



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SYSTÉM PRO MĚŘENÍ S PROPORCIONÁLNÍMI DETEKTORY

PROPORTIONAL COUNTER MEASUREMENT SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Kolář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Ondřej Kolář

ID: 203252

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

System pro měření s proporcionálními detektory

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou detekce ionizujícího záření pomocí proporcionálních detektorů. Proveďte zkušební měření s dostupnou aparaturou využívající širokopásmový zesilovač a digitizér na bázi FPGA. Navrhněte úpravy stávající aparatury s cílem zvýšit citlivost měření, zvýšit dosažitelnou maximální četnost detekce částic, a zlepšit uživatelský komfort obsluhy aparatury.

Realizujte navržené úpravy a ověřte jejich funkčnost s různými dostupnými detektory. S využitím techniky machine learning proveďte analýzu změřených dat spočívající v klasifikaci detekovaných pulzů dle jejich tvaru a amplitudy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] FUKÁTKO, Tomáš. Detekce a měření různých druhů záření. Praha: BEN - technická literatura, 2007. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [2] LINDH Lennart, KLEVIN Tommy. Advanced HW/SW Embedded System for Designers, 2018: FPGA - System On Chip. Independently published, 2018. ISBN: 978-1731115812
- [3] IHNÁT Kryštof: FPGA-based Pulse Classification. Brno 2019/2020, 87 p. Master Thesis. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radio Electronics. Advised by Ing. Michal Kubiček, Ph.D.

Termín zadání: 11.2.2022

Termín odevzdání: 25.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubiček, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vývojem měřicího systému pro použití s proporcionálními detektory ionizujícího záření. Systém umožňuje snadné získání dat z proporcionálních detektorů v podobě časových průběhů, které je možné dále analyzovat. Jeho jádrem je vývojová deska Red Pitaya STEMLab 125-14, která zajišťuje záznam rychlých signálů a jejich přenos do počítače k dalšímu zpracování. V první části práce je stručně popsána teorie ionizujícího záření a proporcionálních detektorů. Dále je zdokumentována poskytnutá měřicí aparatura s uvedením provedených vylepšení. Jádrem práce je popis kompletního programového vybavení měřicí jednotky, které bylo vytvořeno. V závěru práce je uveden průběh provedeného měření, jeho výsledky a možnost využití strojového učení pro zpracování dat z proporcionálních detektorů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ionizující záření, Proporcionální detektor, Radiační spektrometrie, Akviziční systém, Klasifikace impulzů, Microdischarge, Red Pitaya, STEMLab, Zynq, FPGA, Embedded Linux, Strojové učení, Konvoluční neuronová síť

ABSTRACT

This work focuses on development of a measurement system for proportional counters that are used to measure ionizing radiation. The system allows for data acquisition from proportional counters in form of time waveforms for further analysis. Core of the system is a Red Pitaya STEMLab 125-14 board which is able to record fast signals and transfer them to a computer for further processing. The first part of this work briefly describes theory of ionizing radiation and proportional counters. In the following part the measuring unit and its improvements are described. The main part of this work is focused on development of new software and description of individual software pieces. In the last part a real measurement is depicted, gathered data are analyzed and a machine learning method is proposed as a solution for proportional counters data analysis.

KEYWORDS

Ionizing radiation, Proportional counter, Radiation spectrometry, Acquisition system, Pulse classification, Microdischarge, Red Pitaya, STEMLab, Zynq, FPGA, Embedded Linux, Machine learning, Convolutional neural network

KOLÁŘ, Ondřej. *Systém pro měření s proporcionálními detektory*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/141540>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Michal Kubíček.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Bc. Ondřej Kolář
VUT ID autora:	203252
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	Systém pro měření s proporcionálními detektory

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno 25. května 2022

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Michalu Kubíčkovi, Ph.D. za cenné konzultace, odborné rady a čas věnovaný celkové pomoci při tvorbě této práce. Také děkuji panu RNDr. Zdeňku Matějovi, Ph.D. z Masarykovy univerzity za odborné konzultace a zapůjčení technických prostředků pro účely této práce.

Obsah

Seznam obrázků	10
Úvod	11
1 Ionizující záření	12
1.1 Druhy ionizujícího záření	12
1.1.1 Alfa záření	12
1.1.2 Beta záření	13
1.1.3 Gama a rentgenové záření	14
1.1.4 Neutronové záření	15
1.2 Energie ionizujícího záření	15
1.3 Detekce a měření ionizujícího záření	17
2 Proporcionální detektory	18
2.1 Klasifikace výstupních impulzů	19
2.1.1 Parazitní impulzy (microdischarges)	21
3 Hardware měřicí aparatury	22
3.1 Měřicí jednotka	22
3.1.1 Konstrukce	24
3.1.2 Provedené úpravy	25
3.2 Předzesilovač	30
3.3 Proporcionální detektor	32
3.4 Zdroj vysokého napětí	32
4 Firmware a software	33
4.1 HDL konfigurace FPGA	34
4.1.1 Vstupní multiplexor	35
4.1.2 Detekce spouštění	36
4.1.3 Stavový automat zápisu do blokové paměti	36
4.1.4 Bloková paměť	38
4.1.5 Konfigurační registry	38
4.1.6 Řadič LCD displeje	39
4.1.7 Univerzální vstupní brána	39
4.1.8 XADC	39
4.1.9 Mapa adresního prostoru	39
4.2 Software procesoru	40
4.2.1 Operační systém	40

4.2.2	Systémová služba <i>ProportionalCounter</i>	42
4.2.3	Řídicí program	42
4.2.4	Program pro přenos dat	43
4.3	Počítačové aplikace	44
4.3.1	Obslužná aplikace	44
4.3.2	Prohlížeč souborů	46
4.4	MATLAB	46
4.5	Ověření četnosti akvizic	47
5	Měření	48
5.1	Zdroj záření	48
5.2	Průběh měření	48
5.3	Výsledky měření	49
6	Využití strojového učení pro klasifikaci impulsů	51
6.1	Konvoluční neuronové sítě	51
6.2	Generování umělých dat	51
6.3	Vytvoření neuronové sítě	53
6.4	Testování neuronové sítě	54
	Závěr	56
	Literatura	58
	Seznam symbolů a zkratk	60
	Seznam příloh	62
A	Deska plošných spojů - displej	63
A.1	Schéma zapojení	63
A.2	Návrh desky	64
A.3	Soupiska součástek	65
B	Deska plošných spojů - filtr	66
B.1	Schéma zapojení	66
B.2	Návrh desky	67
B.3	Soupiska součástek	67
C	Výkres chladiče	68
D	Stavový diagram automatu zápisu do blokové paměti	69

Seznam obrázků

1.1	Energetické spektrum anihilačního záření páru elektron-pozitron . . .	16
1.2	Energetické spektrum beta rozpadu bismutu ^{210}Bi , vzor[3]	16
2.1	Jednoduchý náčrt válcového proporcionálního detektoru, vzor[5] . .	18
2.2	Pracovní oblasti ionizačních detektorů, vzor[5]	19
2.3	Příklad časových průběhů impulzů proporcionálního detektoru[6] . . .	20
2.4	Rozdělení impulzů dle amplitudy a doby náběžné hrany[6]	20
3.1	Blokové schéma měřicí aparatury	22
3.2	Hlavní měřicí jednotka	23
3.3	Blokové schéma měřicí jednotky	23
3.4	Hlavní měřicí jednotka - napájecí síťový a ethernetový konektor . . .	24
3.5	Hlavní měřicí jednotka - uživatelské rozhraní	25
3.6	Hlavní měřicí jednotka - vnitřní uspořádání	26
3.7	Hlavní měřicí jednotka - koaxiální pigtail	26
3.8	Osazený vstupní odpor na desce Red Pitaya	27
3.9	Hlavní měřicí jednotka - řešení odvodu tepla	28
3.10	Hlavní měřicí jednotka - přístrojové nožky	28
3.11	Hlavní měřicí jednotka - filtr napájení předzesilovače	29
3.12	Časový průběh zvlnění použitého spínaného zdroje	29
3.13	Zapojení konektoru napájení předzesilovače - měřicí jednotka	30
3.14	Fotografie předzesilovače CSP10	30
3.15	Zapojení konektoru napájení předzesilovače - předzesilovač	31
3.16	Fotografie proporcionálních detektorů LND 270132 a LND 270133 . .	32
4.1	Blokový diagram programového vybavení měřicí aparatury	33
4.2	Blokový diagram konfigurace pro FPGA	34
4.3	Vstupy a výstupy vstupního multiplexoru	35
4.4	Vstupy a výstupy bloku spouštění záznamu	36
4.5	Vstupy a výstupy stavového automatu zápisu dat do paměti	36
4.6	Zjednodušený vývojový diagram stavového automatu zápisu do paměti	37
4.7	Vstupy a výstupy modulu konfiguračních registrů	38
4.8	Vstupy a výstupy modulu řadiče LCD displeje	39
4.9	Mapa fyzického adresního prostoru	40
4.10	Struktura řídicích paketů	42
4.11	Struktura datových paketů	43
4.12	Obslužná počítačová aplikace	44
4.13	Struktura datového souboru	45
4.14	Prohlížeč souborů měření	46
4.15	Ztráty dat v závislosti na četnosti impulzů pro různé délky záznamu .	47

5.1	Fotografie detektoru s předzesilovačem a neutronového zářiče AmBe .	49
5.2	Naměřená data	50
6.1	Časové průběhy vygenerovaných signálů	52
6.2	Korelační diagram vygenerovaných signálů	52
6.3	Diagram navržené neuronové sítě	53
6.4	Přesnost učení neuronové sítě	54
6.5	Korelační diagram klasifikovaných signálů	55

Úvod

Proporcionální detektory jsou využívány pro měření ionizujících záření. Oproti běžněji známým Geigerovým-Müllerovým trubicím, které mají velmi podobnou konstrukci, však dokáží tyto detektory poskytnout více informací. Kromě četnosti mohou také rozlišit typ a energii zachycených částic záření. Tato data jsou velmi cenná pro mnoho vědních oborů, například medicínu, jadernou fyziku, výzkum materiálů a další.

Samotný princip funkce proporcionálních detektorů je velmi zajímavý i z pohledu elektroniky, protože využívají některých fundamentálních elektrických jevů. Mají také specifické nároky na aparaturu umožňující jejich provoz. Kromě nutnosti napájení vysokým napětím poskytují relativně slabý, ale rychlý výstupní signál. Ten je nutné vhodně zpracovat, aby mohl být zaznamenán pro další vyhodnocení.

Hlavním cílem práce je tedy vytvoření funkčního systému pro sběr surových dat z proporcionálních detektorů. V minulosti se vytvořením takového systému zabývala již jiná práce. Tento vytvořený systém však neposkytl možnost snadného rozšíření o další funkce a jeho použití nebylo uživatelsky přívětivé. Nový systém využije již stávajících hardwarových prostředků, které však budou prozkoumány a případně vylepšeny. Dále bude pro tuto aparaturu vytvořen zcela nový software, který zajistí její jednoduché používání a umožní snadné budoucí rozšíření o nové funkce.

V následujících kapitolách této práce je stručně popsána teorie ionizujícího záření a proporcionálních detektorů. Dále jsou zdokumentovány úpravy poskytnutého prototypu měřicí aparatury. Následující kapitola pak rozebírá jednotlivé části nově vytvořeného programového vybavení celého systému. Poté je věnována kapitola provedenému měření a analýze nasbíraných dat. Závěr práce je pak stručně věnován využití strojového učení pro klasifikaci impulzů.

1 Ionizující záření

Radioaktivita, a s ní úzce související ionizující záření, je poměrně obsáhlý fyzikální podobor, který má široký přesah i do mnoha dalších oborů. Jeho podrobné studium je tedy, nejen časově, náročné. Následující kapitola pouze velmi stručně popisuje nejdůležitější znalosti z této oblasti fyziky.

Ionizující záření je souhrn fyzikálních jevů, při kterých dochází k přenosu energie, informace a v některých případech také hmoty. Množství energie, kterou kvanta tohoto záření nesou, je dostatečně veliké, aby při interakci s atomy překonalo vazební energii elektronů v obalu, přičemž dochází k jejich oddělení od jader, tj. ionizaci těchto atomů. Při dostatečné energii může ovlivnit i samotná atomová jádra. Dokáže tedy podstatně měnit strukturu látek na atomové úrovni.[1]

Tímto se ionizující záření odlišuje například od ultrafialového, se kterým na energetickém spektru sousedí. To je také schopno měnit strukturu látek, avšak pouze na úrovni molekulární.

1.1 Druhy ionizujícího záření

Jak již bylo zmíněno, ionizující záření může kromě energie přenášet také hmotu. S ohledem na tento aspekt lze ionizující záření dělit na dvě základní skupiny:

- **vlnové** – toto záření má nulovou klidovou hmotnost,
- **korpuskulární** – je tvořeno pohybujícími se částicemi o nenulové klidové hmotnosti.

Dále budou uvedeny nejběžnější druhy ionizujícího záření. Kromě nich však existují také méně běžné typy jako například protonové, neutrinové a další.[1]

1.1.1 Alfa záření

Toto záření patří do skupiny korpuskulárních, protože je tvořeno pohybujícími se jádry hélia ${}^4_2\text{He}$, které jsou někdy označovány jako α částice. K jejich vzniku dochází při rozpadu velmi těžkých nestabilních prvků (např. radium, plutonium, americium).

V jádrech těchto těžkých atomů je příliš mnoho protonů, jejichž souhlasný náboj způsobuje dostatečně velkou odpudivou sílu. Ta při překonání tzv. silné jaderné interakce, díky které drží nukleony společně v jádře, způsobí vystřelení α částice ven z atomu. Protonové číslo původního prvku se sníží o dva a stane se tedy jiným prvkem, který leží v periodické tabulce prvků o dvě pozice „níže“. Příklad takového děje je uveden ve vztahu 1.1.[2]



1.1.2 Beta záření

Beta záření patří, rovněž jako alfa, do skupiny korpuskulárních. Může být tvořeno pohybem elektronů, nebo pozitronů. Dle typu částic se tedy dělí na dva typy:

- **záření β^-** – elektrony,
- **záření β^+** – pozitrony.

Princip vzniku záření β^- spočívá v přeměně neutronu uvnitř atomového jádra na proton. To je možné pouze u izotopů obsahující nepoměrně větší množství neutronů (což je dáno hmotnostně-energetickou podmínkou). Při této přeměně vznikne antineutrino a elektron. Obě tyto částice jsou vymrštěny z jádra, které má nově protonové číslo o jedna větší. Stalo se tedy novým prvkem, který je v periodické tabulce o jedno místo „výše“. Jednoduchým příkladem tohoto jevu je například rozpad tritia na helium, elektron a antineutrino podle vztahu 1.2.[2]



Záření β^+ a jeho vznik je komplementární k β^- . V jádrech s větším množstvím protonů může dojít k přeměně jednoho z nich na neutron, kterých daný izotop obsahuje menší množství. Tato přeměna má za následek vznik pozitronu, neutrinu a původní atom se změní na prvek ležící v periodické tabulce o jednu pozici „níže“, jak lze vidět v příkladu 1.3, dle kterého se fluor rozpadá na kyslík, pozitron a neutrino.[2]



Ačkoliv jsou obě zmíněná β záření vzájemně komplementární, jejich chování na Zemi se zásadně liší. Elektrony, tvořící záření β^- , díky svému zápornému elektrickému náboji, interagují s ostatními částicemi především vlivem elektromagnetických sil. Poté, co daný elektron ztratí svou kinetickou energii (je zbrzděn), stane se součástí hmoty v místě, kde došlo k jeho „zastavení“. Oproti tomu pozitrony tvořící záření β^+ , které jsou antičásticemi elektronů, po zastavení vzájemně anihilují s elektrony, které jsou v hmotě přítomny. Při tomto jevu pak dochází k vyzáření dvou fotonů γ (gama) záření.[2]

1.1.3 Gama a rentgenové záření

Záření γ a rentgenové (někdy také označované jako X) jsou tvořena vysokoenergetickými fotony, které mají nulovou klidovou hmotnost. Nejedná se tedy o hmotné částice, proto obě tato záření patří do skupiny vlnových.

Fyzikální podstata obou těchto typů záření je stejná a mají proto do jisté míry podobné vlastnosti. V některých případech jsou rozlišována podle jejich vlnových délek, kdy záření γ je má kratší a leží tedy energeticky výše než X, jehož vlnové délky jsou větší. Lze je však dělit také dle způsobu jejich vzniku.[2] Některé z těchto případů jsou popsány níže.

Anihilační záření

První možností vzniku γ záření je anihilace pozitronu s elektronem (či jiné částice s příslušnou antičásticí), jak již bylo zmíněno v souvislosti se zářením β^+ . Při této události obě částice zaniknou za současného vzniku dvou fotonů o energiích přibližně 511 keV.[2]

Jaderné deexcitační záření

Typickými původci γ záření bývají excitovaná atomová jádra. Ta se mohou ocitnout v excitovaném stavu například po β rozpadu. Jádra v takovém případě přechází z vyšší energetické hladiny do nižší za současného vyzáření fotonu, který následně může opustit atom, či interagovat s elektronovým obalem.[2]

Brzdné záření

Nejběžnějším způsobem vzniku záření X je prudká změna rychlosti částic s elektrickým nábojem. Typickým příkladem mohou být „nárazy“ elektronů do anody v rentgenkách. Elektrony jsou v ní urychlovány elektrickým polem mezi elektrodami.[1]

Charakteristické záření X

Dalším efektem, který mohou mít velmi rychlé elektrony na látku, je vyražení jiných elektronů z atomového obalu. V takovém případě oba elektrony atom opouští a zůstane v něm prázdné místo, které může zaplnit elektron s vyšší energií z jiné elektronové slupky. Přebytečná energie při tomto přechodu je vyzářena jako foton.

1.1.4 Neutronové záření

Dalším zástupcem ze skupiny korpuskulárních je záření neutronové. Jak samotný název napovídá, je tvořeno proudem pohybujících se volných neutronů. Vzhledem k jejich nulovému elektrickému náboji, nemohou ionizovat zasaženou hmotu přímo, jako například alfa částice, či elektrony. I přes toto, má však neutronové záření zpravidla silné nepřímé ionizační účinky.

Existuje několik způsobů vzniku volných neutronů. Typickým příkladem je štěpení jader těžkých prvků, které je využíváno ve štěpných jaderných reaktorech. Může však vznikat i jako sekundární záření, například ozařováním lehkých prvků alfa zářením. Volné neutrony tak mohou nabývat diametrálně odlišných kinetických energií, resp. rychlostí pohybu. Ta pak podstatně ovlivňuje způsob jejich interakce s ostatními částicemi.^[1]

1.2 Energie ionizujícího záření

Každé záření (nejen ionizující) je nositelem kinetické energie jeho jednotlivých kvant. Velikost této energie společně s druhem záření udává jaká bude jeho interakce s okolím. Také je však nositelem informací o vzniku tohoto záření. Z těchto důvodů je velmi důležité zabývat se nejen detekcí samotného záření, ale také jeho energetickou klasifikací.

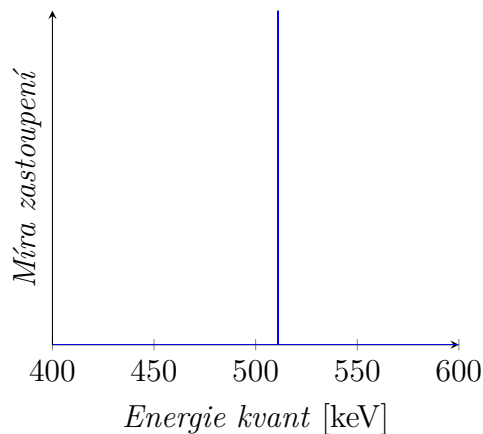
Míra zastoupení kvant záření o různých energiích je dána tzv. energetickým spektrem. Toto spektrum si lze představit jako obdobu elektromagnetického spektra, které udává míru zastoupení jednotlivých vlnových délek (resp. kmitočtů) v elektromagnetickém záření. Tyto dvě veličiny jsou vzájemně nepřímo úměrné.

S ohledem na tvar energetického spektra lze ionizující záření rozdělit na čárové a spojitě.^[1]

Čárové spektrum

Ionizující záření s čárovým energetickým spektrem je v ideálním případě tvořeno kvanty o jedné, či několika přesně daných hodnotách energie. Při zobrazení takového spektra v grafu je tvořeno pouze čarami na příslušných pozicích, ostatní energie nejsou zastoupeny.^[1]

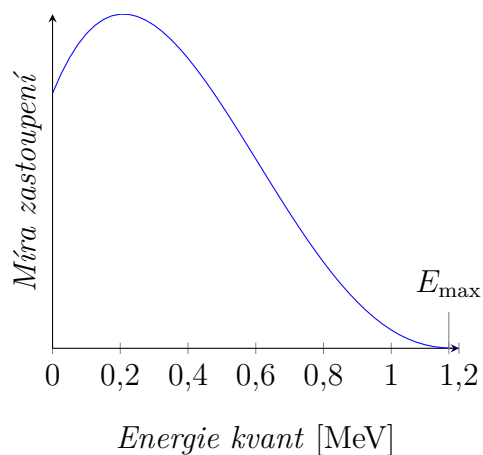
Příkladem záření s čárovým spektrem může být již zmíněné záření anihilační, které je tvořeno dvojicemi fotonů o energiích, které jsou dány klidovými hmotnostmi původních anihilovaných částic. Příklad takového spektra pro anihilaci párů elektron-pozitron je uveden na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Energetické spektrum anihilačního záření páru elektron-pozitron

Spojité spektrum

Druhým typem je spektrum spojité. To oproti čárovému obsahuje plynulé zastoupení energií v určitém spojitém intervalu, který je ohraničen maximální hodnotou. Na obrázku 1.2 je uveden příklad takového spektra pro beta rozpad bismutu ^{210}Bi .



Obr. 1.2: Energetické spektrum beta rozpadu bismutu ^{210}Bi , vzor[3]

1.3 Detekce a měření ionizujícího záření

Detekce a měření ionizujícího záření je důležité nejen pro vědecké účely, ale své využití nachází také v oblasti medicíny a v neposlední řadě pro zajištění bezpečnosti lidského zdraví. Vzhledem k neviditelnosti ionizujícího záření a specifčnosti jeho interakcí s prostředím (především hmotou, ale také elektrickým či magnetickým polem), jsou využívány různé nepřímé měřicí metody.

Pro detekci a měření ionizujícího záření se využívá několik různých typů detektorů, které pracují na rozličných principech a umožňují zjištění různých parametrů záření. Při výběru typu detektoru pro danou aplikaci je nutné uvážit typ záření a jeho intenzitu, požadované měřené parametry a formu výstupu detektoru.

Podle požadované formy výstupu detektoru je lze rozdělit dle několika kritérií. Prvním z nich je časový průběh výstupu, který může být buďto kontinuální, kdy jsou výstupem detektoru data relevantní pro daný časový okamžik, a nebo kumulativní, který je dán sumou účinků záření od počátku měření.

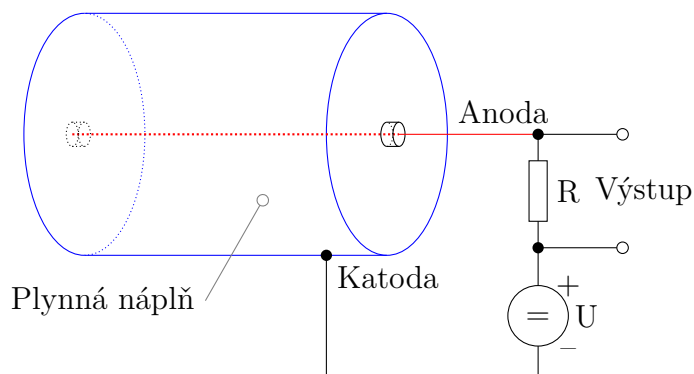
Dále lze detektory rozdělit podle principu, na kterém pracuje. Existují detektory fotografické a materiálové, jejichž využití je však poměrně omezené, a proto zdaleka nejvyužívanějšími jsou detektory elektronické. Ty převádí účinky ionizujícího záření na elektrický signál, který je dále zpracován a vyhodnocen.

Poslední rozdělení detektorů je podle množství získaných informací. Nejjednodušší detektory měří pouze intenzitu záření. Spektrometry jsou schopny kromě intenzity rozlišovat také energii jednotlivých kvant a s jejich použitím lze tedy zjistit energetické spektrum, které bylo popsáno v kapitole 1.2. Dále pak existují detektory zobrazovací a dráhové. Ty dokáží zobrazit polohu či trajektorii jednotlivých kvant či svazku záření.[4]

2 Proporcionální detektory

Proporcionální detektory jsou konkrétním typem detektorů ionizujícího záření. Dle kritérií uvedených v kapitole 1.3 je lze zařadit do skupin kontinuálních, elektronických a spektrometrických detektorů.

Svou konstrukcí, jejíž příklad je uveden na obrázku 2.1, se proporcionální detektory podobají ionizačním komorám a Geigerovým–Müllerovým trubicím. Všechny tyto detektory přímo využívají ionizačních schopností záření. Při vniku kvanta záření do plynové náplně uvnitř detektoru, způsobí ionizaci jejích atomů. Vzniklé ionty jsou pak vlivem elektrického pole zdroje napětí U přitahovány k příslušné elektrodě, což se projeví jako proudový impuls skrze detektor. Ten je převeden pomocí odporu R na impuls napětí, který je dále zpracováván měřicími obvody.



Obr. 2.1: Jednoduchý náčrt válcového proporcionálního detektoru, vzor[5]

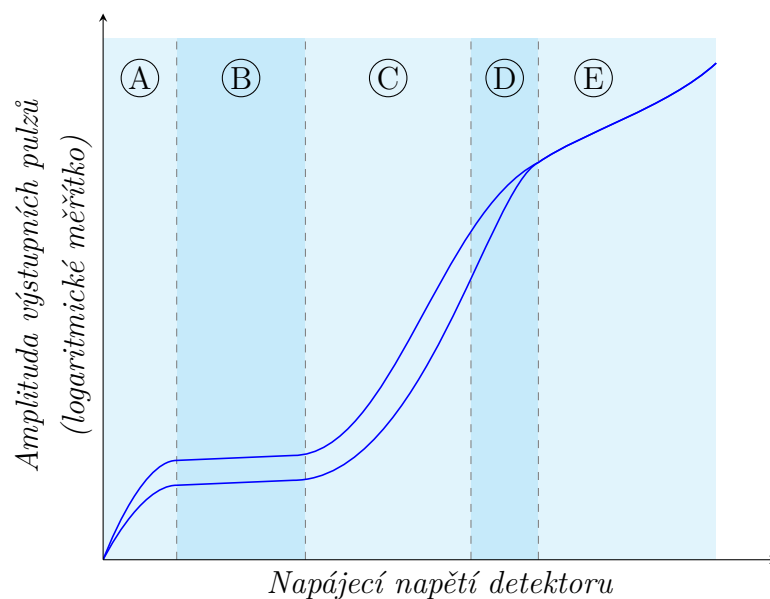
Ionizační detektory se dělí dle své pracovní oblasti. Ta je dána především konkrétní konstrukcí samotného detektoru a velikostí jeho napájecího napětí. Na obrázku 2.2 je vynesena závislost amplitudy výstupního impulsu, v závislosti na pracovní oblasti detektoru, pro dvě kvanta ionizujícího záření o různých energiích. Z této charakteristiky jsou velmi zřejmé jednotlivé pracovní oblasti.

První část charakteristiky, kdy se závislost zvyšuje od nuly, není příliš využívána. Vlivem malého napájecího napětí nejsou vzniklé iontové páry v detektoru dostatečně urychleny a část z nich stihne před dosažením elektrod zrekombinovat. Amplituda výstupních impulsů je tedy nejen závislá na napájecím napětí, ale také velmi malá.

Po zvýšení napájecího napětí do oblasti iontové saturace je již dosaženo dostatečného urychlení všech primárně vzniklých iontových párů, aby neproběhla jejich rekombinace. Tím je docíleno, že všechny ionty dosáhnou příslušných elektrod. Vzhledem k tomu, že jejich počet je dán energií kvanta ionizujícího záření a nikoliv napájecím napětím, je amplituda výstupního impulsu v této pracovní oblasti prakticky konstantní.

U proporcionálních detektorů je využíváno právě oblasti proporcionality. Elektrické pole urychluje primární ionty (především elektrony) do takové míry, že jsou schopny srážkami s ostatními neutrálními částicemi plynové náplně tyto částice taktéž ionizovat. Počet těchto sekundárních iontů je úměrný počtu primárních iontů při daném konstantním napájecím napětí. Oproti oblasti iontové saturace je tedy výstupní impuls vytvořen mnohonásobně vyšším počtem iontů. Díky tomu jsou amplitudy výstupních impulsů větší, což umožňuje jednodušší zpracování signálu s nižšími požadavky na citlivost a přesnost obvodů, při zachování rozlišovací schopnosti energie kvant záření.

Při dalším zvýšení napájecího napětí se proporcionalita detektoru snižuje. Za touto oblastí se pak nachází Geiger-Müllerova oblast, v níž jsou provozovány stejnojmenné detektory. Při takto vysokém napájecím napětí jsou ionty urychleny natolik, že i jen malý počet primárních iontů způsobí vícero lavinových reakcí, nejen přímými srážkami, ale také fotoelektrickým jevem. Výsledkem je výstupní impuls o relativně velké amplitudě, která však není závislá na původní energii kvanta ionizujícího záření, které je jeho původcem. Tyto detektory tedy nelze použít pro spektroskopii.[4][5]

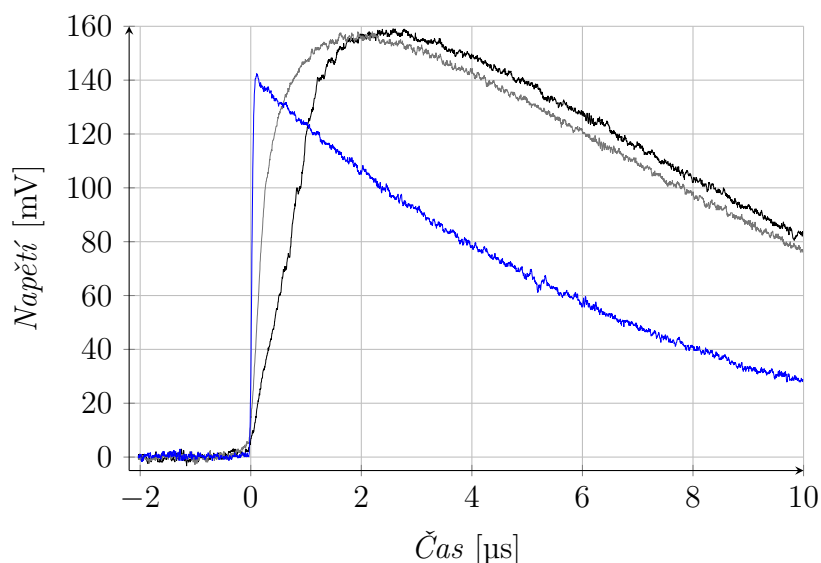


Obr. 2.2: Pracovní oblasti ionizačních detektorů (A - oblast rekombinace, B - oblast iontové saturace, C - proporcionální oblast, D - oblast omezené proporcionality, E - Geigerova-Müllerova oblast), vzor[5]

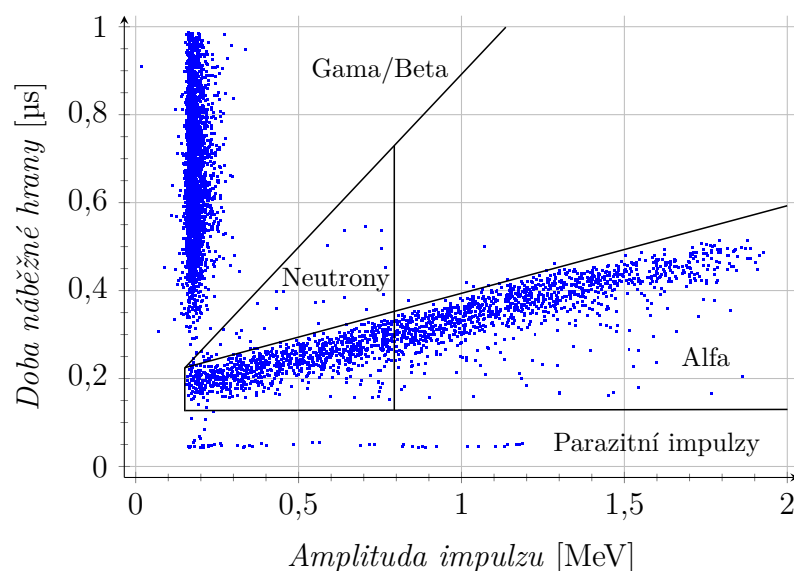
2.1 Klasifikace výstupních impulsů

Doposud bylo zmíněno, že energie kvant ionizujícího záření ovlivňuje především amplitudu výstupních impulsů proporcionálních detektorů. Kromě amplitudy je

však vhodné vyhodnocovat také jejich tvar, především náběžnou hranu. Podle tvaru a doby náběžné hrany lze společně s amplitudou rozlišovat jednotlivé typy ionizujícího záření. Ukázka časových průběhů různých impulzů je uvedena na obrázku 2.3.



Obr. 2.3: Příklad časových průběhů impulzů proporcionálního detektoru[6] (černě - neutron, šedě - alfa částice, modře - parazitní impulz (microdischarge))



Obr. 2.4: Rozdělení impulzů dle amplitudy a doby náběžné hrany[6]

Pro lepší znázornění impulzů generovaných různými typy záření lze vynést hodnoty amplitud a dob náběžných hran do korelačního diagramu. Ukázka takového grafu je uvedena na obrázku 2.4. Kromě samotných impulzů, kdy každý z nich je představen

modrou tečkou, je v diagramu také zvýrazněno a popsáno rozdělení různých zdrojů těchto impulzů.[6]

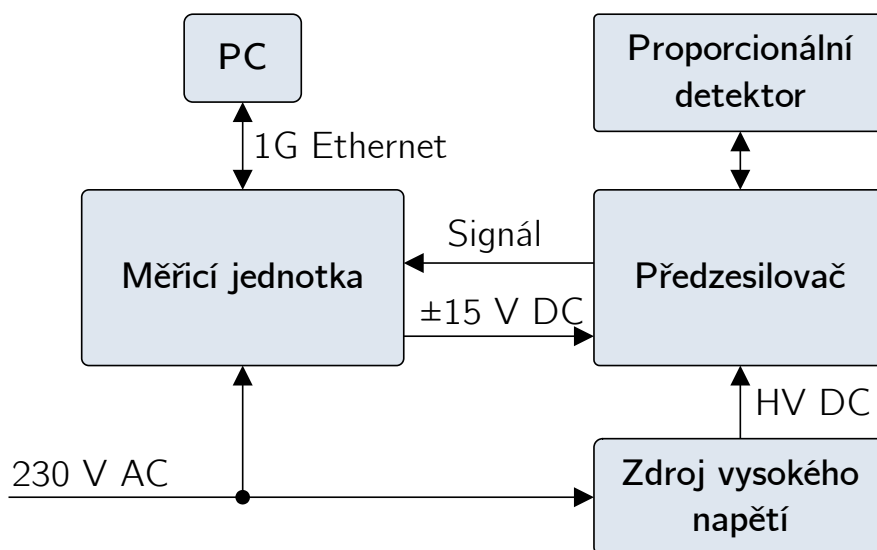
2.1.1 Parazitní impulzy (microdischarges)

Kromě impulzů generovaných ionizujícím zářením lze občas pozorovat také parazitní impulzy, které jsou v angličtině uváděny jako *microdischarge*. Tyto impulzy jsou způsobeny povrchovými nedokonalostmi na rozhraních mezi izolanty či mezi izolantem a vodivou částí v konstrukci detektoru, které při namáhání vysokým napájecím napětím mohou způsobovat mikroskopické výboje. Ačkoliv jsou detektory již při výrobě testovány na četnost výskytu těchto impulzů, nelze jejich výskyt zcela vyloučit.[7]

Během vyhodnocování signálu je tedy nutné tyto parazitní impulzy rozlišit a oddělit od zbytku naměřených dat, aby nedošlo ke zkreslení výsledku měření. Při pohledu na již zmíněné obrázky 2.3 a 2.4 je ihned patrný jejich typický charakter. Náběžná hrana je velice ostrá, čímž se odlišují od všech ostatních impulzů.

3 Hardware měřicí aparatury

Pro účely této práce je poskytnuta měřicí aparatura, která byla sestavena jako součást jiné diplomové práce[8]. Je tvořena několika částmi, které jsou uvedeny v blokovém schématu na obrázku 3.1. Hlavním prvkem je měřicí jednotka. Jejím vstupem je analogový signál z proporcionálního detektoru, který je zesílen speciálním předzesilovačem. Skrze něj je detektor napájen laboratorním zdrojem vysokého napětí.



Obr. 3.1: Blokové schéma měřicí aparatury

3.1 Měřicí jednotka

Jádro hlavní měřicí jednotky (zachycené na obrázku 3.2) tvoří vývojová deska Red Pitaya STEMLab 125-14, která je osazena integrovaným obvodem Xilinx Zynq 7010. Tento SoC¹ obsahuje výkonný dvoujádrový procesor s architekturou ARM Cortex A9 a k němu velmi úzce svázané FPGA². Dále je osazena paměť RAM³ o kapacitě 512 MB. Kromě široké škály digitálních rozhraní, včetně gigabitového Ethernetu, obsahuje deska také dva analogové vstupy se 14bitovými převodníky o vzorkovacím kmitočtu 125 MHz a dva analogové výstupy s totožnými parametry.[9] Díky těmto vlastnostem je ideální pro akvizici a zpracování signálů.

¹System on Chip (systém na čipu)

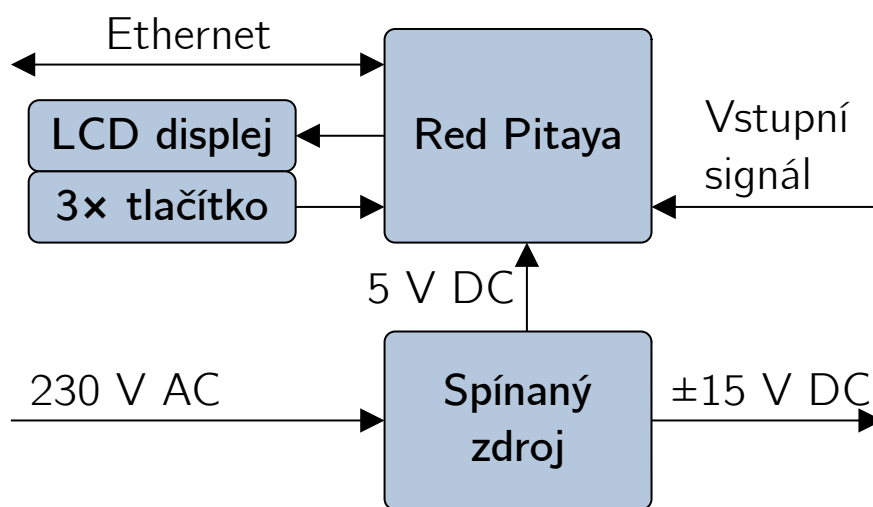
²Field Programmable Gate Array (programovatelné hradlové pole)

³Random Access Memory (paměť s náhodným přístupem)



Obr. 3.2: Hlavní měřicí jednotka

Dále je v měřicí jednotce umístěn spínaný průmyslový zdroj Mean Well RT-50C. Ten poskytuje napětí 5 V desce Red Pitaya a dále větve ± 15 V, jakožto symetrické napájení pro předzesilovač proporcionálního detektoru. Blokové schéma všech částí měřicí jednotky je uvedeno na obrázku 3.3.



Obr. 3.3: Blokové schéma měřicí jednotky

3.1.1 Konstrukce

Jednotku tvoří lakovaná hliníková elektromontážní krabice Spelsberg AL 2616-9 o vnějších rozměrech 260×160×91 mm. Stěny mají tloušťku 4 mm, takže je celá konstrukce velmi robustní a poskytuje dobré stínění vůči elektromagnetickému rušení.

Do bočních stěn krabice jsou umístěny veškeré konektory, signalizační a ovládací prvky. Jmenovitě se jedná o přírodní síťový konektor s integrovaným vypínačem a pojistkou na zadní stěně (viz obrázek 3.4). Vpravo od něj je nainstalována průchozí zásuvka konektoru RJ-45 pro vyvedení gigabitového Ethernetu z desky Red Pitaya. Na levé boční stěně jsou umístěny dva konektory pro připojení předzesilovače proporcionálního detektoru. Prvním z nich je BNC průchodka pro přivedení měřeného signálu a druhým je konektor typu CCB2S1/06, kterým je vyvedeno symetrické napájení předzesilovače. Na přední stěně je uživatelské rozhraní tvořené třemi tlačítky a LCD⁴ displejem.



Obr. 3.4: Hlavní měřicí jednotka - napájecí síťový a ethernetový konektor

⁴Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)

3.1.2 Provedené úpravy

Původní provedení měřicí jednotky vyžadovalo několik úprav, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

Náhrada LED za LCD displej

Původní provedení fyzického uživatelského rozhraní obsahovalo pouze signalizační diody. Ty však nemohly uživateli zobrazit jakoukoli komplexnější informaci. Byly proto nahrazeny za modul dvouřádkového LCD displeje s řadičem HD44780 o šesti znacích na řádek.

Do stěny hliníkové krabice tedy bylo nutné pro displej vyfrézovat patřičný obdélníkový otvor o rozměrech 71,2×24,3 mm a vyvrtat příslušné montážní díry pro přichycení pomocí šroubů M3. Porovnání původního a nového řešení je zachyceno na obrázku 3.5.



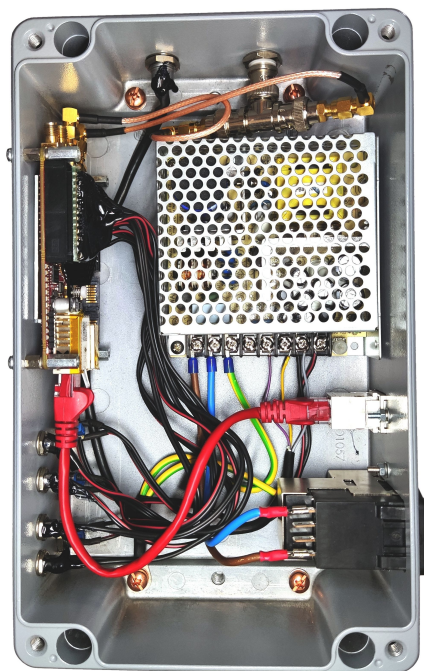
(a) před úpravou



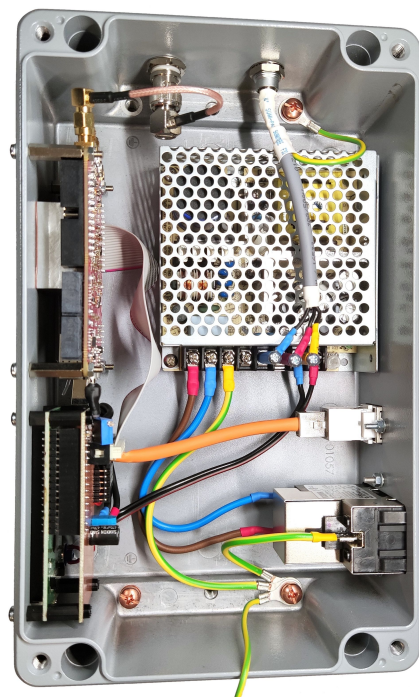
(b) po úpravě

Obr. 3.5: Hlavní měřicí jednotka - uživatelské rozhraní

Společně s náhradou diod byly také zcela vyměněny všechny propojovací vodiče, které byly použity také k tlačítkům. Byl pro ně použit zcela nevhodný typ kabelu o nepoměrně větším průřezu než je nezbytné. Nové řešení využívá vyrobený propojovací plošný spoj (viz příloha A), který je mechanicky připevněn přímo na modul displeje. Připojení k desce Red Pitaya je realizováno na míru vyrobeným plochým kabelem se standardními samořeznými konektory s roztečí 2,54 mm. Porovnání původního a nového řešení je zachyceno na obrázku 3.6.



(a) před úpravou

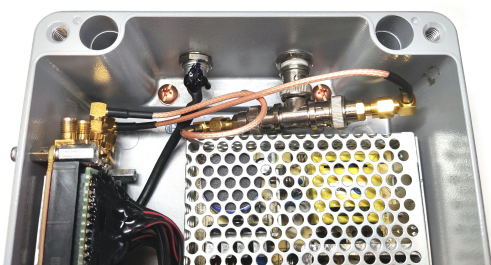


(b) po úpravě

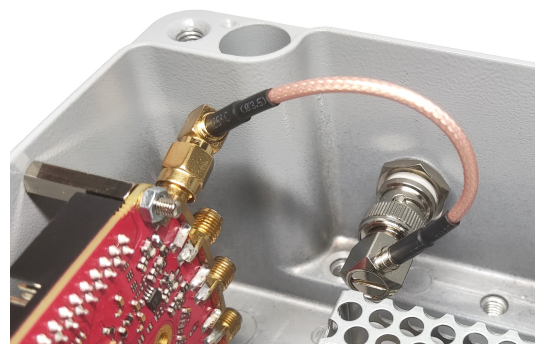
Obr. 3.6: Hlavní měřicí jednotka - vnitřní uspořádání

Náhrada koaxiálního kabelu

Vzhledem k velmi blízkému umístění spínaného zdroje k levé boční stěně, kde se nachází BNC průchodka pro přivedení signálu z detektoru, byla původně využita T spojka pro připojení koaxiálního pigtailu, jehož přímý konektor by nebylo kvůli nedostatku prostoru možné připojit. Toto řešení bylo nahrazeno kratším pigtailem s úhlovým BNC konektorem, který umožnil přímé spojení průchodky s deskou Red Pitaya. Porovnání stavu před a po úpravě je na obrázku 3.7.



(a) před úpravou

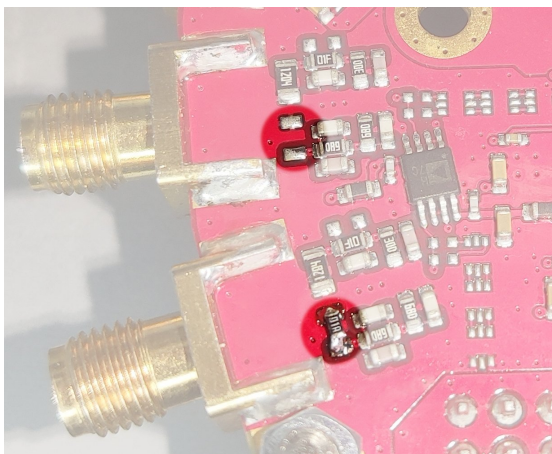


(b) po úpravě

Obr. 3.7: Hlavní měřicí jednotka - koaxiální pigtail

Impedanční přizpůsobení desky Red Pitaya

Analogové vstupy na desce Red Pitaya mají z výroby vstupní odpor $1\text{ M}\Omega$ [\[10\]](#) s ohledem na předpokládané využití jako osciloskop. Měřicí aparatura však využívá koaxiálních kabelů s charakteristickou impedancí $50\ \Omega$. S ohledem na měření velmi rychlých signálů by odrazy vzniklé tímto impedančním nepřizpůsobením měly značný vliv na měřené průběhy. Pro tento případ je Red Pitaya navržena s možností osazení vlastního vstupního rezistoru u obou analogových vstupů. U jednoho z nich byl tento rezistor osazen. Na obrázku [3.8](#) jsou vyznačena místa pro osazení.



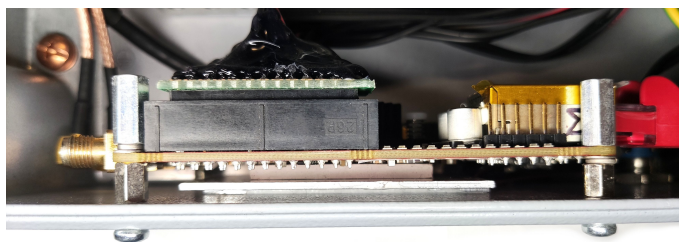
Obr. 3.8: Osazený vstupní odpor (zvýrazněn dole) na desce Red Pitaya, u druhého vstupu neosazen (zvýrazněn nahoře)

Odvod tepla

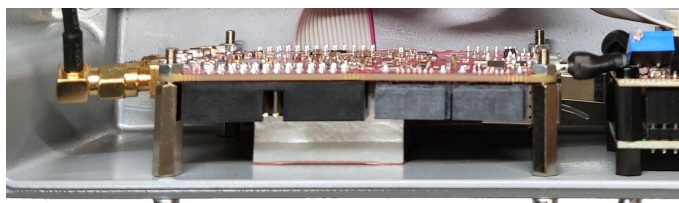
Čip Zynq na desce Red Pitaya je v základu vybaven pasivním hliníkovým chladičem. Ten se v uzavřené konstrukci měřicí jednotky ukázal jako zcela neúčinný. Řešením je využití samotné hliníkové elektromontážní krabice pro odvod tepla.

Původní řešení k tomuto využívalo vypodložení vzduchové mezery mezi dolní stranou desky a stěnou krabice teplovodivými materiály. Ty však nebyly nijak mechanicky uchyceny a kvůli použité teplovodivé pastě se postupně vysmýkaly mimo své původní umístění.

Nově je deska Red Pitaya přimontována vrchní stranou směrem ke stěně krabice, ke které byl přišroubován vyfrézovaný hliníkový kvádr (viz příloha [C](#)) s teplovodivou gumou. Tímto jsou čipy velmi dobře tepelně spojeny s masivní hliníkovou konstrukcí. Nyní, během měření v prostorech s běžnou pokojovou teplotou, je průměrná provozní teplota čipu Zynq okolo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Srovnání původního a nového řešení odvodu tepla je na obrázku [3.9](#)



(a) před úpravou



(b) po úpravě

Obr. 3.9: Hlavní měřicí jednotka - řešení odvodu tepla

Přístrojové nožky

Na spodní straně použité krabice byly nalepeny pěnové přístrojové nožky. Ty však byly příliš tenké (viz obrázek 3.10) a krabice se opírala o šrouby, kterými je uvnitř přichycen spínaný zdroj. Tyto nožky byly nahrazeny vyššími gumovými, díky kterým leží přístroj stabilně.



(a) před úpravou



(b) po úpravě

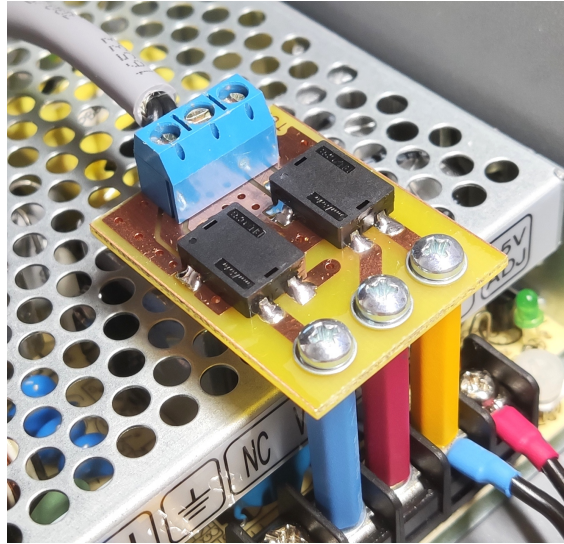
Obr. 3.10: Hlavní měřicí jednotka - přístrojové nožky

Filtrace napájení předzesilovače

Symetrické napájení předzesilovače bylo, vzhledem k použití spínaného zdroje, očekáváno značně zvlněné. Proto byla na jeho výstup přidána dvojice EMI⁵ filtrů

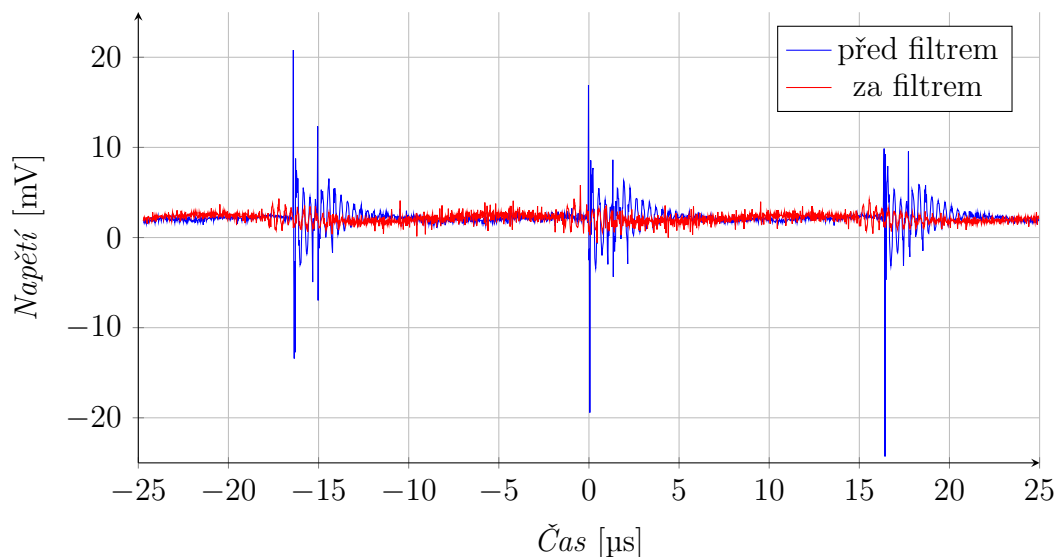
⁵Electromagnetic interference (elektromagnetická interference)

BNX028-01L od firmy Murata Electronics, které dle výrobce dokáží potlačit rušení až o 70 dB[11]. Obrázek 3.11 zachycuje provedení filtrů na samostatné desce plošných spojů (viz příloha B). Ta je k výstupním svorkám zdroje přišroubována pomocí mosazných distančních sloupků.



Obr. 3.11: Hlavní měřicí jednotka - filtr napájení předzesilovače

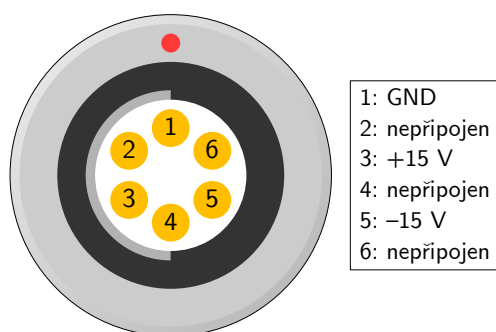
Funkce filtru pak byla ověřena zachycením časových průběhu napětí zdroje před a za filtrem pomocí osciloskopu Keysight EDUX1002A. Tyto průběhy jsou uvedeny na obrázku 3.12. Z nich je vidět typické zvlnění o velikosti přibližně 40 mV špička-špička, způsobené zákmity výstupních tranzistorů zdroje. Po filtraci je pak rozkmit snížen přibližně na 7 mV špička-špička.



Obr. 3.12: Časový průběh zvlnění použitého spínaného zdroje

Napájecí konektor předzesilovače

Součástí úprav byla také záměna pozic konektoru napájení předzesilovače se vstupní BNC průchodky. Nově je koaxiální vstup umístěn blíže k desce Red Pitaya a výstup napájení předzesilovače vedle spínaného zdroje. Záměna je viditelná na již zmíněných obrázcích 3.6 či 3.7. Během této úpravy bylo nutné zdokumentovat zapojení konektoru, které je uvedeno na obrázku 3.13.



Obr. 3.13: Zapojení konektoru napájení předzesilovače (z pohledu na měřicí jednotku)

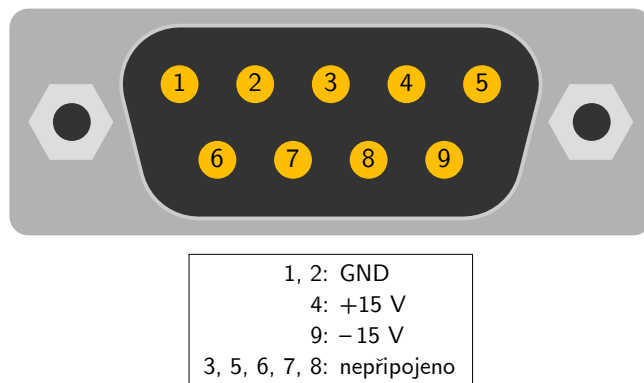
3.2 Předzesilovač



Obr. 3.14: Fotografie předzesilovače CSP10

K aparatuře byly poskytnuty tři různé předzesilovače. Prvním z nich je nábojový předzesilovač CSP10 od firmy FAST ComTec, který je zachycen na obrázku 3.14.

Pro připojení vysokonapětového zdroje a detektoru je vybaven dvěma SHV⁶ konektory. Dále obsahuje testovací vstup a signálový výstup, které jsou provedeny pomocí BNC konektorů. Pro napájení samotného zesilovače je využit standardní devítipinový konektor D-sub, jehož zapojení je uvedeno na obrázku 3.15.



Obr. 3.15: Zapojení konektoru pro napájení předzesilovače (pohled zepředu na předzesilovač)

Další dva poskytnuté předzesilovače, označené jako RFPA2 a RFPA3, byly vyrobeny na Ústavu radioelektroniky. Jejich konstrukční provedení je inspirováno výše zmíněným předzesilovačem CSP10, aby byla možná jejich bezproblémová záměna v aparatuře. Po elektronické stránce však využívají rozdílného principu zesilování signálu. Zatímco CSP10 vstupní signál integruje, RFPA2 a 3 nikoliv.

Po praktické stránce se předzesilovač RFPA2 s nižším zesílením ukázal během testovacích měření účinnější oproti RFPA3 díky nižší úrovni výstupního šumu a lepší stabilitě. Hodnoty změřených úrovní šumu pomocí osciloskopu jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Předzesilovač	Výstupní úroveň šumu
	[mVpp]
CSP10	1
RFPA2	10
RFPA3	135

Tab. 3.1: Hodnoty výstupního šumu předzesilovačů

⁶Safe High Voltage connector (bezpečný vysokonapětový konektor)

3.3 Proporcionální detektor

Součástí aparatury je kulový proporcionální detektor LND 270132. Jeho náplň tvoří vodík o tlaku 3800 torrů[12], což je přibližně pětinasobek normálního atmosférického tlaku. Jeho připojení je realizováno pomocí koaxiálního SHV konektoru.

Tento detektor byl využíván při vývoji softwaru pro aparaturu vzhledem k jeho častému generování parazitních impulzů (viz kapitola 2.1.1). Díky tomu bylo možné testovat skutečné zapojení aparatury bez nutnosti ionizujícího zářiče, či nahrazení detektoru generátorem umělého signálu.

Druhým poskytnutým detektorem je LND 270133, který je mechanickou konstrukcí shodný s předchozím. Jeho plynová náplň však navíc obsahuje příměs ^3He , díky které má odlišnou spektrální citlivost.



Obr. 3.16: Fotografie proporcionálních detektorů LND 270132 a LND 270133

3.4 Zdroj vysokého napětí

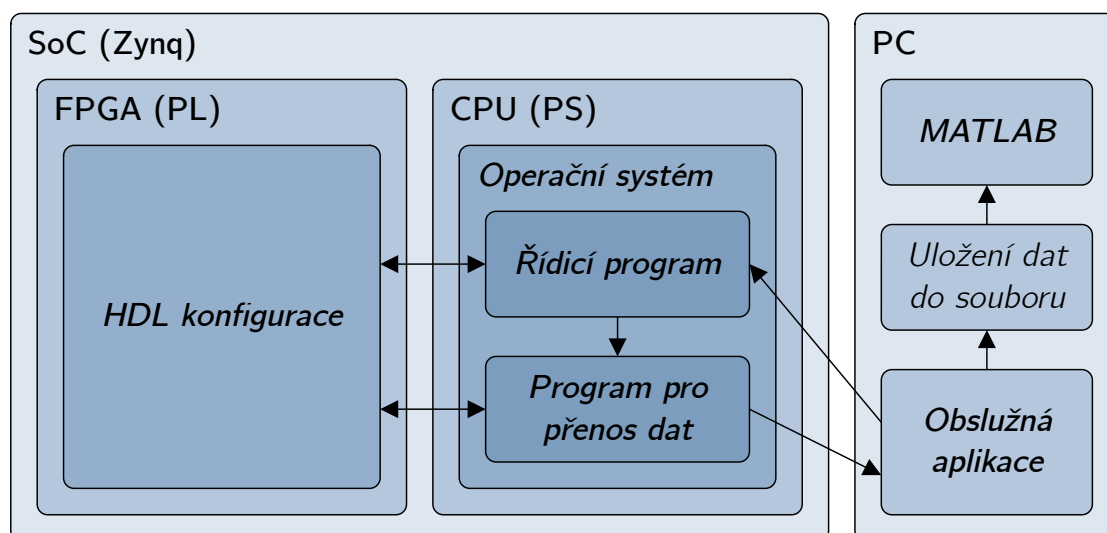
Jako zdroj vysokého napětí pro detektor je použit laboratorní zdroj SRS PS350, který je plně regulovatelný do 5 kV a má nastavitelné proudové omezení do 5 mA, při jehož překročení dojde k samočinnému vypnutí výstupu.

4 Firmware a software

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.1, jádrem aparatury je vývojová deska Red Pitaya STEMLab 125-14, která obsahuje procesor (CPU¹) pro běh obslužného programu a FPGA k zachycení signálu. Dále je k provozu aparatury potřeba počítačový program jako komunikační rozhraní s měřicí jednotkou.

Ačkoliv se předchozí diplomová práce[8] zabývala vytvořením tohoto softwaru, bylo zjištěno, že nebyl k práci bezchybně přiložen. Při pokusu o otevření projektu pro FPGA, hlásilo vývojové prostředí absenci některých zdrojových souborů. Vzhledem k této skutečnosti a také k faktu, že ve zmíněné práci není software téměř vůbec zdokumentován, bylo rozhodnuto, že je nezbytné vytvořit zcela nový.

Programové vybavení měřicí aparatury se skládá z několika hlavních celků, které jsou znázorněny na obrázku 4.1. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé části podrobně popsány.

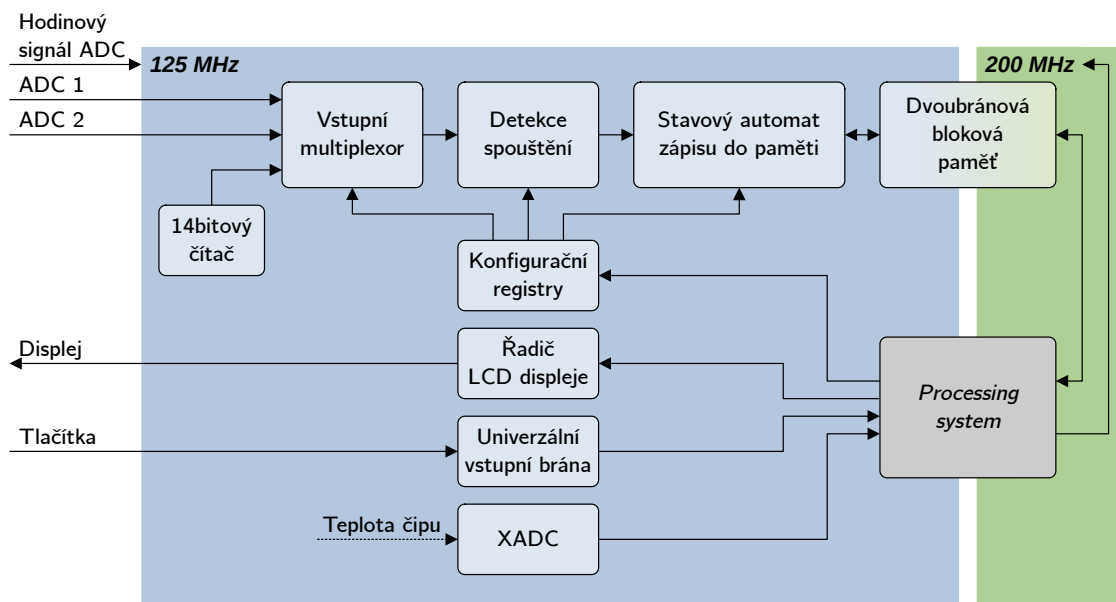


Obr. 4.1: Blokový diagram programového vybavení měřicí aparatury

¹Central Processing Unit (centrální procesorová jednotka)

4.1 HDL konfigurace FPGA

Pro FPGA (v čipu Zynq nazývané jako PL²) byla vytvořena HDL³ konfigurace, pomocí vývojového prostředí Vivado ve verzi 2021.2, jejíž zjednodušené blokové schéma je na obrázku 4.2. Jednotlivé bloky jsou podrobně popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 4.2: Blokový diagram konfigurace pro FPGA

Celý návrh je rozdělen na dvě samostatné vzájemně asynchronní hodinové domény. První z nich pracuje s kmitočtem 125 MHz, jehož zdrojem je oscilátor na desce Red Pitaya, který zároveň taktuje vstupní AD převodníky. Druhá hodinová doména je řízena kmitočtem 200 MHz. Ten je generován jedním ze čtyř hodinových výstupů bloku PS. Jeho frekvence byla zvolena na horní hranici, při které byly stále splněny podmínky časové analýzy, aby byla umožněna co nejvyšší možná propustnost čtení dat procesorem.

Po implementaci návrhu bylo zjištěno využití prostředků FPGA, které je uvedeno v tabulce 4.1. Kromě blokové paměti a pinů je obsazení menší než 10 %. Zbývá tedy dostatek prostředků pro případné budoucí rozšíření návrhu o další funkcionalitu.

²Programmable Logic (programovatelná logika čipu Zynq)

³Hardware Description Language (programovací jazyk pro popis hardwaru)

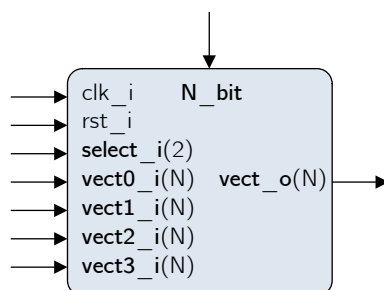
Prostředek	Počet využitých	Počet dostupných	Využití [%]
LUT ⁴	1 537	17 600	8,73
LUTRAM ⁵	85	6 000	1,42
FF ⁶	2 160	35 200	6,14
BRAM ⁷	32	60	53,33
IO ⁸	44	100	44,00
BUFG ⁹	2	32	6,25

Tab. 4.1: Využití prostředků FPGA

4.1.1 Vstupní multiplexor

Blok vstupního multiplexoru byl implementován jako jednoduchý RTL¹⁰ modul v jazyce VHDL¹¹ (*inputMux.vhd*). Jeho vstupy a výstup jsou zakresleny na obrázku 4.3. Má jeden generický parametr *N_bit*, kterým je možné nastavit bitovou šířku datových vstupů a výstupu. Nastavením dvoubitového vstupu *select_i* je aktivován jeden ze čtyř vstupů, který je synchronně s hodinovým signálem *clk_i* přenášen na výstup *vect_o*.

První dva vstupy multiplexoru jsou připojeny k oběma AD převodníkům desky Red Pitaya. Ke třetímu vstupu je připojen 14bitový binární čítač, který byl využíván během vývoje namísto externího signálu. Poslední vstup není připojen.



Obr. 4.3: Vstupy a výstupy vstupního multiplexoru

⁴Look-Up Table (prostředek v FPGA pro realizaci kombinační logiky)

⁵Look-Up Table Random Access Memory (distribuovaná paměť FPGA)

⁶Flip-Flop (klopný obvod)

⁷Block Random Access Memory (bloková paměť s náhodným přístupem)

⁸Input-Output (vstupní/výstupní pin)

⁹Global Buffer (prostředek FPGA k rozvodu hodinového signálu)

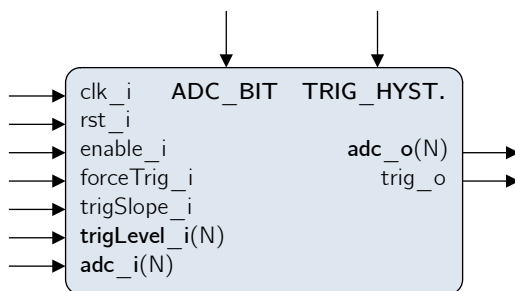
¹⁰Register-transfer level (abstraktní model digitálních obvodů)

¹¹VHSIC Hardware Description Language (jeden z nejpoužívanějších HDL jazyků)

4.1.2 Detekce spouštění

Spouštění záznamu (angl. trigger) zajišťuje blok *adcTrigger.vhd* (viz obrázek 4.4), který byl rovněž implementován v jazyce VHDL. Jeho dvěma generickými parametry *ADC_BIT* a *TRIG_HYSTERESIS* je možné nastavit bitovou šířku datového signálu a délku hystereze komparace. Díky zavedení této hystereze je potlačen vliv šumu v signálu, který by jinak mohl mít za následek nežádoucí spouštění.

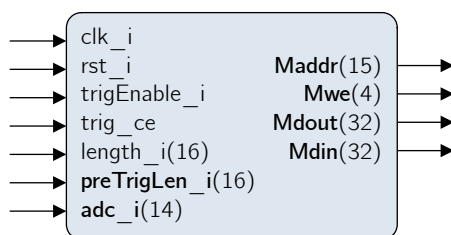
Vstupy *enable_i*, *trigSlope_i* a *trigLevel_i* řídí samotné spouštění, jeho úroveň a směr hrany. Výstup *trig_o* je výsledný spouštěcí signál, který je možné aktivovat také pomocí vstupu *forceTrig_i*. To umožňuje uživateli v případě potřeby zaznamenat vstupní signál ručně.



Obr. 4.4: Vstupy a výstupy bloku spouštění záznamu

4.1.3 Stavový automat zápisu do blokové paměti

Hlavním, a také nejsložitějším, blokem návrhu je stavový automat Mealyho typu *memWriter.vhd* zajišťující ukládání dat do paměti. Návrh jeho rozhraní je na obrázku 4.5.

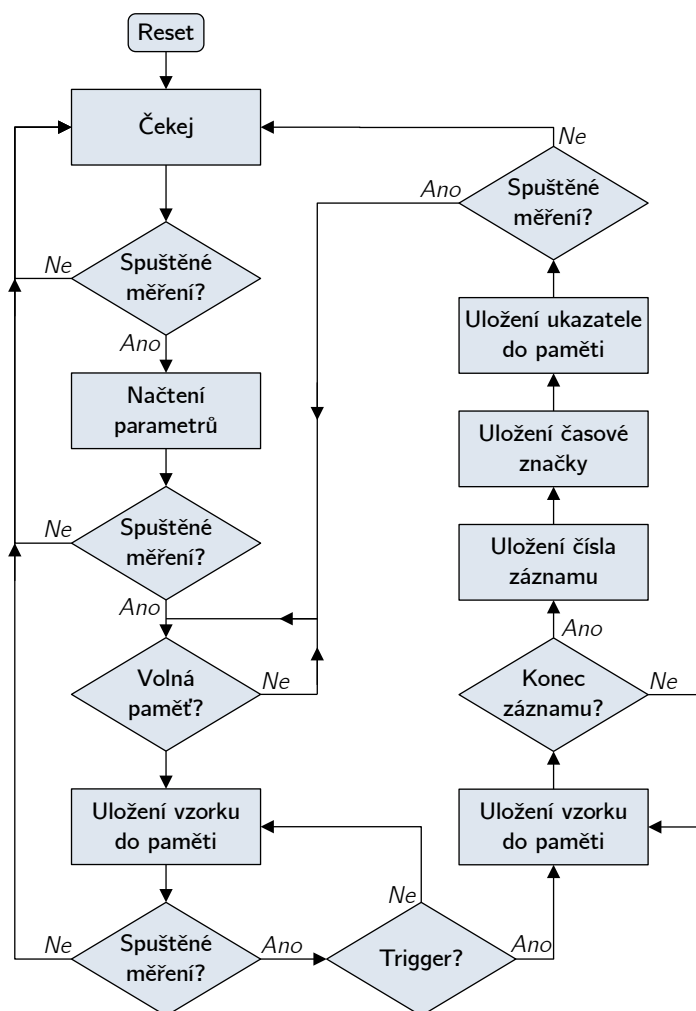


Obr. 4.5: Vstupy a výstupy stavového automatu zápisu dat do paměti

Funkci stavového automatu popisuje zjednodušený vývojový diagram na obrázku 4.6, či případně komplexnější stavový diagram v příloze D, který detailně popisuje veškeré vnitřní signály.

Stavový automat ve výchozím stavu čeká na zahájení měření, které je signalizováno nastavením vstupního signálu *trigEnable* do aktivní úrovně. V takovém případě

přechází automat do stavu kontroly volnosti paměťového segmentu. Při přechodu jsou zároveň uloženy vstupní parametry měření do dočasných vnitřních registrů, aby nemohly být během měření změněny. Při zjištění volného místa v paměti je dalším stavem cyklus zápisu vstupního signálu do datového prostoru v příslušném segmentu. Tento stav nepřetržitě ukládá vstupní signál do chvíle, kdy je buď vypnuto měření, v takovém případě následuje přechod do výchozího stavu, nebo kdy přijde aktivní signál spouštění. V druhém případě je uložen ukazatel na počátek záznamu do dočasného registru a následuje přechod do stavu, kdy je ukládán zbytek záznamu. Po dokončení je uložena hlavička, kterou tvoří pořadové číslo, časová značka a ukazatel začátku záznamu. Zápisem tohoto ukazatele na nulovou pozici daného paměťového segmentu je procesoru signalizováno, že jsou celá data uložena a připravena k odeslání do počítače. Dále je, v případě stále aktivního měření, inkrementován ukazatel na paměťový segment a zahájen nový cyklus záznamu.



Obr. 4.6: Zjednodušený vývojový diagram stavového automatu zápisu do paměti

4.1.4 Bloková paměť

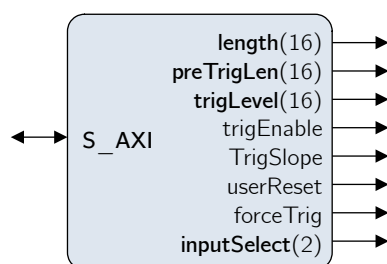
Pro implementaci paměti bylo využito IP¹² jádro *Block Memory Generator* (8.4), které je poskytováno jako součást vývojového prostředí Vivado. V konfigurátoru jádra byl zvolen režim paměti *BRAM Controller* a typ *True Dual Port RAM* s možností oddělených hodinových signálů obou bran. Tato kombinace nastavení umožňuje jednoduché připojení paměti k procesoru pomocí dalšího využitého IP jádra *AXI BRAM Controller* (4.1), které převádí rozhraní paměti na sběrnici AXI¹³. Druhá brána paměti je připojena ke stavovému automatu, který provádí zápis dat.

Adresní rozsah a hloubku paměti je možné nastavit v kartě *Address Editor*, která je součástí prostředí blokového návrhu (*Block Design*). Velikost paměti byla zvolena nejvyšší možná tj. *128K* (128 KiB). Při komunikaci s pamětí bylo nutné uvažovat adresování po bajtech se zarovnáním na nastavenou šířku slova v konfiguraci jádra *AXI BRAM Controller*, tj. 4 B.

4.1.5 Konfigurační registry

Pro řízení parametrů akvizice procesorem bylo vytvořeno vlastní IP jádro pomocí nástroje *Create and Package New IP* v prostředí Vivado. Tato funkce umožňuje vygenerovat šablonu jádra s plně funkční implementací sběrnice AXI. Při zvolení varianty *AXI4Lite-slave* je vytvořen požadovaný počet samostatně adresovatelných registrů. Jejich výstupy byly vyvedeny z jádra a připojeny k příslušným cílovým modulům. Rozhraní lze vidět na obrázku 4.7.

Výstupům *userReset* a *forceTrig* bylo navíc implementováno samovolné nulování. Po jejich zápisu na aktivní úroveň se s následující hranou hodinového signálu vrací zpět do úrovně neaktivní. Tím je zajištěna pouze jednorázová aktivace příslušných akcí.



Obr. 4.7: Vstupy a výstupy modulu konfiguračních registrů

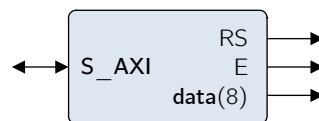
¹²Intellectual Property core (modul vytvořený *třetí osobou*)

¹³Advanced eXtensible Interface (typ komunikační sběrnice)

4.1.6 Řadič LCD displeje

Pro řízení displeje byly zvažovány dvě možnosti realizace. První z nich je tzv. *bit banging*, který spočívá ve využití vstupně-výstupní brány procesoru. Jednotlivé signály jsou programově řízeny tak, aby komunikace splňovala nároky dané sběrnice.

Druhou možností, která byla nakonec zvolena, je implementace modulu řadiče. K tomuto účelu bylo opět využito vytvoření šablony IP jádra s implementací AXI4 Lite-slave, podobně jako u bloku konfiguračních registrů. V tomto případě byl však do jádra vytvořen v jazyce VHDL jednoduchý stavový automat, který na základě zápisu na příslušné adresy skrze AXI sběrnici řídí signály (viz obrázek 4.8) displeje.



Obr. 4.8: Vstupy a výstupy modulu řadiče LCD displeje

4.1.7 Univerzální vstupní brána

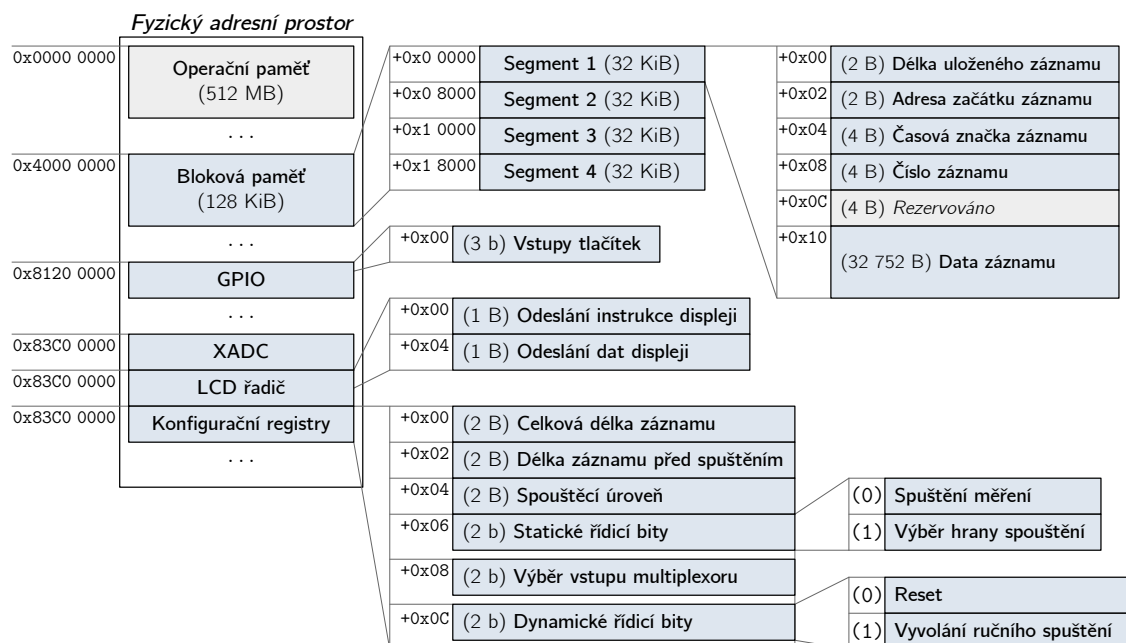
Tento blok zpracovává vnější vstupní signály z tlačítek. K tomuto účelu bylo využito již existující IP jádro *AXI GPIO (2.0)*. V jeho konfiguraci byla nastavena bitová šířka pro tři tlačítka a zapnuta funkce *All Inputs*, díky které nejsou implementovány výstupy, které by zůstaly nevyužity.

4.1.8 XADC

Posledním blokem v návrhu je modul *XADC*. Ten je podobně jako *Processing system* v čipu Zynq fyzicky integrován. Jedná se o vícekanálový AD převodník s možností snímání různých vstupů (externí, monitorování napájecích napětí, atd.). Jeho součástí je také teplotní senzor, díky kterému je možné sledovat teplotu samotného čipu.

4.1.9 Mapa adresního prostoru

Vzhledem k tomu, že všechny moduly využívající sběrnici AXI jsou namapovány na různé rozsahy fyzických adres, byla vytvořena celková mapa tohoto adresního prostoru s popisem jednotlivých registrů pro rychlou orientaci při následujícím vývoji softwaru procesoru. Mapa je uvedena na obrázku 4.9.



Obr. 4.9: Mapa fyzického adresního prostoru

4.2 Software procesoru

Pro zajištění funkcionality procesoru bylo zvoleno využití operačního systému. Výhodou tohoto řešení je podstatné zjednodušení vytvářeného programu, který může využívat již existujících funkcí systému, jeho knihoven a ovladačů^[13]. Vzhledem ke komplexnosti a časové náročnosti sestavení vlastní distribuce operačního systému Linux, bylo využito již existujícího STEMLab OS¹⁴^[14].

4.2.1 Operační systém

Jak již bylo zmíněno, měřicí jednotka využívá existujícího operačního systému určeného přímo pro vývojovou desku Red Pitaya. Pro připojení do CLI¹⁵ lze využít SSH¹⁶, který je dostupný na výchozím portu 22. K přístupu bez omezených práv je možné se přihlásit pomocí uživatele `root`, který má totožné heslo. Toto je nutné brát v potaz při zapojení měřicí jednotky do počítačové sítě, která by měla být izolována. (Je předpokládáno přímé spojení s počítačem.) V opačném případě hrozí kompromitace zařízení útočníkem. Případně je možné heslo změnit pomocí příkazu `passwd`.

¹⁴Operating System (operační systém)

¹⁵Command Line Interface (příkazový řádek)

¹⁶Secure SHell (zabezpečený terminálový protokol)

Adresa síťového rozhraní

Výchozí konfigurace operačního systému umožňuje připojení měřicí jednotky do počítačové sítě s aktivním DHCP¹⁷ serverem (typicky LAN¹⁸) či bez něj (např. přímé spojení s počítačem). V obou případech dojde po několika vteřinách k automatickému nastavení síťové adresy zařízení. V druhém případě je ke komunikaci využito tzv. link-local adres, které si daná zařízení automaticky vytvoří v rozsahu 169.254.0.0/16. Aktuální adresa je průběžně uživateli zobrazována na prvním řádku LCD displeje.

Přizpůsobení systému

V základu obsahuje použitý OS funkce, jako je například webový server, které však nejsou pro akviziční systém potřebné. Tyto služby zbytečně využívaly procesorový čas, a proto byly deaktivovány. Také bylo změněno nastavení časové zóny a nainstalovány základní pomocné programy, tj. *htop* (správce procesů) a *mc* (správce souborů). Tyto úkony byly provedeny pomocí příkazů uvedených ve výpisu 4.1.

```
# Vypnutí a zakázání služby Jupyter
> systemctl stop jupyter.service
> systemctl disable jupyter.service

# Vypnutí a zakázání služby webového serveru Nginx
> systemctl stop redpitaya_nginx.service
> systemctl disable redpitaya_nginx.service

# Nastavení časové zóny
> timedatectl set-timezone Europe/Prague

# Instalace programů htop a mc
> apt-get update
> apt-get install htop mc
```

Výpis 4.1: Příkazy pro prvotní přizpůsobení operačního systému STEMLab OS

Operační systém také využívá mDNS¹⁹ protokolu, díky kterému je měřicí jednotka dostupná nejen pomocí IP adresy, ale také svého hostitelského jména. To je ve výchozím stavu dynamicky vytvořené na základě linkové adresy síťového adaptéru. Pro jeho změnu na **ProportionalCounter** bylo nutné zakázat službu *hostname-mac* a ručně jméno nastavit pomocí příkazů ve výpisu 4.2.

¹⁷Dynamic Host Configuration Protocol (protokol pro automatické nastavení síťové adresy)

¹⁸Local Area Network (lokální počítačová síť)

¹⁹Multicast DNS (protokol pro překlad hostitelských názvů na lokální síti)

```
# Vypnutí a zakázání služby hostname-mac
> systemctl stop hostname-mac.service
> systemctl disable hostname-mac.service

# Ruční nastavení hostitelského jména
> hostnamectl set-hostname 'ProportionalCounter'
```

Výpis 4.2: Příkazy pro změnu hostitelského jména měřicí jednotky

Pro optimalizaci výkonu akvizičního systému bylo také upraveno nastavení spouštění programů. Po přidání položky „CPUAffinity=0“ do oddílu „[Manager]“ v konfiguračním souboru `/etc/systemd/system.conf` je zajištěn výchozí běh všech spouštěných procesů na prvním jádře procesoru. Druhé jádro je tímto vyhrazeno programu pro přenos dat, u kterého je požadována nejvyšší možná rychlost běhu.

4.2.2 Systémová služba *ProportionalCounter*

Pro prvotní nahrání HDL konfigurace (bitstreamu) do FPGA a následné spuštění vytvořených programů (viz kapitoly 4.2.3 a 4.2.4) byl vytvořen skript *start.sh*, který je automaticky spouštěný jako systémová služba, vždy po zapnutí měřicí jednotky. Skript je včetně bitstreamu a zkompileovaných programů umístěn v adresáři `/opt/ProportionalCounter`.

4.2.3 Řídicí program

První ze dvou vytvořených programů je určen k řízení akvizice a obsluze periférií uživatelského rozhraní (tj. tlačítek a displeje). Je napsán v jazyce C a lze ho ze zdrojových souborů sestavit přímo pod operačním systémem měřicí jednotky.

Řízení akvizice

Řízení parametrů akvizice a její ovládání je realizováno skrze konfigurační registry (viz kapitola 4.1.5). Příslušné příkazy jsou vysílány z obslužné aplikace v počítači skrze UDP²⁰ pakety s cílovým portem 39600. Struktura obsahu těchto paketů je uvedena na obrázku 4.10.

	1. bajt	2. bajt	3. bajt	...
<i>Zápis 16bitové hodnoty do konfiguračního registru n</i>	0x1n	Data		
<i>Nastavení IP adresy cílového počítače</i>	0x30	Adresa (ASCII řetězec <i>libovolné</i> délky)		

Obr. 4.10: Struktura řídicích paketů

²⁰User Datagram Protocol (nespojovaný protokol transportní vrstvy počítačových sítí)

Obsluha periférií uživatelského rozhraní

Druhou funkcí řídicího programu je výstup informací na displej. Jeho první řádek je vyhrazen zobrazení aktuální IP adresy. Druhý řádek je pak rozdělen na dvě poloviny. Levá zobrazuje aktuální teplotu čipu Zynq a pravá informuje uživatele o stavu měření, tj. zda probíhá, či nikoliv.

Dále je prováděna obsluha tlačítek umístěných pod displejem. Ta mají naprogramovány následující funkce:

- **levé** - vypnutí měřicí jednotky,
- **prostřední** - vyvolání ruční trigger události,
- **pravé** - zastavení probíhajícího měření.

Každá z těchto funkcí vyžaduje následné potvrzení jiným tlačítkem, aby bylo minimalizováno riziko nechtěné aktivace. Vzhledem k vystouplé konstrukci hmatníků je vysoká pravděpodobnost, že dojde k jejich neúmyslnému stisku.

4.2.4 Program pro přenos dat

Druhý program má za úkol vyčítání dat uložených v blokové paměti a jejich odesílání do počítače přes síťové rozhraní. Jeho funkce spočívá v neustálé kontrole blokové paměti na nově uložená data. Ta probíhá čtením vždy prvního datového slova v příslušném segmentu paměti. Stavový automat ukládající data totiž toto slovo zapisuje vždy jako poslední. Po dokončení přenosu dat do počítače je toto místo programem vynulováno, čímž je logice záznamu dat signalizováno uvolnění daného paměťového segmentu.

Pro samotný přenos dat do počítače jsou data vkládána do UDP paketů s cílovým portem 39500 a cílovou adresou počítače. Do jednoho paketu je vždy vložen celý datový záznam. Jeho struktura je znázorněna na obrázku 4.11 který může mít délku až 32 012 B. Takový paket může přesahovat typickou hodnotu MTU²¹, ta zpravidla činí 1500 B. Operační systém měřicí jednotky v tomto případě paket před odesláním automaticky fragmentuje. Protistrana pak během příjmu tyto dílčí pakety složí do původní podoby.

2 bajty	2 bajty	4 bajty	4 bajty	4 bajty	2 bajty	2 bajty
Počet vzorků	---	Časová značka	Pořadí záznamu	Rezervováno	ADC vzorek	ADC vzo
Hlavička záznamu					Záznam	

Obr. 4.11: Struktura datových paketů

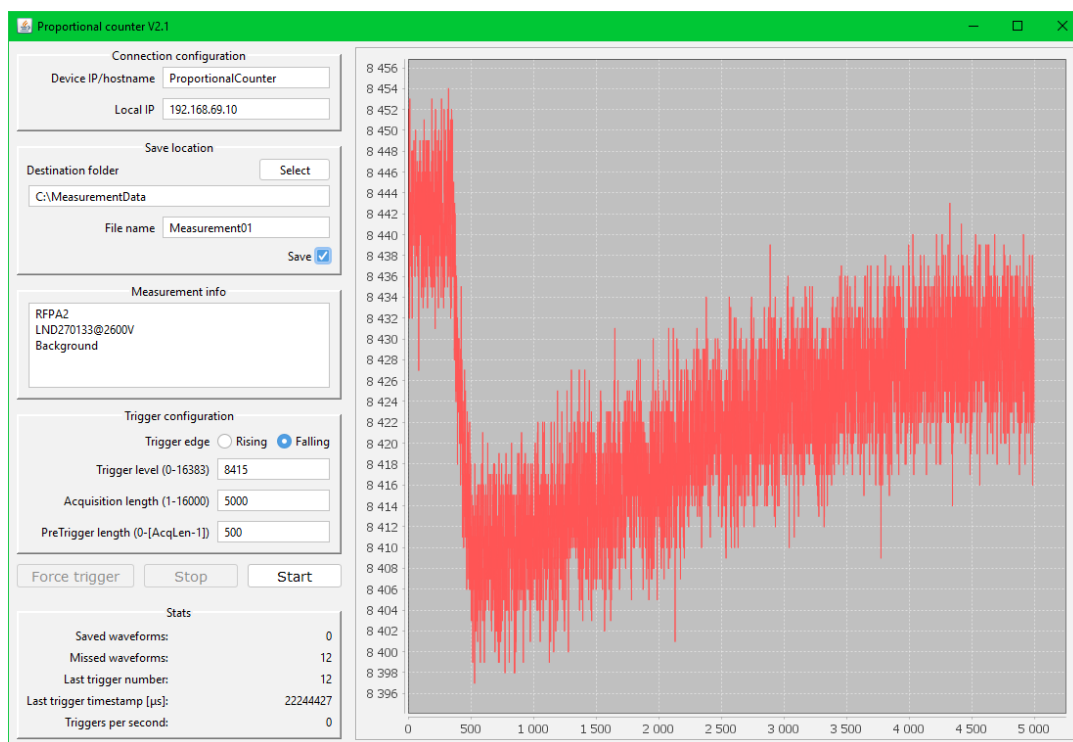
²¹Maximum Transmission Unit (maximální velikost datové jednotky)

4.3 Počítačové aplikace

K aparatuře byly vytvořeny dvě počítačové aplikace. Byl pro ně zvolen programovací jazyk Java, který umožní běh na počítači s libovolným operačním systémem. K jejich vývoji bylo využito prostředí *Apache NetBeans IDE 12.5* a *Java SE Development kit 17.0.1*.

4.3.1 Obslužná aplikace

Úkolem obslužné počítačové aplikace je ovládání měřicí jednotky a příjem naměřených dat. Tato data jsou pak ukládána na pevný disk počítače. Obslužná aplikace je velmi důležitá pro uživatelský komfort, byl tedy kladen důraz na vytvoření jednoduchého a přehledného GUI²², jehož ukázka je na obrázku 4.12.



Obr. 4.12: Obslužná počítačová aplikace

Levá strana rozhraní je rozdělena na čtyři části. V první z nich je nastavení adres pro komunikaci, které jsou automaticky detekovány a předvyplněny. Ve druhé části je cíl ukládání souborů, které je možné vypnout políčkem *Save*. Dále je umístěno pole, do kterého je možné vepsat libovolné poznámky (například podmínky měření), pro uložení společně s datovým souborem. Třetí část obsahuje možnosti měřících parametrů a spuštění či zastavení měření. V dolním levém rohu jsou pak vypisovány

²²Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)

statistiky aktuální akvizice. Na pravé straně okna je umístěn graf pro průběžný náhled časových průběhů zaznamenaných impulzů.

Okamžitě po spuštění měření tlačítkem *Start* jsou v cílovém adresáři vytvořeny dva soubory:

- *název.txt*,
- *název.bin*.

Do prvního souboru jsou uloženy informace o měření. Textový formát, jehož ukázka je na výpisu 4.3, umožňuje snadnou čitelnost, a to jak softwarově, tak i uživatelem.

```
1 StartTime: 2022/04/27 08:46:41
2 TrigSlope: falling
3 TrigLevel: 8390
4 AcqLength: 10
5 PreTrLeng: 3
6 Text prvního řádku poznámky
7 Druhý řádek poznámky...
```

Výpis 4.3: Struktura informačního souboru

Druhý soubor obsahuje všechna data z celého měření v binárním formátu. Ten byl zvolen pro lepší účinnost z pohledu nároků na velikost souboru. Pokud by byly jednotlivé datové vzorky převáděny na text, celková velikost by byla odhadem trojnásobná.

Struktura dat uvnitř souboru je téměř shodná s formátem přijímaných paketů. První čtveřice bajtů je však odstraněna pro zbytečnou redundanci. Údaj o délce jednotlivých záznamů je totiž uložen v souboru s informacemi a v rámci celého měření je neměnný. Na obrázku 4.13 je uveden příklad struktury souboru se třemi záznamy o délce 10 vzorků.

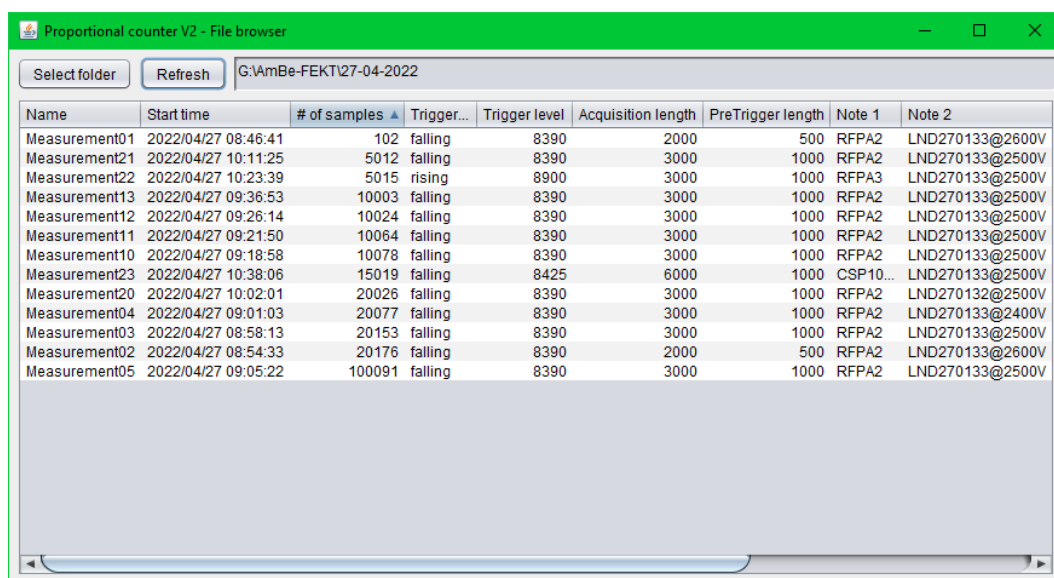
	0x00	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07	0x08	0x09	0x0A	0x0B	0x0C	0x0D	0x0E	0x0F
0x00	Hlavička záznamu															
0x10	Data															
0x20	Časová značka				Pořadí záznamu				Rezervováno				Vzorek 1		Vzorek 2	
0x30	Vzorek 3		Vzorek 4		Vzorek 5		Vzorek 6		Vzorek 7		Vzorek 8		Vzorek 9		Vzorek 10	
0x40	31952470 [μs]				3				0				8443 ₍₁₀₎		8449 ₍₁₀₎	
0x50	8455 ₍₁₀₎		8440 ₍₁₀₎		8440 ₍₁₀₎		8444 ₍₁₀₎		8436 ₍₁₀₎		8444 ₍₁₀₎		8449 ₍₁₀₎		8438 ₍₁₀₎	

	0x00	0x01	0x02	0x03	0x04	0x05	0x06	0x07	0x08	0x09	0x0A	0x0B	0x0C	0x0D	0x0E	0x0F
0x00	FA	AD	6D	01	01	00	00	00	00	00	00	00	FF	20	FB	20
0x10	F8	20	FD	20	F6	20	F6	20	FC	20	00	21	00	21	F8	20
0x20	1D	9F	BE	01	02	00	00	00	00	00	00	00	FA	20	00	21
0x30	FE	20	FF	20	FE	20	FA	20	FE	20	FD	20	01	21	FB	20
0x40	56	8E	E7	01	03	00	00	00	00	00	00	00	FB	20	01	21
0x50	07	21	F8	20	F8	20	FC	20	F4	20	FC	20	01	21	F6	20

Obr. 4.13: Struktura datového souboru

4.3.2 Prohlížeč souborů

Pro rychlejší orientaci mezi více zaznamenanými soubory byla vytvořena aplikace, která nalezne všechna uložená měření ve vybrané složce a zobrazí je v přehledné tabulce. Uživatel má možnost seřadit celý seznam dle hodnot libovolného sloupce. Ukázka této aplikace je na obrázku 4.14



Name	Start time	# of samples	Trigger...	Trigger level	Acquisition length	PreTrigger length	Note 1	Note 2
Measurement01	2022/04/27 08:46:41	102	falling	8390	2000	500	RFP2	LND270133@2600V
Measurement21	2022/04/27 10:11:25	5012	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V
Measurement22	2022/04/27 10:23:39	5015	rising	8900	3000	1000	RFP3	LND270133@2500V
Measurement13	2022/04/27 09:36:53	10003	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V
Measurement12	2022/04/27 09:26:14	10024	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V
Measurement11	2022/04/27 09:21:50	10064	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V
Measurement10	2022/04/27 09:18:58	10078	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V
Measurement23	2022/04/27 10:38:06	15019	falling	8425	6000	1000	CSP10...	LND270133@2500V
Measurement20	2022/04/27 10:02:01	20026	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270132@2500V
Measurement04	2022/04/27 09:01:03	20077	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2400V
Measurement03	2022/04/27 08:58:13	20153	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V
Measurement02	2022/04/27 08:54:33	20176	falling	8390	2000	500	RFP2	LND270133@2600V
Measurement05	2022/04/27 09:05:22	100091	falling	8390	3000	1000	RFP2	LND270133@2500V

Obr. 4.14: Prohlížeč souborů měření

4.4 MATLAB

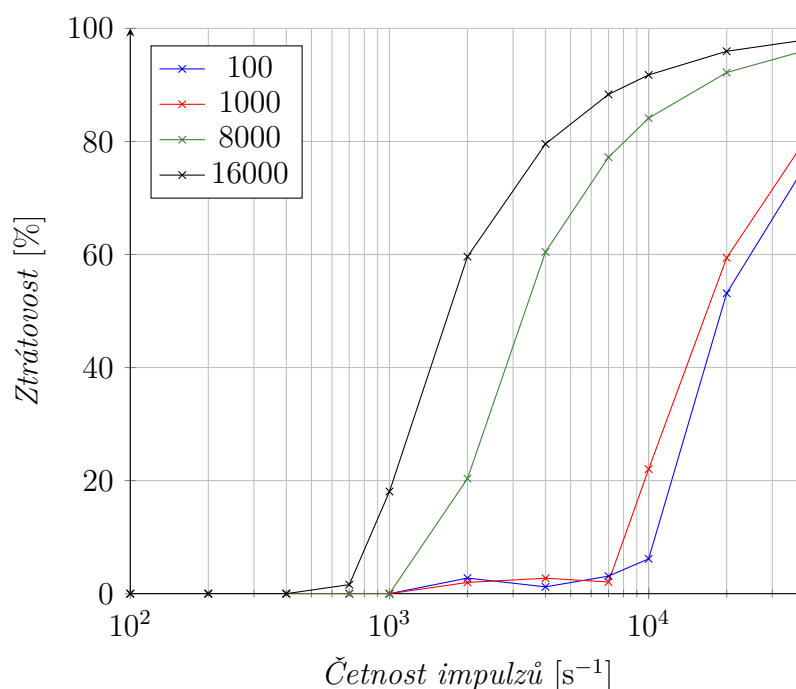
Pro načtení naměřených dat do MATLABu byla vytvořena funkce *loadData.m*. Ta vyžaduje dva vstupní parametry – název souboru bez přípony a cestu k němu. Návrátovými proměnnými jsou pak dvourozměrná matice zaznamenaných průběhů, vektor časových značek, vektor pořadových čísel a struktura s informacemi. Těmi jsou datum a čas počátku měření, parametry měření (tj. typ hrany spouštění, úroveň spouštění, celková délka záznamu a délka záznamu před spouštěcí událostí) a vektor uživatelských poznámek. Ukázkový zdrojový kód pro načtení dat je uveden ve výpisu 4.4.

```
1 file = 'Measurement01';
2 path = 'G:\AmBe-FEKT\27-04-2022\';
3 [data, tstamaps, trigns, info] = loadData(file, path);
```

Výpis 4.4: Načtení dat v MATLABu

4.5 Ověření četnosti akvizic

Po dokončení aparatury proběhlo testování maximální četnosti akvizic. Měřicí jednotka byla připojena ke generátoru funkcí Siglent SDG 2042X a pro několik různých nastavení délek záznamu bylo provedeno měření frekvenčních závislostí. Z časových značek pak byla vypočtena a vykreslena poměrná ztrátovost, která je uvedena na obrázku 4.15.



Obr. 4.15: Ztráty dat v závislosti na četnosti impulsů pro různé délky záznamu

Z průběhů charakteristik jsou patrné rozdílné limity četností, při kterých začíná docházet k výrazným ztrátám. Pro délky záznamů 8000 a 16000 vzorků je dosaženo přenosové rychlosti až 28 MB s^{-1} , u kratšího nastavení méně. Nejvyšší zjištěný datový tok odpovídá zhruba necelé čtvrtině přenosové kapacity gigabitového Ethernetu, který v tomto případě není limitující. Tzv. úzkým hrdlem je tedy pravděpodobně sběrnice mezi procesorem a blokovou pamětí v FPGA, či samotný procesor.

Předchozí práce[8] zmiňuje v kapitole 5.3.1, že původní implementace odesílala data pouze po dávkách, nikoliv nepřetržitě. Četnost záznamu tedy pravděpodobně, již z principu, nemohla dosahovat dostatečného výkonu. Ten lze v nové implementaci považovat za uspokojivý. Při skutečném měření je totiž využíváno menších délek záznamů, zpravidla okolo 3000 vzorků, které při vzorkovacím kmitočtu AD převodníku 125 MHz odpovídají zachycení 24 μs . Dále bylo během skutečného měření (viz kapitola 5) zjištěno, že skutečná četnost detekce částic detektorem nepřesahovala více než 200 impulsů za vteřinu. Důkladnější průzkum úzkého hrdla tedy nebyl nutný.

5 Měření

S pomocí dokončené aparatury bylo provedeno měření v laboratoři jaderné energetiky a ionizujícího záření na Ústavu elektroenergetiky.

5.1 Zdroj záření

Zdrojem záření byl americium-berylíový zářič vyrobený firmou Eckert & Ziegler Cesium s.r.o. s výrobním číslem AS010/15[15]. Tento typ neutronového zdroje využívá izotopu ^{241}Am , který podléhá alfa rozpadu. Vznikající alfa částice se sráží s beryliovými jádry, ze kterých vyraží neutrony.[1]

Z dostupných údajů[15] byl ke dni měření 27. 4. 2022, vypočten odhad aktivity a emise zdroje, dle vztahů 5.1 a 5.2 odvozených ze zákona radioaktivní přeměny:

$$A = A_0 \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{\Delta t}{T_{1/2}}} = 92,5 \cdot 10^9 \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{2365}{432,6 \cdot 365,25}} \doteq 91,545 \text{ GBq}, \quad (5.1)$$

$$n = n_0 \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{\Delta t}{T_{1/2}}} = 5,6 \cdot 10^6 \cdot e^{-\ln 2 \cdot \frac{2365}{432,6 \cdot 365,25}} \doteq 5,542 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}, \quad (5.2)$$

kde:

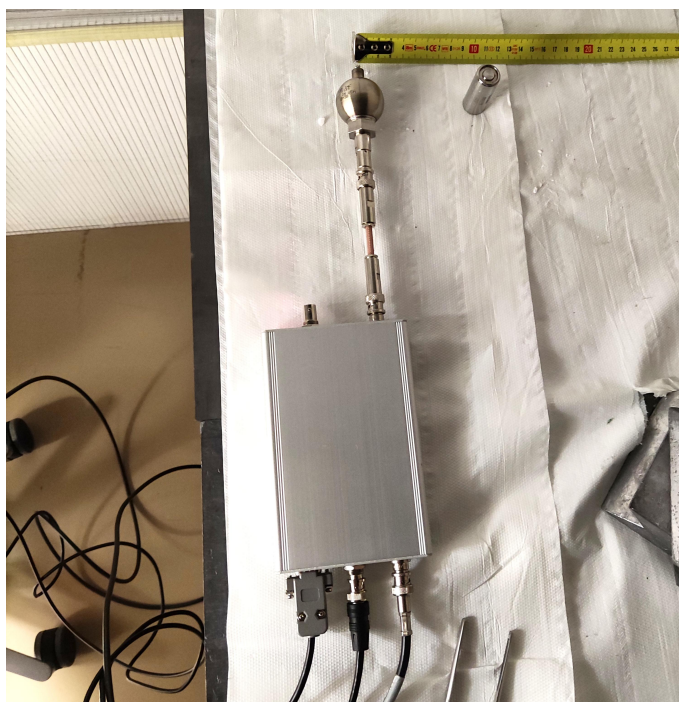
- A je vypočtený odhad aktivity zdroje,
- A_0 jeho počáteční aktivita,
- Δt je doba uvažované přeměny,
- $T_{1/2}$ poločas přeměny[16],
- n je vypočtený odhad emise neutronů,
- n_0 počáteční emise zdroje.

5.2 Průběh měření

V průběhu přibližně 2 hodin bylo provedeno celkem 13 dílčích měření pro různá nastavení měřicích parametrů, s obměnou předzesilovačů a detektorů. Během nich bylo získáno celkem 1,42 GiB dat v podobě 232 340 záznamů.

Během tohoto prvního skutečného měření bylo zjištěno, že propojovací kabel mezi detektorem a předzesilovačem, poskytnutý s původní aparaturou, je v praxi velmi krátký. Jeho délka je přibližně 10 cm včetně konektorů, což nedostačovalo pro umístění detektoru do měřicích kanálů přípravku neutronového zdroje. Důvodem krátké délky vodiče je pravděpodobně minimalizace šumu a útlumu zaváděných do velmi slabého signálu před jeho zesílením. Do budoucna bude vhodné otestovat možnost prodloužení této propojky, aby bylo umožněno umístění detektoru do měřicích kanálů.

Před zahájením měření byl tedy neutronový zdroj umístěn vedle detektoru, jak lze vidět na obrázku 5.1. Je však nutné podotknout, že toto mělo zásadní vliv na měřené spektrum, kvůli absenci moderátoru neutronů, který je součástí přípravku zdroje[15].



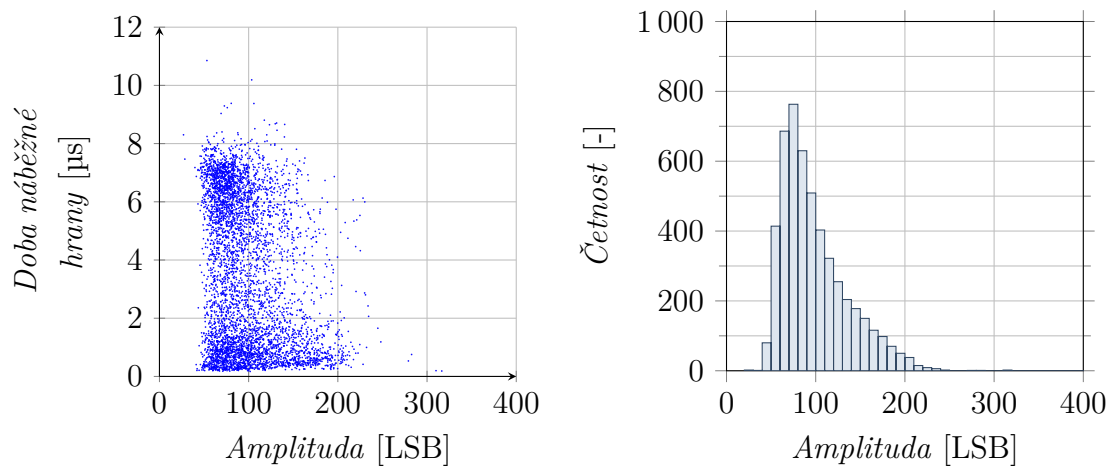
Obr. 5.1: Fotografie detektoru s předzesilovačem a neutronového zářiče AmBe

5.3 Výsledky měření

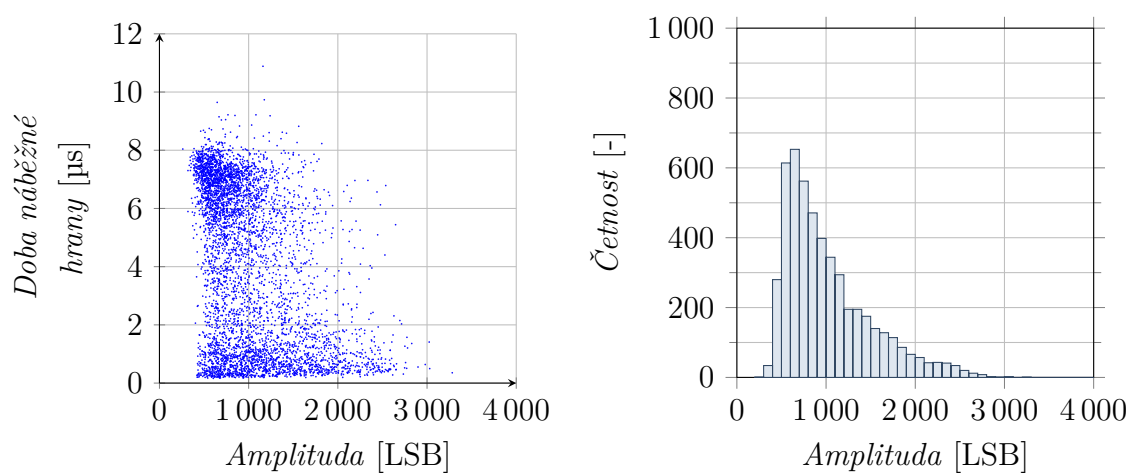
Získaná data byla zpracována do korelačních diagramů (viz kapitola 2.1) a amplitudových histogramů na obrázku 5.2. Uvedeny jsou zde tři soubory dat z detektoru LND 270133 při napájecím napětí 2,5 kV. Každý z nich byl změřen s jedním z předzesilovačů.

Při srovnání výsledků z předzesilovačů RFPA2 a RFPA3 na obrázcích 5.2a a 5.2b, je patrný podobný charakter dat. Zásadním rozdílem je u nich však rozsah amplitud signálů, který je u RFPA3 přibližně desetkrát větší. To naznačuje, že i jeho zesílení je úměrně tomu vyšší.

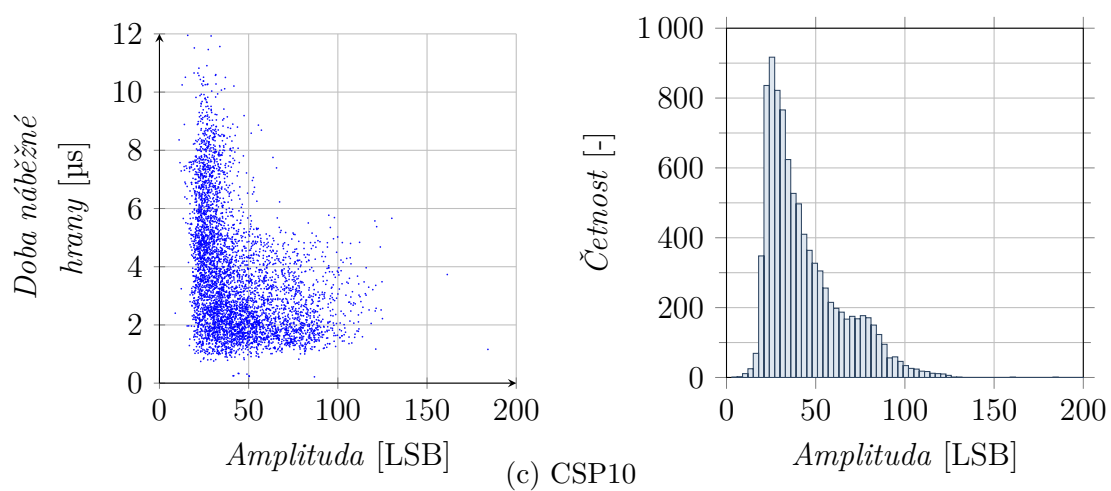
Třetí předzesilovač CSP10 (viz 5.2c) má znatelně odlišnou odezvu. I přes jeho nejnižší zisk umožňuje dobré rozlišení díky nízké hodnotě výstupního šumu.



(a) RFPA2



(b) RFPA3



(c) CSP10

Obr. 5.2: Naměřená data

6 Využití strojového učení pro klasifikaci impulzů

Tato kapitola je věnována využití strojového učení pro klasifikaci impulzů. Jak již bylo rozebráno v kapitole 2.1, impulzy generované různými ionizujícími částicemi se liší tvarem. Pro jejich klasifikaci je tedy nutné s ohledem na tento fakt zvolit vhodnou metodu.

Existuje řada programů a knihoven poskytující funkce strojového učení. Často využívaný je programovací jazyk Python v kombinaci s knihovnami Keras a TensorFlow. Pro tuto práci bylo však zvoleno prostředí MATLAB ve verzi R2021a. Důvodem pro jeho použití je nejen velmi přehledná dokumentace, ale především přívětivější interaktivní uživatelské prostředí pro návrh struktury neuronové sítě.

6.1 Konvoluční neuronové sítě

Jednou z metod strojového učení (specifičtěji hlubokého učení) jsou konvoluční neuronové sítě (zkráceně CNN¹). Ty se vyznačují použitím konvolučních vrstev, které jsou schopny detekovat ve vstupních datech určité znaky či sekvence[17]. Často se tyto sítě využívají pro zpracování obrazových dat, které se dají chápat jako dvourozměrné matice barevných bodů. Je však možné i použití s jednorozměrnou maticí, čili vektorem. Díky těmto vlastnostem se využití konvolučních sítí jeví jako dobrá možnost pro klasifikaci měřených impulzů.

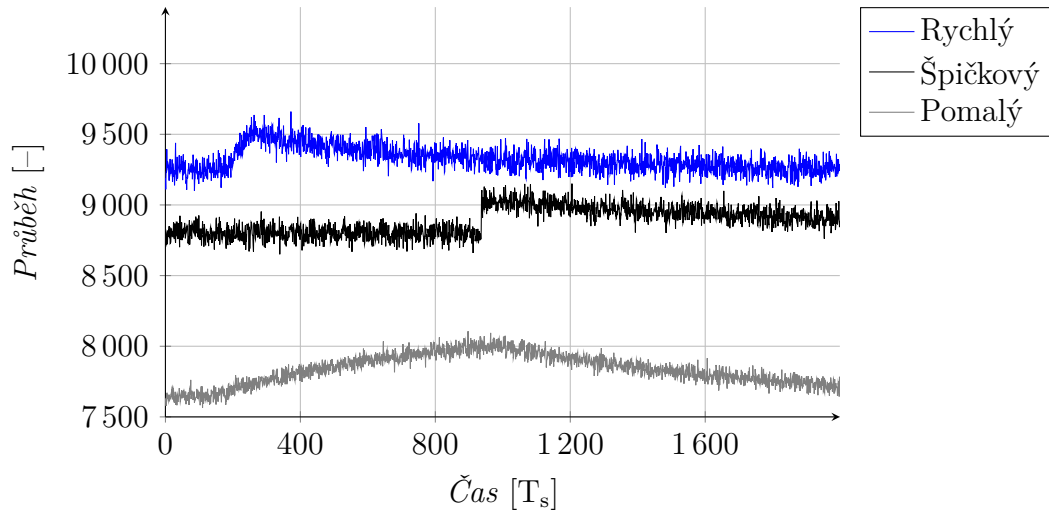
6.2 Generování umělých dat

Vzhledem k tomu, že konvoluční neuronové sítě využívají tzv. učení s učitelem, je nutné mít pro jejich trénování nejenom soubor samotných dat, ale také musí být tato data již rozdělena do příslušných tříd. Tohoto rozdělení se však u dat získaných měření nepodařilo dosáhnout. Pro ověření možnosti využití konvoluční sítě tedy bylo přistoupeno k použití uměle vygenerovaných dat.

K tomuto účelu byl vytvořen skript *genData.m*, který při spuštění vygeneruje požadovaný počet průběhů a uloží je do datového souboru. Celkem jsou vytvářeny tři typy průběhů pro klasifikaci. První skupinou jsou exponenciální impulzy s pomalým náběhem, druhou skupinou jsou exponenciální impulzy s rychlým náběhem a třetí jsou impulzy s ostrou hranou. Všechny průběhy mají náhodnou amplitudu a je jim přidána náhodná stejnosměrná složka. Posledním krokem před uložením je přidání

¹Convolutional Neural Networks (konvoluční neuronové sítě)

šumu, aby se podobala datům skutečným. Ukázka průběhů každé z generovaných tříd je na obrázku 6.1.

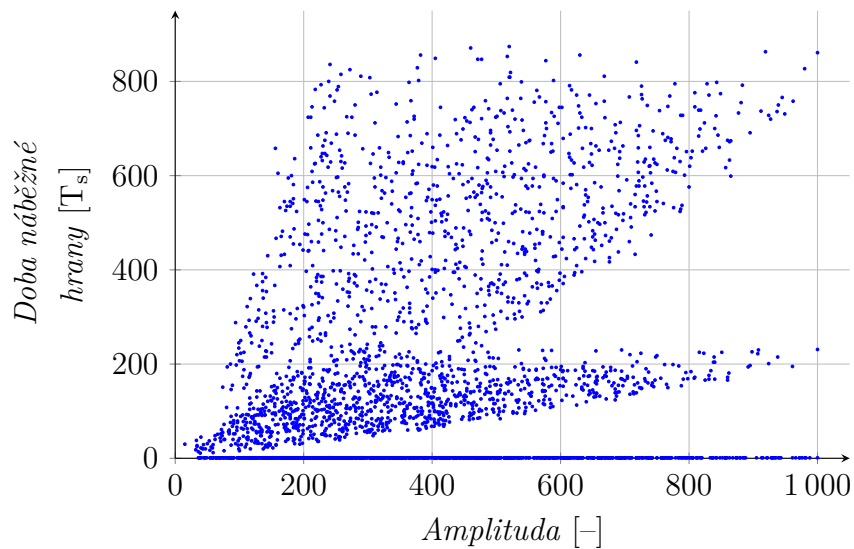


Obr. 6.1: Časové průběhy vygenerovaných signálů

Pro následné použití byly pomocí skriptu vygenerovány tři různé soubory dat:

- trénovací,
- validační,
- testovací,

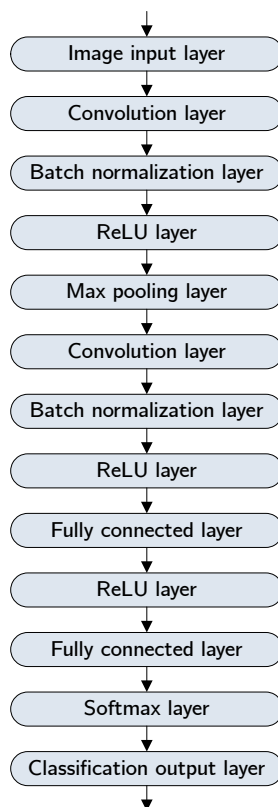
kdy každý z nich obsahuje celkově 3 000 průběhů. K vizualizaci celého datového souboru je využit korelační diagram. Jeho ukázka pro trénovací soubor dat je uvedena na obrázku 6.2.



Obr. 6.2: Korelační diagram vygenerovaných signálů

6.3 Vytvoření neuronové sítě

Pro klasifikaci byl v MATLABu navržen model neuronové sítě pomocí nástroje *Deep Network Designer*. Diagram sítě je uveden na obrázku 6.3. Jejím vstupem je vektor o délce 2000 vzorků a výstupem pak trojice číselných hodnot, které udávají odhad příslušnosti k dané třídě.



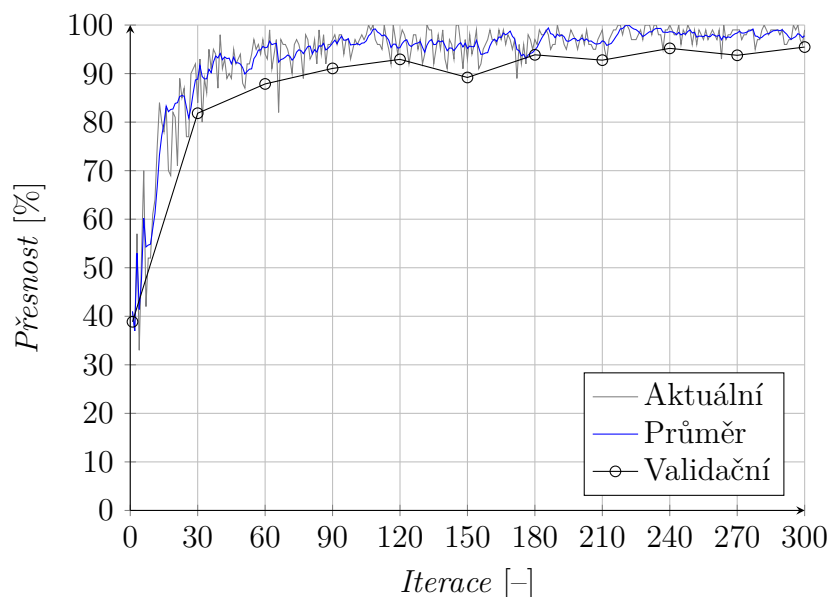
Obr. 6.3: Diagram navržené neuronové sítě

Z návrhového nástroje byl poté vyexportován zdrojový kód pro definici sítě. Ten byl uložen do souboru *classify.m* a doplněn o načtení vygenerovaných trénovacích a validačních dat. Ty jsou dále náhodně zamíchány a normalizovány. Nakonec je síť trénována a uložena do souboru.

Po spuštění učení je vždy MATLABem otevřeno okno s informacemi o průběhu učení, kde je možné sledovat například aktuální přesnost predikce. Trénování probíhalo po dávkách o velikosti 100 sekvencí ve 300 iteracích během 10 epoch. Výsledná udaná validační přesnost činila 95,47 %, jak lze vidět na obrázku 6.4. Učení trvalo 12 minut a 48 sekund na počítači vybaveném procesorem Intel Core i5 4590 s 16 GB operační pamětí a SSD². Ačkoliv byl počítač vybaven také grafickou kartou NVIDIA

²Solid-State Drive (plně elektronický pevný disk)

GeForce GTX 650 Ti BOOST, nebylo ji možné k výpočtům využít kvůli absenci její podpory v MATLABu.



Obr. 6.4: Přesnost učení neuronové sítě

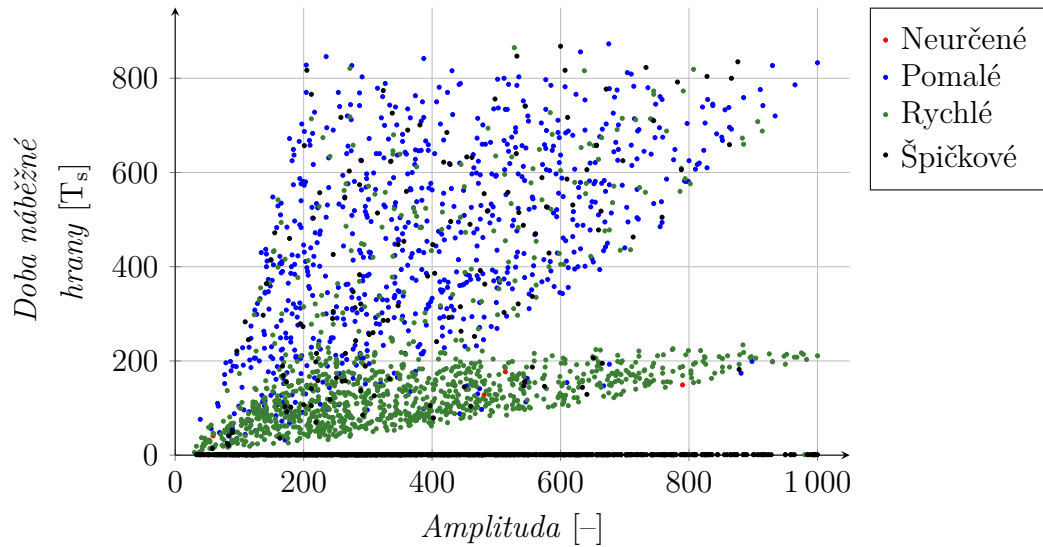
6.4 Testování neuronové sítě

Třetí vytvořený skript *classifyPredict.m* načítá poslední soubor vygenerovaných dat, kterým je otestována naučená neuronová síť. Data jsou před samotnou predikcí opět normalizována. Výsledné predikce dosáhly, dle očekávání, nižší přesnosti, než tomu bylo během učení u validačních dat, tj. 88 %. Podrobnější informace o chybovosti lze vyčíst z chybové matice (tabulka 6.1).

		Klasifikovaná třída			
		Neurčené	Pomalé	Rychlé	Špičkové
Skutečná třída	Pomalé	1	720	177	102
	Rychlé	3	32	928	37
	Špičkové	0	5	3	992

Tab. 6.1: Chybová matice naučené neuronové sítě pro soubor testovacích dat

Graficky byl výsledek opět reprezentován jako korelační diagram, který je uveden na obrázku 6.5. Barevně jsou zde rozlišeny jednotlivé klasifikační třídy. Stejně jako z chybové matice, i zde je patrná nižší úspěšnost predikce pomalých impulzů. Nečlých 18 % z nich bylo určeno jako rychlý impulz. Toto chování je přisuzováno prvotní nedokonalosti generování dat. Impulzy, které mají amplitudu nižší než 400 a zároveň dobu náběžné hrany menší než 200, totiž mohou spadat do obou tříd. Při generování dat totiž nebyl vytvořen žádný charakteristický znak, který by je odlišoval. Toto zavedlo do učení chybu.



Obr. 6.5: Korelační diagram klasifikovaných signálů

Závěr

Primárním cílem této práce bylo vylepšení již existující měřicí aparatury určené pro proporcionální detektory, která vznikla jako součást jiné diplomové práce. Jednalo se především o zlepšení uživatelského komfortu při jejím používání, ale také zvýšení maximální možné četnosti záznamu dat a citlivosti měření.

Průzkum původního stavu aparatury ukázal, že po hardwarové stránce byla poskytnutá měřicí jednotka funkční a bylo využito kvalitních a vhodně zvolených komponent. Po stránce konstrukčního provedení však lze říci, že nebylo zcela vynikající. Především realizace propojení jednotlivých komponent byla provedena neefektivně a neesteticky. Veškeré vnitřní vodiče proto byly nahrazeny lépe odpovídajícími kabely včetně patřičných konektorů a zakončení. Pro zlepšení odvodu tepla z útrob nevětrané jednotky proběhla změna uchycení desky s procesorem. V poslední řadě je nově uživatel informován o stavu zařízení pomocí displeje namísto indikačních diod.

Původní software pro měřicí jednotku však nebylo možné použít. Významná část této práce se tedy věnovala zcela nové implementaci celého programového vybavení. Prvotní pokus zahrnoval úpravy již existujícího návrhu konfigurace FPGA od výrobce desky Red Pitaya. Od toho však bylo upuštěno pro nadměrnou složitost. Nová implementace využívá relativně jednoduchého modulárního řešení, které je v případě nutnosti možné snadno upravit, či doplnit o nové funkce. Použití operačního systému od výrobce se však ukázalo jako rychlé řešení oproti jiným možnostem. Systém vyžadoval pouze drobná přizpůsobení, jinak byl zcela připraven pro vývoj firmwaru. K ovládání měřicí jednotky byly vytvořeny multiplatformní aplikace, které umožňují použití s počítačem vybaveným libovolným operačním systémem. Tím je potlačen problém s nekompatibilitou nativních aplikací pro Windows, Linux, či Mac OS. Aplikace poskytují uživateli interaktivní rozhraní, díky kterému je měření snadné. Zaznamenaná data jsou ukládána ve formátu, který vyvažuje jednoduchost jejich následného zpracování, ale také minimalizaci paměťových nároků.

Novou implementaci programového řešení nebylo možné srovnat s předchozím stavem, bylo však ověřeno, že měřicí jednotka přesahuje svou maximální četností akvizic nároky na použití s proporcionálními detektory, což se potvrdilo provedením skutečného měření neutronového zářiče. Toto měření také poskytlo soubor dat, který byl analyzován klasickou metodou. Na základě výsledků byla ověřena funkčnost předzesilovačů speciálně určených pro použití s proporcionálními detektory.

Prozatím získaná data se však ukázala jako nedostatečná pro jejich zpracování strojovým učením s učitelem. Proto bylo alespoň pro ověření proveditelnosti přistoupeno k vygenerování souborů umělých dat, na kterých byla otestována konvoluční neuronová síť, která i přes vadu v trénovacích datech vykazuje slibné, nikoliv však

vynikající, výsledky.

Do budoucna bude měřicí jednotka sloužit k dalšímu sběru dat pro studium metod zpracování signálu z proporcionálních detektorů, jejichž využití je v současné době jen velmi omezené. Důvodem je právě absence vhodných algoritmů pro jejich vyhodnocování.

Literatura

- [1] ULLMANN, Vojtěch. Jaderná a radiační fyzika: Ionizující záření. *Astro Nukl Fyzika: Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie* [online]. Klinika nukleární medicíny FN Ostrava-Poruba [cit. 2021-09-16]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika6.htm>
- [2] ULLMANN, Vojtěch. Jaderná a radiační fyzika: Radioaktivita. *Astro Nukl Fyzika: Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie* [online]. Klinika nukleární medicíny FN Ostrava-Poruba [cit. 2021-09-17]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [3] NEARY, G. J. The β -ray spectrum of radium E. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1940, **175**(960), 71-87 [cit. 2021-12-20]. ISSN 0080-4630. Dostupné z: [doi:10.1098/rspa.1940.0044](https://doi.org/10.1098/rspa.1940.0044)
- [4] ULLMANN, Vojtěch. Detekce a spektrometrie ionizujícího záření. *Astro Nukl Fyzika: Jaderná fyzika - Astrofyzika - Kosmologie - Filosofie* [online]. Klinika nukleární medicíny FN Ostrava-Poruba [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <https://astronuklfyzika.cz/DetekceSpektrometrie.htm>
- [5] KNOLL, Glenn F. *Radiation Detection and Measurement*. třetí edice. Michigan: John Wiley & Sons, 2000. ISBN 0-471-07338-5.
- [6] LANGFORD, T.J., C.D. BASS, E.J. BEISE, H. BREUER, D.K. ERWIN, C.R. HEIMBACH a J.S. NICO. Event identification in ^3He proportional counters using risetime discrimination. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [online]. 2013, **717**, 51-57 [cit. 2021-12-29]. ISSN 01689002. Dostupné z: [doi:10.1016/j.nima.2013.03.062](https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.03.062)
- [7] HEEGER, K.M., S.R. ELLIOTT, R.G.H. ROBERTSON, M.W.E. SMITH, T.D. STEIGER a J.F. WILKERSON. High-voltage microdischarge in ultra-low background ^3He proportional counters. *IEEE Transactions on Nuclear Science* [online]. 2000, **47**(6), 1829-1833 [cit. 2021-12-29]. ISSN 0018-9499. Dostupné z: [doi:10.1109/23.914454](https://doi.org/10.1109/23.914454)
- [8] IHNÁT, Kryštof: *FPGA-based Pulse Classification*. Brno 2019/2020, 87 p. Master Thesis. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, Department of Radio Electronics. Advised by Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

- [9] RedPitaya.com. *STEMlab 125-14* [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://redpitaya.com/stemlab-125-14/>
- [10] RedPitaya.ReadTheDocs.io *Analog inputs — Red Pitaya 0.97 documentation* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/hardware/125-14/fastIO.html>
- [11] MURATA MFG.CO.,LTD. *BNX02: Reference Specification* [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/281/ENFH0008-1140788.pdf>
- [12] LND, Inc. *Proton recoil detector: Drawing no. 270132* [technická dokumentace]. Drawn: 4/26/2018 [cit. 2022-01-01]. Elektronická komunikace.
- [13] Die.net. *Linux man pages* [online]. [cit. 2022-01-01]. Dostupné z: <https://linux.die.net/man/>
- [14] RedPitaya.com. *STEMlab 125-xx OS v1.04-7 stable* [software]. 25. března 2021 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://downloads.redpitaya.com/downloads/STEMlab-125-1x/old/>
- [15] JELÍNEK, Martin. *Analýza neutronového pole laboratorního AmBe zdroje s využitím měřicího stendu*. Brno, 2017, 93 p. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [16] National Nuclear Data Center. *Chart of Nuclides - ^{241}Am* [online]. [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20170218034802/http://www.nndc.bnl.gov/>
- [17] GOODFELLOW, Ian, Yoshua BENGIO a Aaron COURVILLE. *Deep learning*. Cambridge, MA: MIT press, [2016]. Adaptive computation and machine learning series. ISBN 978-0262035613. Dostupné také z: <https://www.deeplearningbook.org/>

Seznam symbolů a zkratek

H	vodík
He	helium
Am	americium
Np	neptunium
e^-	elektron
e^+	pozitron
ν_e	neutrino
$\bar{\nu}_e$	antineutrino
ADC	Analog to Digital Converter (analogově digitální převodník)
AXI	Advanced eXtensible Interface (typ komunikační sběrnice)
BRAM	Block Random Access Memory (bloková paměť s náhodným přístupem)
BUFG	Global Buffer (prostředek FPGA k rozvodu hodinového signálu)
CLI	Command Line Interface (příkazový řádek)
CNN	Convolutional Neural Networks (konvoluční neuronové sítě)
CPU	Central Processing Unit (centrální procesorová jednotka)
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol (protokol pro automatické nastavení síťové adresy)
DNS	Domain Name System (systém doménových jmen)
EMI	Electromagnetic interference (elektromagnetická interference)
FF	Flip-Flop (klopný obvod)
FIFO	First In, First Out (první dovnitř, první ven)
FPGA	Field Programmable Gate Array (programovatelné hradlové pole)
GPIO	General Purpose Input Output (univerzální vstupně-výstupní rozhraní)
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
HDL	Hardware Description Language (programovací jazyk pro popis hardwaru)
IDE	Integrated Development Environment (integrované vývojové prostředí)
IO	Input-Output (vstupní/výstupní pin)
IP	Internet Protocol (protokol síťové vrstvy referenčního modelu)
IP	Intellectual Property core (modul vytvořený <i>třetí osobou</i>)
LAN	Local Area Network (lokální počítačová síť)

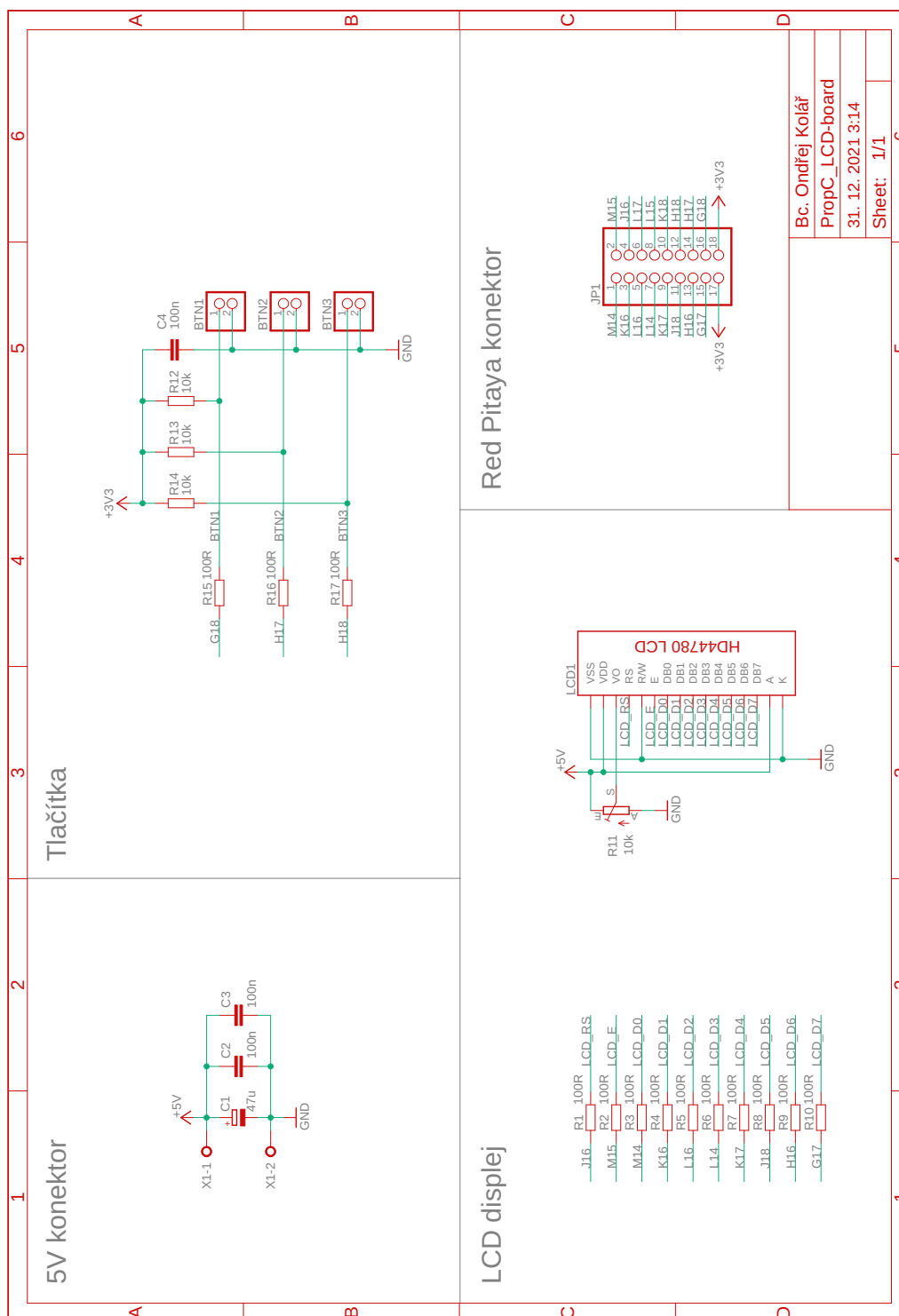
LCD	Liquid Crystal Display (displej z tekutých krystalů)
LED	Light Emitting Diode (světlo vyzařující dioda)
LUT	Look-Up Table (prostředek v FPGA pro realizaci kombinační logiky)
LUTRAM	Look-Up Table Random Access Memory (distribuovaná paměť FPGA)
mDNS	Multicast DNS (protokol pro překlad hostitelských názvů na lokální síti)
MTU	Maximum Transmission Unit (maximální velikost datové jednotky)
OS	Operating System (operační systém)
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PL	Programmable Logic (programovatelná logika čipu Zynq)
PS	Processing System (procesorový systém čipu Zynq)
RAM	Random Access Memory (paměť s náhodným přístupem)
RTL	Register-transfer level (abstraktní model digitálních obvodů)
SHV	Safe High Voltage connector (bezpečný vysokonapěťový konektor)
SoC	System on Chip (systém na čipu)
SSD	Solid-State Drive (plně elektronický pevný disk)
SSH	Secure SHell (zabezpečený terminálový protokol)
UDP	User Datagram Protocol (nespojovaný protokol transportní vrstvy počítačových sítí)
VHDL	VHSIC Hardware Description Language (jeden z nejpoužívanějších HDL jazyků)

Seznam příloh

A	Deska plošných spojů - displej	63
A.1	Schéma zapojení	63
A.2	Návrh desky	64
A.3	Soupiska součástek	65
B	Deska plošných spojů - filtr	66
B.1	Schéma zapojení	66
B.2	Návrh desky	67
B.3	Soupiska součástek	67
C	Výkres chladiče	68
D	Stavový diagram automatu zápisu do blokové paměti	69
E	Výpis elektronických příloh	70

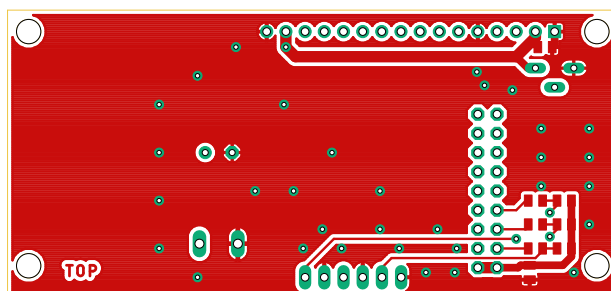
A Deska plošných spojů - displej

A.1 Schéma zapojení

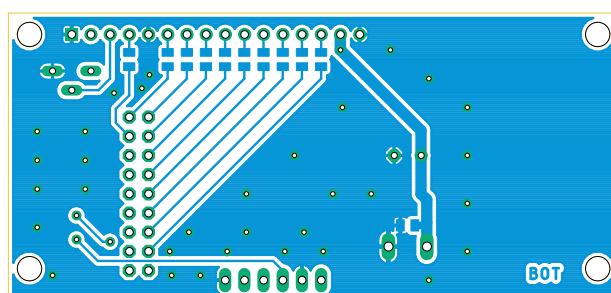


A.2 návrh desky (měřítko 1:1)

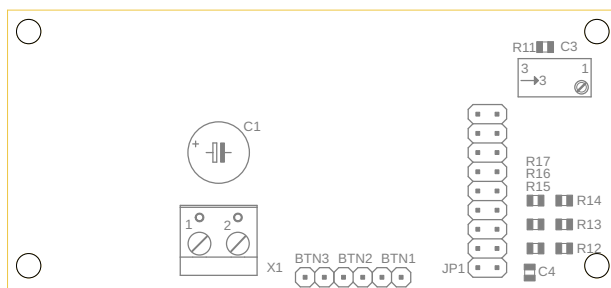
Vrstva TOP



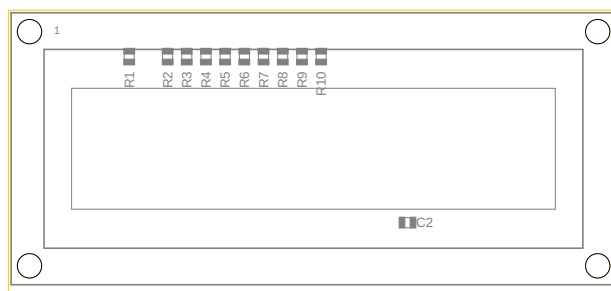
Vrstva BOTTOM



Osazovací plán TOP



Osazovací plán BOTTOM

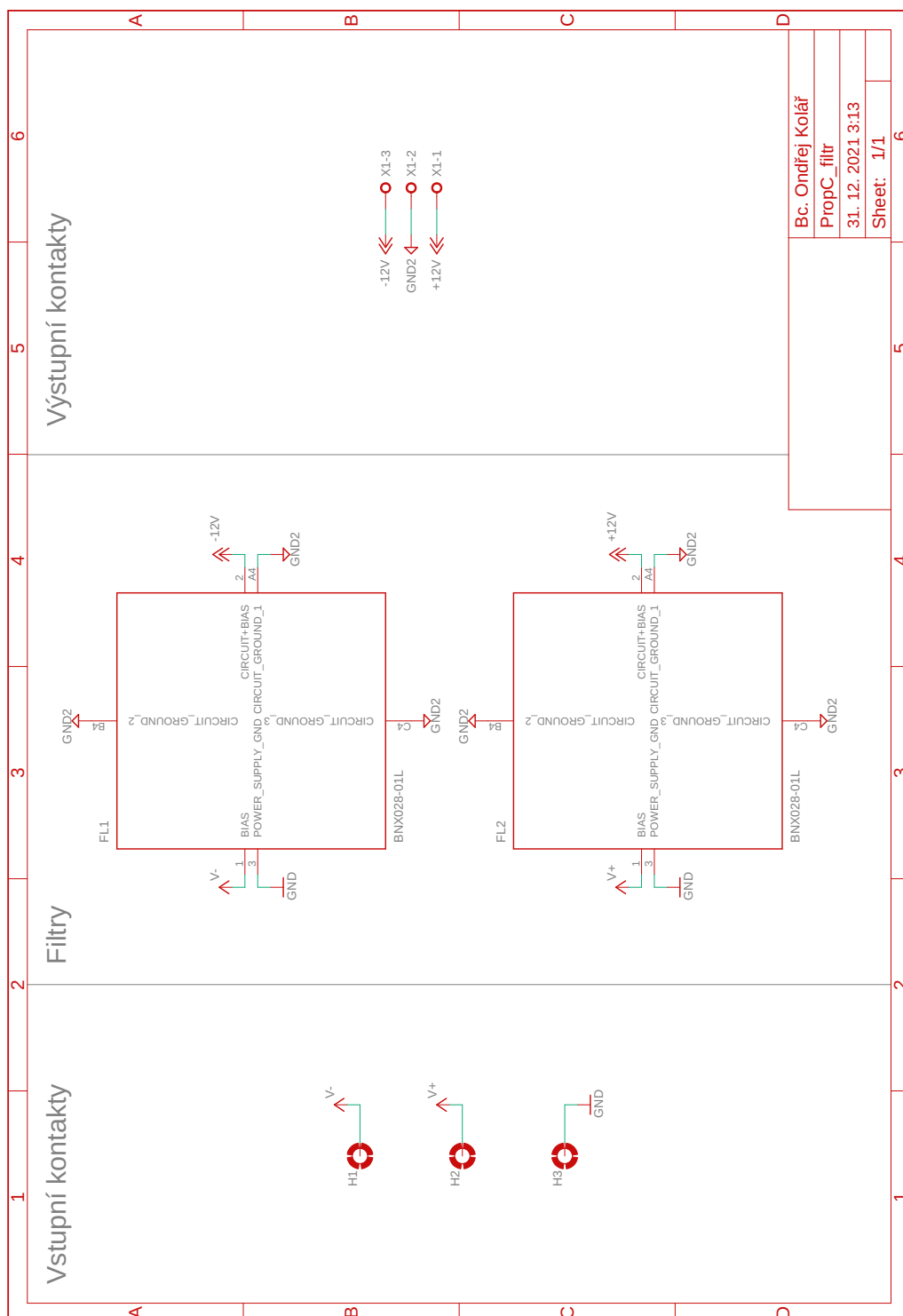


A.3 Soupiska součástek

Poč.	Označení	Součástka	Hodnota/Pozn.	Výrobce	Pouzdro
13	R1-R10, R15, R16, R17	Rezistor SMD	100R	—	0805
3	R12, R13, R14	Rezistor SMD	10k	—	0805
3	C2, C3, C4	Kondenzátor SMD	100n	—	0805
3	BTN1, BTN2, BTN3	Kolíková lišta	1×02	—	2,54 mm
1	JP1	Kolíková lišta	2×09	—	2,54 mm
1	X1	TB-5.08-P-2P/BL	svorkovnice 2P	NINIGI	5,08 mm
1	R11	T67W-10K	10k	SR PASSIVES	—
1	C1	Elyt. kondenz.	47uF	—	—
1	LCD1	DEM 16216 SYH-LY	—	DISPLAY ELEKTRONIK	—

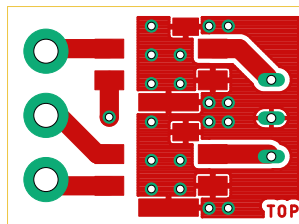
B Deska plošných spojů - filtr

B.1 Schéma zapojení

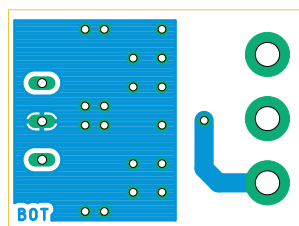


B.2 návrh desky (měřítko 1:1)

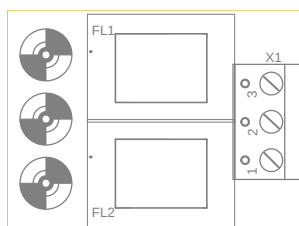
Vrstva TOP



Vrstva BOTTOM



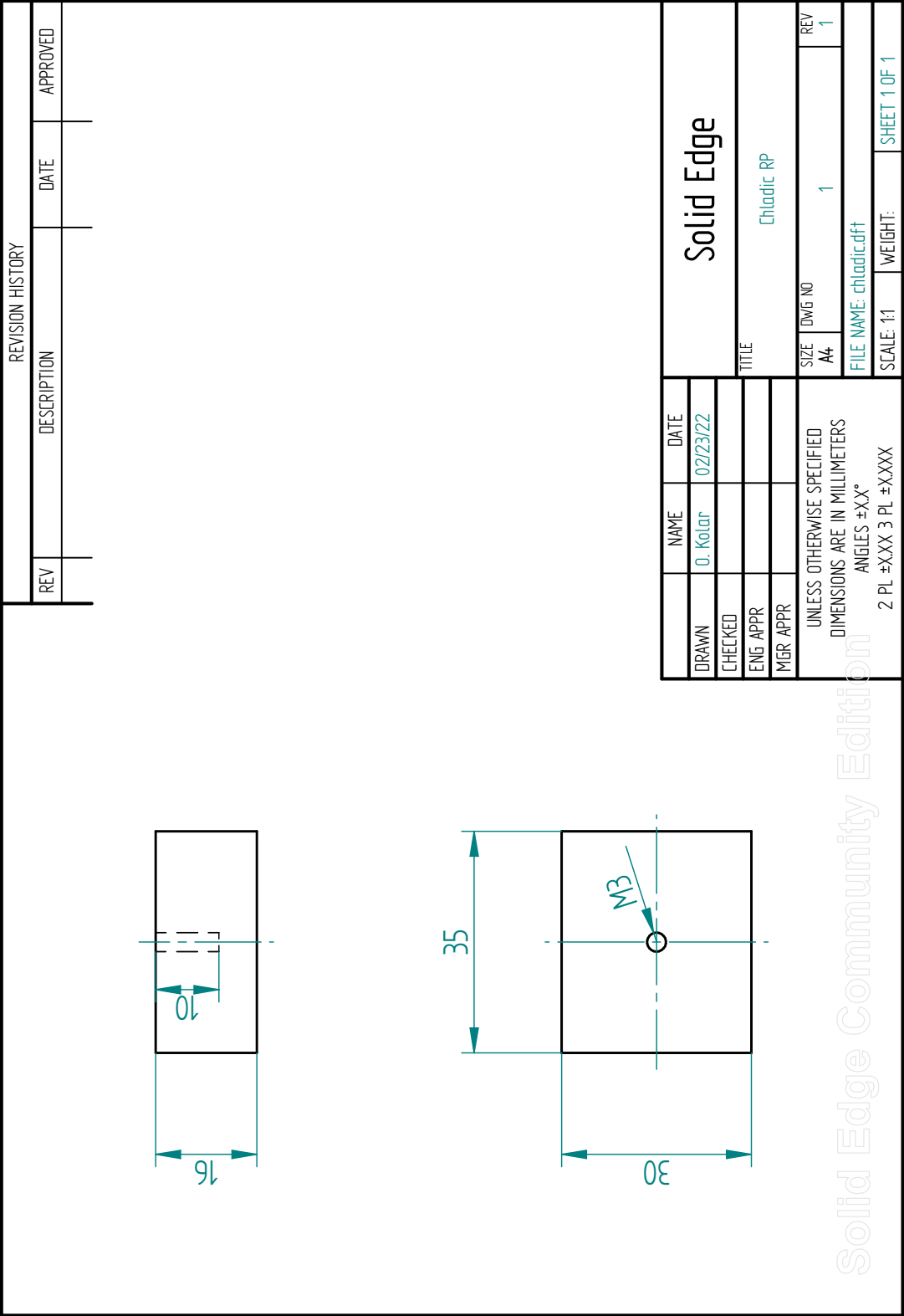
Osazovací plán



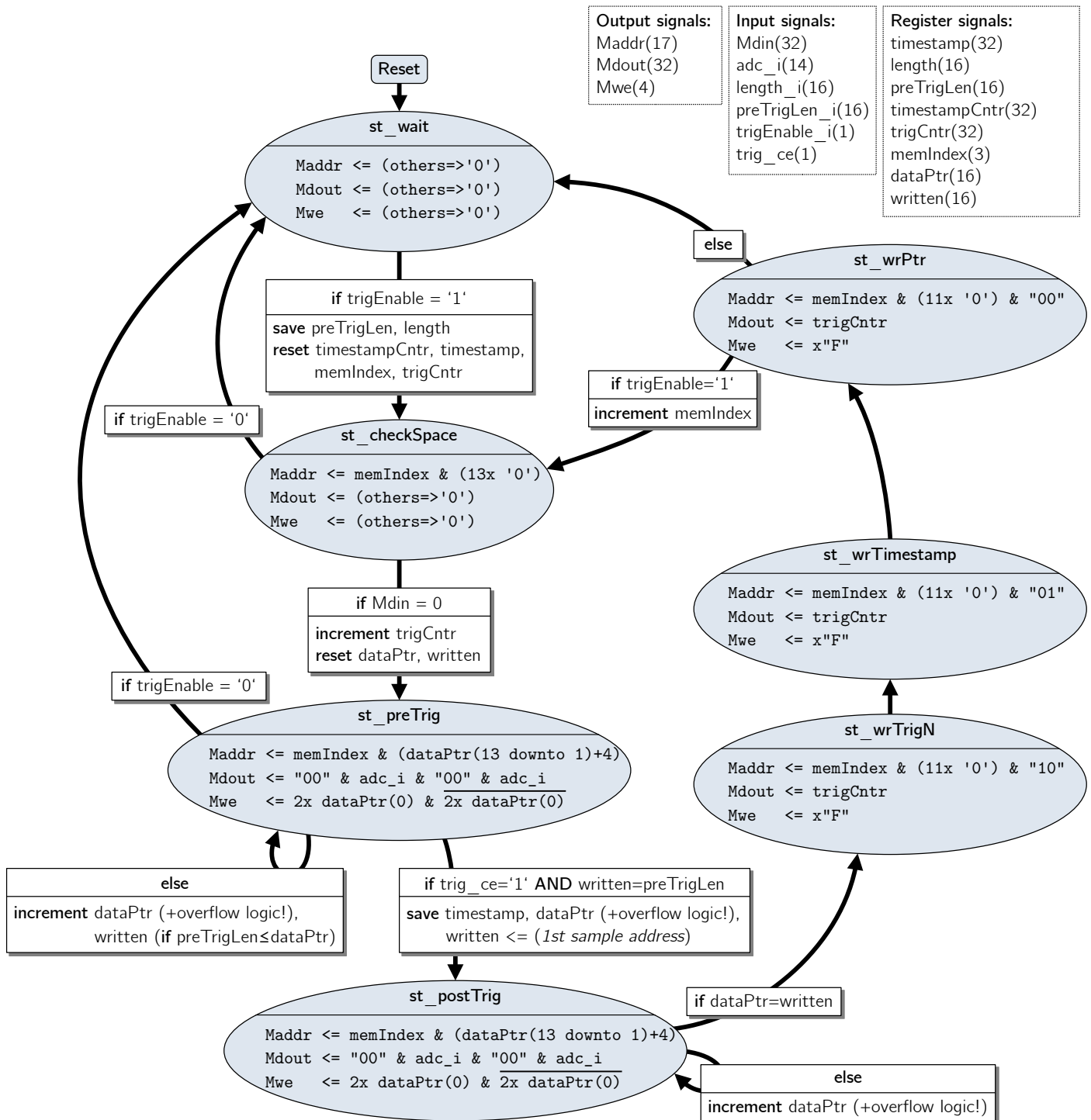
B.3 Soupiska součástek

Poč.	Označení	Součástka	Hodnota/Pozn.	Výrobce	Pouzdro
2	FL1, FL2	BNX028-01L	EMI filtr	Murata	BNX024H01K
1	X1	TB-5.08-P-3P/BL	svorkovnice 3P	NINIGI	5,08 mm

C Výkres chladiče



D Stavový diagram automatu zápisu do blokové paměti



E Výpis elektronických příloh

```
\ ..... prilohy.zip
└─ EAGLE_9-6-2\..... Projekty desek plošných spojů
   └─ displej\..... Deska pro připojení displeje
   └─ filtr\..... Deska s filtrem napájení předzesilovače
└─ Linux\..... Programy pro Linux v jazyce C
   └─ rootfs\..... Sestavené soubory pro vložení do STEMLab OS
   └─ zdrojove_kody\..... Zdrojové soubory vytvořených programů
└─ Matlab_R2021a\..... Vytvořené skripty pro MATLAB
   └─ dataPlotting\..... Vykreslení naměřených dat
   └─ machineLearning\..... Skripty strojového učení
└─ NetBeans_12-5\..... Aplikace pro PC
   └─ lib\..... Knihovny nutné pro běh aplikací
   └─ ProportionalCounterBrowser.jar ..... Sestavená aplikace prohlížeče
   └─ ProportionalCounterBrowser.zip ..... Archivovaný projekt NetBeans
   └─ ProportionalCounterV2-1.jar ..... Sestavená obslužná aplikace
   └─ ProportionalCounterV2-1.zip ..... Archivovaný projekt NetBeans
└─ SolidEdge_2021\..... Výkres chladiče
└─ UkazkovaData\..... Ukázková data pro vyzkoušení programů
└─ Vivado2021-2\..... Archivovaný projekt HDL konfigurace FPGA
```