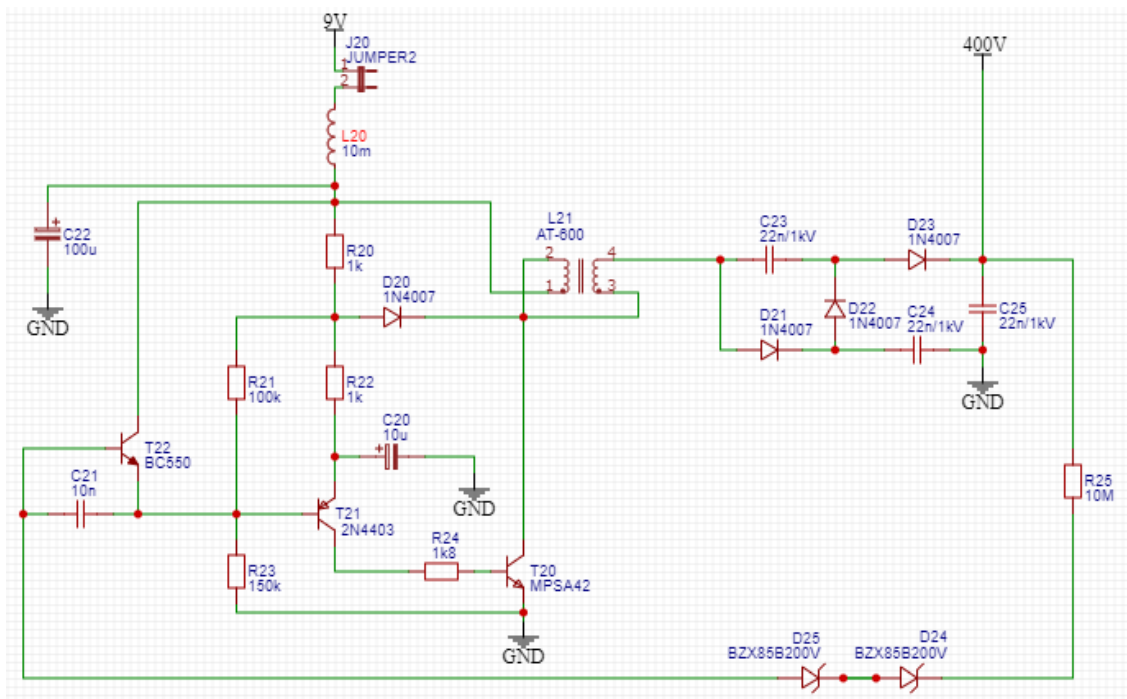
Na výstupu stabilizátoru U11 vzniká sběrnice 3,3 V, jak je znázorněno na Obr. 13.. Ze sběrnice 3,3 V jsou napájeny integrované obvody 74HC a všechny periferie. Stabilizátor U11 je typu 1117 s nízkým úbytkem napětí. Pro kontrolu napájecího napětí je instalována kolíková lišta J13.



26

Pro optickou kontrolu přítomnosti napájecích napětí 5 V a 3,3V jsou na předním panelu přístroje instalovány LED D12, D13.

3.2.6 Napájecí zdroj 400 V



Obr. 14: Zdroj napětí 400 V

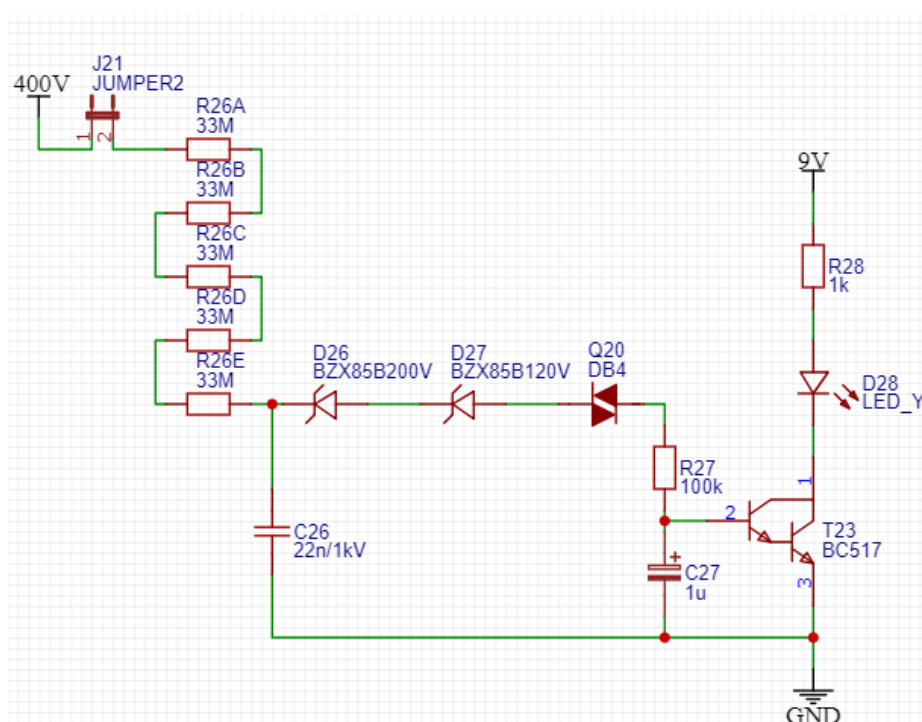
Zapojení napájecího zdroje 400 V bylo převzato od Charlese Wenzela (dostupné ze zdroje [8]) a několikrát prakticky ověřeno. Zapojení znázorněné na Obr. 14 pracuje jako oscilátor se zpětnou vazbou. Jádrem obvodu je oscilátor, tvořený tranzistory T20, T21; rezistory R20-R24, kondenzátory C20; diodou D20 a primárním vinutím feritového transformátoru L21. Oscilace v primárním vinutí budí napětí v sekundárním vinutí a přes diodový násobič, tvořený diodami D21-D23 a kondenzátory C23-C25, je získáváno stejnosměrné napětí o velikosti 400 V.

Regulace napětí na výstupu ze zdroje je realizována pomocí rezistoru R25, Zenerových diod D24, D25; tranzistoru T21 a kondenzátoru C21. V případě, že výstupní napětí přesáhne součet Zenerových napětí diod D24, D25, dojde k otevření tranzistoru T22 a tím k uzavření tranzistoru T21 a zrušení oscilací v oscilátoru.

Zdroj je vybaven signalizací úrovně napájecího napětí 400 V, znázorněné na Obr. 15. Signalizace je navržena tak, aby zatěžovala napájecí zdroj 400 V jen minimálně. Obvod

je tvořen rezistory R26A až R26E, R27, R28; Zenerovými diodami D26, D27; kondenzátory C26, C27; tranzistorem T23; diakem Q20 a LED D28.

V případě, že je napětí na výstupu ze zdroje 400 V větší než asi 360 V, dochází k periodickému otevírání Zenerových diod D26, D27, diaku Q20 a je periodicky dobíjen kondenzátor C27. Dosáhne-li napětí na kondenzátoru C27 hodnoty asi 1,4 V, dojde k otevření Darlingtonova tranzistoru T23 a k rozsvícení LED D28. V případě poklesu napětí na výstupu zdroje pod 360 V dojde k vybití kondenzátoru C27 a k pohasnutí LED D28.



Obr. 15: Indikátor napětí 400 V

3.2.7 Sondy s GM-detektory

Ke koincidenčnímu detektoru se připojují sondy s GM-detektory typu SBM-20, vyrobené v bývalém SSSR a v současnosti dobře dostupné. Katalogový list GM-detektorů SBM-20 je v Příloze D. K propojení GM-detektoru s koincidenčním detektorem je použit koaxiální kabel délky přibližně 1 metr o impedanci 50 Ω , zakončený BNC-konektorem.

3.3 Deska plošných spojů

Návrh desky plošných spojů byl proveden v programu EasyEDA. Jedná se o oboustrannou desku o rozměrech 225x163 mm. Předloha desky je vyobrazena v Příloze C.

Jako materiál byl zvolen běžný kuprexitu typu FR4 tloušťky 1,5 mm, tloušťka měděné fólie je 18 μm . Deska obsahuje celkem 498 vyvrtaných otvorů.

3.3.1 Propojky a konektory na DPS

Na desce plošných spojů se nachází řada konektorů a propojek, jejichž označení a funkce jsou shrnuty v Tab. 3.

Označení	Typ	Funkce
H10	Konektor samice	Vstup napájecího napětí +9-12 V
H30	Konektor samice	Vstup z GM-detektoru do kanálu A
H40	Konektor samice	Vstup z GM-detektoru do kanálu B
H50	Konektor samice	Vstup z GM-detektoru do kanálu C
H60	Konektor samice	Vstup z GM-detektoru do kanálu D
J00	Konektor samec	Země (0 V) pro připojení měřicího přístroje, osciloskopu
J11	Konektor samec	Kontrola napětí 9 V
J12	Konektor samec	Kontrola napětí 5 V
J13	Konektor samec	Kontrola napětí 3,3 V
J20	Propojka	Připojení napájení měniče 400 V
J21	Propojka	Připojení indikátoru napětí 400 V
J30	Propojka	Nastavení délky impulzu z kanálu A
J40	Propojka	Nastavení délky impulzu z kanálu B
J50	Propojka	Nastavení délky impulzu z kanálu C
J60	Propojka	Nastavení délky impulzu z kanálu D
J90	Konektor samec	Vyvedení pinů z desky BlackPill pro měřicí přístroj, osciloskop
J91	Konektor samec	Vyvedení pinů z desky BlackPill pro měřicí přístroj, osciloskop
J92	Konektor samice	Připojení klávesnice
J93	Konektor samice	Připojení adaptéru microSD karty
J94	Konektor samice	Připojení displeje
J99	Konektor samec	Volné (nouzové) konektorové pole 2x20 pinů

Tab. 3: Propojky a konektory na DPS

3.4 Programové vybavení

3.4.1 Popis základních funkcí

Programové vybavení koincidenčního detektoru zajišťuje obsluhu všech periférií (registraci impulzů a koincidencí z GM-detektorů, komunikace s uživatelem, záznam dat na paměťové médium) a provedení zvoleného měření. Detektor ovládá uživatel z klávesnice a veškeré potřebné informace vidí na displeji.

Z pohledu uživatele rozlišujeme tři pracovní režimy programu detektoru:

1. Nastavení koincidenčního detektoru

Pro správnou funkci detektoru je nutné, aby uživatel v rámci nastavení zadal správný datum a čas.

Dále uživatel nastavuje parametry samotného měření, jako použité vstupní kanály, délku měření, počet opakování měření, míru podrobnosti záznamu detekovaných impulzů.

2. Test funkčnosti GM-detektorů

Pro základní kontrolu správné funkce připojených GM-detektorů slouží tzv. test funkčnosti. V nastaveném časovém úseku (alespoň 5 minut) je detekován počet impulzů přicházejících z GM-detektorů. Počet impulzů je porovnán s přípustným dolním a horním limitem na základě čeho je vyhodnocena správná či nesprávná funkce GM-detektoru. Výsledky testu jsou zapsány do textového souboru na microSD kartu.

3. Měření koincidenčním detektorem

Nejdůležitější částí programu je koincidenční detektor. Na základě nastavení provedeného uživatelem je provedeno vlastní měření se záznamem do textového souboru na microSD kartu. Měření je spuštěno ručně uživatelem. Ukončení měření proběhne po uplynutí nastavené doby a počtu opakování. Je samozřejmě možné i ukončit měření ručně v libovolném okamžiku.

Při měření jsou koincidenčním detektorem registrovány impulzy přicházející ze vstupních kanálů GM-detektorů a impulzy koincidencí. Každý impulz vyvolá v procesoru přerušení, v rámci jehož obsluhy je zaregistrováno číslo vstupu, časová značka daného

okamžiku a je zvýšen čítač příslušného kanálu. Nakonec dojde k zápisu řádku se všemi informacemi o události do souboru se záznamem měření.

Po ukončení měření jsou do záznamu vypsány součty impulzů v jednotlivých kanálech.

3.4.2 Použité nástroje a knihovny

Vývojové prostředí a knihovny

K vývoji programu koincidenčního detektoru bylo použito výhradně integrované vývojové prostředí STM32CubeIDE. Vývoj proběhl v jazyce C.

V maximální míře byly využity HAL knihovny, dodávané spolu s vývojovým prostředím.

Pro práci se souborovým systémem na microSD kartě byla využita knihovna FATFS, jež je součástí balíku knihoven dodaných s vývojovým prostředím.

Externí knihovna pro práci s displejem

Pro práci s TFT displejem byla použita externí knihovna ILI9341 LCD driver v1.2, volně dostupná ze zdroje [9].

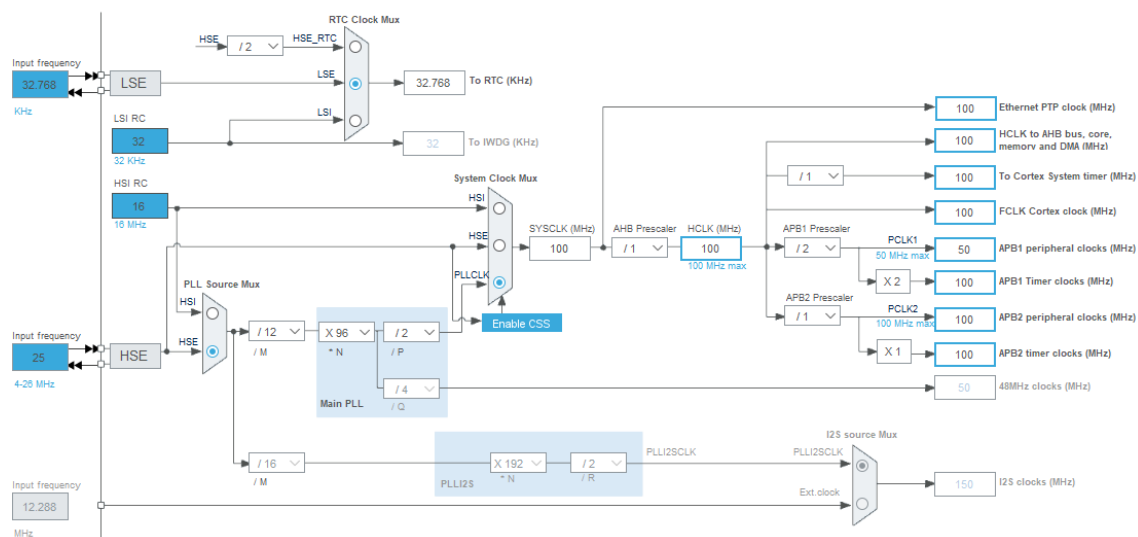
Externí knihovna pro práci s klávesnicí

Obsluha klávesnice je prováděna pomocí externí knihovny STM32 Keypad Interfacing Library 4×4, volně dostupné ze zdroje [10].

3.4.3 Konfigurace procesoru

Konfigurace procesoru byla provedena ve vývojovém prostředí v nástroji MX (Device Configuration Tool). Výstupem je konfigurační soubor `F411_KD_v20.ioc`.

Jako zdroj hodin pro procesor byl zvolen externí krystal o frekvenci 25 MHz. Pomocí vnitřního fázového závěsu (násobič kmitočtu) je získán hodinový signál HCLK a SYSCLK rovný 100 MHz. Zdrojem hodin pro RTC obvod je externí krystal o frekvenci 32,768 kHz. Konfigurace hodin je znázorněna na Obr. 16.



Obr. 16: Konfigurace hodin

Nastavení pinů procesoru, použitých pro účely koincidenčního detektoru, je uvedeno v následující Tab. 4.

Pin	Alias	Vstup/výstup	Funkce
PB14	LCD_RST	Výstup	Signál RST sériové linky SPI k displeji (obsaženo v souboru lcd_io_spi.h)
PA8	LCD_RS	Výstup	Signál pro reset displeje (obsaženo v souboru lcd_io_spi.h)
PB12	LCD_CS	Výstup	Signál CS sériové linky SPI k displeji (obsaženo v souboru lcd_io_spi.h)
PB13	LCD_SCK	Výstup	Signál SCK sériové linky SPI k displeji (obsaženo v souboru lcd_io_spi.h)
PB15	LCD_MOSI	Výstup	Signál MOSI sériové linky SPI k displeji (obsaženo v souboru lcd_io_spi.h)
PA9	LCD_BL	Výstup	Signál BL pro ovládání podsvitu displeje (obsaženo v souboru lcd_io_spi.h)
PA4	SD_CS	Výstup	Signál CS sériové linky SPI k microSD kartě
PA5	SPI1_SCK	Výstup	Signál SCK sériové linky SPI k microSD kartě
PA6	SPI1_MISO	Vstup	Signál MISO sériové linky SPI k microSD kartě
PA7	SPI1_MOSI	Výstup	Signál MOSI sériové linky SPI k microSD kartě
PA10	GM_B	Vstup	Vstup z GM-detektoru B, vyvolá přerušení na lince EXTI15_10
PA11	GM_A	Vstup	Vstup z GM-detektoru A, vyvolá přerušení na lince EXTI15_10
PA12	GM_AB	Vstup	Vstup koincidence AB, vyvolá přerušení na lince EXTI15_10
PA15	GM_BC	Vstup	Vstup koincidence BC, vyvolá přerušení na lince EXTI15_10
PB3	GM_ABC	Vstup	Vstup koincidence ABC, vyvolá přerušení na lince EXTI3
PB4	GM_CD	Vstup	Vstup koincidence CD, vyvolá přerušení na lince EXTI4
PB5	GM_AD	Vstup	Vstup koincidence AD, vyvolá přerušení na lince EXTI9_5
PB6	GM_AC	Vstup	Vstup koincidence AC, vyvolá přerušení na lince EXTI9_5
PB7	GM_C	Vstup	Vstup z GM-detektoru C, vyvolá přerušení na lince EXTI9_5
PB8	GM_D	Vstup	Vstup z GM-detektoru D, vyvolá přerušení na lince EXTI9_5
PB9	TIM11_CH1	Výstup	PWM výstup pro zvukovou signalizaci
PC13	LED_13	Výstup	Výstup na vestavěnou LED na desce BlackPill
PA0	KB_R1	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 1. řádek
PA1	KB_R2	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 2. řádek
PA2	KB_R3	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 3. řádek
PA3	KB_R4	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 4. řádek
PB0	KB_C1	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 1. sloupec
PB1	KB_C2	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 2. sloupec
PB2	KB_C3	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 3. sloupec
PB10	KB_C4	Vstup/výstup	Signál z klávesnice – 4. sloupec

Tab. 4: Konfigurace pinů procesoru

V rámci konfigurace periférií procesoru byly oživeny následující bloky:

Periferie	Funkce
RTC	Hodiny reálného času
TIM2	Čítač cyklů procesoru (inkrementuje +1 s periodou 10 ns)
TIM11	PWM výstup pro zvukovou signalizaci
SPI1	Sériová komunikace s microSD kartou
SPI2	Sériová komunikace s displejem

Tab. 5: Konfigurace periférií procesoru

Vstupy s impulzy od GM-detektorů a koincidenci jsou zpracovávány pomocí přerušení. V Tab. 6 jsou shrnuta všechna externí přerušení v pořadí, v jakém jsou zpracovávána. Ve sloupci „IRQ Handler“ je uveden název funkce ze souboru `stm32f4xx_it.c`, pomocí které je přerušení zpracováváno.

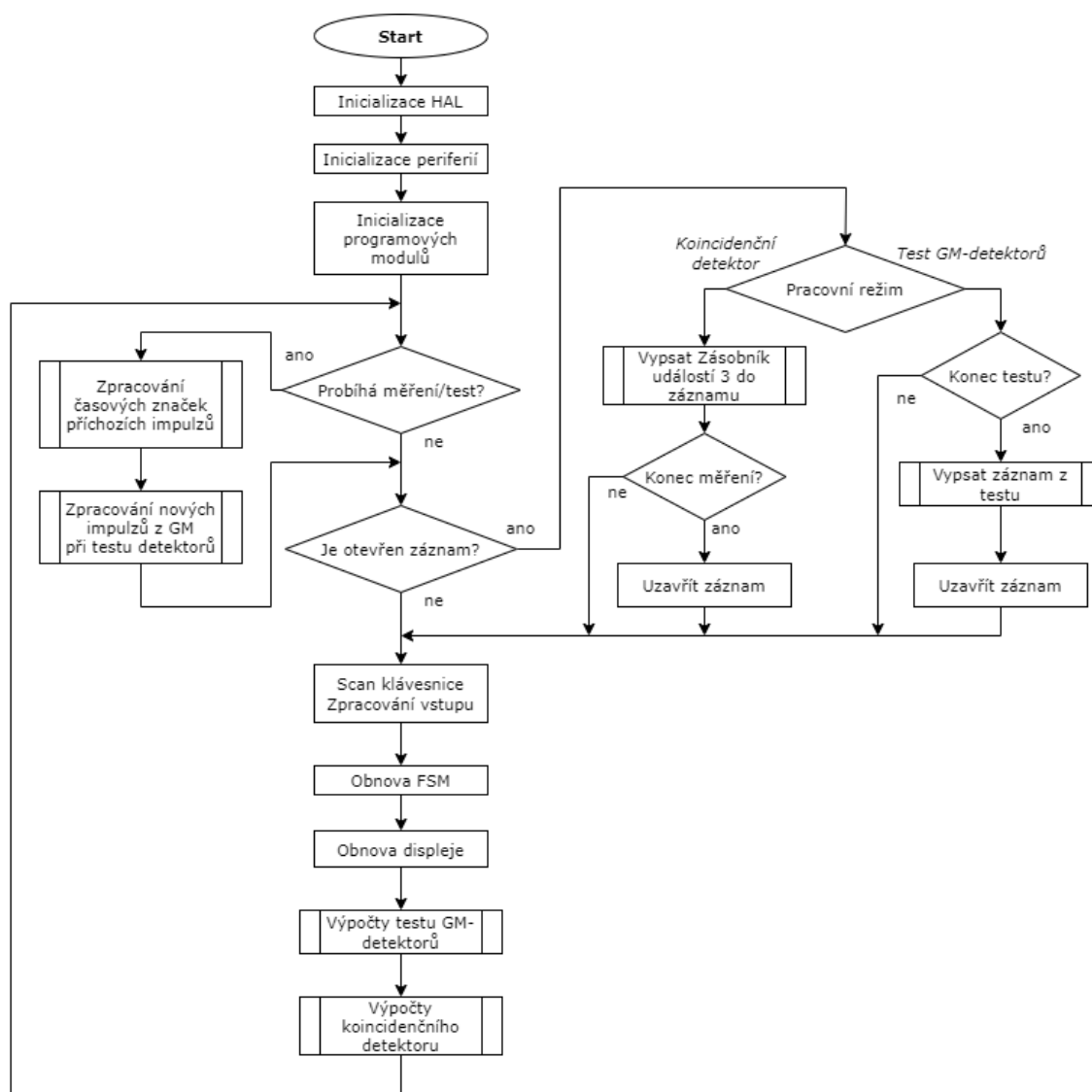
Pořadí	Vstup	IRQ Handler	Přerušení
1	GM_AD	EXTI9_5_IRQHandler	GPIO_EXTI5
2	GM_AC	EXTI9_5_IRQHandler	GPIO_EXTI6
3	GM_C	EXTI9_5_IRQHandler	GPIO_EXTI7
4	GM_D	EXTI9_5_IRQHandler	GPIO_EXTI8
5	GM_ABC	EXTI3_IRQHandler	GPIO_EXTI3
6	GM_CD	EXTI4_IRQHandler	GPIO_EXTI4
7	GM_AB	EXTI15_10_IRQHandler	GPIO_EXTI12
8	GM_BC	EXTI15_10_IRQHandler	GPIO_EXTI15
9	GM_B	EXTI15_10_IRQHandler	GPIO_EXTI11
10	GM_A	EXTI15_10_IRQHandler	GPIO_EXTI10

Tab. 6: Seznam přerušení

3.4.4 Hlavní smyčka programu

Na Obr. 17 je pomocí vývojového diagramu zjednodušeně znázorněna hlavní smyčka programu, spuštěném v procesoru. Po proběhnutí iniciační fáze programu, kdy jsou alokovány všechny proměnné a struktury a nastaveny výchozí hodnoty.

Po proběhnutí iniciační fáze vstupuje program do nekonečné smyčky. Zde jsou periodicky vyhodnocovány vstupní impulzy buď v rámci testu funkce GM-detektorů nebo v režimu koincidenčního detektoru. Dále je periodicky prováděna obsluha všech periférií, je řízena volba pracovního režimu v sekvenčním automatu (FSM), je prováděn zápis údajů do výstupního souboru a je vyhodnocována uplynutá délka měření.

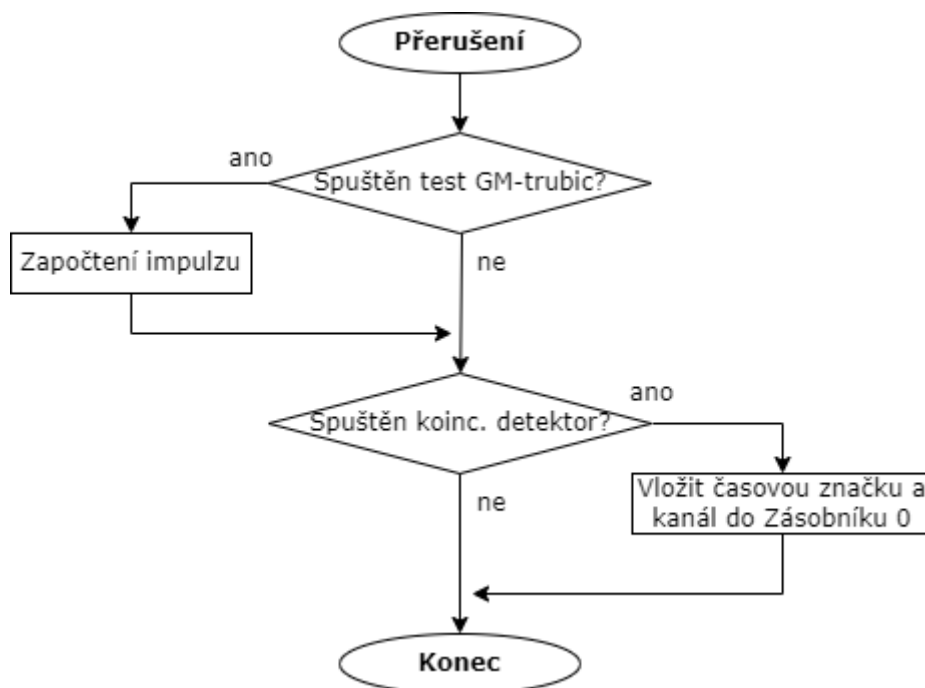


Obr. 17: Hlavní smyčka programu

Na dalším Obr. 18 je znázorněn vývojový diagram obsluhy přerušení, způsobeného impulzem z GM-detektoru nebo koincencí. Jedná se časově kritickou úlohu, množství prováděných operací v rámci obsluhy přerušení je minimalizováno.

V případě provádění testu funkčnosti GM-detektorů je pouze započten příchozí impuls v čítači příslušného kanálu.

V případně práce v režimu koincidenčního detektoru je zaregistrována časová značka ve formě počtu cyklů procesoru (časovač TIM2) a čísla vstupního pinu v poli nazvaném Zásobník 0. Tím končí obsluha přerušení.



Obr. 18: Zpracování přerušení

3.4.5 Algoritmus vyhodnocování koincidencí

Algoritmus vyhodnocování vstupních impulsů a koincidencí je znázorněn v diagramu na Obr. 19. Kromě Zásobníku 0 jsou v rámci algoritmu implementovány ještě Zásobníky 1, 2 a 3. Algoritmus je periodicky obsluhován v rámci běhu hlavní smyčky, nezávisle na přerušení.

V prvním kroku jsou záznamy ze Zásobníku 0 rozšířeny o časové údaje z registrů obvodu RTC a jsou přesunuty do Zásobníku 1.

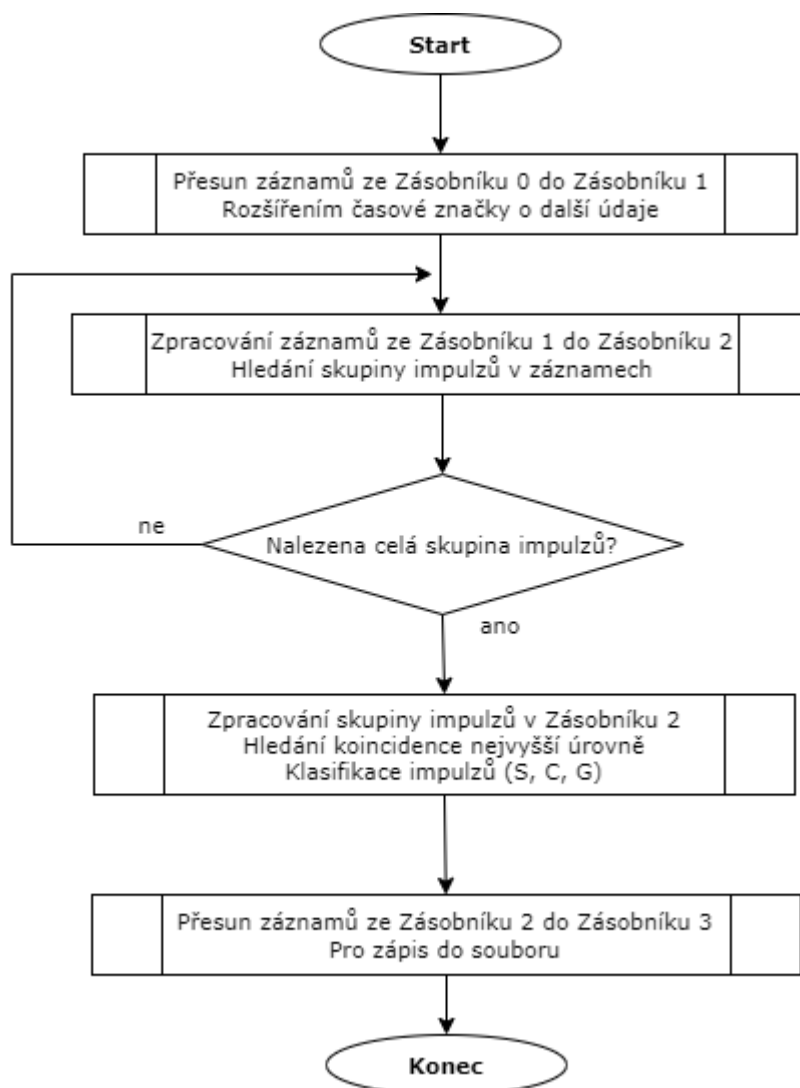
Následuje kopírování záznamů ze Zásobníku 1 do Zásobníku 2. V záznamech v Zásobníku 2 jsou hledány tzv. skupiny impulsů. Důvod vysvětluje následující příklad.

Příklad: V jeden okamžik jsou registrovány koincidence ABC, AB, AC, BC a impulsy A, B, C. Protože impulsy/koincidence byly registrovány ve stejný okamžik, je zřejmé, že v detektorech vznikla pouze koincidence ABC. Nazvěme tuto koincidenci koincidencí nejvyššího řádu. Ostatní současně registrované koincidence jsou tzv. nižších řádů a při dalším zpracování naměřených dat je bude nutné z vyhodnocení vyřadit. Samostatné impulsy A, B, C, registrované v rámci zachycení koincidence, budou též vyřazeny. Proto musí být zpracovávány vždy celé skupiny příchozích impulsů.

Je-li v Zásobníku 2 identifikována celá skupina impulzů, dojde k jejímu dalšímu zpracování a kopírování ze Zásobníku 1 je přerušeno. Jde o identifikaci koincidence nejvyššího řádu a klasifikaci impulzů podle následujících kritérií:

- samostatný impulz – není součástí koincidence, v záznamu označen písmenem „S“
- koincidence nejvyššího řádu – v záznamu označena písmenem „C“
- ostatní impulz ze skupiny – buď koincidence nižšího řádu nebo samostatný impulz tvořící koincenci (A, B, C, D), v záznamu označen písmenem „G“

Oklasifikované záznamy jsou přesunuty do Zásobníku 3.



Obr. 19: Vyhodnocování koincencí

Zásobník 3 představuje řádky, čekající na zápis do textového záznamu.

3.4.6 Moduly programu

Modul appCommon

Obsahuje konstanty a funkce, související zejména hardwarovou konfigurací a mající platnost v rámci všech programových modulů. Využíváno ostatními moduly.

Modul appDetector

Modul obsahuje datové struktury a funkce koincidenčního detektoru. V modulu jsou cyklicky (v rámci obsluhy hlavní smyčky) zpracovávány záznamy příchozích impulzů/koincidencí, vzniklé v modulu appTimeStamp. Impulzy/koincidence jsou vyhodnocovány i s ohledem na současně příchozí jiné impulzy/koincidence. Důvod takového způsobu zpracování vysvětluje kapitola 3.4.5.

Modul appError

Obsahuje funkce volané v případě detekování chyby v programu. Zavoláním chybové funkce dojde k zobrazení chybové zprávy a běh programu končí. Chybové funkci se předává jako parametr chybový kód a řetězec, které jsou pak zobrazeny na displeji a s jejich pomocí lze přesně lokalizovat místo vzniku chyby ve zdrojovém kódu.

Modul appFSM

Obsahuje jednoduchý sekvenční automat, jež určuje, do jakého pracovního módu je možné přejít na základě povelů z klávesnice a zajišťuje správný přechod mezi pracovními módy. Možnými pracovními módy jsou:

- uvítací obrazovka
- hlavní menu
- nastavení data a času
- test GM-detektorů
- nastavení
- koincidenční detektor

Modul appMain

V modulu je obsažena funkce hlavní smyčky `APP_mainKD` a dále obsáhla řada pomocných funkcí, volaných v rámci hlavní smyčky. Funkce hlavní smyčky obsahuje inicializační část a dále nekonečný cyklus. V inicializační fázi dochází k nastavení výchozích hodnot globálních proměnných a struktur. Po proběhnutí inicializační fáze vstupuje program do nekonečného cyklu. V rámci každého cyklu jsou provedeny potřebné výpočty, obsluha periférií a zápis dat na paměťové médium.

Vedle hlavní smyčky stojí na stejné úrovni funkce pro obsluhu přerušení, vyvolaného příchodem impulsu z GM-detektoru či koincidencí. Jedná se o funkci HAL s názvem `HAL_GPIO_EXTI_Callback`, kterou je potřeba pro obsluhu přerušení naimplementovat. V rámci volání funkce pro obsluhu přerušení dochází pouze k započtení příchozího impulsu a k přidělení časové značky. Ostatní procesy, související se zpracováním příchozího impulsu proběhnou v rámci periodické obsluhy hlavní smyčky. Důvodem je především úspora času, protože je nutné minimalizovat na co nejmenší míru množství operací, prováděných v rámci obsluhy přerušení.

Modul appSound

Pomocí časovače TIM11 nakonfigurovaného do režimu PWM je zavoláním příslušné funkce generován zvukový výstup na piezoelektrickém bzučáku.

Modul appTimeStamp

Modul zajišťuje registraci příchozích impulsů/koincidencí a obsahuje funkci, která je přímo volána v rámci obsluhy přerušení vyvolaného příchozím impulzem/koincidencí.

Modul appTimeUtil

Modul navazuje na standardní modul `time.h`. Obsahuje konstanty, struktury a funkce, potřebné pro práci s datumem a časem.

Modul appTubeTest

Modul obsahuje struktury a funkce pro provedení testu funkčnosti GM-detektorů.

Modul appUserData

Modul slouží ke zpracování dat, zadávaných uživatelem. V rámci nastavení programu jsou uživatelem zadávány různé číselné případně binární hodnoty, které jsou zpracovávány a uloženy v tomto modulu. Při zpracování je kontrolováno, zda zadaná hodnota leží v požadovaném rozsahu a jsou kontrolovány logické vazby binárních hodnot.

Moduly displeje

Moduly displeje navazují na knihovnu ILI9341 LCD driver v1.2 [9]. Díky knihovně je možné poměrně jednoduše vytvořit potřebný obsah příslušné obrazovky na displeji. Pro koincidenční detektor bylo vytvořeno celkem 7 obrazovek:

- uvítací obrazovka
- hlavní menu
- nastavení data a času
- test GM-detektorů
- nastavení
- koincidenční detektor
- chybové hlášení

Podrobný popis obsahu jednotlivých obrazovek a význam zobrazovaných hodnot a symbolů je uveden v Příloze E.

3.4.7 Formát výstupních souborů

Koincidenční detektor vytváří na microSD kartě dva typy výstupních souborů – záznamů:

Záznam z testu GM-detektorů

Záznam je uložen ve formátu TXT. Obsahuje počet naměřených impulzů z testovaných detektorů a vyhodnocení formou funkční/nefunkční.

Záznam z měření koincidenčního detektoru

Záznam je uložen ve formátu CSV. V hlavičce záznamu je datum a čas vytvoření

záznamu. Za hlavičkou následují záznamy událostí.

Záznam každé události (samostatný impuls z GM-detektoru nebo koincidence) je vždy na samostatném řádku a obsahuje časový údaj a označení zdroje impulsu.

Na konci souboru jsou vypsány součty impulsů v registrovaných kanálech, délka provedeného měření a datum a čas ukončení záznamu.

3.5 Mechanická konstrukce

Deska plošných spojů spolu s ovládacími prvky a konektory byla vestavěna do univerzální plastové krabičky Z17W s rozměry 92x235x217 mm.

Za účelem pohodlné fixace GM-detektorů při provádění úloh uvedených v kap. 2.3 byly zhotoveny dva dřevěné stojany. K výrobě byla použita buková překližka. Stojany byly nalakovány průhledným lodním lakem.

První stojan představuje krabička tvaru kvádra a lze jej využít například pro měření Rossiho křivek dle kap. 2.3.3. Ve stojanu je k dispozici celkem osm pozic pro umístění GM-detektoru, čtyři pozice leží na vodorovné ose, zbylé čtyři pozice na ose svislé. Rozestup pozic na každé z os je roven 2 cm. Stínící destičky z olova jsou pokládány na horní stěnu krabičky.

Druhý stojan představuje otočný rám s úhломěrem a lze jej využít například k měření dle kap. 2.3.2. V rámu je k dispozici celkem 14 pozic s roztečí 20 mm pro umístění GM-detektorů. Natáčením rámu měníme rovinu GM-detektorů umístěných v rámu. Úhel mezi vodorovnou rovinou a rovinou GM-detektorů indikuje ručka na stupnici úhломěru. Zapevnění rámu vůči podstavci se provádí dotažením křídlových matic.



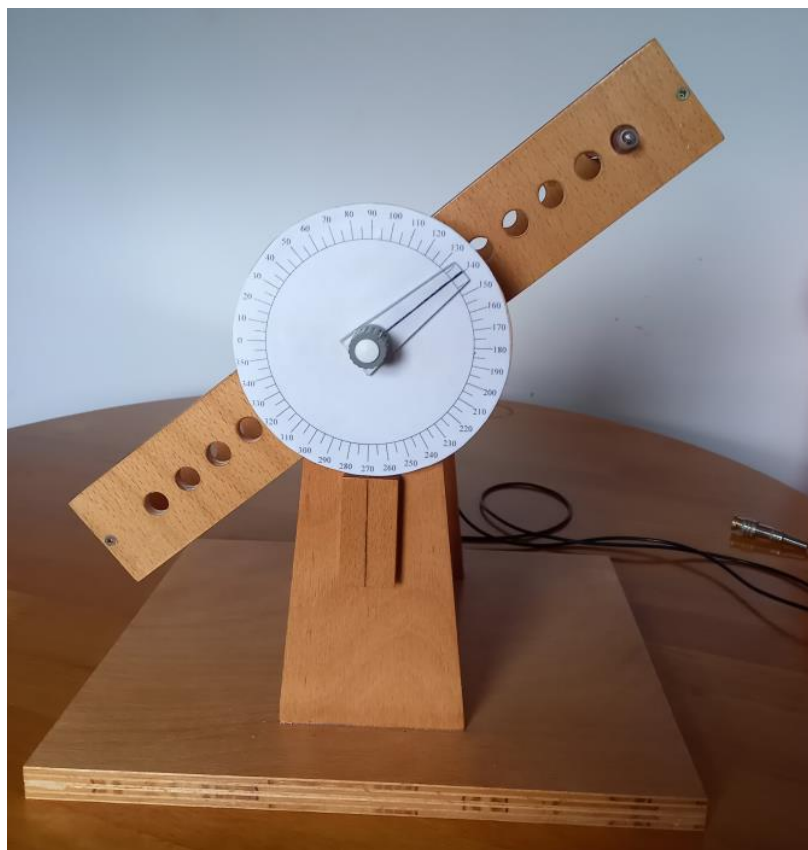
Obr. 20: Přední panel detektoru



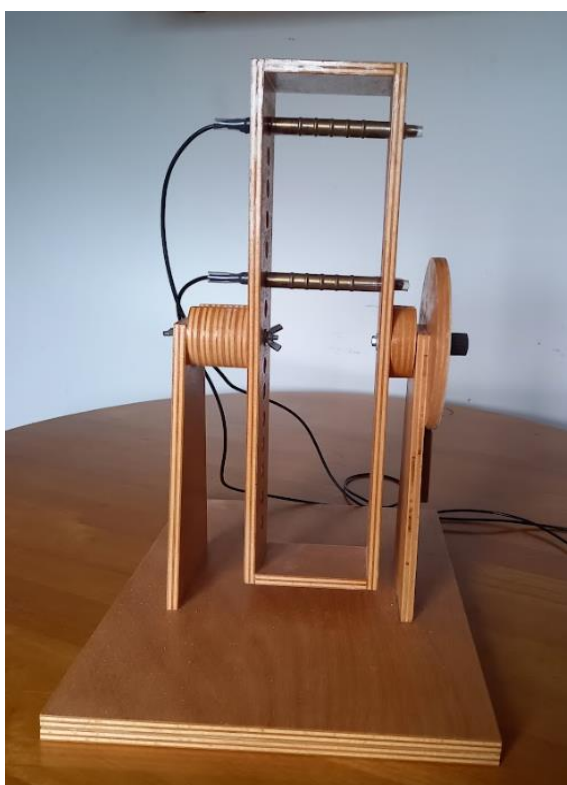
Obr. 22: Zadní panel detektoru



Obr. 21: Stojan pro měření Rossiho křivky



Obr. 24: Stojan pro měření kosmického záření

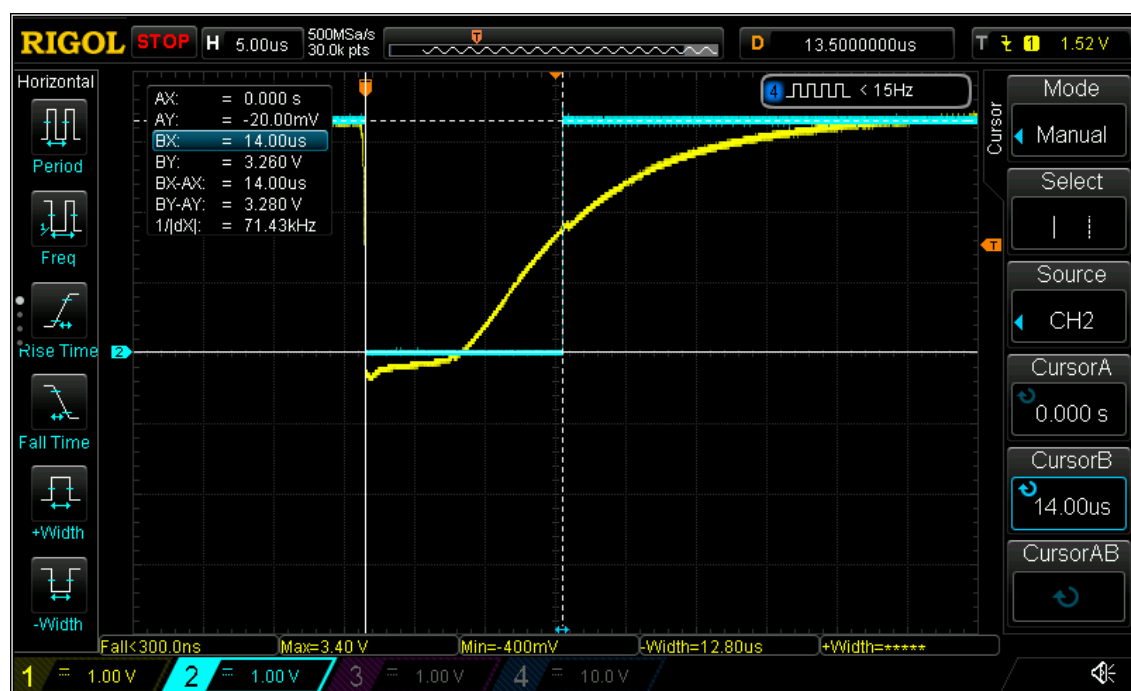


Obr. 23: Stojan pro měření kosmického záření

4 Testování

Po sestavení a oživení koincidenčního detektoru byly provedeny opakované zkoušky funkce, jejich výsledky jsou shrnuty níže.

4.1 Parametry koincidenčního detektoru



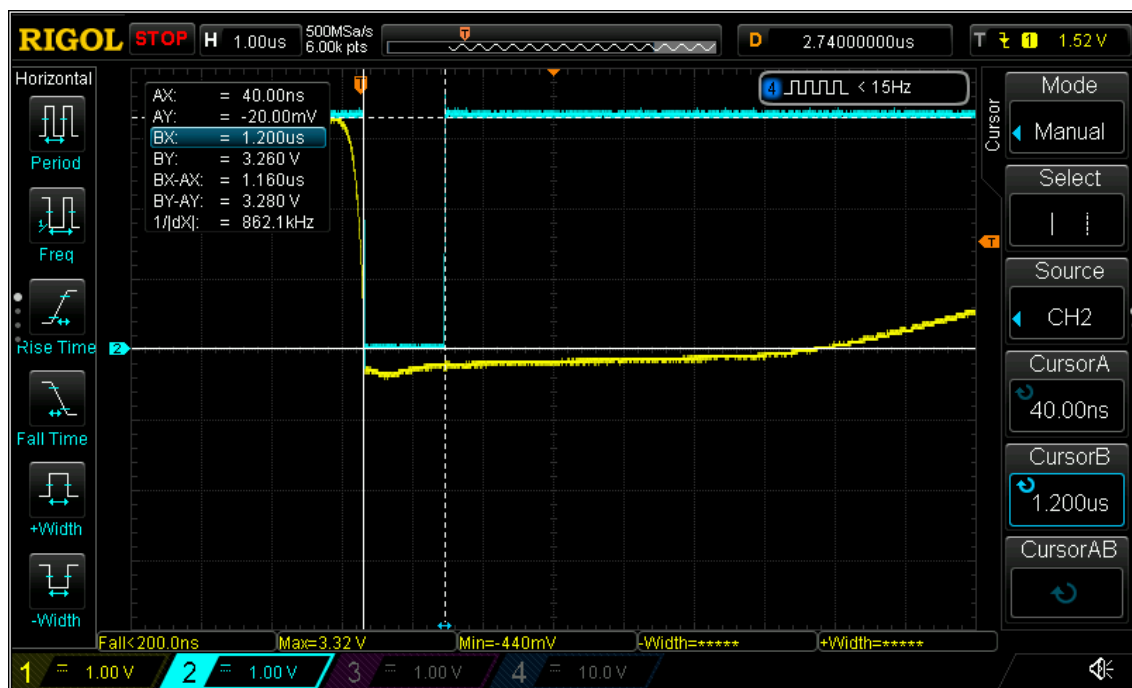
Obr. 25: Kanál A s propojkou J30

Každý ze vstupních kanálů detektoru obsahuje propojku (ozn. J30, J40, J50, J60) popsanou v kap. 3.2.1, pomocí které lze měnit šířku výstupního impulzu. V případě instalace propojky je tvar vstupního a výstupního signálu v kanále A zachycen na Obr. 25. Tvar signálu z GM-detektoru je přibližně konstantní a jeho šířka je přibližně rovna 30 μ s. Impulz na výstupu z kanálu A s propojkou J30 má šířku 14 μ s. Je-li propojka nezapojena, sníží se šířka impulzu na 1,2 μ s (Obr. 26).

Naměřené a průměrné hodnoty pro všechny kanály jsou shrnuty v Tab. 7.

Kanál	S propojkou [μ s]	Bez propojky [μ s]
A	14,0	1,20
B	13,6	1,34
C	13,1	1,14
D	13,2	1,24
Průměr	13,5 $\pm$ 0,4	1,23 $\pm$ 0,08

Tab. 7: Parametry kanálů



Obr. 26: Kanál A bez propojky J30

S ohledem na zanedbatelnou dobu zpracování signálů v bloku vyhodnocení koincidencí, je velikost koincidenčního okna τ_k dána šířkou výstupního impulsu ze vstupního kanálu τ_0 . Pro koincidenční dvou detektorů bez zapojené propojky platí

$$\tau_k = 2\tau_0 = 2 \cdot 1,23 = 2,46 \mu s$$

Díky znalosti velikosti koincidenčního okna lze vypočítat četnost nepravých koincidencí definovanou vztahem (1). Ze vztahu vyplývá, že čím je kratší koincidenční okno, tím je nižší četnost nepravých koincidencí. Proto je výhodnější provozovat vstupní kanály bez propojek J30 až J60.

Je-li průměrná četnost impulsů z GM-detektoru $0,5 s^{-1}$, pak vychází četnost nepravých koincidencí

$$N_s = 2 \cdot 1,23 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5^2 = 6 \cdot 10^{-7} s^{-1}$$

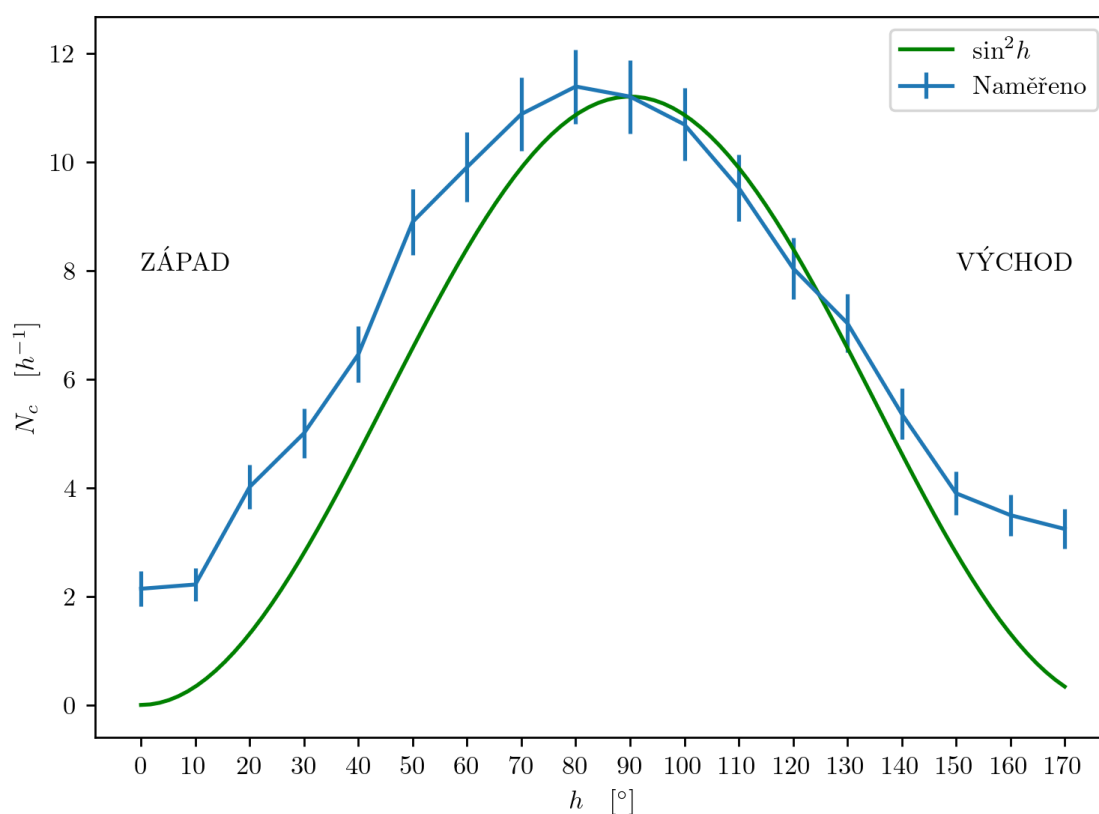
Dále byla provedena simulace současného příchodu všech vstupních signálů do procesoru za účelem zjištění délky trvání obsluhy přerušení. Měření bylo provedeno pomocí interního časovače TIM2 s periodou 10 ns, odpovídající délce jednoho strojového cyklu. Zjištěná průměrná doba obsluhy jednoho přerušení činí 148 strojových cyklů, tj. 1,48 μs .

4.2 Příklad měření koincidenčním detektorem

Pomocí dvou GM-detektorů a otočného stojanu byla proměřena závislost četnosti koincidencí na astronomické výšce. Měření proběhlo pro výšky 0° až 170° s krokem po 10° . Osy detektorů směřovaly ve směru sever-jih. Doba měření se pohybovala okolo 24 hodin. Detektory byly umístěny s rozstupem 100 mm, jejich průměr je přibližně roven 10 mm, tudíž jejich apertura byla podle vztahu (2) rovna

$$\beta = 2 \arcsin \frac{d}{L} = 2 \arcsin \frac{10}{100} = 11,5^\circ$$

Naměřené četnosti koincidencí pro dané úhly jsou vyneseny do Grafu na Obr. 27 modrou barvou a též byly vyneseny chybové úsečky. Teoretický průběh podle vztahu (3) je vynesěn čarou zelenou.



Obr. 27: Závislost četnosti koincidencí na výšce

Naměřený průběh je v souladu s fakty, uvedenými v teoretické části. Z průběhu je jasně patrná východo-západní anomálie, zmiňovaná v kap. 2.2.1. Pro výšky s velikostí do

přibližně 40° nad horizontem je patrná rostoucí odchylka od teoretického průběhu v důsledku konečných rozměrů detektorů, popsaná v kap. 2.3.2 a znázorněná na Obr. 5.

5 Závěr

V rámci teoretické části práce proběhlo studium podkladů k tématice Geiger-Müllerových detektorů, kosmického záření a jeho detekce, koincidenčních detektorů a statistického zpracování dat, jež je nedílnou součástí jejich vyhodnocení. Na základě studia podkladů byl sestaven stručný přehled poznatků, který posloužil jako odrazový můstek pro praktickou část práce.

Na základě poznatků z teoretické části byla zpracována část praktická. Byl proveden hardwarový návrh koincidenčního detektoru. Jednotlivé funkční celky detektoru byly postupně odzkoušeny a odladěny tak, aby jejich parametry vyhovovaly stanoveným požadavkům. Pro výsledný návrh hardwarové části koincidenčního detektoru byl nakreslen a zadán do výroby plošný spoj.

Následovalo osazení plošného spoje součástkami, vestavba zařízení do skříňky, a byla provedena důkladná kontrola funkčnosti pomocí běžných měřících přístrojů.

Po fyzickém sestavení detektoru do konečné podoby následovala fáze vývoje software. Cílem bylo vyvinout software tak, aby umožňoval spolehlivou funkci koincidenčního detektoru, byl jednoduchý na uživatelskou obsluhu a bylo možné získat záznamy z měření v takové formě, která umožňuje další zpracování.

Nejjednodušším a zároveň nejpohodlnějším způsobem zpracování naměřených dat je pomocí počítače s využitím skriptovacího jazyka. Použití skriptovacího jazyka se dokonce ukázalo jako nutnost z důvodu velkého množství informací, registrovaných koincidenčním detektorem.

Pro pohodlné provádění experimentů, nastíněných v teoretické části, byly zhotoveny stojany, umožňující fixaci GM-detektorů v pozicích příhodných pro měření.

Vznikla tak sestava, kterou lze přímo a bez dalších úprav využít v rámci experimentů s kosmickým zářením ve fyzikálním praktiku, v plném souladu se zadáním práce.

Na závěr proběhlo ověřovací měření vybraného experimentu, měření závislosti četnosti koincidencí na astronomické výšce, pomocí zhotovené sestavy. Prezentované výsledky měření odpovídají výsledkům získaným jinými nezávislými skupinami.

6 Seznam literatury

- [1] GERNDT, Josef a Petr PRŮŠA. *Detektory ionizujícího záření*. 2., přeprac. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04710-1.
- [2] KNOLL, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement* /. 3rd ed. Michigan: John Wiley & Sons, Inc, 2000. ISBN 0-471-07338-5.
- [3] BLANCO, F., F. FICHERA, P. LA ROCCA, F. LIBRIZZI, O. PARASOLE a F. RIGGI. Educational cosmic-ray experiments with Geiger counters. *Il Nuovo Cimento C*. 2006, **29**(3), 381-390.
- [4] WIBIG, T., K. KOLODZIEJCZAK, R. PIERZYŃSKI a R. SOBCZAK. Educational studies of cosmic rays with telescope of Geiger-Müller counters. *Physics Education*. 2006, **41**(6). Dostupné z: doi:10.1088/0031-9120/41/6/009
- [5] BLANCO, F., F. FICHERA, P. LA ROCCA, F. LIBRIZZI, O. PARASOLE a F. RIGGI. Geiger counters offer powerful way to teach detection methods. *Physics Education*. 2006, **41**(3). Dostupné z: doi:10.1088/0031-9120/41/3/F02
- [6] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření*. 1. vyd. Praha: SPN, 1983. Učebnice pro vysoké školy (Státní pedagogické nakladatelství).
- [7] *STM32-base: WeAct Black Pill V3.0* [online]. In: . [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://stm32-base.org/boards/STM32F401CEU6-WeAct-Black-Pill-V3.0>
- [8] Geiger Counter Circuits. In: *TECHLIB.COM* [online]. [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <http://techlib.com/science/geiger.html>

- [9] *ILI9341 LCD driver* [online]. In: . [cit. 2022-10-30]. Dostupné z:
https://github.com/RobertoBenjami/stm32_graphics_display_drivers/tree/master/Drivers/lcd/ili9341
- [10] *STM32 Keypad Interfacing Library 4x4* [online]. In: . [cit. 2022-10-30]. Dostupné z:
] <https://deepbluembedded.com/stm32-keypad-interfacing-library/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Závislost počtu sebraných iontů na napájecím napětí detektoru	4
Obr. 2: Zjednodušené schéma GM-detektoru	5
Obr. 3: Mrtvá doba a doba zotavení	8
Obr. 4: Apertura dvou GM-detektorů	12
Obr. 5: Korekce na konečné rozměry detektorů	14
Obr. 6: Uspořádání Rossiho experimentu	15
Obr. 7: Rossiho křivka	16
Obr. 8: Principiální schéma	19
Obr. 9: Vstupní obvod	20
Obr. 10: Blok vyhodnocování koincidencí	22
Obr. 11: Deska WeAct BlackPill V3.0	24
Obr. 12: Zdroj napětí 9 V a 5 V	26
Obr. 13: Zdroj napětí 3,3 V	26
Obr. 14: Zdroj napětí 400 V	27
Obr. 15: Indikátor napětí 400 V	28
Obr. 16: Konfigurace hodin	32
Obr. 17: Hlavní smyčka programu	35
Obr. 18: Zpracování přerušení	36
Obr. 19: Vyhodnocování koincidencí	37
Obr. 20: Přední panel detektoru	41
Obr. 24: Stojan pro měření Rossiho křivky	42
Obr. 21: Zadní panel detektoru	42
Obr. 23: Stojan pro měření kosmického záření	43
Obr. 22: Stojan pro měření kosmického záření	43
Obr. 25: Kanál A s propojkou J30	44

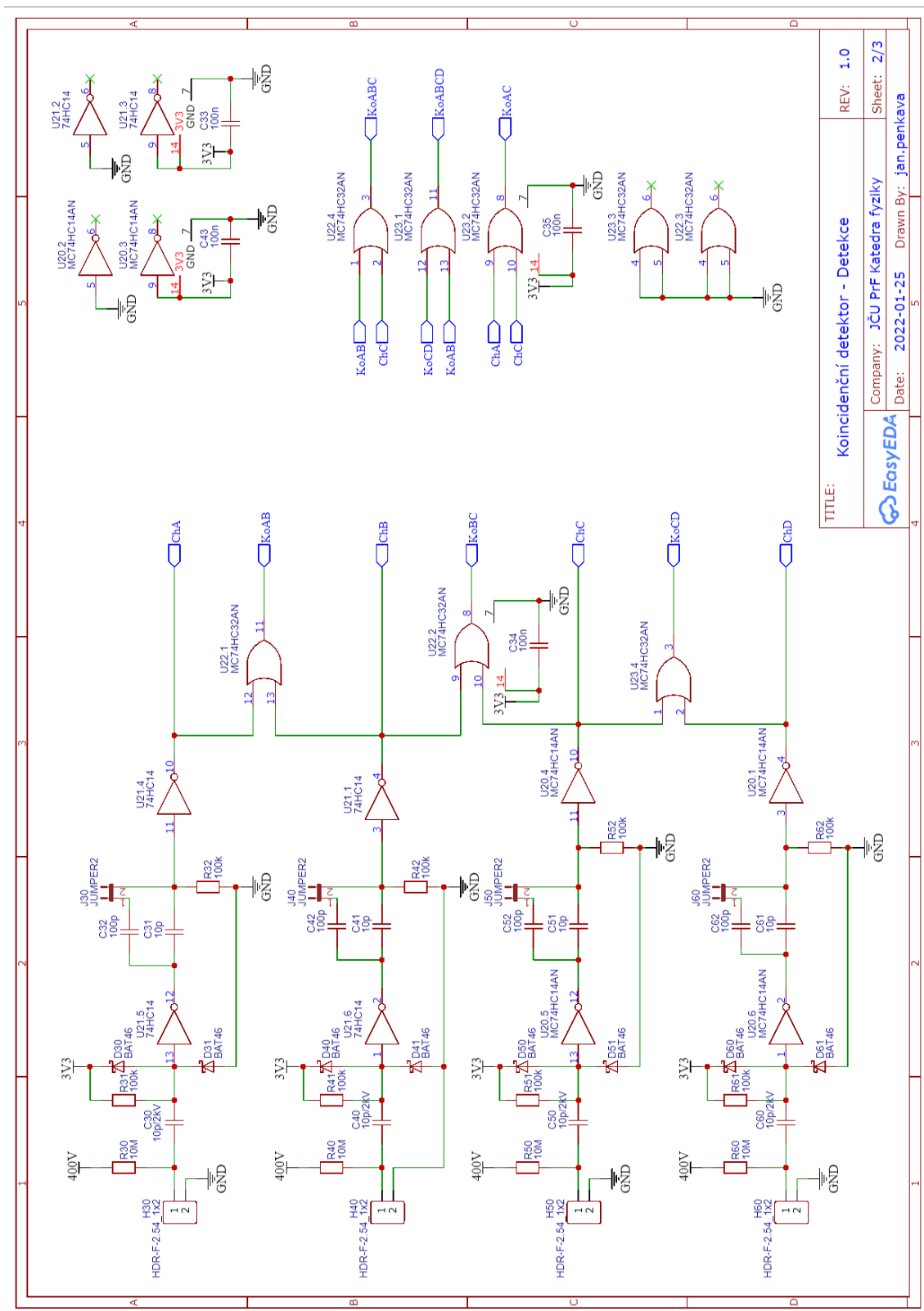
Obr. 26: Kanál A bez propojky J30.....	45
Obr. 27: Závislost četnosti koincidencí na výšce	46
Obr. 28: Úplné schéma napájení.....	53
Obr. 29: Úplné schéma vstupních obvodů	54
Obr. 30: Úplné schéma procesoru a periferií.....	55
Obr. 31: Horní vrstva spojů	59
Obr. 32: Spodní vrstva spojů	60
Obr. 33: Rozmístění součástek.....	61

Seznam tabulek

Tab. 1: Vzorce pro výpočet směrodatné odchylky	18
Tab. 2: Logika OR hradla.....	22
Tab. 3: Propojky a konektory na DPS	29
Tab. 4: Konfigurace pinů procesoru	33
Tab. 5: Konfigurace periférií procesoru	33
Tab. 6: Seznam přerušení.....	34
Tab. 7: Parametry kanálů	44

Obr. 28: Úplné schéma napájení





Obr. 29: Úplné schéma vstupních obvodů

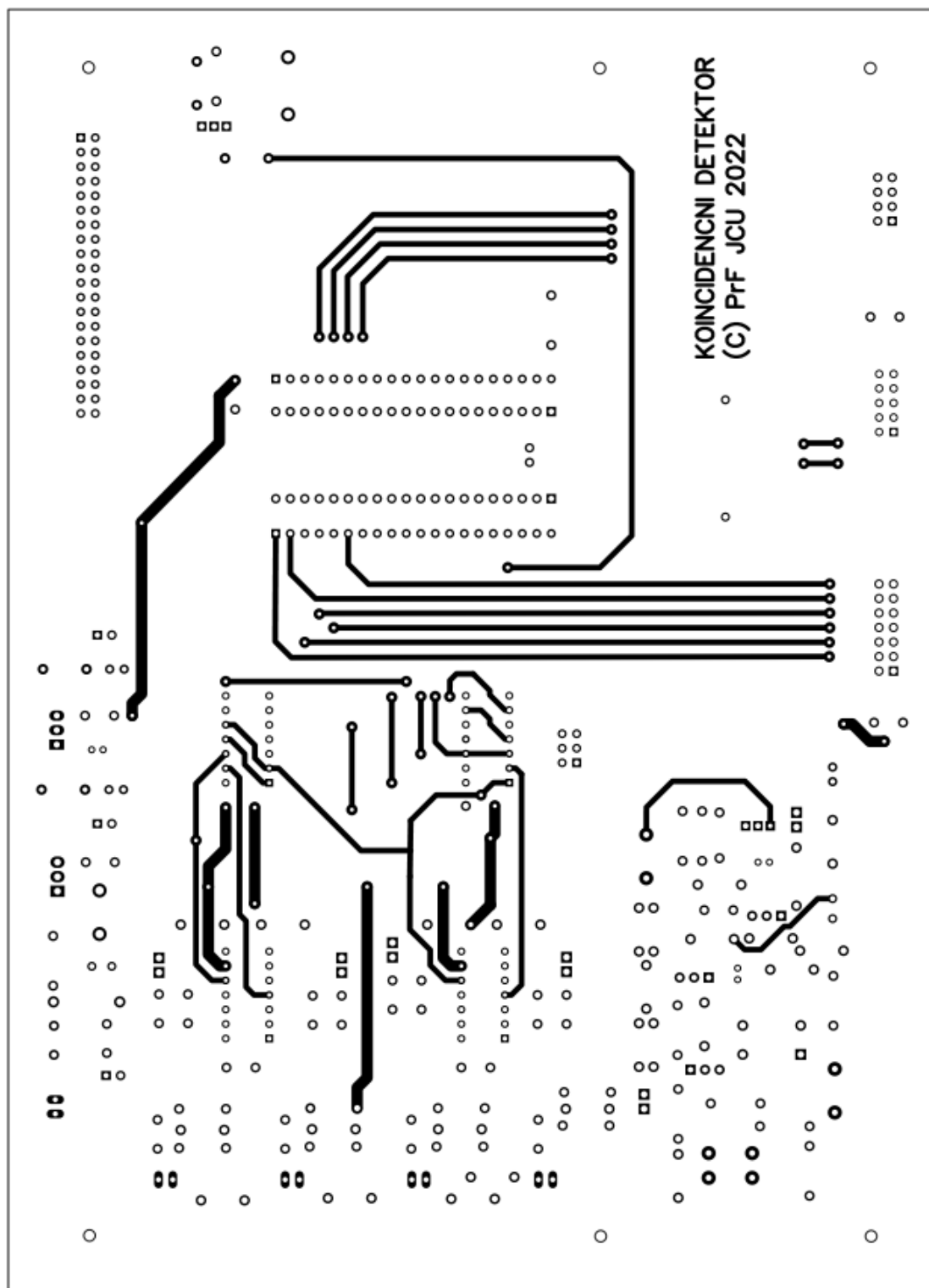


Příloha B – Seznam součástek

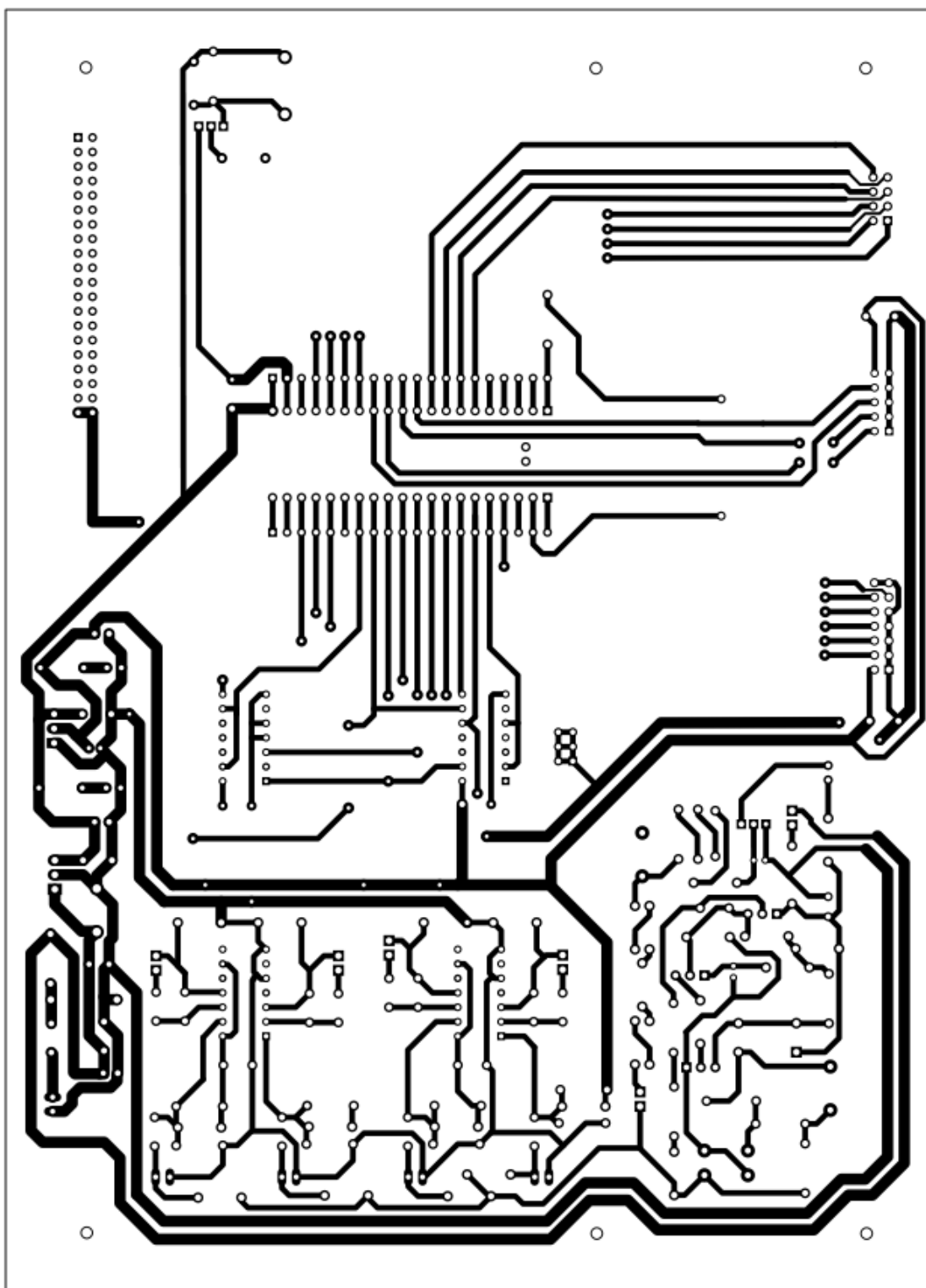
Označení ve schématu	Součástka	Typ / hodnota	Množství
B90	baterie	CR2032	1
C10,C13,C14,C33,C34,C35, C43,C91,C92,C93	kondenzátor keramický	100 nF	10
C11,C22	kondenzátor elektrolytický	100 µF / 35 V	2
C12	kondenzátor keramický	330 nF	1
C15	kondenzátor elektrolytický	10 µF / 35 V	1
C20	kondenzátor elektrolytický	10 µF / 35 V	1
C21	kondenzátor keramický	10 nF	1
C23,C24,C25,C26	kondenzátor keramický	22nF / 1 kV	4
C27	kondenzátor elektrolytický	1 µF / 35 V	1
C30,C40,C50,C60	kondenzátor keramický	10 pF / 2 kV	4
C31,C41,C51,C61	kondenzátor keramický	10 pF	4
C32,C42,C52,C62	kondenzátor keramický	100 pF	4
D10,D20,D21,D22,D23,D91	Dioda univerzální	1N4007	6
D12,D13	LED žlutá	Průměr 3 mm	2
D14	transil	P6KE15CA	1
D24,D25,D26	dioda Zenerova	BZX85B200V	3
D27	dioda Zenerova	BZX85B120V	1
D28	LED žlutá	Průměr 3 mm	1
D30,D31,D40,D41,D50,D51, D60,D61	dioda Schottkyho	BAT46	8
D90	dioda Schottkyho	1N5819	1
F10	pojistka trubičková	5x20 mm, T 500 mA	1
H10,H30,H40,H50,H60	Konektor samice	Konektor JST Rozteč 2.54 mm 1x2 piny	5
J00	Konektor samec	Kolíková lišta Rozteč 2.54 mm 2x3 piny	1
J11,J12,J13	Konektor samec	Kolíková lišta Rozteč 2.54 mm 1x2 piny	3

J20,J21,J30,J40,J50,J60	Konektor samec	Kolíková lišta Rozteč 2.54 mm 1x2 piny + jumper	6
J90,J91	Konektor samec	Kolíková lišta Rozteč 2.54 mm 1x20 pinů	2
J92	Konektor samice	Amphenol T821108A1S100CEU	1
J93	Konektor samice	Amphenol T821110A1S100CEU	1
J94	Konektor samice	Amphenol T821114A1S100CEU	1
J99	Konektor samec	Kolíková lišta Rozteč 2.54 mm 2x20 pinů	1
L20	Tlumivka	Neosazeno	
L21	Transformátor feritový	AT-600 Převod 1:1, 600 Ω	1
Q20	diak	DB4	1
R11	rezistor	1,5 k Ω	1
R12	rezistor	680 Ω	1
R20,R22,R28,R90	rezistor	1 k Ω	4
R21,R27,R31,R32,R41,R42, R51,R52,R61,R62	rezistor	100 k Ω	10
R23	rezistor	150 k Ω	1
R24	rezistor	1,8 k Ω	1
R25,R30,R40,R50,R60	rezistor	10 M Ω	5
R26A,R26B,R26C,R26D,R26E	rezistor	33 M Ω	5
R91	rezistor	10 k Ω	1
T20	Tranzistor vysokonapětový	MPSA42	1
T21	Tranzistor nízkofrekvenční	2N4403	1
T22	Tranzistor nízkošumový	BC550	1
T23	Tranzistor Darlingtonův	BC517	1
T90	Tranzistor spínací	2N2222	1
U10	stabilizátor	7805	1
U11	stabilizátor	LD1117V33	1
U90	Deska s procesorem	WeAct BlackPill	1
XT90	Piezokeramický měnič	libovolný	1
U20, U21	Logický IO	74HC14	2
U22,U23	Logický IO	74HC32	2

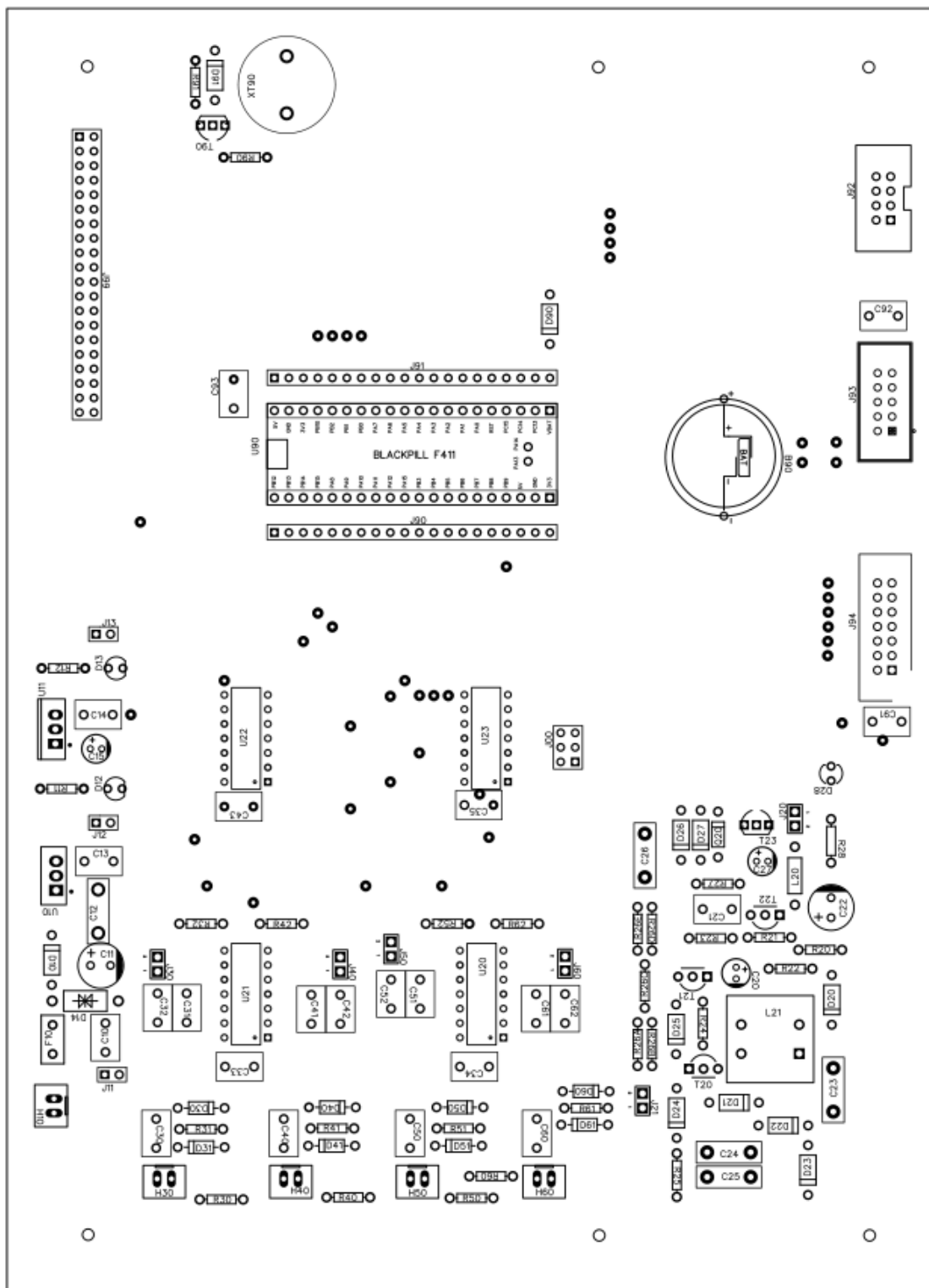
Příloha C – Návrh DPS



Obr. 31: Horní vrstva spojů



Obr. 32: Spodní vrstva spojů



Obr. 33: Rozmístění součástek

γ изл от 10 мР/ч до 100(200) мР/ч



Технические условия ОДО. 339. 172 ТУ

Номинальное рабочее напряжение	400 в
Протяженность плато счетной характеристики	не менее 100 в
Наклон плато счетной характеристики	не более 0,1% на 1 в
Диапазон регистрируемых мощностей экспозиционных доз гамма-излучения	
$P_{\min}$	0,004 мкр/сек ($44 \frac{\text{мР}}{\text{ч}}$)
$P_{\max}$	40 мкр/сек ($444 \frac{\text{мР}}{\text{ч}}$)
Чувствительность к гамма-излучению Ra^{226} мощностью 0,1 $P_{\max}$	420 $\pm$ 20 имп/сек
Собственный фон	не более 1 имп/сек ?
Амплитуда импульса	не менее 50 в
Наибольший допустимый ток	20 мка
Ресурс работы не менее	2×10^{10} имп
Диапазон рабочих температур	$-50 \div +70^\circ\text{C}$
Счетчики допускают эксплуатацию при температуре в течение 125 час	$+85^\circ\text{C}$
Изменение чувствительности счетчика в течение всего ресурса не превышает 20% при эксплуатации как в импульсном и токовом режиме.	

Штамп ОТК

05.58

№ 6 01 81

Заказ 2453. Тираж 50 000 экз. Тип. «Красный Октябрь».

Příloha E – Návod k obsluze detektoru

E.1 Uvedení detektoru do provozu

- připojit napájecí adaptér (napětí 9 V) do zdířky na zadním panelu
- připojit konektory GM-detektorů do zdířek označených „A“ až „D“ na zadním panelu
- zasunout microSD kartu do adaptéru u nápisu „SD CARD“ na předním panelu
- zapnout napájení páčkovým spínačem na předním panelu do polohy „ON“
- zkontrolovat správnost všech napájecích napětí – svítí klidným světlem všechny tři žluté LED na předním panelu („5V READY“, „3,3V READY“ a „400V READY“)
- vyčkat až se na displeji objeví hlavní menu

V horní části displeje jsou ve všech pracovních režimech zobrazovány následující údaje:

- datum
- čas
- stav microSD karty – nápis „SD“
 - červeně – karta chybí nebo je nefunkční
 - zeleně – karta úspěšně připojena
- stav záznamu – nápis „LOG“
 - červeně – chyba při zápisu do souboru
 - zeleně – soubor se záznamem je otevřen
 - bíle – soubor se záznamem je uzavřen

Pomocí kláves „1“ až „4“ lze vybrat požadovaný pracovní režim.

Upozornění: GM-detektory, vzhledem k tloušťce jejich pláště v řádu desítek μm , nesnesou větší mechanické namáhání. Proto, aby nedošlo ke zdeformování a tím ke zničení GM-detektoru, vyvarujte se jejich mechanickému namáhání (neohybejte, nepromáčkněte, opatrně je instalujte do stojanu) a chraňte je před nárazy. Dodržením

těchto zásad je zajištěna jejich životnost po desítky let a je limitována jen počtem detekovaných impulzů (tj. vyčerpáním plynové náplně).

E.2 Nastavení data a času

Stisknutím klávesy „1“ v hlavním menu je zvolen režim nastavení data a času.

Nyní je nutné zadat aktuální datum a čas. Pomocí číselných kláves se postupně zadá

- den v měsíci
- měsíc
- rok (poslední dvě číslovky)
- den v týdnu (pondělí = 1, úterý = 2, ... neděle = 7)
- hodina
- minuta
- vteřina

Správnost data a času je potvrzena zeleným textem „Valid“. V případě neexistujícího data/času je zobrazen červený text „Invalid“.

Po zadání všech hodnot a jsou-li platné, se stiskem klávesy „#“ hodnoty uloží. V případě omylu lze zadané hodnoty smazat stiskem klávesy „C“ a opakovat jejich zadání. Stiskem klávesy „*“ je nastavení data a času opuštěno, dojde k návratu do hlavního menu a zůstává nastaven původní datum/čas.

Upozornění: Pokud po vypnutí a zapnutí detektoru dojde ke ztrátě uloženého data a času, je nutné vyměnit článek typu CR2032 na desce detektoru (pozice B90).

E.3 Test funkčnosti GM-detektorů

Stisknutím klávesy „2“ v hlavním menu je zvolen režim testu funkčnosti GM-detektorů.

Doba testu GM-detektorů je přednastavena na 5 minut. Stiskem klávesy „C“ lze změnit dobu testu podle potřeby. Po stisku klávesy „C“ a zadáním času v minutách (v rozsahu 1 až 99 minut) je údaj potvrzen stiskem klávesy „#“.

Test je zahájen stiskem klávesy „A“, po uplynutí nastaveného času je test ukončen a vyhodnocen. Test lze kdykoliv přerušit stiskem klávesy „B“.

Na displeji je pod textem „Log file“ zobrazeno jméno souboru, do kterého je pořízen záznam z testu. Název souboru vždy obsahuje datum a čas svého vzniku.

V průběhu testu je sečítán počet impulzů přicházejících z GM-detektorů a je vypočítávána četnost impulzů v impulzech za minutu (cpm). Počet impulzů je zobrazen u jednotlivých kanálů, označených písmeny „A“ až „D“, četnosti jsou zobrazeny ručkami na příslušných stupnicích. Je-li četnost GM-detektoru příliš nízká, nachází se ručka v modrém poli, při příliš vysoké četnosti se ručka nachází v poli červeném.

Po ukončení testu dojde k jeho vyhodnocení. U kanálů, jejichž četnost je v předepsaném rozsahu, se zobrazí zelený nápis „OK“. U kanálů s četností mimo povolené pásmo je zobrazen červený nápis „BAD“.

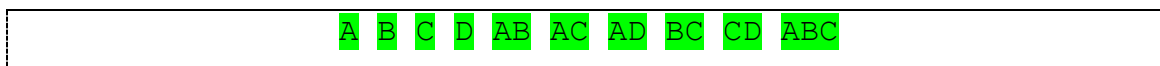
Stiskem klávesy „*“ dojde k návratu do hlavního menu, pokud neprobíhá měření.

E.4 Nastavení měření

Stisknutím klávesy „3“ v hlavním menu je zvolen režim nastavení.

V nastavení lze volit následující parametry:

- zpracovávané/nezpracovávané GM-detektory v rámci koincidenčního detektoru – stiskem kláves „A“ až „D“ lze navolit, které kanály budou koincidenčním detektorem zpracovávány a které budou ze zpracování vyřazeny. Zpracovávané kanály koincidencí jsou automaticky odvozeny od zpracovávaných GM-detektorů. Aktuální nastavení kanálů je signalizováno řádkem



kde zelená barva písmen značí, že daný kanál/koincidence bude zpracováván. Vyřazené kanály jsou zobrazeny bílou barvou. V případě potřeby lze klávesou „1“ potlačit/povolit registraci koincidence „ABC“.

- nastavení délky měření a počtu opakování měření –

- stiskem klávesy „2“ je aktivována volba počtu hodin. Po zadání hodnoty potvrdit stiskem klávesy „#“. Povolený rozsah je 0 až 2981 hodin.
- stiskem klávesy „3“ je aktivována volba počtu minut. Po zadání hodnoty potvrdit stiskem klávesy „#“. Povolený rozsah je 0 až 59 minut.
- stiskem klávesy „4“ je aktivována volba počtu opakování měření zadané délky. V rámci každého opakování je založen nový soubor se záznamem. Po zadání hodnoty potvrdit stiskem klávesy „#“. Povolený rozsah je 1 až 999 opakování.
- registrace koincidencí nejvyššího řádu – stiskem klávesy „5“ je povolen/potlačen výpis koincidencí nejvyššího řádu (impulzy typu „C“) do záznamu. Povolení je signalizováno textem „YES“, potlačení je signalizováno textem „NO“.
- registrace ostatních impulzů ze skupiny - stiskem klávesy „6“ je povolen/potlačen výpis ostatních impulzů ze skupiny (impulzy typu „G“) do záznamu. Povolení je signalizováno textem „YES“, potlačení je signalizováno textem „NO“.
- registrace samostatných impulzů - stiskem klávesy „7“ je povolen/potlačen výpis samostatných impulzů (impulzy typu „S“) do záznamu. Povolení je signalizováno textem „YES“, potlačení je signalizováno textem „NO“.

Po provedení všech změn v nastavení je možné se vrátit do hlavního menu stiskem klávesy „*“.

E.5 Měření koincidenčním detektorem

Stisknutím klávesy „4“ v hlavním menu je zvolen režim koincidenčního detektoru.

Nastavení měření koincidenčním detektorem se provádí podle předchozí kapitoly.

Měření je zahájeno stiskem klávesy „A“. Název souboru s aktuálním záznamem z měření je vypsán pod textem „Log file“. Název souboru vždy obsahuje datum a čas svého vzniku.

Po proběhnutí všech cyklů měření nastavené délky je koincidenční detektor zastaven. Ruční zastavení detektoru je možné kdykoliv stiskem klávesy „B“, čímž dojde k uzavření aktuálně otevřeného záznamu.

Na displeji zobrazeny následující údaje:

- „Total time“ – celkový nastavený čas měření a počet opakování měření
- „Remaining time“ – zbývající čas do konce měření a zbývající počet opakování měření
- „Counts“ – počet registrovaných impulzů v kanálech z GM-detektorů a koincidencí
- „Last event“ – datum, čas a zdroj poslední registrované události

Stiskem klávesy „*“ dojde k návratu do hlavního menu, pokud neprobíhá měření.

E.6 Vypnutí detektoru

Před vypnutím detektoru je dobré zkontrolovat, zda není spuštěno žádné měření. Dále musí být uzavřen poslední textový záznam, aby nedošlo ke ztrátě naměřených dat (nápis „LOG“ v horním řádku na displeji má bílou barvu).

Vypnutí napájení detektoru se provádí páčkovým spínačem na předním panelu přepnutím do polohy „OFF“

E.7 Chybová hlášení

Nastane-li při běhu programu situace, kdy není možné dál pokračovat, objeví se na displeji chybové hlášení ve formě modré obrazovky a běh programu se zastaví.

Na displeji se zobrazí podrobnosti k místu vzniku chyby a tyto je nutné předat autorovi k nápravě, nejlépe vyfotografovat displej mobilním telefonem.

E.8 Textové záznamy z měření

E.8.1 Záznam z testu funkčnosti GM-detektorů

Záznam z testu funkčnosti GM-detektorů je soubor ve formátu TXT.

Příklad záznamu:

```
# Tube test log created on 29.08.2022 at 20:15:22
#
Channel  Counts      CPM
   A      126      25
   B      139      27
   C      159      31
   D      143      28
#
# Finished on 29.08.2022 at 20:20:21
```

Počty registrovaných impulzů za dobu testu jsou ve sloupci zvýrazněném žlutou barvou. Vypočtené četnosti jsou ve sloupci zvýrazněném zelenou barvou. Aby byl GM-detektor vyhodnocen jako vyhovující, musí být naměřená četnost v rozsahu 20-60 impulzů za minutu.

E.8.2 Záznam koincidenčního detektoru

Záznam koincidenčního detektoru je soubor ve formátu CSV. V souboru se nachází záznamy impulzů z GM-detektorů a koincidencí. Dále jsou zde obsaženy doplňkové informace, jejich řádky jsou uvozeny znakem „#“.

Příklad záznamu:

```
# Detector log created 01.10.2022 20:58:24
#
#
# Note:
#   s = singleton
#   c = coincidence
#   g = pulse from group
#
Line,Date,Time,Timer [*10 ns],Channel,Note
000000,01.10.22,20:58:24,2052419207,B,s
000001,01.10.22,20:58:25,2194089547,B,s
000002,01.10.22,20:58:26,2250730593,B,s
000003,01.10.22,20:58:26,2272041461,A,s
000004,01.10.22,20:58:28,2470691539,B,s
000005,01.10.22,20:58:29,2585884615,B,s
....
001629,01.10.22,21:26:31,2806627957,A,s
001630,01.10.22,21:26:32,2831220499,A,s
001631,01.10.22,21:26:34,3048494721,AB,c
001632,01.10.22,21:26:35,3185059007,A,s
001633,01.10.22,21:26:35,3194683813,B,s
....
073054,02.10.22,18:00:37,3381701501,A,s
073055,02.10.22,18:00:40,3603498349,B,s
073056,02.10.22,18:00:43,3952515549,A,s
#
# Total counts:
#   A      36795
```

```

#      B      36217
#      C      0
#      D      0
#      AB     45
#      BC      0
#      CD      0
#      AC      0
#      ABC     0
#      AD      0
#      A+B+C+D 73012
# Detection time: 75739.000 s
#
# Finished 02.10.2022 18:00:44

```

Hlavička záznamu je zvýrazněna žlutou barvou. Je zde uveden datum a čas začátku měření, vysvětlivka ke zkratkám typů záznamů (S, C, G) a v posledním řádku hlavičky je popis jednotlivých sloupců.

Záznamy impulzů a koincidencí jsou označeny šedou barvou. V prvním sloupci je uvedeno pořadové číslo záznamu. Druhý sloupec obsahuje datum a třetí čas, kdy záznam impulzu/koincidence vznikl (údaje z RTC obvodu procesoru). Ve čtvrtém sloupci je hodnota čítače cyklů procesoru v okamžiku příchodu impulzu (časovač TIM2). Číslo představuje desítky nanosekund. Tato hodnota je využitelná při diagnostice zpracování impulzů v procesoru, pro praktické měření nemá význam. V pátém sloupci je uveden název kanálu a šestý sloupec obsahuje písmeno označující typ impulzu, vysvětlený v kapitole 3.4.5.

Zelenou barvou je znázorněna oblast, kde se nachází celkové počty impulzů v registrovaných kanálech. V posledním řádku je uveden součet samostatných impulzů (typu S) bez koincidencí.

Modrou barvou je znázorněn závěr souboru, kde se nachází celková délka měření a datum a čas ukončení záznamu.

Soubor je strukturován tak, aby byl jednoduše zpracovatelný počítačem např. pomocí skriptovacího jazyka.