



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 ČETNOSTI AMPLITUD PULZŮ

SYSTEM FOR MEASURING THE FREQUENCY OF PULSE AMPLITUDES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Karlíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

BRNO 2025

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Marek Karlíček

ID: 246863

Ročník: 3

Akademický rok: 2024/25

NÁZEV TÉMATU:

System pro měření četnosti amplitud pulzů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte stávající projekty [1-3] a dostupné komerční řešení. Zvolte vhodný způsob měření a volbu zdůvodněte. Následně navrhnete vlastní zařízení, s důrazem na snímání krátkých pulzů. Zařízení musí být schopné komunikovat s počítačem po USB nebo pomocí síťového připojení. Výstupní data musí být jednoduše zpracovatelné pomocí běžných nástrojů jako je MATLAB/Octave.

Zařízení otestujte v praktické aplikaci a vyhodnoťte přesnost měření a zdroje chyb, porovnejte dosažené výsledky s komerční alternativou. Naprogramujte jednoduchý software pro obsluhu zařízení nebo přidejte hardwarové ovládací rozhraní. Práci publikujte na vhodné platformě, např. GitHub, LinkedIn, studentská konference, apod.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] VO HONG HAI. Development of an FPGA-Based Pulse-Height Analyzer for Scintillation Detectors in Gamma Energy Spectroscopy. Online. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2024. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/380984142_Development_of_an_FPGA-Based_Pulse-Height_Analyzer_for_Scintillation_Detectors_in_Gamma_Energy_Spectroscopy. [cit. 2024-06-27].
- [2] KOLÁŘ, Ondřej. System pro měření s proporcionálními detektory. Online, Diplomová práce, vedoucí Ing. Michal Kubiček, Ph.D. Brno: VUT v Brně, 2022. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/141540>. [cit. 2024-06-27].
- [3] DEMIN, Pavel. Multichannel Pulse Height Analyzer. Online. Dostupné z: <https://pavel-demin.github.io/red-pitaya-notes/mcpha/>. [cit. 2024-06-27].

Termín zadání: 10.2.2025

Termín odevzdání: 2.6.2025

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

Konzultant: Mgr. Michal Dudka

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Zařízení pro měření četnosti amplitud pulzů na jeho vstupu bylo navrženo, realizováno a otestováno. Projekt zahrnoval návrh a realizaci hardwarové části za použití moderních mikrokontrolérů a jednoduchý software pro obsluhu zařízení. Důraz byl kladen na uživatelskou přívětivost, jednoduchou replikovatelnost a nízkou cenu. Zařízení se skládá ze dvou částí, měřicí desky a desky pro interakci s uživatelem, přičemž měřicí deska je schopna fungovat samostatně.

KLÍČOVÁ SLOVA

STM32, gama spektroskopie, analyzátor výšek pulzů, mikrokontrolér, špičkový detektor, vícekanálový analyzátor

ABSTRACT

A device for measuring the frequency of pulse amplitudes at its input was designed, implemented, and tested. The project included the design and realization of the hardware part using modern microcontrollers, as well as simple software for device operation. Emphasis was placed on user-friendliness, ease of replication, and low cost. The device consists of two parts — a measurement board and a user interface board — with the measurement board being capable of operating independently.

KEYWORDS

STM32, gamma spectroscopy, pulse height analysis (PHA), microcontroller, peak detector, multichannel analyzer (MCA)

KARLÍČEK, Marek. *Systém pro měření četnosti amplitud pulzů*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2025. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Marek Karlíček
VUT ID autora: 246863
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2024/25
Téma závěrečné práce: Systém pro měření četnosti amplitud pulzů

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

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Za zadané téma a poskytnuté podklady k práci děkuji Katedře experimentální fyziky - Přírodovědecká fakulta UP, jmenovitě mému konzultantovi Mgr. Michalovi Dudkovi.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Úvod | 11 |
| 1 Problematika a současná řešení vícekanálových analyzátorů | 12 |
| 1.1 Reálné použití | 13 |
| 1.2 Současná řešení na trhu | 14 |
| 2 Měření výšky špiček | 16 |
| 2.1 Měření pomocí běžného laboratorního osciloskopu | 16 |
| 2.2 Samplování signálu | 16 |
| 2.3 Analogový špičkový detektor | 19 |
| 2.4 Měření s využitím řady komparátorů | 19 |
| 3 Návrh zařízení | 21 |
| 3.1 Specifikace požadavků | 21 |
| 3.2 Hlavní deska - měřicí část | 22 |
| 3.3 Testování metody komparátorovou bankou | 28 |
| 3.4 Uživatelská deska - obslužné rozhraní | 30 |
| 3.4.1 Webové rozhraní a REST API | 31 |
| 4 Charakterizace zařízení a dosažené parametry | 33 |
| 4.1 Limitace zvolenou koncepcí | 34 |
| 4.2 Offset komparátoru | 34 |
| 4.3 Propagační zpoždění | 35 |
| 4.4 Vliv na reálné měření | 36 |
| 4.5 Rezonance komparátorů | 37 |
| Závěr | 38 |
| Seznam symbolů a zkratk | 42 |
| Seznam příloh | 44 |
| A Osazovací výkres - hlavní deska | 45 |
| B Náhled rozložení spojů - hlavní deska | 46 |
| C Schémata zapojení - hlavní deska | 47 |
| D Schémata zapojení - uživatelská deska | 53 |

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| E | Obsah elektronické přílohy | 57 |
| F | Tabulka endpointů | 58 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Ukázkový signál měřený osciloskopem | 12 |
| 1.2 | Vzorová aparatura pro gama spektroskopii | 13 |
| 1.3 | Zjednodušené blokové schéma ORTEC | 14 |
| 2.1 | Blokové schéma kitu Red Pitaya STEMLab 125-14 [11] | 18 |
| 2.2 | Vzorkování vzorového signálu s frekvencí 125 MSPS | 18 |
| 2.3 | Vizualizace navržené metody | 20 |
| 2.4 | Blokové schéma okénkového komparátoru [13] | 20 |
| 3.1 | Blokové schéma zapojení měřicí desky | 22 |
| 3.2 | Ukázka konfigurace komparátorů | 23 |
| 3.3 | Ukázka konfigurace čítačů na výstupu komparátorů | 24 |
| 3.4 | Vývojový diagram funkce měřicí části zařízení | 25 |
| 3.5 | Obvodové schéma DA převodníku s bufferem reference | 27 |
| 3.6 | Obvodové schéma okénkového komparátoru | 27 |
| 3.7 | Fotodokumentace hlavní desky | 28 |
| 3.8 | Fotografie prototypu | 29 |
| 3.9 | Histogram měření s pomocí prototypu | 30 |
| 3.10 | Blokové schéma zapojení uživatelské desky | 31 |
| 3.11 | Náhled webové aplikace pro ovládání | 31 |
| 4.1 | Testovací aparatura pro charakterizaci PHA | 33 |
| 4.2 | Závislost pravděpodobnosti komparace na amplitudě pulzu | 34 |
| 4.3 | Závislost pravděpodobnosti komparace na amplitudě pulzu po kompenzaci offsetu | 35 |
| 4.4 | Závislost počtu zaznamenaných pulzů na frekvenci signálu pro referenční napětí 500 mV | 36 |
| 4.5 | Zaznamenané spektrum scintilačním detektorem | 36 |
| 4.6 | Vliv aktivace filtru na eliminaci oscilací na výstupu komparátoru (a) a bez filtru (b) s filterm | 37 |
| 4.7 | Fotografie zařízení | 38 |
| A.1 | Osazovací výkres - hlavní deska | 45 |
| B.1 | Rozložení spojů horní vrstva - hlavní deska | 46 |
| B.2 | Rozložení spojů dolní vrstva - hlavní deska | 46 |
| C.1 | Schéma zapojení - hlavní deska 1/6 | 47 |
| C.2 | Schéma zapojení - hlavní deska 2/6 | 48 |
| C.3 | Schéma zapojení - hlavní deska 3/6 | 49 |
| C.4 | Schéma zapojení - hlavní deska 4/6 | 50 |
| C.5 | Schéma zapojení - hlavní deska 5/6 | 51 |
| C.6 | Schéma zapojení - hlavní deska 6/6 | 52 |

| | | |
|-----|---|----|
| D.1 | Schéma zapojení - uživatelská deska 1/4 | 53 |
| D.2 | Schéma zapojení - uživatelská deska 2/4 | 54 |
| D.3 | Schéma zapojení - uživatelská deska 3/4 | 55 |
| D.4 | Schéma zapojení - uživatelská deska 4/4 | 56 |

Úvod

Měření špičkového napětí pulzů je klíčovou součástí řady experimentů v technických oborech. Nejširší uplatnění tyto přístroje, též nazývané jako pulse high analyzéry (PHA), nacházejí v oblasti fyziky částic, pro stanovení spektra ionizujícího záření. Cílem mojí bakalářské práce je navrhnout a realizovat jednoduchý a levný PHA, který bude schopen měřit amplitudy pulzů s krátkými dobami trvání (desítky nanosekund). Důraz bude kladen na jednoduchou replikovatelnost a nízkou výrobní cenu, stejně jako na uživatelskou přívětivost.

Finální podoba navrženého zařízení je určena především pro praktické využití ve výzkumných laboratořích Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. Díky své kompaktní konstrukci, nízké ceně a uživatelsky přívětivému rozhraní bude sloužit jako nástroj pro měření a analýzu amplitud pulzů v rámci fyzikálních experimentů. Laboratorní pracovníci jej mohou využít například při spektroskopických měřeních, studiu ionizujícího záření nebo při testování scintilačních detektorů, kde je potřeba přesně zaznamenávat četnost výskytu pulzů určité amplitudy. Zařízení tak přispěje k efektivnějšímu sběru dat a vyhodnocování experimentálních výsledků.

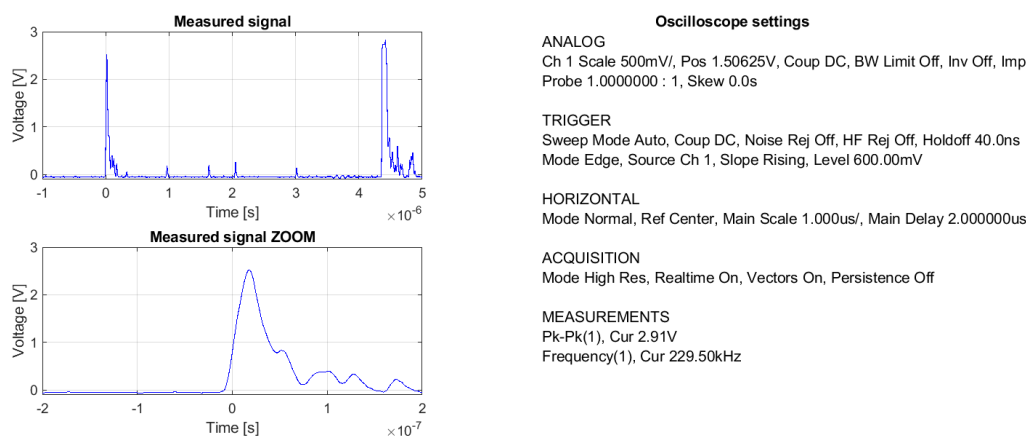
V práci je nejprve představena problematika a současná řešení vícekanálových analyzátorů (kapitola 1), přičemž jsou diskutována jak komerční, tak DIY zařízení. Následně je podrobně analyzováno několik možných způsobů měření amplitud pulzů (kapitola 2), z nichž je jako nejvhodnější vybrána metoda využívající banku komparátorů (kapitola 2.4). Tato metoda byla ověřena pomocí vývojových nástrojů (kapitola 3.3). Na základě zvoleného principu byl navržen a zkonstruován funkční prototyp analyzátoru výšky pulzů (kapitola 3.2), doplněný o uživatelské rozhraní a webovou aplikaci (kapitola 3.4). Následně bylo zařízení charakterizováno z hlediska parametrů, jako je offset, propagační zpoždění či rezonance komparátorů (kapitola 4), a otestováno na reálných fyzikálních experimentech (kapitola 4.4). V závěru práce (kapitola Závěr) byla vyhodnocena účinnost zvolené metody měření a navržena další možná vylepšení zařízení.

1 Problematika a současná řešení vícekanálových analyzátorů

Cílem práce je zkonstruovat zařízení pro měření četnosti amplitud při požadavku uživatelské přívětivosti a cenové dostupnosti zařízení. Na trhu se vyskytuje řada zařízení pro podobné účely, typicky se ovšem vyznačují vysokou cenou a jejich obsluha není příliš přívětivá pro uživatele. Uživatelskou přívětivostí je myšleno jednoduché ovládání pomocí zabudovaných ovládacích prvků nebo prostřednictvím rozhraní pro obsluhu z externích zařízení (počítač nebo mobilní telefon), a to nejlépe vzdáleně. Pro další návrh zařízení je klíčové znát vzorové průběhy, které se můžou dostat na jeho vstup a mají být vyhodnoceny. Tyto průběhy bylo možné změřit pomocí běžného osciloskopu.

Na základě teoretických poznatků a pozorování můžeme předpokládat, že čas příchodu signálu je zcela náhodný s výjimkou jevu, kdy dopadající foton interakcí s okolním prostředím emituje foton o nižší energetické hladině; popřípadě situaci, kdy na detektoru vznikají falešné detekce jako následek detekce reálného fotonu. Podstatou této práce není zabývat se podrobnostmi měření energií ionizujícího záření, proto toto téma nebude v práci dále rozebíráno.

Ze změřeného signálu na obrázku 1.1 si můžeme všimnout krátké délky trvání napětového impulsu. Jeho trvání lze odhadnout na méně než 50 ns. Napětová úroveň u žádného z pozorovaných signálů nepřesáhla 3,3 V. Samozřejmostí je možnost zaznamenání dostatečného počtu pulzů. U všech měřených průběhů bylo možné pozorovat drobný offset, ten je dobré mít možnost změřit.



Obr. 1.1: Ukázkový signál měřený osciloskopem

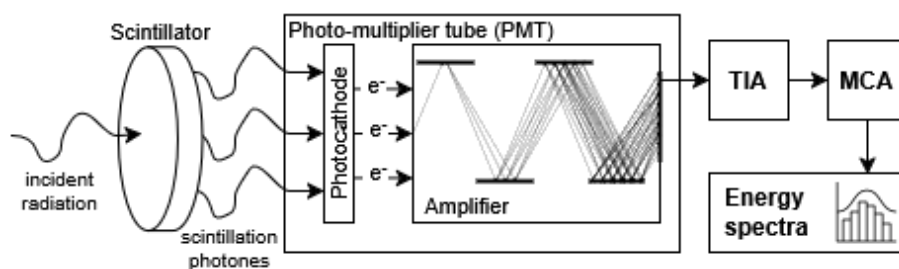
1.1 Reálné použití

Analýza amplitud pulzů je typicky využívána v gamma spektroskopii. Jedná se o ne-destruktivní analytickou metodu, která zkoumá energii radionuklidů v pozorovaném vzorku, kde se každý radionuklid vyznačuje jedinečnou energií vyzařovaných částic a rozdílným poločasem rozpadu. Její podstatou je snímání energie dopadajících fotonů na detektor (viz obrázek 1.2). Pro snímání dopadajícího záření se typicky využívá tzv. scintilační detektor. Ten se skládá ze scintilačního materiálu, který se vyznačuje charakteristickou vlastností vyzařovat fotony o viditelné (popř. UV) vlnové délce jako následek absorpce ionizujícího záření. Mezi běžně používané materiály patří thaliem dopovaný jodid sodný NaI(Tl) a bromid lanthanitý dopovaný cerem LaBr₃(Ce) [1]. Výběr scintilátoru ovlivňuje účinnost a rozlišení detektoru.

Vyzařované světlo obsahující velmi málo fotonů je nutné převést na elektrický signál. K tomuto účelu se běžně používá fotonásobič (PMT), případně křemíkové fotonásobiče (SiPMs) [2]. Nevýhodou SiPMs je velmi malá citlivá plocha ve srovnání s PMT. PMT vyžaduje stabilní vysokonapěťové napájení, obvykle v rozmezí 800 V až 2000 V [3], aby mohl efektivně fungovat. Toto napětí je nezbytné pro udržení potenciálového rozdílu mezi dynodami pro správné násobení elektronů. Díky nízkému odběru proudu lze použít kompaktní integrovaná řešení [4].

Elektrické signály z kolektorových elektrod PMT jsou zpracovány za účelem získání relevantních informací, jako je výška pulzu, která koreluje s energií detekovaných gama paprsků. Toto zpracování může zahrnovat zesílení, diskriminaci apod.

Přesnou analýzou rozložení amplitud napěťových pulzů lze určit spektrální složení radionuklidů v testovaném objektu.

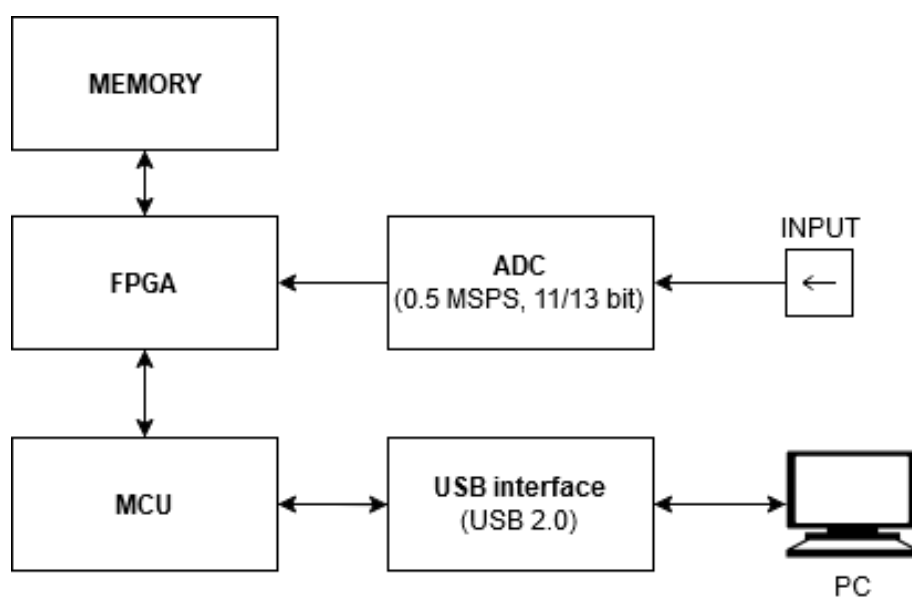


Obr. 1.2: Vzorová aparatura pro gama spektroskopii

1.2 Současná řešení na trhu

Navrhovaný přístroj není nic unikátního a na trhu najdeme širokou škálu zařízení, která jsou určena pro podobné účely. Typicky se vyznačují vysokou pořizovací cenou, závislostí na počítači a omezenou flexibilitou. Cílem této práce je se od dostupných produktů odlišit v detailech, které zpříjemní uživatelský zážitek, zvýší přenositelnost a umožní připojení detektoru s pulzy o délce v řádu desítek nanosekund.

V současné době se v laboratoři, pro kterou je zařízení cíleno, využívají pouze vlastní zařízení s jedním komparátorovým oknem [5] a EASY-MCA od společnosti ORTEC. EASY-MCA je zařízení fungující na principu samplování signálu (viz obrázek 1.3), které nabízí vysokou přesnost, ale jeho nevýhodou je závislost na proprietárním softwaru a externím napájení.



Obr. 1.3: Zjednodušené blokové schéma ORTEC

Toto zařízení je možné ovládat pomocí USB 2.0, vyžaduje externí napájení a jeho ovládání je možné pouze přes proprietární aplikaci výrobce. Jeho snímkovací frekvence je navíc ve srovnání s požadavky na rychlé zpracování signálů velice nízká, což omezuje jeho využití v aplikacích se specificky rychlými detektory.

Keysight nabízí rozšíření pro měření amplitud pulzů do jejich signálových analyzátorů (N9067EM0E Pulse Analysis Measurement Application [6]). Tato řešení poskytují vysokou přesnost a široké možnosti analýzy, avšak jejich pořizovací cena a licence se pohybují okolo milionu korun českých, což je pro mnoho laboratoří finančně nedostupné.

Na internetu je možné najít také různá open-source a DIY řešení problému. Příkladem může být využití univerzálního zařízení Red Pitaya [7], [8] se softwarem pro

příslušnou úlohu nebo snímání pomocí zvukové karty v počítači [9], [10]. Tato řešení jsou cenově dostupná a snadno přizpůsobitelná, ale trpí nízkou přesností a omezenou snímkovací frekvencí, což je nevýhodné pro aplikace vyžadující vysokou rychlost a přesnost.

Navrhované zařízení se snaží spojit výhody komerčních a DIY řešení. Nabídne kompaktní design, jednoduché ovládání, možnost připojení přes moderní rozhraní (např. Wi-Fi nebo Bluetooth) a schopnost zpracovávat pulzy s délkou v řádu desítek nanosekund. Důraz je kladen na uživatelskou přívětivost, nízkou pořizovací cenu a nezávislost na proprietárním softwaru.

2 Měření výšky špiček

Měření špičkového napětí se na první pohled může zdát jako jednoduchý úkol, i přesto lze najít několik velmi odlišných způsobů, jak to lze provádět. V následující kapitole bude nastíněno několik možných řešení a následně budou zhodnoceny jejich výhody a nevýhody.

2.1 Měření pomocí běžného laboratorního osciloskopu

První myšlenka každého elektronika je využít k tomuto úkolu osciloskop, podobně jako při měření ukázkového signálu. Osciloskop je zařízení, které je relativně levné a dosahuje výborných výsledků z pohledu vertikálního i horizontálního rozlišení. Typicky nabízí výbornou konektivitu a vlastní ho prakticky každá laboratoř.

Osciloskop je možné nastavit tak, že při příchodu pulzu (většího než nastavená úroveň) zastaví měření a vyhodnotí jeho výšku. Tu následně do histogramu zpracuje interně (modernější zařízení nebo vyšší řady), popř. měřená data pošle do počítače k dalšímu zpracování. Problémem tohoto řešení je mrtvá doba, což je čas, během kterého osciloskop vyhodnocuje změřená data, a tedy neprovádí další měření. Praktická část práce cílí mimo jiné na to, aby výsledné zařízení bylo uživatelsky přívětivější než použití hotových produktů s vlastním softwarem.

2.2 Samplování signálu

Nejvíce flexibilním způsobem pro měření charakteristických vlastností pulzů je digitální samplování, které mimo jiné umožňuje také měření jejich výšky. Analogový časově spojitý signál tedy diskretizujeme a kvantujeme pomocí dostatečně rychlého analogově-digitálního převodníku (ADC). Jeho snímkovací frekvence musí být dostatečná pro co nejlepší přiblížení se špičce pulzu a počet kvantovacích hladin musí být dostatečný pro snímání malých rozdílů.

ADC vzorkuje diskrétně s periodou T_s , takže vzorek nikdy přesně nezasáhne čas maxima. Nejbližší vzorek může být vzdálen maximálně o $\delta t = \frac{T_s}{2}$. Pomocí kvadratické aproximace sinu kolem maxima lze odhadnout maximální odchylku změřené hodnoty od skutečného maxima:

$$\Delta_{\max} \approx a \cdot \frac{\pi^2 T_s^2}{8T^2}$$

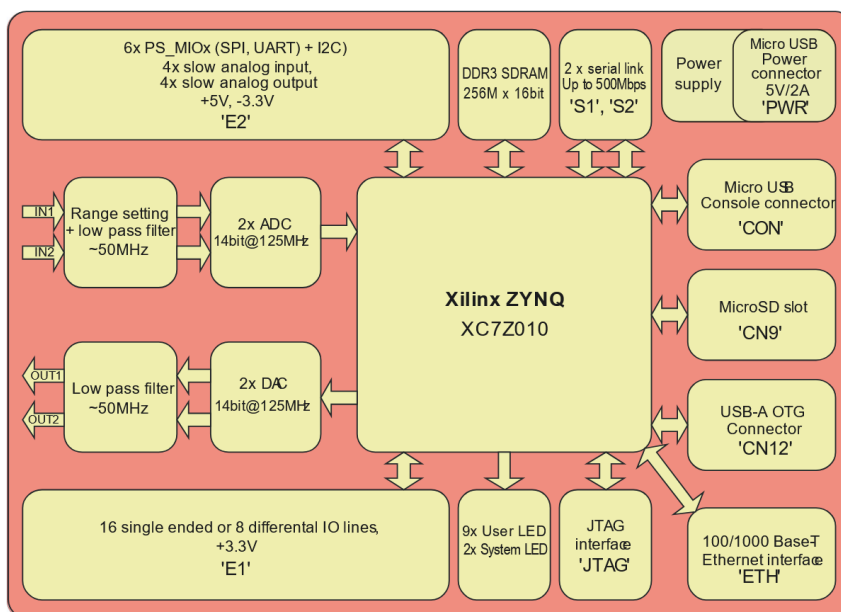
- a – amplituda sinového pulzu (maximální hodnota signálu)
- T – doba trvání jednoho pulzu (šířka pulzu)
- T_s – vzorkovací perioda ADC (čas mezi dvěma vzorky)
- Δ_{\max} – maximální chyba (odchylka vzorku od skutečného maxima)

Výstupem z ADC je tedy datový proud, který musí být zařízení schopné zpracovat, a to ideálně v reálném čase.

Na vzorových datech si lze povšimnout, že špička sledovaného pulzu má pouze několik jednotek nanosekund. Dostatečnou vzorkovací frekvencí se tedy rozumí stovky milionů vzorků za vteřinu (MSPS). I přes nízké potřebné rozlišení, kdy 8-bitů (256 kvantovacích hladin) je dostatečné, se jedná o datový tok ve stovkách MB/s. Ani nejvýkonnější běžně dostupné mikrokontroléry nedosahují 1 GHz taktovací frekvence jádra, nemají tedy šanci takto objemná data v reálném čase zpracovávat. Možným řešením je využití obvodů programovatelné logiky FPGA, které umožňují vytvoření vlastního komplexního digitálního obvodu. Tento obvod je schopný data zpracovávat paralelně a díky tomu dosáhnout dostatečné pracovní rychlosti.

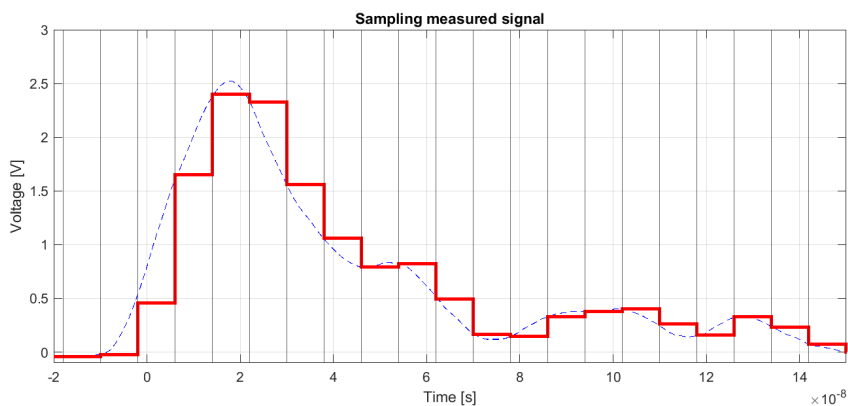
Výhodou tohoto řešení je možnost implementace digitálních filtrů v hradlovém poli, čímž je možné pulzy dále filtrovat (např. na základě jejich tvaru, délky nástupné a sestupné hrany, apod.). Řešení umožňuje detekovat situace, kdy by fotony dopadaly po sobě v čase příliš krátkém - pulzy na výstupu detektoru by se superponovaly, zároveň je možné dosáhnout nulové mrtvé doby zařízení.

Nevýhodou uvedeného řešení je znatelně vyšší cena komponent a náročnost vývoje zařízení. Vyvinout obvod pro vzorkování analogového signálu na frekvencích ve stovkách MHz není jednoduché, a proto nebude řešení této problematiky v práci dále rozvíjeno. Alternativně je možné využít dostupné vývojové kity. Příkladem může být dříve avizovaný kit Red Pitaya (blokový diagram na obrázku 2.1), který disponuje hradlovým polem včetně procesoru, ethernet konektivitou i ADC se vzorkovací frekvencí 125 MSPS. Návrh digitální logiky pro zpracování je neméně náročný [11].



Obr. 2.1: Blokové schéma kitu Red Pitaya STEMLab 125-14 [11]

I přestože se vzorkovací frekvence uvedeného kitu může jevit jako vysoká, je třeba si uvědomit, že trvání špičky impulsu je velice krátké. Při vzorkovací frekvenci 125 MSPS je doba mezi jednotlivými vzorky 8 ns, viz obrázek 2.2.



Obr. 2.2: Vzorkování vzorového signálu s frekvencí 125 MSPS

Z obrázku 2.2 je patrné, že při vzorkovací frekvenci 125 MSPS je možné vzorkováním špičku minout a změřit nižší než reálnou hodnotu. V uvedeném příkladu je vzorkovaná hodnota o 5 % nižší než reálná. Odlišnou konfigurací nábojového zesilovače může dojít ke zkrácení pulzů a tím k ještě větší chybě měření. Pro kvalitní výsledky je tedy nezbytné využití rychlejšího ADC.

Celková náročnost tohoto řešení a jeho vyšší cena převyšují jeho výhody. Z těchto důvodů se nejedná o metodu vhodnou pro problém řešený v této práci, jelikož jedním

z cílů bylo zkonstruovat dostupné a jednoduše zreplikovatelné zařízení, aby mohlo sloužit pro výzkumné pracovníky jako jednoduchý nástroj pro rychlý náhled.

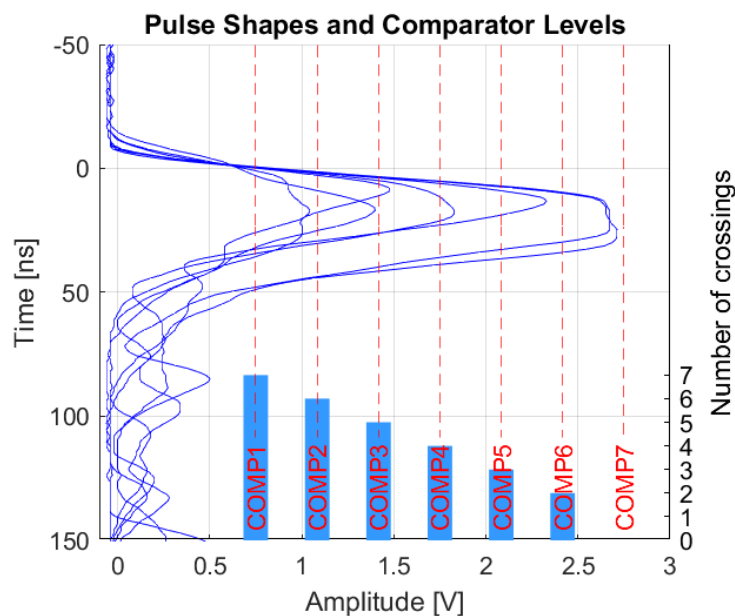
2.3 Analogový špičkový detektor

V literatuře je možné najít několik různých analogových zapojení pro převod proměnného napětí na ustálené, odpovídající nejvyšší hodnotě. Nejjednodušším příkladem takového zapojení je využití operačního zesilovače ve funkci komparátoru. Ten nabíjí kapacitu na jeho výstupu za předpokladu, že na ní je nižší napětí než na jeho neinvertujícím vstupu. S tímto zapojením se pojí řada problémů. Jako příklad lze uvést nenulový čas pro vystoupení ze záporné saturace. To je možné řešit úpravou zapojení, přidáním další diody do zpětné vazby [12].

Alternativním řešením může být využití komparátoru s binárním výstupem. I ten má nenulový čas potřebný k překlopení výstupu. Na výstupu špičkového detektoru následně vzniká schodovitý průběh. V případě, že dojde k deaktivaci výstupu těsně pod vrcholem příchozího pulzu, lze předpokládat, že komparátor nestihne znovu provést cyklus a výstupní napětí se nedorovná špičce, nebo naopak může špičkou překmitnout. Na základě toho lze konstatovat, že analogový přístup k měření by zanášel vyšší šum do měření a jeho výstup by byl závislý na tvaru pulzu, respektive na délce jeho trvání a rychlosti jeho náběžné hrany. Návrh analogového obvodu, který pracuje s takto rychlým signálem, je velmi náročný a mimo uvážení všech parazitních jevů, musí řešit problémy se stabilitou. Ani jeho simulace není jednoduchá vzhledem k silně zjednodušeným modelům součástek.

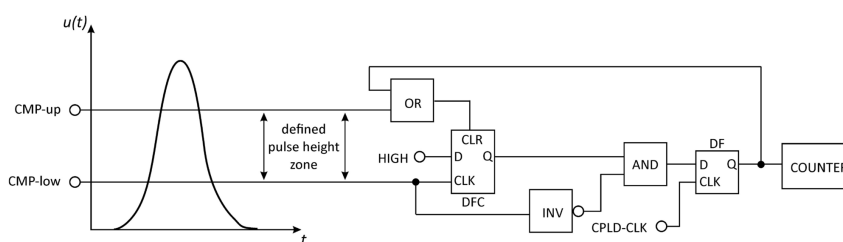
2.4 Měření s využitím řady komparátorů

Preferovaným řešením pro tuto práci je měření za pomoci banky komparátorů, to nabízí výborný kompromis mezi přesností, mrtvou dobou a výrobní cenou. Proto bude tato metoda využita ve finálním návrhu zařízení. Výsledné zařízení obsahuje několik komparátorů s možností nastavení komparační hladiny. Na výstupu každého komparátoru je umístěn čítač, který počítá, kolikrát byla nastavená komparační hladina překročena (viz obrázek 2.3). V pravidelných intervalech jsou hodnoty všech čítačů vyčteny a je možné stanovit četnost překročení jednotlivých hladin. Posouváním hladin je možné proměřit celé spektrum, nebo se případně zaměřit jenom na měření takových hladin, jejichž měření je zajímavé pro vyhodnocení experimentu. Výše zmíněnou logiku komparátorů lze implementovat za pomoci periférií mikrokontroléru nebo z diskretních logických obvodů.



Obr. 2.3: Vizualizace navržené metody

Počet napěťových hladin je určený počtem komparátorů, počet měřených oken je jedna nižší. Můžeme-li předpokládat, že impulzy chodí stále se stejnou četností nezávisle na čase, můžeme se zaměřit pouze na malou část spektra, provést měření a následně rekonfigurovat komparátory pro měření jiné části spektra - takto proměřit celou oblast. Je-li tento způsob realizován interně v mikrokontroléru - periodicky jsou vyčítány hodnoty čítačů, nelze bez prodlevy vyrobit signál indikující příchozí impuls v nastaveném rozsahu. Přidáním obvodu z diskretních prvků [13] bude tato funkcionalita přidána. Na základě výstupního signálu je možné spustit další události v měřicí aparatuře, zároveň lze očekávat přesnější výsledky pro měření jednoho konkrétního rozsahu. Výstupní pulzy bude také možné čítat interně.



Obr. 2.4: Blokové schéma okénkového komparátoru [13]

3 Návrh zařízení

3.1 Specifikace požadavků

Většina zařízení na trhu je určena pro připojení k počítači, který následně slouží i ke zpracování změřených dat. Řada experimentů se provádí i dále, a to až několik desítek hodin. Proto je žádoucí, aby zařízení bylo možné obsluhovat i vzdáleně, prostřednictvím připojení k síti. Zároveň je vhodné, aby zařízení nebylo závislé na žádném serveru a bylo možné jej provozovat i bez připojení k internetu. Zařízení bude obsahovat malý displej pro náhled změřených dat a základní konfiguraci zařízení.

Je pravděpodobné, že uživatel bude chtít naměřená data dále zpracovávat v běžně dostupných nástrojích, jako jsou Excel, MATLAB či Python. Z tohoto důvodu bylo zvoleno jednoduché a široce podporované řešení – stažení dat pomocí HTTP GET požadavku. Tato metoda umožňuje snadný přístup k datům bez nutnosti instalace specifického softwaru, přičemž výsledky lze stáhnout jako běžný soubor (například ve formátu CSV). GET požadavek je podporován téměř všemi webovými prohlížeči, skriptovacími jazyky a analytickými nástroji, což výrazně usnadňuje integraci zařízení do existujících pracovních postupů.

Alternativně bylo zvažováno využití jiných protokolů, jako je FTP nebo přenos dat pomocí POST požadavků. Tyto metody však vyžadují složitější implementaci na straně serveru i klienta a nepřinášejí v kontextu jednoduchého získání dat výrazné výhody. Další možností by byla například obousměrná komunikace pomocí WebSocketů nebo přímé čtení dat ze zařízení přes virtuální sériový port, avšak tyto přístupy jsou vhodnější spíše pro interaktivní nebo real-time aplikace. Zvolený přístup s GET požadavkem tak představuje nejlepší kompromis mezi jednoduchostí, univerzálností a použitelností.

Pro splnění všech funkčních požadavků je zařízení rozděleno do dvou částí: na měřicí desku s minimem nezbytných periférií pro sběr a předzpracování dat a na uživatelskou desku s fyzickými ovládacími prvky, barevným displejem a rozhraními pro komunikaci (Ethernet, Wi-Fi). Konstrukce zařízení zároveň umožňuje, aby měřicí deska fungovala zcela samostatně, ve spojení s počítačem přes USB

Žádoucí je, aby displej nabízel uživatelsky příjemný vzhled ovládacího prostředí, proto bude zvolen barevný displej s dostatečným rozlišením. Dalším faktorem při výběru bude kompatibilita s knihovnamy pro uživatelské rozhraní. Jako vstupní ovládací prvky bude sloužit dvojice tlačítek spolu s rotačním enkodérem, pro pohodlné nastavování hodnot.

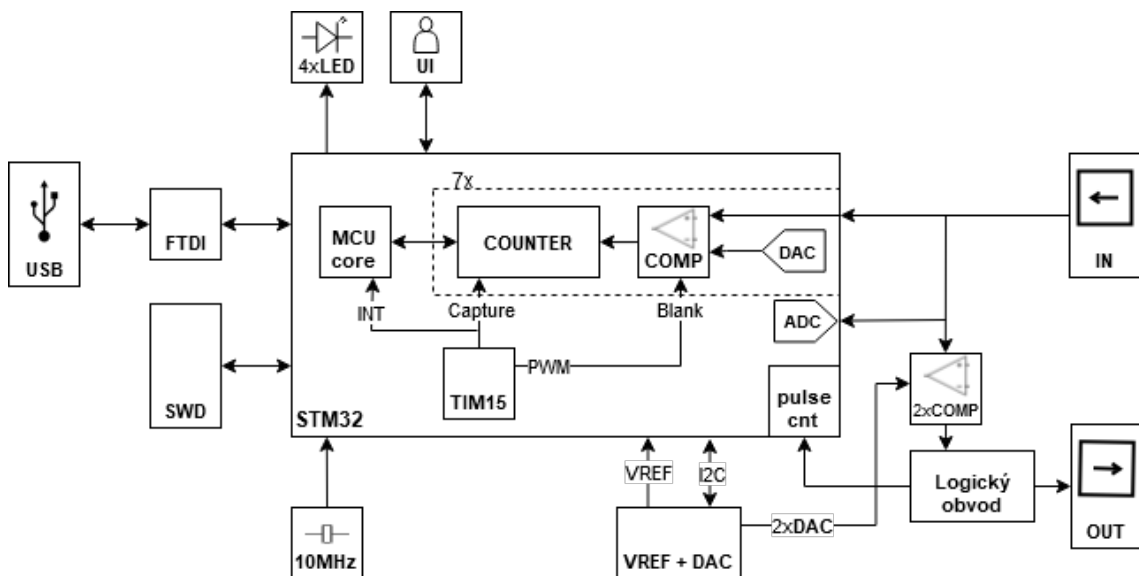
Výstupem měření bude relativně velká matice hodnot. Její náhled na malém displeji ve formě grafu by nebyl dostatečný, proto je pro uživatelskou přívětivost *uživatelský zážitek* (UX) klíčové jednoduché propojení na zařízení uživatele. To bude

možné libovolným z dostupných rozhraní, primární ovšem bude připojení po síti (WiFi nebo Ethernet), díky němuž bude zařízení možné obsluhovat z místní sítě LAN. Také bude možné jej zpřístupnit z internetu (VPN, Tunneling, port-forwarding). Důraz bude kladen také na moderní webovou aplikaci pro ovládání měření. Zároveň bude zachováno přístupné REST API pro možnost integrace do vlastního systému.

Ovládání po USB ve funkci virtuálního sériového portu VCP bude spíše záložní - měřicí část zařízení bude fungovat samostatně. Spojení přes sériový port bude možné s oběma deskami. Pro tvorbu webové aplikace mohou být využity moderní frameworky. Jak již bylo avizováno výše, zařízení bude rozděleno na dvě PCB, které budou propojeny pinovými lištami. Požadavkem je napájet celé zařízení pomocí jednoho USB-C konektoru, který bude součástí hlavní desky.

3.2 Hlavní deska - měřicí část

Jako jádro měřicí části byl hledán mikrokontrolér s dobrou výbavou analogových periférií. Větší počet komparátorů snižuje mrtvou dobu (zvyšuje počet pulzů, které může zařízení zaznamenat), integrované DAC snižuje výrobní cenu a zjednodušuje návrh PCB, čítače vhodné pro danou aplikaci zjednodušují programování a zároveň zvyšují přesnost měření. Navržené blokové schéma zařízení je možné vidět na obrázku 3.1.

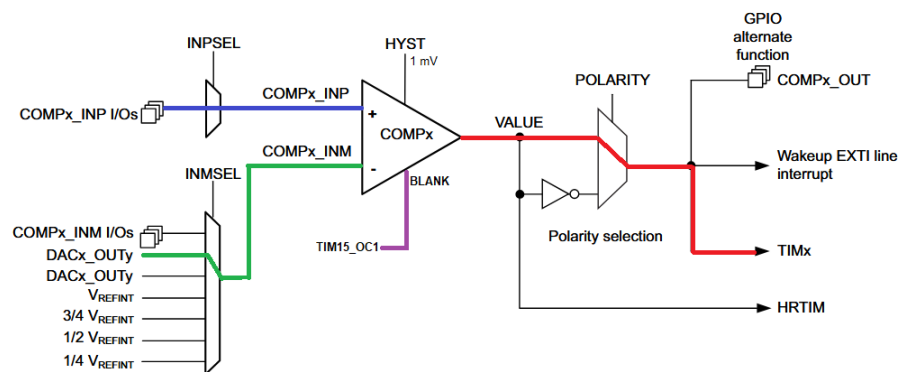


Obr. 3.1: Blokové schéma zapojení měřicí desky

Na základě stanovených požadavků byl vybrán mikrokontrolér STM32G474 společnosti STMicroelectronics. Uvedený čip nabízí 7 integrovaných komparátorů a DA

převodníků s možností interního propojení. Nabízí také možnost připojení externí reference a jeho analogové komparátory jsou dostatečně rychlé pro požadovanou aplikaci, což bylo empiricky ověřeno pomocí vývojového kitu Nucleo, viz níže. Udávané přenosové zpoždění (Propagation delay) je 16,7 ns. [14]

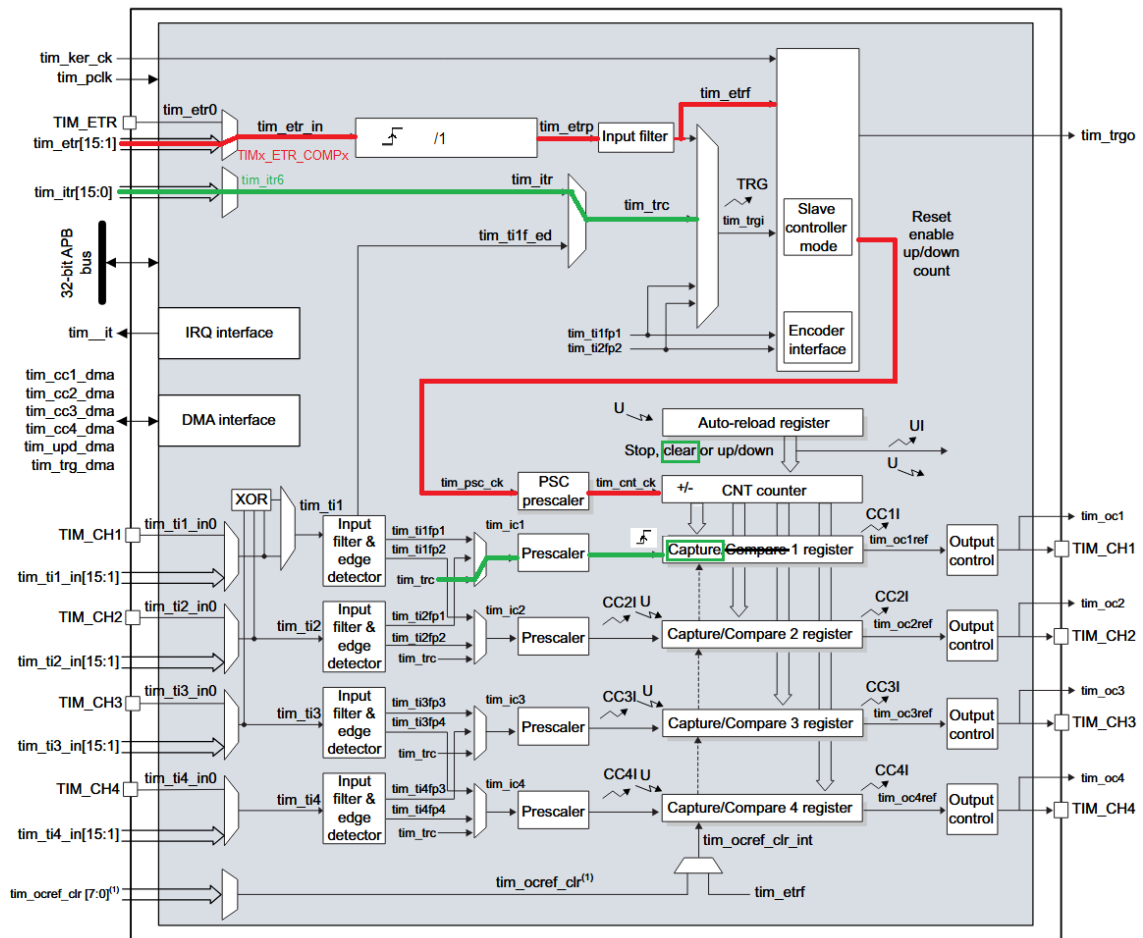
Samozřejmostí je dostatečný výpočetní výkon pro zpracování dat a bohaté periferie pro komunikaci nejen s počítačem, ale také s druhou částí zařízení. Snímaný signál bude přiveden na neinvertující vstupy všech 7 komparátorů, jejichž invertující vstupy budou napojeny na 7 nezávislých kanálů interních DAC. Všechny interní komparátory nabízejí možnost výběru hystereze, offsetu komparačního napětí od jeho invertujícího vstupu. Na výstupu každého komparátoru bude jeden čítač, který bude počítat to, kolikrát došlo k překročení nastavené komparační úrovně.



Obr. 3.2: Ukázka konfigurace komparátorů

[Převzato, upraveno: RM0440[15]]

Pro korektní interpretaci napočítaných hodnot je nutné, aby klíčová data ze všech čítačů byla vyčtena současně. K tomuto účelu jsou všechny použité čítače vybaveny možností "capture". Čítač po přivedení signálu na jeho trigger vstup zkopíruje hodnotu do capture registru (konfiguraci timeru je možné vidět na obrázku 3.3). Tento signál (konkrétně itr6) může být pro všechny čítače společný. Volbou správného slave módu lze současně s vyčtením hodnot všechny čítače resetovat. Tento signál je generovaný dalším čítačem, TIM15, který určuje periodu jednoho měřicího cyklu.



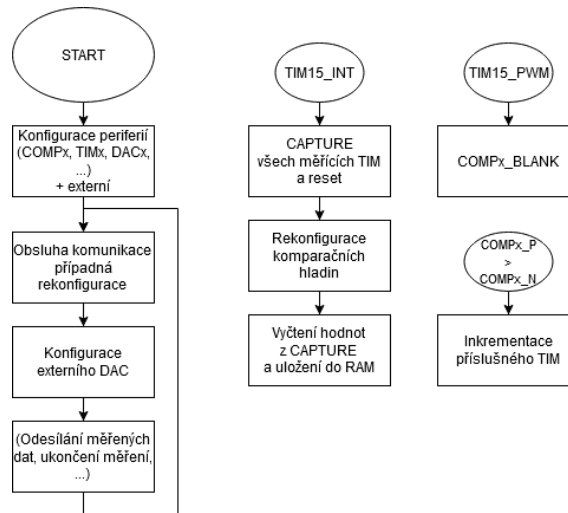
Obr. 3.3: Ukázka konfigurace čítačů na výstupu komparátorů

[Převzato, upraveno: RM0440[15]]

V jednom měřicím cyklu je možné signál z pohledu amplitudy rozdělit na omezený počet úrovní (signál menší než nejnižší komparační hladina, signál v rozsahu mezi dvěma komparačními hladinami, signál vyšší než nejvyšší hladina). Pomocí sedmi komparátorů lze tedy signál rozdělit do sedmi známých úrovní (signál menší než nejnižší hladina nebo větší než nejvyšší hladina nelze vyhodnotit). Pro měření více hladin s omezeným počtem komparátorů je možné komparační hladiny průběžně měnit. Po vyčtení hodnot z čítače je možné vstupy na krátkou chvíli zablokovat a změnit úrovně DAC. Po změně hladin je možné zase odblokovat vstupy a pokračovat v měření. Stálost délky měřicího cyklu pro všechny hladiny je důležitá pro přesnost měření. Pro zajištění konzistence měřicí doby je možné PWM signál z TIM15 využít jako blokovací signál pro všechny komparátory. Zároveň časovač může generovat přerušení pro rekonfiguraci hladin.

Vyčtení hodnot z capture registrů je tedy potřeba stihnout v rámci jedné periody

časovače TIM15, tento požadavek není nijak limitující. V paměti RAM bude uloženo pole pro každou snímanou úroveň signálu. Počet pulzů v dané úrovni poté stanovíme jako rozdíl mezi hodnotami dvou po sobě jdoucích capture registrů. Počet změřených pulzů příslušných úrovní v každém měřícím cyklu přičteme k hodnotám v poli. Měřící okno bylo zvoleno 10 ms. Okno musí být dostatečně dlouhé, aby pravděpodobnost, že se pulz trefí na kraj měřícího intervalu byla co nejmenší. Po měřícím okně následuje 1 ms určená pro rekonfiguraci a ustálení hladin. Vývojový diagram funkce zařízení je možné vidět na obrázku 3.4.



Obr. 3.4: Vývojový diagram funkce měřící části zařízení

Žádoucí je, aby tato deska mohla fungovat samostatně. Proto byla vybavena USB portem pro napájení a komunikaci s počítačem. Propojení je realizováno za pomoci čtyřkanalového převodníku FT4232HQ, kde právě jeden kanál bude sloužit pro komunikaci mezi měřicí deskou a jeden pro propojení PC na druhou desku - celé zařízení bude možné ovládat pomocí jednoho USB konektoru. Pro aktualizace firmwaru a debug byl přidán konektor zpřístupňující rozhraní Serial Wire Debug SWD. Po přidání malé paměti k FTDI převodníku je možné si uložit konfiguraci pro lepší přehlednost během užívání zařízení. Vzhledem k povaze zařízení je klíčové mít možnost zajistit přesné časování, proto na zařízení byl přidán krystalový generátor hodinového signálu.

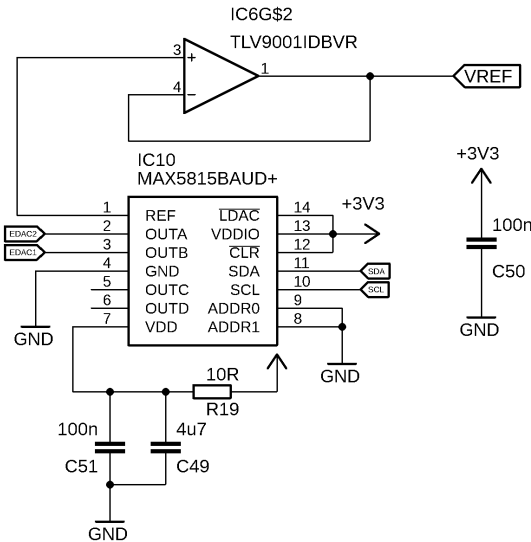
Pro lepší uživatelskou přívětivost (a komfort během vývoje) bylo na zařízení přidáno tlačítko pro restartování zařízení a čtyři barevné LED. Pro jednoduchost návrhu PCB byly využity adresovatelné LED WS2812 [16], jejichž výhodou je, že jimi lze řídit velké množství RGB LED pomocí jediného výstupního pinu GPIO. Integrované řadiče se chovají jako jednoduché posuvné registry. Přenos je zahájen nástupnou hranou na datovém signálu první LED. Po určitém časovém úseku si

dioda znovu přečte hodnotu na vstupu a tu posune do interní paměti - poslední bit v paměti je obdobně vyslán na výstup stejného formátu. Nepřijde-li delší doba nástupná hrana na datový vstup diody, data se latchují a dioda mění barvu a intenzitu podle vstupních dat. Každá dioda přijímá 24 bitů dat, které jsou rozděleny na 3 8bitové hodnoty pro barvy RGB (popř. GRB). LED je žádoucí napájet napětím okolo 5 V pro maximální jas. I když bylo empiricky ověřeno, že i při tomto napájení jsou napěťové úrovně výstupu 3,3 V mikrokontroléru vyhovující, je to v rozporu s dokumentací. Do série s jejich napájením tedy byla přidána dioda, která sníží napětí o pár desetin voltu. Díky tomu nedojde k výrazné ztrátě jasu a zároveň budou dodrženy specifikace pro vstupní napěťové úrovně.

Napájení zařízení je zajištěno z USB portu, který by měl být schopný dodat dostatečný proud (průměrná spotřeba by neměla přesáhnout 500 mA). Vzhledem k použití moderního USB-C konektoru je potřeba nezapomenout na rezistory udávající požadovaný proud do zařízení a orientaci konektoru. Vliv tohoto rezistoru se projevuje pouze v takovém případě, kdy je zařízení připojeno USB-C-USB-C kabelem. [17]

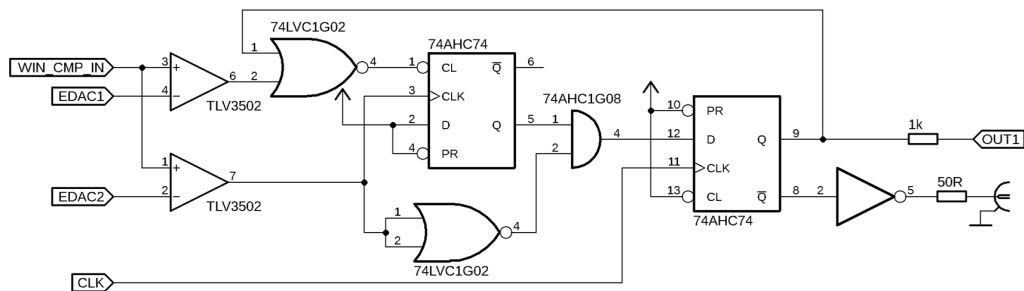
Vstupní konektor BNC bude terminovaný dle zvyku 50 Ohm. Samozřejmostí je ošetření proti vyššímu napětí než povolenému (3,3 V). Vstupní signál je dále veden do bufferu pro měření stejnosměrné složky a následně na jeden z kanálů zabudovaného ADC.

Kromě měření za využití interních komparátorů a čítačů je zařízení vybaveno jedním dedikovaným okénkovým komparátorem. Jeho výstupem je pulz tehdy když je na vstupu pulz o amplitudě náležící do intervalu mezi limity. Tyto limity jsou definované pomocí externího DA převodníku, který zároveň obsahuje integrovanou napěťovou referenci (referenci je potřeba pro další použití impedančně oddělit - jedná se o měkký zdroj napětí, viz obrázek 3.5).



Obr. 3.5: Obvodové schéma DA převodníku s bufferem reference

Obdobný okénkový komparátor [13] je obvod v podobných zařízeních často implementovaný v hradlovém poli (FPGA) nebo v komplexní programovatelné logice (CPLD). Jelikož zařízení navržené v této práci obsahuje pouze jeden takový komparátor, je jeho realizace jednodušší s pomocí diskretních logických obvodů, schéma je uvedeno na obrázku 3.6. Byl vybrán TLV3502, který obsahuje oba potřebné komparátory integrované v jednom pouzdře a zároveň nabízí dostatečnou rychlost. Komparační úrovně jsou nastaveny pomocí externího DA převodníku s integrovanou referencí - MAX5815. Výstupní signál zapojení je veden na jeden z čítačů mikrokontroléru, dále do konektoru pro připojení druhé desky a přes buffer, ve kterém je proudově posílen, je veden na výstupní BNC - tento výstup je možné připojit na další zařízení řídicí nebo měřicí příslušný experiment.

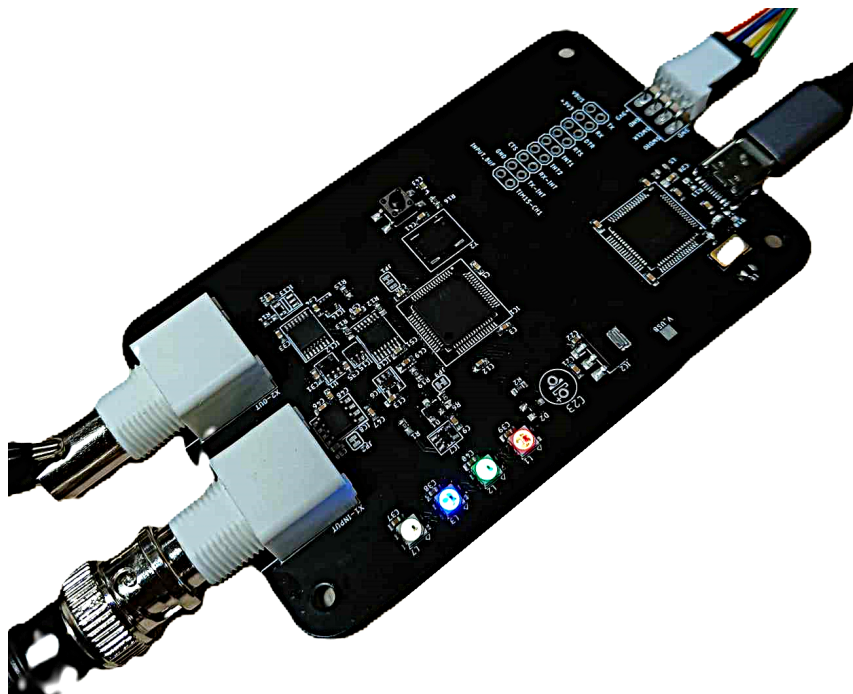


Obr. 3.6: Obvodové schéma okénkového komparátoru

Během návrhu spojů na desce byl kladen důraz na minimalizaci rušení analogové části a na co nejlepší spojení mezi vstupním konektorem a mikrokontrolérem,

který měří požadovaná data. Všechny digitální signály byly odděleny od analogových a vstupní signál byl veden co nejkratší cestou. Důraz byl kladen na zemnicí polygon, a to konkrétně především na to, aby nebyl nikde v cestě signálu přerušen a aby bylo dosaženo nejmenší možné indukčnosti spojení. Pro podobné desky by bylo lepší volbou využití vícevrstvého plošného spoje. Všechny komponenty byly umístěny tak, aby bylo možné je osadit ručně.

Navržená deska po vyrobení profesionální firmou a po ručním osazení komponent je zobrazena na obrázku 3.7. Ihned po osazení bylo možné desku připojit k počítači a započít programování. Po připojení k USB portu jsou automaticky instalovány potřebné ovladače a deska je přihlášena jako čtveřice COM portů, jeden z nich je určen pro komunikaci s STM32, druhý pro komunikaci s druhou deskou. Zbylé dva porty nejsou využity a bude možné je deaktivovat později.

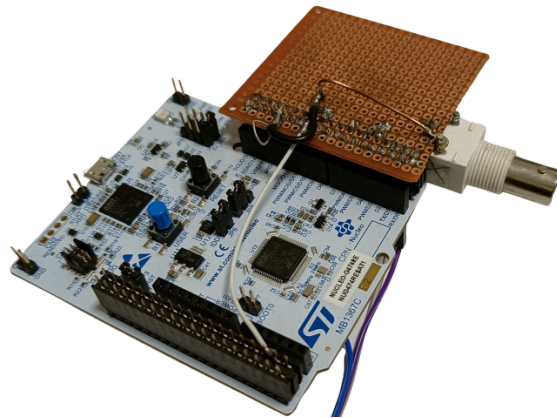


Obr. 3.7: Fotodokumentace hlavní desky

3.3 Testování metody komparátorovou bankou

Metoda měření pomocí banky komparátorů zabudovaných v MCU byla před návrhem vlastního hardwaru otestována s využitím vývojového kitu s STM32G474RE 3.8. Pro otestování bylo potřeba spojit všechny kladné vstupy všech sedmi komparátorů a patřičně zařízení nakonfigurovat. Bylo provedeno vždy přibližně 10 měření na každé úrovni, načež byla data poslána do počítače. Vstupem zařízení byl signální generátor s dostatečně rychlým výstupem, který byl nastavený na generování

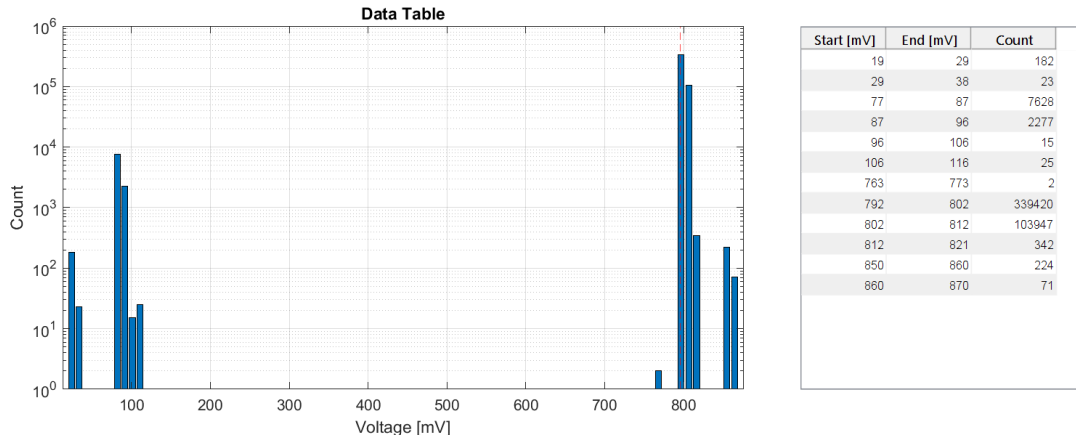
krátkých pulzů o konstantní amplitudě. Typicky lze pozorovat, že s klesajícím trváním pulzu dochází k jeho snižování - tzn. signální generátor předpokládá o něco rychlejší přeběh jeho výstupního zesilovače než je přeběh reálný. Amplituda tedy byla ověřena pomocí osciloskopu. Nezbytností bylo přidání zakončovacího odporu, a to z důvodu zamezení přítomnosti odrazů. Za předpokladu že amplituda pulzů byla podobná jedné z komparačních hladin, bylo možné pozorovat oscilaci daného komparátoru. Ve finálním zařízení bylo tedy nutné využít hysterezi.



Obr. 3.8: Fotografie prototypu

Generátor byl nastaven na generování obdélníku o frekvenci 20 kHz, amplitudě 796 mV a střídě 0.2 %. Výsledky byly o něco horší než se očekávalo. Nebyla připojena externí napěťová ani časová reference pro MCU.

Z Obr. 3.9 je možné pozorovat znatelný šum v oblasti nízkého napětí - ten může být způsoben šumem reference, napájecího napětí, přívodů nebo generátoru samotného - s lepším návrhem spojů se vlastnosti měření nejspíše o něcolepší. Použitý generátor (Agilent 33210A [18]) nebyl dostatečně rychlý pro testování minimální délky impulzu (10 MHz). To bude jedním z parametrů charakterizace v poslední části práce.



Obr. 3.9: Histogram měření s pomocí prototypu

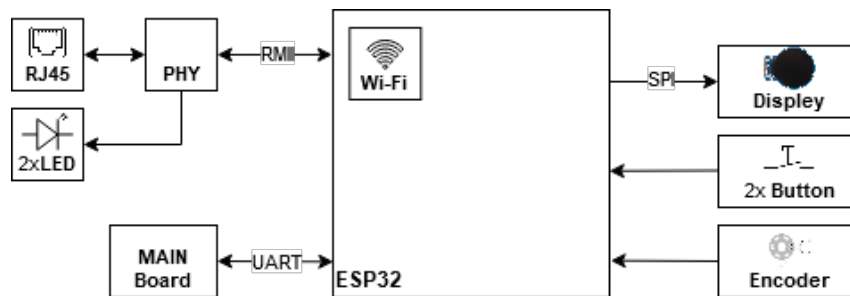
3.4 Uživatelská deska - obslužné rozhraní

Druhá deska bude sloužit jako uživatelské rozhraní, ve kterém bude možné nastavit parametry měření a sledovat náhled výsledků na malém displeji. Jako jádro této desky byl zvolen modul s procesorem ESP32, který je dostatečně výkonný pro tuto aplikaci, nabízí rozhraní Wi-Fi a přípravu pro připojení převodního PHY pro připojení k síti pomocí Ethernetu. Jeho nevýhodou je malý počet vstupně výstupních pinů. S hlavní deskou bude komunikovat pomocí UART (bez využití hardwarového flow controlu, z důvodu nedostatku pinů). Při výběru displeje byl kladen důraz na dobrou podporu knihoven. Pro grafické rozhraní byl využit balíček knihoven LVGL, a to z důvodu jednoduchosti celého řešení z pohledu programátora a dobrého výběru grafických studií pro návrh ovládacích prvků. LVGL je open-source multiplatformní řešení - framework, který nabízí moderní a velmi jednoduchou možnost tvorby (Smartphone-like) rozhraní. Hlavní předností knihovny je možnost využití dotykového rozhraní. Tato možnost byla z důvodu praktičnosti nevyužita [19]. LVGL je open-source multiplatformní řešení - framework, který nabízí moderní a velmi jednoduchou možnost tvorby (Smartphone-like) rozhraní. Hlavní předností knihovny je možnost využití dotykového rozhraní. Tato možnost byla z důvodu praktičnosti nevyužita. Pro zařízení byl zvolen malý kruhový displej, a to z důvodu jeho netypického vzhledu a kontroler GC9A01 driverů knihoven LVGL. Display je snadno dostupný ve formě vývojových modulů. Pro možnost přímého ovládání zařízení jsem přidal rotační enkodér a dvojici tlačítek. Celkové blokové schéma desky je možné vidět na obrázku 3.10.

Návrh ethernetového rozhraní byl inspirován vývojovým kitem ESP32-GATEWAY

od firmy Olimex. [20] Pro možnost připojení k síti byl přidán konektor RJ45 s integrovaným transformátorovým oddělením v SMD montáži (S811-1X1T-36-F) a převodník PHY LAN8710A.

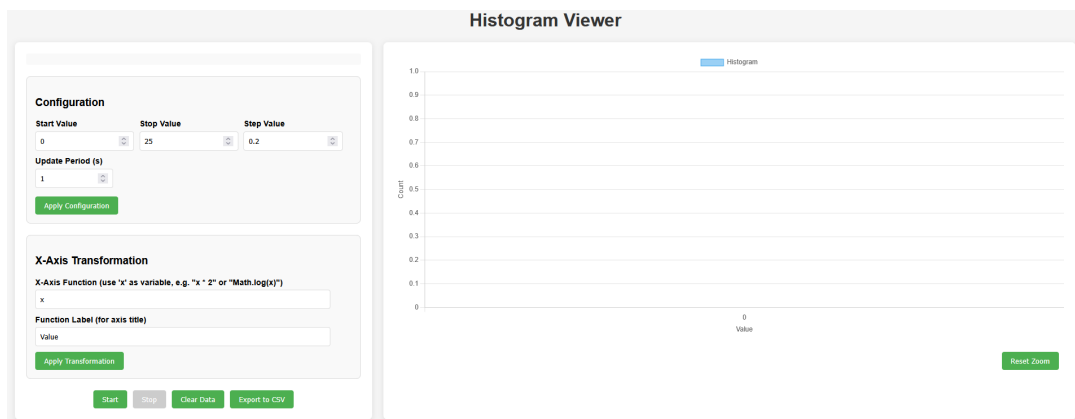
Při návrhu desky byly všechny komponenty umístěny ze spodní strany desky, aby bylo možné horní desku využít zároveň jako pohledový panel. Pro lepší design může být panel později překrytý nebo je možné využít horní PCB a dodělat popisky ovládacích prvků. Deska má vlastní stabilizátor napětí, aby nijak nerušila analogovou část zapojení. Napájení je zajištěno z hlavní desky pomocí pinového konektoru. Ten mimo jiné obsahuje také UART pro komunikaci s počítačem, pro možnost aktualizace firmwaru.



Obr. 3.10: Blokové schéma zapojení uživatelské desky

3.4.1 Webové rozhraní a REST API

Pro možnost vyčítání změřených dat a základní ovládání měření byla naprogramována jednoduchá webová stránka 3.11, která byla uložena v ESP32 s využitím interního souborového systému SPIFFS [21].



Obr. 3.11: Náhled webové aplikace pro ovládání

Data do webové aplikace jsou pomocí HTTP GET požadavku načítána z RAM paměti, kde jsou uložena v binárním formátu. Data jsou uložena v matici, kde každý

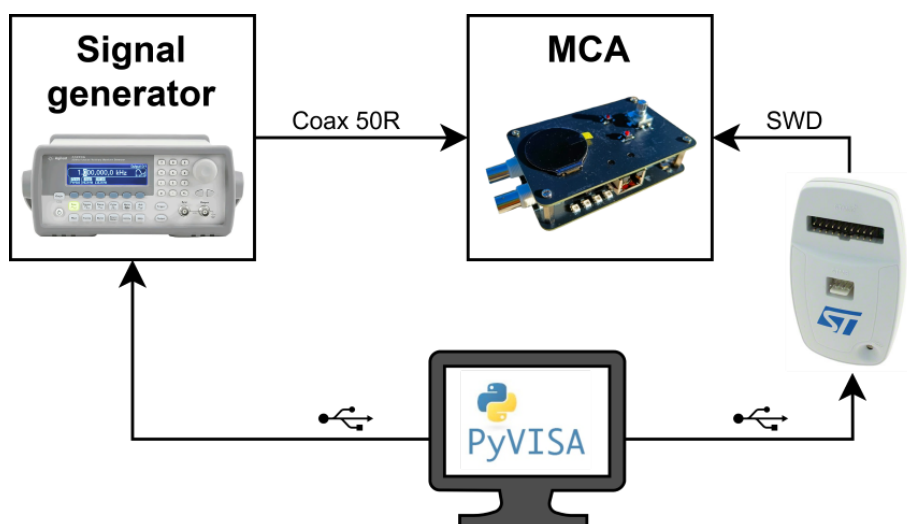
řádek odpovídá jedné hladině a sloupec počtu pulzů v dané hladině. Pro jednoduchost je možné data stáhnout jako CSV soubor, který je možné následně zpracovat v běžných nástrojích (Excel, Python, Matlab). Pro možnost integrace do vlastních systémů jsem vytvořil jednoduché REST API, které umožňuje získat data v JSON formátu. Jednotlivé endpointy jsou popsány v tabulce F.1. Pro možnost ovládání zařízení z počítače byla vytvořena jednoduchá knihovna v Pythonu, která umožňuje nastavit parametry měření a stáhnout naměřená data.

Pro komplexnější rozhraní je možné využít moderní webové frameworky. *React*, *Vue* a *Svelte* jsou běžně využívány při vývoji interaktivních webových rozhraní. Z hlediska nasazení v embedded systémech s omezenými výpočetními a paměťovými zdroji, jako je mikrokontrolér ESP32, však existují zásadní rozdíly. *React* a *Vue* využívají za běhu poměrně robustní runtime pro správu virtuálního Document Object Model DOM a reaktivitu, což vede k vyšším nárokům na velikost výsledného JavaScriptového kódu i spotřebu paměti v prohlížeči [22, 23]. Naproti tomu *Svelte* přistupuje k reaktivitě kompilací komponent do optimalizovaného JavaScriptu již v době překladač, čímž eliminuje potřebu runtime a výrazně redukuje velikost i složitost výstupu [24]. Díky tomu je *Svelte* obzvláště vhodné pro nasazení na ESP32, kde bývá webový obsah uložen v souborovém systému typu SPIFFS či LittleFS a obsluhován pomocí HTTP serveru (např. ESPAsyncWebServer). S využitím statických buildů lze na ESP32 efektivně provozovat jednoduchá webová rozhraní s použitím kompilovaného Svelte, zatímco *React* a *Vue* jsou vhodnější spíše pro vývoj na straně výkonnějšího serveru.

4 Charakterizace zařízení a dosažené parametry

Při vývoji všech měřících zařízení je klíčové zjištění a popis vlastností a chování zařízení, především pracuje-li v oblasti blízko svých limitů. V této kapitole budou dále diskutovány jednotlivé faktory ovlivňující parametry vyrobeného zařízení. Pro popis reálného PHA nejdříve definujeme ideální zařízení téhož typu. Takové zařízení bude mít nekonečné napěťové rozlišení, žádnou mrtvou dobu - dobu, kdy zařízení není schopné snímání pulzů, limitně nulovou šířku pulzu a impedančně přizpůsobený vstup o nulové kapacitě.

Pro provedení požadovaných měření byla sestavena testovací aparatura 4.1, která se skládala z arbitrárního signálního generátoru a počítače, který proces testování řídil. K propojení obou zařízení s počítačem byla využita standardní USB komunikace. Vzdálené ovládání generátoru bylo realizováno pomocí knihovny *PyVISA* [25] a *PyMeasure* [26].



Obr. 4.1: Testovací aparatura pro charakterizaci PHA

Pro zjednodušení jednotlivých testů bylo využito přímého připojení do MCU pomocí debugovacího SWD portu. Díky tomu bylo možné libovolně pomocí jednoduchého skriptu v pythonu měnit nastavení zařízení a jednoduše si vyčíst změřená data bez potřeby složitějšího programování. K tomu byla využita knihovna *pyOCD* [27], která umožňuje přímou komunikaci s STM32G4 (nebo jiným ARM procesorem) pomocí stejného nástroje (ST-link) jako je využíván pro nahrávání programu. Do skriptu si může uživatel na základě souboru ".map", který vzniká při kompilaci, vyčíst adresy jednotlivých proměnných a přímo je číst nebo měnit.

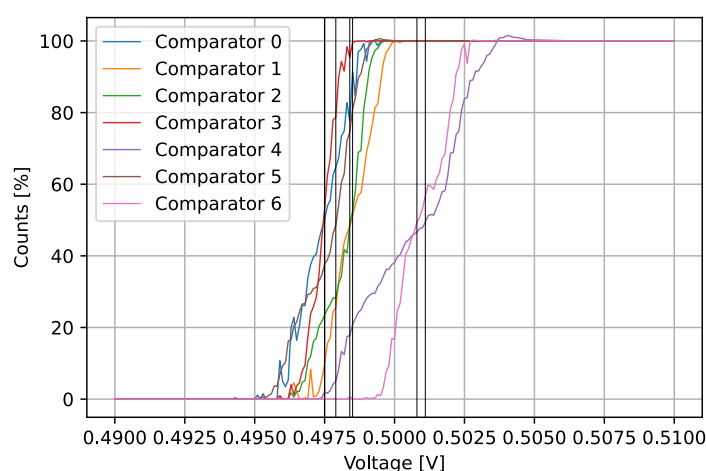
4.1 Limitace zvolenou koncepcí

Zvolenou koncepcí je limitována především mrtvá doba vyvinutého zařízení. Z principu funkce jednoznačně vyplývá, že jsou efektivně zaznamenávány pouze pulzy o amplitudě v rozmezí nejnižšího a nejvyššího komparátoru. Z toho lze konstatovat, že mrtvá doba zařízení je závislá především na nastaveném rozlišení snímání a na počtu komparátorů.

4.2 Offset komparátoru

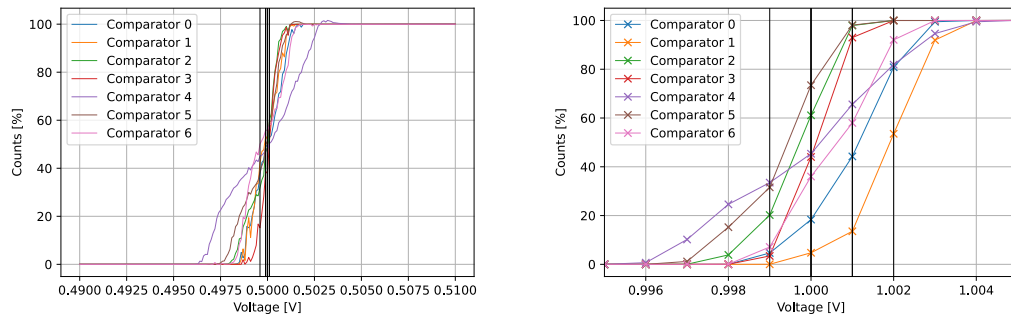
Offset komparátoru je jedním z nejdůležitějších parametrů, který ovlivňuje přesnost měření. Offset je definován jako rozdíl mezi skutečným a očekávaným napětím, při kterém dochází k přepnutí výstupu komparátoru. I přestože se všechny použité komparátory nacházejí na stejném čipu, jejich offset není během výroby nijak korigován a každý komparátor má tedy rozdílné parametry. Podle dokumentace výrobce se offset pohybuje v rozmezí typicky až ± 5 mV (viz "Table 79. COMP characteristics" [28]).

Testování offsetu bylo provedeno konfigurací všech komparátorů na stejnou referenci a počítáním pravděpodobnosti, že dojde k zaznamenání pulzu 4.2. Reference pro některé komparátory bylo možné ověřit přesným změřením napětí - vyvedením na pin a připojením k externímu multimetru. Na základě provedených měření lze konstatovat, že zdroj reference s největší pravděpodobností není signifikantním zdrojem chyb, zabudované DA převodníky jsou při výrobě trimovány pro dosažení co nejlepší přesnosti.



Obr. 4.2: Závislost pravděpodobnosti komparace na amplitudě pulzu

Offset komparátoru je možné digitálně kompenzovat, během měření byla pozorována závislost offsetu na komparačním napětí. Pro účely testování byl offset kompenzován pro hodnotu 500 mV. I přesto, při posunutí komparace na 1 V, došlo znovu k jeho projevu (viz obrázek 4.3).

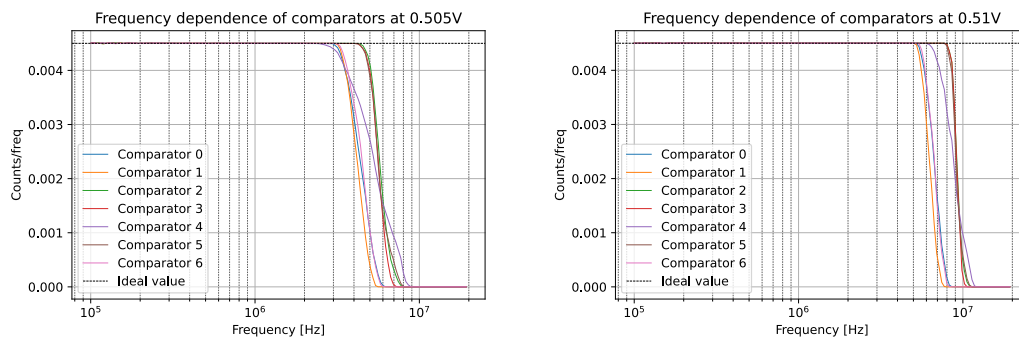


Obr. 4.3: Závislost pravděpodobnosti komparace na amplitudě pulzu po kompenzaci offsetu

Offsetové napětí komparátorů by tedy bylo možné kompenzovat funkcí, kterou by bylo možné obdobným způsobem změřit ve více bodech. Toto v práci není dále implementováno.

4.3 Propagační zpoždění

Propagační zpoždění je doba, po kterou trvá, než dojde k přepnutí výstupu komparátoru. Tato doba je závislá především na napětí které je porovnáváno a na napětí referenčním [29]. Měření následků vlivu tohoto parametru bylo provedeno s využitím stejné aparatury jako měření offsetu 4.1. Pro měření byla nastavena konstantní amplituda o několik jednotek milivoltů vyšší než komparační hladina. Do zařízení byl následně přiveden sinusový signál o postupně rostoucí frekvenci. Relativní počet zaznamenaných pulzů v závislosti na frekvenci je zobrazen na obrázku 4.4. Vliv hystereze (nastaveno 10 mV) na toto měření bylo možné pozorovat pouze zanedbatelně.

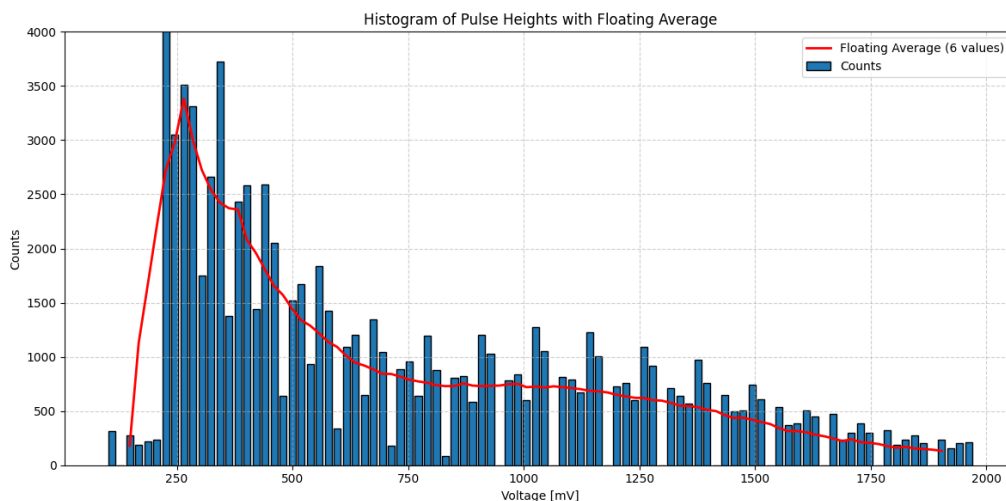


Obr. 4.4: Závislost počtu zaznamenaných pulzů na frekvenci signálu pro referenční napětí 500 mV

Z měření je možné dedukovat dvě tvrzení: propagační zpoždění komparátorů se mezi komparátory v rámci jednoho čipu liší a minimální šířka pulzu, která je schopna být detekována, se tedy může lišit až o 50 %.

4.4 Vliv na reálné měření

Pro testování dosažených parametrů v reálné aplikaci byl připojen detektor s velmi krátkými pulzy. Sečtením vlivů všech nežádoucích vlastností komparátorů pro velmi krátké pulzy bylo možné si povšimnout opakujícího se vzorce, jehož délka odpovídá počtu měřících oken. Docházelo k detekci komparátorem na vyšším prahovém napětí a zároveň komparátor na nižším nedetekoval vlivem rozdílného propagačního zpoždění a offsetu. Výsledné měření bylo silně zatíženo touto chybou - obrázek 4.5.

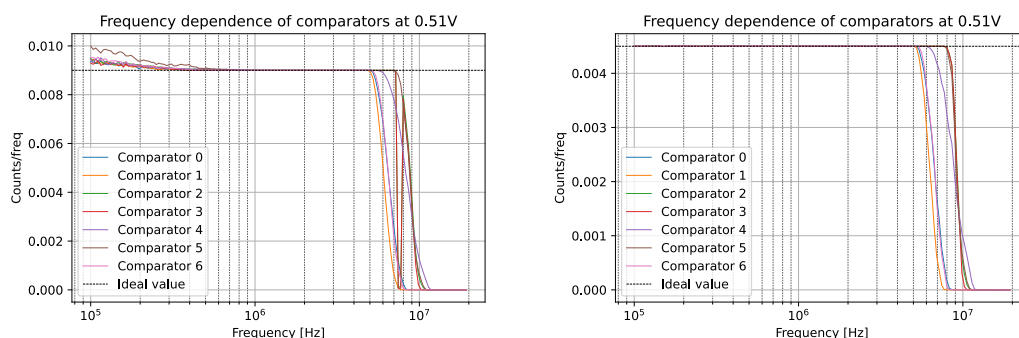


Obr. 4.5: Zaznamenané spektrum scintilačním detektorem

Pro eliminaci tohoto artefaktu je možné implementovat odlišný krok měření. V uvedeném grafu 4.5 byly vždy po jedné periodě měření (po provedení capture události) posunuty úrovně všech komparátorů tak, aby nejvyšší komparační úroveň odpovídala nejnižší v následující periodě. Aby došlo k vyrovnání pozorovaného efektu, je možné posouvat měřící rozsah pouze o jedno měřící okno (v uvedeném příkladu tedy 20 mV). V tu chvíli by mělo dojít k odstranění pozorovaných vlivů, podobně jako když měření probíhá pomocí pouze jednoho okna. Pro lepší náhled z dostupných dat je možné implementovat plovoucí průměr o délce průměrovaného okna odpovídající počtu celočíselného násobku měřených oken (6 oken pro 7 komparátorů).

4.5 Rezonance komparátorů

Během testování propagačního zpoždění bylo zaznamenáno zvláštní chování komparátorů a to především při nižších frekvencích 4.6. Při nástupné hraně výstupu komparátoru se objevovaly oscilace. Tyto oscilace bylo možné pozorovat nejen osciloskopem při vyvedení výstupu na pin, ale i při porovnání napočítaných pulzů se vstupní frekvencí. Nastavení tento efekt nijak neovlivnilo, díky tomu tedy lze vyloučit šum na hraně signálu jako zdroj tohoto jevu. Uvedené pozorování se podařilo reprodukovat i na jiných čípech. Na základě doporučení jednoho ze zaměstnanců [30] výrobce, byl aktivován zabudovaný filtr, který tento jev dokonale eliminuje. Jeho funkčnost ani existence není nikde oficiálně dokumentována.

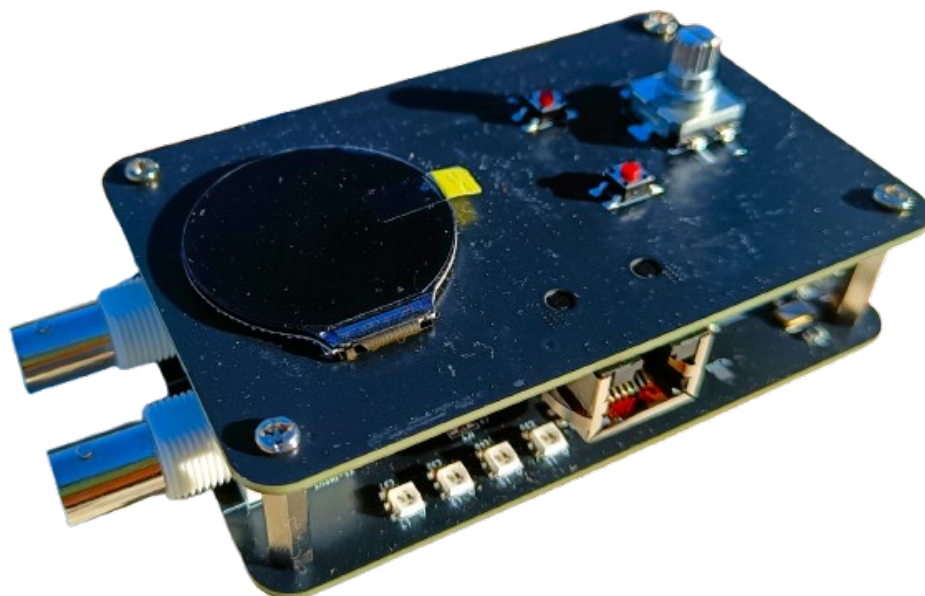


Obr. 4.6: Vliv aktivace filtru na eliminaci oscilací na výstupu komparátoru (a) a bez filtru (b) s filterm

Závěr

Dosavadní prací bylo navrženo a vyrobeno zařízení pro měření četnosti amplitud pulzů s možností snímání pulzů o délce desítek nanosekund, které je svými vlastnostmi (jako je rozlišení, minimální doba trvání pulzu, konektivita, atd.) schopné konkurovat dostupným komerčním řešením. Toto navržené zařízení je možné vidět na obr. 4.7. Výhodou je jeho velice nízká cena - materiál na výrobu měřicí části stojí přibližně 1000 Kč. Zařízení se skládá ze dvou částí, a to z měřicí desky a desky pro interakci s uživatelem. Požadavek na možnost využití měřicí desky samostatně byl zachován. Obě součásti zařízení splňují všechny požadavky, i když měřicí část nabízí prostor pro lepší optimalizaci algoritmu a jsou navrženy vzhledem k aktuálním trendům v oblasti spotřební elektroniky. Příkladem těchto trendů je například použití USB-C konektoru pro napájení a komunikaci s PC, moderně vypadající barevný displej nebo možnost obsluhy zařízení vzdáleně přes webové rozhraní, popř. aplikaci (zařízení může být do sítě připojeno přes ethernetový kabel nebo WiFi 2.4 GHz).

Použitá měřicí metoda byla představena a publikována na konferenci Radioelektronika 2025 [31]. Další vývoj tohoto zařízení je v plánu pro usnadnění implementace zařízení do denní praxe výzkumných pracovníků. Možnosti vývoje zařízení jsou široké, příkladem je vytvoření systému na podobném principu s použitím FPGA a rychlejších komparátorů (popřípadě také jejich většího počtu). Implementací firmwarových korekcí systematických chyb měření je možné dosáhnout přesnějších výsledků. Obvod pro napájení fotonásobiče by rovněž usnadnil použití zařízení.



Obr. 4.7: Fotografie zařízení

Literatura

- [1] Berkeley Nucleonics Corporation. *Scintillation Crystals & Detectors*. Accessed: 2025-04-08. 2025. URL: <https://www.berkeley-nucleonics.com/scintillation-crystals-detectors>.
- [2] Fengzhao Shen et al. “A Compact Dual Gamma Neutron Detector Based on NaI(Tl+Li) Scintillator Readout with SiPM”. In: *Crystals* 12.8 (čvc. 2022), s. 1077. ISSN: 2073-4352. DOI: 10.3390/cryst12081077. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/cryst12081077>.
- [3] V. M. Ainutdinov et al. In: *Instruments and Experimental Techniques* 46.3 (2003), s. 376–379. ISSN: 0020-4412. DOI: 10.1023/a:1024474607600. URL: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024474607600>.
- [4] Hamamatsu Photonics. *High Voltage Power Supply Modules for PMTs*. Accessed: 2025-04-08. URL: https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/pmt/accessory-for-pmt/high-voltage-power-supply/module%5C_pmt.html.
- [5] Aleš STEJSKAL. *Tvarová filtrace signálu v detekci jaderného záření [online]*. Bakalářská práce. 2017. URL: <https://theses.cz/id/bjhxkr/>.
- [6] Keysight Technologie. *Pulse Analysis X-Series Measurement App, Multi-Touch UI*. Online. Zář. 2022. URL: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-06093/technical-overviews/5992-2855.pdf>.
- [7] Ondřej Kolář. “Systém pro měření s proporcionálními detektory”. Dipl. pr. VUT v Brně, 2022.
- [8] Pavel Demin. *pavel-demin/red-pitaya-notes: 20241222*. en. Tech. zpr. 2024. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14543923>.
- [9] A Jana et al. “Development of a zero-cost multichannel analyser based on digital signal processing for γ – rayspectroscopy using the PC soundcard”. In: *Pramana* 94.1 (pros. 2019). ISSN: 0973-7111. DOI: 10.1007/s12043-019-1880-6.
- [10] H. Kasani, S. Ashrafi a N. Ghal-Eh. “High count-rate digital gamma-ray spectroscopy using a low-cost COTS digitizer system”. In: *Radiation Physics and Chemistry* 184 (čvc. 2021), s. 109438. ISSN: 0969-806X. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109438.
- [11] *Electrical schematics for: STEMLab_125-14*. Red Pitaya d.o.o. Velika pot 22, 5250 Solkan, Slovenia, zář. 2021. URL: https://downloads.redpitaya.com/doc/User-DOC_STEMLab_125-14_V1.1%28STEMLab%20125-14%20LN%29.PDF.

- [12] Paul Horowitz. *The art of electronics*. Ed. Winfield Hill. Third edition, 20th printing with corrections. Figure 4.58. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2024. 1230 s. ISBN: 978-0-521-80926-9.
- [13] André Bieberle et al. “Multi-channel Detector Module for Multi-energy Gamma Ray Computed Tomography”. In: *Journal of Signal Processing Systems* 94.4 (led. 2022), s. 349–360. ISSN: 1939-8115. DOI: 10.1007/s11265-021-01693-9.
- [14] *STM32G4 Mainstream Series Mixed Signals MCU product overview*. STMicroelectronics. URL: https://empa.com/empathings/en/Microcontrollers%5C_STM32G4%5C_series%5C_product%5C_overview.pdf.
- [15] STMicroelectronics. *RM0440 - Reference manual STM32G4*. Online. STM32G4 series advanced Arm® -based 32-bit MCUs. Ún. 2024.
- [16] Worldsemi. *WS2812 Intelligent Control LED Datasheet*. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812.pdf>. Accessed: 2025-06-01.
- [17] Kristof₂649. *Simple way to use USB Type-C to get 5V at up to 3A (15W)*. Online forum. DigiKey, čvn. 2020. URL: <https://forum.digikey.com/t/simple-way-to-use-usb-type-c-to-get-5v-at-up-to-3a-15w/>.
- [18] Agilent Technologies Inc. *33210A Waveform/Function Generator*. <https://www.keysight.com/us/en/product/33210A/33210a-waveform-and-function-generator.html>. Accessed: 2025-01-15.
- [19] LVGL Team. *LVGL - Light and Versatile Graphics Library*. Online. Accessed: 2025-06-01. URL: <https://lvgl.io/>.
- [20] Olimex. *ESP32-GATEWAY schematic REV.G*. Online. 2020. URL: https://github.com/OLIMEX/ESP32-GATEWAY/blob/master/HARDWARE/Hardware%20revision%20G/ESP32-GATEWAY%5C_Rev%5C_G.pdf.
- [21] Espressif Systems. *SPIFFS Filesystem*. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-reference/storage/spiffs.html>. Accessed: 2025-06-01.
- [22] BS-team. *Selected Best Progressive Web App (PWA) Frameworks in 2025*. Accessed: 2025-06-01. 2025. URL: <https://simicart.com/blog/pwa-frameworks/>.
- [23] Vue.js Team. *Vue.js Guide - Introduction*. Accessed: 2025-06-01. URL: <https://vuejs.org/guide/introduction.html>.
- [24] Rich Harris. “Rethinking Reactivity”. In: *Svelte Documentation* (2019). Accessed: 2025-06-01. URL: <https://svelte.dev/blog/svelte-3-rethinking-reactivity>.

- [25] PyVISA. *PyVISA*. Online. Python VISA library. URL: <https://pyvisa.readthedocs.io/en/stable/>.
- [26] PyMeasure. *PyMeasure*. Online. Python library for instrument control and data acquisition. URL: <https://pymasure.readthedocs.io/en/stable/>.
- [27] pyOCD. *pyOCD*. Online. Python OpenOCD library. URL: <https://pyocd.io/>.
- [28] STMicroelectronics. *STM32G474 Datasheet*. Online. Datasheet. Lis. 2021. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g474cb.pdf>.
- [29] Analog Devices. *Parameters that Affect Comparator Propagation Delay Measurements*. 2015. URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/parameters-that-affect-comparator-propagation-delay-measurements.html>.
- [30] Michal Dudka. *STM32G431 Comparator BUG*. STMicroelectronics Community Forum. 2024. URL: <https://community.st.com/t5/stm32-mcus-products/stm32g431-comparator-bug/m-p/675832>.
- [31] Marek Karlicek, Michal Dudka a Tomas Fryza. “A Comparator-Based Pulse Height Analyzer for Gamma Spectroscopy”. In: *2025 35th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. 2025, s. 1–5. DOI: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA65656.2025.11008409.

Seznam symbolů a zkratek

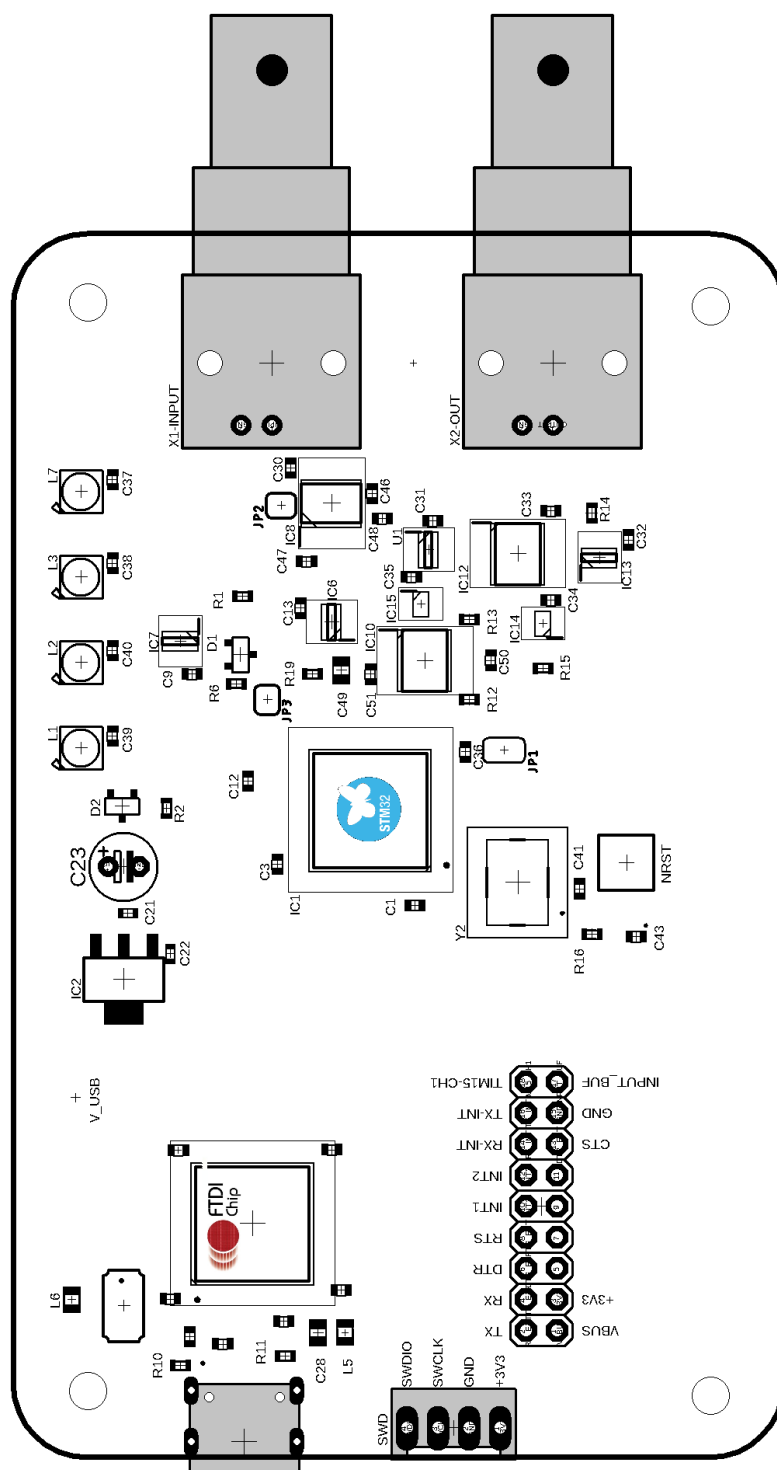
| | |
|-------------|--|
| ADC | analogově digitální převodník |
| API | rozhraní pro programování aplikací |
| CPLD | komplexní programovatelné logické zařízení |
| DAC | digitální analogový převodník |
| DIY | udělej si sám |
| DOM | Document Object Model |
| FPGA | napětím programovatelná hradlová pole |
| GUI | grafické uživatelské rozhraní |
| HTTP | hypertextový protokol |
| I2C | sběrnice sériové periférie |
| itr | signál přerušení |
| LED | světo-vyzařující dioda |
| LVGL | grafická knihovna s malým využitím paměti |
| MCA | multikanálový analyzátor |
| MCU | mikrokontrolér |
| MSPS | miliónů vzorků za sekundu |
| PCB | deska tištěných spojů |
| PHA | analyzátor výšek pulzů |
| PHY | fyzická vrstva |
| PMT | fotonásobič |
| PWM | modulace šířky pulzu |
| RAM | operační paměť, paměť s náhodným přístupem |
| REST | reprezentativní stavový přenos |
| RGB | červená, zelená, modrá |

| | |
|---------------|--|
| SiPMs | křemíkový fotonásobič |
| SPI | sběrnice sériové periférie |
| SPIFFS | file system intended for SPI NOR flash devices on embedded targets |
| SWD | Serial Wire Debug |
| TIM | časovač/čítač |
| UART | univerzální asynchronní přijímač/vysílač |
| USB | univerzální sériová sběrnice |
| UV | ultrafialový |
| UX | uživatelský zážitek |
| VCP | virtuální COM port |

Seznam příloh

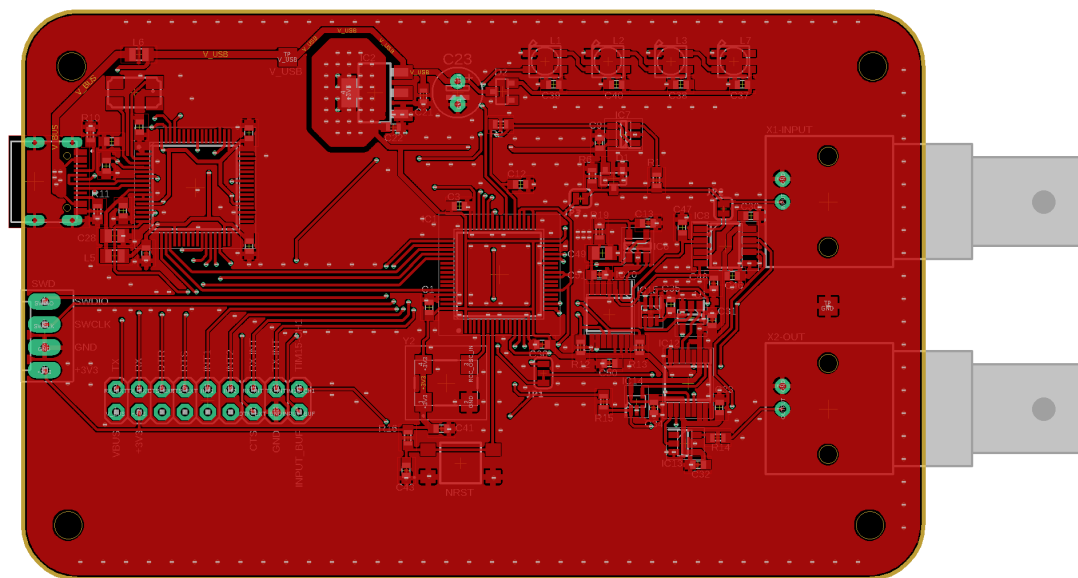
| | |
|---|----|
| A Osazovací výkres - hlavní deska | 45 |
| B Náhled rozložení spojů - hlavní deska | 46 |
| C Schémata zapojení - hlavní deska | 47 |
| D Schémata zapojení - uživatelská deska | 53 |
| E Obsah elektronické přílohy | 57 |
| F Tabulka endpointů | 58 |

A Osazovací výkres - hlavní deska

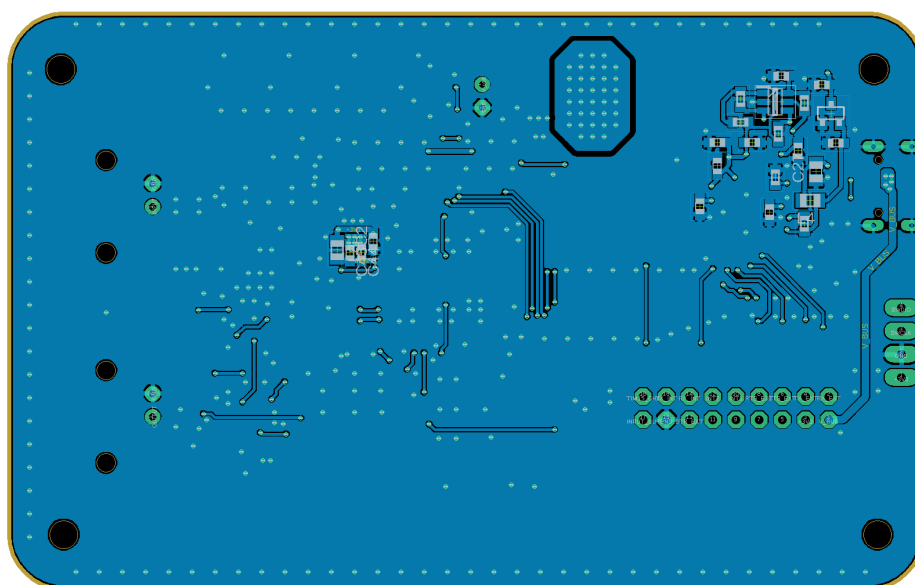


Obr. A.1: Osazovací výkres - hlavní deska

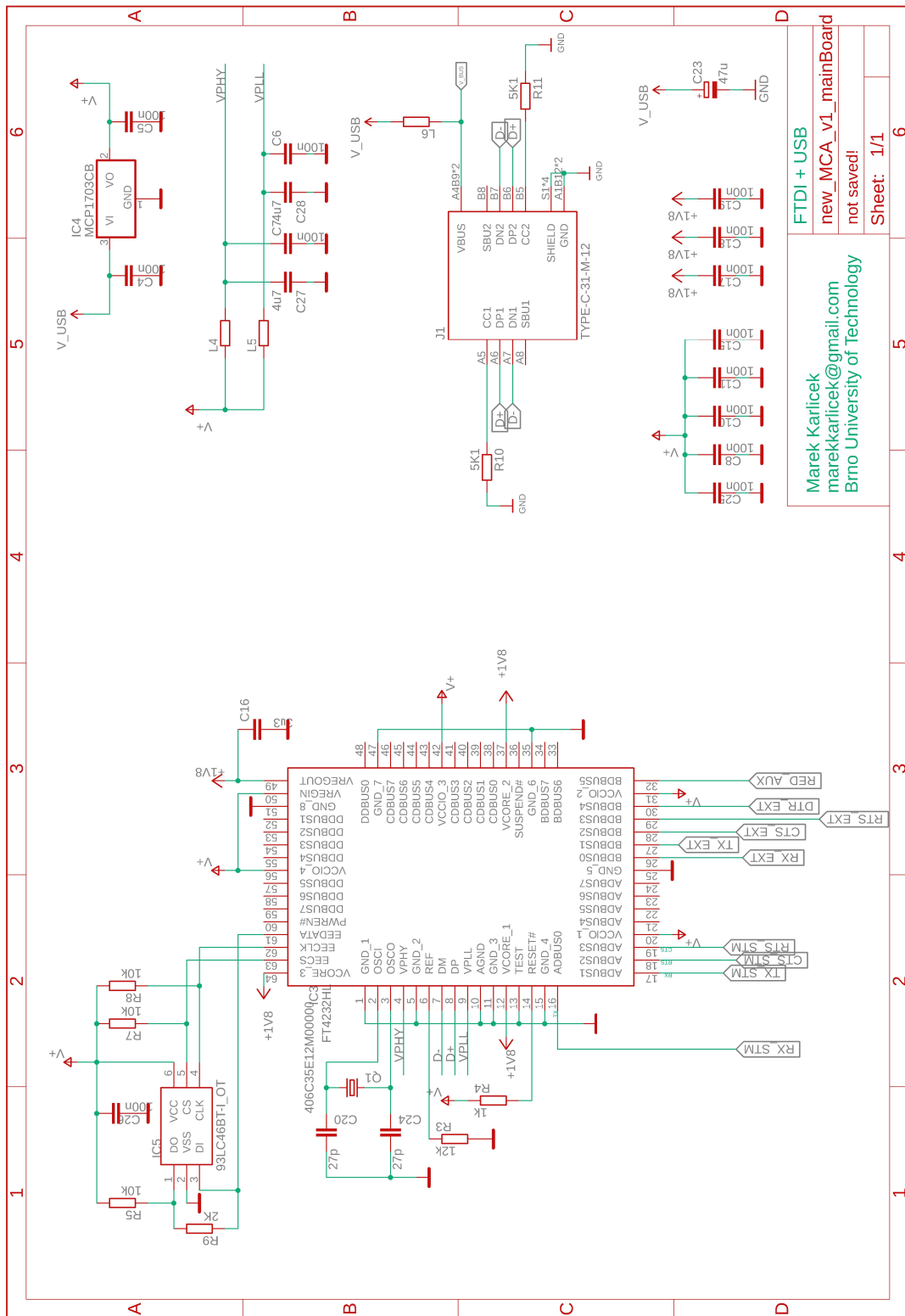
B Náhled rozložení spojů - hlavní deska



Obr. B.1: Rozložení spojů horní vrstva - hlavní deska



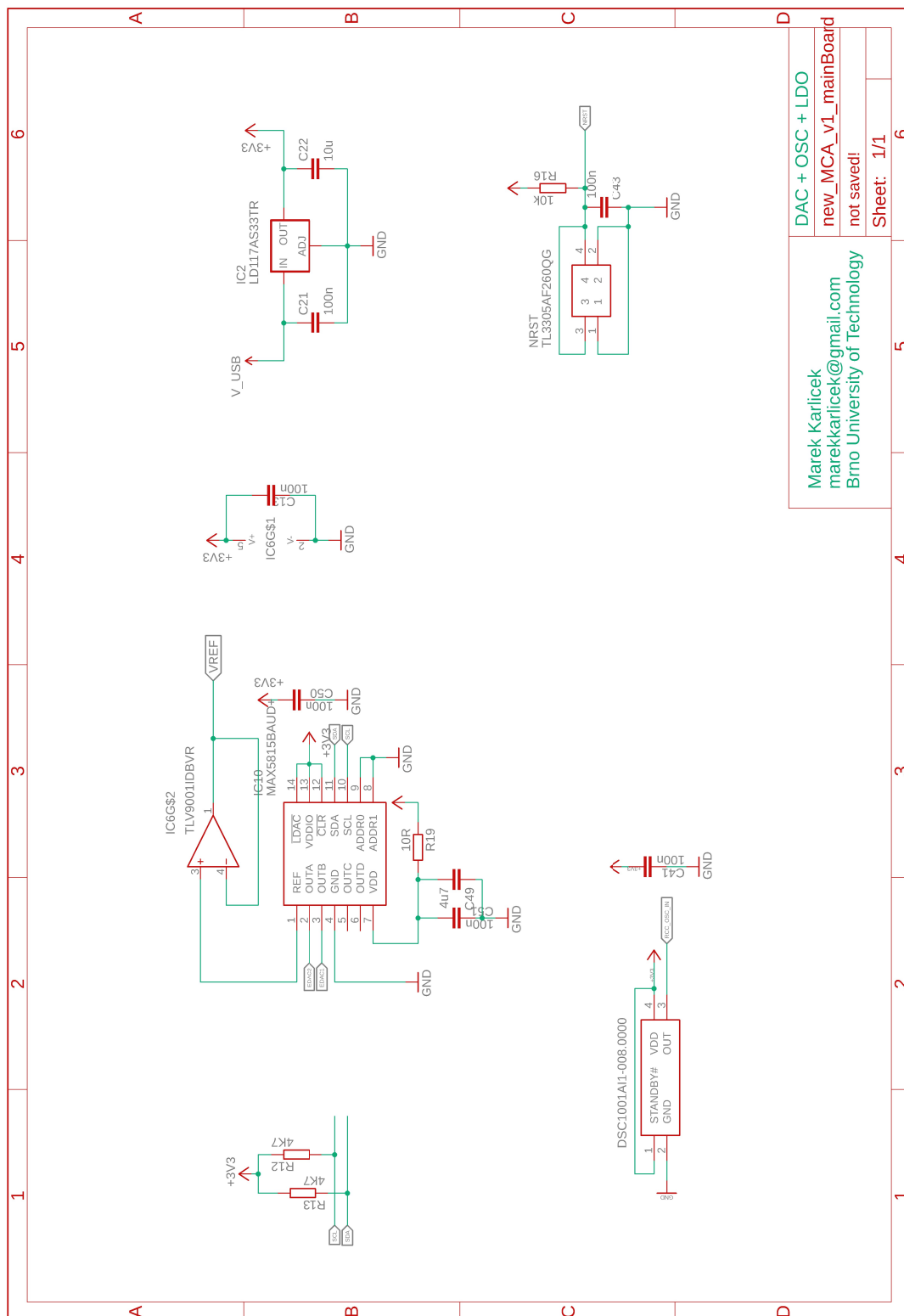
Obr. B.2: Rozložení spojů dolní vrstva - hlavní deska



FTDI + USB
 new_MCA_v1_mainBoard
 not saved!
 Sheet: 1/1

Marek Karlicek
 marekkarlicek@gmail.com
 Brno University of Technology

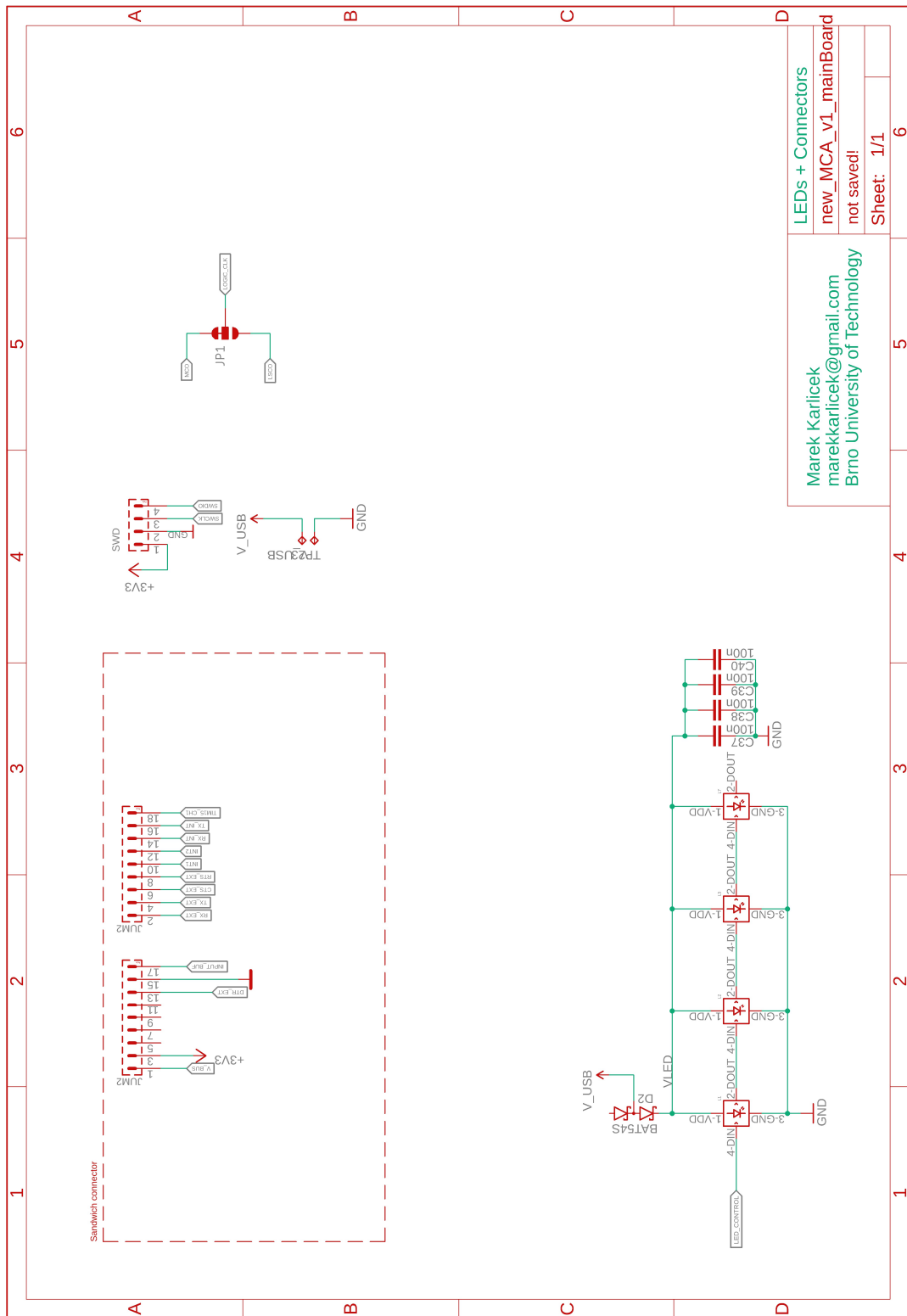
Obr. C.3: Schéma zapojení - hlavní deska 3/6



DAC + OSC + LDO
 new_MCA_v1_mainBoard
 not saved!
 Sheet: 1/1

Marek Karlicek
 marekkarlicek@gmail.com
 Brno University of Technology

Obr. C.5: Schéma zapojení - hlavní deska 5/6

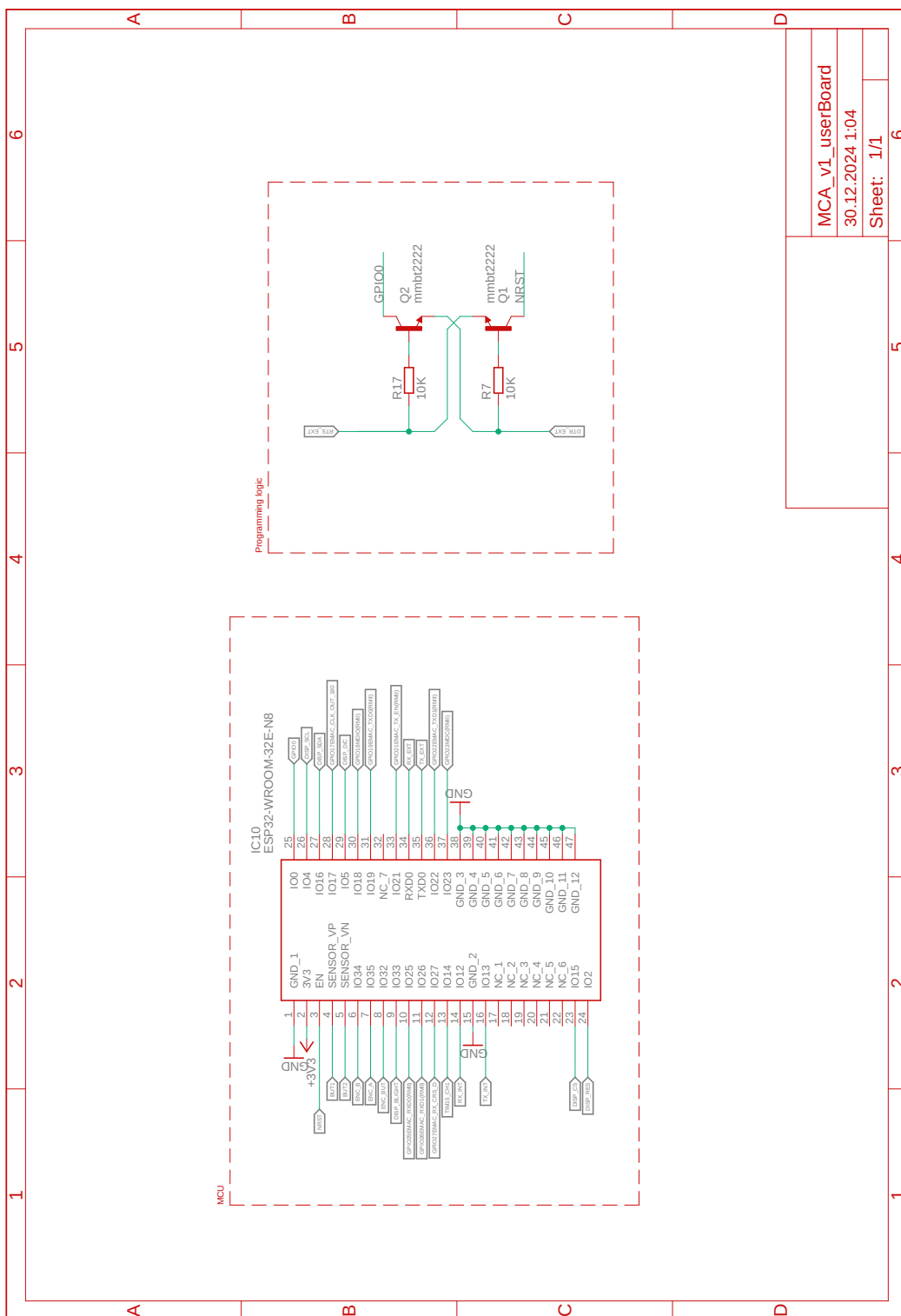


LEDs + Connectors
 new_MCA_v1_mainBoard
 not saved!
 Sheet: 1/1

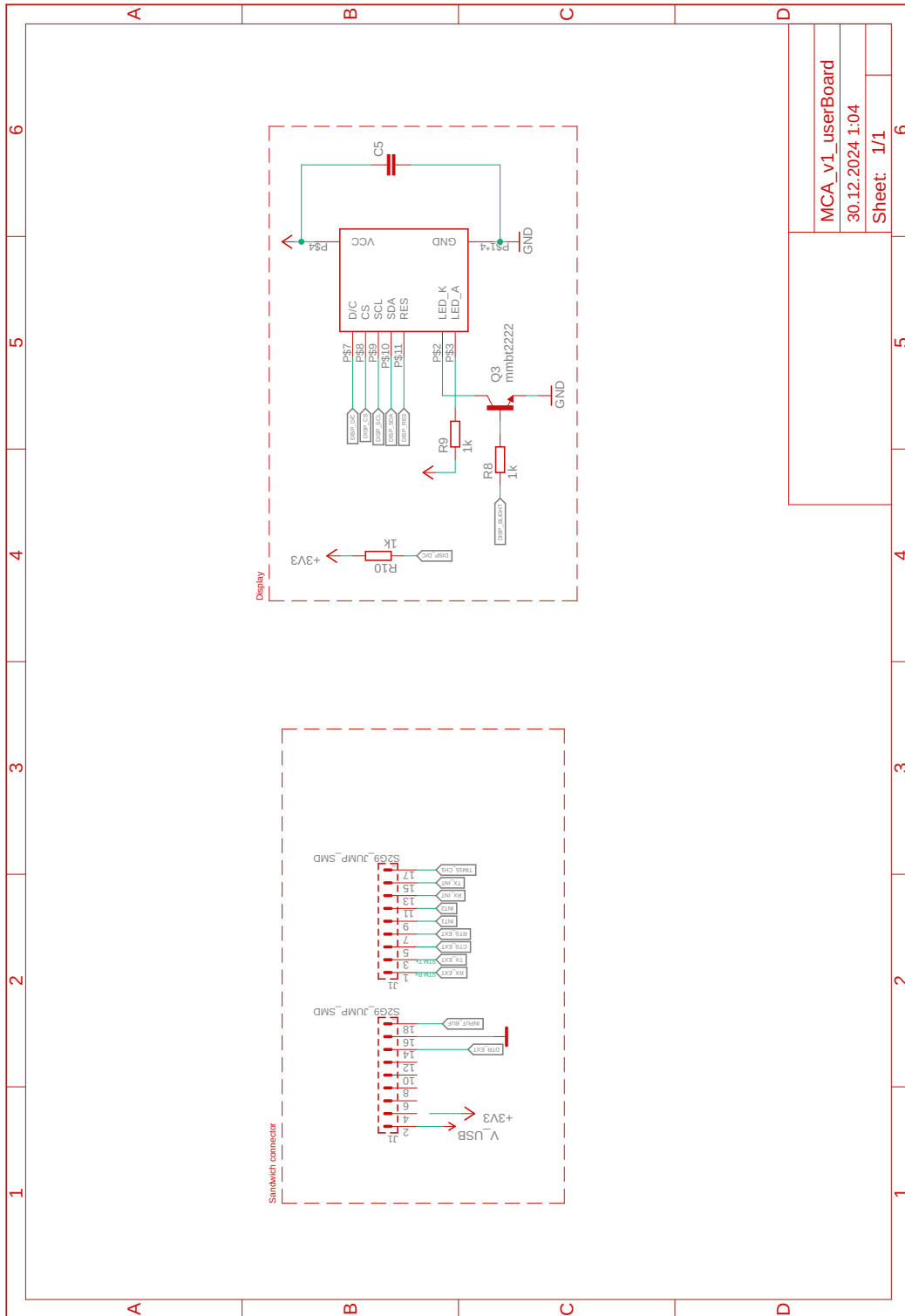
Marek Karlicek
 marekkarlicek@gmail.com
 Brno University of Technology

Obr. C.6: Schéma zapojení - hlavní deska 6/6

D Schémata zapojení - uživatelská deska

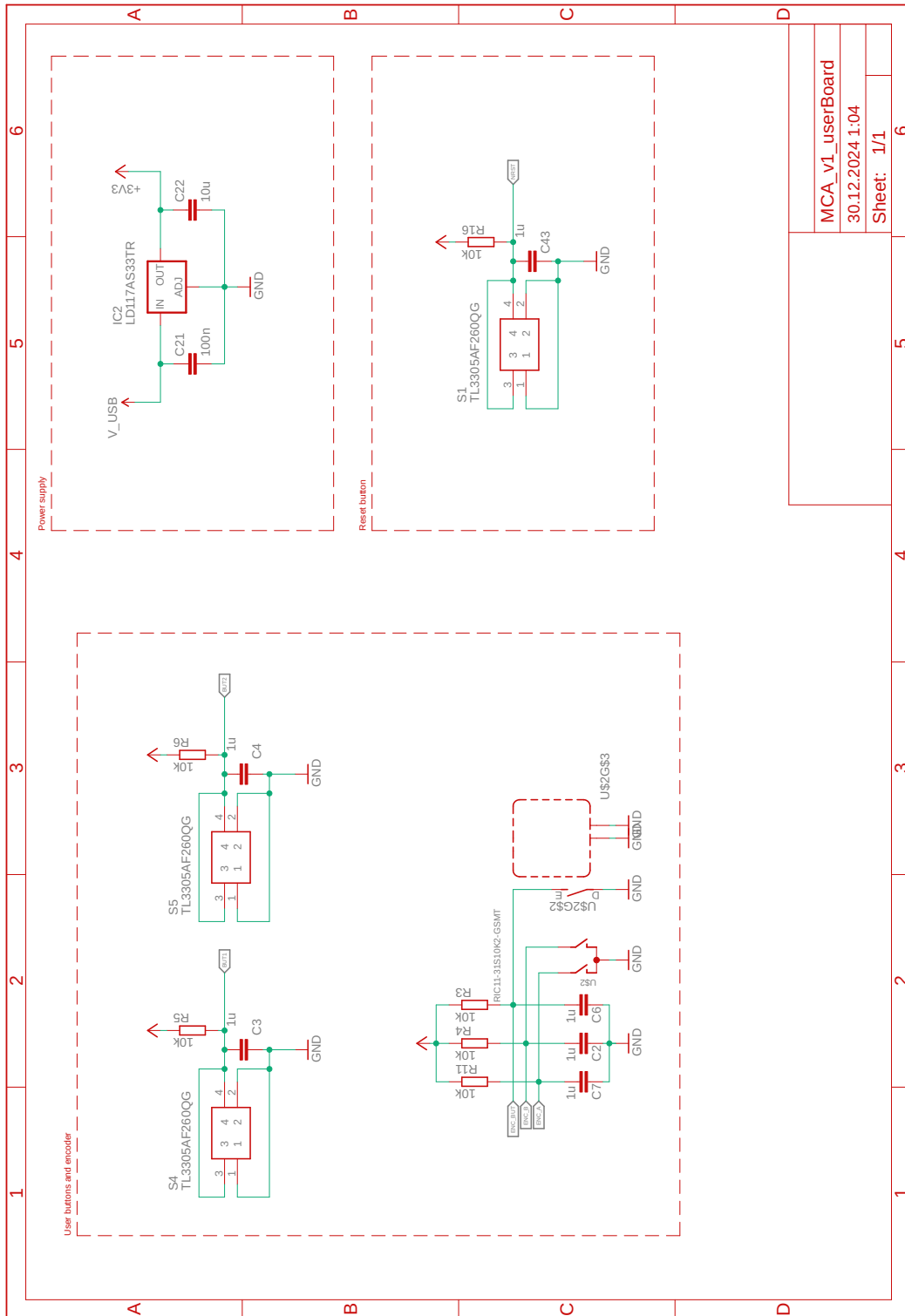


Obr. D.1: Schéma zapojení - uživatelská deska 1/4



| | |
|------------------|---|
| MCA_v1_userBoard | |
| 30.12.2024 1:04 | |
| Sheet: 1/1 | 6 |

Obr. D.2: Schéma zapojení - uživatelská deska 2/4



Obr. D.4: Schéma zapojení - uživatelská deska 4/4

E Obsah elektronické přílohy

| | |
|---|------------------------|
| Prilohy | kořenový adresář |
| ├── SW | software a skripty |
| │ ├── comparator_testing.ipynb | |
| │ └── histogram_api.py | |
| ├── FW | firmware pro obě desky |
| │ ├── ESP32-MCA-PIO Project.zip | |
| │ └── STM32 | |
| │ ├── Inc | |
| │ ├── main.h | |
| │ ├── MAX5815.h | |
| │ ├── serial.h | |
| │ ├── stm32g4xx_hal_conf.h | |
| │ ├── stm32g4xx_it.h | |
| │ ├── stm32_assert.h | |
| │ └── WS2812.h | |
| │ ├── Src | |
| │ ├── main.c | |
| │ ├── MAX5815.c | |
| │ ├── serial.c | |
| │ ├── stm32g4xx_hal_msp.c | |
| │ ├── stm32g4xx_it.c | |
| │ ├── syscalls.c | |
| │ ├── systemem.c | |
| │ ├── system_stm32g4xx.c | |
| │ ├── trash.c | |
| │ └── WS2812.c | |
| │ └── Startup | |
| │ └── startup_stm32g474rbtx.s | |
| └── HW | hardware dokumentace |
| ├── Gerber - mainBoard.zip | |
| ├── Gerber - userBoard.zip | |
| ├── mainBoard.brd | |
| ├── mainBoard.sch | |
| ├── Schematic - mainBoard.pdf | |
| ├── Schematic - userBoard.pdf | |
| ├── userBoard.brd | |
| └── userBoard.sch | |

F Tabulka endpointů

| Endpoint | Method(s) | Description | Parameters |
|-------------------|-----------|--|---|
| /data | GET, POST | Retrieves histogram data in JSON format. | None |
| /config | GET, POST | Configures histogram parameters. | start_value, stop_value, step_value |
| /start | GET, POST | Starts data generation for a specified period. | count_period (optional, for duration; infinite sampling if omitted) |
| /stop | GET, POST | Stops the data generation process. | None |
| /clear | GET, POST | Clears the histogram data. | None |
| /status | GET, POST | Retrieves the current status of the data generation process. | None |
| / or /index.html | GET | Serves the default HTML page from the SPIFFS filesystem. | None |
| Invalid endpoints | Any | Returns a 404 Not Found response if the requested file or endpoint is invalid. | None |

Tab. F.1: Summary of REST API Endpoints (Rotated)