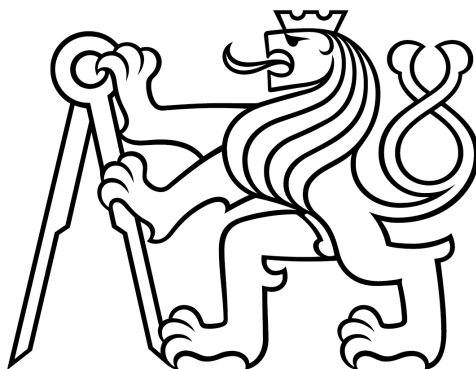


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY



Diplomová práce

Miniaturizované vyčítací rozhraní pro pixelový detektor radiace
Timepix 2

Ondřej Pavlas

Vedoucí: Ing. Záhlava Vít, CSc.

Studijní program: Elektronika a komunikace
Květen 2024

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Praha, dne

.....

podpis

Poděkování:

TODO poděkování

Abstract

TODO English abstract

Abstrakt

TODO Český abstrakt

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Pixelové detektory radiace a vyčítací zařízení | 2 |
| 2.1 | Princip činnosti pixelových detektorů | 2 |
| 2.2 | Vyčítací zařízení pro pixelové detektory | 3 |
| 2.2.1 | USB Lite | 3 |
| 2.2.2 | MiniPIX SPRINTER | 4 |
| 2.2.3 | Katherine pro Timepix 2 | 4 |
| 2.3 | Timepix 2 | 5 |
| 2.3.1 | Analogová část | 5 |
| 2.3.2 | Digitální část | 5 |
| 2.3.3 | Komunikační rozhraní | 7 |
| 2.3.4 | Technická specifikace | 8 |
| 3 | Návrh řešení | 11 |
| 3.1 | Koncept řešení | 11 |
| 3.1.1 | Výpočetní výkon | 11 |
| 3.1.2 | Komunikační rozhraní | 12 |
| 3.1.3 | Napájení | 12 |
| 3.1.4 | Mechanika | 12 |
| 4 | Realizace | 13 |
| 4.1 | Základní deska | 13 |
| 4.1.1 | Napájení | 13 |
| 4.1.2 | Mikrokontrolér | 15 |
| 4.1.3 | Konverze logických úrovní | 18 |
| 4.1.4 | USB | 18 |
| 4.2 | Deska s Timepix 2 | 18 |
| 4.2.1 | Timepix 2 | 18 |
| 4.2.2 | Vysokonapěťový zdroj | 18 |
| 4.2.3 | Měření teploty | 18 |
| 4.2.4 | Konektor | 18 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Testování | 19 |
| 5.1 | Napájení | 19 |
| 5.2 | Vysokonapěťový zdroj | 19 |
| 5.3 | Měření teploty | 19 |
| 5.4 | Komunikační rozhraní s Timepix 2 | 19 |
| 5.5 | Digitální test Timepix 2 | 19 |
| 5.5.1 | Vyčtení chip ID | 19 |
| 5.5.2 | Vyčtení a zapsání pixelových matic | 19 |
| 5.6 | USB komunikace | 19 |
| 5.7 | Měření spotřeby | 19 |
| 5.7.1 | Porovnání spotřeby | 19 |
| 5.8 | Dosažené parametry | 19 |
| 6 | Závěr | 20 |
| | Seznam použité literatury | 23 |
| | Seznam použitých symbolů | 24 |
| | Seznam použitých zkratk | 25 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4] | 3 |
| 2.2 | Vyčítací zařízení <i>USB lite</i> | 3 |
| 2.3 | Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER | 4 |
| 2.4 | Vyčítací zařízení Katherine pro Timepix 2 [8] | 4 |
| 2.5 | Detektor Timepix 2 [10] | 5 |
| 2.6 | Zpracování signálu na úrovni pixelů | 6 |
| 2.7 | Digitální módy Timepix 2 [12] | 6 |
| 2.8 | SLVS specifikace [14] | 7 |
| 2.9 | Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin $f_{clock} = 100$ MHz [2] | 7 |
| 2.10 | Rozložení detektoru Timepix 2 [2] | 9 |
| 2.11 | Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [20] | 10 |
| 3.1 | Koncept řešení vyčítacího rozhraní pro detektor Timepix 2 | 12 |
| 4.1 | Rozložení vrstev PCB základní desky | 14 |
| 4.2 | Popis vrstev PCB základní desky | 14 |
| 4.3 | Zapojení regulátoru MP2333H | 14 |
| 4.4 | Napájecí sekvence základní desky | 15 |
| 4.5 | Konfigurace a napájení STM32U5A9 | 17 |
| 4.6 | STM32U5A9 PCB realizace | 18 |

Seznam tabulek

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Napájecí úrovně Timepix 2 | 8 |
| 4.1 | Napájení základní desky vyčítacího rozhraní | 14 |
| 4.2 | Napájení mikrokontroléru STM32U5A9 | 17 |

Kapitola 1

Úvod

Kapitola 2

Pixelové detektory radiace a vyčítací zařízení

Mezi možnosti detekovat ionizující záření patří mimo jiné, použití pixelových detektorů. Pomocí pixelových detektorů, konkrétněji hybridních pixelových detektorů, jsme schopni detailně změřit ionizující záření. V dalších částech této kapitoly bude popsána obecná činnost a princip detekce radiace pixelových detektorů. V části 2.3, bude konkrétně popsán detektor z rodiny Timepix [1], detektor Timepix 2 [2].

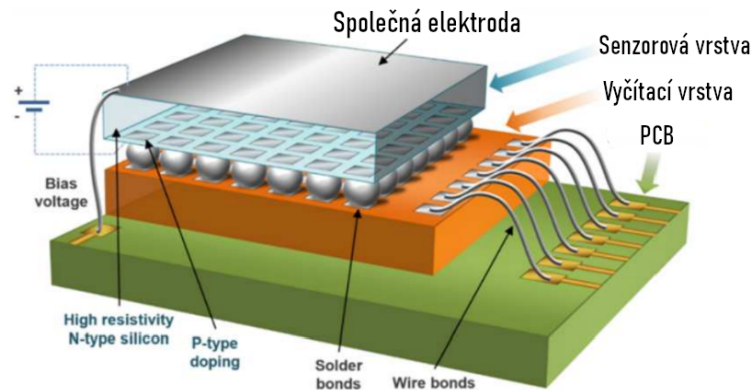
2.1 Princip činnosti pixelových detektorů

V této části bude popsán obecný princip činnosti pixelových detektorů, který je společný pro detektory radiace z rodiny Timepix [1], vyvíjenými pod záštitou CERN Medpipix Collaboration [3]. Pixelový detektor, přesněji hybridní pixelový detektor se skládá ze dvou oddělitelných částí, ze sensorové vrstvy a vrstvy s vyčítací elektronikou viz. obrázek 2.1. Právě toto rozdělení na sensorovou a vyčítací část označuje název hybridní detektor.

Senzorová vrstva je tvořena polovodičovým materiálem. Důležitými parametry sensorové vrstvy jsou typ polovodičového materiálu a její tloušťka. Nejčastěji používané materiály jsou Si, CdTe a GaAs. Na sensorovou vrstvu je připojené vysoké napětí, označované jako *bias voltage*. Toto vysoké napětí zajistí vyprázdnění oblasti v polovodičové struktuře sensorové vrstvy. Pokud částice ionizujícího záření interaguje v sensorové vrstvě, dojde k vytvoření náboje. Tento náboj je dále zpracován vyčítací elektronikou která je pomocí technologie nazývané *bump bond*, připojena k sensorové vrstvě.

Vyčítací vrstva (ASIC) je rozdělena na 256x256 individuálních pixelů. Každý pixel obsahuje potřebnou elektroniku ke zpracování náboje, vzniklého v sensorové vrstvě. Detailnější popis zpracování analogového náboje na úrovni jednotlivých pixelů, bude popsán pro konkrétní pixelový detektor Timepix 2 v části 2.3. Po analogovém zpracování signálu následuje digitální zpracování, poté je digitální signál převeden na výstupní plošky. Vyčítací vrstva je pomocí *wire bond* technologie připojena k desce plošných spojů. Signály

vedoucí z pixelových detektorů jsou následně zpracovány vyčítacím zařízením. Druhy vyčítacích zařízení budou popsány v části 2.2.



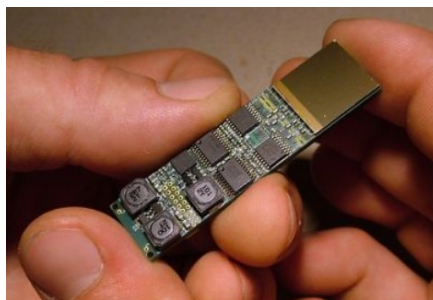
Obrázek 2.1: Rozložení hybridního pixelového detektoru Timepix [4]

2.2 Vyčítací zařízení pro pixelové detektory

Každý pixelový detektor z rodiny detektorů Timepix [1], má specifické požadavky pro návrh vyčítacího zařízení. Základními požadavky jakými jsou napájecí napětí detektoru a komunikační rozhraní s detektorem, musí být vždy splněny aby bylo možné spolehlivě komunikovat s pixelovým detektorem. Vyčítacích zařízení existuje celá řada. V této práci, respektive v následujících částech bude popsán návrh miniaturizovaného vyčítacího rozhraní. Pokusím se zde tedy uvést příklady miniaturizovaných zařízení.

2.2.1 USB Lite

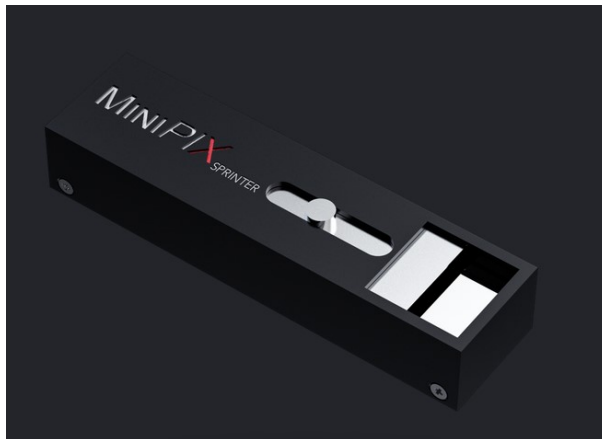
Dosud nejmenším vyčítacím zařízením rodiny detektorů Timepix [1], je zařízení *USB Lite* [5], viz. obrázek 2.2. Toto zařízení umožňuje komunikovat s detektorem Medipix 2 [6]. Rozměry zařízení jsou 60x15 mm. Rychlost vyčítání snímků je 4 fps a spotřeba zařízení je menší než 2 W [5].



Obrázek 2.2: Vyčítací zařízení *USB lite*

2.2.2 MiniPIX SPRINTER

Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER je vyvíjeno společností ADVACAM, zařízení je možné vidět na obrázku 2.3. Toto zařízení umožňuje komunikovat s detektorem Timepix 2 [2]. Rozměry zařízení jsou 50x21x14 mm. Rychlost vyčítání snímků je 99 [7].



Obrázek 2.3: Vyčítací zařízení MiniPIX SPRINTER

2.2.3 Katherine pro Timepix 2

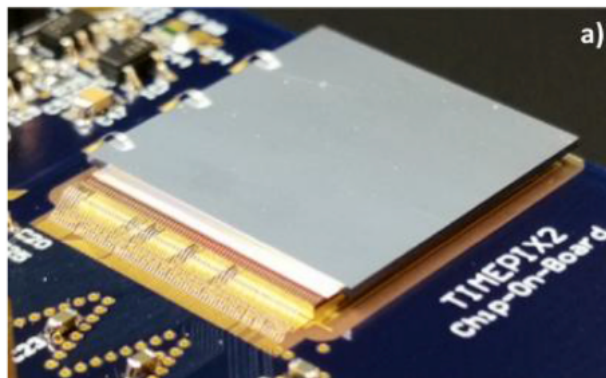
Posledním uvedeným tipem vyčítacího zařízení je zařízení Kathrine pro Timepix 2, které můžete vidět na obrázku 2.4. Toto vyčítací zařízení se od předchozích dvou uvedených liší ve velikosti a maximální rychlosti komunikace. Zařízení se skládá ze dvou částí. Samotným vyčítacím zařízením, na obrázku 2.4 vpravo a takzvaným *chipboardem*, na obrázku 2.4 vlevo. Část chipboardu obsahuje detektor Timepix 2 a napájecí zdroje potřebné pro provoz detektoru. Dále jsou ze propojeny signály z konektoru od vyčítacího zařízení po samotný Timepix 2. Výhodou tohoto modulárního zapojení je možnost modifikace chipboardové části, bez nutnosti změn na straně vyčítacího zařízení. Tedy existuje možnost k jednomu vyčítacímu zařízení, připojit různé chipboardy. Parametry samotného vyčítacího zařízení jsou následující. Rozměry 100x80x28 mm, rychlost vyčítání až 3.2 Gbps [8].



Obrázek 2.4: Vyčítací zařízení Katherine pro Timepix 2 [8]

2.3 Timepix 2

V předchozí části 2.1, byly popsány obecné vlastnosti detektoru a základní principy detekce ionizujícího záření. V této kapitole bude detailněji popsán konkrétní detektor, detektor Timepix 2 [2]. Detektor byl vyvinut pod záštitou CERN Medipix Collaboration [3]. Timepix 2 patří do rodiny detektorů Timepix. Prvním z rodiny detektorů byl detektor Timepix [1], následně to popořadě byly detektory Timepix 3 [9], Timepix 2 [2], [10] a nejnovějším detektorem je Timepix 4 [11]. Detektor Timepix 2 je zobrazen na obrázku 2.5.



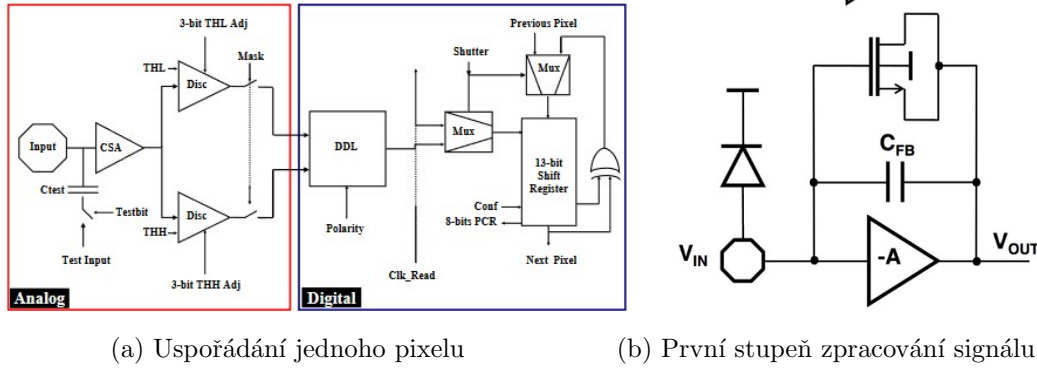
Obrázek 2.5: Detektor Timepix 2 [10]

2.3.1 Analogová část

Každý pixel z matice 256x256 pixelů má vlastní analogovou část. Jak bylo zmíněno v kapitole 2, pokud částice interaguje na senzorové vrstvě dojde k vytvoření nábojového impulsu. Tento náboj je díky připojenímu napětí přitážen k elektrodám. Tento náboj může být charakterizován jako Diracův proudový impuls. Integrací Diracovo proudového impulsu dostaneme celkový generovaný náboj Q . Diracův impuls je naintegrovan do malého kapacitoru C_f . Poté na výstupu CSA je v ideálním případě napěťový skok s amplitudou Q/C_f viz. 2.6b. Výstupní puls je poté porovnán s prahovou úrovní. Nastavením prahové úrovně lze eliminovat zbytkový proud, takzvaný *leakage current*, závěrného směru polovodičové struktury, který zde vznikl kvůli připojenímu vysokému napětí. Pokud je signál větší než daná nastavená úroveň, je inkrementován digitální čítač [1]. Každý diskriminátor obsahuje 5-bitový DAC převodník. Tento 5 bitový DAC převodník umožňuje nastavit úroveň detekovatelného signálu pro každý pixel individuálně a tím eliminovat šum. Uspořádání pro analogovou část lze vidět na obrázku 2.6a, kde je zobrazeno uspořádání jednoho pixelu detektoru Medipix 2.

2.3.2 Digitální část

Každý pixel obsahuje čtyři digitální čítače typu LSFR. Každý n -bitový čítač generuje 2^n pseudonáhodných čísel. V případě Timepix 2 každý pixel obsahuje dva 10-bitové (A,B) a



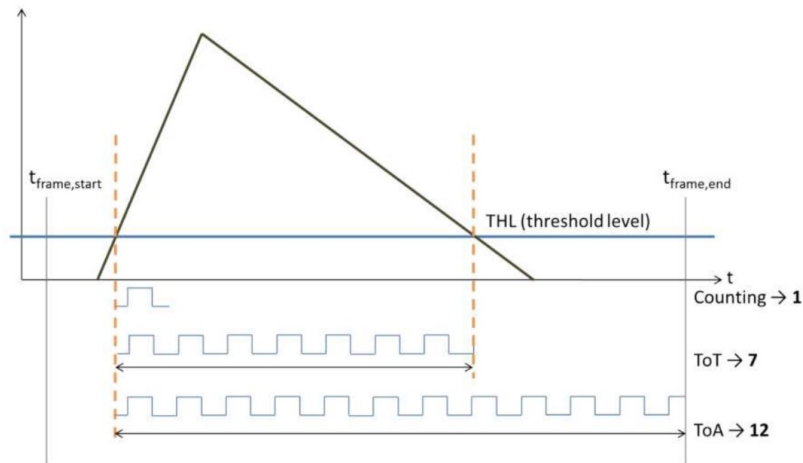
Obrázek 2.6: Zpracování signálu na úrovni pixelů

dva 4-bitové (C,D) čítače. Například tedy 14-bitový čítač vznikne kombinací 10-bitového a 4-bitového čítače. Odpovídající 14-bitová hodnota je poté viz 2.1. Celkem tedy pro každý pixel lze využít 28-bitů. Tyto čítače mohou pracovat v různých módech. Tyto módy budou probrány v další části.

$$14 - bit = (hodnota_{4-bit} \times 2^{10}) + hodnota_{10-bit} \quad (2.1)$$

Jak bylo zmíněno výše. Každý z digitálních čítačů může být nakonfigurován do jiného módu. Pro Timepix 2 jsou to následující módy 2.7.

- **Time over Threshold (ToT):** Čítač je inkrementován při každém hodinovém pulsu, kdy je signál nad nastavenou prahovou úrovní
- **Time of Arrival (ToA):** Čítač je inkrementován při každém hodinovém pulsu, kdy signál překročí nastavenou úroveň a inkrementuje se až do konce akvizice.
- **Counting mode:** Čítač je inkrementován pokud signál překročí dvakrát nastavený práh, viz. obrázek 2.7



Obrázek 2.7: Digitální módy Timepix 2 [12]

Jakou energii interagující částice zanechala v senzoru můžeme zjistit z ToT měření. Počet hodinových cyklů odpovídá času, po který hodnota analogového napětí byla nad nastavenou detekovatelnou úrovní. Více o způsobu měření energie například viz. [13].

2.3.3 Komunikační rozhraní

Logické úrovně

Timepix 2 umožňuje komunikaci po paraelním nebo sériovém datovém kanálu. Pro komunikaci přes paraelní bránu je možno využít 32 paraelních vodičů. Paraelní brána dosahuje násobně vyšších přenosových rychlostí, než sériový kanál, viz. obrázek 2.9. Dosažením takovýchto rychlostí je zapotřebí na straně vyčítací elektroniky použít velmi rychlé rozhraní, například FPGA.

Veškerá sériová komunikace probíhá po diferenciálních datových párech. Konkrétně se jedná o specifikaci SLVS [14]. Napěťové úrovně této specifikace lze najít na obrázku 2.8. Jak lze na obrázku 2.8 vidět, specifikace SLVS je analogická se specifikací LVDS [15]. Výhody sériové komunikace jsou především v návrhu a spotřebě vyčítacího zařízení. Maximální datové rychlost, respektive rychlost komunikačních hodin je dle [2] 100 Mhz. Lze tedy pro návrh použít například mikroprocesor. Hlavní nevýhodou sériové komunikace je oproti paraelní komunikaci vyčítací rychlost, která je násobně nižší 2.9.



Obrázek 2.8: SLVS specifikace [14]

| # bits/pixel | Full Frame, serial port | | Full frame, parallel port | |
|--------------|-------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | t_{read} [ms] | framerate [fps] | t_{read} [ms] | framerate [fps] |
| 4 | 2.62 | 381 | 0.08 | 12207 |
| 10 | 6.55 | 153 | 0.20 | 4883 |
| 14 | 9.18 | 109 | 0.29 | 3488 |
| 28 | 18.35 | 54 | 0.57 | 1744 |

Obrázek 2.9: Vyčítací rychlosti snímků z Timepix2. Frekvence hodin $f_{\text{clock}} = 100$ MHz [2]

Struktura komunikace

V této podkapitole bude popsána struktura komunikace s Timepix 2 za použití sériové komunikace popsané v 2.3.3. Komunikace s Timepix 2 se rozděluje na příkazy SET a GET. Příkazy SET nastavujeme příslušný registr a příkazy GET daný registr vyčítáme.

2.3.4 Technická specifikace

Timepix 2 je rozdělen do 256 x 256 pixelů. Rozteč mezi jednotlivými pixely je 55 μm . Celkově pak Timepix 2 má rozměry 16.6 x 14.14 mm. Vyčítací část detektoru tvoří ASIC chip navržen ve 130 nm CMOS technologii. Samotná výroba ASIC je zajišťována jedním z předních výrobců chipů, firmou TSMC [16] na Taiwanu. Všechny technické informace, nebude-li uvedeno jinak jsou čerpány z manuálu k detektoru Timepix 2 [2].

Napájení

Timepix 2 ke své činnosti potřebuje celkem 3 napájení viz. tabulka 2.1. Napájení VDD a VDDA slouží k napájení jádra Timepix 2, napájení VDDIO pak k napájení vstupních výstupních bran. Pokud chceme z Timepix 2 vyčíst CHIP ID, musíme na pin VDD33 aplikovat napájecí napětí 2.5 V. Při normální činnosti detektoru, je požadováno napětí 1.2 V. Celková spotřeba Timepix 2 při zapnutí všech pixelů a frekvenci datových hodin $f_{\text{clock}} = \text{Mhz}$ je dle [10] nižší než 900 mW.

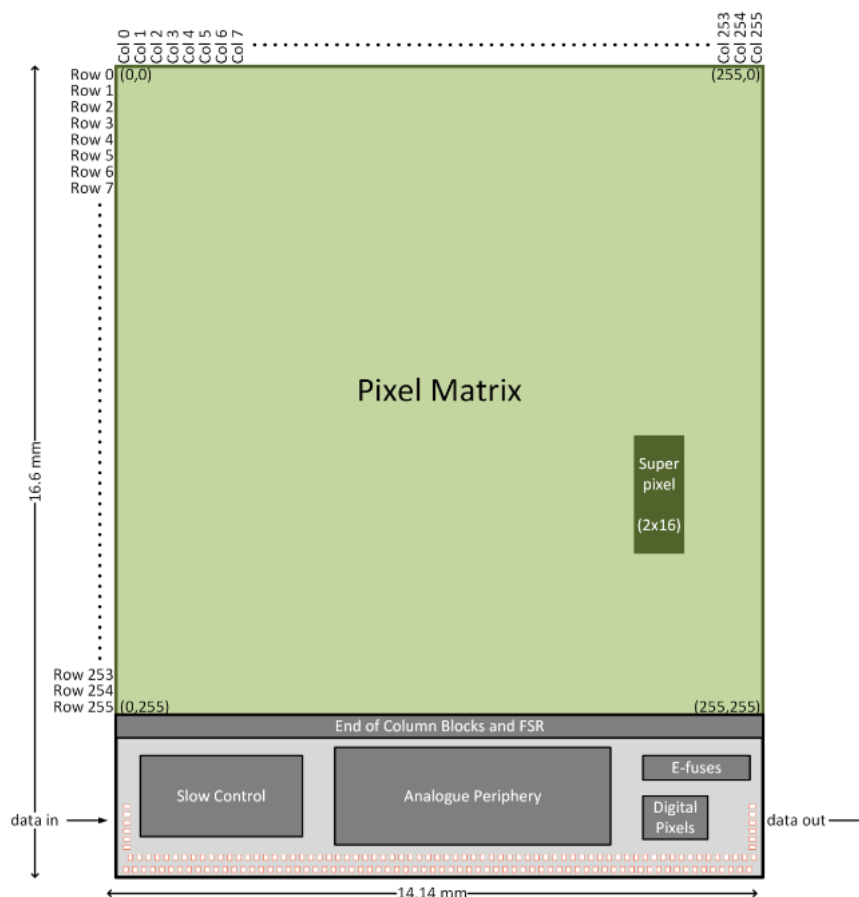
| Napájecí úrovně Timepix 2 | |
|---------------------------|----------------------------------|
| Název pinu | Hodnota napájecího napětí [V] |
| VDDIO | 2.5 |
| VDD | 1.2 |
| VDDA | 1.2 |
| VDD33 | 2.5 (1.2) |

Tabulka 2.1: Napájecí úrovně Timepix 2

Speciální kategorií napájení je napájení pro zajištění vysokého napětí, které se připojí na senzorovou vrstvu. Toto napětí zajistí vyprázdnění oblasti v polovodičové struktuře. Požadavky na parametry vysokého napětí záleží na typu a tloušťce senzorové vrstvy. Nejčastěji používaným materiálem senzorové vrstvy je křemík. Příklad vysokého napětí, které bylo použito pro testování Timepix 2 se senzorovou vrstvou křemíku o tloušťce 500 μm dle [17] bylo 100 V. Další příklady velikosti vysokého napětí používaných pro různé senzorové vrstvy lze najít v odkazech [18], [19]. Důležitou vlastností vysokonapěťových zdrojů je možnost nastavení výstupního vysokého napětí v určitém rozsahu.

Rozhraní pro připojení Timepix 2 k desce plošných spojů

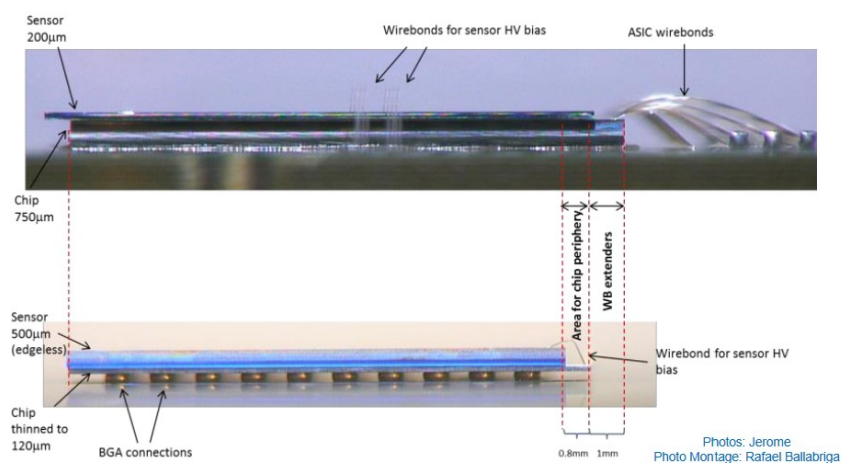
Připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je nejčastěji realizováno pomocí technologie *wire bonding*. Timepix 2 má celkem 152 pinů pro přichycení wire bondů. Rozložení pinů je zobrazeno na obrázku 2.10 ve spodní části. Rozteč mezi jednotlivými plošky je $108\ \mu\text{m}$. Dalším možným způsobem připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je pomocí



Obrázek 2.10: Rozložení detektoru Timepix 2 [2]

technologie zvané TSV. Respektive pomocí této technologie je možné signály vyvést ze zadní strany Timepix 2 k pájecím ploškám. Vznikne tím tak uspořádání, známe z technologie výroby pouzder BGA elektronických součástek.

Běžnější způsob připojení Timepix 2 k desce plošných spojů je pomocí wire bondů. Použití wire bondů i technologie BGA je možné vidět na obrázku 2.11. Výhodou oproti technologii wire bondů je lepší praktické zacházení, díky absenci tenkých wire bondů, které jsou velmi náchylné na mechanické poškození. Další výhodou je poté technologicky méně náročné připojení detektoru. Avšak nevýhodou této technologie je vystavení chipu vysoké teplotě při pájení.



Obrázek 2.11: Připojení detektoru Timepix 2 k desce plošných spojů [20]

Kapitola 3

Návrh řešení

Návrh řešení musí brát ohled na primární požadavky, které zařízení musí splňovat, aby byla zajištěna základní funkčnost zařízení. Tyto požadavky byly popsány v části 2.3.4. Dalšími požadavky na zařízení je miniaturizace vyčítacího rozhraní, tento požadavek stanovuje zadní diplomové práce. V této části budou popsány obecné požadavky na návrh rozhraní a dále v 4 bude podrobněji popsán výběr konkrétních součástek a návrh zapojení rozhraní.

3.1 Koncept řešení

Navržený koncept vyčítacího rozhraní je zobrazen na obrázku 3.1. Koncept se skládá ze dvou desek plošných spojů (PCB). Toto rozložení bylo navrženo s ohledem na požadavky miniaturizace celého zařízení a také s ohledem na variabilitu zařízení. Nebo-li například možnosti připojit k jedné základní desce různé chipboardy, respektive například připojit chipboard, s různým typem senzorové vrstvy detektoru Timepix 2.

Prvním PCB je takzvaná *základní deska*. Na této desce je implementováno většina funkcionalit potřebných pro komunikaci s detektorem Timepix 2. Dále je zde implementována USB komunikace, která slouží pro komunikaci rozhraní přes USB.

Druhou deskou plošných spojů je *chipboard*, na této desce se nachází samotný detektor Timepix 2. Dále je zde implementován vysokonapěťový (HV) zdroj a měření teploty.

3.1.1 Výpočetní výkon

Komunikace s Timepix 2

Pro komunikaci s Timepix 2 je možné využít sériové, nebo paralelní komunikace, jak již bylo zmíněno v části 2.3.3. Pro tuto práci uvažujeme využití pouze sériové komunikace. Maximální vyčítací rychlost z detektoru Timepix 2 je 100 Mb/s. S ohledem na tuto maximální rychlost vyčítání dat z Timepix 2 musí být vybrán vhodný mikrokontrolér pro obsluhu komunikace.



Obrázek 3.1: Koncept řešení vyčítacího rozhraní pro detektor Timepix 2

3.1.2 Komunikační rozhraní

Komunikační rozhraní pro tuto práci bylo zvoleno rozhraní USB konkrétněji standart USB 2.0 High Speed. Tento standart umožňuje komunikovat maximální rychlostí až 480 Mbit/s. S respektem na rychlost vyčítání dat z detektoru Timepix 2 je tato rychlost dostačující.

3.1.3 Napájení

Pro napájení detektoru Timepix 2 jsou dle 2.1 jsou zapotřebí dvě napájecí napětí. Napájecí zdroje musí být vhodné pro maximální odběr detektoru Timepix 2, která by neměla být větší než 900 mW.

Dalším potřebným napájením je napájení mikrokontroléru. Toto napájení je závislé na konkrétním typu mikrokontroléru. Detailnější informace o výběru mikrokontroléru budou v části 4.

3.1.4 Mechanika

Návrh rozhraní je rozložen do dvou desek plošných spojů spojenými konektorem. Při návrhu mechanické části zařízení musí být zajištěna mechanická odolnost vůči poškození, možnost se na rozhraní připojit pomocí konektoru a především musí být zajištěn odvod tepla od objektů, které mají největší výkon. Těmito objekty jsou především Timepix 2, mikrokontrolér a napájecí zdroje.

Kapitola 4

Realizace

V této části bude popsána detailní realizace celého zařízení. V předchozích částech byly zmíněny základní požadavky na návrh celého vyčítacího rozhraní. Při výběru individuálních částí rozhraní byly tyto části respektovány. Dále jednotlivé části byly vybírány s ohledem na miniaturizaci rozhraní a spotřebu. Cílem návrhu bylo pokud co možno nejvíce funkčních bloků implementovat na základní desce. Prvním důvodem bylo, že druhá deska plošných spojů (chipboard) obsahuje detektor Timepix 2, který je v celém návrhu nejdůležitější a nejsložitější částí. Pokud by bylo vše implementováno na jedné desce plošných spojů, při jakémkoliv problému musí být vyměněna celá deska i s detektorem Timepix 2. Přitom při rozložení rozhraní na dvě desky plošných spojů dojde při případném problému k výměně jen základní desky.

Druhým důvodem rozložení rozhraní na dvě desky plošných spojů je minimalizace rozměrů rozhraní. Za použití konektoru celé rozhraní zvýší své rozměry pouze na výšku o 3 mm přitom rozměry chipboardové desky mohou být stejné jako desky základní.

4.1 Základní deska

Základní deska je navržena na šesti vrstevém plošném spoji. Využití jednotlivých vrstev lze vidět na obrázku 4.2. Celková tloušťka výsledného PCB je dle celkové skladby z obrázku 4.1, 1.6 mm. Vnější rozměry základní desky jsou 53 x 17 mm.

4.1.1 Napájení

Na základní desce je realizováno veškeré napájení, které je dále používáno pro celé vyčítací rozhraní. Celkem jsou zde tři spínané synchronní buck regulátory. Konkrétně se jedná o regulátor MP2333H [21] od společnosti Monolithic Power Systems. Regulátor pracuje v rozsahu vstupních napětí od 4.2 - 18 V. maximální výstupní proud jsou 3 A, spínací frekvence regulátoru je 1.2 MHz. Regulátor je možné pořídit v pouzdře SOT583, s rozměry 1.6x2 mm, které jsou pro úlohu minimalizace zařízení vyhovující. V tabulce 4.1 můžete vidět seznam napětí dostupných na základní desce. Všechny napájení uvedené v tabulce

| # | Name | Material | Type | Thickness |
|---|----------------|---------------|-------------|-----------|
| | Top Overlay | | Overlay | |
| | Top Solder | Solder Resist | Solder Mask | 0.0308mm |
| 1 | Top Layer | | Signal | 0.035mm |
| | Prepreg1 | PP-006 | Prepreg | 0.0994mm |
| 2 | GND | CF-004 | Signal | 0.0152mm |
| | Core1 | PP-006 | Prepreg | 0.55mm |
| 3 | Signal | CF-004 | Signal | 0.0152mm |
| | Prepreg2 | FR-4 | Dielectric | 0.1088mm |
| 4 | PWR | CF-004 | Signal | 0.0152mm |
| | Core2 | PP-006 | Prepreg | 0.55mm |
| 5 | GND1 | CF-004 | Signal | 0.0152mm |
| | Prepreg3 | PP-006 | Prepreg | 0.0994mm |
| 6 | Bottom Layer | | Signal | 0.035mm |
| | Bottom Solder | Solder Resist | Solder Mask | 0.0308mm |
| | Bottom Overlay | | Overlay | |

Obrázek 4.1: Rozložení vrstev PCB
základní desky

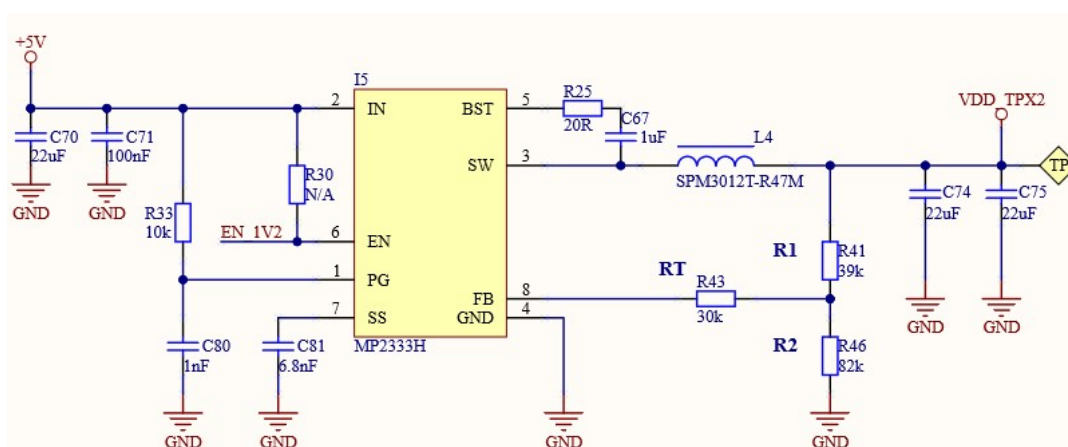
| Rozložení vrstev PCB základní desky | |
|-------------------------------------|------------------|
| Vrstva | Popis |
| 1 - TOP | Signálová vrstva |
| 2 - GND1 | Zemní vrstva |
| 3 - SIG | Signálová vrstva |
| 4 - PWR | Napájecí vrstva |
| 5 - GND2 | Zemní vrstva |
| 6 - BOT | Signálová vrstva |

Obrázek 4.2: Popis vrstev PCB základní desky

| Napájení základní desky vyčítacího rozhraní | |
|---|--|
| Napájení | Popis |
| +5V | Externí napájení vyčítacího rozhraní přes USB typu C. |
| +3V3 | Napájení pro mikrokontrolér, CPLD a další 3.3V periférie |
| +2V5 | Napájení vstupní a výstupní brány detektoru Timepix 2 |
| +1V2 | Napájení jádra Timepix 2 a vstupní/výstupní brány CPLD. |

Tabulka 4.1: Napájení základní desky vyčítacího rozhraní

4.1 jsou dostupné také na druhé desce, chipboardu. Více o propojení základní desky a chipboardové desky v části 4.2.4. Ukázkové zapojení jednoho ze tří spínaných regulátorů, můžete vidět na obrázku 4.3. Konkrétně se jedná o zapojení, při kterém regulátor reguluje +5 V napájení na napájení +1.2 V.



Obrázek 4.3: Zapojení regulátoru MP2333H

Napájecí sekvence

Napájecí sekvenci je možné vidět na zjednodušeném diagramu na obrázku ?? . Po připojení USB typu C do konektoru na základní desce je dostupné napájení +5 V. Těchto +5 V spíná první regulátor, který generuje na výstupu +3.3 V napájení. Pokud je toto výstupní napájení +3.3 V v pořádku, integrovaný obvod tuto informaci signalizuje pomocí pinu PG. Právě tento pin PG, signál PG_3V3, je připojen na vstupní pin dalšího regulátoru v sérii a to na pin regulátoru generující výstupní napětí +2.5 V. Poslední regulátor s výstupním napětí +1.2 V je řízený z mikrokontroléru, jeho vstupní pin EN je propojen signálem EN_1V2 s výstupní bránou mikrokontroléru.



Obrázek 4.4: Napájecí sekvence základní desky

Výstupní napětí spínaného regulátoru je nastaveno pomocí napěťového děliče ve zpětné vazbě regulátoru a dáno vztahem dle 4.1. Kde $V_{REF} = 805 \text{ mV}$.

$$V_{OUT} = \frac{R1 \cdot V_{REF}}{R2} + V_{REF} \quad (4.1)$$

Z obrázku 4.4 je vidět, že spínaná stabilizátory pro +3.3 V a +2.5 V nejsou programově ovladatelné z mikrokontroléru. Spínaný stabilizátor +3.3 V, z mikrokontroléru řídit nelze, protože právě těchto +3.3 V je napájením pro vybraný mikrokontrolér. Možností jakým mimo jiné zajistit dodržení vhodného časování napájecí sekvence základní desky, je propojení PG signálu stabilizátoru +3.3 V na signál EN stabilizátoru +2.5 V. Další možností rozfázování napájecí sekvence je volba vhodného kondenzátoru mezi pinem SS a zemním pinem ze zapojení 4.3. Kde $V_{REF} = 805 \text{ mV}$ a $I_{SS} = 7.3 \mu\text{A}$.

$$T_{SS} [ms] = \frac{2V_{REF} \cdot C_{SS} [nF]}{I_{SS}} \quad (4.2)$$

Ze zapojení 4.3 a dosazení do vzorce 4.2 můžeme dopočítat, že rozběhový čas spínaného zdroje bude 1.4 ms.

Ochrana vstupního napájení bude popsána v části 4.1.4. Pouze ve shrnutí, pokud dojde k jakýmkoliv podmínkám které by mohli elektricky ohrozit vyčítací rozhraní obvodu z části 4.1.4 zajistí vypnutí napájení pomocí externího tranzistoru.

4.1.2 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér pro tuto práci byl vybrán od firmy STMicroelectronics, přesněji mikrokontrolér s označením STM32U5A9NJH6Q [22]. Právě tento mikrokontrolér byl vybrán s ohledem na požadavky vyčítacího rozhraní. V následující části budou uvedeny nejdůležitější parametry vybraného mikrokontroléru:

- Jádru : Arm 32-bit Cortex-M33 s DSP a FPU. Frekvence 160 MHz
- Napájení 1.7 - 3.6 V
- Při provozu 18.5 μ A/MHz
- 4-Mbyte flash s EEC
- 2514-Kbyte RAM, 66 Kbytes s EEC
- 25 Komunikačních periférií
- 156 konfigurovatelných vstupních/výstupních pinů
- 1 USB OTG high-speed s embedded PHY
- Pouzdro : TFBGA216. 13 x 13 mm, 0.8 mm mezi pájecími plošky

Prvním požadavkem na mikrokontrolér bylo, aby bylo možné komunikovat přes sériovou datovou linku s detektorem Timepix 2. V již popsané části textu [2.3.3](#), bylo zmíněno, že Timepix 2, dokáže komunikovat po sériové lince s maximální frekvencí 100 Mhz. Výše popsaný vybraný mikrokontrolér umožňuje konfiguraci komunikačního kanálu, konkrétně specifikace SPI až do frekvence 160 MHz.

Dalším důležitým parametrem při výběru mikrokontroléru byla velikost paměti. Pro vyčtení jedné matice pixelů z detektoru Timepix 2, z výše popsané části textu [2.3.2](#) vyplývá, že je zapotřebí vyčíst 28x256x256 bitů dat, tedy 229.376 kB. Výše vybrané parametry pamětí mikrokontroléru jsou pro tento objem dat dostačující.

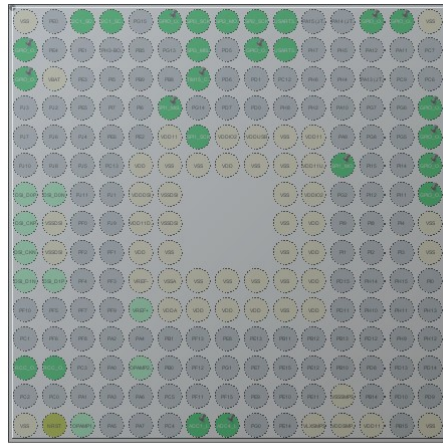
Nejméně důležitým parametrem při výběru mikrokontroléru byl parametr integrovaného USB přímo uvnitř mikrokontroléru. Není tedy zapotřebí při návrhu USB umísťovat další součástky, až na ESD ochranu, pro implementaci USB komunikace. Tímto parametrem mikrokontroléru dokážeme výrazně snížit počet použitých součástek a tím tak i rozměry celého vyčítacího rozhraní.

Konfigurace mikrokontroléru

Pro práci s mikrokontrolérem jsem použil vývojové prostředí STM32CubeIDE dodávané od společnosti STMicroelectronics, která je výrobcem vybraného mikrokontroléru. Výhodou vývojového prostředí je přímočará grafická konfigurace celého mikrokontroléru. Na obrázku [4.5a](#) můžete vidět příklad nakonfigurovaného mikrokontroléru STM32U5A9 v pouzdře TFBGA216. Tmavě zelené body mezi piny znamenají uživatelsky nastavené rozhraní daného pinů mikrokontroléru.

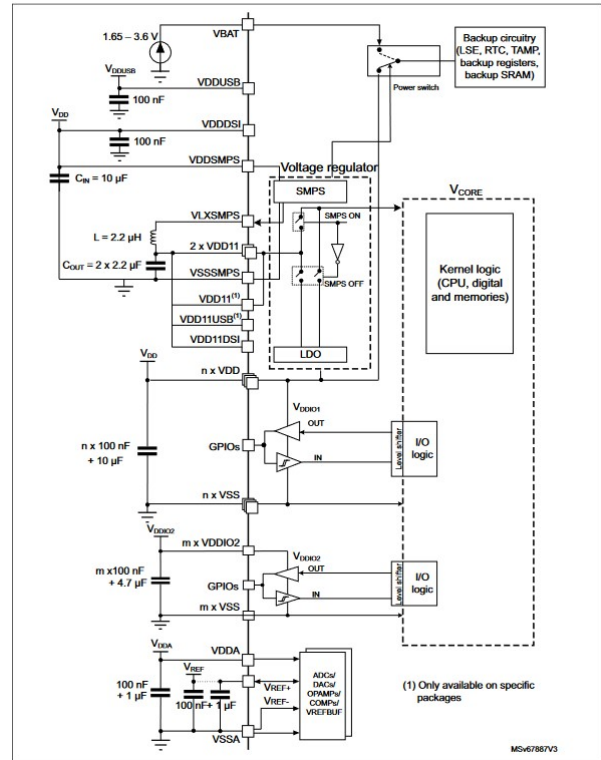
Napájení

Na obrázku [4.5b](#) můžete vidět potřebná napájení pro vybraný mikrokontrolér. Více podrobností ohledně napájení lze najít v souhrnné tabulce nebo v [\[23\]](#). Realizace shematického zapojení viz příložená příloha. Výhodou vybraného mikrokontroléru je, že pro napájení jádra a digitálních periférií využívá spínaného regulátoru, který má



TFBGA216 (Top view)

(a) STM32CubeIDE konfigurace pinů mikrokontroléru



(b) STM32U5A9 napájení

Obrázek 4.5: Konfigurace a napájení STM32U5A9

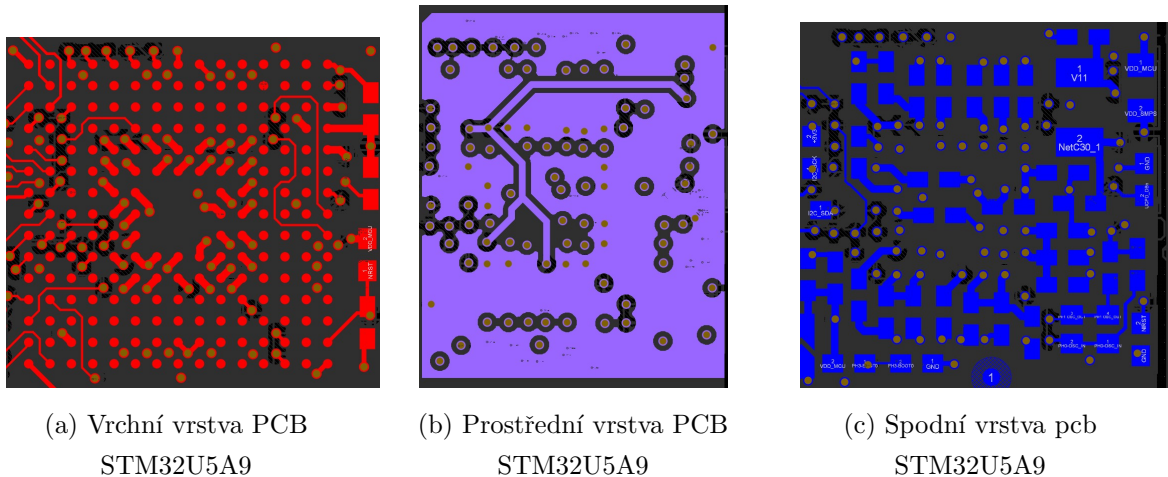
| Napájení základní desky vyčítacího rozhraní | |
|---|---|
| Napájení | Popis |
| VBAT | Napájení z externí baterie 1.65 - 3.6 V |
| VDDUSB | Napájení periférie USB |
| VDDSI | Napájení pro periféri DSI |
| VDDSMPS | Napájení pro integrovaný spínaný stabilizátor |
| VLXSMPS | Spínaný výstup integrovaného stabilizátoru |
| VDD11 | Napájení digitální části mikrokontroléru |
| VDD11, VDD | Napájení digitální části mikrokontroléru ze spínaného stab. |
| VDDIO2 | Napájení samostatné vstupní/výstupní brány |
| VDDA | Napájení analogové části mikrokontroléru |

Tabulka 4.2: Napájení mikrokontroléru STM32U5A9

nižší spotřebu oproti lineárnímu regulátoru, integrovaného přímo na čipu. Nevýhodou je požadavek připojení externí cívky, která je nezbytná pro provoz interního spínaného stabilizátoru.

PCB

Na obrázku 4.6 můžete vidět realizaci PCB pro část mikrokontroléru. Nejsou zde uvedeny 2 zbylé vrstvy PCB, kterými jsou 2., 3. a 5. vrstva. Vrstva 2 a 5 tvoří pod částí mikrokontroléru souvislou zemní plochu a vrstva 3 slouží jako vrstva signálová. Blokovací kondenzátory napájení dle specifikací [23] jsou umístěny co nejbližně příslušným pinům, viz. 4.6c.



Obrázek 4.6: STM32U5A9 PCB realizace

4.1.3 Konverze logických úrovní

4.1.4 USB

4.2 Deska s Timepix 2

4.2.1 Timepix 2

Rozhraní pro připojení Timepix 2

Napájení

4.2.2 Vysokonapěťový zdroj

Měření vysokého napětí

4.2.3 Měření teploty

4.2.4 Konektor

Kapitola 5

Testování

5.1 Napájení

5.2 Vysokonapěťový zdroj

5.3 Měření teploty

5.4 Komunikační rozhraní s Timepix 2

5.5 Digitální test Timepix 2

5.5.1 Vyčtení chip ID

5.5.2 Vyčtení a zapsání pixelových matic

5.6 USB komunikace

5.7 Měření spotřeby

5.7.1 Porovnání spotřeby

5.8 Dosažené parametry

Kapitola 6

Závěr

Seznam použité literatury

- [1] X. Llopart Cudié, *Design and characterization of 64K pixels chips working in single photon processing mode*. PhD thesis, Mid Sweden University, 2007. ISBN: 978-91-85317-56-1.
- [2] J. Alozy, R. Ballabriga, I. Kremastiotis, X. Llopart, T. Poikela, V. Sriskaran, and W. Wong, “Timepix2 Manual (v2.1),” April 12 2019. CERN, Geneva.
- [3] CERN, “Web presentation of the Medipix Collaboration.” Dostupné z: www.cern.ch/medipix.
- [4] M. Platkevič, *Signal Processing and Data Read-Out from Position Sensitive Pixel Detectors*. PhD thesis, ČVUT, 2014.
- [5] Z. Vykydal and J. Jakůbek, “USB lite - Miniaturized readout interface for Medipix2 detector,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 633, pp. 48–49, 2011. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210013082/pdf?md5=733e9d449a2e198b6559b52d5fbe242f&pid=1-s2.0-S0168900210013082-main.pdf>.
- [6] CERN, “Web presentation of the Medipix Collaboration.” Dostupné z: <https://medipix.web.cern.ch/medipix2>.
- [7] ADVACAM, “Web presentation of the MiniPIX SPRINTER.” Dostupné z: <https://advacam.com/camera/minipix-sprinter>.
- [8] P. Burian, P. Broulím, B. Bergmann, and L. Tlustos, “Ethernet embedded readout interface for timepix2—katherine readout for timepix2,” *Journal of Instrumentation*, vol. 15, p. C01037, jan 2020.
- [9] T. Poikela, J. Plosila, T. Westerlund, M. Campbell, M. D. Gaspari, X. Llopart, V. Gromov, R. Kluit, M. van Beuzekom, F. Zappon, V. Zivkovic, C. Brezina, K. Desch, Y. Fu, and A. Kruth, “Timepix3: a 65k channel hybrid pixel readout chip with simultaneous toa/tot and sparse readout,” *Journal of Instrumentation*, vol. 9, p. C05013, may 2014.

- [10] W. Wong, J. Alozy, R. Ballabriga, M. Campbell, I. Kremastiotis, X. Llopart, T. Poikela, V. Sriskaran, L. Tlustos, and D. Turecek, “Introducing timepix2, a frame-based pixel detector readout asic measuring energy deposition and arrival time,” *Radiation Measurements*, vol. 131, p. 106230, 2020.
- [11] X. Llopart, J. Alozy, R. Ballabriga, M. Campbell, R. Casanova, V. Gromov, E. Heijne, T. Poikela, E. Santin, V. Sriskaran, L. Tlustos, and A. Vitkovskiy, “Timepix4, a large area pixel detector readout chip which can be tiled on 4 sides providing sub-200 ps timestamp binning,” *Journal of Instrumentation*, vol. 17, p. C01044, jan 2022.
- [12] P. Mánek, “Machine learning approach to ionizing particle recognition using hybrid active pixel detector,” Master’s thesis, ČVUT, 2018.
- [13] J. Jakubek, “Precise energy calibration of pixel detector working in time-over-threshold mode,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 633, pp. S262–S266, 2011. 11th International Workshop on Radiation Imaging Detectors (IWORID).
- [14] F. Tavernier and P. Moreira, “SLVS interface circuits.” Dostupné z: https://indico.cern.ch/event/404345/contributions/1850202/attachments/809975/1109940/SLVS_IO.
- [15] “Ieee standard for low-voltage differential signals (lvds) for scalable coherent interface (sci),” *IEEE Std 1596.3-1996*, pp. 1–34, 1996.
- [16] TSMC, “Web presentation of the TSMC.” Dostupné z: <https://www.tsmc.com/english>.
- [17] S. George, D. Turecek, S. Wheeler, S. Kodaira, and L. Pinsky, “First tests with timepix2 and heavy ions,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 958, p. 162725, 2020. Proceedings of the Vienna Conference on Instrumentation 2019.
- [18] S. Pospisil, “Timepix hybrid pixels detectors for particle identification and dosimetry.” Dostupné z: <https://indico.cern.ch/event/954194/contributions/4009245/attachments/2156334/3637201/Stanislav%20Pospisil%20-%20SP-Dakar-Timepix-lecture-fin.pdf>.
- [19] L. S. Pinsky, “An Update on the Timepix2.” Dostupné z: <https://wrmiss.org/workshops/twentyfourth/Pinsky.pdf>.
- [20] V. Re, “Web presentation of the TSV.” Dostupné z: https://indico.cern.ch/event/710050/contributions/3185372/attachments/1741432/2817619/11_20_Re_Vertex_2018.pdf.

- [21] Monolithic Power Systems, “Synchronous Buck Converter.” Dostupné z: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP2333H/document_id/4409/.
- [22] STMicroelectronics, “Datasheet STM32U5Axxx.” Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32u5a9nj.pdf>.
- [23] STMicroelectronics, “RM0456 reference manual STM32U5A.” Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32u5a9nj.pdf>.

Seznam použitých symbolů

α alfa

Seznam použitých zkratek

| | |
|------|--|
| ASIC | Application Specify Integrated Circuit |
| TSMC | Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Limited |
| TSV | Through-Silicon-Vias |
| BGA | Ball Grid Array |
| FPGA | Field Programmable Gate Arrays |
| CMOS | Complementary metal–oxide–semiconductor |
| DAC | Digital to Analog Convertor |
| LSFR | Linear Feedback Shift Registers |
| PCB | Printed Circuit Board |
| HV | High Voltage |
| USB | Universal Serial Bus |
| DSP | Digital signal processing |
| FPU | Floating Point Unit |
| EEC | Error Correction Code |
| ESD | Electro Static Discharge |
| DSI | Display Serial Interface |