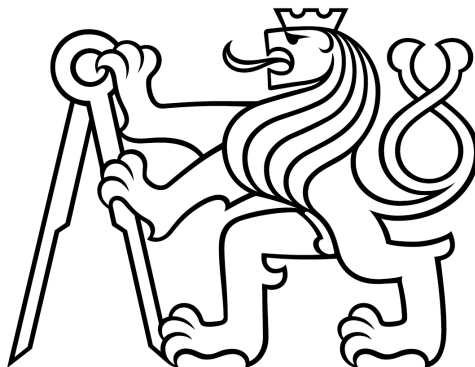


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MĚŘENÍ



Bakalářská práce

Ondřej Pavlas

Vedoucí: Ing. Martin Šipoš, Ph.D

Studijní program: Kybernetika a Robotika

Květen 2022

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:

Tímto bych chtěl poděkovat Martinovi Navrátilovi za organizaci prohlídky ÚTEFu s Petrem Přidalem, kterému tímto také děkuji. Právě po této prohlídce jsem využil možnosti psát na půdě ÚTEFu svoji bakalářskou práci. Rád bych poděkoval mým vedoucím, kterými byli za ÚTEF Milan Malich, Jan Broulím a za FEL p. Martin Šipoš. Milanovi za veškerou pomoc s moji prací, od návrhu elektroniky až po korekci psané části práce. Honzovi a p. Šipošovi za korigování a vedení psané části práce. Dále bych rád poděkoval také Michaeli Holíkovi za věcné připomínky k mé práci. A v neposlední řadě p. Vladimíru Víchovi za pomoc zpracování snímku s ionizujícím zdrojem.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the design of a HW prototype of a reading device for a pixel detector Timepix2 based on MCU. Designed HW prototype, can be variably connected to various development kits that contain a defined connector. HW prototype communicate with Timepix2 using the SPI bus. The first part deals with the theory of particle detection by pixel detectors and the basic properties of these detectors. The second part deals with the description of the implementation of the HW prototype.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh HW prototypu vyčítacího zařízení pro pixelový detektor Timepix2 na bázi MCU. Navržený HW prototyp, lze variabilně připojit na různé vývojové kity, které obsahují definovaný konektor. Komunikace HW prototypu s Timepix2 probíhá pomocí SPI sběrnice. První část práce se zabývá teorií ohledně detekce částic pixelovými detektory a základními vlastnostmi těchto detektorů. Druhá část práce se zabývá samotným popisem realizace HW prototypu.

Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Detekce ionizujícího záření | 2 |
| 2.1 | Exkurz do historie měření ionizujícího záření | 2 |
| 2.2 | Přímo ionizující částice | 3 |
| 2.2.1 | Těžké částice | 3 |
| 2.2.2 | Elektrony | 4 |
| 2.3 | Nepřímo ionizující částice | 5 |
| 2.3.1 | Energetické fotony, rentgenové záření | 6 |
| 2.3.2 | Neutrony | 8 |
| 2.4 | Ostatní | 8 |
| 2.5 | Součastnost | 9 |
| 3 | Timepix2 | 10 |
| 3.1 | Vlastnosti | 10 |
| 3.2 | Základní princip činnosti | 10 |
| 3.3 | Matice pixelů | 11 |
| 3.4 | Analogová část | 12 |
| 3.5 | Digitální část | 14 |
| 3.6 | Chipboard | 14 |
| 3.7 | Pixelman software | 16 |
| 4 | Realizace shield-tpx2 pro komunikaci s Timepix2 | 17 |
| 4.1 | Vývojový kit | 17 |
| 4.1.1 | Připojení k vývojovému kitu | 19 |
| 4.2 | Připojení k chipboardu | 20 |
| 4.3 | Komunikace s Timepix2 | 21 |
| 4.3.1 | SPI komunikace | 22 |
| 4.3.2 | SLVS komunikace | 22 |
| 4.4 | I2C komunikace | 26 |
| 4.5 | Napájení | 27 |
| 4.5.1 | Schematické zapojení | 28 |
| 4.5.2 | PCB | 29 |

| | |
|--|-----------|
| 5 Testování | 30 |
| 5.1 Rychlost komunikace | 30 |
| 5.2 Varianta shield-tpx2_optim | 31 |
| 5.2.1 Schematické zapojení | 31 |
| 6 Závěr | 34 |
| Seznam použité literatury | 37 |
| Seznam použitých symbolů | 38 |
| Seznam použitých zkratk | 39 |
| A Zadání Bakalářské práce | 40 |
| B Schéma zapojení | 41 |
| C Formátově velké obrázky | 43 |

Seznam obrázků

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Exponovaná fotografická deska, s Maltézským křížkem, pořízena H. Becquerelem. [3] | 3 |
| 2.2 | Kinetická energie zanechána v senzoru. [6] | 4 |
| 2.3 | Stopa alfa částice zanechaná v senzoru | 5 |
| 2.4 | Charakteristika reakce elektronu v materiálu | 5 |
| 2.5 | Stopa fotonu zanechaná v senzoru | 6 |
| 2.6 | Druh interakce přilétajícího fotonu s křemíkem v závislosti na jeho energii | 7 |
| 2.7 | Comptonův a fotoelektrický jev. [6] | 7 |
| 2.8 | Produkce páru pozitron-elektron. [6] | 8 |
| 2.9 | Stopa mionu zanechána v senzoru | 8 |
| 2.10 | Olověný křížek ozářen izotopem ^{241}Am | 9 |
| 2.11 | Olověný křížek, který byl ozářen izotopem ^{241}Am | 9 |
| 3.1 | Timepix2 | 11 |
| 3.2 | Rozložení Timepix2. [13] | 12 |
| 3.3 | Schematický popis pixelu. [6] | 13 |
| 3.4 | Jeden pixel z matice pixelů. [17] | 13 |
| 3.5 | Analogová část. [17] | 14 |
| 3.6 | Části chipboardu | 15 |
| 3.7 | Chipboard ze Západočeské univerzity v Plzni | 15 |
| 3.8 | Prostředí Pixelman Preview | 16 |
| 4.1 | Blokové schéma realizace | 17 |
| 4.2 | Finální realizace shield-tpx2 | 18 |
| 4.3 | MCU konfigurace | 18 |
| 4.4 | ARDUINO Uno V3 shield | 20 |
| 4.5 | VHDCI konektor typu male | 21 |
| 4.6 | VHDCI konektor | 21 |
| 4.7 | Nastavení registru Timepix2. [21] | 22 |
| 4.8 | Vyčtení registru Timepix2. [21] | 22 |
| 4.9 | Ukázka SPI komunikace mezi MCU a Timepix2. Nastavení a vyčtení registru Timepix2: NTESTPULSES | 23 |
| 4.10 | LVDS a SLVS. Zdroj: SLVS interface circuits | 23 |
| 4.11 | Napěťový průběh, pár SCK_SLVS | 23 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.12 | SLVS páry DCLOCK_OUT při základním nastavení | 24 |
| 4.13 | Nastavení SLVS diferenciálních párů DCLOCK_OUT | 24 |
| 4.14 | LVDS zapojení | 25 |
| 4.15 | PCB LVDS zapojení | 25 |
| 4.16 | Součástky komunikující pomocí I ² C komunikace | 26 |
| 4.17 | Nastavení výstupu AD5321 pomocí I ² C komunikace | 27 |
| 4.18 | Dekódování I ² C komunikace | 27 |
| 4.19 | Blokové schéma napájení shield-tpx2 a Chipboardu | 27 |
| 4.20 | Zapojení step-down stabilizátorů | 28 |
| 4.21 | Zapojení LDO stabilizátorů | 28 |
| 4.22 | Step-Down stabilizátor zapojení na PCB | 29 |
| 4.23 | LDO stabilizátor PCB | 29 |
| 5.1 | Schematické zapojení shield-tpx2_optim pro diferenciální SLVS pár SCK | 32 |
| 5.2 | Schematické zapojení shield-tpx2_optim s OZ | 32 |
| 5.3 | Schematické zapojení shield-tpx2_optim s OZ a vyhlazovacím kondenzátorem | 33 |
| 5.4 | Průběh po přidání vyhlazovacích kondenzátorů | 33 |
| 5.5 | DCLOCK_OUT_P a DCLOCK_OUT_N při frekvenci komunikace 35Mhz | 33 |
| B.1 | VHDCI male | 41 |
| C.1 | shield-tpx2 vrchní PCB vrstva | 43 |
| C.2 | shield-tpx2 spodní PCB vrstva | 44 |
| C.3 | shield-tpx2 3D pohled | 44 |

Kapitola 1

Úvod

Cílem bakalářské práce bylo navržení HW prototypu vyčítacího zařízení pixelového detektoru Timepix2 na bázi MCU.

Timepix2 je hybridní pixelový detektor, používající se k detekci ionizujícího záření. Samotná práce s Timepix2 je pro běžného uživatele obtížná. Snahou tedy bylo připravit HW prototyp, který uživatel dokáže jednoduše připojit ke svému preferovanému vývojovému kitu a za pomoci základního firmwaru bude moci komunikovat s Timepix2. Práce na HW prototypu probíhaly na půdě ÚTEFu (Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze).

Teoretická část práce je rozdělena do dvou kapitol. V druhé kapitole **Detekce ionizujícího záření** je popsána teorie ohledně toho, jak jsme schopni jednotlivé ionizující částice detekovat, kde detekovatelné částice jsem rozdělil na přímo a nepřímo ionizující. V třetí kapitole **Timepix2** popisují základní vlastnosti pixelového detektoru Timepix2, použitého chipboardu.

V druhé polovině této práce, tedy kapitole čtyři **Realizace shield-tpx2 pro komunikaci s Timepix2** a kapitole pět **Testování** popisují, jak celá realizace probíhala a jakým způsobem probíhalo testování navrženého HW prototypu. Přičemž kapitola čtyři se zabývá popisem realizace HW prototypu. Kapitola pět obsahuje popis testování komunikace mezi Timepix2 a MCU. V poslední části páté kapitoly se zmiňují o optimalizované verzi HW prototypu.

Kapitola 2

Detekce ionizujícího záření

V následujících částech budu uvažovat, až na část [Exkurz do historie měření ionizujícího záření](#), kdy samozřejmě pixelové detektory ještě neexistovaly, že pro detekci ionizujícího záření byl použit pixelový detektor, kde sensorová vrstva může být tvořena materiálem jako například: Si, CdTe, GaAs. Aby jednotlivé částice mohly být detekovány, je zapotřebí, aby reagovaly na úrovni sensorové vrstvy. Detekovatelné částice můžeme rozdělit, dle způsobu detekce do následujících kategorií.

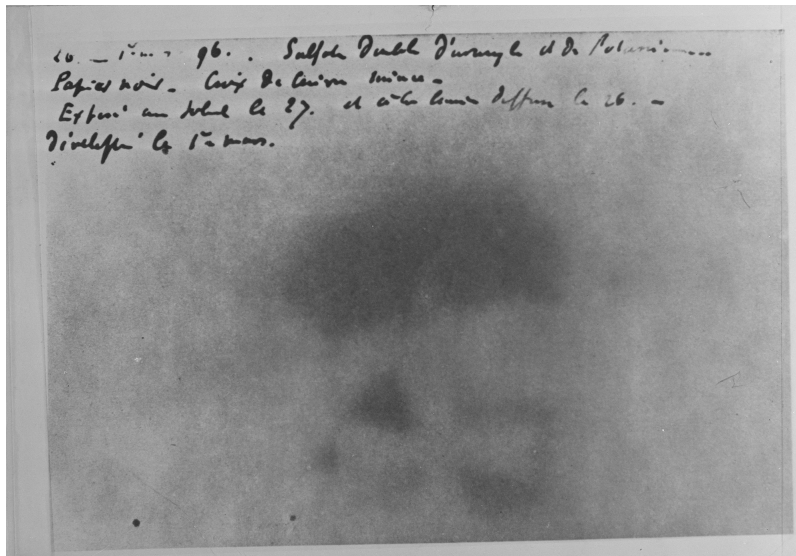
1. [Přímo ionizující částice](#)
 - (a) [Těžké částice](#)
 - (b) [Elektrony](#)
2. [Nepřímo ionizující částice](#)
 - (a) [Energetické fotony, rentgenové záření](#)
 - (b) [Neutrony](#)
3. [Ostatní](#)

Neuvádím zde částice, jako jsou například neutrina. Ty pro pixelové detektory detekovatelná nejsou. K jejich detekci je zapotřebí sestavit sofistikovaný fyzikální experiment. V následující částech textu byly obrázky stop částic [2.3](#), [2.4b](#), [2.5](#), zpracovány programem [Pixelman software](#) [1].

2.1 Exkurz do historie měření ionizujícího záření

Nejprve bych rád udělal malou odbočku do úplných počátků detekce ionizujícího záření, tedy k samotnému objevu radiace. Na počátku roku 1896 se H. Becquerel dozvěděl prostřednictvím H. Poincarého, na setkání Francouzské akademii věd, o rentgenovém záření, objeveném C. W. Röntgenem koncem roku 1895. H. Poincaré vyslovil domněnku, že rentgenové záření souvisí s fosforescencí. H. Becquerel, v té době studující jev fosforescence,

hledal s rentgenovým zářením nějakou spojitost. V jeho laboratoři vystavil slunečnímu záření minerál obsahující uran, pod který umístil kovový křížek, který měl odstínit případné záření vycházející z minerálu. Vše bylo položeno na fotografické desce, která byla zabalena do černé obálky nepropuštějící světlo. O konkrétní sloučenině uranu bylo známo, že se jedná o luminiscenční materiál. Slunce mělo budit luminiscenci a popřípadě rentgenové záření a tyto jevy měly být zachyceny na fotografické desce. Po vystavění přípravku na sluneční záření, byla fotografická deska opravdu exponovaná. H. Becquerel, ale zjistil, že jestliže je stejný přípravek uložen v místě bez přístupu slunečního záření, je fotografická deska exponována stejně, jako na světle slunečním [2]. Výsledek exponované desky je možné vidět na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Exponovaná fotografická deska, s Maltézským křížkem, pořizena H. Becquerelem. [3]

Postupnými kroky H. Becquerel došel k závěru, že fotografická deska je exponována jen když se na povrch umístí minerál obsahující uran. Stal se tedy prvním člověkem, kdo radioaktivní záření detekoval. Za tuto detekci dostal roku 1903 společně s Marie Curie Nobelovu cenu [4].

2.2 Přímou ionizující částice

Do této kategorie patří částice, které mají nenulový elektrický náboj. Díky tomu reagují pomocí Coulombovi síly s elektrony materiálu, kterým daná částice prochází [5].

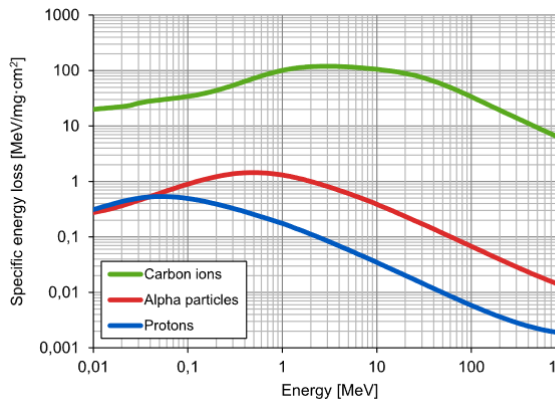
2.2.1 Těžké částice

Jedná se například o částice alfa označované jako jádro helia He^{2+} , které je tvořeno dvěma protony a dvěma neutrony, nebo také za těžkou částicí je označován samotný proton. Na sensorové vrstvě těžké částice silně interagují s jádry a elektrony materiálu, za pomoci

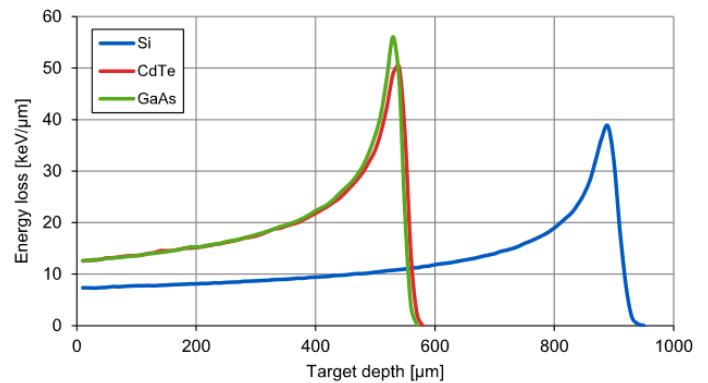
elektrického pole (jaderná interakce je oproti tomu velice nepravděpodobná), ze kterého je daný senzor vyroben. Těžké částice mají tedy silné ionizující účinky. Na druhou stranu rychle ztrácejí svoji kinetickou energii [6]. Kinetickou energii, kterou v senzoru zanechá těžká částice je definována dle vztahu 2.1.

$$S = -\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N Z \left[\ln\left(\frac{2m_0 v^2}{I}\right) - \ln\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2} \right], \quad (2.1)$$

kde m_0 je klidová hmotnost elektronu, e je náboj elektronu, N a Z jsou hustota a atomové číslo absorbujících atomů, v a z jsou rychlosti přilétajících částic, c je rychlost světla a I reprezentuje průměrnou excitaci a ionizující potenciál absorbované látky [5]. Pro senzor, který má senzorem vrstvu z křemíku, je závislost zanechané kinetické energie v senzoru a kinetické energie se kterou částice přiletěla vidět na obrázku 2.2a. Graf charakterizující ztrátu energie podél dráhy částice, známá pod názvem Braggova křivka, v materiálu je vidět na obrázku 2.2b. Kde počáteční energie protonu směřujícího na jednotlivé povrchy senzoru byla 11 MeV [6].



(a) Kinetická energie těžkých částic zanechaná v křemíkovém senzoru



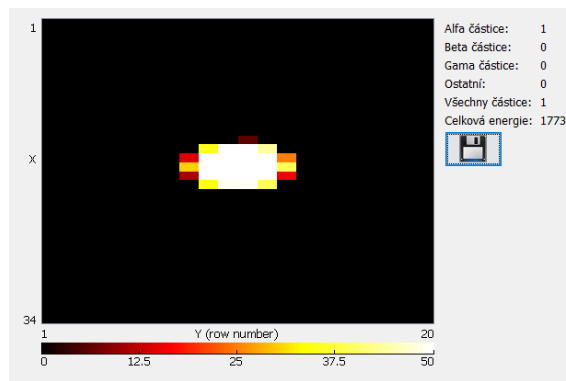
(b) Braggova křivka pro proton s energií 11 MeV, pro různé materiály senzorů

Obrázek 2.2: Kinetická energie zanechaná v senzoru. [6]

Těžké částice ztrácejí, po reakci s materiálem, rychle veškerou svou kinetickou energii. Neproniknou tak hluboko do objemu senzorem vrstvy. Proto ke generaci volných elektronů a děr dochází nejčastěji blízko horní vrstvě senzoru. Generované díry a elektrony jsou pak přitahovány k elektrodě. Díky difuzi v materiálu, má poté částice alfa charakteristickou stopu v materiálu [7]. Stopa alfa částice zpracována softwarem Pixelman [1] a naměřená výukovým kitem SESTRÁ, je vidět na obrázku 2.3.

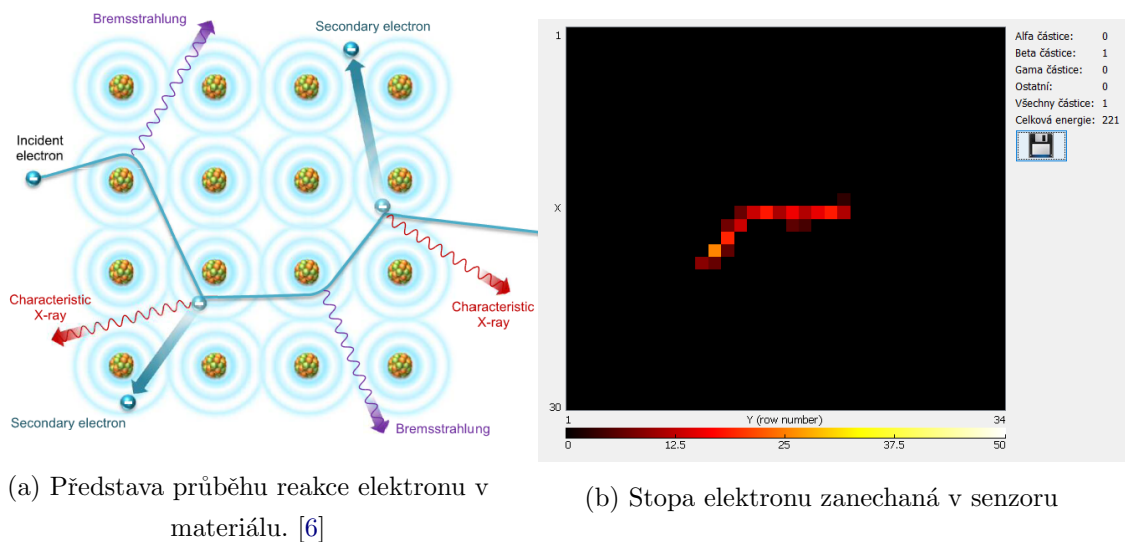
2.2.2 Elektorny

Kvůli nižší hmotnosti než mají **Těžké částice**, není reakce elektronů v materiálu, jak by se dalo jednoduše označit, přímá. Každá interakce v senzorem vrstvě vychýlí elektron z jeho přímé dráhy, tedy jeho dráha materiálem je více klikatá [5].



Obrázek 2.3: Stopa alfa částice zanechaná v senzoru

Velice zjednodušená představa je pohyb kulečnickové koule po kulečnickém stole. Bílá koule představuje elektron, který vstupuje na sensorovou vrstvu, a ostatní koule představují elektrony a jádra daného materiálu (senzoru), abych byl přesnější, interakce přilétajícího elektronu (bílé koule) s elektrony daného materiálu (ostatní koule) je mnohem pravděpodobnější než interakce s jádry atomů daného materiálu. Konkrétnější představa je vidět v podobě obrázku 2.4a. Tuto představu, jakéhosi odrazu příchozího elektronu na sensorové vrstvě, lze krásně potvrdit při podívání se na obrázek 2.4b, kde elektron reagoval na sensorové vrstvě, předal svojí energii v podobě volného náboje a vytvořil tak proudový impuls, který byl detekován, programově zpracován a zobrazen programem Pixelman [1].



(a) Představa průběhu reakce elektronu v materiálu. [6]

(b) Stopa elektronu zanechaná v senzoru

Obrázek 2.4: Charakteristika reakce elektronu v materiálu

2.3 Nepřímě ionizující částice

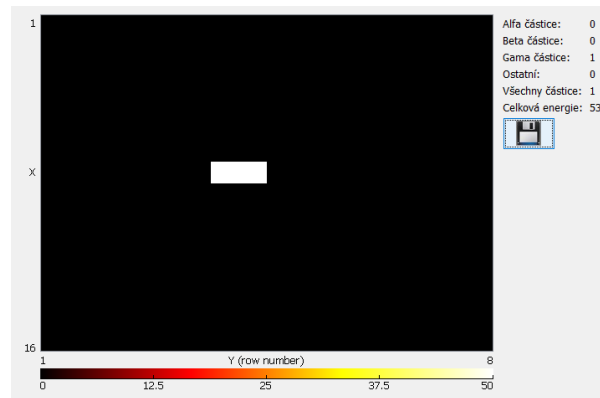
Do této kategorie patří částice, který nemají elektrický náboj. Díky tomu nemohou reagovat pomocí Coulombovi síly s elektrony materiálu, kterým daná částice prochází. To jak částice reagují s materiálem, bude zmíněno dále.

2.3.1 Energetické fotony, rentgenové záření

Při reakci energetických fotonů (gama fotony, rentgenové fotony) s materiálem, je to trochu složitější, než-li v případě částic, jakými jsou **Elektrony** a **Těžké částice**. Jak je známo fotony nemají žádný náboj, ani hmotnost. Interakce s materiálem probíhá hlavně těmito způsoby [8]:

- Fotoelektrický jev
- Comptonův jev
- Produkce páru elektron-pozitron

Ať již foton reaguje s materiálem jedním z výše uvedených způsobů, stopu, kterou foton zanechá v detektoru to neovlivní. Je ji možné vidět na následujícím obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Stopa fotonu zanechaná v senzoru

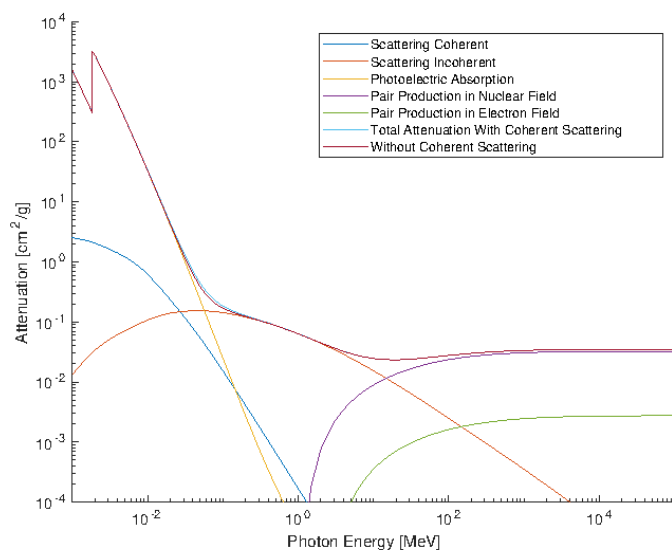
Jakým druhem interakce, z výše uvedených, reaguje přilétající foton v závislosti na jeho energii je zobrazeno na obrázku 2.6. Z obrázku můžeme odečíst, pro které energie přilétajícího fotonu jsou jaké interakce pravděpodobnější. Data byly vygenerovány programem XCOM [9]. Získané hodnoty jsem zobrazil pomocí programu Matlab.

Fotoelektrický jev

Aby fotoelektrický jev měl šanci proběhnout, je z obrázku 2.6 vidět, že se musí jednat o fotony nízko energetické až po fotony s energií nižších jednotek MeV. Přilétající foton reaguje s materiálem, konkrétně je zcela pohlcen atomem, který se nachází v senzoru. To způsobí emitaci elektronu z atomového obalu, atomu, který pohltit přilétající foton. Tedy přilétající foton s energií $h\nu$ emituje elektron o energii E_e , která se vypočítá jako 2.2. Tento jev zároveň nemůže proběhnout, tak, že by přilétající foton reagoval pouze s volnými elektrony v elektronovém obalu atomu [5].

$$E_{e^-} = h\nu - E_b, \quad (2.2)$$

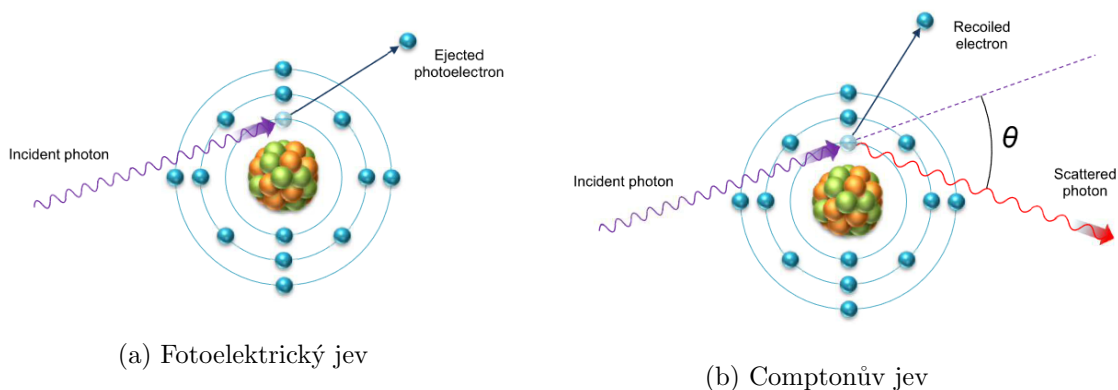
kde E_b je vazebné energie elektronu v elektronovém obalu před jeho emitací [5]. Celá situace je názorně ukázána na obrázku 2.7a.



Obrázek 2.6: Druh interakce přilétajícího fotonu s křemíkem v závislosti na jeho energii

Comptonův jev

Comptonův jev může proběhnout právě tehdy, když má přilétající energetický foton kinetickou energii z intervalu energií z obrázku 2.6 (průběhy: Scattering). Průběh Comptonova jevu je i s popisem vysvětlen na obrázku 2.7b.



Obrázek 2.7: Comptonův a fotoelektrický jev. [6]

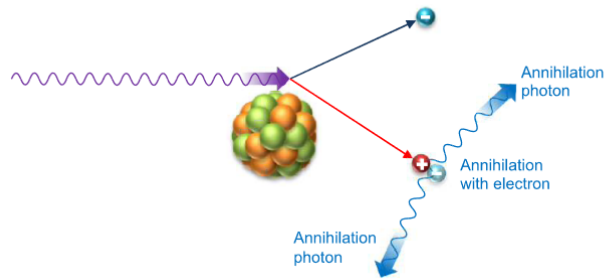
Kinetická energie hv' odraženého fotonu je popsána v rovnici 2.3.

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2}(1 - \cos(\theta))}, \quad (2.3)$$

kde m_0c^2 je zbytková hmotnost elektronu (0,511 MeV) a hv energie přilétajícího fotonu [5].

Produkce páru elektron-pozitron

Za předpokladu, že kinetická energie fotonu je alespoň dvakrát vyšší jak zbytková energie elektronu (1,022 MeV), může foton reagovat s jádrem atomu a produkovat pár elektron-pozitron [5]. Kinetická energie je pak rovnoměrně rozdělena mezi tyto dvě částice. Navíc pozitron anihiluje dva fotony s energií 511 keV. U těchto dvou fotonů však může zase proběhnout **Comptonův jev** nebo **Fotoelektrický jev** [8]. Schematicky průběh produkce páru elektron pozitron je vidět na obrázku 2.8.



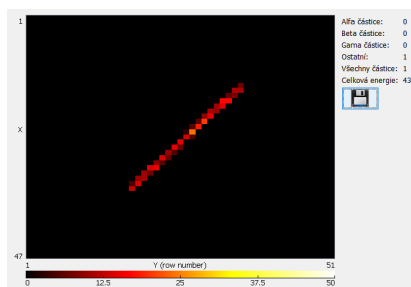
Obrázek 2.8: Produkce páru pozitron-elektron. [6]

2.3.2 Neutrony

Neutrony jsou částice s podobnou hmotností, jakou mají protony. Podobně jako u gama fotonů můžeme neutrony detekovat nepřímo prostřednictvím sekundárních nabitých částic (protony, alfa částice..), které vzniknou při reakci neutronu s jádrem materiálu. Pro podrobnější popis detekce, lze vyhledat informace například zde [5], [6], nebo zde [8].

2.4 Ostatní

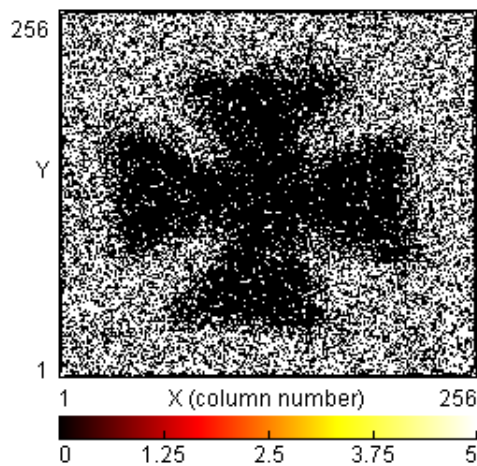
Mezi ostatní částice patří například Mion [7]. Jeho charakteristická stopa je vidět na obrázku 2.9. Záznam byl zaznamenán na palubě letadla. O Mionu je známo, že jeho doba života je velice krátká, ale díky zákonům speciální teorie relativity, je mion možné detekovat i na povrchu Země. Na povrchu Země se jedná o poměrně vzácný jev, ovšem umístíme-li detektor do palubu letadla je detekce mionu více pravděpodobná.



Obrázek 2.9: Stopa mionu zanechána v senzoru

2.5 Současnost

Krásnou paralelou mezi prvním snímkem H. Becquerela a současnými snímky pořizovanými pixelovými detektory je obrázek 2.10. Kde stejně jako H. Becquerel jsem použil předmět pro odstínění záření (v mém případě se jednalo o olověný křížek, který je možné vidět zde 2.11). Rozdílný je ovšem detektor. H. Becquerel použil fotografický papír, přitom já použil pixelový detektor. A data poté zpracoval pomocí **Pixelman software**. Jak je vidět, tak částice, které ze zdroje vychází, olověný křížek dokáže odstínit. Konkrétně se jednalo o radionuklidový zdroj využívající izotop ^{241}Am s aktivitou 300 kBq. Expoziční doba poté byla okolo 5 minut. Kdyby jako zdrojem ionizujícího záření byly například fotony vycházející z rentgenky, mohli bychom se s rozlišením detailů ozářeného objektu dostat na mnohem menší rozměry, čehož se v moderní vědě využívá, jako například zde [10] a [11].



Obrázek 2.10: Olověný křížek ozářen izotopem ^{241}Am



Obrázek 2.11: Olověný křížek, který byl ozářen izotopem ^{241}Am

Kapitola 3

Timepix2

3.1 Vlastnosti

Hybridní pixelový detektor Timepix2, vyrobený CERN Medipix collaboration [12], je nástupce úspěšné varianty pixelového detektoru Timepix. Používá se k detekci ionizujícího záření. Detektor se skládá z matice 256×256 pixelů, kde rozteč mezi pixely je $55 \mu\text{m}$ [13]. Každý pixel je schopný samostatně zaznamenat:

- Čas dopadu ionizující částice
- energii zanechanou částicí v senzoru
- Počet dopadlých částic

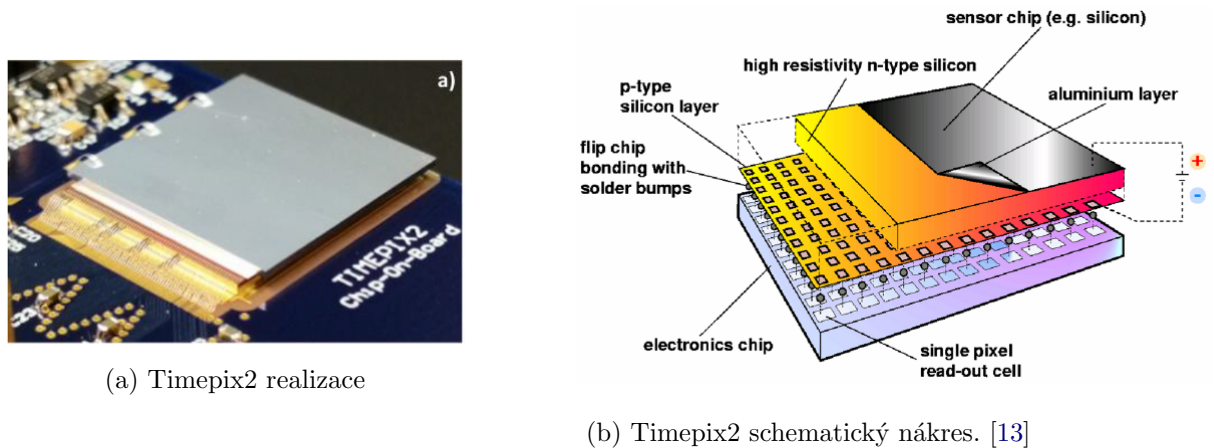
Jestli se jednalo o částici alfa, beta, gama, nebo jinou částici, jsme schopni rozeznat na základě toho, že každá částice vytváří v senzoru charakteristickou stopu, jak bylo ukázáno v sekci **Detekce ionizujícího záření**. Tedy jak budou výstupní data z Timepix2 zpracovány, záleží pouze na použitém programu pro zpracování dat. V předešlých ukázkách jsem jako prostředek pro zpracování dat, tedy rozpoznání jednotlivých stop použil program **Pixelman software** [1].

Využití Timepix2 je velice rozmanité. Příklady použití Timepix2 můžeme rozdělit na dvě hlavní kategorie. První kategorií je particle-tracking, tato oblast se zabývá sledováním jednotlivých částic, jaké stopy zanechaly v nejrůznějších druzích sensorových vrstev, příkladem může být monitorování radiace [14]. Druhá kategorie se týká radiography/imaging, tato kategorie se zabývá velice detailním rentgenováním, zobrazování předmětů, tedy příkladem prací může být [10] nebo [15].

3.2 Základní princip činnosti

Timepix2 je hybridní pixelový detektor, který můžete vidět na obrázku 3.1b. Jeho reálné provedení je poté zde 3.1a. Je označován jako hybridní pixelový detektor proto, že má vyčítací a sensorovou část oddělitelnou. Jeho části jsou propojeny flip-chip bondovací

technologií. Díky tomu lze ke stejné vyčítací technologii připojit různé senzory, ale i naopak lze optimalizovat vyčítací část, což jsou hlavní přednosti pixelových detektorů. Může se jednat například o senzory z materiálů jako Si, CdTe, GaAs atd.. Co se vyčítací části týká, ta se může optimalizovat dle navrženého experimentu.



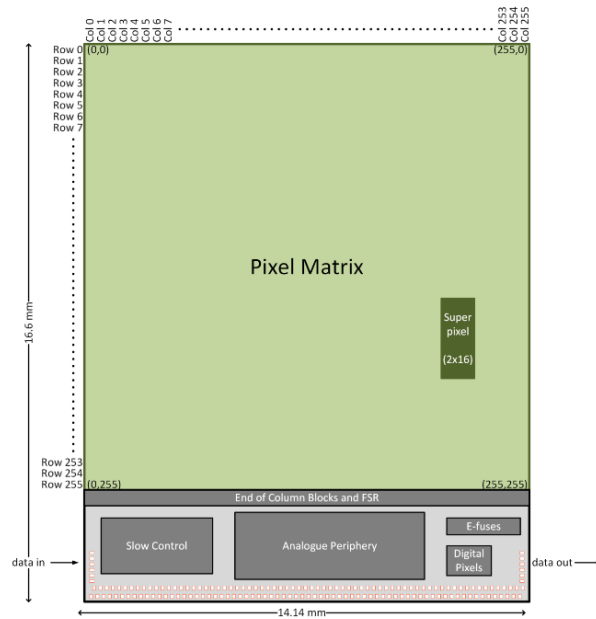
Obrázek 3.1: Timepix2

Na vrchní straně detektoru, obrázek 3.1b je sensorová vrstva, která funguje jako PN dioda. Dioda je zapojena v závěrném směru přičemž velikost napětí připojené na diodu (označované jako předpětí nebo také Bias) je uživatelem nastavitelné a může být až řádově stovky voltů. Díky zapojení diody v závěrném směru dojde v PN přechodu diody k vyprázdnění oblasti. Při tomto zapojení prochází diodou jen velice malý zbytkový proud označovaný také jako leakage current. Aby tento proud neovlivňoval detekci částic, lze nastavit úroveň detekce (práh detekce), tak, aby proudový impuls způsobený dopadem částice na sensorovou vrstvu byl detekován jen tehdy, kdy je větší než leakage current. Zároveň tento práh detekce slouží k odfiltrování šumu pocházejícího z pixelové elektroniky zpracovávající vstupní proudové signály [7].

Dopadne-li částice na senzor dojde k vytvoření volného náboje v podobě páru elektron-díra. Pár je přitážen k elektrodám (záporně nabitý elektron k anodě a kladně nabitá díra ke katodě) a dojde tak k proudovému impulsu, který je detekovatelný, při překročení dříve zmiňovaném prahu. Následně je poté pomocí vyčítacího zařízení vyčten [7]. Schematicky rozkreslené rozložení celého Timepix2 lze vidět na obrázku 3.2.

3.3 Matice pixelů

Uspořádání Timepixu2 je vidět na obrázku 3.2. V horní části obrázku je oblast Pixel Matrix rozdělena do 256×256 pixelů. Rozteč mezi jednotlivými pixely je $55 \mu\text{m}$. Tedy celkem se jedná o 65536 pixelů v $1,4 \times 1,4 \text{ cm}^2$. Díky použití standardní komerční technologie, kterou je $0,25 \mu\text{m}$ 6-metal CMOS je možné implementovat zesilovač, diskriminátor a digitální counter na úrovni pixelů. Největším rozdílem ve zdánlivě podobné technologii CCD je možnost pracovat s jednotlivými pixely a nastavit úroveň, od které bude proudový



Obrázek 3.2: Rozložení Timepix2. [13]

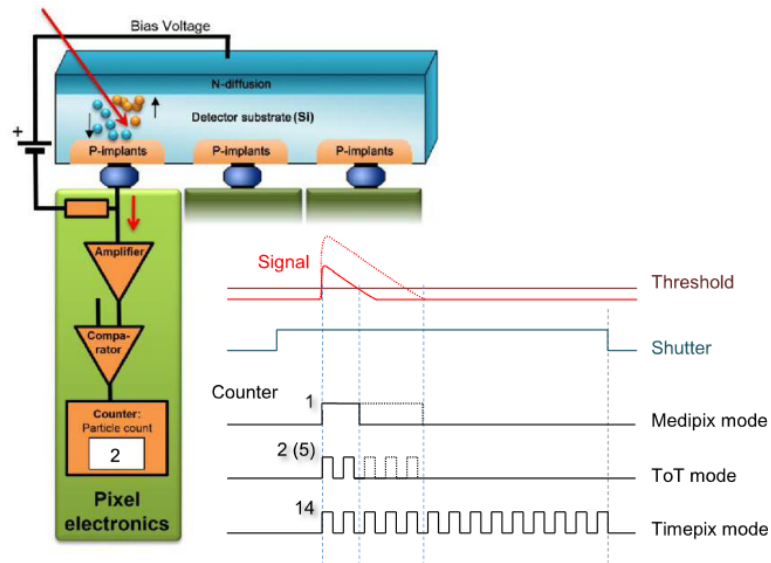
impuls detekován. U CCD dochází k integraci šumu společně s nábojem deponovaným interagující částice v celé časové periodě mezi vyčítacími cykly. Velice zjednodušené schéma této nastavitelné úrovně je vidět na obrázku 3.3, kde konkrétně se úroveň nastavuje na prvku Comparator. V levé spodní části obrázku jsou vidět tři konfigurace ve kterých může každý jednotlivý pixel pracovat. Podrobněji jednotlivé konfigurace jsou [16]:

- Medpix mode: počítá počet příchozích částic
- ToT mode: čas kdy signál je nad nastavenou úrovní (threshold)
- ToA mode: slouží jako časovač, pro zjištění času, kdy částice přiletěla

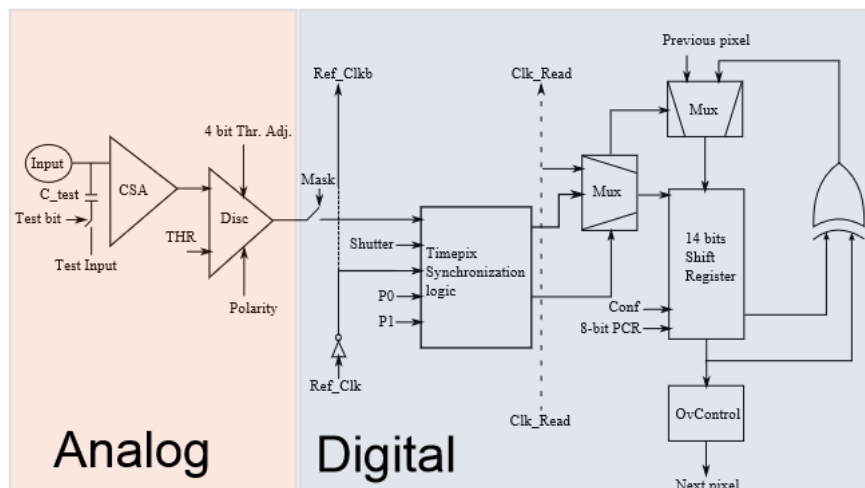
Pokud přiletí částice a reaguje na sensorové vrstvě, vytvoří velice krátký proudový impuls. Časový okamžik zachycení tohoto jevu je přibližně v jednotkách ns. Může být tedy brán jako Diracův proudový impuls. Integrál Diracova proudového impulsu je poté celkový generovaný náboj. Kvůli tomu je navržena architektura jednotlivých pixelů dle obrázku 3.4. Tuto architekturu obsahuje každý z 65536 pixelů [13]. Jednotlivé části budou popsány dále v **Analogová část** a **Digitální část**. Každá z těchto dvou částí jsou napájeny samostatně aby se zabránilo případnému rušení. Konkrétně jsou napájeny napětím 1,2 V analogových a 1,2 V digitálních.

3.4 Analogová část

V levé části obrázku 3.4, je schematicky nakreslena analogová část Timepix2. V této sekci se nacházejí bloky CSA a Discriminátor. Jejich základní princip činnosti bude dále stručně vysvětlen.



Obrázek 3.3: Schematický popis pixelu. [6]

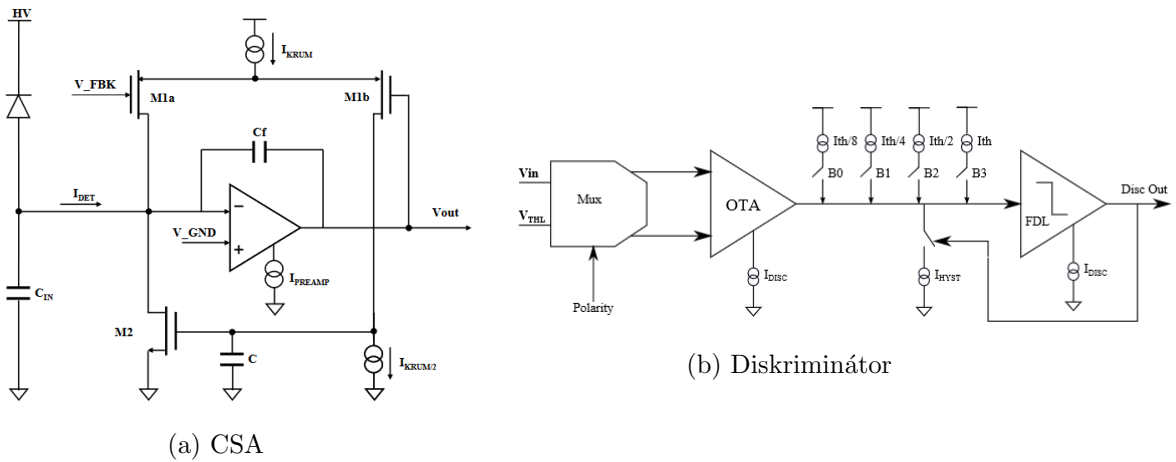


Obrázek 3.4: Jeden pixel z matice pixelů. [17]

CSA a jeho podrobnější zapojení najdeme na obrázku 3.5a. Toto zapojení má za úkol tvarovat a integrovat vstupní náboj a kompenzovat pozitivní a negativní zbytkový DC proud [17].

Dále na obrázku 3.4 můžeme v analogové části vidět diskriminátor. Jeho podrobnější zapojení je poté zde 3.5b. Zapojení se skládá z multiplexeru, OTA, obvodu FDL a hysterezní smyčky. Do multiplexeru vstupují napětí V_{IN} (výstupní napětí z 3.5a) a napětí V_{THL} . Funkce multiplexeru je, aby výstup z OTA byl nezávislý na polaritě vstupních napětí. OTA má zjednodušeně řečeno na starost převést vstupní napětí na proud. Zesílení OTA lze nastavit pomocí I_{DISC} , jedná se o 8-bit DAC [13].

Nevýhodou použití flich-chip technologie pro připojení sensorové a vyčítací části Timepixu je to, že není pomocí této technologie možné dosáhnout stejné parazitní kapacity ve všech pixelech.



Obrázek 3.5: Analogová část. [17]

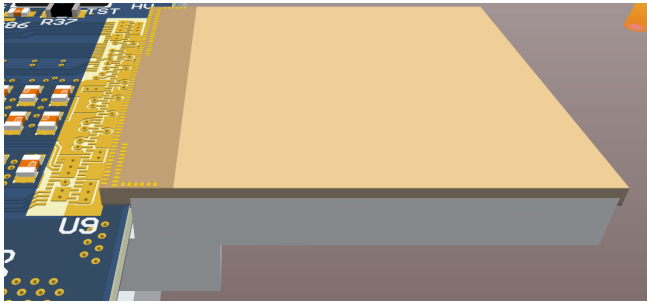
Také dochází k tomu, že tranzistory implementované přímo na rozměrech pixelů nejsou vždy úplně stejné, nebo například může docházet k lokálním poklesům napájecího napětí. Tyto nedostatky mají za důsledek, že bez jejich kompenzace, by se mohla úroveň prahového proudu, která je považována za detekci, měnit [17]. Ke kompenzaci těchto lokálních nedostatků se používá vyrovnávací proudový obvod ($I_{th/8}$, $I_{th/4}$, $I_{th/2}$, I_{th}) z obrázku 3.5b, kterým lze případné nedostatky kompenzovat.

3.5 Digitální část

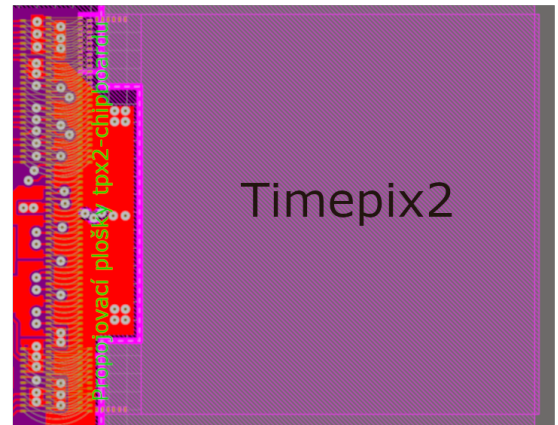
V pravé části obrázku 3.4 můžeme vidět Digitální část jednoho pixelu. Nachází se zde registr pro konfiguraci jednotlivých pixelů, 14 bitový counter a logika potřebná ke synchronizaci Timepix2. Za pomoci správného nastavení konfiguračního registru pro jednotlivé pixely může každý pixel pracovat v jednom ze 3 režimů. Podrobněji popsáno v sekci **Maticе pixelů**. Více informací o digitální sekci lze dohledat například zde [13].

3.6 Chipboard

Na spodní straně obrázku 3.2, jsou vidět připojovací plošky, které lze připojit tenkými drátky, za použití bondovací technologie k chipboardu. Na obrázcích 3.6 je ukázána část chipboardu v Altium Desingeru. Chipboard na obrázcích byl vyvinutý na Západočeské univerzitě v Plzni. Na obrázku 3.6a je v pravé části sensorová vrstva Timepix2 a v levé části propojovací plošky umožňující připojení Timepix2 a Chipboardu. Na obrázku 3.6b je poté vidět návrh PCB chipboardu a virtuální připojení jednotlivých plošek Timepix2 k Chipboardu, které se poté za již zmíněné jemné bondovací technologie realizuje velice slabými drátky. Slabé drátky (virtuální pohled) můžete vidět při detailnějším pohledu na obrázek 3.1a.



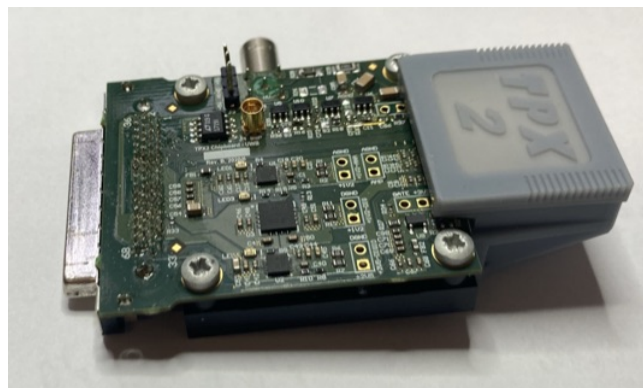
(a) Část chipboardu v 3D modu Altium Desingeru



(b) Část chipboardu pcb Altium Desingeru

Obrázek 3.6: Části chipboardu

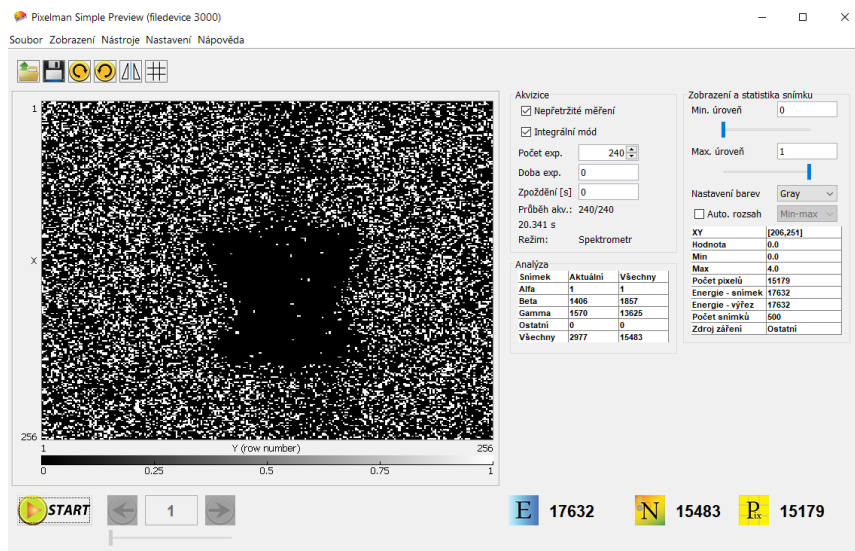
Komunikace s Timepix2 je možná, pokud je k chipboardu připojen readout. Toto připojení probíhá například pomocí VHDCI konektoru. Některé chipboardy/readouty byly vyvinuty v Ústavu Techniké a Experimentální fyziky ČVUT (ÚTEF), jako například USB Lite [18], FITPix[19] nebo RISESAT[20]. Od tohoto okamžiku budu nadále v této práci mluvit o chipboardu vyvinutý na Západočeské universitě v Plzni. Tento chipboard jsem použil v praktické části. K chipboardu se je možné připojit pomocí VHDCI konektoru. VHDCI konektor je vidět v levé části obrázku 3.7. VHDCI konektor má 68pinů. Jeho signálové rozložení můžete vidět na obrázku 4.6a. Na samotném chipboardu jsou umístěny napájecí zdroje (LDO stabilizátory), poté je k Timepix2 rozvedeno potřebné napájení, s oddělenou analogovou a digitální částí. Dále jsou na chipboardu rozvedeny signály vedoucí od VHDCI konektrem až po připravené bondovací plošky.



Obrázek 3.7: Chipboard ze Západočeské univerzity v Plzni

3.7 Pixelman software

Za účelem zpracování vyčtených dat byl v ÚTEF (Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze) vyvinut **Pixelman software** [1]. Obrázky stop částic pořízené v části **Detekce ionizujícího záření**, byly zpracovány právě tímto softwarem. Software je spustitelný pro Linux, Mac OS X, Microsoft Windows operační systémy. Java grafické prostředí, tedy konkrétněji pouze prostředí Pixelman Preview, které slouží pro výukové potřeby (prostředí Pixelman je výrazně složitější), je možné vidět na obrázku 3.8.

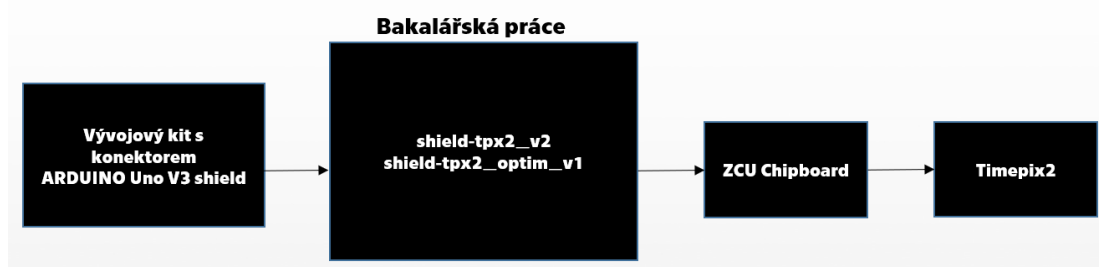


Obrázek 3.8: Prostředí Pixelman Preview

Kapitola 4

Realizace shield-tpx2 pro komunikaci s Timepix2

Úkolem bylo vytvořit zařízení na bázi MCU, které bude komunikovat s Timepix2. Pro moji realizaci jsem vybral vývojový kit STM32 Nucleo-64 s STM32F401RE MCU, navrhl konverzní desku shield-tpx2, kterou jsem poté připojil k Timepix2 a nakonec napsal základní firmware, který umožňuje komunikaci s Timepix2 a ověřuje funkčnost navrženého shield-tpx2. Blokové schéma realizace je zobrazeno na obrázku 4.1.

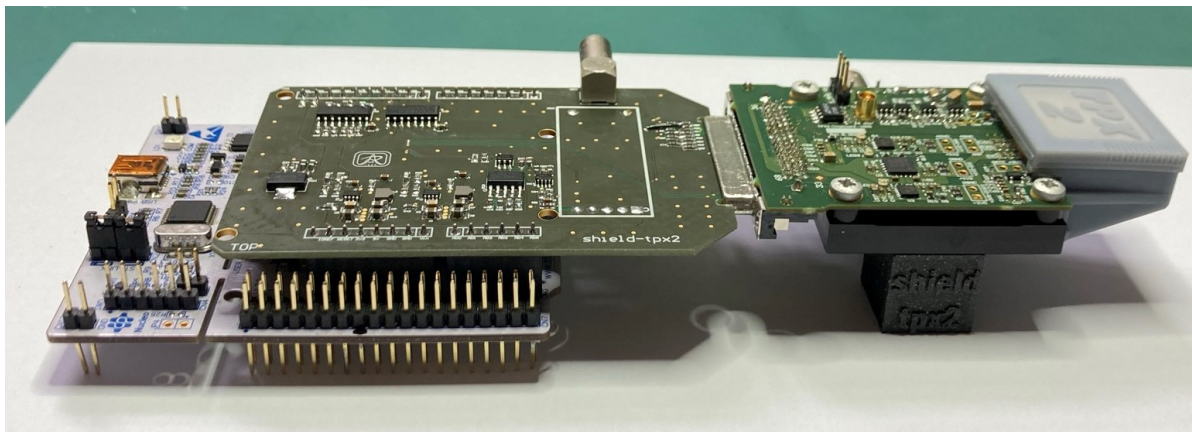


Obrázek 4.1: Blokové schéma realizace

V dalších částech textu zdůvodňuji návrh celého zařízení a popisuji průběh realizace mé práce. Nadále v této práci budu označovat navržený HW prototyp jako shield-tpx2, který lze společně s Timepix2 vidět připojený na vývojový kit STM32 Nucleo-64 s STM32F401RE MCU na obrázku 4.2.

4.1 Vývojový kit

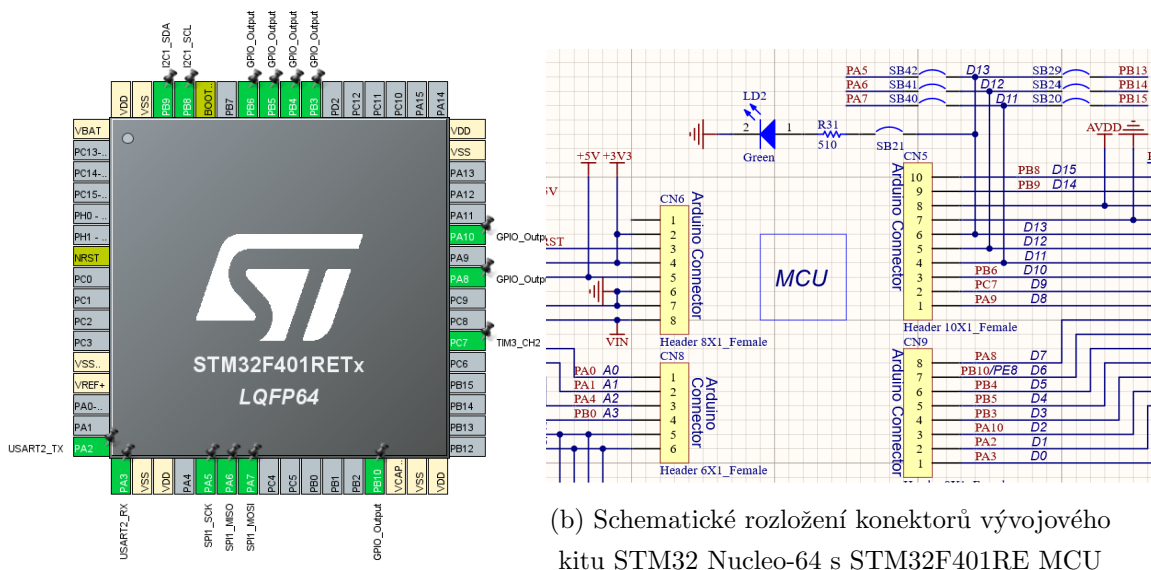
Pro práci s shieldem-tpx2 byl použit vývojový kit STM32 Nucleo-64 s STM32F401RE MCU, jedná se o procesor s jádrem ARM Cortex-M4 32bit RISC. Procesor dokáže pracovat na frekvenci až do 84MHz. Flash paměť má 512 Kbytes a SRAM paměť 96 Kbytes. Má 12 komunikačních rozhraní, z toho pro mě nejdůležitější jsou periférie I²C, SPI a USART.



Obrázek 4.2: Finální realizace shield-tpx2

Použit byl proto, že jde o velice komerčně dostupnou variantu a také proto, že uvedený vývojový kit obsahuje konektor ARDUINO Uno V3 shield. Bez tohoto konektoru by shield-tpx2 nešel připojit k vývojovému kitu.

Ke konfiguraci pinů jsem využil prostředí od firmy STMicroelectronics, konkrétně program STM32Cube IDE 1.7.0. V grafickém konfigurátoru jsem nastavil všechny potřebné piny, jak je vidět na obrázku 4.3a. Nutné je uvést, že při použití jiné desky je toto nastavení nutné provést vůči zapojení pinů daného vývojového kitu. Na obrázku 4.3b, je vidět, kam jaký pin z konektoru ARDUINO Uno V3 shield je k MCU připojen. Například na obrázku 4.3b a konektoru CN15, jsou horní 2 piny PB8 a PB9, proto, porovnáme-li toto zapojení s rozložením pinů na obrázku 4.4a, nakonfigurujeme piny PB9 a PB8 u MCU jako piny I2C1.SDA a I2C1.SCL. Takto provedeme pro každý pin. To znamená, že každý nový vývojový kit připojený k shield-tpx2 by měl projít touto konfigurací.



Obrázek 4.3: MCU konfigurace

4.1.1 Připojení k vývojovému kitu

Snahou bylo vytvořit shield-tpx2 tak, aby byl jednoduše připojitelný k různým vývojovým kitům, tedy tzn. k různým MCU. Proto jsem pro návrh zvolil konektor ARDUINO Uno V3 shield, který se u vývojových kitů často objevuje, například se využívá ve vývojových kitech jakými jsou: STM32H735G-DK, nebo REB1 – VA108X0 s radiačně odolným procesorem. Konkrétně jsem zvolil pro návrh zapojení s konektory typu male, aby shield-tpx2 mohl jít na vývojové kity nasadit. ARDUINO Uno V3 shield má celkem 32 pinů, z toho je 14 pinů mnou využitých. Aby pro představu bylo jasné o jakém konektoru a jakých pinech se zde píše, přikládám obrázek 4.2 celé realizace. Na spodní a vrchní straně shield-tpx2, obrázku je poté vidět konektor ARDUINO Uno V3 shield, který je nasunut na vývojový kit STM32 Nucleo-64 s STM32F401RE MCU (bílé PCB).

Pro další text práce zavedu označení signálů. Postfix u signálů SLVS_P nebo SLVS_N označuje o jaký z diferenciálních SLVS signálů se jedná. SLVS_P je signál pozitivní, SLVS_N je signál negativní. Prefix n, nebo / značí, že daný signál má aktivní úroveň v logické nule. Postfix N nebo P označuje o jaký z diferenciálních LVDS párů se jedná, analogicky jako u SLVS signálů je N negativní a P pozitivní.

Schematickým nákresem na obrázku 4.4a popisují rozložení pinů navržené desky, realizované černými konektory z obrázku 4.4b. Signály rozdělím do pomyslných tří kategorií a to následovně.

Signály pro SPI komunikaci:

- SCK - Hodinový signál pro SPI komunikaci
- MOSI - Datový signál, od MCU do Timepix2
- MISO - Datový signál, od Timepix2 do MCU
- DCLOCK_OUT - Hodinový signál na který se odesílají data z Timepix2
- nCS - Chipselect jdoucí do Timepix2

Signály pro I²C komunikaci:

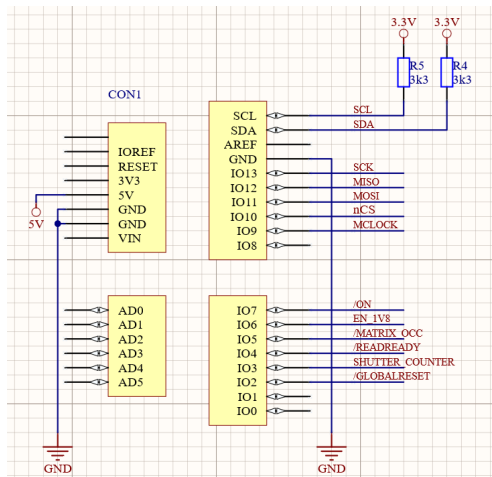
- SCA - Hodinový signál
- SCL - Datový signál

A v poslední řadě tyto signály:

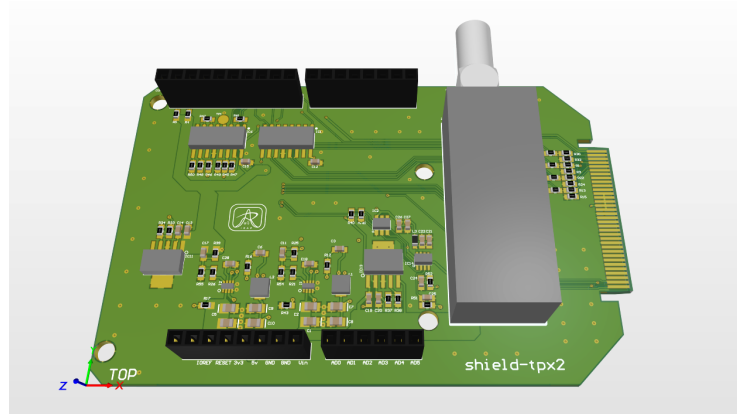
- MCLOCK - Hodinový signál pro měření Timepix2. Referenční hodiny pro ToT měření a pro děličku hodin generující ToA hodiny. Maximální frekvence 100 MHz.
- /MATRIX_OCC - Signál výstupní z Timepix2. Označuje kolik sloupců z vyčtené matice přesáhlo programově nastavenou úroveň.

- /READREADY - Signál výstupní z Timepix2. Indikuje, kdy je možno začít číst data.
- SHUTTER_COUNTER - Signál vedoucí do Timepix2. Pro funkci vyčítání registrů v režimech ToT/ToA nastavit na logickou 1
- /GLOBALRESET - Signál vedoucí do Timepix2. Globální reset Timepix2. Pro vyresetování by měl být logické 0 minimálně 824 taktů hodin SCK.
- /ON - Slouží k zapnutí HV zdroje
- EN_1V8 - Signál řídicí zapnutí step-down stabilizátoru, který generuje napětí 1,8 V pro napájení Timepix2

Podrobnější informace o tom co jaký pin vedoucí do, nebo z Timepix2 má za funkci lze dohledat zde [21].



(a) ARDUINO Uno V3 shield schema

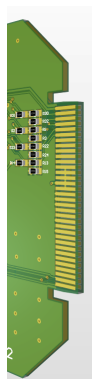


(b) ARDUINO Uno V3 shield PCB

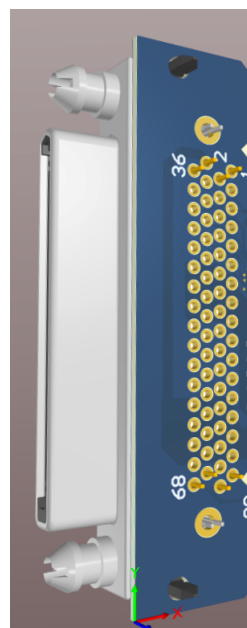
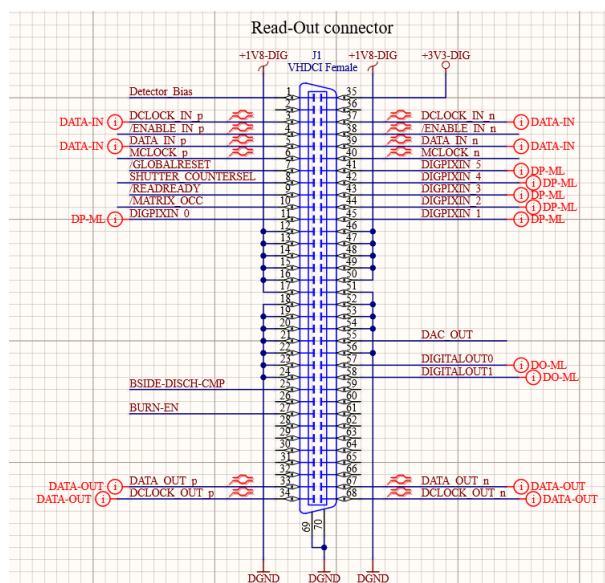
Obrázek 4.4: ARDUINO Uno V3 shield

4.2 Připojení k chipboardu

Pro připojení shield-tpx2 k chipboardu, bylo nutné použít konektro VHDCI typu male. Rozložení jednotlivých signálů VHDCI konektrem na chipboardu lze vidět na obrázku 4.6a. Upozorňuji na značné odlišnosti v zapojení signálů VHDCI konektorů napříč použitými chipboardy. Konektor VHDCI typu male jsem implementoval přímo na plošném spoji. Bylo tak důležité dodržet tloušťku plošného spoje a to konkrétně tloušťku 1,2 mm. Dále bylo nutné dodržet povrchovou úpravu pinů konektoru, které jsou implementované přímo na desce, aby byla zajištěna spolehlivost/životnost konektoru. Poté jsem přesně navrhl plošný spoj ve tvaru takovém, aby se dal do VHDCI konektoru zasunout a navíc, aby měl z obou stran plošného spoje konektorové plošky. Konkrétně v Altium Designer se jednalo o takovýto návrh 4.5.



Obrázek 4.5: VHDCI konektor typu male



(a) Schematické rozložení pinů VHDCI konektoru

(b) 3D model VHDCI konektoru na chipboardu

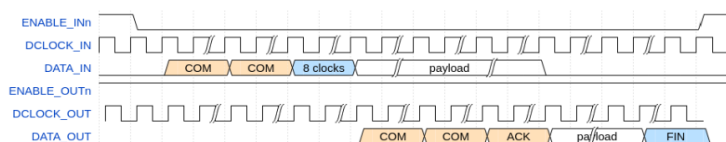
Obrázek 4.6: VHDCI konektor

4.3 Komunikace s Timepix2

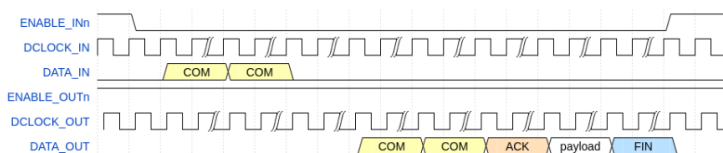
Ke zprovoznění komunikace bylo zapotřebí následujících kroků. Zapnutí napájení pro Timepix2, které je popsáno v sekci **Napájení**. Zapsání sekvence příkazů do registrů Timepix2 uvedených v [21]. Konkrétně sekvence zápisů do registru Timepix2 se skládá z následujících instrukcí:

1. Pin /GLOBALRESET do logické 0
2. Pin nCS do logické 1
3. Pomocí signálu EN_1V8 zapneme napájení pro Timepix2
4. Min. 487 hodinových cyklů MCLOCK držíme pin /GLOBALRESET v logické 0
5. Pin /GLOBALRESET dáme do logické 1

Pro další komunikaci je potřeba správně zapsat pomocí **SPI komunikace**, dle požadavků má-li se jednat o zápis do registru 4.7, nebo pro vyčtení z registru 4.8. Hodnotu COM, lze dohledat zde [21]. Jestli komunikace proběhla v pořádku, lze určit na základě hodnot ACK. Tyto hodnoty jsou pro rozpoznatelné příkazy shodné s hodnoty COM. V případě nerozpoznatelného příkazu je hodnota ACK nastavena na hodnotu 0xCF. V případě zápisu do Timepix2, tak v případě vyčítání z Timepix2 může hodnota payload, v závislosti na zapsané/vyčtené hodnotě, nabývat od 1 byte až po 32 bytů.



Obrázek 4.7: Nastavění registru Timepix2. [21]



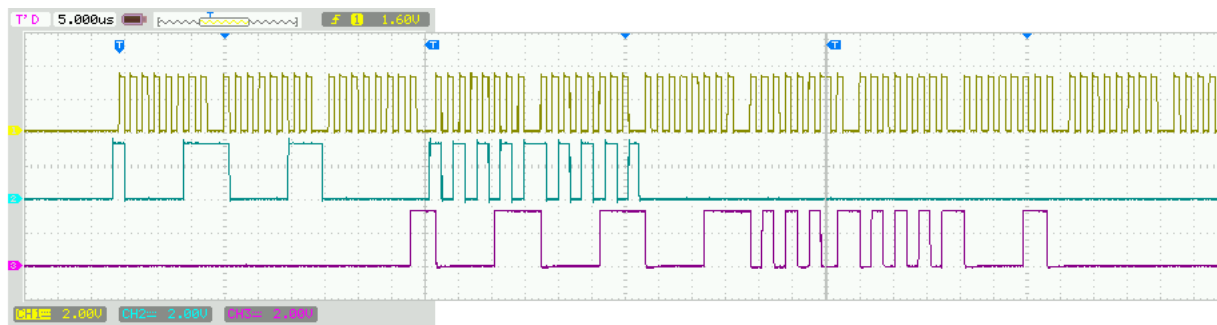
Obrázek 4.8: Vyčtení registru Timepix2. [21]

4.3.1 SPI komunikace

Ke komunikaci s Timepix2 byla použita SPI komunikace. Pro SPI komunikaci jsou potřebné 4 signály. Význam signálů je popsán v sekci **Připojení k vývojovému kitu**. Použité MCU používá standardní 3,3 V logiku, neboli za logickou hodnotu 1 považuje napěťovou úroveň +3,3 V a za logickou hodnotu 0 považuje napěťovou úroveň 0 V. Na obrázku 4.9 je SPI komunikace mezi MCU a Timepix2. Konkrétně se jedná o příkaz nastavení a vyčtení z registru NTESTPULSES Timepix2. Z důvodu velikosti obrazovky u osciloskopu jsou zde zobrazeny pouze 3 signály a to CH1-SCK, CH2-MOSI a CH3-MISO. Komunikace se zahájí na náběžnou hranu hodin SCK, kdy navíc signál nCS (není na obrázku) jde do nuly. Z napěťových úrovní vidíme, že signály jsou v rozmezí 0-3,3 V, tedy komunikace byla měřena na výstupu z MCU.

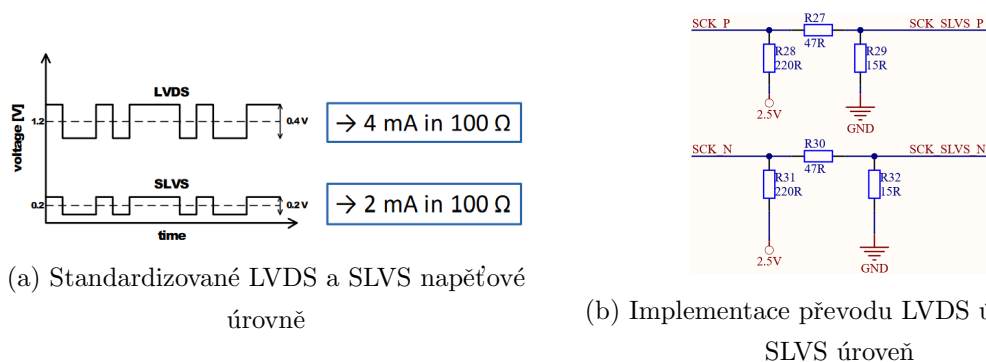
4.3.2 SLVS komunikace

Pro komunikaci s Timepix2 je zapotřebí, aby každý ze signálů vytvořil SLVS pár. Nebo-li například ze signálu SCK je potřeba udělat diferenciální SLVS signály SCK.SLVS_P a SCK.SLVS_N. K tomu jsem použil vysokorychlostní LVDS vysílač SN65LVDS31. Kde na jeho vstupu je signál s napěťovým rozmezím 0-3,3 V, konkrétně signál generovaný MCU, a na jeho výstupu je diferenciální LVDS pár, který na obrázku 4.14b je označený postfixem N a P. Z těchto LVDS úrovní, které jsou zobrazeny zde 4.10 [22], je nutné pro



Obrázek 4.9: Ukázka SPI komunikace mezi MCU a Timepix2. Nastavení a vyčtení registru Timepix2: NTESTPULSES

Timepix2 vytvořit diferenciální SLVS pár. To jsem provedl pro každý z diferenciálních LVDS párů následovně 4.10b. SLVS diferenciální pár, s postfixem SLVS_P a SLVS_N již vede do Timepix2. Uvnitř Timepix2 je navíc zakončen vnitřním odporem jehož hodnota je $100\ \Omega$. Toto zakončení se poté projeví v sekci **Varianta shield-tpx2_optim**.

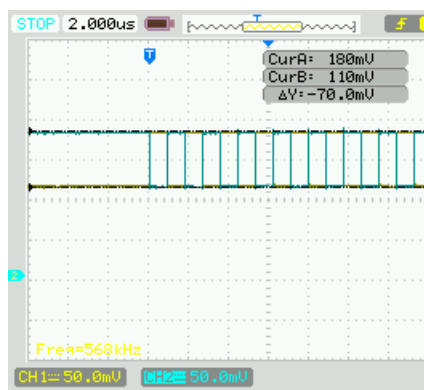


(a) Standardizované LVDS a SLVS napěťové úrovně

(b) Implementace převodu LVDS úrovně na SLVS úrovně

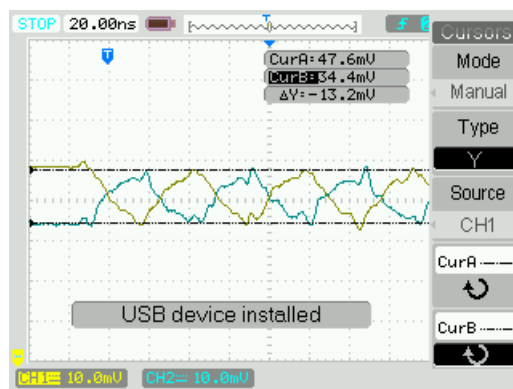
Obrázek 4.10: LVDS a SLVS. Zdroj: SLVS interface circuits

Napěťové úrovně signálu SCK_SLVS_P a SCK_SLVS_N jsou vidět na obrázku 4.11. Signály byly proměřeny na vstupech vedoucích do Timepix2. CH1 je signál SCK_SLVS_P a CH2 je signál SCK_SLVS_N. Jak je vidět, napěťový offset diferenciálních SLVS párů je posunut, ale rozdílově napětí $70\ \text{mV}$ mezi páry, je pro komunikaci s Timepix2 vyhovující.



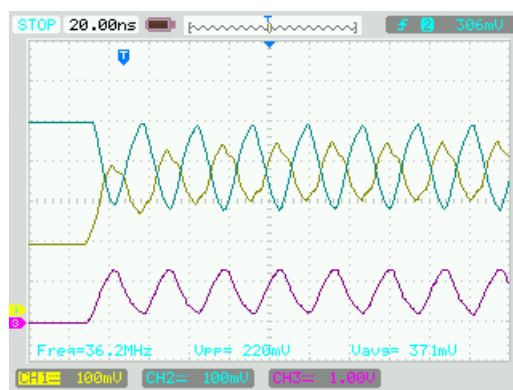
Obrázek 4.11: Napěťový průběh, pár SCK_SLVS

Timepix2 odesílá data také vždy pomocí diferenciálních SLVS párů. Pro jejich konverzi na 3,3 V logiku jsem použil LVDS přijímač DS90LV032A, který jsem zapojil viz. 4.14a. Do LVDS přijímače vedou tedy vždy SLVS diferenciální páry vedoucí z Timepix2. Tento konkrétně použití LVDS přijímač DS90LV032A potřebuje, aby SLVS diferenciální páry na vstupu do přijímače měly rozdílové napětí alespoň 20 mV. Pokud necháme registry Timepix2, které řídí proudové výstupy SLVS signálu v základním nastavení, tedy registr VCM_SLVS řídicí nastavení proudového offsetu necháme nastavený s hodnotou, která napěťový offset nastavuje na přibližně 34,4 mV [21]. A registr VBIAS_SLVS, nastavující, jak velké rozdílové napětí bude po diferenciálních párech vysíláno necháme také v základním nastavení, tedy nastaven na hodnotu 0x07 [21]. Poté jsem po proměření signálů DCLOCK_OUT_P a DCLOCK_OUT_S ze zapojení 4.14a, dostal na osciloskopu tento průběh. 4.12.



Obrázek 4.12: SLVS páry DCLOCK_OUT při základním nastavení

Jak je vidět, napěťový offset diferenciálních úrovní odpovídá [21]. Rozdílové napětí diferenciálních párů je ovšem jen 13 mV, při tomto rozdílovém napětí nemůže LVDS přijímač správně převést SLVS komunikaci na 3,3 V logiku, kterou by poté mohl zpracovat MCU.

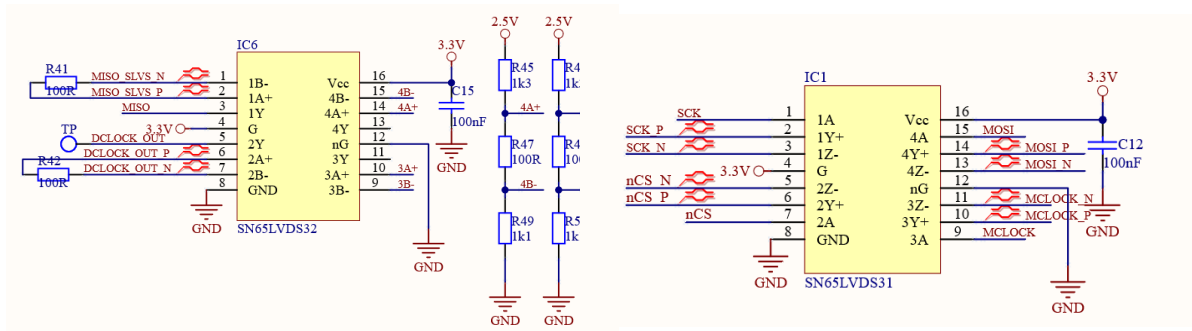


Obrázek 4.13: Nastavení SLVS diferenciálních párů DCLOCK_OUT

Jak bylo zmíněno, proudové parametry vysílaných diferenciálních párů můžeme změnit zapsáním do registrů VBIAS_SLVS a VCM_SLVS. Nastavíme-li první registry na hodnotu

0xFF a druhý na hodnotu 0x45 a proměříme signály vedoucí do LVDS přijímače, dostaneme tento průběh 4.13. Jak je vidět, tak v nejhroším případě, tedy jel-li CH1 zleva v první kladné špičce a CH2 je v první zleva záporné špičce, je rozdílové napětí přibližně 100 mV. Toto rozdílové napětí již LVDS přijímač dokáže korektně zpracovat a na výstupu generovat signál, který má 3,3 V logiku a je tak validní pro MCU. Tento výsledný signál, jde již zpět do MCU, kde je poté zpracován a jeho průběh, v případě signálu SCK, je jeho průběh vidět na obrázku 4.13, kde je zobrazen na kanálu CH3.

Samotné zapojení LVDS vysílače a přijímače je možné vidět na obrázku 4.14. Je-li některý ze vstupu LVDS přijímače nezapojený, musí se zapojit dle zapojení na uvedeném obrázku.

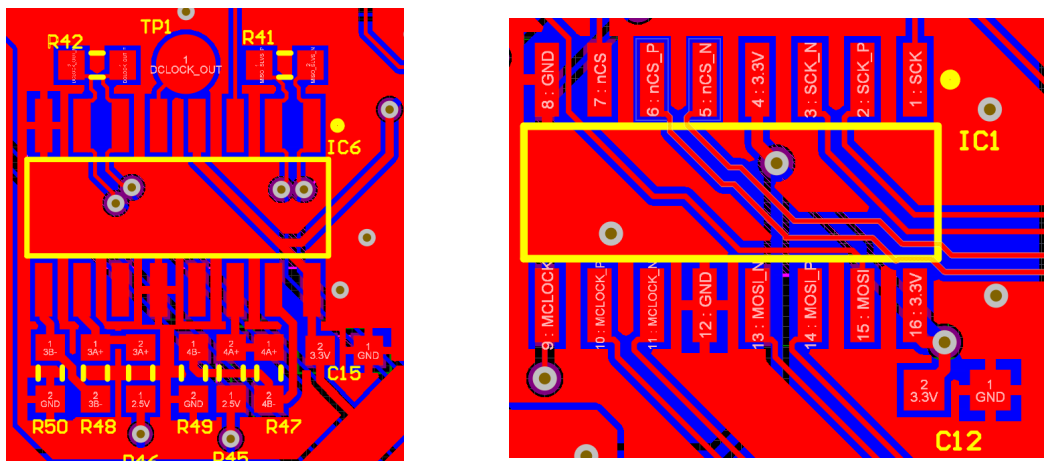


(a) Zapojení přijímače LVDS

(b) Zapojení vysílače LVDS

Obrázek 4.14: LVDS zapojení

Poté zapojení PCB LVDS přijímače a vysílače je vidět na obrázku 4.15. V Altium Designer, kde routování probíhalo, jsem využil, pro diferenciální LVDS páry, funkci interaktivního routování diferenciálních párů.



(a) PCB zapojení přijímače LVDS

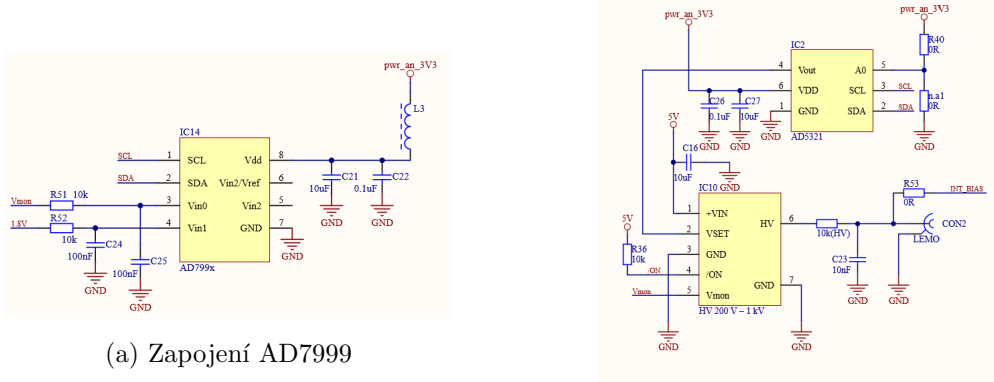
(b) PCB zapojení vysílače LVDS

Obrázek 4.15: PCB LVDS zapojení

4.4 I²C komunikace

Pro I²C komunikaci [23] se využívají signály SDA a SCL. Komunikace I²C na shield-tpx2 slouží ke komunikaci s dvěma integrovanými obvody.

První z nich je ADC převodník AD7999 od firmy Analog Devices. Jeho zapojení je možné vidět na obrázku 4.16a.



(a) Zapojení AD7999

(b) AD5321 a HV zdroj

Obrázek 4.16: Součástky komunikující pomocí I²C komunikace

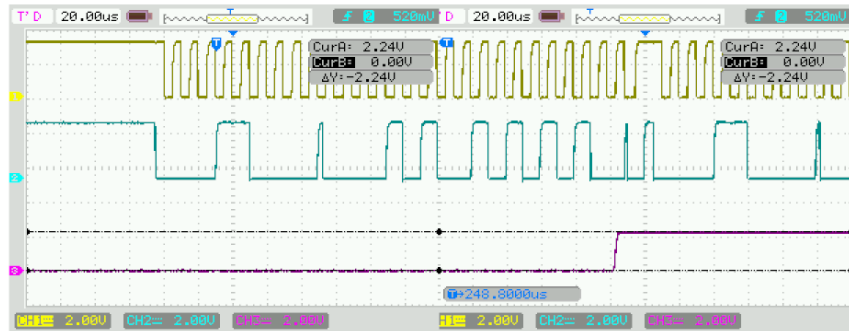
Na jeho vstupech V_{in0} a V_{in1} je napětí 1,8 V a monitorovací napětí (označeno V_{mon}) vedoucí z HV. Napětí 1,8 V slouží k napájení Timepix2, tak jeho přesné monitorování pomocí vyčítání z AD převodníku je vhodné pro kontrolu jeho napěťové úrovně. To samé platí i v případě napětí V_{mon} , které slouží pro nastavení Biasu na PN diodě, více o Biasu v sekci **Základní princip činnosti**.

Druhým integrovaným obvodem je DAC převodník AD5321 Analog Devices. Převodník má výstupní napětí připojené na nastavovací pin (V_{set}) HV zdroje. Výstupní napětí je nastaveno pomocí 4.1. Kde D odpovídá decimální hodnotě zapsané do DAC převodníku, která může nabývat hodnot 0-4095. A N je v našem případě rovno 12, protože jsem použil převodník s 12-bity. Tedy maximální napětí na výstupu DAC převodníku je 3,3 V. Výstupní napětí z DAC převodníku v rozmezí 0-3,3 V je dostačující pro nastavení vysokého napětí na HV zdroji. Dle použité varianty HV zdroje, lze v rozmezí 0-2,5 V nastavovacího napětí (V_{SET}) měnit výstupní napětí od 200 V až po 1 kV (záleží na variantě zvoleného HV zdroje, existují i varianty HV s negativním napěťovým výstupem).

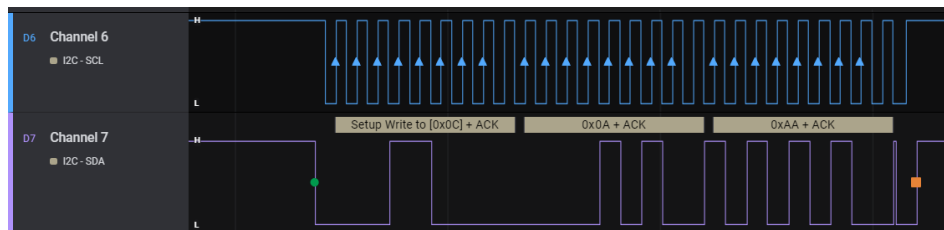
$$V_{OUT} = \frac{3.3 \cdot D}{2^N} \quad (4.1)$$

Ukázka nastavení výstupního napětí AD5321 na hodnotu 2,2 V je na obrázku 4.17. CH1 je hodinový signál SCK a CH2 je datový signál SDA. Poté CH3 měří hodnotu výstupního napětí (V_{OUT}), kterou lze odečíst z kurzorů, které na této úrovni jsou umístěné. Jak je vidět, hodnota napětí z CH3 se po zapsání hodnoty do DAC pomocí I²C komunikace změnila z hodnoty 0V na hodnotu 2,24 V. Pro jednodušší dekódování komunikace přikládám fotku 4.18 téhož měření, ale zachyceného logickým analyzátozem, který byl připojen k PC

a zpracován programem Saleae Logic 2.3.38. Porovnáme-li napěťové úrovně CH3 z obrázku 4.17 a vypočítaného výstupního napětí pomocí 4.1, kde za D dosadí zapsanou hodnotu po I²C tedy hodnotu $0xAAA_{16} = 2730_{10}$, pak $V_{OUT} \doteq 2,2 \text{ V}$. Jak je vidět tato hodnota odpovídá naměřenému výstupnímu napětí 4.1, tedy komunikace proběhla v pořádku.

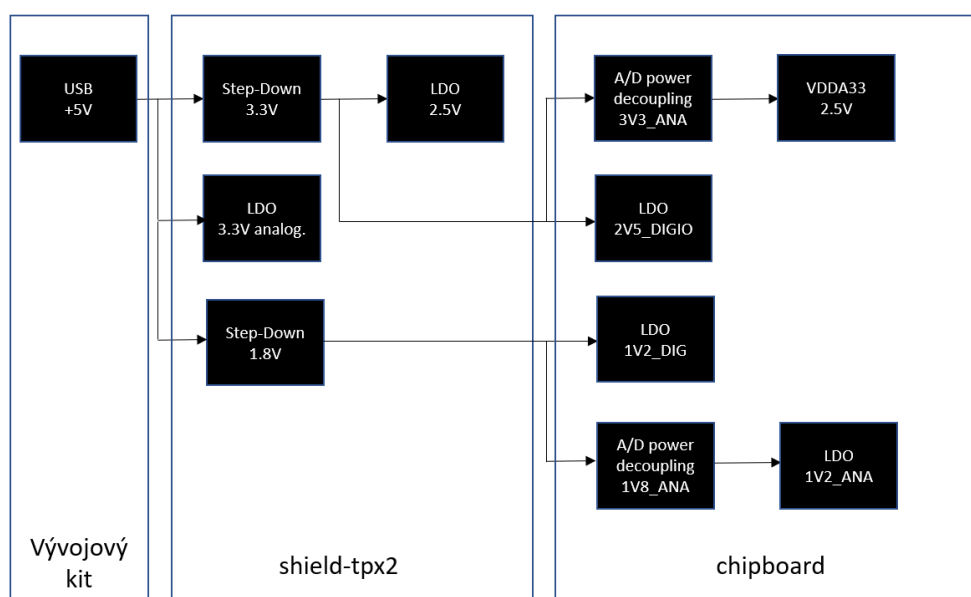


Obrázek 4.17: Natavení výstupu AD5321 pomocí I²C komunikace



Obrázek 4.18: Dekódování I²C komunikace

4.5 Napájení



Obrázek 4.19: Blokové schéma napájení shield-tpx2 a Chipboardu

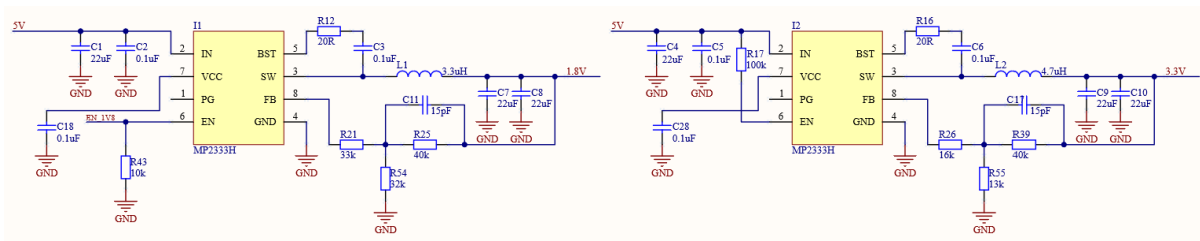
Pro přehlednost uvádím na obrázku 4.19 blokové schéma napájení na shield-tpx2 a na Chipboardu. V každé buňce je uvedeno o jaké napětí se jedná a jak je dané napětí získáno (použitím LDO, Step-Down stabilizátoru atd..).

Na shieldu-tpx2 je celkem rozváděno 5 napěťových úrovní. Prvním z nich je napětí +5V. Toto napětí je na PCB vyvedeno přímo z konektoru ARDUINO Uno V3 shield. Tři napětí (1,8V, 3,3V, 3,3V analogových) jsou poté vždy získané z těchto +5 V pomocí stabilizátorů a poslední napětí 2,5 V je získané z 3,3 V. Na tuto práci proběhla výroba celkem dvou shield-tpx2, označení variant je shield-tpx2_v1 a shield-tpx2_v2. V době, kdy probíhal návrh celého PCB, muselo dojít, kvůli nepříznivé situaci na trhu s integrovanými obvody celkem třikrát k výměně stabilizátorů. Konkrétní typy daných stabilizátorů, zde neuvádím, dají se, ale v případě nedostupnosti nahradit jejich ekvivalenty.

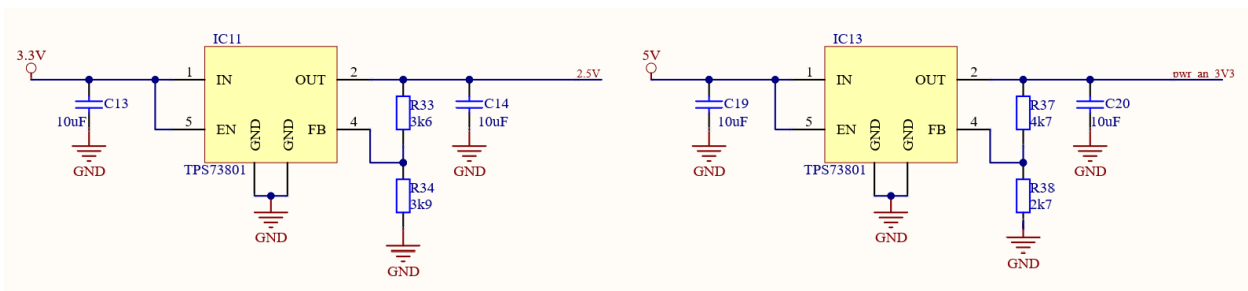
4.5.1 Schematické zapojení

Napětí 1,8 V a 3,3 V je získané pomocí step-down stabilizátorů 4.20. Napětí 1,8 V slouží pro napájení Timepix2 a napětí 3,3 V je poté použito pro napájení přijímače a vysílače LVDS signálů. Navíc stabilizátor generující napětí 1,8 V, má na svém pinu EN přiveden signál EN_1V8 vedoucí z MCU. Tento signál umožňuje programově kontrolovat zapnutí resp. vypnutí napájení pro Timepix2, pomocí zapsání logické hodnoty jedna resp. nula.

Napětí 2,5 V je získané pomocí LDO z 3,3 V 4.21 a je použito pro konverzi LVDS napěťových úrovní na SLVS napěťové úrovně. Napětí 3,3 V analogové je získané také pomocí LDO z 5 V 4.21 a používá se jako napájení komponent AD5321 a AD7999. Účelem oddělení 3,3 V napájení na analogovou část bylo dosáhnout co nejstabilnějšího napájení pro ADC a DA převodník.



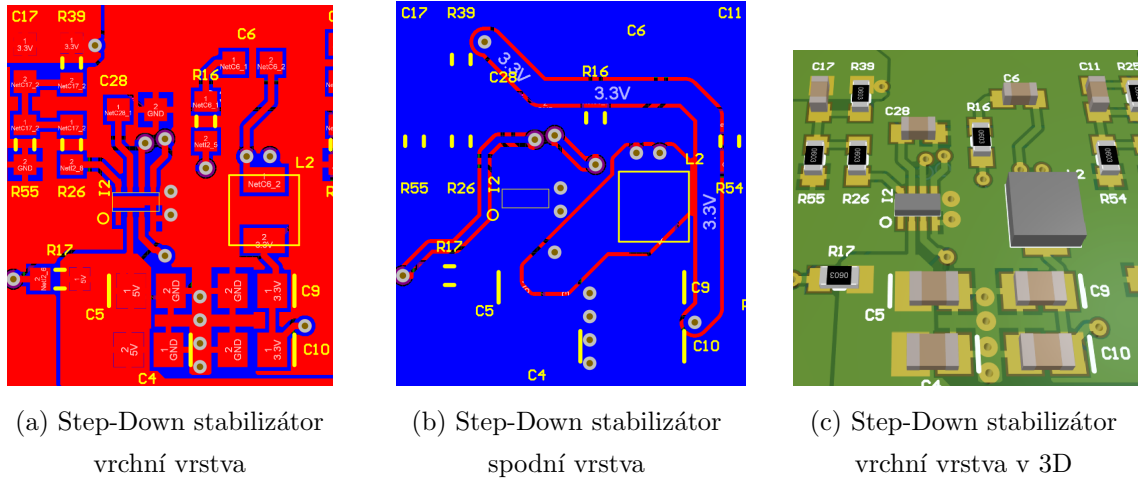
Obrázek 4.20: Zapojení step-down stabilizátorů



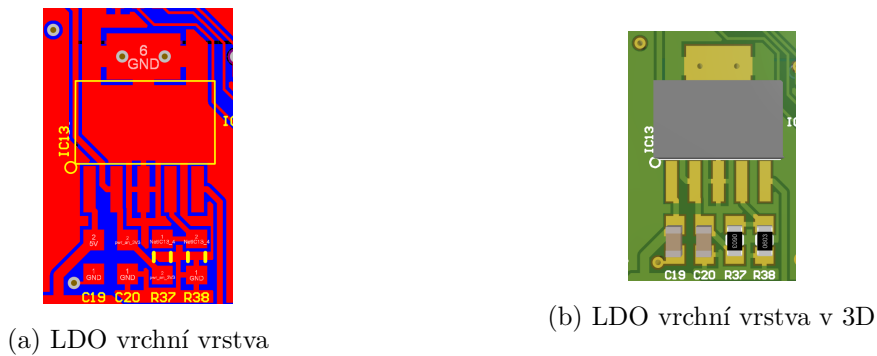
Obrázek 4.21: Zapojení LDO stabilizátorů

4.5.2 PCB

Zejména pro step-down stabilizátory, je důležité dodržet návrhové požadavky zapojení výrobce, pro správné fungování stabilizátoru. PCB zapojení step-down stabilizátorů je poté vidět zde 4.22. Nutné bylo umístit kondenzátory C5, C4, C9 a C10, co nejbližže stabilizátoru a zvolit pouzdro o velikosti 0805. LDO zapojení je poté vidět na obrázku 4.23



Obrázek 4.22: Step-Down stabilizátor zapojení na PCB



Obrázek 4.23: LDO stabilizátor PCB

Kapitola 5

Testování

5.1 Rychlost komunikace

MCU komunikuje s Timepix2 pomocí **SPI komunikace**. Snahou tedy bylo otestovat maximální rychlost se kterou dokáže MCU s Timepix2 správně komunikovat. Pro ověření správnosti komunikace jsem v prostředí STM32 Cube IDE, napsal jednoduchý program, jehož hlavní nekonečnou smyčku uvádím níže.

```
while (1)
{
    for(int i = 0; i <= 65536; i++){
        // pattern testovací datove sekvence
        tpx2_set_reg_16b(SET_NTESTPULSES, 0xAAAA);
        uint8_t result1 = tpx2_get_reg_16b(GET_NTESTPULSES, &data16_1);

        tpx2_set_reg_16b(SET_NTESTPULSES, i);
        uint8_t result2 = tpx2_get_reg_16b(GET_NTESTPULSES, &data16_2);

        tpx2_set_reg_16b(SET_NTESTPULSES, 0x5555);
        uint8_t result3 = tpx2_get_reg_16b(GET_NTESTPULSES, &data16_3);

        // same as if data16_1 != 0xAAAA or data16_2 != i or data16_3 != 0x5555
        if(result1 != 0 || result2 != 0 || result3 != 0){
            error++;
        }
        count++;
    }
}
```

Pattern testování datové sekvence jsem zvolil takový, aby vyzkoušel zápis a vyčtení hodnot přes celý interval hodnot, které mohou nastat, tedy v případě 2 bajtového datového typu se jedná o hodnoty od 0 po $2^{16} = 65536$. A dále jsem zvolil hodnoty, které testují četněji a to hodnoty 0xAAAA a 0x5555. Tyto hodnoty jsem zvolil právě takto, protože se u nich pravidelně při binárním zápisu střídají jedničky a nuly, neboli $A_{16} = 1010_2$ a $5_{16} = 0101_2$.

Za bezchybnou komunikaci jsem prohlásil stav, kdy proměnná *count* > 20000 a proměnná *error* = 0. Pokud zapojíme LVDS přijímač viz. 4.14a bez zakončovacích odporů R41 a R42, komunikace bude funkční jen pro rychlosti jednotek MHz. Při rostoucí frekvenci komunikace (desítky MHz), však komunikace selhává. Při správném nastavení registrů Timepix2, viz. **SLVS komunikace** a přidání zakončovacích odporů, jsem na frekvenci 25 MHz SPI komunikace schopen dostat takovýto 4.13 průběh napětí. Napětí bylo měřeno na SLVS diferenciálních párech vedoucích z Timepix2. Experimentálně jsem ověřil, že SPI komunikace probíhá bezchybně, při frekvenci 50 MHz. Při testování na 50 MHz jsem namísto vývojového kitu STM32 Nucleo-64 s STM32F401RE MCU, který umožňuje komunikovat pomocí SPI na maximální frekvenci okolo 35 MHz, použil vývojový kit STM32H735G-DK. Tento vývojový kit již dokáže pomocí SPI komunikovat na frekvenci 50 MHz. Zároveň jsem tím otestoval kompatibilitu shield-tpx2 s jiným vývojovým kitem, než se kterým jsem v průběhu celé práce pracoval.

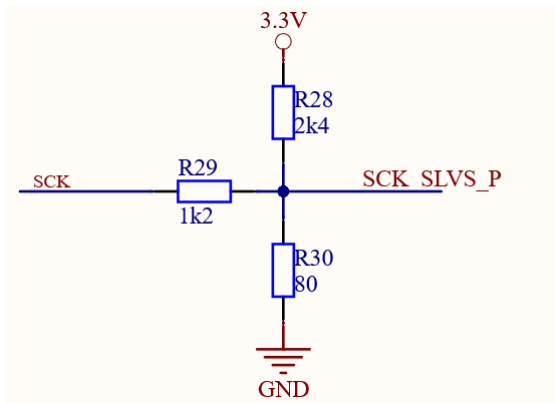
5.2 Varianta shield-tpx2_optim

Pro tuto práci bylo paralelně s shield-tpx2 vyrobeno PCB shield-tpx2_optim. Motivací pro návrh desky shield-tpx2_optim byla snaha nahradit LVDS vysílač, popsáný v sekci **SLVS komunikace**, zapojením s operačním zesilovačem. Zapojení s operačním zesilovačem, nahrazující LVDS vysílač, by při přechodu na radiačně odolnou variantu shield-tpx2_radhard umožňovalo použít výrazně menší pouzdro radiačně odolného operačního zesilovače, než je pouzdro pro radiačně odolný LVDS vysílač.

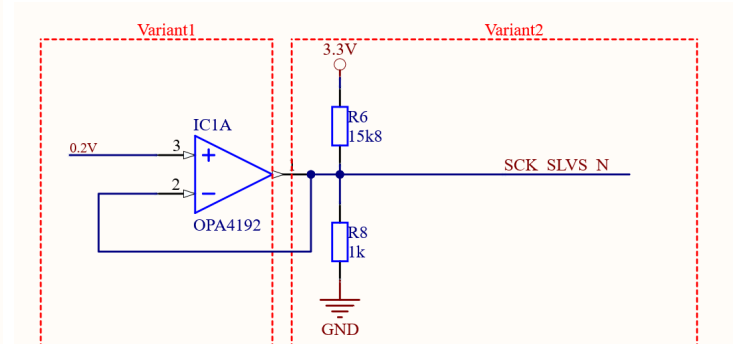
5.2.1 Schematické zapojení

Snahou tedy bylo nahradit zapojení s LVDS vysílačem SN65LVDS31 4.14b, pomocí použití operačního zesilovače, nebo lépe pouze použitím zapojení jen s odpory. Návrh tohoto náhradního zapojení je poté vidět zde 5.1. Na obrázku je ukázáno zapojení jen pro diferenciální SLVS pár SCK, pro ostatní páry je zapojení analogické. Jak již bylo zmíněno v sekci **SLVS komunikace**, znovu zmíním, že SLVS signály jdoucí do Timepix2 jsou mezi sebou propojeny 100 Ω vnitřním odporem. Tento vnitřní odpor nejde softwarově vypnout. Rozhodl jsem se pro zapojení, kde jeden z diferenciálních SLVS signálů bude mít konstantní napěťovou úroveň 0,2 V a bude označován jako SCK_SLVS_N 5.1b a druhý SLVS signál bude mít logickou jedničku při napětí 0,3 V a logickou nulu při napětí 0,1 V a bude označován jako SCK_SLVS_P 5.1a.

Zapojení 5.1b je rozděleno na pomyslné 2 varianty. Při použití Varianty 1 je operační zesilovač zapojen jako napěťový sledovač a rezistory ve Variantě 2 nejsou osazeny. Zapojením zesilovače jako napěťového sledovače jsem chtěl docílit konstantního napětí 0.2 V na výstupu zesilovače. Jak se ale ukázalo operační zesilovač (OPA4192) nedokázal dost rychle sledovat napětí. Průběh na SLVS diferenciálních párech jdoucích do Timepix2 vypadal takto 5.2.



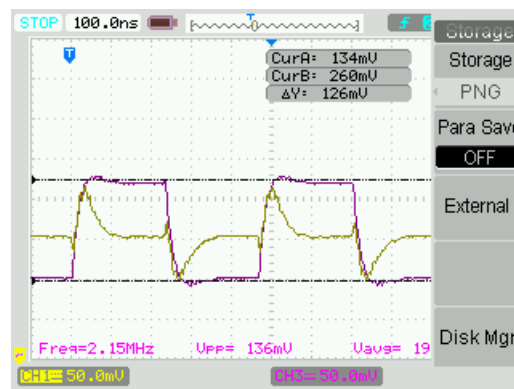
(a) Schematické zapojení shield-tpx2_optim
SCK_SLVS_P



(b) Schematické zapojení shield-tpx2_optim
SCK_SLVS_N

Obrázek 5.1: Schematické zapojení shield-tpx2_optim pro diferenciální SLVS pár SCK

Kde CH1 má být konstantní napětí 0,2 V a CH3 je signál s amplitudou 0,1 V až 0,3 V. Jak je vidět OZ nestíhal dost rychle napětí sledovat a vlivem vracejícího se napětí, kvůli vnitřnímu propojení v Timepix2, vznikal značný překmit na na kanálu CH1. Komunikace při stejném testování, jako v sekci **Rychlost komunikace**, nefungovala.

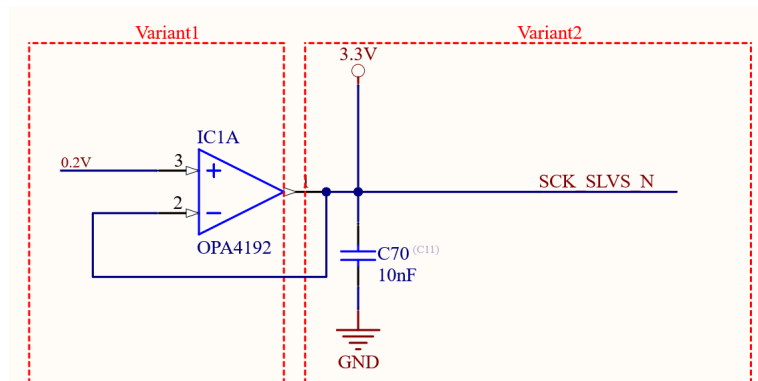


Obrázek 5.2: Schematické zapojení shield-tpx2_optim s OZ

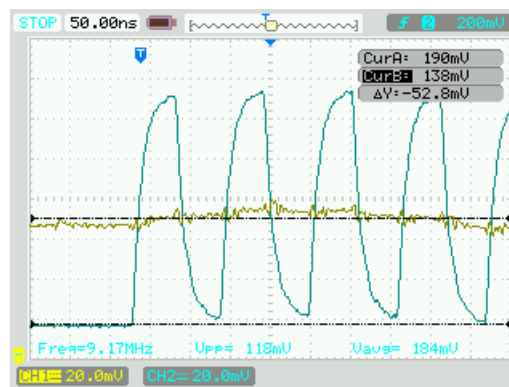
Při použití Varianty 2 je naopak operační zesilovač z obrázku 5.1b neosazen a rezistory z Varianty 2 jsou osazeny. Situace měřená stejně na stejných signálech jako při průběhu 5.2, dopadla ještě hůře.

Po analýze celého problému vyplynulo, že pokud se zapojí Varianta 1 a osadí se ve Variantě 2 místo odporu R8 kondenzátor s hodnotou 10 nF a odpor R6 se neosadí, dojde ke značnému zlepšení. Zapojení je na obrázku 5.3.

Kondenzátor dokáže překmit, způsobený vracejícím se napětím, z průběhu 5.2 vyhladit. Toto vyhlazení má za cenu menší strmosti hran signálu s amplitudou 0,1 V až 0,3 V. Průběh poté při rychlosti komunikace 9 MHz, vypadá takto 5.4. Kde CH1 má být konstantní napětí 0,2 V a CH2 signál s amplitudou 0,1 V až 0,3 V.

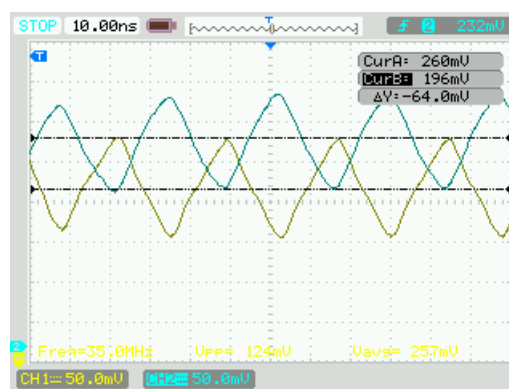


Obrázek 5.3: Schematické zapojení shield-tpx2_optim s OZ a vyhlazovacím kondenzátorem



Obrázek 5.4: Průběh po přidání vyhlazovacích kondenzátorů

Při měření výstupního diferenciálního SLVS páru DCLOCK_OUT z Timepix2, můžeme naměřit takovéto průběhy 5.5, kdy rychlost komunikace byla 35 MHz. Zmíním, že registry Timepix2 nastavující proudový výstup SLVS diferenciálních párů byly nastaveny takto: VBIAS_SLVS = 0x65 a VCM_SLVS = 0x45.



Obrázek 5.5: DCLOCK_OUT_P a DCLOCK_OUT_N při frekvenci komunikace 35Mhz

V nejhorším případě je rozdíl napětí zhruba 60 mV, s tímto rozdílovým napětím si dokáže LVDS přijímač poradit. Při stejném testování jako v sekci **Rychlost komunikace**, jsem ověřil funkčnost komunikace. Na rychlosti 35 MHz komunikace fungovala bezchybně.

Kapitola 6

Závěr

Podářilo se mi sestavit a otestovat HW prototyp vyčítacího zařízení, označovaný jako shield-tpx2, pro Timepix2 na bázi MCU.

Při práci jsem se seznámil s principem fungování pixelového detektoru Timepix2. Návrh schématu, routování PCB, dodání podkladů pro výrobu a tvorba knihovnic součástek probíhala v programu Altium Designer, kde jsem se snažil využít všech výhod, které moderní program pro návrh PCB, Altium Designer nabízí. Osazování součástek, navržené desky probíhalo ručním osazením, pomocí pájecí stanice. Došlo, ale také i k vyzkoušení osazení, za pomoci pájecí pasty a pájecí pece. Od prvotní diagnostiky až po finální testování rychlosti komunikace jsem používal osciloskop. Pro snadnější dekódování komunikace jsem poté použil logický analyzátor a program Saleae Logic 2.3.38. Nejjednodušší debugování probíhalo pomocí výpisu po sériové lince do terminálu na PC. Pro psaní základního firmwaru jsem používal program STM32Cube IDE 1.7.0. Konfigurace použitého vývojového kitu probíhala také v tomto prostředí.

Mohu prohlásit, že zadání bakalářské práce bylo splněno. Pro mě, jako příjemným bonusem je poté zprovoznění PCB shield-tpx2-optim, které bylo při návrhu PCB trochu otazníkem.

Seznam použité literatury

- [1] D. Tureček, T. Holý, and Z. Vykydal, “Pixelman.” Dostupné z: <http://aladdin.utef.cvut.cz/ofat/others/Pixelman/Pixelman.html>.
- [2] A. Chodos, “APS news,” *American Physical Society*, vol. 17, March 2008. Dostupné z: <https://www.aps.org/publications/apsnews/200803/upload/March-2008-Volume-17-Number-3-Entire-Issue.pdf>. ISSN: 1058-8132.
- [3] Lamethodecurie.fr, “The discovery of uranium rays.” Dostupné z: <https://lamethodecurie.fr/en/article12.html>.
- [4] NobelPrize.org, “The Nobel Prize in Physics 1903.” Dostupné z: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1903/summary/>, 17 Mar 2022.
- [5] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurements*. New York: John Wiley and Sons, Inc, 3 ed., 2000. ISBN 0-471-07338-5.
- [6] I. M. Platkevič, *Signal Processing and Data Read-Out from Position Sensitive Pixel Detectors*. PhD thesis, ČVUT, 2014.
- [7] V. Vícha, *Experimenty s pixelovým detektorem pro výuku jaderné a částicové fyziky*. Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2017.
- [8] Z. Vykydal, *Evaluation of Radiation Field Properties with Pixel Semiconductor Detectors Operating in Particle Tracking Mode*. PhD thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau, Breisgau, 2012.
- [9] M. J. B. (NIST), “XCOM - Photon cross sections and attenuation coefficients.” Dostupné z: <https://atom.kaeri.re.kr>.
- [10] D. Vavrik, J. Dammer, J. Jakůbek, I. Jeon, O. Jirousek, M. Kroupa, and P. Zlamal, “Advanced x-ray radiography and tomography in several engineering applications,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, vol. 633, 2011. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448719300599>.
- [11] S. Procz, C. Avila, J. Fey, G. Roque, M. Schuetz, and E. Hamann, “X-ray and gamma imaging with Medipix and Timepix detectors in medical research,” *Radiation*

- Measurements*, vol. 127, 2019. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350448719300599>.
- [12] CERN, “Web presentation of the Medipix Collaboration.” Dostupné z: www.cern.ch/medipix.
- [13] 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.
- [14] C. Granja, S. Polansky, Z. Vykydal, S. Pospisil, A. Owens, Z. Kozacek, K. Mellab, and M. Simcak, “The SATRAM Timepix spacecraft payload in open space on board the Proba-V satellite for wide range radiation monitoring in LEO orbit,” *Planetary and Space Science*, vol. 125, 2016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063316300216/pdf?md5=30e746c68937555463b1fa0c4d1fe4ac&pid=1-s2.0-S0032063316300216-main.pdf>.
- [15] J. Jakůbek, “Semiconductor Pixel detectors and their applications in life sciences,” *Journal of Instrumentation*, vol. 4, 2009. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063316300216/pdf?md5=30e746c68937555463b1fa0c4d1fe4ac&pid=1-s2.0-S0032063316300216-main.pdf>.
- [16] M. Holík, *Precise position sensitive spectroscopy of energetic ions with adapted pixel device*. PhD thesis, UNIVERSITY OF WEST BOHEMIA, Pilsen, 2015.
- [17] J. M. Jose, *Pixel detectors in double beta decay, experiments COBRA and TGV*. PhD thesis, Czech Technical University in Prague, Prague, 2014.
- [18] 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>.
- [19] V. Kraus, M. Holik, J. Jakubek, M. Kroupa, P. Soukup, and Z. Vykydal, “FITPix - fast interface for Timepix pixel detectors,” *Journal of Instrumentation*, vol. 6, 2011. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/6/01/C01079/pdf>.
- [20] C. Granja, M. Holík, J. Jakůbek, V. Kraus, T. Kuwahara, M. Platkevič, S. Pospíšil, D. Tureček, O. Valach, and Z. Vykydal, “Timepix-based Miniaturized Radiation Micro-Tracker for the Micro-Satellite RISESAT,” *Transactions of JSASS, Aerospace*

- Technology Japan*, vol. 12, no. 29, pp. 7–11, 2014. Dostupné z: https://doi.org/10.2322/tastj.12.Tr_7.
- [21] J. Alozy, R. Ballabriga, I. Kremastiotis, X. Llopart, T. Poikela, V. Sriskaran, and W. Wong, “Timepix2 Manual (v2.1),” April 12 2019. CERN, Geneva.
- [22] F. Tavernier and P. Moreira, “SLVS interface circuits.” Dostupné z: https://indico.cern.ch/event/404345/contributions/1850202/attachments/809975/1109940/SLVS_IO.
- [23] NXP Semiconductors, “I2C-bus specification and user manual.” Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.

Seznam použitých symbolů

| | |
|-------------------|-----------------|
| α | alfa |
| β | beta |
| γ | gamma |
| θ | theta |
| ^{241}Am | izotop americia |
| Si | Křemík |
| CdTe | Cadmin Telurid |
| GaAs | Galium Arsenid |
| He^{2+} | Jádro Hélia |

Seznam použitých zkratek

| | |
|------------------|---|
| ADC | Analog to Digital Converter |
| CCD | Charge Coupled device |
| CERN | Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire |
| CMOS | Complementary Metal–Oxide–Semiconductor |
| CSA | Charge Sensitive Amplifier |
| DAC | Digital to Analog Converter |
| FDL | FastDiscLogic |
| FITPix | Fast Interface for the TimePix detector |
| HV | High Voltage |
| HW | Hardware |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| LDO | Low DropOut |
| LVDS | Low Voltage Differential Signal |
| MCU | Microcontroller |
| NIKHEF | National Institute for Subatomic Physics |
| OZ | Operační zesilovač |
| PCB | Printed Circuit Board |
| RISESAT | Rapid International Scientific Experiment Satellite |
| RISC | Reduced Instruction Set Computer |
| SPI | Serial Periphery Interface |
| SLVS | Scalable Low-Voltage Signaling |
| SRAM | Static Random Access Memory |
| SW | Software |
| TOT | Time Over Threshold |
| TOA | Time Of Arrival |
| USB | Universal Serial Bus |
| VHDCI | Very High Density Cable Interconnect |

Příloha A

Zadání Bakalářské práce



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Pavlas** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **492331**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh HW prototypu vyčítacího zařízení pro pixelový detektor Timepix 2 na bázi MCU

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a HW prototype of a reading device for a Timepix 2 pixel detector based on MCU

Pokyny pro vypracování:

V rámci řešení bakalářské práce postupujte dle následujících dílčích úkolů zadání:

- Seznamte se s MCU a principem pixelového detektoru Timepix2,
- Seznamte se s moderním návrhovým prostředím Altium Designer pro vývoj elektronických obvodů,
- Navrhněte blokový diagram a schéma HW prototypu,
- Navrhněte DPS (desku plošného spoje),
- Realizujte prototyp DPS a prověřte základní elektrické parametry,
- Vytvořte jednoduchý demonstrační program pro MCU a demonstруйте funkčnost komunikace mezi Timepix2 a MCU,
- Zhodnoťte vlastnosti navrženého prototypu HW prototypu.

Seznam doporučené literatury:

[1] Vicha, V.: Experimenty s pixelovým detektorem pro výuku jaderné a částicové fyziky, Praha: ČVUT v Praze, Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2016. ISBN 978-80-01-05888-6.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Martin Šipoš, Ph.D. katedra měření FEL (13138)

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **28.01.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Martin Šipoš, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

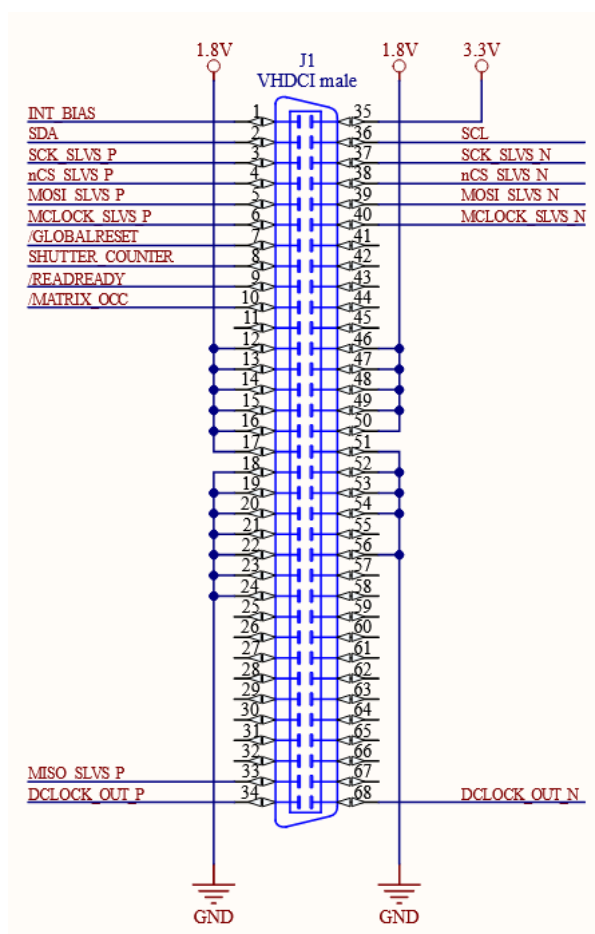
Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

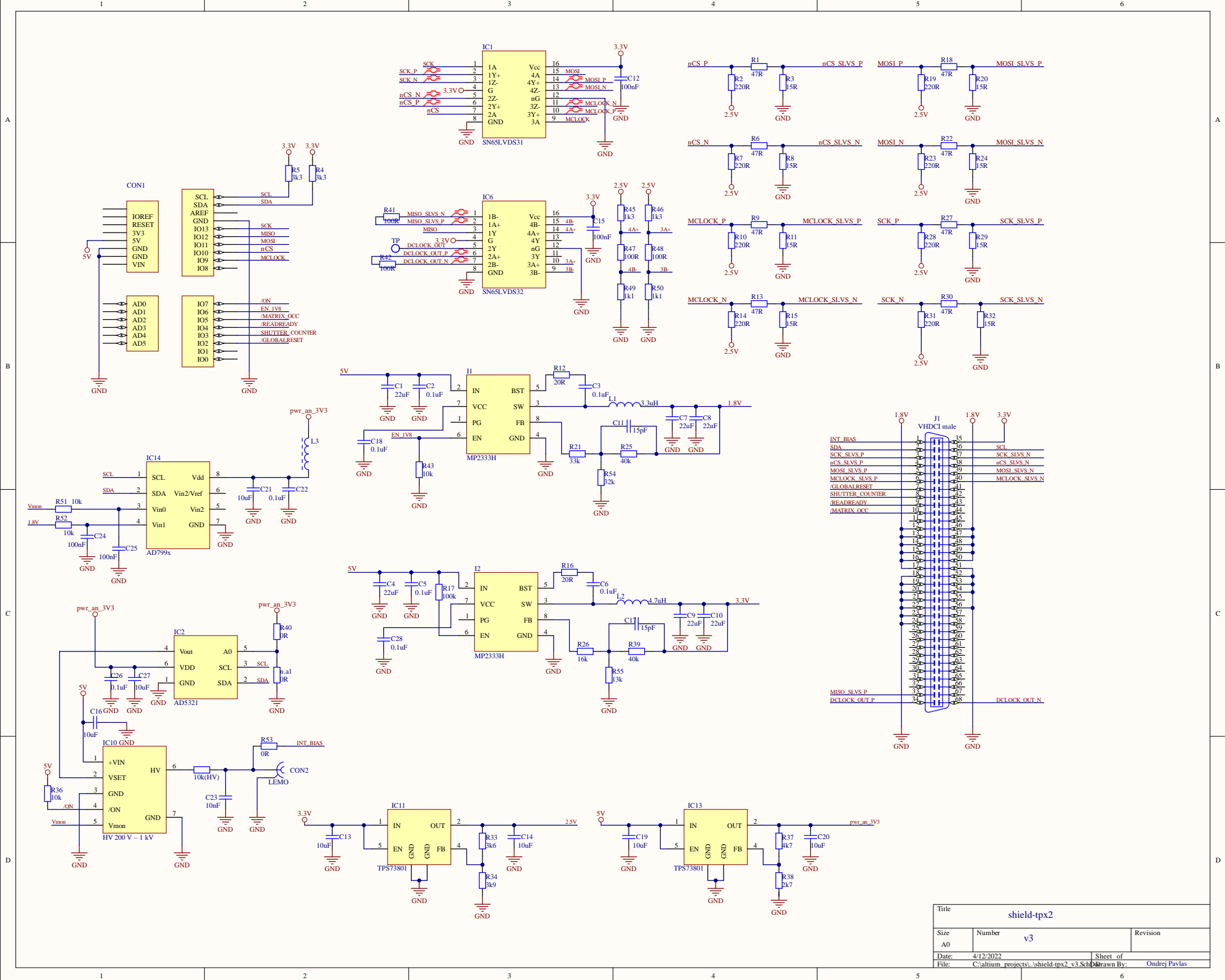
Podpis studenta

Příloha B

Schéma zapojení



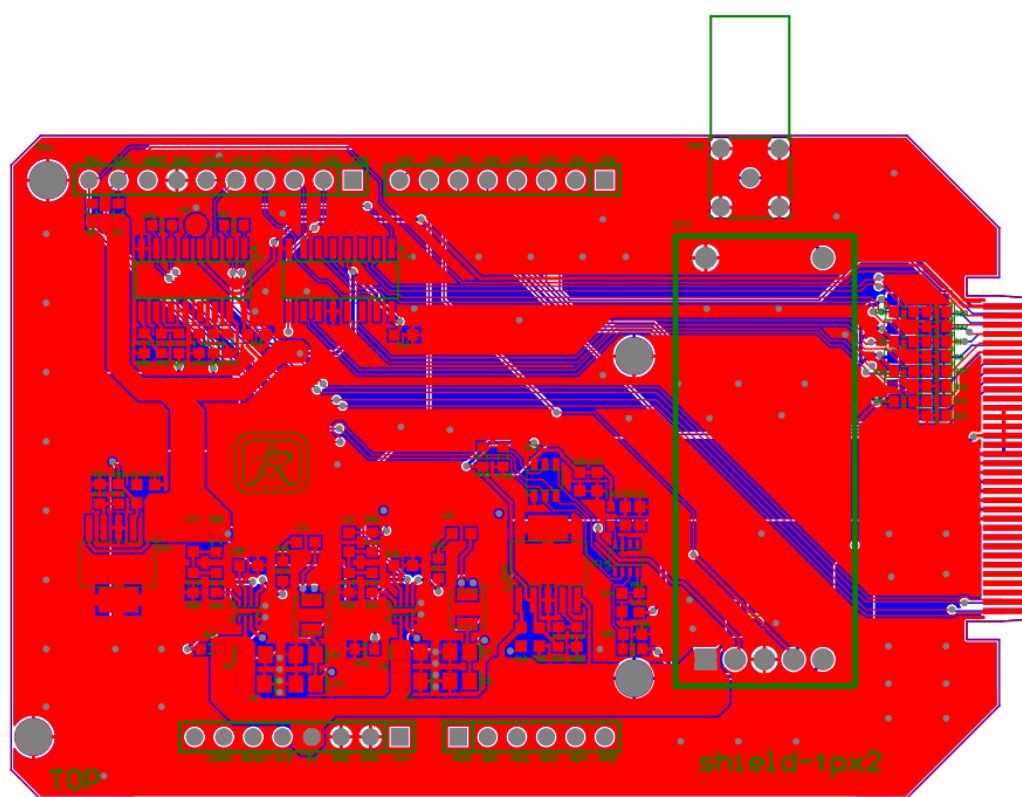
Obrázek B.1: VHDCI male



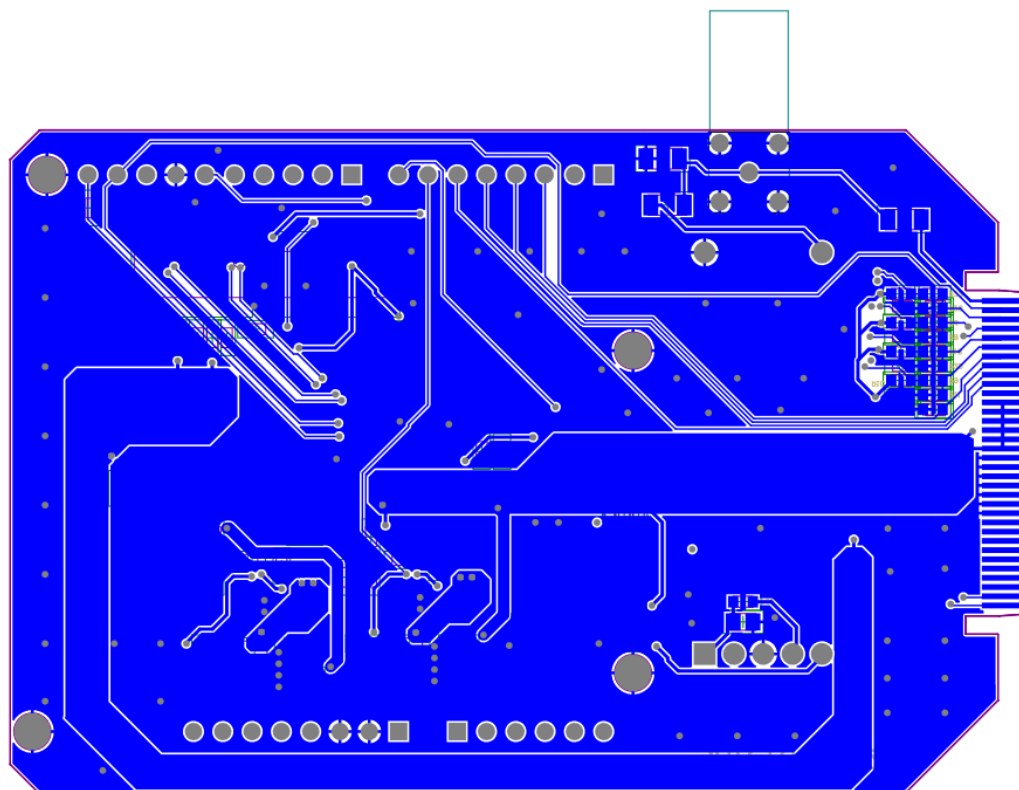
| | | | | | |
|-------|--|----|-------------------------|----------|--|
| Title | | | shield-tpx2 | | |
| Size | Number | v3 | | Revision | |
| Date: | 4/12/2022 | | Sheet of | | |
| File: | C:\allium_projects\shield-tpx2_v3.SchDoc | | Drawn By: Ondrej Pavlas | | |

Příloha C

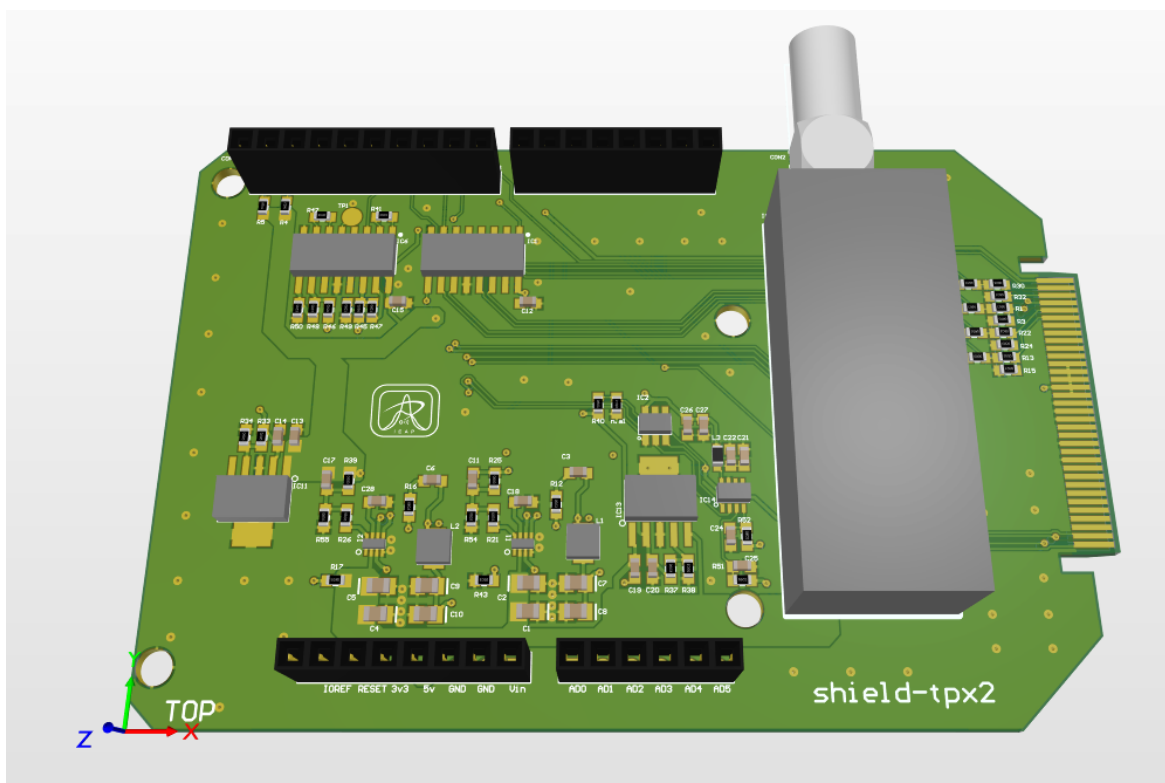
Formátově velké obrázky



Obrázek C.1: shield-tpx2 vrchní PCB vrstva



Obrázek C.2: shield-tpx2 spodní PCB vrstva



Obrázek C.3: shield-tpx2 3D pohled