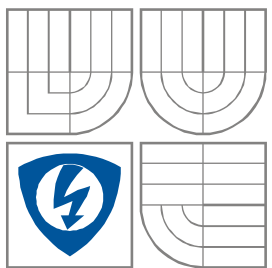




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PŘEVODNÍKOVÁ KARTA PRO PŘESNÉ ŘÍZENÍ LASEROVÉ DIODY

CONVERTER CARD FOR PRECISE CONTROL OF LASER DIODE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ ČOŽÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. PETR FIEDLER, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Ondřej Čožík

ID: 106398

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Převodníková karta pro přesné řízení laserové diody

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete a zrealizujete převodníkovou kartu pro přesné řízení laserové diody umožňující nezávislé nastavení velikosti klidového pracovního bodu a modulačního proudu. Laserová dioda bude sloužit jako zdroj měřicího signálu s délkou pulsu menším než 100 ns. Karta také bude umožňovat přesné synchronizované měření signálu čtyř fotodiod s minimálním rozlišení 14 bitů. Frekvence měření bude vyšší než 200 kHz. Výstupní data budou zpracovávána a předávána na komunikační sběrnici CAN s komunikační rychlostí 1 Mb/sec. Požadovaný formát výstupní desky je polovina EUROCARD slotu do typizované RACK skříně. Vstupy a výstupy z karty musí být ošetřeny EMI a ESD filtry, dle možností a potřeby. Napájecí bloky by měli dosahovat vysoké účinnosti za předpokladu použití spínaných zdroj s vysokými pracovními kmitočty. Požadovaný rozsah provozních teplot karty je od -25°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Celou práci včetně podkladů pro výrobu a osazení DPS dodejte také na CD.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BIELECKI, Zbigniew; CHMIELEWSKI, Krzysztof. Application of avalanche effect in transistors for shaping of the pulse driving diode laser. Opto-Electronics Review. 1996.

LUKÁŠ, Michal. Laserové diody : Princip funkce laserových diod. Elektrevue : Časopis pro elektrotechniku [online]. 2001.

PASCHOTTA, Rüdiger. RP-Photonics : Photodiodes, 2011. Encyclopedia of Laser Physics and Technology.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody. Nejprve je popsán princip samotné laserové diody, fotodiody a princip funkce snímače s optickým vláknem. Dále se práce zabývá popisem vzniklé převodníkové karty. V diplomové práci jsou postupně rozebírány jednotlivé části a je detailně vysvětlena jejich funkce. Následně jsou v diplomové práci testovány problémové části převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody, jako je část pro spínání proudu laserovou diodou a řešení zapojení pro vyhodnocení vygenerovaného proudového pulzu na snímací fotodiodě. Nedílnou součástí práce tvoří popis realizované desky plošného spoje převodníkové karty, kde jsou popsány její jednotlivé vrstvy a uspořádání součástek na desce plošného spoje. V poslední části práce je popsáno programové vybavení řídicího mikrokontroléru, které vzniklo za účelem otestování všech navržených částí převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody. Současně vznikl i program pro PC, který komunikuje s převodníkovou kartou po sběrnici USB.

Klíčová slova

Laserová dioda, Fotodioda, Vláknově optický senzor, řízení laserové diody, měření proudu fotodiody.

Abstract

The diploma thesis deals with design of the converter card for the precise control of a laser diode. At first, there are described the principles of the laser diode, photodiode and basic functions of optical fiber sensors. Following chapter deals with description of developed converter card. In the diploma thesis are discussed all function blocks of the converter card and they are explained in detail. In the thesis are subsequently tested all problem parts of the converter card for the precise control of the laser diode, such as fast switching of the current flowing through the laser diode and design of the connection for evaluating of current pulse from the sensing photodiode. An integral part of thesis is a description of created printed circuit board and there are described all used layers and devices' layout on the PCB. Final part of the diploma thesis deals with firmware for the microcontroller, which was made for testing of all function blocks of the converter card for the precise control of a laser diode. At the same time was developed software for PC, which communicates with the converter card via universal serial bus (USB).

Keywords

Laser diode, Photodiode, Fiber optic sensor, Laser diode control, Photodiode current measurement.

Bibliografická citace:

ČOŽÍK, O. *Převodníková karta pro přesné řízení laserové diody*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 95 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D..

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „převodníková karta pro přesné řízení laserové diody“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **11. dubna 2012**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Petrovi Fiedlerovi, PhD. za odborné vedení při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Jaroslavovi Kadlecovi, PhD. za odborné konzultace a všechny cenné rady, které mi velmi pomohly při řešení mé diplomové práce. Poděkování patří také celé mé rodině, která mě ve studiu podporovala a zejména mi studium umožnila.

V Brně dne: **11. dubna 2012**

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Teoretický rozbor	10
2.1	Lasertová dioda – princip funkce.....	10
2.2	Fotodioda.....	12
2.3	Princip funkce snímače s optickým vláknem.....	14
3	Popis zapojení a funkce karty.....	16
3.1	Napájecí část.....	16
3.1.1	Blokové schéma napájecí části	16
3.1.2	Schéma zapojení napájecí části	17
3.2	Digitální část.....	18
3.2.1	Řidící obvod převodníkové karty	19
3.2.2	Sběrnice USB	21
3.2.3	Sběrnice CAN.....	24
3.2.4	Obvody komunikující pomocí sběrnice IIC.....	24
3.2.4.1	Měření teploty	25
3.2.4.2	Uložení inicializačních a konfiguračních dat	26
3.2.4.3	Digitální vstupy a výstupy	27
3.2.4.4	Adresa převodníkové karty	29
3.2.4.5	Indikace stavu převodníkové karty	30
3.2.5	Připojení převodníkové karty do standardizované skříně.....	31
3.2.6	Výběr analogově-číslicového převodníku pro komunikaci (sběrnice SPI)	32
3.3	Analogová část.....	34
3.3.1	Přesné řízení laserové diody	35
3.3.1.1	Blokové schéma řízení laserové diody.....	35
3.3.1.2	Schéma zapojení řídicí části pro laserovou diodu.....	36
3.3.2	Vyhodnocení pulzů na fotodiodě.....	38
3.3.2.1	Analogové kanály pro vyhodnocování velikosti pulzů na fotodiodách	39
3.3.2.2	Schéma zapojení analogového kanálu pro vyhodnocování velikosti pulzu na fotodiodě.....	40
4	Ověření problémových částí převodníkové karty.....	44
4.1	Testování funkce obvodu LM5111 pro řízení laserové diody	44
4.2	Testování spínání laserové diody pomocí obvodu LM5111 a tranzistoru BSS138.....	46
4.3	Měření velikosti pulzů na fotodiodě pomocí A/Č převodníku AD7685.....	49

5	Popis desky plošného spoje převodníkové karty	52
5.1	Vrchní vrstva (TOP) desky plošného spoje převodníkové karty	52
5.2	Vnitřní vrstva 1 desky plošného spoje převodníkové karty	53
5.3	Vnitřní vrstva 2 desky plošného spoje převodníkové karty	53
5.4	Spodní vrstva (BOTTOM) desky plošného spoje převodníkové karty	53
6	Programové vybavení	55
6.1	Programové vybavení řídicího mikrokontroléru LM3S2276	55
6.1.1	Popis hlavní funkce mikrokontroléru	55
6.1.2	Inicializace	56
6.1.3	Vygenerování pulzu laserovou diodou a vyhodnocení velikosti pulzu na fotodiodě ...	59
6.1.4	Odeslání dat na sběrnici CAN	61
6.1.5	Komunikace s převodníkovou kartou po sběrnici USB	62
6.1.5.1	Příkaz 0	65
6.1.5.2	Příkaz 1	66
6.1.5.3	Příkaz 2	67
6.1.5.4	Příkaz 3	67
6.1.5.5	Příkaz 4	68
6.2	Program pro vyčítání měřených hodnot	69
7	Závěr	71

1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je navrhnout převodníkovou kartu pro přesné řízení laserové diody, která má být připojena k vláknově optickému senzoru. Karta také musí následně vyhodnocovat velikost pulzu ze senzoru.

V první části diplomové práce je popsán stručně popsán princip funkce laserové diody a fotodiody. Následně je také ukázáno, na jakém principu pracuje vláknově optický senzor a do jakých skupin se dělí.

Následující část se již zabývá řešením převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody. Návrh je rozdělen do několika částí, které jsou detailně popsány. Nejprve je popsána kompletní napájecí část celé převodníkové karty, dále jsou popsány funkce všech obvodů umístěných v digitální části převodníkové karty a v závěru této kapitoly je popsáno samotné řízení laserové diody spolu s vyhodnocováním velikosti pulzů na jednotlivých fotodiodách, které slouží jako detektory záření pro vláknově optický senzor.

Po vyhotovení desky plošného spoje převodníkové karty a programového vybavení pro řídicí mikrokontrolér bylo nutné ověřit funkčnost zapojení jednotlivých částí. Ověřením důležitých částí se zabývá kapitola 4 - Ověření problémových částí převodníkové karty. Je zde odzkoušeno zapojení jak pro spínání laserové diody, tak i zapojení pro vyhodnocování velikosti pulzů na fotodiodě.

V následující části diplomové práce je zobrazena a popsána navržená deska plošného spoje převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody, je i stručně popsáno rozmístění důležitých obvodů na desce plošného spoje.

Pro otestování jednotlivých částí vyhotovené převodníkové karty pro řízení laserové diody bylo zapotřebí navrhnout také programové vybavení do řídicího mikrokontroléru LM3S2276. Popisu vzniklého programového vybavení pro testování jednotlivých částí karty, spolu s programem pro komunikaci po USB sběrnici s převodníkovou kartou, se věnuje kapitola 6 – Programové vybavení.

2 TEORETICKÝ ROZBOR

Převodníková karta obsahuje laserovou diodu pro vysílání pulzů do optického vlákna a fotodiodu pro vyhodnocování velikosti přijatých pulzů z optického vlákna, proto jsou dále v textu uvedeny základní principy funkce obou součástí spolu s obecným popisem vláknově optického senzoru.

2.1 Laserová dioda – princip funkce

Ke generování světla (emisi fotonů) dochází, když kvantová soustava přechází ze stavu s vyšší energií do stavu s nižší energií, kdy pod kvantovou soustavou, která je schopná emitovat fotony, rozumíme atomy ve volném stavu (v plynu), ionty ve volném stavu nebo v krystalové mřížce krystalu látky, atomy příměsí v monokrystalech apod. [1].

Pro vysvětlení principu laserové diody je zapotřebí znát dva termíny – **Absorpce energie** a **spontánní emise**. Pokud kvantová soustava absorbuje (pohltní) energii, pak se dostane do stavu excitace (vybuzení), kdy elektron z valenčního pásu přejde do pásu vodivostního. K absorpci fotonu dojde jen tehdy, pokud se jeho energie rovná rozdílu energie hladiny, na kterou se excitovaný elektron dostává a energii hladiny, na které setrval. Kvantová soustava zůstane po velmi krátkou dobu v excitovaném stavu a následně se za současné emise fotonu, se stejnou energií jakou měl absorbovaný elektron (s různým směrem, fází i polarizací vlnění), kvantová soustava vrátí opět do stavu s minimální energií (dojde k zářivému přeskoku). Emise může být spontánní (samovolnou), nebo stimulovanou (vynucenou).

Při stimulované emisi je do kvantové soustavy, která se právě nachází v excitovaném stavu (byl absorbován foton), přiveden další foton s energií rovnající se opět rozdílu energií obou hladin. Kvantová soustava při absorpci tzv. stimulujícího fotonu přejde do základního stavu již v tomto okamžiku za současné emise stimulovaného fotonu, který má také stejnou energii, ale navíc má i stejný směr, fází i polarizaci jako foton stimulující.

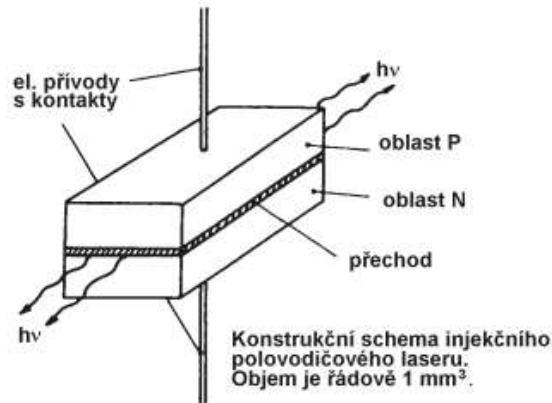
Funkce laserů je založena na procesu stimulované emise. Polovodičové lasery – laserové diody se vyznačují tím, že se v polovodičových krystalech uskutečňují zářivé přechody mezi energetickými pásy. Aby došlo k absorpci a následné stimulované emisi, fotonů, musí mít dopadající foton následující energii:

$$E_g < h \cdot n < (E_{fn} - E_{fp}) \quad (1)$$

kde E_g je šířka zakázaného pásu polovodiče [eV], E_{fn} je Fermiho kvazihladina pro elektrony a E_{fp} je Fermiho kvazihladina pro díry, h je Planckova konstanta a n je frekvence optického záření, která je dána podílem rychlosti světla a vlnové délky[1].

Aktivní prostředí v „injekčních“ polovodičových laserech pak vznikne například injekcí elektronů a děr z PN přechodu. Aby vzniklo optické záření, je zavedena kladná zpětná

vazba, které odvádí část zesíleného výstupního signálu zpět na vstup. Za tímto účelem se používají například různé rezonátory apod.

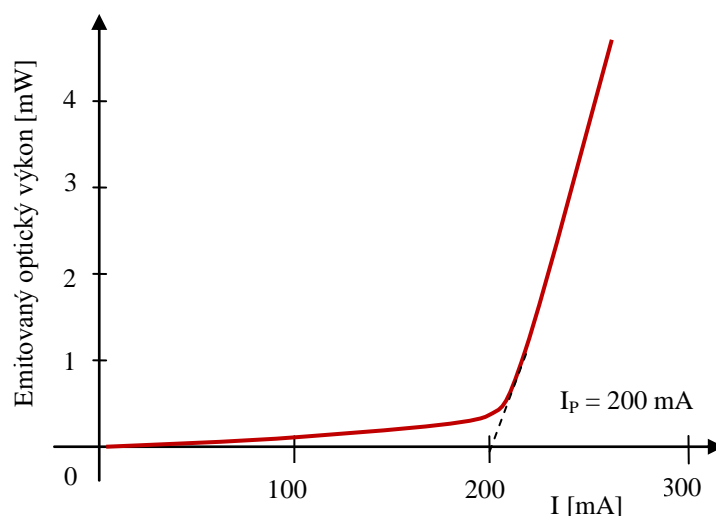


Obrázek 1: Ukázka nejjednodušší možné konstrukce polovodičového laseru[2]

Pokud přes daný PN přechod v propustném směru teče pouze malý proud, je generováno spontánní záření, kdy se fotony šíří všemi směry s náhodnou fází. Pokud se proud přechodem PN bude zvětšovat, zrychlí se proces zářivé rekombinace, což povede k růstu hodnoty fotonového toku a v důsledku kladné zpětné vazby bude docházet ke stimulaci dalších rekombinací.

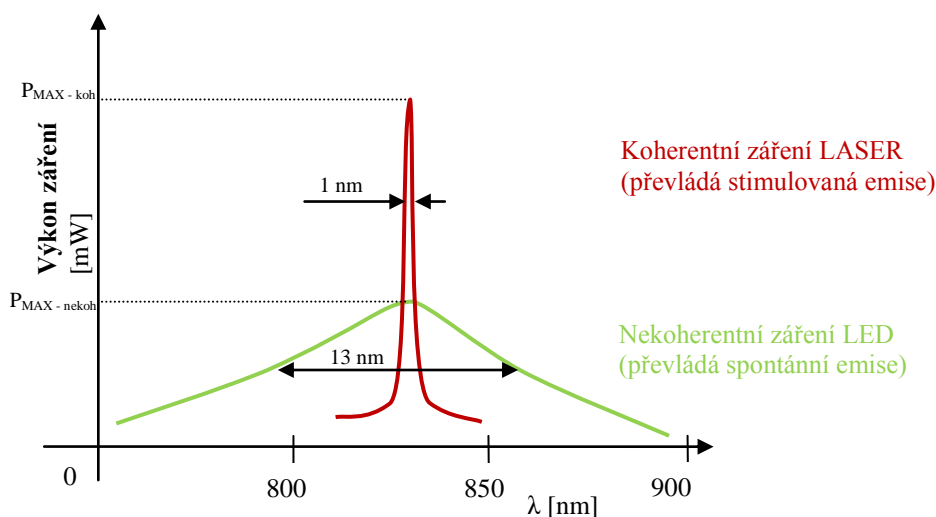
Dalším zvyšováním budícího proudu poroste intenzita vyzařování nelineárně s růstem buzení, kdy tento proces bývá nazýván superluminiscence a fotony generované při tomto procesu se také šíří ve všech směrech s náhodnou fází. Jakmile se stimulované zesílení rovná ztrátám, přejde se do dalšího režimu, což je laserový režim. Při laserovém režimu se pak generované záření stává koherentním, čehož se dosáhne použitím optického rezonátoru, kterým se zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitou frekvencí a definovanou fází a dojde tak ke vzniku stojatého vlnění. Úroveň koherence je ovlivněna kvalitou použitého rezonátoru.

Proud, při kterém u laserové diody dochází k náhlému přechodu mezi režimem nekoherentního zdroje a režimem laseru se nazývá prahový proud a bývá označován I_p .



Obrázek 2: Typická závislost emitovaného optického výkonu na budícím proudu laserové diody

Jak vypadá typická závislost emitovaného optického výkonu laserové diody na budícím proudu, viz obrázek 2. Jakmile se dosáhne prahového proudu $I_p = 200 \text{ mA}$, prudce narůstá výkon stimulovaného záření a z rezonátoru je pak emitováno koherentní záření.



Obrázek 3: Srovnání šířky pásma emitovaného záření při spontánní a stimulované emisi [1]

Současně také dochází ke změně vyzařovací charakteristiky laserové diody, kdy se zmenšuje vyzařovací úhel a dochází také ke zmenšení šířky pásma emitovaného záření (viz obrázek 3).

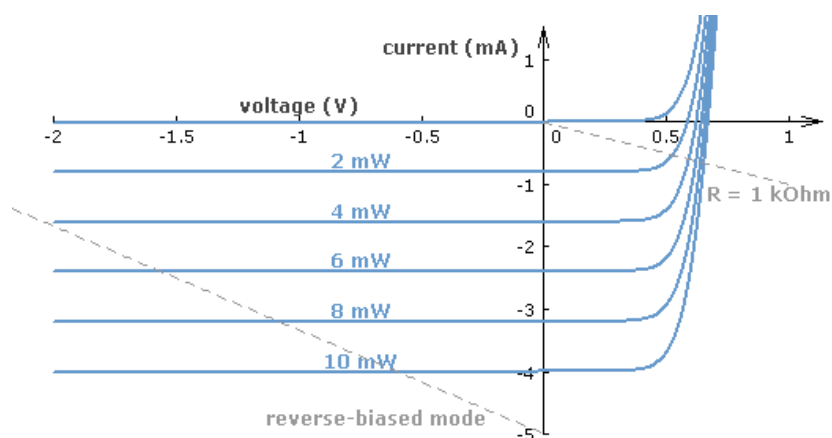
2.2 Fotodioda

Jedná se o optoelektronickou součástku používanou jako detektor světla (záření), jejíž princip je založen na generaci párů elektron-díra v blízkosti PN přechodu, případně mezi vrstvami P a N bývá ještě jedna vrstva – intrinsická, označovaná jako I. Při použití

intrinšické vrstvy je fotodioda označována jako fotodioda PIN. Většina vygenerovaných párů elektron-díra přispívá k velikosti fotoproudu. Celkový proud procházející fotodiódou se skládá ze dvou složek. První z nich je proud I_D označovaný jako proud za tmy a tzv. fotoproudu I_L , který je závislý na intenzitě osvětlení E a citlivosti S , tedy hodnota fotoproudu je:

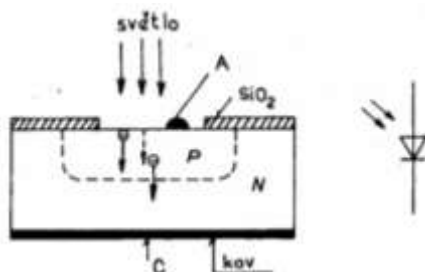
$$I_L = S \cdot E \quad (2)$$

Fotodiody mohou pracovat ve dvou rozdílných režimech. Prvním z nich je tzv. **fotovoltaický (hradlový) režim**, kdy fotodioda generuje napětí, které může být měřeno, bohužel ale v tomto režimu je závislost vygenerovaného napětí na intenzitě osvětlení nelineární a dynamický rozsah není příliš velký (viz obrázek 4, ve IV. kvadrantu).



Obrázek 4: V-A charakteristiky fotodiody pro různé intenzity osvětlení[3]

Druhý režim, ve kterém je fotodiodu možno používat, je **odporový režim**, kdy je fotodioda zapojena v závěrném směru v sérii se zdrojem napětí. V závislosti na velikosti intenzity osvětlení fotodiódou pak prochází fotoproud. Pokud je v sérii s fotodiódou a zdrojem napětí ještě rezistor, pohyboval by se pracovní bod například po zatěžovací přímce ve III. kvadrantu - viz obrázek 4. Dioda se v tomto režimu chová jako rezistor řízený osvětlením.



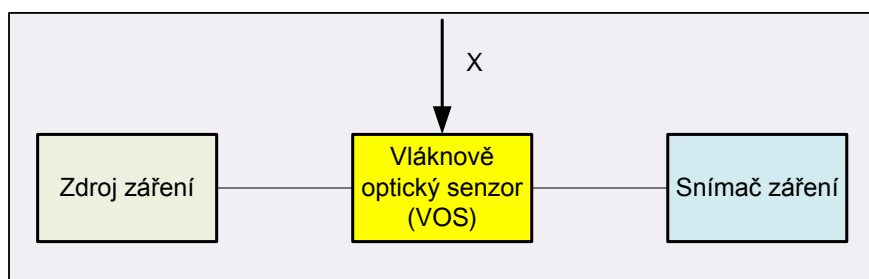
Obrázek 5: Zobrazení vrstev a schematické značky fotodiody [4]

2.3 Princip funkce snímače s optickým vláknem

Díky velkému pokroku v technologických postupech při výrobě optických vláken je možné používat snímače s optickým vláknem ve stále větším množství aplikací v oblasti měřicí a sensorové. Sensorové systémy, které využívají ke své činnosti optická vlákna, se nazývají **vláknově optické senzory** [5] (dále jen VOS).

Optické vlákno u VOS zpravidla bývá upraveno tak, aby bylo citlivé na veličinu, kterou pomocí něj chceme snímat. Obvykle na něj působí různé fyzikální veličiny, jako jsou tah, tlak, teplota apod., které ovlivňují tok fotonů uvnitř optického vlákna.

Mezi hlavní výhody použití VOS patří jejich nízká hmotnost, rozměry a odolnost proti elektrostatickému i elektromagnetickému rušení, naopak nevýhodou může být vyšší cena.

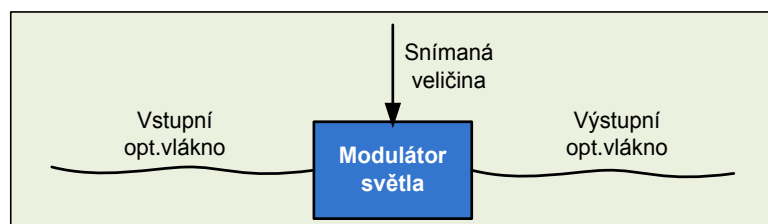


Obrázek 6: Základní blokové schéma vláknově optického senzoru (VOS) [5]

Jako zdroj optického záření, který je zobrazen v základním blokovém schématu VOS viz obrázek 6, může sloužit buď luminiscenční dioda (LED), která je zdrojem nekoherentního záření, nebo laserová dioda, která je naopak zdrojem koherentního záření s charakteristickými vlastnostmi (vlnovou délkou, šířkou pásma, optickým výkonem apod.).

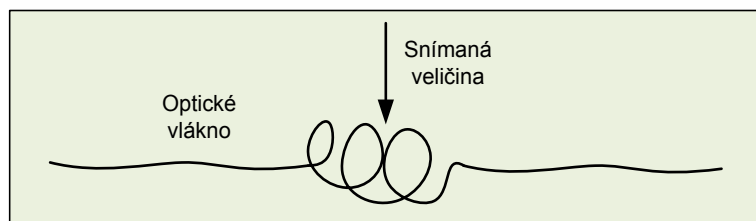
Snímačem optického záření je obvykle fotodioda, PIN dioda nebo lavinová dioda. VOS zobrazený na blokovém schématu (viz obrázek 6), se zpravidla volí v závislosti na druhu měřené veličiny označené jako „X“, dále způsobu modulace, metody měření atd.

VOS se dle odborného článku F. Hanáčka [5] dají rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou extrinziční VOS, kdy se do optického vlákna vloží další prvek, který moduluje optický signál, jež tímto prvkem prochází. Ukázka takového VOS viz obrázek 7.



Obrázek 7: Extrinziční VOS [5]

Druhou skupinou jsou intrinziční VOS, u kterých se využívá přímo optického vlákna jako senzoru a změna veličiny působící na optické vlákno v kterémkoliv jeho místě ke změně procházejícího signálu tímto vláknem (viz obrázek 8).



Obrázek 8: Intrinziční VOS [5]

VOS tak lze využít jako senzory úhlové rychlosti, rotace, zrychlení, intenzity elektrického a magnetického pole, vlhkosti, ale především teploty a tlaku.

3 POPIS ZAPOJENÍ A FUNKCE KARTY

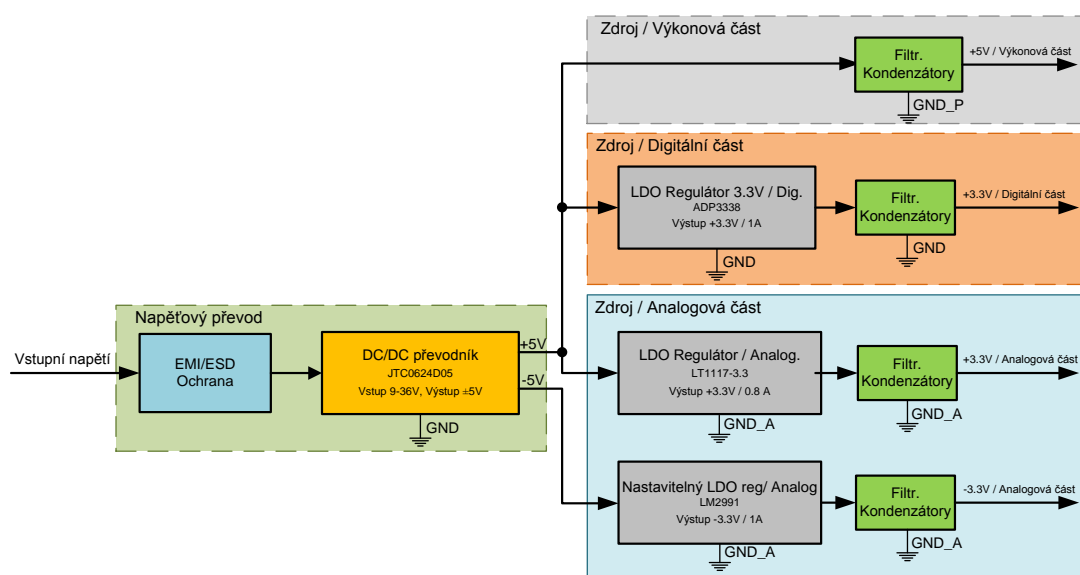
Převodníková karta pro přesné řízení laserové diody je rozdělena na několik částí, které jsou patrné z blokového schématu uvedeného v příloze A. 1. a jedná se o napájecí, výkonovou, digitální a analogovou část. Každá z těchto částí převodníkové karty je detailně popsána dále.

3.1 Napájecí část

Dle daných požadavků je typické napájecí napětí převodníkové karty +24 V (DC), ovšem karta by měla být funkční v rozsahu od +9 V až do +36 V (DC). Další podmínkou je, aby karta měla maximální odběrový proud 500 mA.

3.1.1 Blokové schéma napájecí části

Jak již bylo řečeno výše, převodníková karta je rozdělena na několik částí z důvodu minimalizace možnosti vzájemného ovlivňování jednotlivých částí. Napájecí část je rozdělena na příslušné části pro eliminaci rušení (viz obrázek 9).



Obrázek 9: Blokové schéma napájecí části převodníkové karty

Vstupní napájecí napětí převodníkové karty je přivedeno na napájecí část, konkrétně na blok napěťového převodu, o který se stará DC-DC převodník JTC0624D05 od výrobce XP Power, který má rozsah vstupního napětí shodný s maximálními povolenými hodnotami vstupního napětí převodníkové karty, tedy +9 V až +36 V. Výstupem z DC-DC převodníku je napětí ± 5 V (DC), kdy právě toto napětí je přivedeno několik bloků současně, které se starají o napájení odpovídajících částí desky (digitální, analogová a výkonová část).

Jak je znázorněno na blokovém schématu - obrázek 9, napájecí napětí pro výkonovou část tvoří přímo napětí z DC-DC převodníku, pouze jsou na něj připojeny filtrační kondenzátory. Na rozdíl od napájecí části pro výkonovou část, obsahují zbylé napájecí části další regulační obvody, kterými jsou LDO regulátory.

V případě napájecí části pro digitální obvody, se jedná o regulátor ADP3338, který má na svém výstupu přímo napětí +3,3 V (DC), není tedy nutné výstupní napětí nijak nastavovat pomocí odporového děliče na výstupu. Výstup LDO regulátoru ADP3338 je opět filtrován pomocí doporučených kondenzátorů, pro odstranění nežádoucího šumu a případně poklesu napětí při změnách odběru. Zatížitelnost výstupu obvodu ADP3338 je až 1 A, čímž je dosaženo dostatečné rezervy při maximálním proudovém odběru.

Poslední napájecí blok slouží pro úpravu napájecího napětí pro analogovou část. Zde bylo nutné použít dvou LDO regulátorů, pro kladné napájecí napětí +3,3 V je to regulátor LT1117-3.3 a pro zápornou větev -3,3 V je to LDO regulátor LM2991. Jak již název LDO regulátoru LT1117-3.3 říká, jde opět o regulátor s pevným výstupním napětím +3.3 V (DC) a není tedy potřeba kromě stabilizačních a filtračních kondenzátorů používat další součástky. V případě LDO regulátoru LM2991 pro zápornou napájecí větev -3,3 V to bohužel neplatí, jelikož je nutno na výstup regulátoru zapojit rezistorový dělič napětí a stanovit hodnoty tak, aby výstupní napětí bylo skutečně -3,3 V (DC), což je určeno dále ve výpočtu rovnice (3).

Jelikož na desce jsou i analogové součástky a součástky, které jsou citlivé na rušení, jako jsou například operační zesilovače (dále jen OZ), nebo analogově-číslicové převodníky (dále jen A/Č převodníky), bylo potřeba s rozdělením napájecího napětí na jednotlivé části, rozdělit také země na výkonovou (GND_P), digitální (GND) a analogovou (GND_A). Vzájemné propojení všech zemí je realizováno v jednom bodě až u napájecího zdroje, což je v tomto případě na výstupu bloku pro napěťový převod.

3.1.2 Schéma zapojení napájecí části

Detailní zapojení kompletní napájecí části je zobrazeno v příloze B. 1. Vstupní napětí tedy prochází přes vratnou pojistku F1 (MF-R050), která se v případě většího proudového odběru zahřeje, skokově změní svůj odpor až o několik řádů a prakticky tak přeruší proud obvodem, nebo jej omezí tak, aby následujícím součástkám nehrozilo poškození. Maximální proud, který tato pojistka ještě propustí bez skokové změny odporu je 500 mA (vychází z požadavku na maximální odběr desky). Za vratnou pojistkou následuje EMI filtr označený jako L1 (typ 2518121217Y6).

Za EMI filtrem L1 je zapojen transil TRS1 (1.5KE36CA), který slouží jako přepěťová ochrana, pokud tedy vstupní napětí překročí 36V (pro 1.5KE36CA), tak se transil chová podobně jako Zenerova dioda v závěrném směru, tedy začne propouštět proud a ochrání tak následující součástky před přepětím.

Před samotným DC-DC převodníkem, je umístěn LC filtr (tzv. π -filtr), jehož použití je doporučeno v katalogovém listu DC-DC převodníku JTC0624D05. Filtr se skládá

z cívky L2 a dvou kondenzátorů C14 a C15 a slouží pro odstranění nechtěného signálu s vyššími kmitočty.

Jak již bylo zmiňováno dříve, napájecí část se skládá z několika částí (výkonová, digitální a analogová), které jsou taktéž vyznačeny v příloze B. 1. V horní části je zobrazena výkonová napájecí část, která obsahuje jen filtrační kondenzátor a ochrannou diodu. Pod napájením pro výkonovou část následuje napájení pro digitální část desky. Zde je použit již zmiňovaný obvod ADP3338, který vstupní napětí +5 V reguluje na výstupní napětí +3,3 V. Dioda D3 slouží jako ochrana proti poškození regulátoru IC3 při případném zkratování vstupního napětí na zem. Nejnižší ve schématu na příloze B. 1. je třetí část pro napájení analogových součástek a A/Č převodníků. LDO regulátor pro kladnou napájecí větev je zapojen téměř shodně jako LDO regulátor pro digitální část. Pro regulaci v kladné větvi napájecího napětí +3,3 V analogové části se mohlo využít také LDO regulátoru APD3338, ten má ovšem menší přesnost výstupního napětí, než LDO regulátor LT1117-3.3.

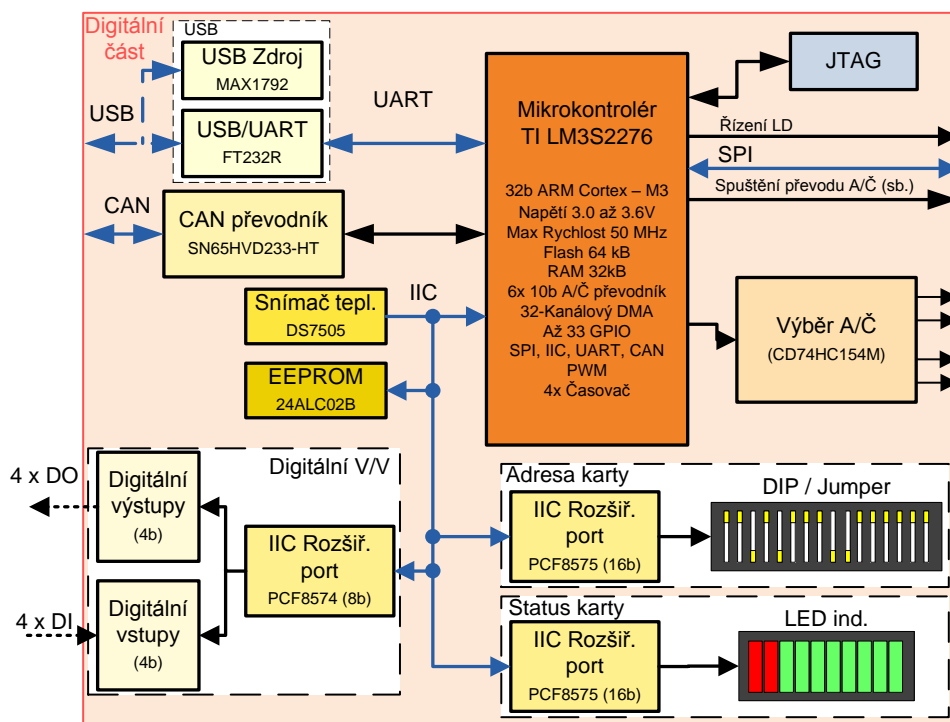
Pro regulaci záporné větve napájecího napětí (-3,3 V) analogové části je využito obvodu LM2991, ten má nastavitelné výstupní napětí pomocí odporového děliče (R10 a R11). Výstupní napětí LDO regulátoru LM2991 je určeno následujícím vztahem:

$$V_{OUT} = V_{REF} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - (I_{ADJ} * R_2) . \quad (3)$$

Platí, že $V_{REF} = -1,21 \text{ V}$, $I_{ADJ} = 60 \text{ nA}$ a $R_{10} = 240 \text{ } \Omega$, tedy pro záporné výstupní napětí -3,3 V je hodnota odporu $R_{11} = 390 \text{ } \Omega$.

3.2 Digitální část

Digitální část převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody je zobrazena na blokovém schématu viz obrázek 10. Pro řízení karty jako celku byl zvolen mikrokontrolér od firmy Texas Instruments, konkrétně typ LM3S2276. Důvodem této volby byla především rychlost samotného mikrokontroléru nezbytná pro samotné řízení laserové diody. Dále pak hrála významnou roli velikost paměti (jak programu – 64kB, tak i paměť RAM – 32 kB), která by neměla nijak omezovat návrh programového vybavení a obslužných funkcí pro přesné řízení laserové diody. Spolu s rychlostí samotného mikrokontroléru a velikostí paměti byly požadavky na podporu základních komunikačních sběrnic CAN, SPI, IIC a rozhraní UART. Napájení mikrokontroléru LM3S2276 je typicky +3,3 V, minimálně však +3,0 V a maximálně +3,6 V.



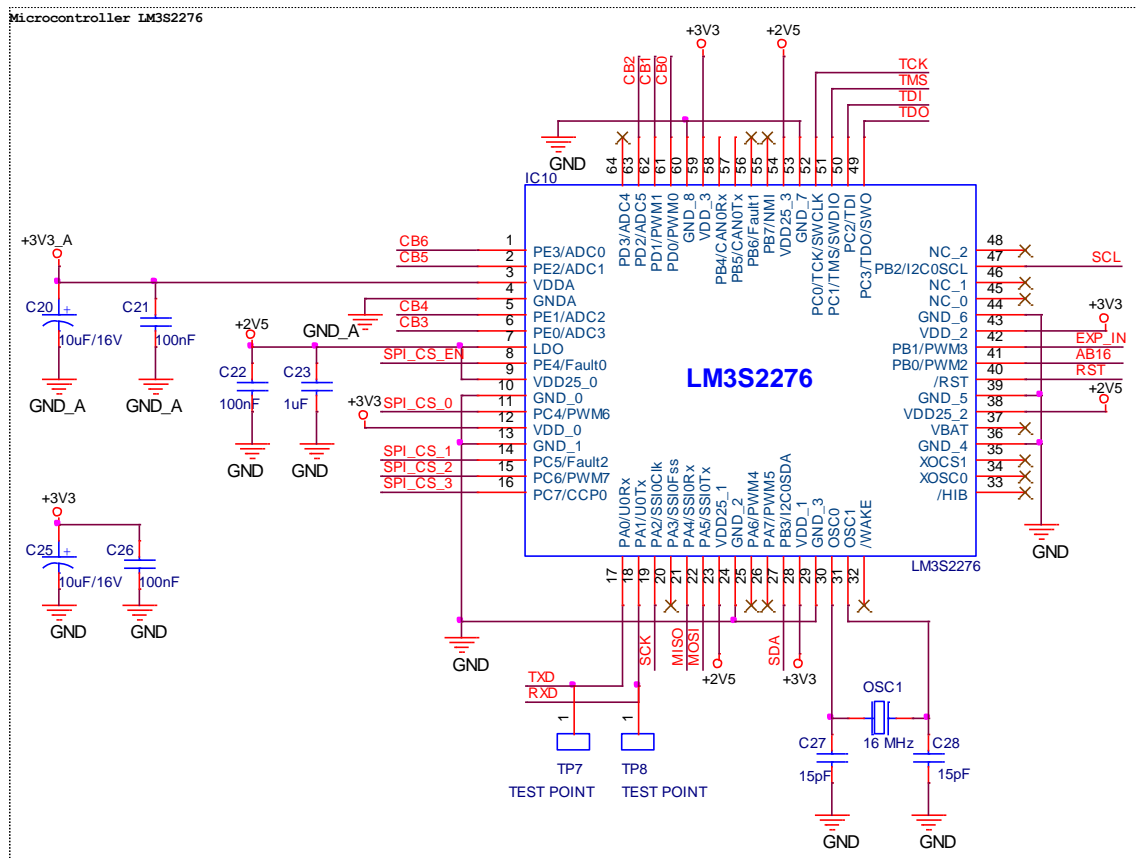
Obrázek 10: Blokové schéma digitální části převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody

3.2.1 Řídicí obvod převodníkové karty

Jak již bylo zmíněno dříve, pro řízení celé převodníkové karty byl zvolen mikrokontrolér od firmy Texas Instruments, konkrétně LM3S2276. Některé z parametrů jsou uvedeny výše, další parametry lze nalézt v [6]. Přesné zapojení a popis řídicího mikrokontroléru LM3S2276 jsou uvedeny dále.

Samotné zapojení mikrokontroléru LM3S2276 a naznačené připojení všech periférií pro řízení převodníkové karty viz obrázek 11. Mikrokontrolér je tedy napájen napětím označeným +3V3 (digitální napětí +3,3 V), přičemž je připojeno pro případ modifikace zapojení i napájecí napětí +3,3 V pro analogovou část označováno +3V3_A, které by se využilo v případě použití integrovaného analog-číslicového převodníku. Obě napětí jsou u mikrokontroléru připojeny přes kondenzátory, pro zamezení jak kolísání napětí, tak napěťových špiček. Napájecí napětí pro digitální část +3V3 je připojeno na kondenzátory $C25 = 10 \mu F / 16 V$ a $C26 = 100 nF$. Napájecí napětí pro analogovou část je připojeno přes kondenzátory $C20 = 10 \mu F / 16 V$ a $C21 = 100 nF$. Pro napájení jádra mikrokontroléru je zapotřebí další napájecí napětí o hodnotě maximálně +3 V. Za tímto účelem je v mikrokontroléru integrován také LDO regulátor napětí, který si ze vstupního napájecího napětí +3,3 V vytvoří napájecí napětí pro jádro +2,5 V, ve schématu označeného jako +2V5. Toto napájecí napětí jádra mikrokontroléru se však také musí dle [6] připojit přes kondenzátory, v tomto případě jsou to $C22 = 100 nF$ a $C23 = 1 \mu F$.

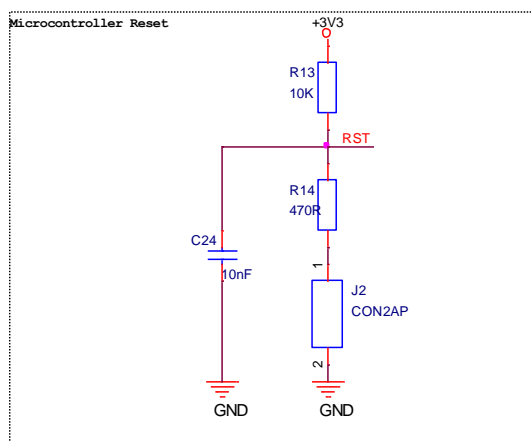
Mikrokontrolér sice obsahuje i integrovaný oscilátor, ale zde je použit externí oscilátor OSC1 s frekvencí 16 MHz, ke kterému jsou dle doporučení [6] připojeny kondenzátory $C27 = C28 = 15 \text{ pF}$.



Obrázek 11: Schéma zapojení řídicího mikrokontroléru LM3S2276 pro převodníkovou kartu

Dle požadavků má být na předním panelu převodníkové karty spínač (tlačítko), kterým je možné resetovat mikrokontrolér. Zapojení obvodu resetu pro řídicí mikrokontrolér viz obrázek 12.

V obvodu je zapojen RC článek $C24 = 10 \text{ nF}$ a $R14 = 470 \text{ R}$, který je zde z důvodu zamezení nechtěných resetů mikrokontroléru. Pokud tedy stiskneme tlačítko na předním panelu převodníkové karty, zkratujeme tak pin 1 a pin 2 na konektoru J2, tím dojde k vybíjení kondenzátoru přes odpor R14. Úroveň napětí se začne exponenciálně zmenšovat s časovou konstantou $\tau_1 = R14 \times C24$ až poklesne pod úroveň nutnou pro reset (+2 V) a mikrokontrolér se resetuje.



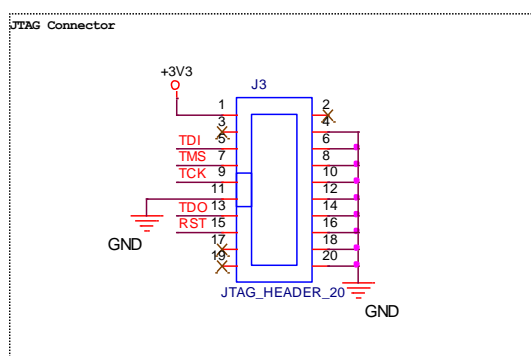
Obrázek 12: Schéma zapojení resetovacího obvodu mikrokontroléru LM3S2276

Po uvolnění tlačítka se zkratované piny 1 a 2 konektoru J2 opět rozpojí a napětí na kondenzátoru se začne exponenciálně zvyšovat s časovou konstantou

$$\tau_2 = R13 \times C24 , \quad (4)$$

jakmile hodnota přesáhne resetovací úroveň mikrokontroléru +2 V, dojde k uvolnění signálu reset a k obnově činnosti mikrokontroléru.

Pro naprogramování a případné ladění obsahuje převodníková karta také konektor pro připojení programátoru, resp. debuggeru přes rozhraní JTAG.



Obrázek 13: Schéma zapojení konektoru JTAG pro mikrokontrolér LM3S2276

Obrázek 13 zobrazuje schéma zapojení konektoru JTAG, jedná se o standardní 20-ti pinový konektor s roztečí pinu 2,54 mm. Tento konektor by měl umožňovat bez jakýchkoliv úprav připojení většiny programátorů či debuggerů se standardním rozhraním JTAG.

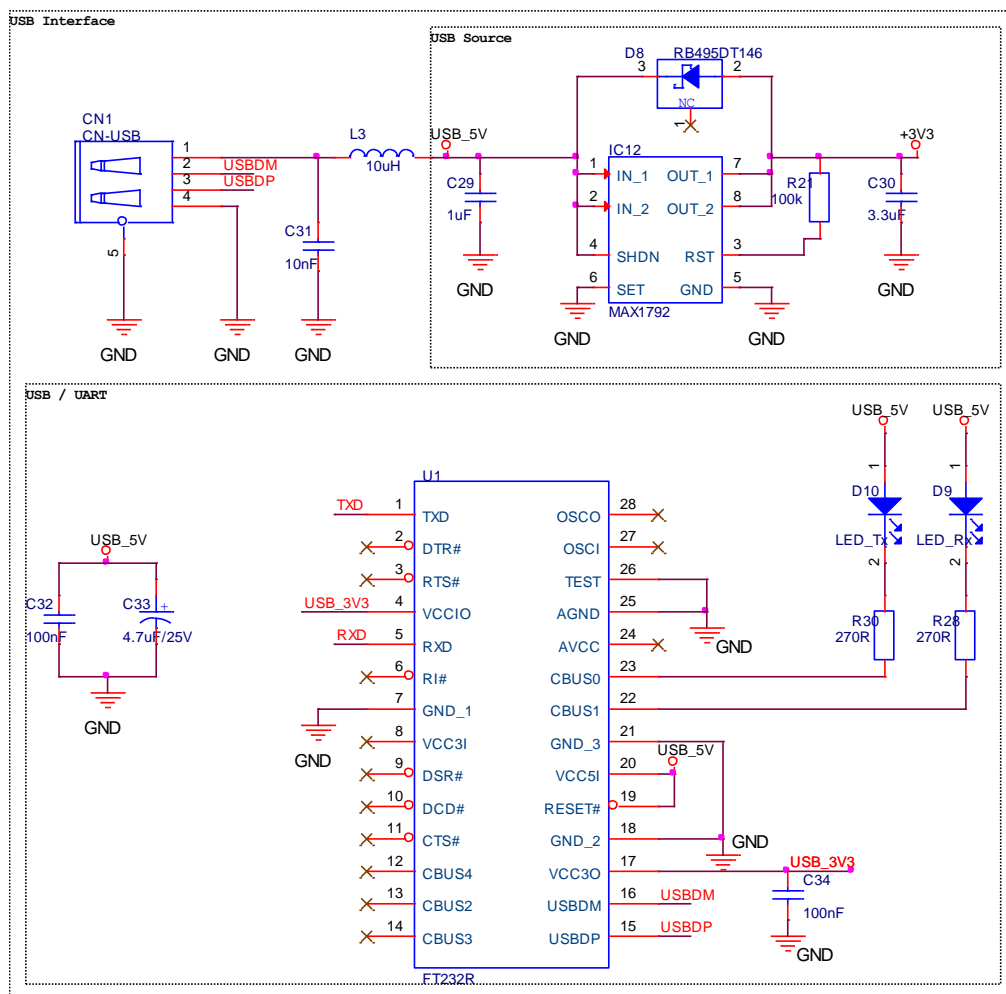
3.2.2 Sběrnice USB

Pro komunikaci převodníkové karty je požadováno několik rozhraní. Prvním požadovaným rozhraním je USB, které má sloužit pro servis a diagnostiku. Konektor USB je vyveden na přední panel převodníkové karty, takže bude jednoduše dostupný i při umístění karty do typizované 19“ RACK skříně (dle požadavků).

Obrázek 10 znázorňuje dvě hlavní části pro sběrnici USB. První část, která je tvořena obvodem FT232R od firmy FTDI, slouží výhradně pro převod ze sběrnice USB na rozhraní UART. Mikrokontrolér tedy bude s obvodem FT232R komunikovat prostřednictvím rozhraní UART. Tento obvod převede komunikaci z rozhraní UART na sběrnici USB, kdy datové a napájecí vodiče sběrnice USB jsou pak připojeny na USB konektor.

Druhý blok související se sběrnici USB slouží pro převod napájecího napětí sběrnice USB na napětí +3,3 V, které je připojeno na výstup napájecího bloku pro digitální část převodníkové karty. Pokud tedy nebude převodníková karta napájena z hlavního napájecího zdroje, po připojení USB konektoru je tak zajištěno napájení základních bloků mikrokontroléru umožňujících programování a komunikaci pro testování a ladění, případně diagnostiku převodníkové karty. Pro převod napájecího napětí +5 V ze sběrnice USB na napětí +3,3 V pro digitální část, je využito LDO regulátoru MAX1762.

Jak již bylo zmiňováno dříve, navržené řešení pro komunikaci pomocí sběrnice USB se skládá ze dvou bloků (napájení sběrnice USB a převod sběrnice USB na rozhraní UART), kdy jednotlivé bloky jsou vyznačeny i na schématu zapojení (viz obrázek 14).



Obrázek 14: Schéma zapojení sběrnice USB na převodníkové kartě

Dle schématu (viz obrázek 14) se po připojení zařízení USB schopného napájet další zařízení, napájecí napětí +5 V dostane na LDO regulátor MAX1792, který reguluje na svém výstupu napětí +3,3 V. Toto napětí je poté připojeno k výstupu bloku pro napájení digitální části převodníkové karty. Pro případ, že by bylo připojeno jak hlavní napájení převodníkové karty současně s USB zařízením umožňující napájet další zařízení po sběrnici USB, je v zapojení Schottkyho dioda D8, která chrání LDO regulátor proti zpětnému proudu a výběr zdroje napětí pak probíhá zcela automaticky [7].

Na vstupní piny regulátoru MAX1792 je přivedeno napájecí napětí ze sběrnice USB +5 V (piny 1,2), výstupní napětí regulátoru +3,3 V je pak na pinech 7 a 8. Vstupní napětí je dle doporučení [8] přiváděno přes kondenzátor $C29 = 1 \mu F$, podobně jako na výstupu je připojen kondenzátor $C30 = 3,3 \mu F$. Pin RST slouží pro vypnutí výstupu regulátoru a je aktivní v nule. Dle [8] je pin RST připojen přes pull-up rezistor $R2 = 100 k\Omega$. Pokud je pin 6 (SET) připojen ke GND, výstup regulátoru je přednastaven na výstupní napětí +3,3 V, pokud je naopak připojen na dělič mezi výstupní napětí OUT a GND, pak lze výstupní napětí nastavit v rozmezí +1,25 V až +5,0 V. Jelikož napájení digitální části je +3,3 V, je pin 6 (SET) připojen na zem a na výstupu regulátoru tak je napětí +3,3 V.

Druhý blok v zapojení sběrnice USB je tedy převodník sběrnice USB na rozhraní UART a je tvořen obvodem FT232R. Tento obvod je napájen přímo z napájení sběrnice USB +5 V, přičemž má zabudován svůj vlastní regulátor pro +3,3 V, ten je ale využit jen pro interní potřeby tohoto obvodu a i když je možnost jej využít pro napájení dalších součástek, je limitován výstupním proudem 50 mA, což je na hranici odběru digitální části, a proto je použit první blok pro zajištění bezproblémového napájení ze sběrnice USB. Výstup z vnitřního regulátoru je ještě filtrován kondenzátorem $C34 = 100 nF$.

Pro propojení obvodu FT232R s mikrokontrolérem LM3S2276 pomocí rozhraní UART slouží signály TXD (pin 1) a RXD (pin 5). Tyto signály jsou překříženy a připojeny k mikrokontroléru. Takže signál TXD je připojen k U0Rx (pin17) mikrokontroléru a signál RXD je připojen k U0Tx (pin 18) mikrokontroléru. Pro zajištění napěťové úrovně +3,3 V pro komunikaci pomocí rozhraní UART, je připojeno výstupní napětí z integrovaného regulátoru obvodu FT232R na pin 4 (VCCIO).

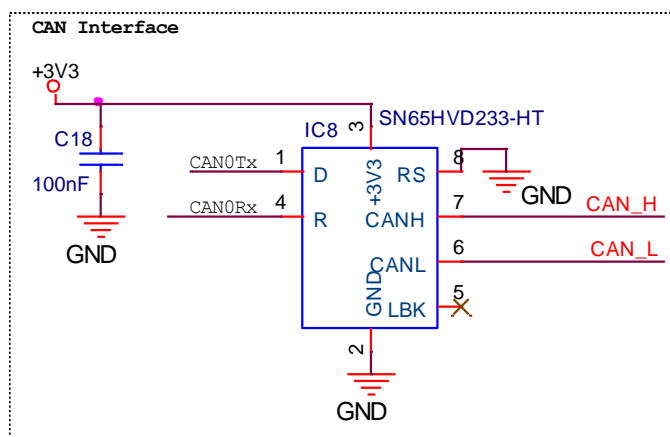
Datové vodiče pro sběrnici USB jsou propojeny přímo z USB konektoru na piny 15 (USBDP) a 16 (USBDM) obvodu FT232R označeného jako U1. Pro napájení obvodu složí pin 20 (VCC5I), na který je přivedeno napětí +5 V ze sběrnice USB, které je současně přivedeno i na resetovací pin 19 (RESET), který je aktivní v nule. Na pinech 23 (CBUS0) a 22 (CBUS1) jsou dále připojeny diody LED, které indikují odchozí nebo přichozí komunikaci.

Pro filtrování napětí +5 V ze sběrnice USB, které je následně připojeno k obvodu FT232R, slouží kondenzátory $C32 = 100 nF$ a $C33 = 4,7 \mu F / 25 V$.

3.2.3 Sběrnice CAN

Jak si lze všimnout již ze základního blokového schématu digitální části (obrázek 10), sběrnice CAN je tvořena pouze jedním blokem a také jedním integrovaným obvodem (SN65HVD233-HT). Zapojení je tedy velmi jednoduché.

Jelikož mikrokontrolér LM3S2276 přímo podporuje sběrnici CAN (obsahuje CAN kontrolér), jen jeho piny 58 (CAN0Rx) a 57 (CAN0Tx) připojíme k obvodu SN65HVD233-HT, který funguje jako budič sběrnice CAN (vysílač/přijímač). CAN kontrolér integrovaný do mikrokontroléru tak komunikuje s budičem pomocí napěťových úrovní 0 V a +3,3 V a budič se stará o převod na diferenciální úrovně sběrnice CAN. Na sběrnici jsou definovány dva stavy – recesivní (log. 1) a dominantní (log. 0) a rozdílové napětí mezi těmito vodiči udává stav sběrnice recesivní (rozdílové napětí mezi vodiči je 0 V), nebo stav dominantní (rozdílové napětí je 2 V až 5 V). Na signálovém vodiči CAN_H je napětí při dominantním stavu v rozsahu 3,5 V až 5 V a na signálovém vodiči CAN_L je napětí 0 V až 1,5 V.



Obrázek 15: Schéma zapojení sběrnice CAN převodníkové karty

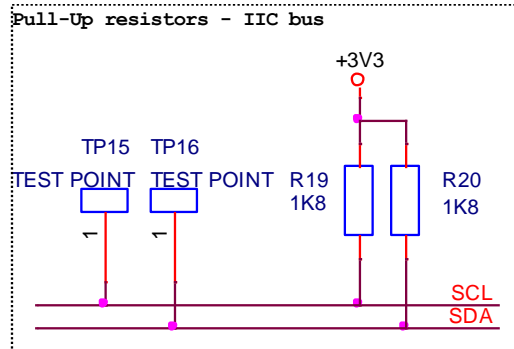
Pro samotnou činnost tohoto převodníku je zapotřebí pouze jedné další součástky a to je kondenzátor $C18 = 100 \text{ nF}$.

Dle požadavků není zakončovací odpor sběrnice CAN umístěn na převodníkové kartě, ale až na konci spojovacího vedení v centrální jednotce.

3.2.4 Obvody komunikující pomocí sběrnice IIC

Na převodníkovou kartu bylo několik dalších požadavků, a to aby umožnila měřit teplotu, aby bylo možné uložení konfiguračních a inicializačních dat, změnit adresu karty pomocí propojek a pomocí DIP přepínačů, aby byly na přední panel vyvedeny indikační LED diody, které by zobrazovaly aktuální stav převodníkové karty a nakonec aby převodníková karta obsahovala 4 digitální vstupy a 4 digitální výstupy. Z důvodu potřeby připojení těchto rozšiřujících obvodů, byla zvolena pro jejich propojení komunikační sběrnice IIC.

Jednotlivé funkční bloky, které jsou připojeny na sběrnici IIC (jak znázorňuje obrázek 10) budou detailně popsány dále. Celá sběrnice je přes odpory R19 a R20 (oba 1,8 k Ω) připojena k napájení digitální části +3V3 (slouží tedy jako pull-up odpory), protože klidový stav sběrnice je log. 1, tedy +3,3 V (viz obrázek 16).

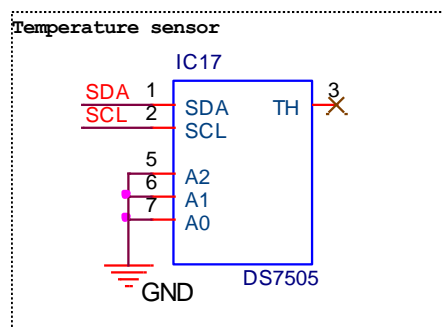


Obrázek 16: Schéma zapojení pull-up rezistorů pro sběrnici IIC

3.2.4.1 Měření teploty

Pro měření teploty na převodníkové kartě pro přesné řízení laserové diody se využívá obvodu DS7505 firmy Maxim Integrated Products. Tento snímač může být napájen z napětí +1,7 V až +3,7 V a nevyžaduje žádné externí součástky pro svou funkci, což je výhodné z hlediska jednoduchosti zapojení. Propojení s řídicím mikrokontrolérem LM3S2276 je tedy pomocí dvou vodičového rozhraní IIC. Rozsah měření teplot pomocí obvodu DS7505 je od -55 °C do +125 °C, s přesností $\pm 0,5$ °C (v rozmezí 0 °C až +70 °C), což je pro danou aplikaci zcela dostačující.

Schéma zapojení obvodu DS7505, jež bylo použito pro měření okolní teploty na převodníkové kartě, ukazuje obrázek 17.



Obrázek 17: Schéma zapojení obvodu DS7505 pro měření teploty

První dva piny (SDA a SCL) jsou určeny pro připojení integrovaného obvodu DS7505 (IC17) ke sběrnici IIC. Třetí pin označený jako TH, dle [9] slouží jako výstupní pin termostatu zapojený jako otevřený kolektor (není jej využíváno a proto není připojen). Následující piny 5, 6 a 7, které slouží pro nastavení jedné části adresy obvodu DS7505 na sběrnici IIC, kdy jednotlivé bity odpovídající části adresy jsou $A2 = 0$, $A1 = 0$ a $A0 = 0$ (všechny tři piny jsou připojeny na zem).

Pro napájení digitálního teploměru DS7505 se využívá pinů 8 a 4, kdy na pin 8 (VDD) je přivedeno napájecí napětí pro digitální část označené jako +3V3 a na pin 4 je připojena digitální zem, označována jako GND.

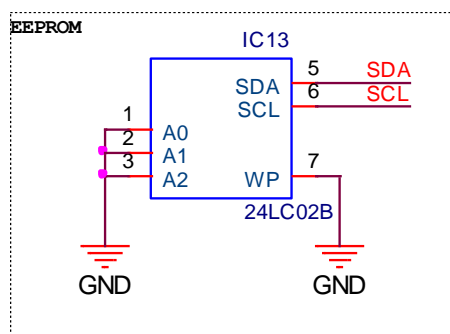
3.2.4.2 Uložení inicializačních a konfiguračních dat

Aby bylo možné uložit inicializační a nejrůznější konfigurační data, která zůstanou uložena i po výpadku napájecího napětí, je převodníková karta opatřena EEPROM s označením 24LC02B o velikosti 2Kb (256B). Tato paměť si uchová obsah datové paměti, i když není připojena na napájení.

Napájecí napětí EEPROM 24LC02B má být v rozsahu +2,5 V až +5,5 V a lze použít maximální hodinovou frekvenci pro komunikaci s ní až 400 kHz. Jelikož data do/z paměti budou nahrávána jen po zapnutí, nebo při změně konfigurace převodníkové karty, nebude funkce převodníkové karty rychlostí tohoto přenosu nijak omezena.

Podobně jako v případě zapojení digitálního teploměru DS7505, je i zapojení EEPROM 24LC02B velmi jednoduché a není zapotřebí žádných externích součástek.

Piny 1, 2 a 3 (A0, A1, a A2) jsou obvykle určeny pro nastavení části adresy, podle které se adresuje zařízení na sběrnici IIC. Obvykle u zařízení připojitelných ke sběrnici IIC je jedna část adresy dána zapojením pinů součástky (jako jsou A0 až A2 u DS7505) a druhá část adresy zařízení odpovídá nějaké skupině (typu) zařízení, například EEPROM 24LC02B má tuto část adresy jinou, než má použitý snímač teploty DS7505. Podle [10] na zapojení pinů na EEPROM 24LC02B nezáleží a využívá se pouze jedné části adresy, která je daná výrobcem.



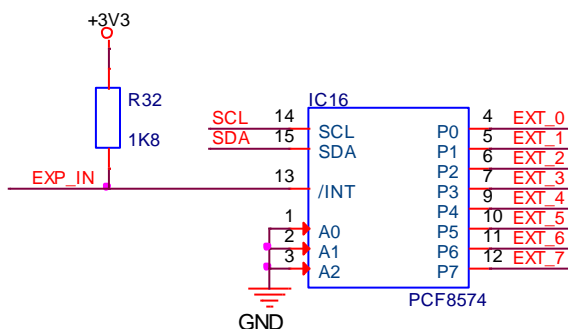
Obrázek 18: Schéma zapojení EEPROM 24LC02B

Piny 5 a 6 slouží k připojení EEPROM ke sběrnici IIC, tedy jsou na ně přivedeny signály SDA, respektive SCL. Dále je na EEPROM 24LC02B pin 7 (WP), který slouží pro znemožnění zápisu do paměti. Pokud je tedy na pinu WP připojena log. 1, pak jsou operace zápisu do paměti ignorovány a zápis se neuskuteční. Naopak, pokud je na pinu WP přivedena log. 0, pak je možno do paměti bez omezení zapisovat. V případě navrhované převodníkové karty je tento pin držen trvale na úrovni log. 0, tedy do paměti je možné zapisovat kdykoliv.

3.2.4.3 Digitální vstupy a výstupy

Převodníková karta obsahuje, dle požadavků, čtyři digitální vstupy a digitální výstupy. Jelikož použitý mikrokontrolér nemá k dispozici takové množství pinů, bylo potřeba rozšířit mikrokontrolér pomocí dalšího portu.

Z důvodu nedostatku volných portů na mikrokontroléru je zde využito rozšiřujícího portu. V tomto případě se jedná o integrovaný obvod s označením PCF8574, který s mikrokontrolérem komunikuje přes stávající sběrnici IIC. Jediný signál, který je přiveden z tohoto rozšiřujícího portu na mikrokontrolér, (mimo sběrnice IIC) je signál EXP_IN.



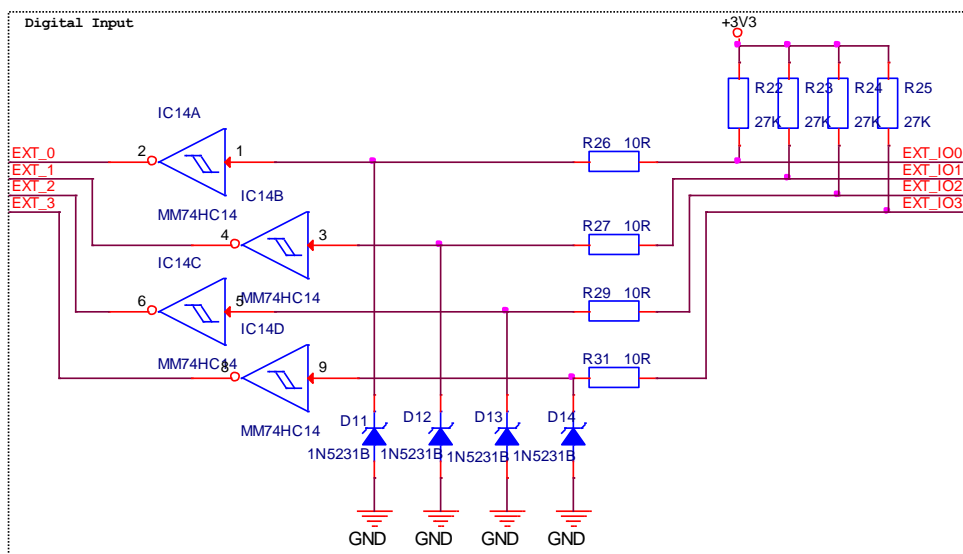
Obrázek 19: Schéma zapojení rozšiřujícího portu PCF8574 pro připojení digitálních I/O

Signálem EXP_IN integrovaný obvod PCF8574 (pin 13 – INT) vyvolá přerušení v mikrokontroléru, pokud se změní logická hodnota na vstupních pinech rozšiřujícího portu IC16. Klidová úroveň tohoto signálu je log. 1, tedy +3,3 V, díky připojenému pull-up rezistoru R32 o velikosti $R32 = 1,8 \text{ k}\Omega$ (zobrazuje obrázek 19).

Integrovaný obvod PCF8574 je napájen napájecím napětím určeným pro digitální část, tedy +3,3 V (ve schématu označeno jako +3V3), které je přivedeno na pin 16 (VCC) oproti pinu 8 (GND). Pomocí pinů 1 až 3 (A0 až A3) je opět volena část adresy zařízení, v tomto případě jsou všechny piny připojeny na zem, tedy jednotlivé bity této části adresy rozšiřujícího portu na sběrnici IIC budou $A0 = 0$, $A1 = 0$ a $A2 = 0$. Samotné vodiče sběrnice IIC jsou připojeny na pin 14 (SCL) a pin 15 (SDA).

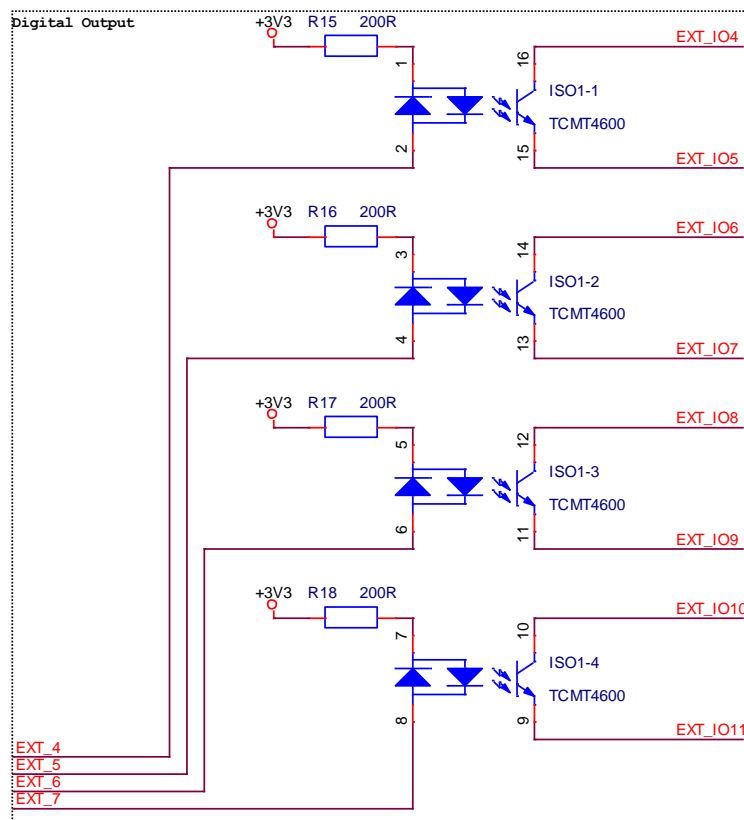
Na piny integrovaného obvodu PCF8574 označené jako P0 až P7 jsou již přivedeny digitální vstupy a výstupy.

Vstupy převodníkové karty jsou určeny pro připojení k výstupům s otevřeným kolektorem. V klidovém stavu je na vstupech napětí blízké napájecímu napětí +3,3 V, díky použitým pull-up rezistorům R22 až R25 s hodnotou 27 k Ω (viz obrázek 20). Vstupy jsou dále chráněny sériovým odporem o hodnotě 10 Ω (odpory R26, R27, R29 a R31) spolu se Zenerovou diodou 1N5231B, která má Zenerovo napětí 5,1 V. Signál je dále přiveden na hradlo se Schmidtovou převodní charakteristikou a následně je přiveden na vstup rozšiřujícího portu PCF8574 (IC16, piny 4 až 7).



Obrázek 20: Schéma zapojení digitálních vstupů převodníkové karty

Stejně jako má převodníková karta čtyři digitální vstupy, má i čtyři digitální výstupy. Digitální výstupy jsou opticky oddělené pomocí optočlenu TCMT4600. Jako jeden výstup je považován kolektor a emitor jednoho fototranzistoru obsaženého v optočlenu, takže je možné je snadno zapojit jako výstupy s otevřeným kolektorem (viz obrázek 21). Do obvodu fototranzistoru nejsou dle požadavků vloženy další součástky, ty jsou případně doplněny externě mimo kartu.



Obrázek 21: Schéma zapojení digitálních výstupů převodníkové karty

Digitální výstupy převodníkové karty jsou připojeny, stejně jako digitální vstupy, na rozšiřující port IC16 (integrováný obvod PCF8574) připojený k řídicímu mikrokontroléru pomocí sběrnice IIC.

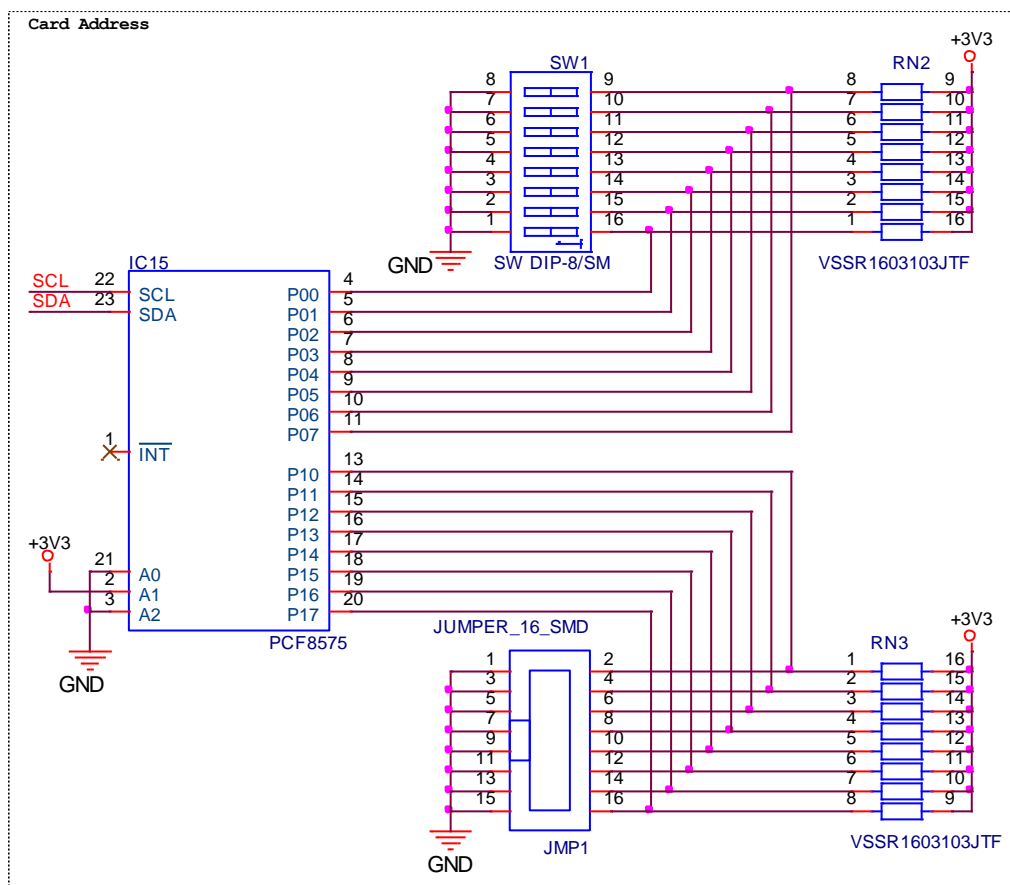
3.2.4.4 Adresa převodníkové karty

Převodníková karta bude umístěna ve skříni, spolu s dalšími obdobnými měřicími kartami a pro každou kartu nezávisle je nutné nastavit unikátní adresu karty. Pro nastavení adresy karty jsou požadovány dva způsoby.

První způsob nastavení adresy převodníkové karty je prostřednictvím propojek, které je možno vyvést přes flexi kabel na zadní část karty. Takto nastavená adresa je pak brána jako hlavní.

Druhý způsob nastavení adresy převodníkové karty je pomocí přepínačů DIP. Ty jsou umístěny přímo na desce plošného spoje. Těmito přepínači se nastavuje sekundární adresa převodníkové karty.

Pro určení adresy převodníkové karty by byla potřeba další piny na mikrokontroléru, a proto je podobně jako v minulém případě použito rozšiřujícího portu. Pro vytvoření kompletní 16-ti bitové adresy je využito 16-ti bitový dekodér (viz obrázek 22).



Obrázek 22: Schéma zapojení přepínačů a propojek pro určení adresy převodníkové karty

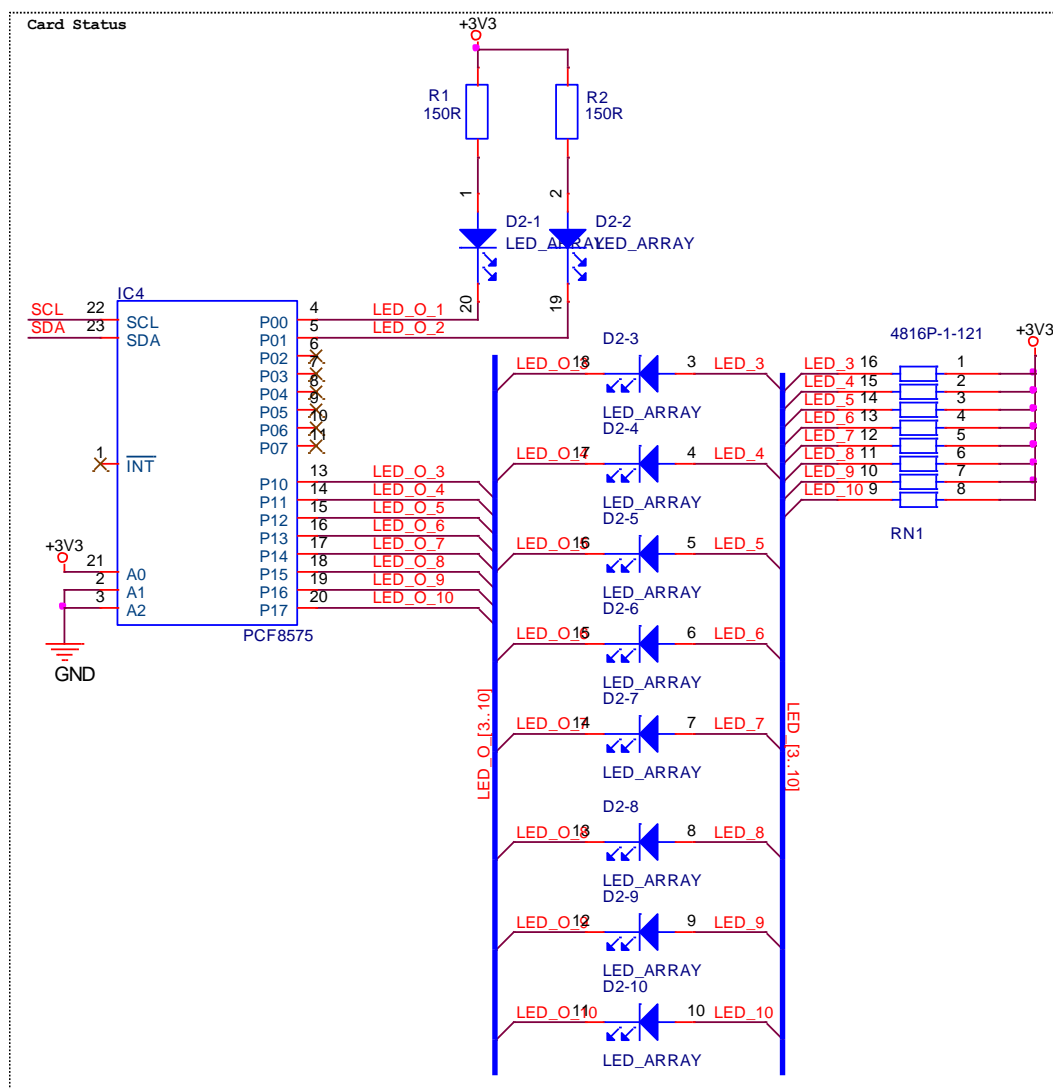
Rozšiřující port PCF8575 (IC15) je připojen opět k sběrnici IIC (pin 22 – SCL a pin 23 – SDA). Tentokrát ale není využito přerušení, které je vyvoláno změnou vstupní logické úrovně na rozšiřujícím portu, protože z portu se nastavené hodnoty vyčítají jen při inicializaci převodníkové karty. Napájení integrovaného obvodu IC16 je opět pomocí napájení pro digitální část označeného jako +3V3 a obvod je připojen k zemi GND (pin 24, resp. pin 12). Adresa rozšiřujícího portu IC15 na IIC sběrnici je v tomto případě $A0 = 0$, $A1 = 1$ a $A2 = 0$.

Pokud je tedy přepínač DIP (obrázek 22) přepnut do polohy sepnuto, na rozšiřujícím portu se objeví hodnota log. 0 a naopak, pokud je přepínač rozepnut, na rozšiřujícím portu se objeví hodnota log. 1. Analogicky je tomu i u nastavování adresy u propojek, pokud tedy je propojka osazena, je zjištěna na rozšiřujícím portu hodnota log. 0, a pokud zde propojka osazena není, hodnota na rozšiřujícím portu bude log. 1.

3.2.4.5 Indikace stavu převodníkové karty

Pro rychlou indikaci stavu převodníkové karty jsou použity LED diody, které budou umístěny na předním panelu. Budou použity dvě červené LED diody a 8 zelených LED diod. Červené LED diody budou indikovat alarm, zelené LED diody slouží k indikaci činnosti převodníkové karty.

Pro spínání jednotlivých diod a zobrazení stavu je opět použito 16-ti bitového rozšiřujícího portu PCF8575.



Obrázek 23: Schéma zapojení indikace stavu převodníkové karty

Zapojení tohoto rozšiřujícího portu je prakticky shodné s případem pro určování adresy převodníkové karty, pouze s tím rozdílem, že adresa rozšiřujícího portu na sběrnici IIC je nyní $A0 = 1$, $A1 = 0$ a $A2 = 0$.

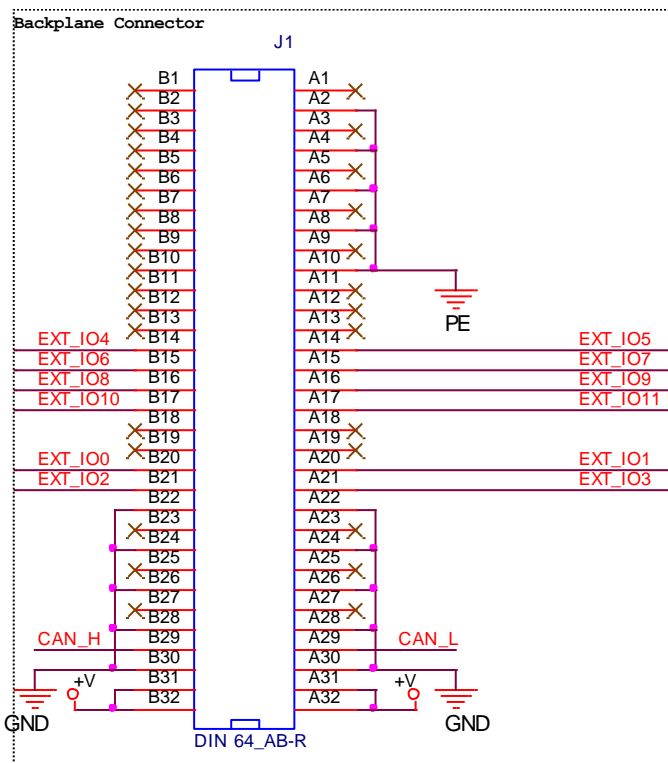
Spínání jednotlivých diod je prováděno pomocí zápisu hodnot přes sběrnici IIC do rozšiřujícího portu. Pokud na daný pin přivedeme hodnotu log. 0, pak diodou poteče proud s velikostí danou odporem v sérii s diodou (pro červené diody odpor $R = 150 \Omega$, pro zelené diody odpor $R = 120 \Omega$ a dioda tak bude svítit. Naopak, pokud zapíšeme na daný pin hodnotu log. 1, pak diodou nepoteče žádný proud a dioda svítit nebude.

3.2.5 Připojení převodníkové karty do standardizované skříně

Převodníková karta bude umístěna spolu s dalšími kartami do standardizované skříně (19" RACK systém), ve které je na zadní straně protikus dvouřadého 64 pinového konektoru DIN 41612, který je osazen na desce. Na tento konektor jsou připojeny, jak

digitální vstupy a výstupy převodníkové karty, tak je na něj vyvedena sběrnice CAN a vstupní napájecí napětí celé karty.

Schéma zapojení konektoru DIN 41612 použitého na převodníkové kartě ukazuje obrázek 24.



Obrázek 24: Schéma zapojení konektoru pro připojení převodníkové karty ve standardizované skříně

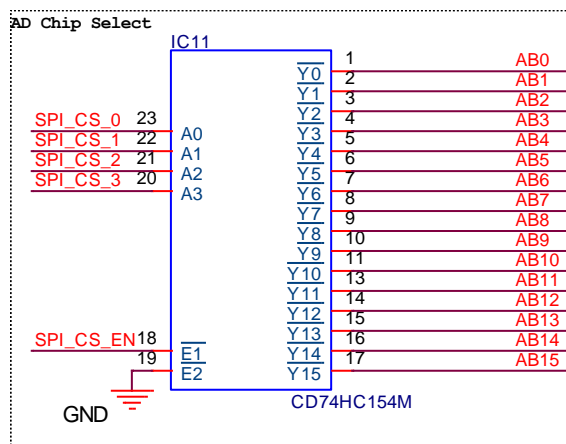
Signály EXT_IO0 až EXT_IO3 jsou digitální vstupy a signály EXT_IO4 až EXT_IO11 jsou digitální výstupy, které mají vždy po dvou vodičích (kolektor a emitor výstupního fototranzistoru oddělovacího optočlenu).

Dále je na konektor J1 přiveden diferenciální pár pro sběrnici CAN (CAN_H a CAN_L) a vstupní napájecí napětí převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody, které může nabývat hodnota +9 V až +36 V, ovšem typicky je připojeno napětí +24 V.

3.2.6 Výběr analogově-číslicového převodníku pro komunikaci (sběrnice SPI)

Převodníková karta pro přesné řízení laserové diody se dále skládá ze čtyř analogových kanálů (zobrazeno na obrázku v příloze A.1.), kdy každý tento kanál obsahuje čtyři analogově-číslicové (dále jen A/Č) převodníky AD7685. Každý z těchto převodníků je připojen na komunikační sběrnici SPI, pomocí které se přenáší data naměřená data do mikrokontroléru LM3S2276.

Aby ale mikrokontrolér mohl komunikovat postupně s každým analogově-číslicovým převodníkem, je nutné na každý převodník přivést signál, kterým určujeme, že právě tento jediný převodník bude vysílat naměřená data na sběrnici SPI.



Obrázek 25: Schéma zapojení demultiplexeru CD74HC154M pro výběr konkrétního A/Č převodníku

Jelikož je ale potřeba vybírat z šestnácti A/Č převodníků, opět nastává podobný problém jako v případě digitálních vstupů a výstupů, či výběru adresy desky a to ten, že mikrokontrolér neobsahuje takové množství pinů, ke kterým by bylo možno tyto řídicí signály připojit. Na rozdíl od předchozích úkolů, nyní je ovšem ještě požadavek na rychlost spínání daného signálu (popsáno dále). Z uváděných důvodů bylo využito demultiplexeru CD74HC154M (viz obrázek 25).

Na demultiplexer jsou tak přivedeny jen čtyři signály z mikrokontroléru SPI_CS_0 až SPI_CS_3, což znamená, že je zde značná úspora v počtu zabraných pinů na mikrokontroléru a současně integrovaný obvod CD75HC154M zaručuje, že je možné zajistit dostatečně rychlý výběr konkrétního A/Č převodníku (nástupná a sestupná hrana výstupního signálu by měla trvat dle [11] kolem 50 ns).

Výstupem demultiplexeru je 16 různých signálů označených jako AB0 až AB15, kdy každý z nich je připojen na jeden A/Č převodník a tímto signálem říkáme tomuto převodníku, že právě on bude vysílat změřená data na sběrnici SPI. Záměrně byl vybrán demultiplexer s invertovanými výstupy, protože výběr A/Č převodníku má také invertovanou logiku, tedy pokud chceme daný převodník vybrat pro komunikaci, musíme jeho pin SDI připojit na log. 0 [12]. Výběr konkrétního A/Č převodníku je naznačen v následující tabulce (viz tabulka 1).

Tabulka 1: Určení konkrétního A/Č převodníku na základě vstupních signálů demultiplexeru DC74HC154M

Vstupy CD74HC154M					Aktivní výstup (log. 0)	Určení A/Č převodníku	
E1	AB3	AB2	AB1	AB0		Kanál	Označení
1	X	X	X	X	-	-	-
0	0	0	0	0	0	1	IC100
0	0	0	0	1	1		IC103
0	0	0	1	0	2		IC104
0	0	0	1	1	3		IC105
0	0	1	0	0	4	2	IC200
0	0	1	0	1	5		IC203
0	0	1	1	0	6		IC204
0	0	1	1	1	7		IC205
0	1	0	0	0	8	3	IC300
0	1	0	0	1	9		IC303
0	1	0	1	0	10		IC304
0	1	0	1	1	11		IC305
0	1	1	0	0	12	4	IC400
0	1	1	0	1	13		IC403
0	1	1	1	0	14		IC404
0	1	1	1	1	15		IC405

Na vstupy demultiplexeru označené v tabulce jako AB0 až AB3 jsou ve schématu připojeny signály z mikrokontroléru označené jako SPI_CS_0 až SPI_CS_3. Pro vypnutí všech A/Č převodníků a umožnění komunikace mikrokontroléru například s Č/A převodníkem pomocí sběrnice SPI, slouží signál označený ve schématu jako SPI_CS_EN, kterým lze všechny výstupy demultiplexeru uvést do logické úrovně log. 1, kdy není vybrán žádný A/Č převodník.

3.3 Analogová část

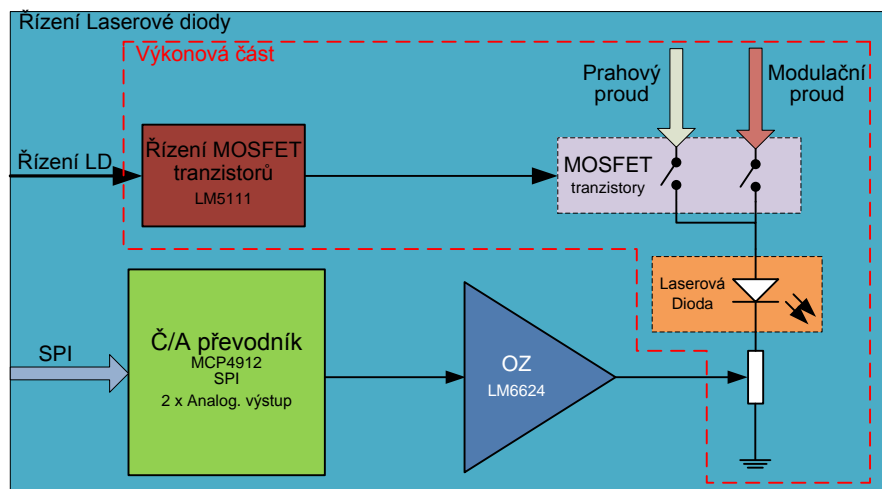
Další část převodníkové karty je označena jako analogová. Co všechno analogová část obsahuje je zobrazeno v příloze A. 1. Analogovou část je možno rozdělit do dalších dvou funkčních bloků a to na část řízení laserové diody, která je na převodníkové kartě izolována od ostatních částí a je považována za výkonovou část a na část vyhodnocující velikost pulzů na fotodiodách, které jsou propojeny pomocí optického vlákna s vysílací laserovou diodou. Tyto jednotlivé funkční bloky budou popsány v následujícím textu.

3.3.1 Přesné řízení laserové diody

Tato část byla velmi problematická z hlediska návrhu, protože dle zadaných požadavků má být navržené zapojení schopné spínat relativně velký proud protékající laserovou diodou (až 250 mA) a to s velmi vysokou rychlostí spínání tohoto proudu (celý pulz vyslaný laserovou diodou by měl trvat méně než 100 ns). Současně by ale mělo zůstat vzniklé zapojení co nejjednodušší, proto bylo snahou se vyhnout poměrně složitým integrovaným obvodům, které se používají pro rychlé řízení výkonných laserových diod.

3.3.1.1 Blokové schéma řízení laserové diody

Pro vysvětlení vzniklého principu řízení laserové diody vzniklo blokové schéma, na kterém jsou zobrazeny pouze důležité části pro pochopení principu (obrázek 26). Pro samotné řízení velikosti proudu (pulzu) protékajícího laserovou diodou, slouží spodní část zobrazená na blokovém schématu (obrázek 26). Jedná se o číslicově-analogový převodník (dále jen Č/A převodník), který podporuje sběrnici SPI. Po sběrnici SPI tak lze mikrokontrolérem zapsat hodnotu do 10-ti bitového dvoukanálového Č/A převodníku MCP4912 a na jehož výstupu se pak objeví odpovídající analogová hodnota.



Obrázek 26: Blokové schéma řídicího obvodu pro laserovou diodu

Výstupní napětí Č/A převodníku je dána následujícím vztahem:

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF} * D_n}{2^n} * G \quad (5)$$

Ve vztahu (5) je hodnota $V_{REF} = 3,3 V$, D_n je hodnota, která je do Č/A převodníku přivedena po sběrnici SPI, $n = 10$ (počet bitů Č/A převodníku) a G je nastavitelné zesílení převodníku, které je možno nastavit, při zápisu číslicové hodnoty určené pro převod na odpovídající analogovou hodnotu.

Aby nedocházelo k zatěžování Č/A převodníku, je na jeho výstup zařazen operační zesilovač LM6624, který zapojen jako napěťový sledovač. Na výstupu operačního zesilovače by tedy mělo být napětí stejné jako na výstupu Č/A převodníku, pouze s tím rozdílem, že by nemělo být závislé na zátěži. Výstupním napětím operačního zesilovače LM6624 se následně řídí velikost proudu, který protéká laserovou diodou.

Proud procházející laserovou diodou se skládá z malého prahového proudu, který teče laserovou diodou neustále (je ale možnost jej vypnout spínačem, viz obrázek 26), tento proud se v literatuře často označuje jako „bias current“ a slouží pro nastavení úrovně proudu nutného pro stimulovanou emisi fotonů. Nastavení úrovně prahového proudu je nezbytné primárně pro rychlé spínání laserové diody a taktéž pro prodloužení její životnosti. Druhou složkou celkového proudu procházejícího laserovou diodou je modulační proud, určující délku a intenzitu výsledného optického signálu. Modulační proud je neustále spínán s minimální možnou periodou. Velikost prahového i modulačního proudu lze nastavit Č/A převodníky.

3.3.1.2 Schéma zapojení řídicí části pro laserovou diodu

Detailní schéma zapojení řídicí části pro přesné řízení laserové diody pro převodníkovou kartu je zobrazeno v příloze B. 2. V levé části tohoto obrázku se nachází Č/A převodník MCP4912, který má rozlišení 10 bitů, dva výstupní kanály a komunikační sběrnice SPI.

Č/A převodník je napájen napájecím napětím pro digitální část označeným +3V3, které je u převodníku ještě připojeno blokující a filtrační kondenzátory $C2 = 100\text{ nF}$ a $C3 = 10\text{ }\mu\text{F}/16\text{ V}$. Jako referenční napětí pro převod je ale použito napájecí napětí pro analogovou část označené jako +3V3_A, které je taktéž blokováno u samotného Č/A převodníku IC2 pomocí kondenzátoru $C4 = 100\text{ nF}$.

Jak již bylo zmíněno, Č/A převodník je připojen ke sběrnici SPI (piny 4, 5 a pin 6 pro výběr součástky ke komunikaci). Pin 8 (LDAC) slouží jako synchronizační vstup pro přenos dat ze vstupního registru (hodnota zaslána mikrokontrolérem po sběrnici SPI) do registru výstupního, pokud je tento pin držen v hodnotě log. 0, pak je výstupní registr aktualizován současně se změnou vstupního registru a z důvodu zjednodušení je tento princip využit i na převodníkové kartě. Následuje pin 9 (SHDN), který slouží jako hardwarové zakázání funkce Č/A převodníku, během kterého na výstupu tohoto převodníku nenajdeme žádné napětí. Dalšími důležitými piny jsou pin 10 a 14, což jsou výstupní piny převodníku, na kterých je napětí $V_{out,b}$, respektive $V_{out,a}$.

Na výstupu $V_{out,a}$ Č/A převodníku je připojen neinvertující vstup operačního zesilovače LM6624. Signál je ale ještě připojen přes odpor $R6 = 10\text{ K}\Omega$ na analogovou zem GND_A, to pro případ, kdyby Č/A převodník neměl na svém výstupu žádné napětí, aby operační zesilovač neměl na svém vstupu náhodné hodnoty a byl přes tento odpor uzemněn.

Operační zesilovač LMH6624 je zapojen jako klasický sledovač napětí, kdy na neinvertující vstup (pin 3) je přivedeno výstupní napětí z Č/A převodníku a na jeho výstupu (pin 1) by mělo být, i za pomoci záporné zpětné vazby vedené z výstupu zesilovače na invertující vstup (pin 4), stejné napětí jako na jeho neinvertujícím vstupu. Díky tomuto zapojení by nemělo docházet k žádnému zatěžování výstupu Č/A převodníku.

Za napěťovým zesilovačem je již zapojen tranzistor T2, kterému předchází odpor $R7 = 1\text{ k}\Omega$. Pomocí tohoto odporu lze nastavit maximální proud protékající laserovou diodou.

Maximální proud laserovou diodou a tím i kolektorový proud tranzistoru I_c lze určit ze znalosti maximálního proudu tekoucího do báze tranzistoru I_b a z udávaného proudového zesilovacího činitele h_{21e} dle následujícího vztahu:

$$I_c = I_b * h_{21e} . \quad (6)$$

Proudový zesilovací činitel tranzistoru T2 je uveden v katalogovém listu tranzistoru 2DD2661 [13] a měl by být $h_{21e} = 270$ až 680 [-], dále bude pro výpočet uvažována nejhorší možná hodnota, a to $h_{21e} = 680$ [-], pokud by bylo potřeba proud zvýšit, bude možná jeho korekce pomocí odporu R7. Proud I_b se dá spočítat ze saturačního napětí operačního zesilovače a úbytku napětí na tranzistoru U_{BE} , podle vztahu:

$$I_b = \frac{U_{OZ_SAT} - U_{BE}}{R7} . \quad (7)$$

Pro maximální proud $I_c = 250\text{ mA}$ musí být proud báze tranzistoru T2 roven hodnotě:

$$I_b = \frac{I_c}{h_{21e}} = \frac{0,250}{680} \cong 368\text{ }\mu\text{A} . \quad (8)$$

Aby byla hodnota proudu $I_b = 368\text{ }\mu\text{A}$, musí mít odpor R7 hodnotu

$$R7 = \frac{U_{OZ_SAT} - U_{BE}}{I_b} = \frac{2,4 - 0,6}{368 \cdot 10^{-6}} \cong 4891\text{ }\Omega . \quad (9)$$

Z dostupné řady odporů E12 byl zvolen nejbližší nižší odpor pro dosažení maximální hodnoty proudového zesilovacího činitele $h_{21e} = 680$ [-], tedy $R7 = 4,7\text{ k}\Omega$.

Pro možnost testování, případně nahrazení celého bloku řízení proudu laserovou diodou pomocí popsané techniky, je na schématu připojen paralelně k tranzistoru T2 ještě odpor R38, jehož vhodnou volbou a neosazením tranzistoru T2 lze nastavit konstantní proud laserovou diodou. Při funkci klasického řízení pak tento odpor zůstává neosazen. Proud, který protéká laserovou diodou neustále (na blokovém schématu - obrázek 26, je označen jako prahový proud) má hodnotu danou odporem R33, tedy

$$I_{\text{bias}} = \frac{U}{R33} = \frac{5}{3900} \cong 1,3\text{ mA} . \quad (10)$$

Tento proud se tedy určí odporem R33 jen po odladění celé převodníkové karty a pak se již nepředpokládá jeho změna. Spínání pomocného proudu je prováděno stejným způsobem jako spínání hlavního proudu laserovou diodou. Je využito tranzistoru MOSFET BSS138N, který je řízen integrovaným obvodem pro řízení tranzistorů MOSFET LM5111. Řídící signály pro spouštění jak hlavního, tak i pomocného proudu laserové diody jsou připojeny na mikrokontrolér a ve schématu jsou označeny jako CB0, respektive CB1.

Na tranzistor MOSFET pro spouštění hlavního proudu laserovou diodou jsou kladeny vysoké nároky na rychlost sepnutí. Dle [14] je rychlost nástupné/sestupné hrany MOSFET tranzistoru BSS138N maximálně 4,5 resp. 10 ns (za určitých podmínek, které ale nejsou na převodníkové kartě splněny).

Podobné nároky byly kladeny i na integrovaný obvod pro řízení tranzistorů MOSFET LM5111, který má hodnoty těchto parametrů o něco vyšší, ale nejsou nijak limitující, a to 25, resp. 25 ns.

Integrovaný obvod pro řízení tranzistorů MOSFET je napájen napájecím napětím +5 V určeným pro výkonovou část převodníkové karty. Na piny 2 a 4 jsou přivedeny řídicí signály z mikrokontroléru pro ovládání proudů laserovou diodou. Jsou to signály CB0 (modulační proud) a CB1 (prahový proud). Výstupní signály tohoto obvodu jsou na pinech 7 a 5.

Na rozdíl od zapojení prahového proudu je ve větvi pro spínání modulačního proudu zapojení posilující proudové impulsy. Součástky L6, C61, C62 a R35, které podle [15] zrychlují sepnutí proudu laserové diody tím, že pokud je tranzistor Q1 rozpojen, je nabíjen kondenzátory C61 přes tranzistor R35. Ihned po sepnutí tranzistoru Q1 se tak kondenzátor C61 vybíjí přes laserovou diodu na zem. Velikost cívky L6 a kondenzátoru C62 umožňuje tvarovat požadovaný průběh proudového pulzu procházejícího laserovou diodou.

3.3.2 Vyhodnocení pulzů na fotodiodě

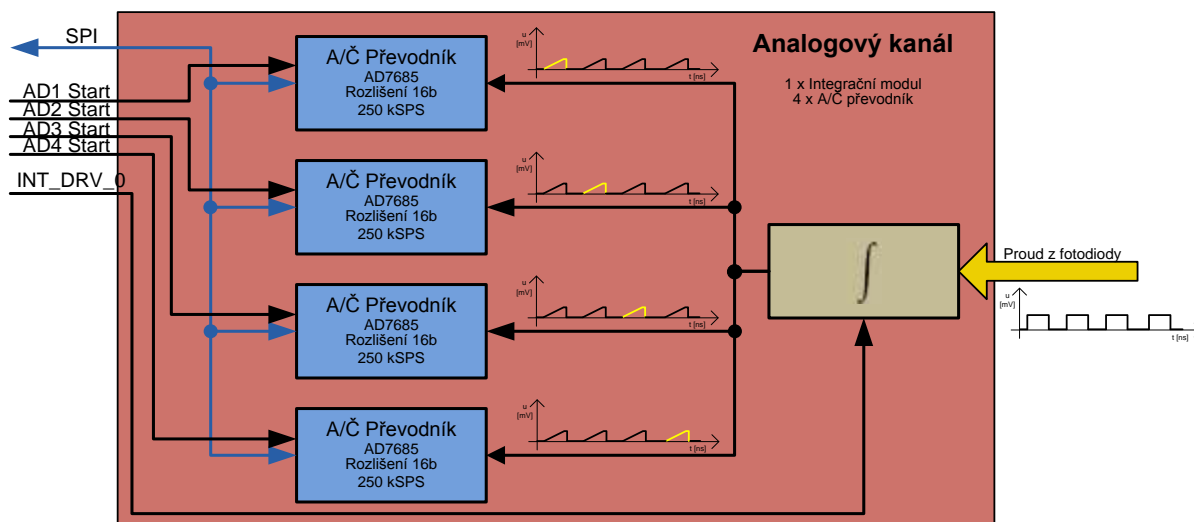
Propojení optickými vlákny od laserové diody až po jednotlivé fotodiody a bloky zpracovávající pulzy na těchto fotodiodách, jsou naznačeny na blokovém schématu v příloze A. 1.

Na desce je osazena laserová dioda, která je připojena přímo na optické vlákno. Převodníková karta schopná paralelně měřit a vyhodnocovat velikost pulzů až ze čtyř optických vláken. Pro souběžné vyhodnocení pulzů je převodníková karta osazena čtyřmi fotodiodami. Fotodiody jsou zapojeny v závěrném směru, ve kterém jsou pulzy vysílané laserovou diodou převáděny na proudový signál odpovídající velikosti.

Jak je vidět z blokového schématu převodníkové karty v příloze A. 1., každá fotodioda má svůj vlastní blok pro vyhodnocování velikosti pulzů, které vygeneruje. Jednotlivé bloky označené jako „analogový kanál 1 až 4“ jsou popsány následně v textu.

3.3.2.1 Analogové kanály pro vyhodnocování velikosti pulzů na fotodiodách

Pro vyhodnocování velikosti pulzů generovaných fotodiódou byl zvolen integrační princip měření, tedy pulz generovaný z fotodiody je nejprve integrován. Integrační princip byl zvolen mimo jiné pro potlačení šumu a zvýšení přesnosti měření malých proudů. Obrázek 27 zobrazuje blokové schéma zapojení jednoho analogového kanálu.



Obrázek 27: Blokové schéma analogového kanálu pro vyhodnocování velikosti pulzů z fotodiody

Vstupním signálem do tohoto bloku jsou obdélníkové proudové pulzy generované fotodiódou. Tyto pulzy se na vstupu analogového kanálu integrují a z obdélníkového signálu na vstupu integrátoru je pilovitý tvar signálu. Maximální amplituda trojúhelníkového pulzu je dána plochou obdélníkového pulzu na vstupu integrátoru. Velikost amplitudy trojúhelníkového pulzu generovaného integrátorem je přímo závislá na útlumu optického vlákna (se vzrůstajícím útlumem optického vlákna, klesá amplituda signálu na výstupu integrátoru). K integrátoru je dále připojen signál z mikrokontroléru INT_DRV_0 (0 je označení řídicího signálu pro první kanál) a slouží pro nulování integrátoru.

Výstup integrátoru je připojen paralelně ke čtyřem A/Č převodníkům AD7685. Obrázek 27 ukazuje, jak každý z A/Č převodníků měří jen jeden ze čtyř pulzů, které následují velmi rychle po sobě. Pro spuštění převodu v daném A/Č převodníku jsou přivedeny do bloku analogového kanálu čtyři řídicí signály označené „ADX_Conv.“, kde X označuje pořadové číslo A/Č převodníku, na který je přiveden.

Signály pro spouštění převodu jednotlivými A/Č převodníky jsou připojeny paralelně na všechny analogové kanály, to znamená, že první převodník ve všech čtyřech analogových kanálech je spouštěn stejným řídicím signálem z mikrokontroléru. Proto má každý A/Č převodník svůj vlastní signál CS_AD_X (X opět určuje daný převodník), kterým se určuje, který z převodníků má právě vysílat na sběrnici SPI změřenou hodnotu. Na blokovém schématu (obrázek 27) ovšem tyto signály pro jednoduchost nejsou a budou popsány dále.

3.3.2.2 Schéma zapojení analogového kanálu pro vyhodnocování velikosti pulzu na fotodiodě

Pro detailní popis jednoho analogového kanálu je uvedeno detailní schéma zapojení tohoto kanálu (viz obrázek 28). Jsou zde popsány jednotlivé bloky tak, jak bylo uvedeno u blokového schématu.

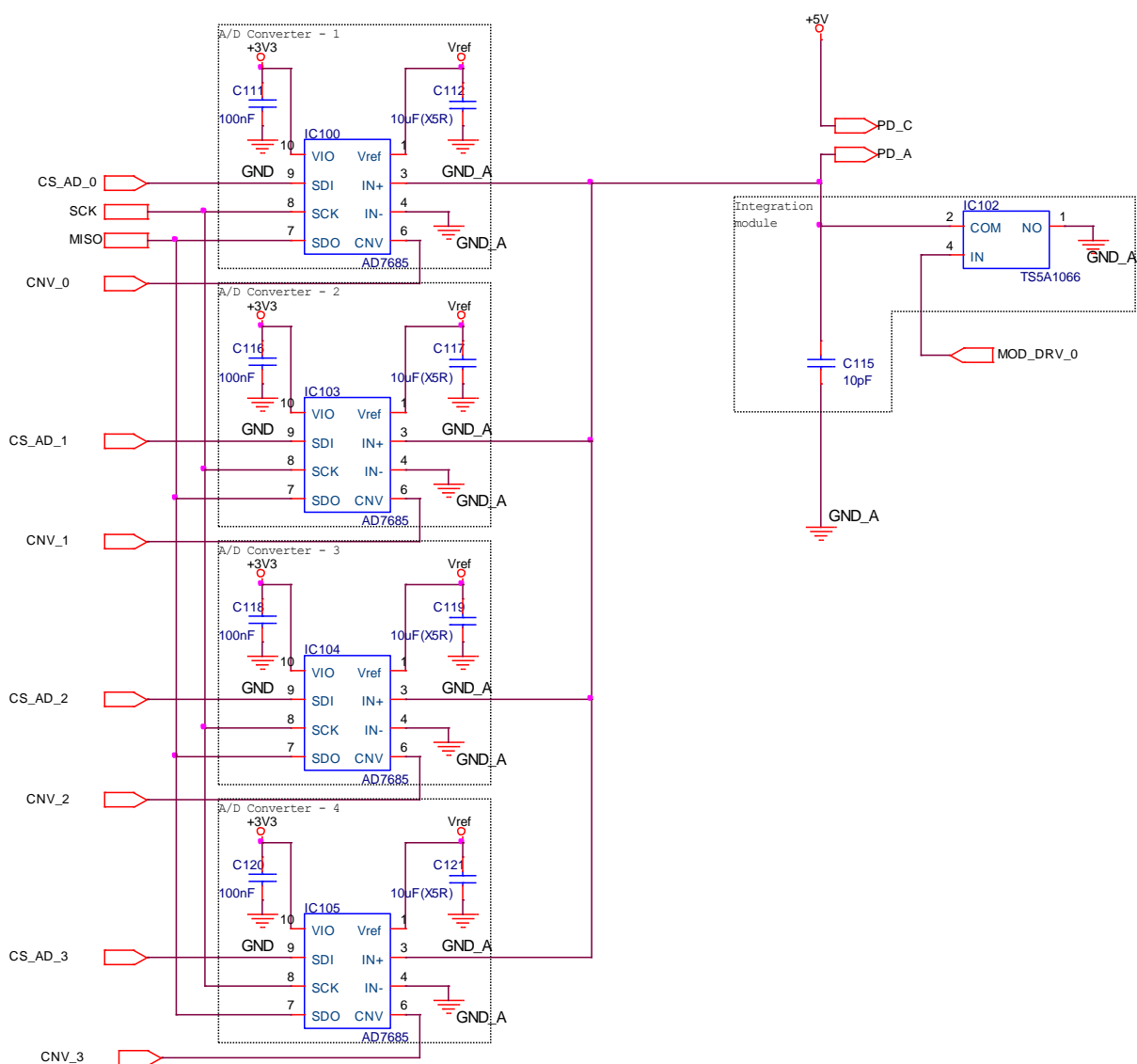
Fotodioda zapojená v závěrném směru je připojena na svorky označené ve schématu jako PD_C a PD_A, kde PD_C je svorka pro připojení katody a PD_A je svorka pro připojení anody fotodiody. Fotodioda je tedy připojena k integračnímu modulu, který byl po mnoha složitých zapojeních s operačními zesilovači nahrazen velmi jednoduchým zapojením, kdy se využívá závislosti nabíjení kondenzátoru proudovým pulzem z fotodiody. Proudový pulz z fotodiody je tak malý, že je nutno používat velmi malé hodnoty integračního kondenzátoru $C_{115} = 10 \text{ pF}$, aby napětí na tomto kondenzátoru dosáhlo při dané délce proudových pulzů hodnot měřitelných s přijatelnou přesností pomocí A/Č převodníku AD7685. Snahou tedy bylo přiblížit se referenční hodnotě A/Č převodníku 1,225 V. Ze vztahu pro proud kondenzátorem platí vztah

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}, \quad (11)$$

kde předpokládaná doba trvání proudového pulzu $t = 50 \text{ ns}$ s amplitudou přibližně $i_c = 50 \text{ }\mu\text{A}$ pak vychází hodnota kondenzátoru následně

$$C = \frac{i_c \cdot \Delta t}{\Delta u_c} = \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 10^{-9}}{1,225} \cong 2,048 \text{ pF}. \quad (12)$$

Z důvodu kapacitních vazeb ale byla vybrána již zmiňovaná hodnota kondenzátoru $C_{115} = 10 \text{ pF}$ i za cenu snížení maximální možné hodnoty napětí. Toto maximum je ale možné změnit prodloužením délky pulzu.



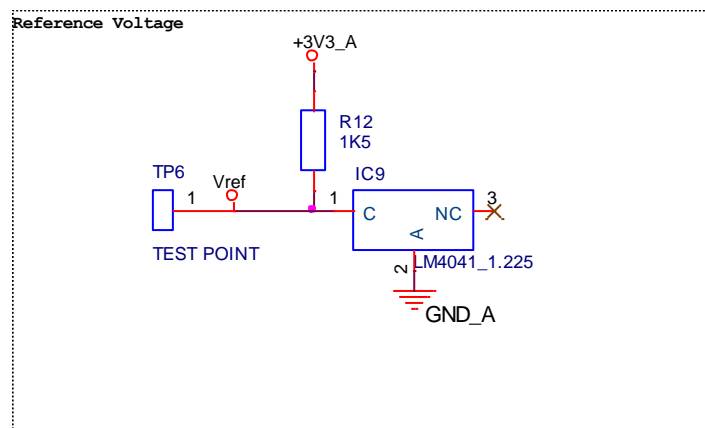
Obrázek 28: Schéma zapojení analogového kanálu pro vyhodnocování velikosti pulzů na fotodiodě

Na kondenzátoru C115 tedy při konstantním proudu lineárně roste napětí. Po skončení tohoto pulzu je spuštěn převod v A/Č převodníku IC100 pomocí signálu CNV_0, převodník si zapamatuje analogovou hodnotu na svém vstupu (přibližně za deset nanosekund). Poté je ihned pomocí signálu MOD_DRV_0 vybit kondenzátor C115, kdy tímto signálem je ovládán řídicí vstup analogového spínače TS5A1066, který kondenzátor zkratuje na zem a tak dojde k okamžitému vybití kondenzátoru (pouze přes vnitřní odpor analogového spínače, který je velmi malý, přibližně 7,5 Ω) [16]. Po rozepnutí tohoto spínače se ihned může začít integrovat další proudový pulz z fotodiody, s tím rozdílem, že nyní bude spuštěn převod u druhého A/Č převodníku označeného jako IC103. Po krátké době může být zase kondenzátor C115 vybit. Takto jsou převedeny všechny čtyři pulzy. Po spuštění převodu na posledním A/Č převodníku a následném vybití kondenzátoru C115 je možné vyčítat naměřené hodnoty z A/Č převodníků, kdy pomocí signálů CS_AD_0 až CS_AD_3 jsou postupně vybírány

jednotlivé převodníky, ze kterých je vyčítána hodnota odpovídající velikosti napětí na kondenzátoru C115.

Na pinech 3 a 4 A/Č převodníků jsou vstupní signály, kdy pin 4 udává, vůči čemu se signál na pinu 3 vztahuje. Ke každému převodníku jsou přivedeny po sběrnici SPI signály MISO, SCK a signál určující, který A/Č převodník má komunikovat (signály CS_AD_X).

Jak již bylo zmiňováno dříve, referenční napětí pro A/Č převodník bylo zvoleno 1,225 V. Toto napětí je vytvářeno z napájení analogové části +3,3 V pomocí obvodu LM4041.



Obrázek 29: Schéma zapojení obvodu pro referenční napětí 1,225 V

Schéma zapojení obvodu LM4041 je velmi jednoduché, je nutné připojit pouze externí rezistor (R12), jehož hodnota vychází dle [17] ze vztahu

$$R = \frac{U_S - U_Z}{I_L + I_Z}, \quad (13)$$

kde U_S je vstupní napájecí napětí ($U_S = +3,3 V$), U_Z je výstupní napětí z regulátoru ($U_Z = +1,225 V$), proud I_L je proud zátěží, kdy dle [12] jeden A/Č převodník zatěžuje referenční zdroj proudem typicky $50 \mu A$, tedy pro 16 A/Č převodníků by měl být maximální odebíraný proud z referenčního zdroje $I_{L,max} = 800 \mu A$ a konečně I_Z je proud do LM4041.

Při použití tohoto vzorce se musí uvažovat dva mezní případy. První mezní situace je, v případě poklesu vstupního napětí V_S na minimum a současně je zatěžovací proud I_L maximální. V tomto případě musí být zajištěn minimální proud obvodem LM4041, který má hodnotu $I_{Z,min} = 45 \mu A$, z toho vychází maximální hodnota rezistoru R, která nesmí být větší než

$$R_{max} = \frac{U_{S,min} - U_Z}{I_{L,max} + I_{Z,min}} = \frac{3,1 - 1,225}{(800 + 45) \cdot 10^{-6}} \cong 2219 \Omega, \quad (14)$$

při maximálním poklesu vstupního napětí na hodnotu $U_{S,min} = +3,1 V$.

Druhá mezní situace je, když vstupní napětí U_S dosáhne maximální hodnoty, která je zvolena jako $U_{S,max} = +3,5 V$ a současně je minimální proud zátěží $I_{L,min}$, kdy se musí zajistit, aby proud obvodem LM4041 nebyl větší, než je maximální dovolená hodnota proudu, tedy $I_{Z,max} = 12 mA$ [17]. Minimální proud zátěží je zvolen jako proud jedním A/Č převodníkem, tedy $I_{L,min} = 50 \mu A$. Z těchto podmínek plyne, že minimální hodnota tohoto odporu je

$$R_{min} = \frac{U_{S,max} - U_Z}{I_{L,min} + I_{Z,max}} = \frac{3,5 - 1,225}{50 \cdot 10^{-6} + 12 \cdot 10^{-3}} \cong 189 \Omega . \quad (15)$$

Takto je stanoven rozsah hodnot pro volbu velikosti externího rezistoru k regulátoru napětí LM4041, ve schématu (viz obrázek 29) je to rezistor R12. Velikost odporu je tedy volena z následujícího intervalu

$$R_{min} < R12 < R_{max} . \quad (16)$$

Zvolená hodnota rezistoru R12 z uvedeného intervalu je pak $R12 = 1,5 k\Omega$, kdy se spíše počítá s poklesem vstupního napájecího napětí a větším zatížením výstupu, než se zapojením regulátoru naprázdno.

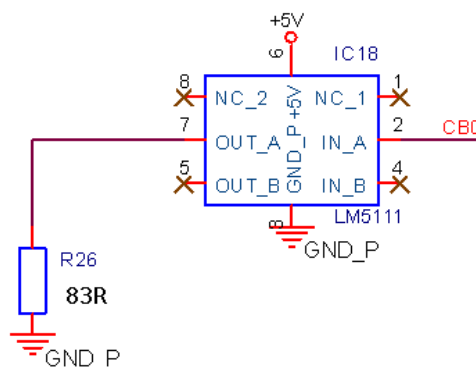
4 OVĚŘENÍ PROBLÉMOVÝCH ČÁSTÍ PŘEVODNÍKOVÉ KARTY

Ještě než byl vytvořen návrh desky plošného spoje, byly jednotlivé části, u kterých by mohl vzniknout problém z hlediska jejich funkčnosti, odzkoušeny na univerzální desce plošného spoje. Nejproblémovější a současně i nejdůležitější částí celé převodníkové karty je spínání laserové diody a vyhodnocování velikosti pulzu na fotodiodách při velké rychlosti. V následujícím textu jsou ukázány výsledky z praktického testování těchto částí.

4.1 Testování funkce obvodu LM5111 pro řízení laserové diody

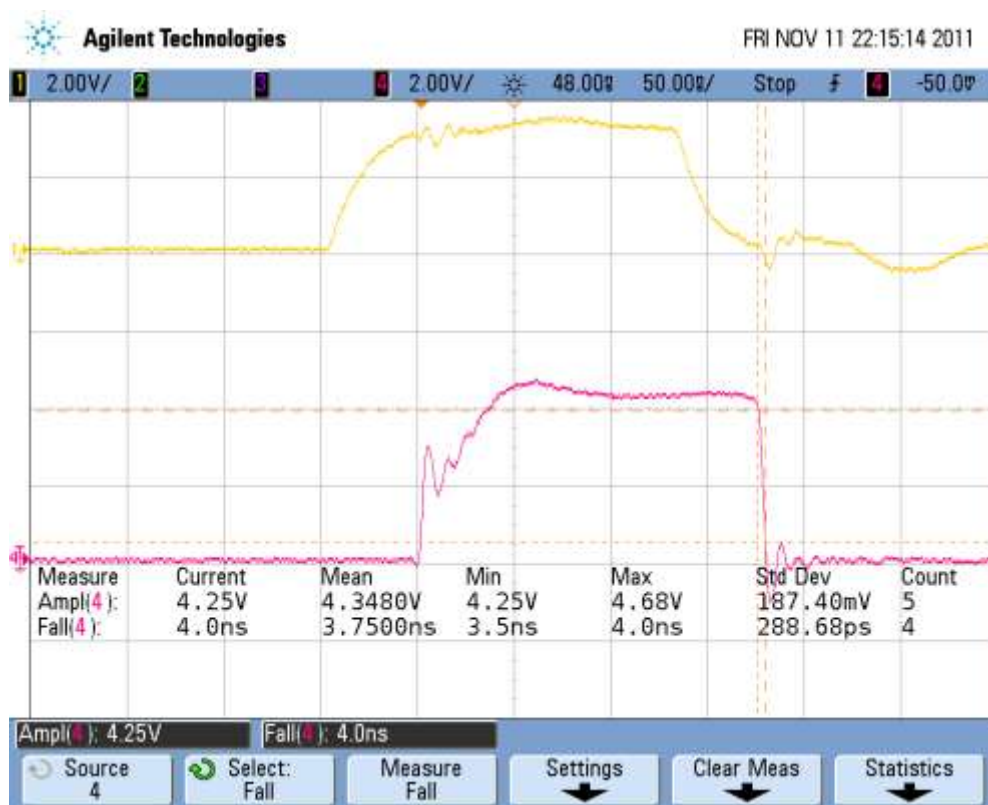
Původně bylo zamýšleno, že spínání laserové diody bude provedeno jen pomocí samotného integrovaného obvodu LM5111 zapojeného přímo na laserovou diodu, protože dle [18] je schopen špičkově dodávat až 3 A. Při praktických zkouškách se ale projevil omezení a nutnost připojení tranzistoru MOSFET (v tomto případě BSS138N) na výstup tohoto obvodu.

Při zkoušení se vycházelo ze schématu zapojení části pro přesné řízení laserové diody zobrazeného v příloze B. 2. K integrovanému obvodu LM5111 byl tedy pouze připojen řídicí signál z mikrokontroléru, napájecí napětí bylo +5 V a výstup obvodu pro řízení MOSFET tranzistoru byl připojen k rezistoru o hodnotě 83 Ω .



Obrázek 30: Schéma zapojení obvodu LM5111 při testování

Rezistor R26 byl zvolen záměrně malý, aby se odzkoušela zatížitelnost výstupu integrovaného obvodu LM5111.



Obrázek 31: Zobrazení spínacího pulzu pro řízení laserové diody na rezistoru $R_{26}=83\Omega$

Obrázek 31 zobrazuje naměřené průběhy z testování obvodu LM5111 zatíženého rezistorem $R_{26} = 83 \Omega$, kde žlutá křivka znázorňuje spínací impuls z mikrokontroléru a růžová křivka zobrazuje výstupní napětí na integrovaném obvodu LM5111 zatíženého rezistorem R_{26} . Šířka spínacího pulzu z mikrokontroléru je přibližně 200 ns, náběžná hrana byla přibližně 36 ns a sestupná hrana asi 4 ns, z čehož lze usuzovat, že integrovaný obvod zvládá skutečně spínat výstup dle údajů ve svém katalogovém listu [18].

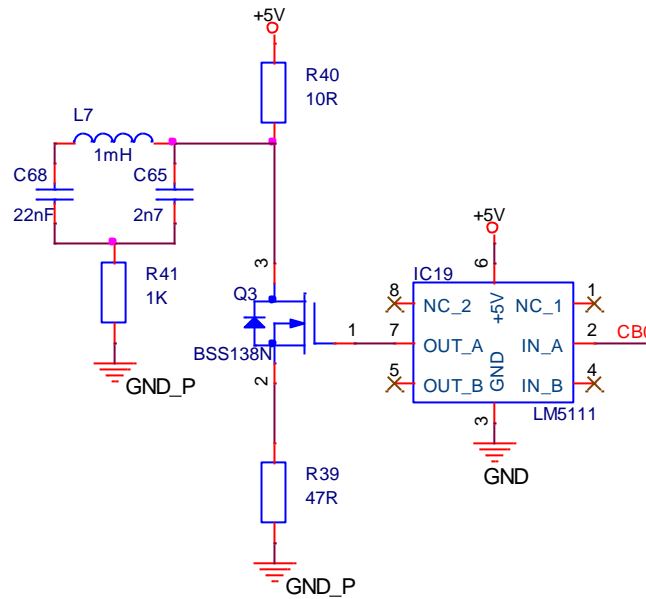
Na výstupu obvodu LM5111 zatíženého rezistorem $R_{26} = 83 \Omega$, se objevilo napětí přibližně $U_{LM5111} = 4,35 V$, což znamená, že při dané hodnotě rezistoru R_{26} měl proudový pulz rezistorem R_{26} hodnotu I_{LM5111}

$$I_{LM5111} = \frac{U_{LM5111}}{R_{26}} = \frac{4,35}{83} \cong 52,4 \text{ mA}. \quad (17)$$

Za předpokladu použití laserové diody s označením QSDM 1300-1 by tento proud měl být dostatečný pro překročení prahového proudu a zajištění stimulované emise, ovšem zadáním byl návrh univerzálního zapojení pro spínání laserové diody schopného dodávat několikanásobně vyšší proud. V tomto zapojení se při dalším snižování zatěžovacího rezistoru R_{26} již výstupní napětí začalo také snižovat a maximální proudový impuls do rezistorové zátěže se pohyboval na hranici 60 mA. Z tohoto důvodu bylo modifikováno zapojení a na výstup integrovaného obvodu LM5111 byl připojen tranzistor MOSFET BSS138N.

4.2 Testování spínání laserové diody pomocí obvodu LM5111 a tranzistoru BSS138

Bylo ověřeno i zapojení s tranzistorem MOSFET BSS138N na výstupu obvodu LM5111. Jedná se o MOSFET tranzistor s N kanálem, kterým může protékat proud až 230 mA [14], což je za účelem generování pulzů laserovou diodou dostačující.



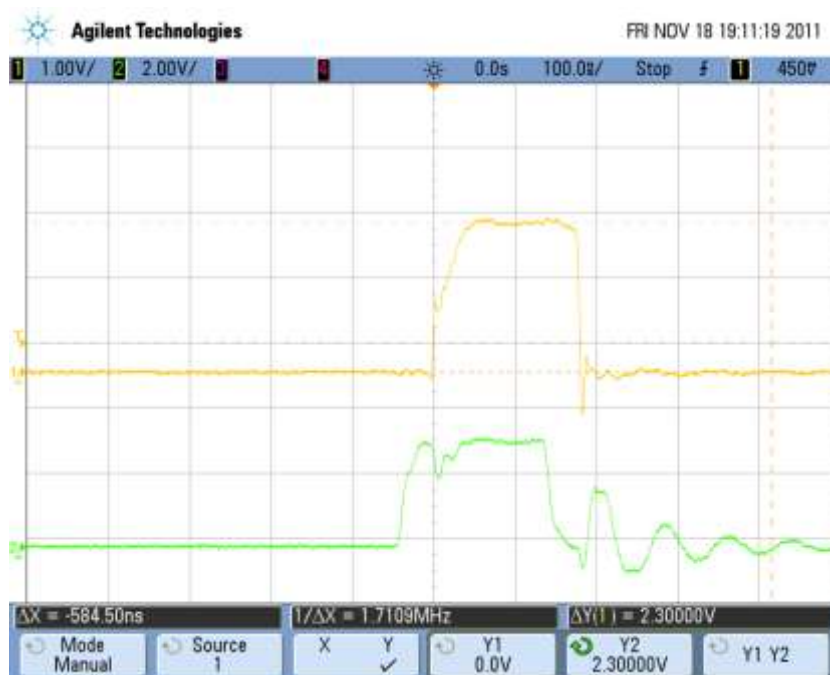
Obrázek 32: Testování obvodu LM5111 spolu s BSS138N pro spínání pulzů pro laserovou diodu

Dále bylo zapojení doplněno kombinací cívky $L7 = 1\text{ mH}$, kondenzátory $C65 = 2,7\text{ nF}$, $C68 = 22\text{ nF}$ a rezistor $R41 = 1\text{ k}\Omega$. Toto zapojení je doporučeno ve [15] pro rychlejší spínání proudu laserovou diodou a také pro možnost změny tvaru proudového pulzu pomocí hodnot těchto součástek.

Při zapojení s připojeným MOSFET tranzistorem (viz obrázek 32), kdy je místo laserové diody umístěn rezistor $R39$ o hodnotě $47\ \Omega$ a obrázek 33 zobrazuje pulzy (žlutá barva) procházející tímto obvodem Zelenou barvou je zobrazen průběh řídicího impulsu z mikrokontroléru, který je ve schématu pojmenován jako CB0. Průběh proudového impulsu určeného pro laserovou diodu má dobrý tvar, ale vstupní signál z mikrokontroléru po sestupné hraně mírně osciluje a nakonec dochází k jeho utlumení. Na spouštěcím pulzu mikrokontroléru lze pozorovat mírný pokles napětí v okamžiku sepnutí obvodu LM5111.

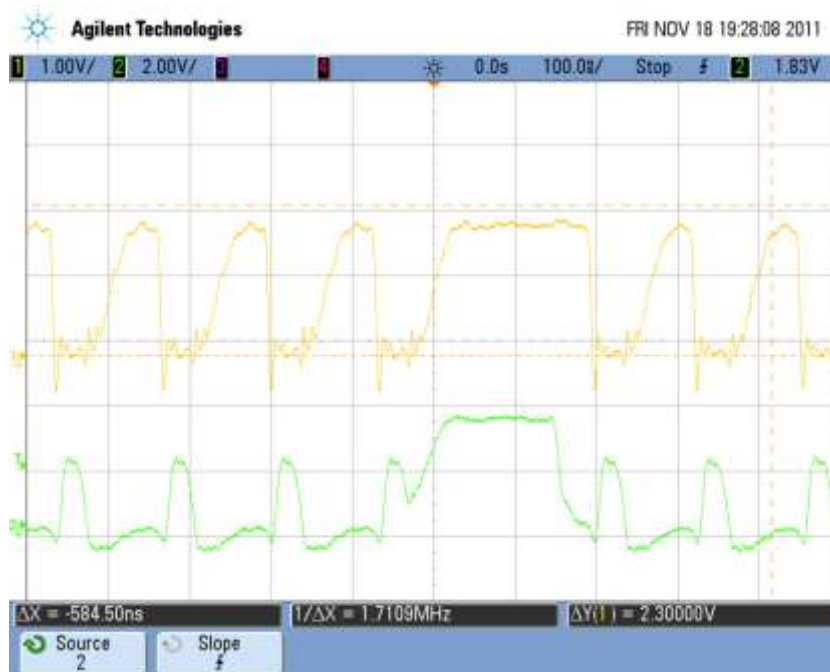
Pro odpor $R39 = 47\ \Omega$ a amplitudu napětí na tomto rezistoru $U_{R39} = 2,2\text{ V}$, vychází proud rezistorem $R39$ roven hodnotě

$$I_{R39} = \frac{U_{R39}}{R39} = \frac{2,2}{47} \cong 46,8\text{ mA} . \quad (18)$$



Obrázek 33: Zobrazení průběhů při testování obvodu LM5111 spolu s BSS138N, zatěžovací odpor 47 Ω

Proud $I_{R39} = 46,8 \text{ mA}$ je ale stále malý dle požadavků pro řízení i jiných laserových diod, a tak byl odpor R39 změněn na hodnotu $R39 = 32 \Omega$. Po této změně ovšem došlo k rozkmitání obou signálů, jak signálu z mikrokontroléru, tak signálu pro spouštění laserové diody (viz obrázek 34).



Obrázek 34: Zobrazení průběhů při testování obvodu LM5111 spolu s BSS138N, zatěžovací odpor 32 Ω

Zřejmě došlo k poklesu napájecího napětí při sepnutí MOSFET tranzistoru BSS138N a výstup se tak rozkmital. Ve snaze omezit tyto kmity a tak i pokles napájecího napětí byl

přidán na pin 6 integrovaného obvodu LM5111 keramický kondenzátor o velikosti 330 nF a následným měřením byly zjištěny průběhy zobrazené na oscilogramu níže (viz obrázek 35).



Obrázek 35: Zobrazení průběhů z testování obvodu LM5111 spolu s BSS138N, zatěžovacím odporem $R=32 \Omega$ a keramickým kondenzátorem na napájení obvodu LM5111 o velikosti 330 nF

Přidáním keramického kondenzátoru o hodnotě 330 nF na napájecí napětí obvodu LM5111 se tedy podařilo odstranit nežádané kmity a pokles napětí řídicího pulzu v okamžiku sepnutí MOSFET tranzistoru BSS138N. Proud procházející odporem R39 je nyní

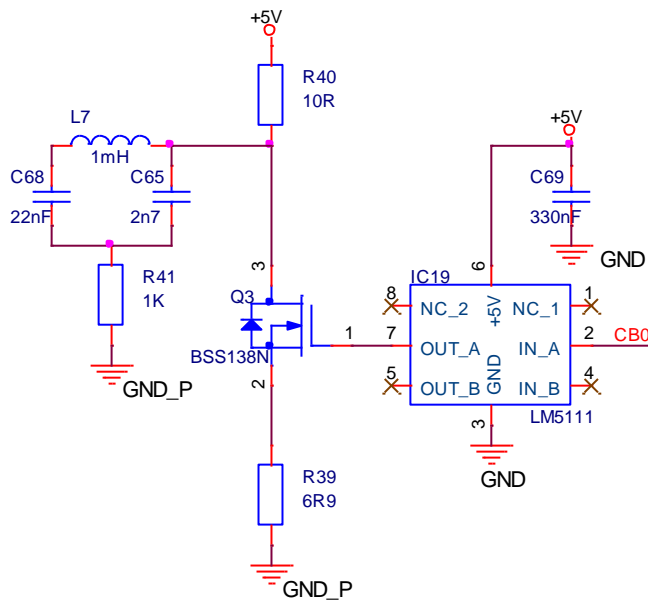
$$I_{R39} = \frac{U_{R39}}{R39} = \frac{1,7}{32} \cong 53,1 \text{ mA} . \quad (19)$$

Proud zatěžovacím rezistorem $I_{R39} = 46,8 \text{ mA}$ také nedosahuje požadovaných parametrů, ale při snížení zatěžovacího odporu R39 na hodnotu $R39 = 6,9 \Omega$ zůstal tvar spouštěcího pulzu stejný, pouze poklesla amplituda úbytku napětí na rezistoru R39 na hodnotu $U_{R39} = 1,1 \text{ V}$, proud tímto rezistorem je pak

$$I_{R39} = \frac{U_{R39}}{R39} = \frac{1,1}{6,9} \cong 160 \text{ mA} . \quad (20)$$

Proud 160 mA je již dostačující pro spínání téměř jakékoliv použitelné diody pro danou aplikaci, dá se ale předpokládat, že při dalším snížení zatěžovacího odporu by se proud dále zvětšoval.

Obrázek 36 ukazuje ověřené schéma pro generování spínacích pulzů pro laserovou diodu.

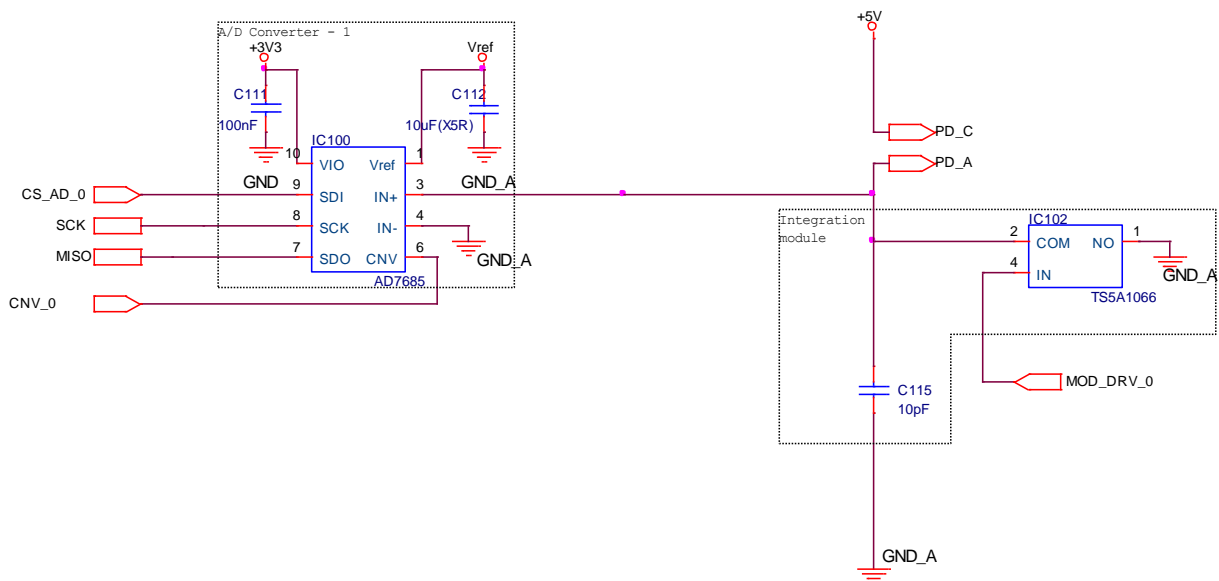


Obrázek 36: Ověřené schéma zapojení pro spínání laserové diody

Zatěžovací odpor R39 ve schématu (viz obrázek 36) jen nahrazuje kombinaci laserové diody a proměnného odporu pro nastavení hodnoty proudu protékajícího laserovou diodou. Konečné schéma zapojení pro řízení laserové diody je zobrazeno v příloze B. 2.

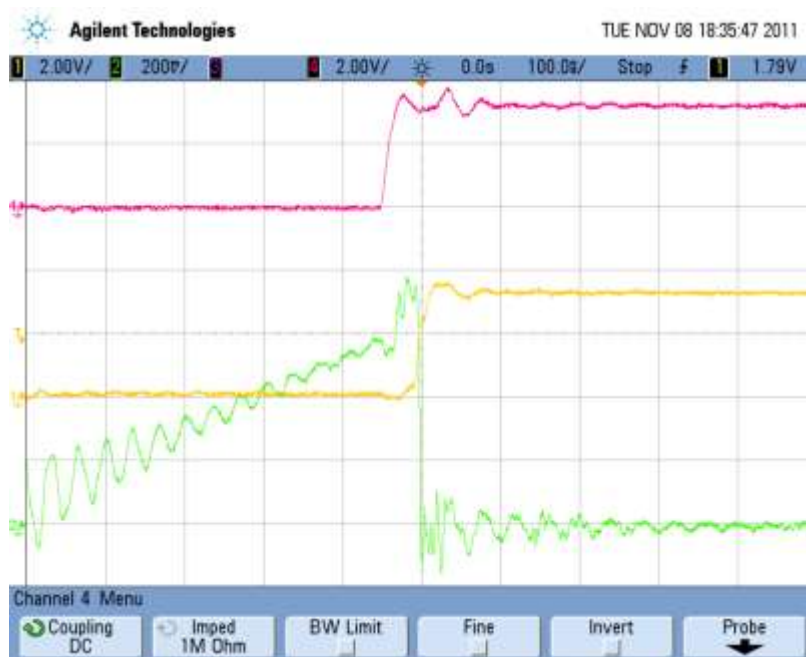
4.3 Měření velikosti pulzů na fotodiodě pomocí A/Č převodníku AD7685

Pro zjištění velikosti proudového pulzu z fotodiody je využíváno již dříve popsané závislosti nabíjení kondenzátoru proudovým pulzem vygenerovaným fotodiodou.



Obrázek 37: Schéma zapojení obvodu pro zjišťování velikosti proudového pulzu generovaného fotodiodou

Obrázek 37 zachycuje takové zapojení obvodu pro otestování funkčnosti, kdy na svorky PD_A a PD_C byl přiveden proudový impuls z fotodiody, ten nabíjel kondenzátor $C_{115} = 10 \text{ pF}$ a velikost napětí na tomto kondenzátoru se pak měřilo A/Č převodníkem AD7685, v uvedeném schématu je označen jako IC100. Po dokončení převodu se kondenzátor pomocí analogového spínače TS5A1066 (IC102) a signálu z mikrokontroléru MOD_DRV_0 zkratuje na zem, takže dojde téměř okamžitě k vybití kondenzátoru a může se začít měřit další proudový impuls z fotodiody.



Obrázek 38: Zobrazení průběhů z měření pomocí A/Č převodníku AD7685

Dále je nutné vyčítat naměřené hodnoty v číslicové formě z A/Č převodníku po sběrnici SPI. Za tímto účelem byl převodník připojen k mikrokontroléru LM3S2276, který je používán pro řízení převodníkové karty.

Obrázek 38 zobrazuje průběhy získané z testování uvedené části obvodu, kde zelenou barvou je zobrazen průběh napětí na kondenzátoru C115 (vstup A/Č převodníku AD7685), žlutou barvou je pak znázorněn signál z mikrokontroléru MOD_DRV_0 pro vybíjení A/Č převodníku a konečně růžovou barvou je znázorněn signál z mikrokontroléru CNV_0, kterým je spuštěn převod v převodníku. Při tomto měření se hodnota vyčtená z A/Č převodníku pohybovala okolo $n = 12300 [-]$, tedy napětí naměřené A/Č převodníkem odpovídalo hodnotě

$$U_{AD7685} = \frac{n \cdot V_{REF}}{2^{16}} = \frac{12300 \cdot 3,3}{65536} \cong 619 \text{ mV}. \quad (21)$$

Velikost napětí $U_{AD7685} \cong 619 \text{ mV}$ je přibližně zjištěna i osciloskopem (viz obrázek 38). Jelikož je ale kapacita kondenzátoru velmi malá, zanáší se do obvodu chyba při připojení sondy osciloskopu k měřenému obvodu. Pokud je sonda osciloskopu od testovaného obvodu odpojena, hodnota vyčítaná z A/Č převodníku se zvýší přibližně

na hodnotu $n = 16000$ [–], kdy pak výsledné napětí na kondenzátoru vychází následovně:

$$U_{AD7685} = \frac{n \cdot V_{REF}}{2^{16}} = \frac{16000 \cdot 3,3}{65536} \cong 805 \text{ mV}. \quad (22)$$

Tato hodnota již není zatížená chybou způsobenou kapacitou sondy osciloskopu, které má hodnotu $C_p = 30 \text{ pF}$ a projeví se jako paralelně připojená k měřicímu kondenzátoru $C_{115} = 10 \text{ pF}$. Pro ověření hodnoty získané A/Č převodníkem ale tato chyba není tak důležitá.



Obrázek 39: Detailní zobrazení průběhů v okamžiku spuštění převodu A/Č převodníku AD7685

Při spuštění převodu signálem CNV_0 z mikrokontroléru A/Č převodník připojí svůj vstupní obvod, který je v náhradním zapojení [12] tvořen sériovou kombinací rezistoru $R_{IN} = 3 \text{ k}\Omega$ a kondenzátoru $C_{IN} = 30 \text{ pF}$. Po připojení těchto prvků při sepnutí sledovacího obvodu použitého A/Č převodníku se hodnota napětí na kondenzátoru C115 mírně zvýší (asi o 50÷100 mV). Tento jev zobrazuje obrázek 39, kdy krátce po sepnutí převodu (růžový průběh) je zvýšena hodnota napětí na kondenzátoru C115. Příčinu tohoto navýšení bude nutno ještě ověřit. Zda-li se v tomto případě nejedná pouze o rušení vzniklé na relativně dlouhé a nestíněné propojce na univerzální desce plošného spoje, či zda je navýšení způsobeno například nábojem na kapacitě C_{PIN} na vstupu A/Č převodníku [12].

5 POPIS DESKY PLOŠNÉHO SPOJE PŘEVODNÍKOVÉ KARTY

Navržená deska převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody má čtyři vrstvy. Jednotlivé vrstvy jsou popsány v této kapitole. Při návrhu rozmístění součástek, vedení signálových cest a stínění byl kladen důraz na dodržení topologie navržených funkčních bloků, jejich vzájemného oddělení, minimalizaci vzdáleností spolu s počtem propojek u signálových cest a optimalizaci z hlediska minimalizace šumu u vodičů přenášejících měřený signál.

5.1 Vrchní vrstva (TOP) desky plošného spoje převodníkové karty

Na vrchní straně desky plošného spoje převodníkové karty se nachází dvě části, které byly popsány dříve, a to kompletní napájecí část a téměř celá digitální část, s výjimkou obvodu pro výběr jednotlivých A/Č převodníků, konkrétně se jedná o obvod CD74HC154M, který byl z důvodu velkého množství vývodů a tak i snadnějšího zapojení umístěn na spodní část desky (BOTTOM), blíže k jednotlivým A/Č převodníkům.

Navržená vrchní vrstva (TOP) desky plošného spoje převodníkové karty je zobrazena v příloze C. 1. S tím souvisí také rozmístění součástek na vrchní (TOP) vrstvě, které je zobrazeno v příloze D. 1. a na kterém je také znázorněno, ve které části desky plošného spoje je umístěna napájecí část. Zbývající součástky patří do digitální části. V této vrstvě tedy nebyly žádné speciální požadavky na rozmístění součástek, až na zmiňované oddělení součástek napájecí části od části digitální.

Z výkresu osazení součástek na vrchní straně je vidět, že na přední panel je vyveden pouze USB konektor CN1, dále budou na přední panel umístěny indikační LED diody, které se připojí flexi kabelem ke konektoru D2. Dle požadavků se na přední panel, opět za pomoci flexi kabelu, umístí tlačítko pro resetování mikrokontroléru. To bude připojeno ke konektoru J2.

Na druhé straně desky je umístěn 64pinový konektor, který se při zastrčení do standardizované skříně zapojí do protikusu konektoru DIN 41612. Na tento konektor jsou připojeny všechny digitální vstupy/výstupy, sběrnice CAN a hlavní napájecí napětí pro celou převodníkovou kartu.

Další důležitou částí pro uživatele je 20-ti pinový konektor JTAG pro naprogramování a případné ladění programu mikrokontroléru, označený jako J3, který je umístěn v těsné blízkosti mikrokontroléru samotného.

Poslední část nezbytná pro uživatele, je možnost nastavení primární a sekundární adresy, pomocí propojek na konektoru JNP1, respektive pomocí DIP přepínačů (SW2),

kteře jsou umístěny v levé horní části převodníkove části a v horní části přibližně uprostřed plošného spoje je umístěn konektor JNP1, na kterém může uživatel nastavit propojkami požadovanou primární adresu nutnou pro adresaci zařízení při komunikaci prostřednictvím sběrnice CAN.

5.2 Vnitřní vrstva 1 desky plošného spoje převodníkove karty

V první vnitřní vrstvě převodníkove karty je vylitá měď, ke které je připojena analogová zem, jež je připojena, dle zásad pro návrh desek plošných spojů, pouze v jednom místě k hlavní zemi GND. Tato vnitřní vrstva je umístěna záměrně ihned pod vrchní vrstvou, jelikož má sloužit i jako stínění analogove části, která je umístěna na spodní straně desky (BOTTOM), od součástek ve vrchní vrstvě desky plošného spoje (TOP), na které se nachází digitální a napájecí část.

Zobrazení této vrstvy je v příloze C. 2., ze které je patrné, že měď a potažmo analogová zem, není na celé ploše první vnitřní vrstvy, ale pouze v místech, kde se nachází analogove obvody na spodní straně desky plošného spoje (BOTTOM).

5.3 Vnitřní vrstva 2 desky plošného spoje převodníkove karty

Ve druhé vnitřní vrstvě jsou rozvedeny jen tři analogove signály. Jedná se o kladné i záporné napájecí napětí pro analogovou část a referenční napětí +1,225 V pro A/Č převodníky.

Topologie druhé vnitřní vrstvy je zobrazena v příloze C. 3. Oba napájecí vodiče ($\pm 3V3_A$) jsou v této vrstvě navrženy ve tvaru hřebene, který do sebe zapadá a není tak nutné tyto napájecí vodiče propojovat na jinou vrstvu v jiných místech, než kde je nutné připojit tyto signály k součástce. Napájecí napětí pro analogovou část ($\pm 3V3_A$) jsou připojeny k regulátorům také pouze v jednom bodě, aby nedocházelo ke vzniku nežádoucích smyček. Podobným způsobem je zapojeno i referenční napětí V_{REF} , které ale na rozdíl od napájecího napětí, bylo nutné táhnout i po spodní vrstvě (BOTTOM) desky plošného spoje.

5.4 Spodní vrstva (BOTTOM) desky plošného spoje převodníkove karty

Na spodní straně desky plošného spoje (BOTTOM) převodníkove karty je umístěn pouze jeden integrovaný obvod patřící do digitální části, a to je obvod IC11 (MC74HC154M), který slouží jako dekodér pro výběr jednotlivých A/Č převodníků pro komunikaci na sběrnici SPI. Spodní strana desky plošného spoje (BOTTOM) je zobrazena v příloze C. 4., se kterým souvisí příloha D. 2., na které je zobrazeno

rozmístění součástek na spodní straně převodníkové karty. Oba uvedené obrázky jsou zrcadlené.

Na spodní straně (BOTTOM) převodníkové karty jsou také umístěny všechny diody (jak vysílací laserová dioda LD1, pro kterou je zde umístěna patice pro případnou výměnu), tak i přijímací fotodiody PD1 až PD4. Fotodiody bohužel nebylo možné dát do žádné patice, jelikož pro uvažované fotodiody EPM 605 není dostupná vhodná patice. Jinak je tomu u laserové diody QSDM 1300-1, kterou je možno umístit do precizní 8-mi pinové patice DIL. Jak je naznačeno na rozmístění součástek na spodní straně DPS (příloha D. 2.), všechny diody jsou umístěny tak, že orientace optického vlákna je směrem ke středu převodníkové karty. Vyvedení optických vláken na čelní panel je řešeno ohybem vlákna za předpokladu dodržení mezního poloměru ohybu. Těsně u fotodiod jsou umístěny kondenzátory Cx10 (x označuje jednotlivé fotodiody) pro filtrování napájecího napětí fotodiod.

Na spodní straně (BOTTOM) jsou dále odděleny součástky, které jsou výkonové a mohly by způsobovat rušení. Jedná se o skupinu součástek v pravé části desky plošného spoje (příloha C. 4.). Je vidět, že je mezi nimi ponechán prostor bez vylité vrstvy mědi spojené se zemnicím uzlem pro minimalizaci šíření rušení prostřednictvím zemnicího vodiče.

Výstupní elektrický signál z fotodiod je velmi malý a náchylný na jakékoliv rušení. Z toho důvodu jsou signálové cesty od fotodiody až po jednotlivé A/Č převodníky stíněny pomocí cest analogové země, které jsou průběžně připojovány prostřednictvím prokuvů na analogovou zem. Uprostřed spodní strany (BOTTOM) převodníkové karty jsou pak umístěny všechny A/Č převodníky tak, aby byly vždy v řadě převodníky z jednoho analogového kanálu a co možná nejméně ovlivňovaly druhou skupinu převodníků v dalším analogovém kanále. První a druhý analogový kanál je umístěn tak, aby mezi sebou měly veškeré digitální signály (především sběrnice SPI) a odvrácené od sebe aby byly zmiňované citlivé cesty od fotodiod, které jsou stíněné společně s referenčním napětím V_{REF} . Stejným způsobem je pak na této vrstvě umístěn také třetí a čtvrtý analogový kanál.

6 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

V rámci diplomové práce vzniklo programové vybavení pro řídicí mikrokontrolér a následně také testovací program pro osobní počítač, aby bylo možné z převodníkové karty vyčítat změřené hodnoty i jinak, než pomocí „krokování“ programu pomocí debuggeru, ale také automaticky a případně i měření vyhodnocovat. Popisem programového vybavení pro řídicí mikrokontrolér LM3S2276 i zmiňovaným programem pro PC se zabývá následující kapitola.

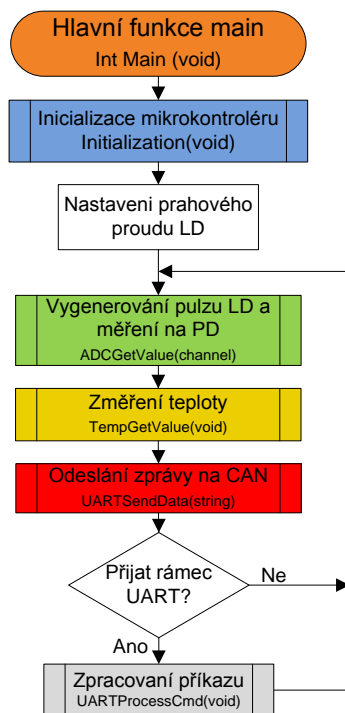
6.1 Programové vybavení řídicího mikrokontroléru

LM3S2276

Pro ověření funkčnosti převodníkové karty pro řízení laserové diody bylo nutné vytvořit program do mikrokontroléru LM3S2276, který ovládá všechny části obsažené na převodníkové kartě. V průběhu vývoje byly postupně ověřovány všechny funkční části systému. V této podkapitole je stručně popsáno navržené a následně realizované programové vybavení mikrokontroléru.

6.1.1 Popis hlavní funkce mikrokontroléru

Vývojový diagram představující hlavní funkci navrženou v mikrokontroléru ukazuje obrázek 40. Hlavní funkce se skládá z několika hlavních bloků. Prvním blokem po spuštění mikrokontroléru je inicializace mikrokontroléru a periférií k němu připojených.



Obrázek 40: Vývojový diagram řídicího programu mikrokontroléru LM3S2276 pro ověření funkce převodníkové karty

Po inicializaci všech nezbytných částí se pomocí signálu z mikrokontroléru, který je připojen na obvod pro řízení MOSFET tranzistorů LM5111, sepne prahový proud laserovou diodou. Následně je již převodníková karta připravena na generování pulzního průběhu vstupního signálu do laserové diody a vyhodnocování přijatých pulzů na jednotlivých měřicích fotodiodách.

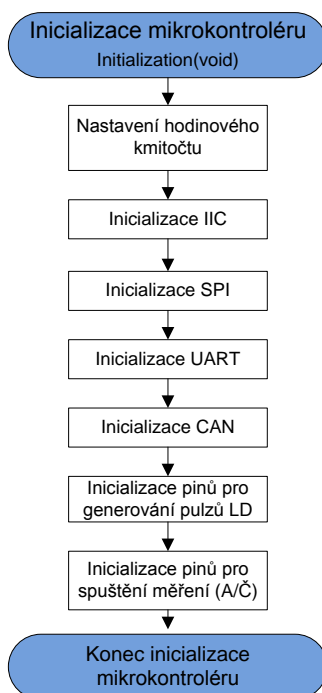
Spuštěním funkce „ADCGetValue“ je spuštěn integrační modul, následně je vygenerován pulz optického signálu pomocí laserové diody a hodnota napětí na integračním kondenzátoru snímací fotodiody je následně převedena do digitální hodnoty a přenesena do řídicího mikrokontroléru pomocí sběrnice SPI. Jako parametr se funkci „ADCGetValue“ předává informace, který A/Č převodník má aktuálně měřit (slouží pro nastavení „Chip select“ signálu na sběrnici SPI) a funkce vrací hodnotu vyčtenou z A/Č převodníku, která je v rozsahu 0 - 65 535.

Jakmile je změřena hodnota pulzu přijatého na příslušné fotodiodě, je tato hodnota převedena do mikrokontroléru. Výsledek měření je uložen do struktury.. Pro ověření funkčnosti je výsledek měření odesílán na sběrnici CAN. Po dokončení těchto hlavních bloků je v hlavní funkci dán prostor pro zpracování možného příkazu přijatého přes rozhraní UART. Níže jsou popsány detailněji jednotlivé funkční bloky.

6.1.2 Inicializace

První vykonávanou funkcí po spuštění mikrokontroléru je inicializace všech využívaných částí, jak již bylo řečeno při popisu hlavní funkce v kapitole 6.1.1.

Sekvenci nastavení všech inicializovaných periférií mikrokontroléru, přehledně ukazuje obrázek 41.



Obrázek 41: Vývojový diagram představující jednotlivé kroky prováděné během inicializace mikrokontroléru

Nejprve je nastaven ve funkci „ClockInit(void)“ jako hlavní zdroj hodinového signálu externí oscilátor o kmitočtu 16 MHz. Následně je povoleno a nastaveno I²C rozhraní, konkrétně jsou to pin 2 a pin 3 na portu B mikrokontroléru. Na pinu 2 je generován hodinový signál (SCL), na pinu 3 je pak datový signál (SDA). Mikrokontrolér LM3S2276 je dále nastaven jako hlavní zařízení na sběrnici I²C (Master). Ve funkci „I2C_Init(void)“ pro nastavení I²C modulu je také povoleno přerušení jak od I²C modulu, tak globální přerušení mikrokontroléru.

Jakmile je dokončeno výchozí nastavení I²C modulu, inicializuje se modul pro komunikační sběrnici SPI, který slouží pro komunikaci s Č/A převodníkem MCP4912 a s Č/A převodníky AD7685. Ve funkci pro výchozí nastavení sběrnice „SPI_Init(void)“ je nejprve povolen periferní modul pro SPI a následně jsou nakonfigurovány jednotlivé piny SCK, MOSI a MISO. V dalším kroku je nastaven zdroj hodinového signálu pro sběrnici SPI a je povolena funkce celého modulu. Po úspěšném výchozím nastavení jsou vyčtena aktuální data ze zásobníku, pro zabránění pozdějšímu přijetí náhodných dat. Na konci procesu inicializace sběrnice SPI, jsou uvedeny do výchozího stavu signály pro výběr součástky, tzv. „ChipSelect“. Ve výchozím stavu je nutno nastavit signál „SPI_CS_EN“ do log. 1, kdy budou všechny A/Č převodníky neaktivní a současně je nutno takto nastavit i signál s názvem „AB16“, který slouží pro aktivaci komunikace mikrokontroléru LM3S2276 s Č/A převodníkem MCP4912.

Převodníková karta je vybavena univerzální sériovou sběrnici (USB). Jak již bylo popsáno v kapitole 3.2. sběrnice usb, mikrokontrolér komunikuje s obvodem FT232R pomocí rozhraní UART a ten převádí komunikaci z rozhraní UART na univerzální sériovou sběrnici (USB). Během inicializace jsou nastaveny parametry pro rozhraní mikrokontroléru UART a ty se již během programu nemění, využívá se obousměrná komunikace. Nejprve jsou povoleny a nastaveny jednotlivé piny mikrokontroléru a nastaven přijímací zásobník. Následně jsou nastaveny parametry komunikace mezi zmiňovanými obvody. Rychlost komunikace je 115 200 Baud, počet datových bitů je 8 a následuje jeden stop bit (paritní bit není použit). Po tomto nastavení je povoleno přerušování při příjmu dat přes rozhraní UART (modul UART0) a následuje povolení globálního přerušování. Při vzniku tohoto přerušování je definována funkce „UARTIntHandler(void)“ zajišťující příjem jednotlivých bytů, které jsou pomocí stavového automatu pro příjem rámce přes rozhraní UART ukládány do struktury a jestliže je přijat kompletní rámec, je nastaven příznak přijetí kompletního rámce. Tento příznak je testován na konci nekonečné smyčky v hlavní funkci (vizobrázek 40) a pokud je příznak nastaven, dojde ke zpracování přijatého rámce.

Naměřené hodnoty z převodníkové karty mají být odesílány na sběrnici CAN. Pro výchozí nastavení integrovaného modulu CAN v mikrokontroléru LM3S2276 byla vytvořena funkce „CANInitialize(void)“. Během zmiňované funkce se správně nakonfigurují piny mikrokontroléru, a také se povolí funkce samotného modulu CAN. Následně je volána funkce pro inicializaci modulu CAN integrovaného do mikrokontroléru, během které se resetuje stav přijatý a odesílaných datových zpráv a modulu CAN. Rychlost komunikace po sběrnici CAN je nastavena na 1Mb/s. Následně je povoleno přerušování od modulu CAN v mikrokontroléru, globální přerušování a konečně jsou nastaveny formáty jednotlivých zpráv sběrnice CAN pro převodníkovou kartu.

V další části inicializace jsou nastaveny piny pro spouštění prahového a modulačního proudu laserovou diodou. Nejprve jsou nastaveny tyto piny jako výstupní a posléze jsou nastaveny do klidové úrovně log. 1 (tranzistorem protéká proud, pokud je na pin 1 („Gate“) přivedena log. 0).

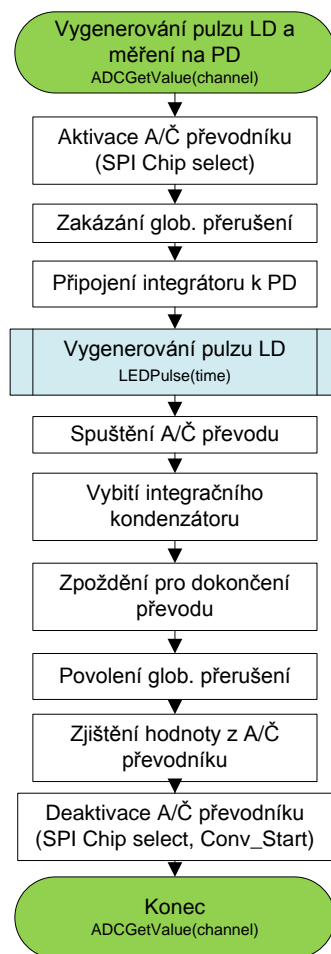
Poslední částí inicializace je nastavení pinů pro spouštění převodů A/Č převodníků AD7685 v jednotlivých kanálech. Piny je potřeba nastavit jako výstupní, což je provedeno hned v prvním kroku. Všechny piny pro spuštění převodu zůstanou v log. 0 (klidová úroveň). Pouze jeden pin je nastaven do log. 1, a to pin 2 na portu D, který slouží pro vybíjení kondenzátoru, na kterém se následně bude provádět integrace proudového pulzu u fotodiody.

6.1.3 Vygenerování pulzu laserovou diodou a vyhodnocení velikosti pulzu na fotodiodě

Pro otestování nejdůležitější funkce převodníkové karty bylo nutné navrhnout a odzkoušet funkci „ADCGetValue(Channel)“, která slouží pro vygenerování pulzu laserovou diodou a současně změření velikosti proudového pulzu vygenerovaného na připojené fotodiodě. Jako parametr se této funkci předává informace o tom, ze kterého A/Č převodníku se má změřená hodnota získávat. Nejprve se ve funkci vybere požadovaný A/Č převodník AD7685 (pomocí signálu „ChipSelect“ na sběrnici SPI). Jakmile je vybrán požadovaný A/Č převodník, zakáže se všechna přerušení v mikrokontroléru (pro zajištění shodných délek pulzů na laserové diodě a zajištění nenarušeného měřicího procesu programovým přerušením od jiných periférií).

Po nastavení A/Č převodníku a zakázání přerušení se již může spustit samotné měření. Nejprve je rozeprt spínač, který zkratuje kondenzátor, pomocí kterého se má integrovat proudový pulz (signál „MOD_DRV_X“, kde X označuje požadovaný kanál). Dále je volána funkce pro vygenerování krátkého pulzu laserovou diodou nazvaná „LEDPulse(time)“, jejíž vývojový diagram zobrazuje obrázek 43.

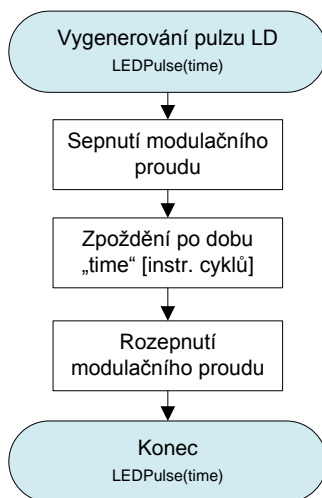
Pro vygenerování proudového pulzu s co nejstrmější hranou bylo zapotřebí k výstupnímu pinu, který spíná modulační proud laserovou diodou, přistupovat v programu přímo k registru pro ovládání portu D (funkce „HWREG(x)“). Tím se podstatně zvýší strmota hrany spínacího signálu. Pro sepnutí modulačního proudu je výstupní pin 0 na portu D nastaven do log. 0. Poté je možné vložit volitelné zpoždění, které je funkci „LEDPulse(time)“ předáváno v parametru „time“ a udává počet instrukčních cyklů. Následně je proud diodou opět rozeprt (přivedením log. 1 na obvod řídicí MOSFET tranzistor v sérii s laserovou diodou – signál CB0 ve schématu).



Obrázek 42: Vývojový diagram funkce `ADCGetValue(channel)` pro generování pulzu laserovou diodou a následné měření přijatého pulzu z fotodiody

Vygenerováním pulzu laserovou diodou, proběhla téměř současně také integrace proudového pulzu ze snímací fotodiody, která je připojena na kondenzátor, který se nabije na určitou hodnotu napětí (dle velikosti proudového pulzu). Po vygenerování pulzu se okamžitě spouští převod ve vybraném A/Č převodníku AD7685. Převod z analogové hodnoty měřeného napětí na integračním kondenzátoru začíná připojením interního vzorkovacího kondenzátoru převodníku. Po přerozdělení nábojů mezi integračním kondenzátorem a interním vzorkovacím kondenzátorem dochází k odpojení vzorkovacího kondenzátoru a integrační kondenzátor je možné vybití a ukončit jednu periodu měřicího cyklu. Hodnota napětí vzorkovacího kondenzátoru je interním procesem A/Č převodníku převedena na číslcovou hodnotu. Pro testování je následně vložena zpožďovací smyčka, kdy se čeká na dokončení převodu (dle [12] minimálně 500 ns, testováním byla zjištěna hodnota přibližně 688 ns). Následně je již povoleno přerušení, pro možnost vyčtení dat přes sběrnici SPI. Z převodníku se vyčte hodnota o velikosti 2 B, která je následně vrácena funkcí „`ADCGetValue(Channel)`“ jako návratová hodnota. Ještě před návratem z této funkce se nastaví všechny signály sběrnice SPI do výchozího stavu (deaktivace zvoleného A/Č převodníku a také

ukončení konverze tak, jak je zobrazeno na průběhu ve [12] pro danou konfiguraci sběrnice).



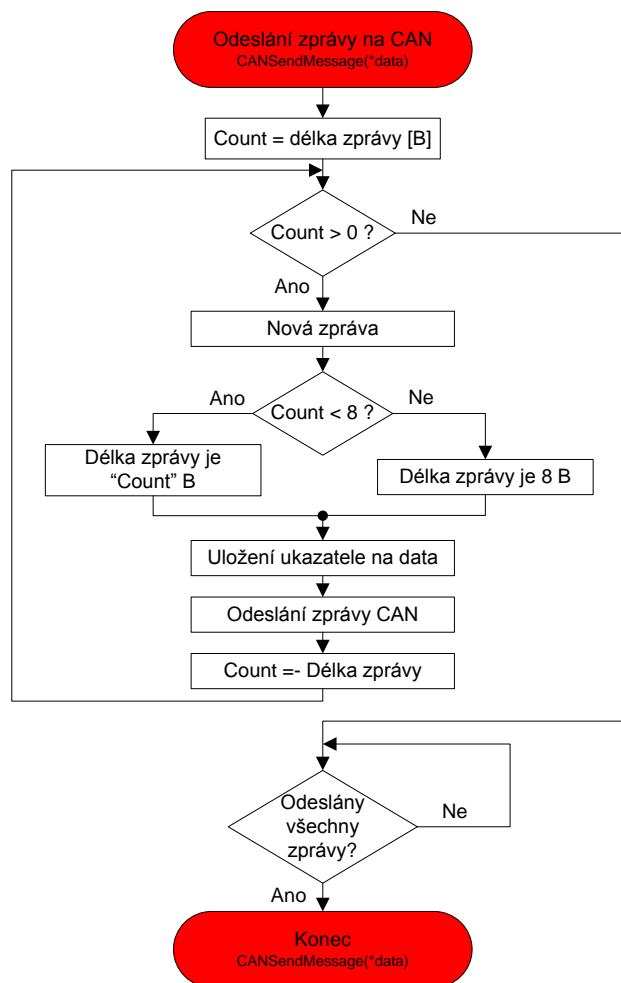
Obrázek 43: Vývojový diagram funkce LEDPulse(time) pro vygenerování pulzu laserovou diodou

Obrázek 42 tak představuje posloupnost výše popsanych funkcí, díky nimž bylo možné ověřit funkčnost daného principu jak generování pulzu laserovou diodou, tak i měření velikosti pulzu vygenerovaného měřicí fotodiodou.

6.1.4 Odeslání dat na sběrnici CAN

Podobně jako pro ověření komunikace mezi PC a mikrokontrolérem po univerzální sériové sběrnici (USB) je připravena funkce „UARTSendData(*Data, Length)“ pro odesílání naměřených dat na rozhraní UART a potažmo na sběrnici USB, tak i pro ověření zapojení sběrnice CAN na převodníkové kartě byla vytvořena funkce „CANSendMessage(*data)“.

Obrázek 44 ukazuje vývojový diagram pro funkci odesílání zprávy na sběrnici CAN. Každá zpráva odeslaná na sběrnici CAN může mít maximálně 8 B dat. Délka odesílaných dat je kontrolována hned na začátku. Pokud jsou připravena data k odeslání, vytvoří se nová datová zpráva. Pro tuto zprávu se nastaví odpovídající velikost [B]. Pokud je počet dat větší než 8 B, pak je nastavena velikost jen 8 B (maximální počet datových bytů v každé CAN zprávě) a zbytek dat se odešle v další zprávě.

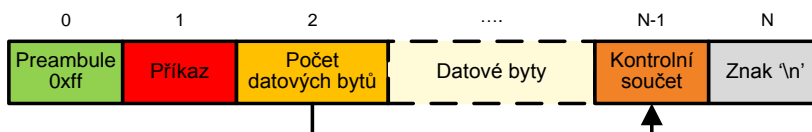


Obrázek 44: Vývojový diagram funkce CANSendMessage(*data) pro odeslání zprávy pomocí sběrnice CAN

Jakmile jsou tímto způsobem rozděleny všechny datové byty do zpráv, následuje smyčka, ve které se vyčká na odeslání všech zpráv na sběrnici CAN a funkce je ukončena.

6.1.5 Komunikace s převodníkovou kartou po sběrnici USB

Implementovaná sběrnice USB má sloužit k servisním účelům, ke změně nastavení karty, nebo její kalibraci. Z toho důvodu je navržen jednoduchý komunikační protokol, pomocí kterého je možné s kartou komunikovat. Při komunikaci pomocí vzniklého protokolu převodníková karta samovolně neodesílá žádné data na sběrnici USB, ale pouze vyčká na příjem rámce, který specifikuje akci převodníkové karty a následně také formát rámce odpovědi.



Obrázek 45: Formát rámce pro komunikaci po sběrnici USB

Obrázek 45 ukazuje, jak vypadá rámec pro komunikaci s převodníkovou kartou po sběrnici USB. Skládá se celkem z šesti částí, kdy část „Datové byty“ lze vynechat, pokud je nastavena hodnota „počet datových bytu“ na hodnotu 0.

První byte, tzv. **preamble**, slouží jen pro informaci o počátku rámce a musí mít vždy hodnotu 255, aby byl rámec přijat. Následující byte označený jako **příkaz**, udává akci, která se má vykonat po příjmu kompletního rámce. Převodníková karta má implementovaných pět příkazů.

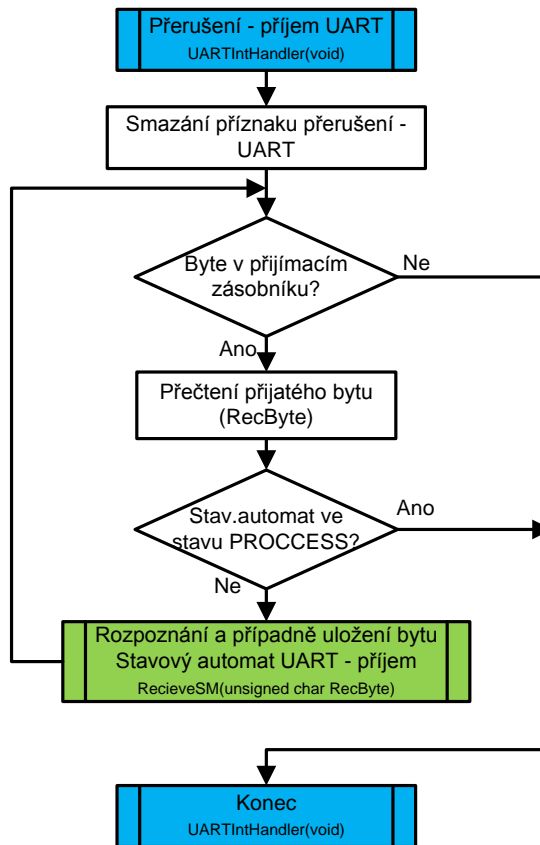
Tabulka 2: Seznam podporovaných příkazů pro komunikaci s převodníkovou kartou po sběrnici USB

Příkaz	Význam
0	Zjištění stavu převodníkové karty
1	Čtení hodnoty z A/Č převodníku
2	Čtení teploty na převodníkové kartě
3	Zápis dat do EEPROM
4	Čtení dat z EEPROM

Tabulka 2 obsahuje seznam podporovaných příkazů a jejich význam. Jsou implementovány jen základní příkazy pro otestování funkčnosti komunikace po sběrnici USB a v případě potřeby je možné příkazy velmi jednoduše upravit, případně přidat další příkazy. Formáty rámců pro konkrétní příkazy jsou uvedeny dále.

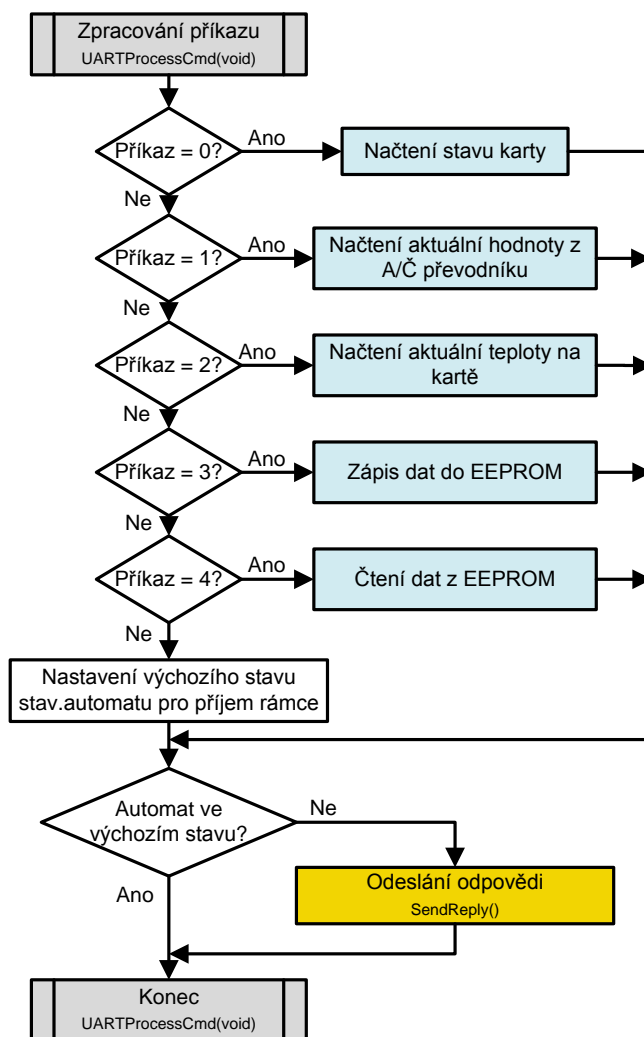
Byte **Počet datových bytů**, jak již sám název napovídá, obsahuje počet datových bytů, které následují ihned za tímto bytem, čímž je řečeno, který byte již není datový, ale jedná se o **kontrolní součet** (viz obrázek 45 - naznačeno šipkou). Hodnota kontrolního bytu je určena jako funkce XOR hodnot jednotlivých bytů od příkazu až po poslední byte před kontrolním součtem. Poslední byte rámce je označen jako **zakončovací znak** rámce a má vždy hodnotu 10 (znak ‘\n’).

Rámec zprávy po sběrnici USB je v mikrokontroléru zpracováván byte po byte. Při příjmu dat přes rozhraní UART mikrokontrolér vyvolá přerušení, které je spojeno s funkcí UARTIntHandler(void). Obrázek 46 ukazuje vývojový diagram zmiňované funkce pro obsluhu tohoto přerušení. Nejprve je smazán příznak přerušení od UART modulu. Následuje smyčka, kdy se z přijímacího zásobníku vyčítají jednotlivé přijaté byty. O rozhodnutí, zda se jedná o platnou část rámce zprávy (platný byte) se stará v řídicím mikrokontroléru stavový automat. Stavový automat je volán pro každý přijatý byte ve smyčce (zobrazuje obrázek 46) a je volán pouze v případě, pokud není ve stavu „PROCESS“, tedy pokud není právě zpracováván jiný přijatý rámec, aby nedošlo k přepsání dat.



Obrázek 46: Funkce UARTIntHandler(void) mikrokontroléru pro obsluhu přerušení při příjmu dat přes rozhraní UART

Přijímané byty jsou ukládány jeden po druhém do struktury v mikrokontroléru, a jakmile je přijat kompletní rámec, přijímací stavový automat přejde do stavu „PROCCCESS“ a dokud není obslužen aktuální příkaz z přijatého rámce, převodníková karta nereaguje na dále přijímané byty. Detailní vývojový diagram stavového automatu pro příjem bytů přes rozhraní UART, jejich testování a uložení do struktury je ukázán v příloze H. 1. Po přijetí kompletního rámce, je přijímacím stavovým automatem nastaven příznak přijetí kompletního rámce a automat je uveden do již zmiňovaného stavu „PROCCCESS“. Příznak přijetí kompletního rámce je testován přímo v hlavní funkci v nekonečné smyčce. Po zjištění příznaku dokončení rámce je volána funkce UARTProcessCmd(void), která zjistí, který příkaz je požadován, naplní odpovídajícím způsobem strukturu pro odeslání odpovědi a odpověď odešle. O samotné odesílání rámce se stará podobný stavový automat, jako je navržen pro příjem rámce přes rozhraní UART a zobrazen v příloze H. 1.

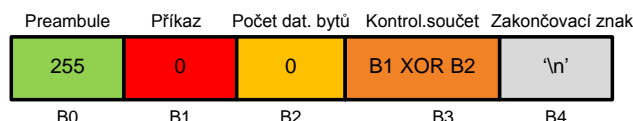


Obrázek 47: Funkce UARTProcessCmd(void) mikrokontroléru pro obsluhu příznaku přijetí kompletního rámce přes rozhraní UART

Obrázek 47 detailně popisuje funkci UARTProcessCmd(void) pro obsluhu příznaku přijetí kompletního rámce přes rozhraní UART pomocí vývojového diagramu. Jakmile je naplněna struktura pro odeslání odpovědi přes rozhraní UART, je spuštěn odesílací stavový automat implementovaný ve funkci SendReply(void), který odesílá ve smyčce postupně jeden byte za druhým ze struktury, dokud není odeslán celý rámec. Následně jsou v textu uvedeny hodnoty bytů v rámcích pro odesílané jednotlivé příkazy podporované převodníkovou kartou (formát rámce požadavku odesílaného např. z PC do převodníkové karty).

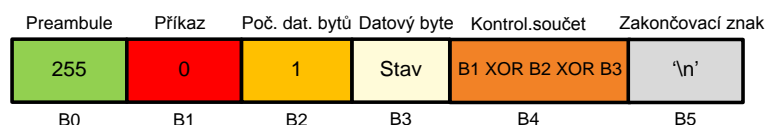
6.1.5.1 Příkaz 0

Pro zjištění stavu převodníkové karty je využíván příkaz 0. Strukturu rámce požadavku odeslaného do převodníkové karty zobrazuje obrázek 48.



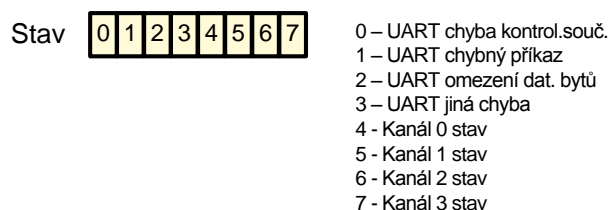
Obrázek 48: Formát rámce požadavku pro příkazy 0 po sběrnici USB

Obrázek 48 zobrazuje konkrétní hodnoty v rámci odesílaném do převodníkové karty. Při tomto příkazu se neodesílají žádné datové byty, takže celý rámec má pouze 5B.



Obrázek 49: Rámec s odpovědí převodníkové karty na příkaz 0

Rámec odpovědi převodníkové karty na příkaz 0 zobrazuje obrázek 49. Pokud je hodnota pole „Stav“ v odpovědi rovna 0, pak převodníková pracuje správně. Tímto způsobem lze jednoduše vracet různé chybové příznaky.

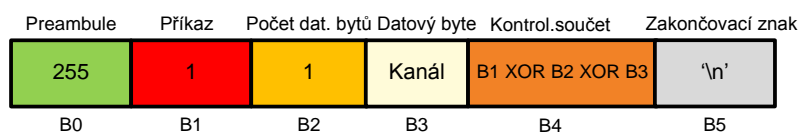


Obrázek 50: Význam jednotlivých bitů v odpovědi převodníkové karty na příkaz 0 (byte „Stav“)

Obrázek 50 zobrazuje význam jednotlivých bitů v odpovědi převodníkové karty na příkaz 0. Bity 0-3 jsou bity, kterými lze zjistit stav komunikace po rozhraní UART a bity 4-7 udávají stav jednotlivých kanálů převodníkové karty.

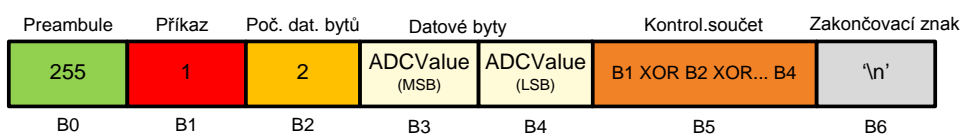
6.1.5.2 Příkaz 1

Příkaz číslo 1 slouží pro zjištění hodnoty vyčítané z A/Č převodníku na daném kanálu.



Obrázek 51: Formát rámce požadavku pro příkaz 1 po sběrnici USB

Formát rámce požadavku pro příkaz 1 zobrazuje obrázek 51. Oproti příkazu 0 je odesílán o jeden datový byte navíc. Tento datový byte slouží k identifikaci kanálu, resp. A/Č převodníku, ze kterého je požadována hodnota. Číslo smí nabývat hodnoty 0 až 15. Kontrolní součet je nyní počítán z bytů B1 až B3 a operace XOR.

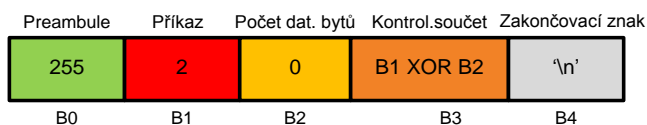


Obrázek 52: Rámec s odpovědí převodníkové karty na příkaz 1

Obrázek 52 zachycuje odpověď převodníkové karty na příkaz 1. V odpovědi jsou dva datové byty, které odpovídají číslu získanému z A/Č převodníku AD7685. První je odeslán byty s vyšší vahou (MSB) a následně je odeslán byte s nižší vahou (LSB). Pomocí vztahu (21) lze zjistit měřené napětí na daném kanálu. Kontrolní součet je počítán z bytů B1 až B4, jak je naznačuje obrázek 52.

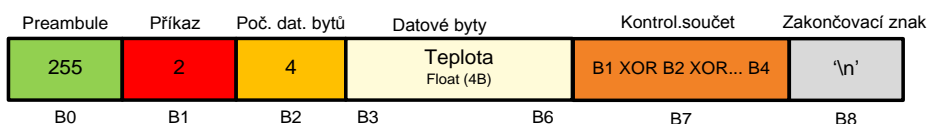
6.1.5.3 Příkaz 2

Příkaz číslo 2 slouží pro načtení teploty, která je měřena přímo na převodníkové kartě pomocí obvodu DS7505.



Obrázek 53: Formát rámce požadavku pro příkaz 2 po sběrnici USB

Obrázek 53 ukazuje formát rámce požadavku, který je odeslán do převodníkové karty. Délka rámce je shodná s příkazem 0 (5 B), pouze je jiná hodnota bytu s příkazem a tím pádem i jiná hodnota kontrolního součtu.

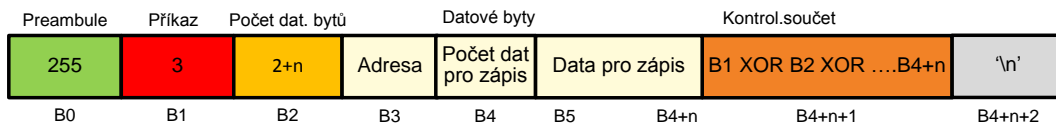


Obrázek 54: Rámec s odpovědí převodníkové karty na příkaz 2

Odpověď převodníkové karty na požadavek s příkazem číslo 2 zobrazuje obrázek 54. V odpovědi jsou čtyři datové byty, které prezentují již výslednou hodnotu teploty uloženou jako číslo s plovoucí řádovou čárkou (float). První odesílaný byte (B3) představuje byte s nejvyšší vahou (MSB) a byte B6 zase byte s nejnižší vahou (LSB). Kontrolní součet je dán operací XOR bytů B1 až B6.

6.1.5.4 Příkaz 3

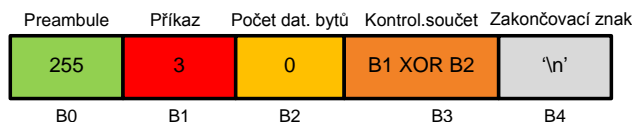
Obrázek 55 představuje korektní rámec pro příkaz 3, který slouží pro zápis dat do EEPROM na převodníkové kartě po sběrnici USB.



Obrázek 55: Formát rámce požadavku s příkazem 3 pro zápis dat do EEPROM na převodníkové kartě po sběrnici USB

Příkazu lze s výhodou využít pro změnu konfiguračních hodnot, které jsou uloženy právě v EEPROM. Minimální počet datových bytů je 3. První datový byte je vždy počáteční adresa v EEPROM, kam se má provést zápis, případně od které adresy se bude zapisovat více bytů. Následuje byte udávající počet dat, která jsou určena

pro zápis. Počet je omezen na 10B, tuto hodnotu lze jednoduše změnit pomocí konstanty v programu mikrokontroléru. Následuje kontrolní součet, který je opět počítán stejným způsobem, tedy pomocí operace XOR všech bytů od příkazu (včetně) až po poslední datový byte. Zakončovací znak má stále stejnou hodnotu, tedy 10 (znak '\n').

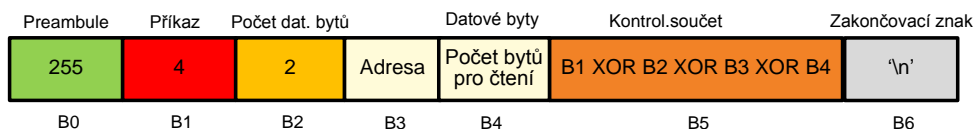


Obrázek 56: Rámec s odpovědí převodníkové karty na příkaz 3

Odpověď na úspěšně provedený zápis do EEPROM pomocí příkazu číslo 3 je rámec, který neobsahuje žádné datové byty (viz obrázek 56) a slouží jen jako potvrzení.

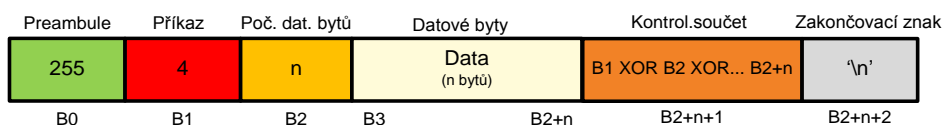
6.1.5.5 Příkaz 4

Poslední podporovaný příkaz pro převodníkovou kartu zobrazuje obrázek 57 a jedná se o požadavek čtení bytů z EEPROM umístěné na převodníkové kartě.



Obrázek 57: Formát rámce požadavku s příkazem 4 pro čtení dat z EEPROM na převodníkové kartě po sběrnici USB

Maximální počet čtených bytů opět omezen na 10. Za číslem příkazu (příkaz číslo 4) v rámci požadavku následuje počet datových bytů, který je roven dvěma. První datový byte obsahuje počáteční adresu, ze které se mají číst data z EEPROM, a následuje počet bytů, které se mají číst.



Obrázek 58: Rámec s odpovědí převodníkové karty na příkaz 4

Obrázek 58 zachycuje rámec s odpovědí převodníkové karty na příkaz číslo 4. Tentokrát karta vrací obecně n datových bytů přečtených z EEPROM, kde n je maximálně 10. Postupně jsou odesílány jednotlivé byty od adresy zadané v požadavku, tedy v bytu B3 rámce odpovědi budou data načtená z adresy EEPROM uvedené v rámci požadavku v bytu B3, následovat budou data z adresy, která je rovna inkrementované hodnotě bytu B3 atd. Kontrolní součet je počítán z bytu B1 až posledního datového bytu B2+n.

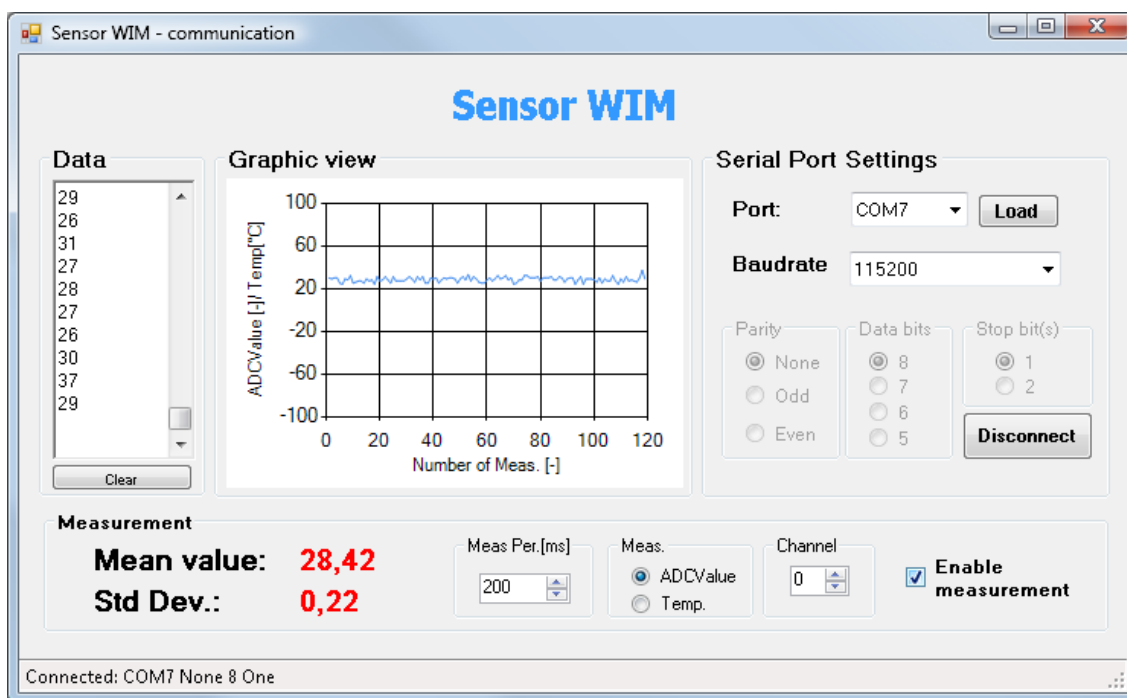
6.2 Program pro vyčítání měřených hodnot

Z důvodu potřeby vyhodnocovat měřenou hodnotu z převodníkové karty a případně potřeby vykreslovat jednotlivé změřené hodnoty v grafu, vznikl program pro PC, napsaný v jazyce C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008 [SW4].

Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole 6.1, převodníková karta vždy po změření velikosti vygenerovaného pulzu z fotodiody pomocí A/Č převodníku, uloží hodnotu v datové struktuře paměti mikrokontroléru a v případě přijetí rámce po sběrnici USB s příkazem 1, pak odešle zjištěnou hodnotu na sběrnici USB. Ze sběrnice USB je hodnota vyčítána pomocí realizovaného programu s názvem „Sensor WIM - communication“.

Po připojení převodníkové karty pomocí USB kabelu k PC se automaticky nainstalují ovladače potřebné pro komunikaci a v PC se objeví nový „virtuální“ sériový port, pomocí kterého probíhá komunikace s kartou. Hlavní okno programu zachycuje Obrázek 59. obrázek 59

V pravé části okna jsou prvky pro konfiguraci komunikace. Program umožňuje automatické načtení dostupných sériových portů pro všechny PC s operačními systémy Microsoft Windows. Po připojení převodníkové karty a zmáčknutí tlačítka „Load“ v části „Serial Port Settings“, se zobrazí dostupné sériové porty včetně sériového portu pro komunikaci s převodníkovou kartou. Po vybrání příslušného sériového portu uživatel dále vybere odpovídající rychlost komunikace, kdy převodníková karta má pro testovací účely nastavenou výchozí komunikační rychlost 115 200 b/s. Parita, počet datových bitů a stop bitů není potřeba měnit, tedy platí nastavení 8 datových bitů, žádný paritní bit a jeden stop bit. Po nastavení konfigurace je povoleno tlačítka „Connect“ pro připojení k sériovému portu. V levé části programu označené jako „Data“ je okno, ve kterém se vypisují veškerá přijatá data (změřené hodnoty) a program automaticky posunuje výpis pro zobrazení poslední přijaté hodnoty. Pomocí tlačítka „Clear“ lze vymazat všechny dosavadní změřené hodnoty výpisu, čímž dojde také ke smazání křivky v grafu, který je umístěn v prostřední části programu a vykresluje průběh změřených hodnot. Poslední a důležitá část se nachází ve spodní části programu a nese označení „Measurement“. Tato část, jak již název napovídá, je určena pro vyhodnocování velikosti měřených hodnot, kdy se počítá průměrná hodnota („Mean value“) a směrodatná odchylka (Std. Dev), pomocí které lze přiblížit, jak jsou si jednotlivé hodnoty blízké. Měření je po startu programu zakázáno a lze jej spustit po připojení k sériovému portu zatržením „Enable measurement“, kdy program dopočítá i z předchozích hodnot průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku a zobrazí ji červeně. Pokud je požadováno vymazání měření, opět se využije tlačítka „Clear“.



Obrázek 59: Zobrazení funkčnosti programu "Sensor WIM - communication"

Obrázek 59 zobrazuje, jak program pro komunikaci s převodníkovou kartou vykresluje data a také počítá průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku. Program byl testován s převodníkovou kartou, kdy nebyla připojena optická trasa, a tak jsou vyčítány jen hodnoty odpovídající šumu na A/Č převodníku AD7685.

V části „Measurement“ lze měnit periodu měření resp. periodu, s jakou jsou odesílány požadavky převodníkové kartě. Interval lze volit v rozsahu 100 ms až 2 s. Pokud si uživatel zvolí měření hodnoty z A/Č převodníku, je mu povolena část s výběrem kanálu, ze kterého požaduje číst data. Převodníková karta je osazena celkem 16-ti A/Č převodníky, tedy je možno zvolit hodnotu 0 až 15. Program uživateli umožňuje také periodicky měřit a zaznamenávat teplotu na převodníkové kartě. Pokud uživatel vybere v části „Meas.“ teplotu pomocí přepínače s označením „Temp.“, jsou veškeré dosavadní hodnoty smazány, je smazán i graf a pokud je povoleno měření, ihned jsou vykreslovány nové hodnoty s informací o teplotě. Podobně pokud je měřena teplota a uživatel přepne na měření hodnoty z A/Č převodníku, jsou data opět smazána.

7 ZÁVĚR

Během řešení diplomové práce bylo navrženo zapojení pro převodníkovou kartu určenou pro ovládání laserové diody s označením QSDM 1300-1. Zapojení je rozděleno do několika částí (digitální, analogová, napájecí a výkonová část), kdy každá z těchto částí je detailně popsána v kapitole 3 - Popis zapojení a funkce karty.

Pro ověření funkčnosti jednotlivých částí byl vytvořen program pro řídicí mikrokontrolér LM3S2276 ve vývojovém prostředí IAR for ARM [SW5].

V kapitole 4 - Ověření problémových částí převodníkové karty jsou zobrazeny výsledky testování důležitých měřicích a řídicích částí zapojení převodníkové karty, konkrétně spínání laserové diody a vyhodnocování velikosti proudových pulzů generovaných fotodiodou. V době testování nebyla k dispozici reálná optická soustava s laserovou diodou QSDM 1300-1 a příslušnou fotodiodou. Z toho důvodu probíhalo testování funkce na převodníkové karty na laserové diodě QSDM 1300-5, která má fotodiodu přímo vestavěnou v pouzdře. Měření zobrazená v kapitole 4 jsou získány při zapojení integrované fotodiody, kterou ozařuje přímo vysílací laserová dioda (bez optické trasy).

V kapitole 5 - Popis desky plošného spoje převodníkové karty jsou stručně popsány jednotlivé vrstvy vytvořené desky plošného spoje. Jedná se o čtyřvrstvou desku plošného spoje, jejíž podklady jsou zobrazeny v příloze C. 1. až C. 4.

Poslední kapitola 6 - Programové vybavení pomocí vývojových diagramů popisuje funkce, kterými byly ověřovány jednotlivé části převodníkové karty nejenom pro řízení laserové diody. Pro ověření nejdůležitější části převodníkové karty slouží popsána funkce „ADCGetValue(Channel)“ (viz obrázek 42), pomocí které je vygenerován pulz laserovou diodou a současně je změřena velikost odpovídajícího proudového pulzu vygenerovaného měřicí fotodiodou. Pro testování dalších modulů na kartě jsou měřené hodnoty odpovídající optickému signálu generované laserovou diodou ukládány do struktury v mikrokontroléru a je možné je na požadavek odesílat na sběrnici USB, případně sběrnici CAN (aktuálně je funkce odeslání na sběrnici CAN je v přiložených programech „zakomentována“, protože je nutno mít na sběrnici CAN připojenu odpovídající protistranu se zakončovacím rezistor o velikosti 120 Ω). Funkce obsahovala i testování odeslání dat na sběrnici a musela být po otestování odstraněna z hlavní funkce, aby nedocházelo k uvíznutí běhu programu mikrokontroléru.

V rámci mé diplomové práce se tak podařilo navrhnout, realizovat a ověřit funkčnost převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody, včetně programového vybavení pro řídicí mikrokontrolér a osobní počítač. Byly verifikovány jednotlivé programové rutiny a moduly a realizovaná karta je připravena pro měření s optickými vláknovými senzory.

Bibliografie

- [1] **Lukáš, Michal.** Laserové diody: Princip laserových diod. *Elektrorevue: Časopis pro elektrotechniku*. [Online] 2001. [Citace: 13. 12 2011.] <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html>. 1213-1539.
- [2] **Ivan, Pelant.** *Fyzikální praktikum III.: Optika*. Praha : Matfyzpress, 2005. str. 274. 8086732673.
- [3] **Paschotta, Rüdiger.** RP-Photonics: Photodiodes. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. [Online] 2011. [Citace: 14. 12 2011.] <http://www.rp-photonics.com/photodiodes.html>.
- [4] **Boušek, Jaroslav.** *Optoelektronické součástky*. [Online] 2005. [Citace: 10. 2 2012.] 15 s. <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/eso/prvky8x.pdf>.
- [5] **Hanáček, F., a další.** Vláknově optické senzory - hudba budoucnosti. *Automatizace*. [Online] 52, 10, 2009. [Citace: 14. 12 2011.] <http://www.automatizace.cz/article.php?a=2624>.
- [6] **LM3S2276.** Datasheet. *Stellaris LM3S2276 Microcontroller*. [Online] 2011. [Citace: 8. 9 2011.] 776 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3s2276.pdf>.
- [7] **AKABANE, Kazuma.** Boost converter switches between battery an USB Power. *Analog, linear, and mixed-signal devices from Maxim*. [Online] 16. Zář 2009. [Citace: 16. Zář 2011.] <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN4445.pdf>.
- [8] **MAX1792.** Datasheet. *500mA Low-Dropout Linear Regulator in μ -MAX*. [Online] 2008. [Citace: 3. 9 2011.] 11 s. <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/maxim/MAX1792.pdf>.
- [9] **DS7505.** Datasheet. *Digital Thermometer and Thermostat*. [Online] 2008. [Citace: 29. 9 2011.] 14 s. <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS7505.pdf>.
- [10] **24AA02/24LC02B.** Datasheet. *2K I2C Serial EEPROM*. [Online] 2003. [Citace: 8. 9 2011.] 24 s. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21709c.pdf>.
- [11] **CD74HC154M.** Datasheet. *High-Speed CMOS Logic 4- to 16-Line Decoder/Demultiplexer*. [Online] 2004. [Citace: 8. 12 2011.] 16 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc154.pdf>.
- [12] **AD7685.** Datasheet. *16-Bit, 250kSPS PulSAR ADC in MSOP/QFN*. [Online] 2007. [Citace: 17. 11 2011.] 28 s. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7685.pdf.
- [13] **2DD2661.** Datasheet. *Low VCE(SAT) NPN Surface Mount Transistor*. [Online] 2008. [Citace: 3. 12 2011.] 4 s. <http://www.diodes.com/datasheets/ds31635.pdf>.
- [14] **BSS138N.** Datasheet. *SIPMOS Small-Signal-Transistor*. [Online] 2006. [Citace: 13. 10 2011.] 9 s. http://www.infineon.com/dgdl/BSS138N_Rev2.3.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b42f0f324aeb.
- [15] **Bielecki, Zbigniew a Chmielewski, Krzysztof.** *Application of avalanche effect in transistors for schaping of the pulse driving diode laser*. [Online] 1996. [Citace: 26. 9 2011.] s. 58-61. <http://www.wat.edu.pl/review/optor/1996/1/4%281,2%2958.pdf>.
- [16] **TS5A1066.** Datasheet. *10- Ω SPST ANALOG SWITCH*. [Online] 2006. [Citace: 7. 10 2011.] 28 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ts5a1066.pdf>.

- [17] **LM4041.** Datasheet. *PRECISION MICROPOWER SHUNT VOLTAGE REFERENCE.* [Online] 2006. [Citace: 29. 11 2011.] 23 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4041c.pdf>.
- [18] **LM5111.** Datasheet. *Dual 5A Compound Gate Driver.* [Online] 2011. [Citace: 9. 12 2011.] 12 s. <http://www.national.com/ds/LM/LM5111.pdf>.
- [19] **FT232R.** Datasheet. *FT232R USB UART IC.* [Online] 2010. [Citace: 2. 10 2011.] 43 s. http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf.
- [20] **LM2991.** Datasheet. *Negative Low Dropout Adjustable Regulator.* [Online] 2011. [Citace: 7. 12 2011.] 14 s. <http://www.national.com/ds/LM/LM2991.pdf>.
- [21] **LMH6624/LMH6626.** Datasheet. *Single/Dual Ultra Low Noise Wideband Operational Amplifier.* [Online] 2005. [Citace: 29. 11 2011.] 19 s. <http://www.national.com/ds/LM/LMH6624.pdf>.
- [22] **MCP4902/4912/4922.** Datasheet. *8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter with SPI Interface.* [Online] 2010. [Citace: 27. 11 2011.] 48 s. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22250A.pdf>.
- [23] **PCF8574.** Datasheet. *Remote 8-bit I/O Expander for I2C Bus.* [Online] 2008. [Citace: 2. 9 2011.] 27 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf>.
- [24] **PCF8575.** Datasheet. *Remote 16-bit I2C and SMBus I/O Expander with interrupt output.* [Online] 2007. [Citace: 2. 9 2011.] 32 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8575.pdf>.
- [25] **SN65HVD233-HT.** Datasheet. *3.3-V CAN TRANSCEIVER.* [Online] 2010. [Citace: 7. 9 2011.] 32 s. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd233-ht.pdf>.
- [26] **TCMT4600.** Datasheet. *Optocoupler, Phototransistor Output.* [Online] 2011. [Citace: 17. 9 2011.] 8 s. <http://www.vishay.com/docs/83512/tcmt1600.pdf>.
- [27] **1N5231B.** Datasheet. *Small Signal Zener Diodes.* [Online] 2011. [Citace: 25. 10 2011.] 6 s. <http://www.vishay.com/docs/85588/1n5221b.pdf>.

Seznam použitých zkratk

LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light Emitting Diode
VOS	Vláknově optické senzory
LDO	Low-dropout regulator
OZ	Operační zesilovač
EMI	Electromagnetic Interference
A/Č	Analogově / Číslicový
Č/A	Číslicově / Analogový
CAN	Controller Area Network
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal asynchronous receiver / transmitter
IIC (I ² C)	Inter-Integrated Circuit
USB	Universal Serial Bus
JTAG	Join Test Action Group
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
RAM	Random Access Memory

Použitý software

[SW1]	OrCAD Capture CIS v.16.3
[SW2]	OrCAD PCB Designer with PSpice v.16.3
[SW3]	Allegro Pad Designer 16.3
[SW4]	Microsoft Visual Studio 2008 Professional Edition v.9.0
[SW5]	IAR Embedded Workbench for ARM v.6.21
[SW6]	Microsoft Office Visio 2007 v.12.0
[SW7]	Mentor Graphics IPC-7351 LP Viewer 10.2
[SW8]	RealTerm 2.0.0.45

Seznam adresářů na přiloženém CD

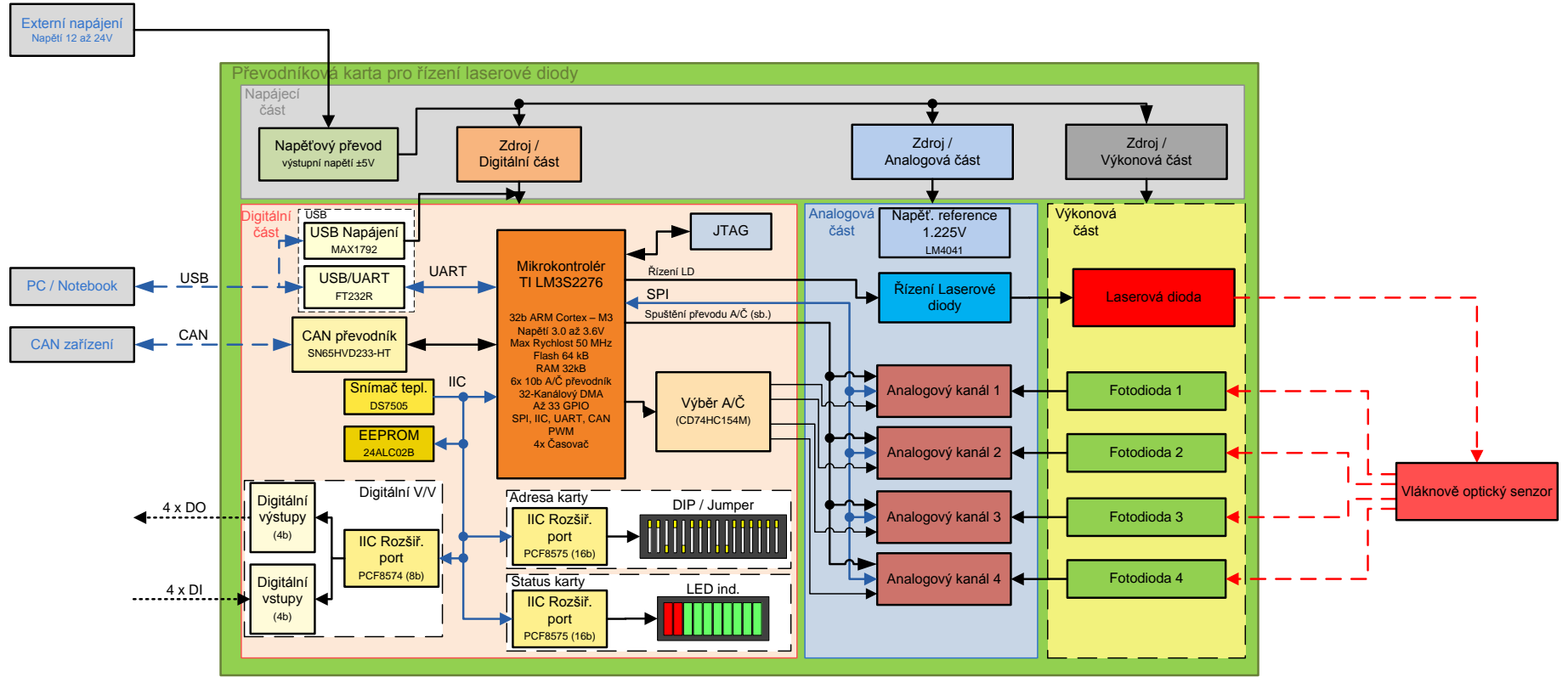
\Blokove_schema\	Blokové schémata částí převodníkové karty v [SW6]
\DPS\	
\DPS_3D_model\	3D model převodníkové karty vygenerovaný v [SW2]
\DPS_export\	Podklady k převodníkové kartě vygenerované ze [SW1] a [SW2] do souboru *.pdf pro náhled
\DPS_foto\	Fotografie vyhotovené převodníkové karty pro přesné řízení laserové diody
\DPS_material\	Seznam součástek pro převodníkovou kartu vygenerovaný programem [SW1]
\DPS_projekt\	Projekt s návrhem převodníkové karty v programech [SW1] a [SW2].
\DPS_Vyroba\	Výrobní podklady pro převodníkovou kartu ve formátu GERBER RS274-X
\Vyvojove_diagramy\	Vývojové diagramy popisující programové vybavení řídicího mikrokontroléru v programu [SW6]
\Zdrojove_kody\	
\Mikrokontroler\	Programové vybavení řídicího mikrokontroléru vytvořené v programu [SW5]
\PC\	Software pro komunikaci s převodníkovou kartou po sběrnici USB vytvořený v programu [SW4]
\DP_xcozik00.pdf	Diplomová práce (tento dokument)

Seznam příloh

- A. Blokové schéma
 - A. 1. Blokové schéma převodníkové karty
- B. Schéma zapojení
 - B. 1. Napájecí část převodníkové karty
 - B. 2. Část pro přesné řízení laserové diody
 - B. 3. Kompletní převodníková karta
 - B. 4. Analogový kanál
- C. Deska plošného spoje
 - C. 1. Vrchní strana (TOP)
 - C. 2. Vnitřní vrstva 1 (analogová zem GND_A)
 - C. 3. Vnitřní vrstva 2 (napájení analogové části)
 - C. 4. Spodní vrstva (BOTTOM) - zrcadlené
- D. Rozmístění součástek na desce plošného spoje
 - D. 1. Vrchní strana (TOP)
 - D. 2. Spodní strana (BOTTOM) - zrcadlená
- E. Seznam použitých součástek
- F. 3D model navržené převodníkové karty
 - F. 1. 3D model – pohled vrchní stranu (TOP)
 - F. 2. 3D model – pohled na spodní stranu (BOTTOM)
- G. Fotografie navržené převodníkové karty
 - G. 1. Vrchní strana (TOP)
 - G. 2. Spodní strana (BOTTOM)
- H. Vývojové diagramy
 - H. 1. Stavový automat pro příjem rámce přes rozhraní UART

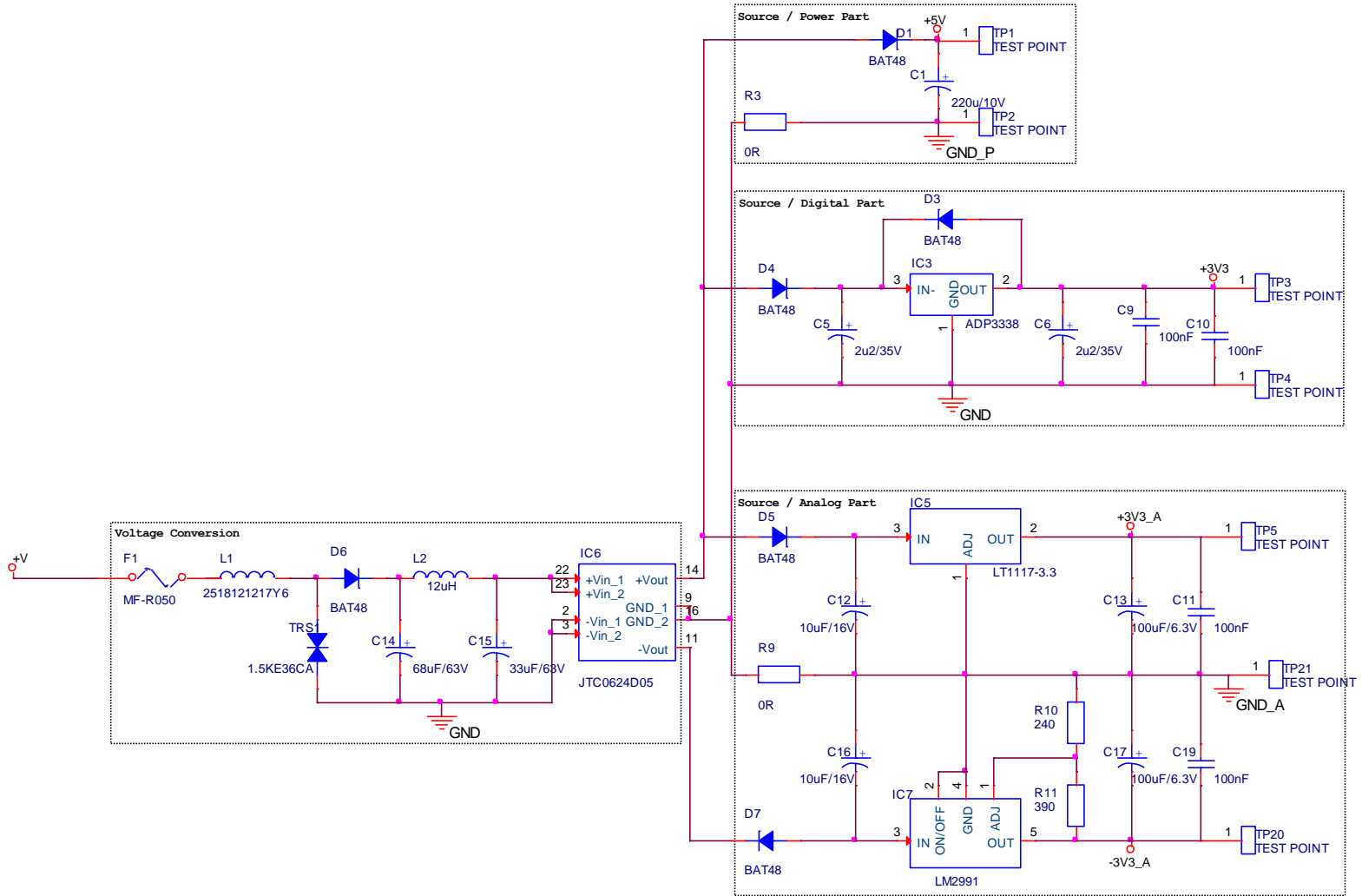
A. Blokové schéma

A. 1. Blokové schéma převodníkové karty

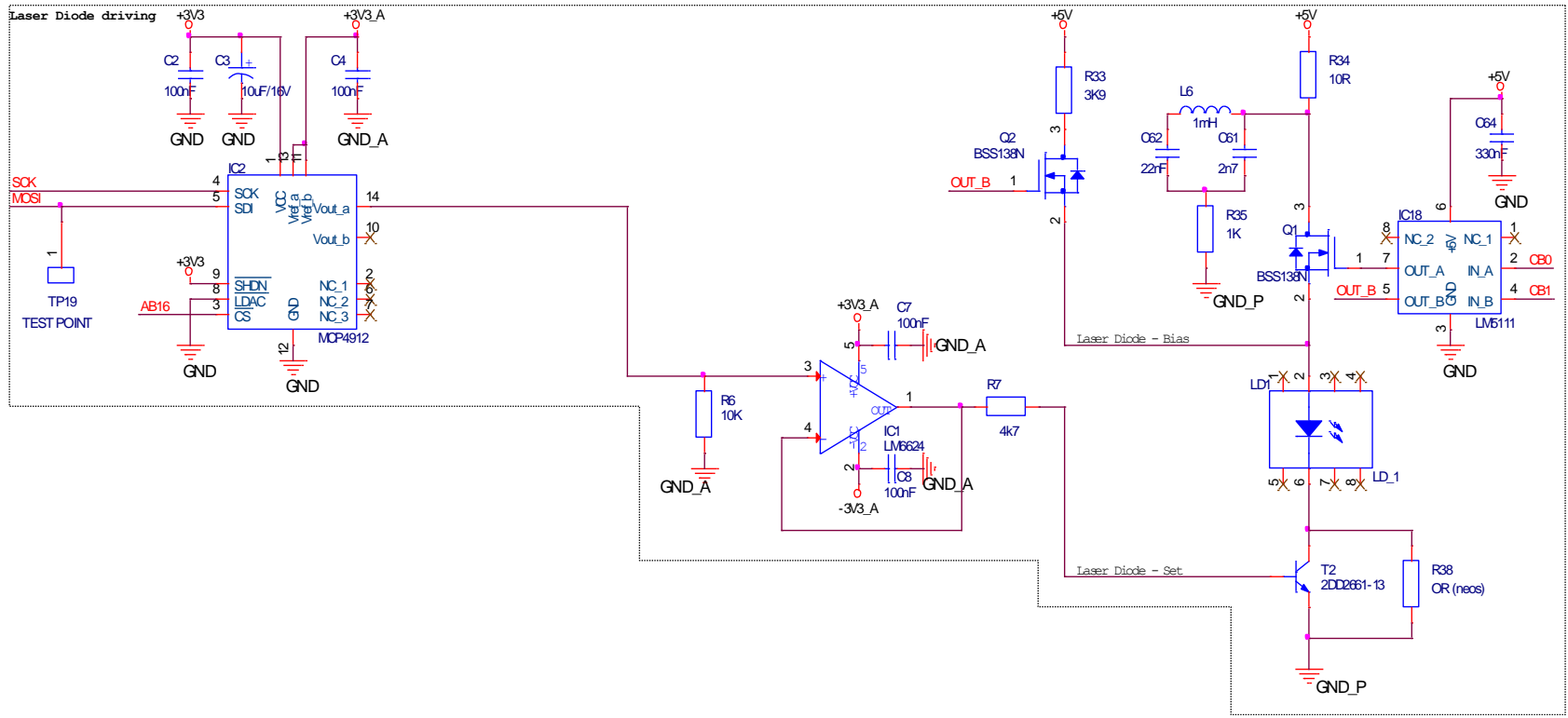


B. Schéma zapojení

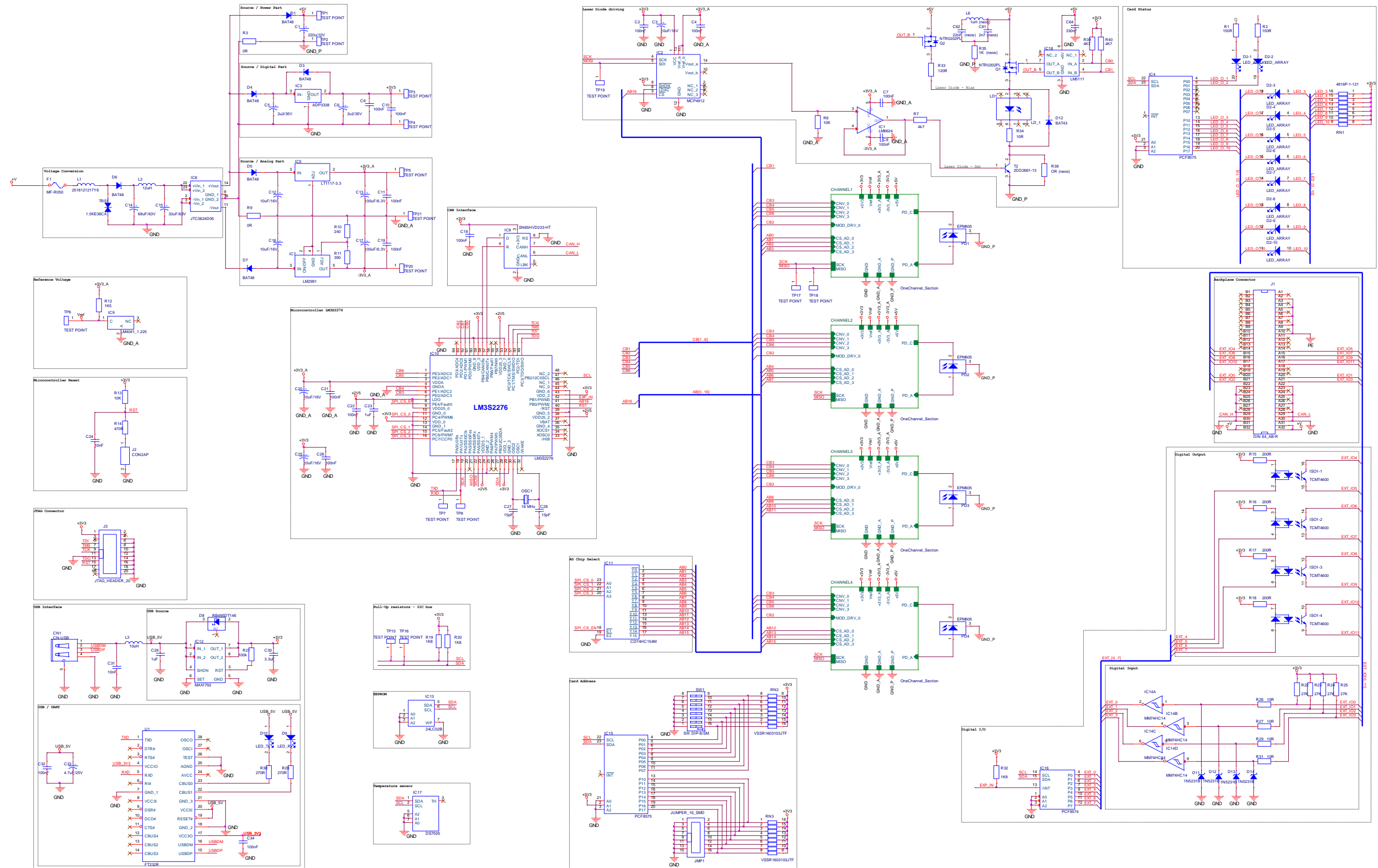
B. 1. Napájecí část převodníkové karty



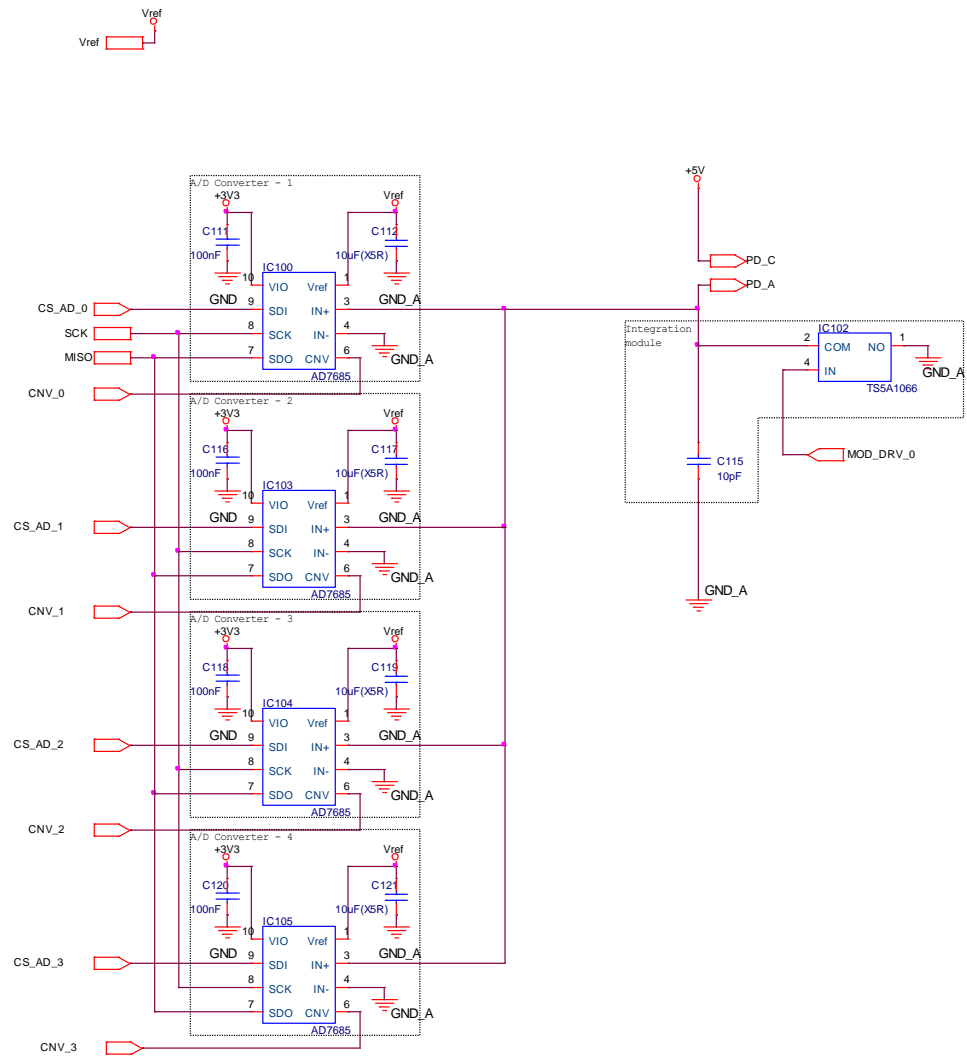
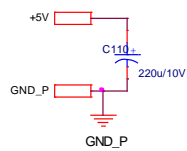
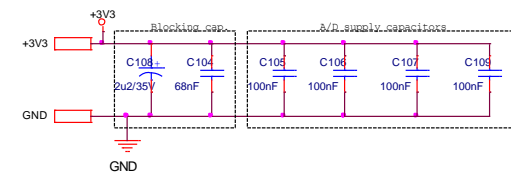
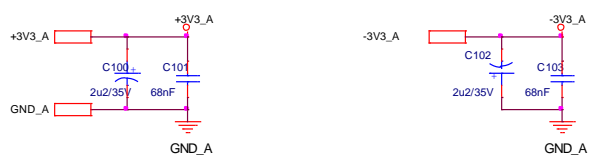
B. 2. Část pro přesné řízení laserové diody



B. 3. Kompletní převodníková karta

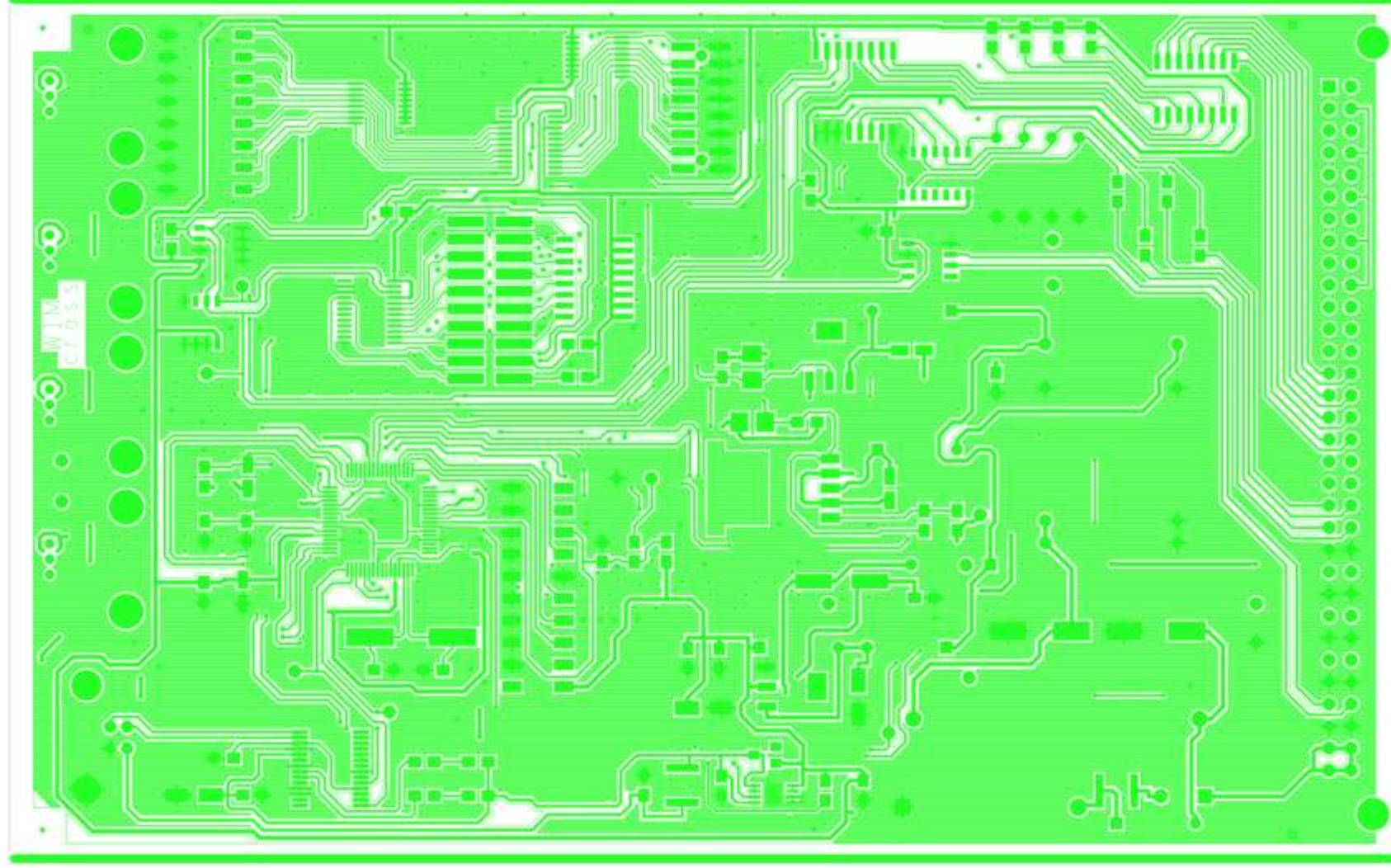


B. 4. Analogový kanál

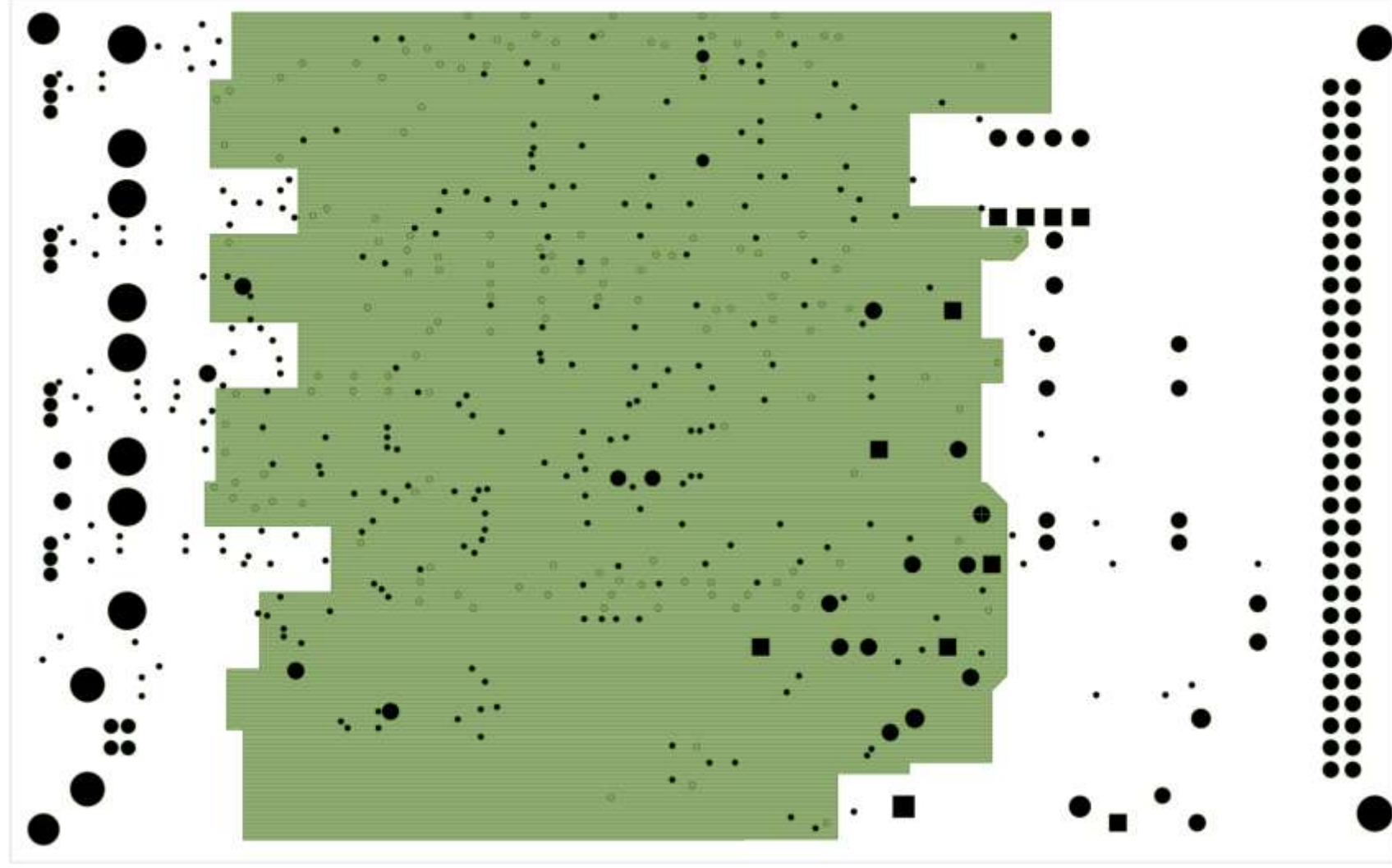


C. Deska plošného spoje

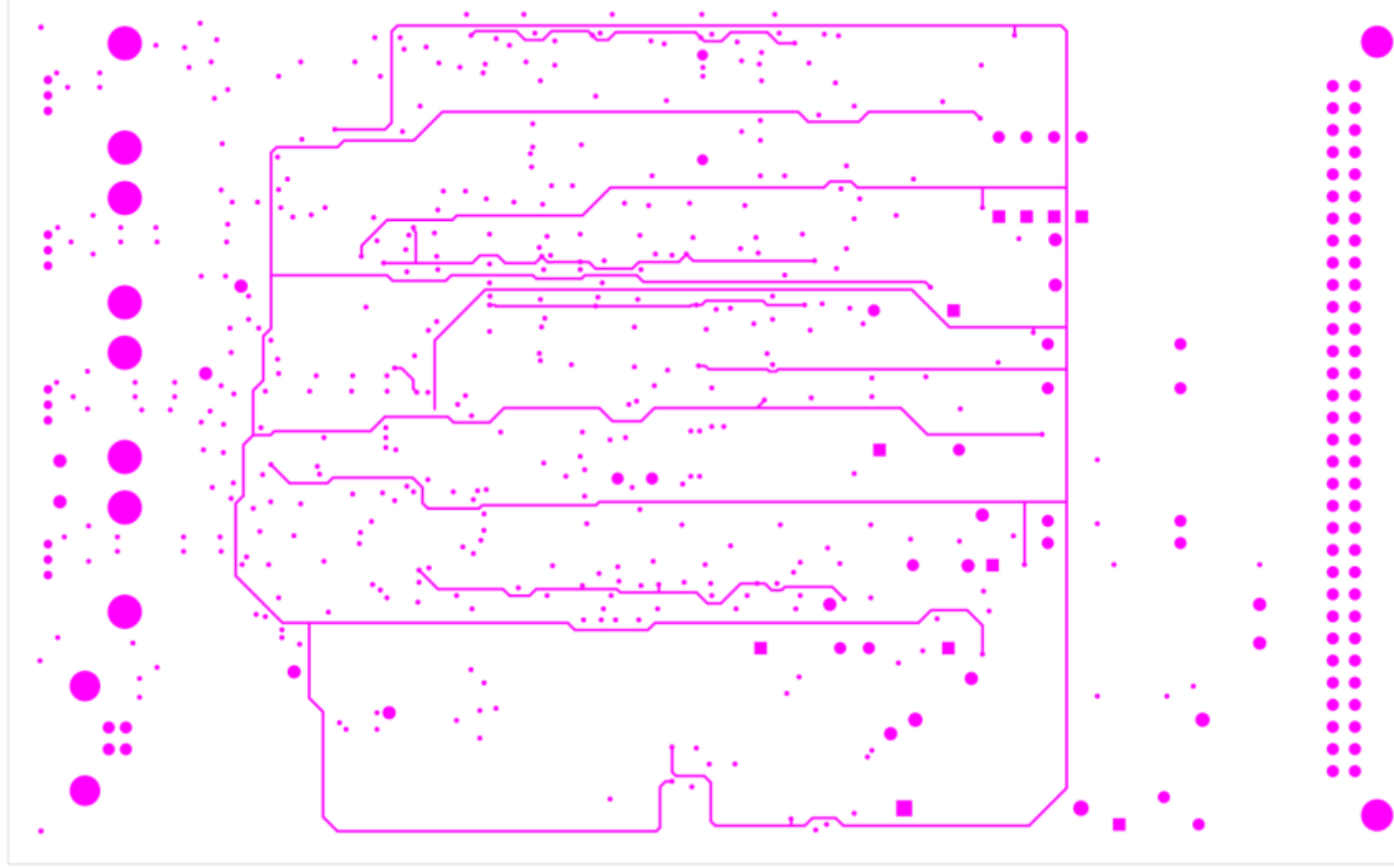
C. 1. Vreční strana (TOP)



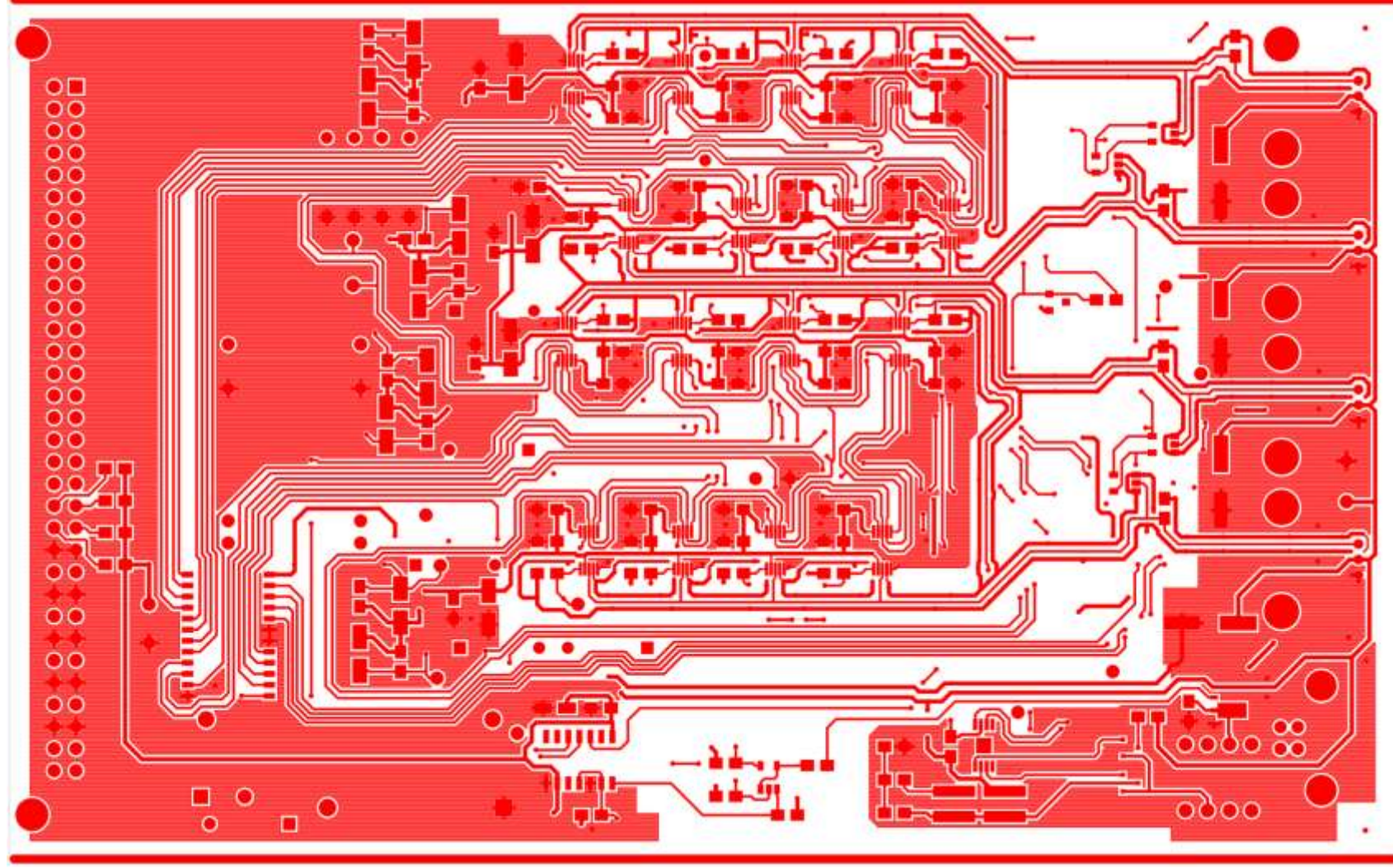
C. 2. Vnitřní vrstva 1 (analogová zem GND_A)



C. 3. Vnitřní vrstva 2 (napájení analogové části)

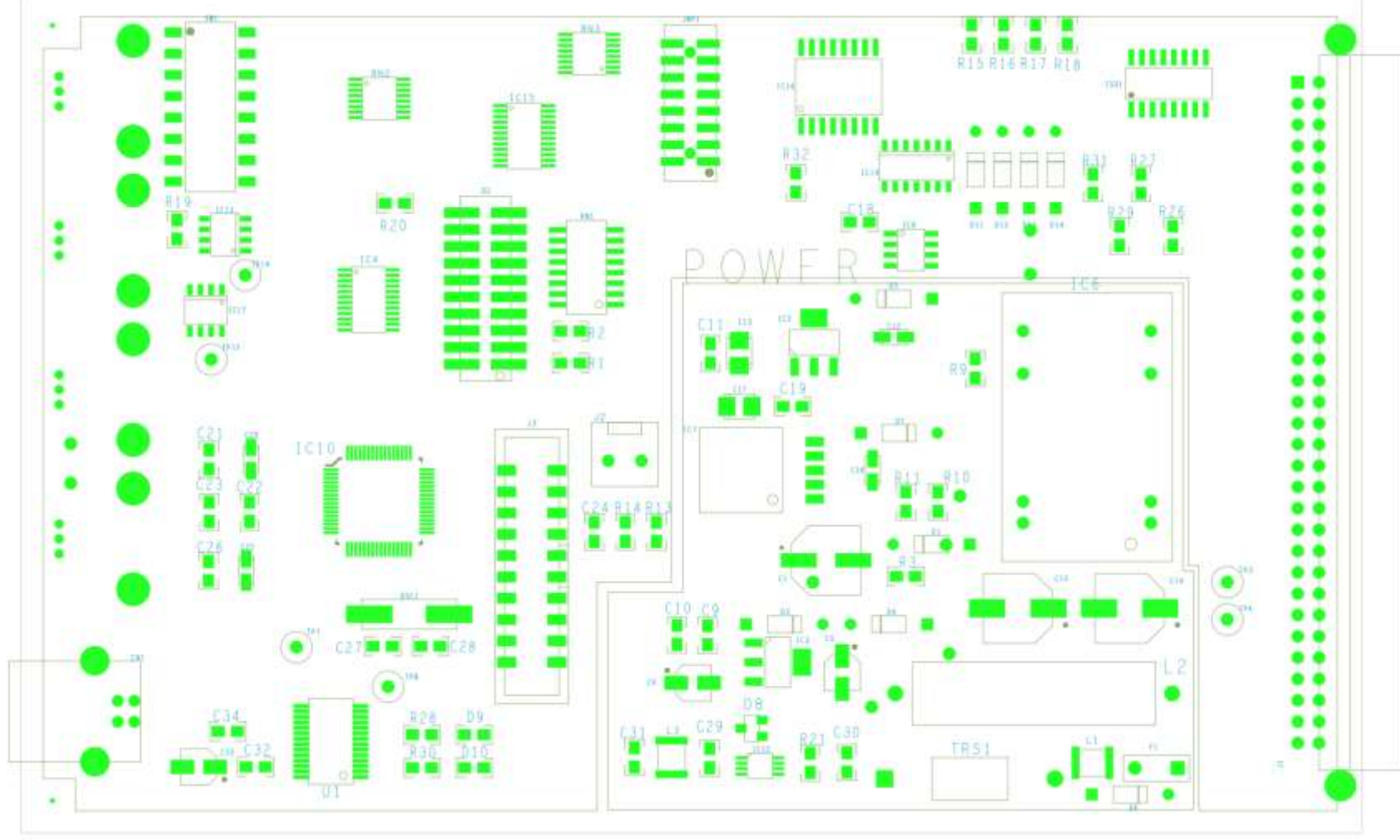


C. 4. Spodní vrstva (BOTTOM) - zrcadlené

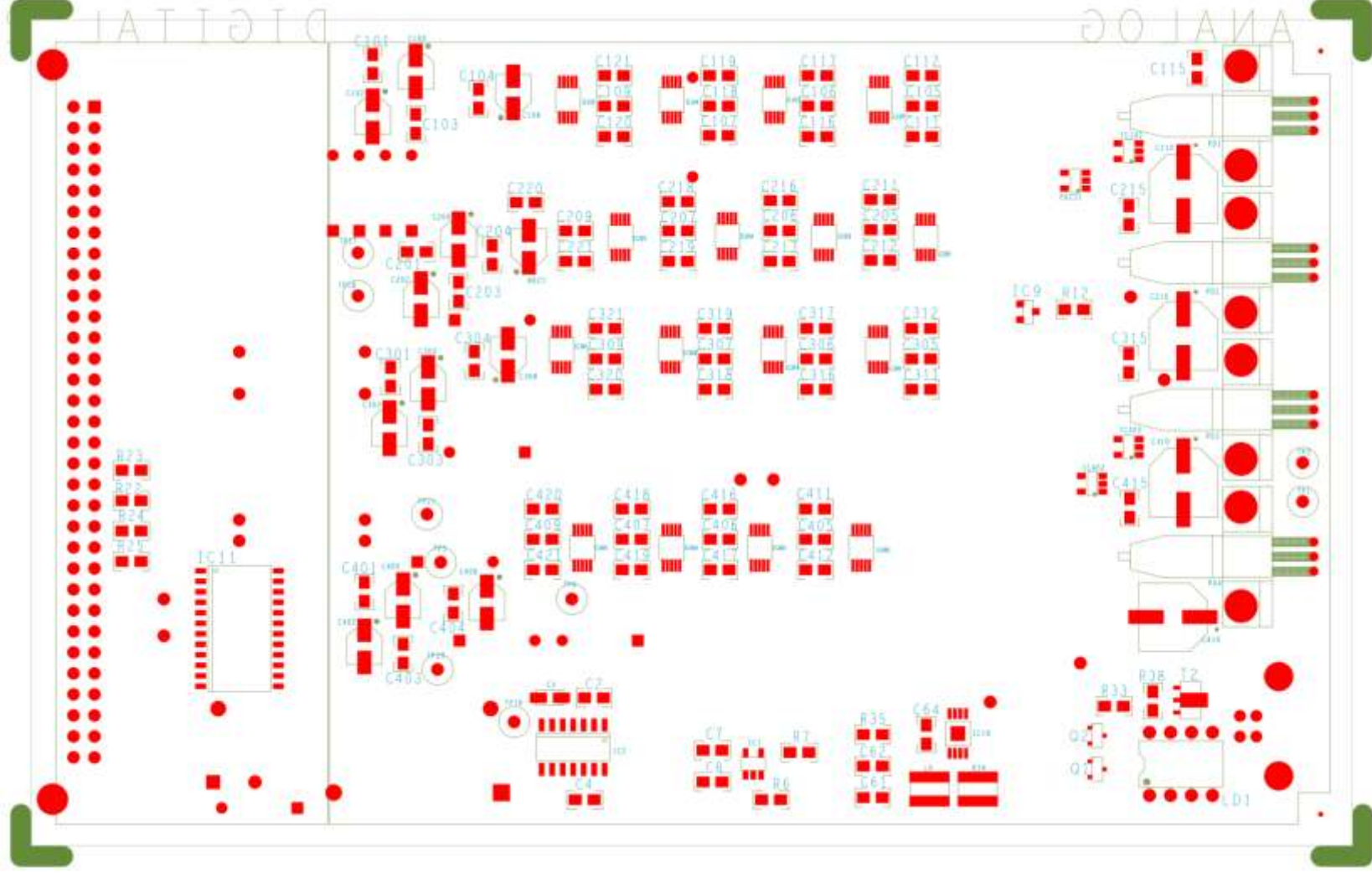


D. Rozmístění součástek na desce plošného spoje

D. 1. Vrchní strana (TOP)



D. 2. Spodní strana (BOTTOM) - zrcadlená



E. Seznam použitých součástek

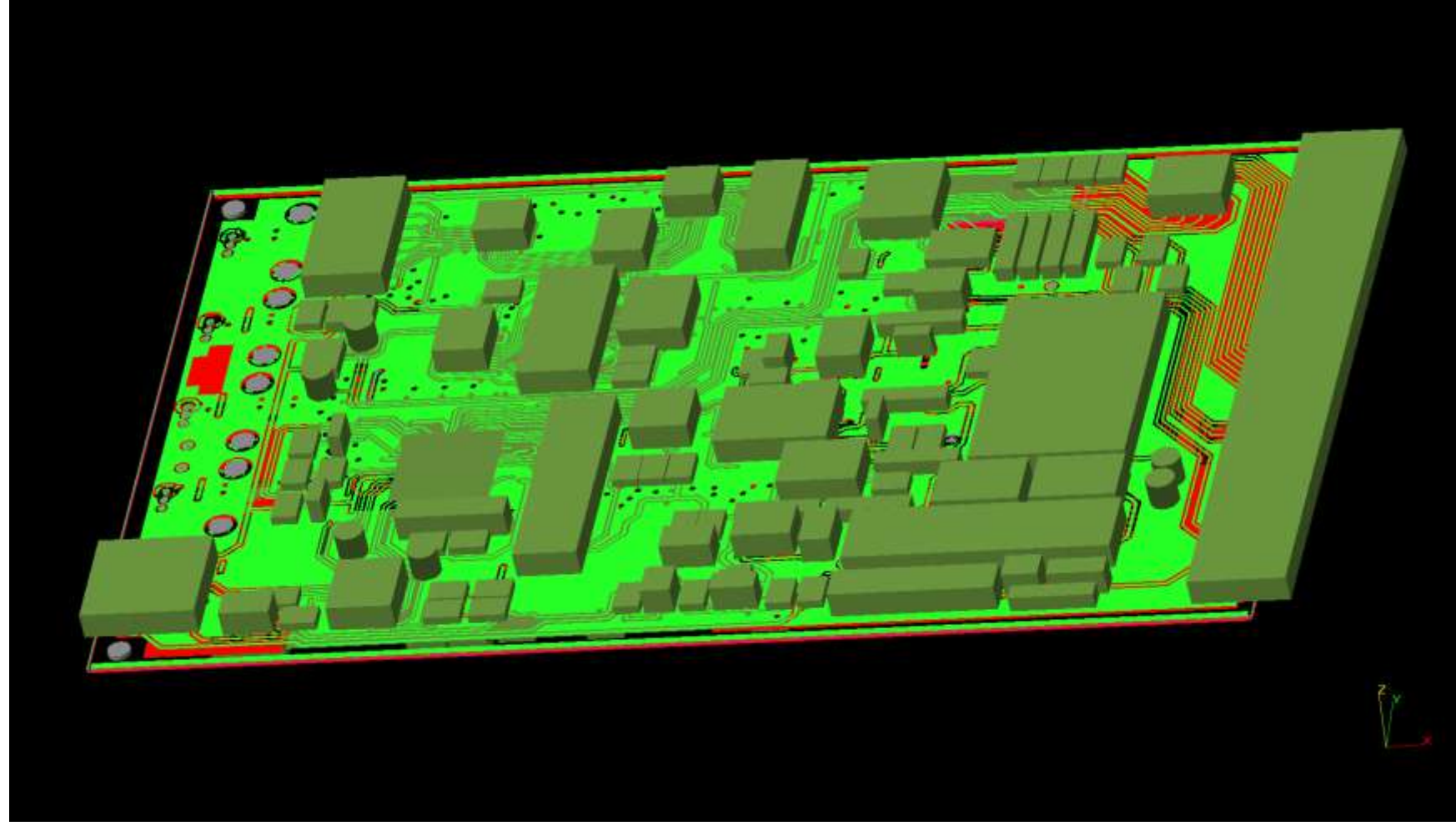
Položka	Počet	Označení	Název / Hodnota
1	1	CN1	CN-USB
2	5	C1,C110,C210,C310,C410	220u/10V
3	46	C2,C4,C7,C8,C9,C10,C11, C18,C19,C21,C22,C26,C32, C34,C105,C106,C107,C109, C111,C116,C118,C120,C205, C206,C207,C209,C211,C216, C218,C220,C305,C306,C307, C309,C311,C316,C318,C320, C405,C406,C407,C409,C411, C416,C418,C420	100nF
4	5	C3,C12,C16,C20,C25	10uF/16V
5	14	C5,C6,C100,C102,C108, C200,C202,C208,C300,C302, C308,C400,C402,C408	2u2/35V
6	2	C13,C17	100uF/6.3V
7	1	C14	68uF/63V
8	1	C15	33uF/63V
9	2	C23,C29	1uF
10	2	C24,C31	10nF
11	2	C27,C28	15pF
12	1	C30	3.3uF
13	1	C33	4.7uF/25V
14	1	C61	2n7
15	1	C62	22nF
16	1	C64	330nF
17	12	C101,C103,C104,C201,C203, C204,C301,C303,C304,C401, C403,C404	68nF
18	16	C112,C117,C119,C121,C212, C217,C219,C221,C312,C317, C319,C321,C412,C417,C419, C421	10uF(X5R)
19	4	C115,C215,C315,C415	10pF
20	6	D1,D3,D4,D5,D6,D7	BAT48
21	1	D2	LED_ARRAY
22	1	D8	RB495DT146
23	1	D9	LED_Rx
24	1	D10	LED_Tx
25	4	D11,D12,D13,D14	1N5231B
26	1	F1	MF-R050

Položka	Počet	Označení	Název / Hodnota
27	1	IC1	LM6624
28	1	IC2	MCP4912
29	1	IC3	ADP3338
30	2	IC4,IC15	PCF8575
31	1	IC5	LT1117-3.3
32	1	IC6	JTC0624D05
33	1	IC7	LM2991
34	1	IC8	SN65HVD233-HT
35	1	IC9	LM4041_1.225
36	1	IC10	LM3S2276
37	1	IC11	CD74HC154M
38	1	IC12	MAX1792
39	1	IC13	24LC02B
40	1	IC14	MM74HC14
41	1	IC16	PCF8574
42	1	IC17	DS7505
43	1	IC18	LM5111
44	16	IC100,IC103,IC104,IC105, IC200,IC203,IC204,IC205, IC300,IC303,IC304,IC305, IC400,IC403,IC404,IC405	AD7685
45	4	IC102,IC202,IC302,IC402	TS5A1066
46	1	ISO1	TCMT4600
47	1	JMP1	JUMPER_16_SMD
48	1	J1	DIN 64_AB-R
49	1	J2	CON2AP
50	1	J3	JTAG_HEADER_20
51	1	LD1	LD_1
52	1	L1	2518121217Y6
53	1	L2	12uH
54	1	L3	10uH
55	1	L6	1mH
56	1	OSC1	16 MHz
57	4	PD1,PD2,PD3,PD4	EPM605
58	2	Q1,Q2	BSS138N
59	1	RN1	4816P-1-121
60	2	RN2,RN3	VSSR1603103JTF
61	2	R1,R2	150R
62	2	R3,R9	0R
63	2	R6,R13	10K
64	1	R7	4k7
65	1	R10	240
66	1	R11	390

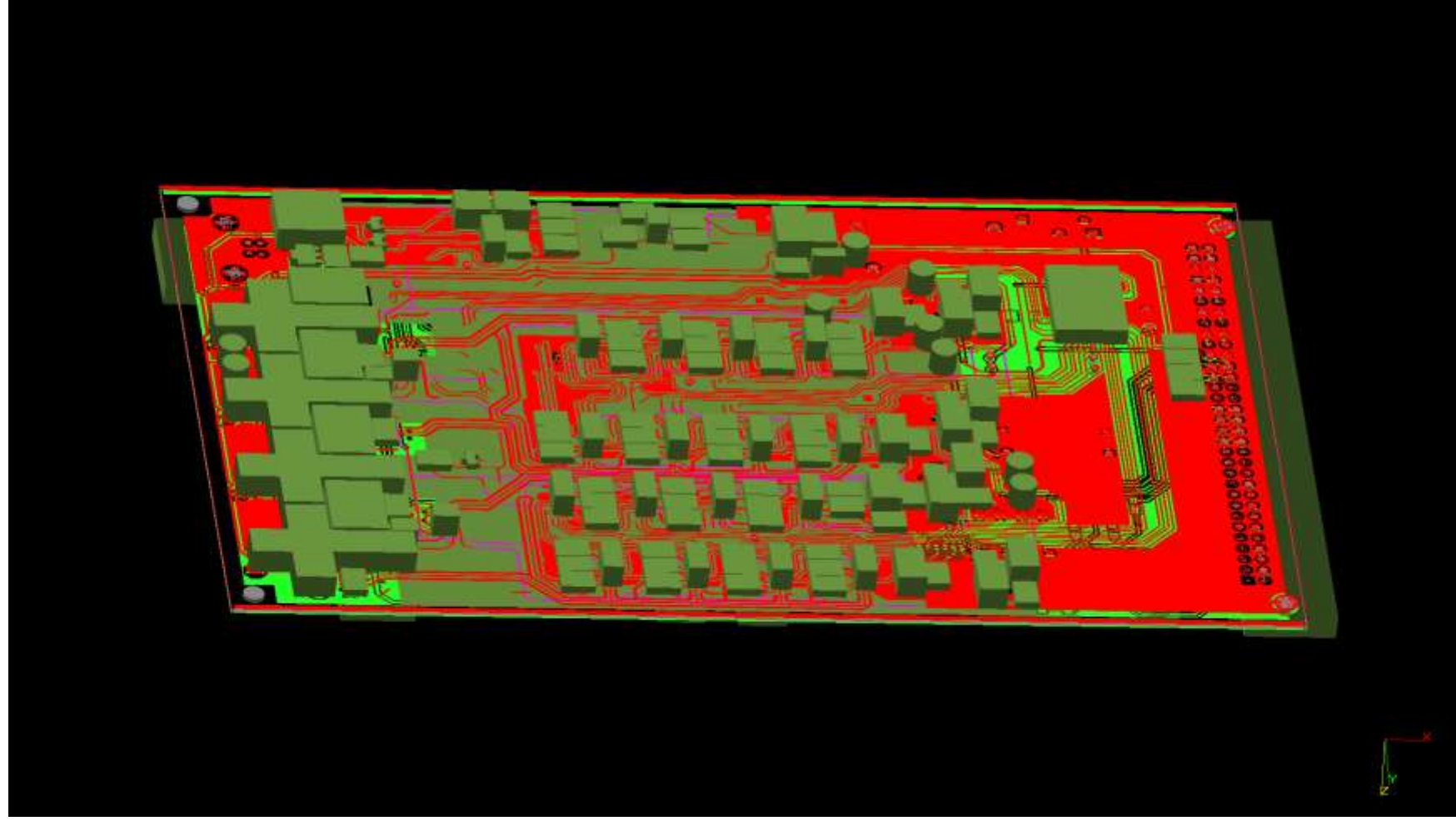
Položka	Počet	Označení	Název / Hodnota
67	1	R12	1K5
68	1	R14	470R
69	4	R15,R16,R17,R18	200R
70	3	R19,R20,R32	1K8
71	1	R21	100k
72	4	R22,R23,R24,R25	27K
73	5	R26,R27,R29,R31,R34	10R
74	2	R28,R30	270R
75	1	R33	3K9
76	1	R35	1K
77	1	R38	OR (neos)
78	1	SW1	SW DIP-8/SM
79	15	TP1,TP2,TP3,TP4,TP5,TP6, TP7,TP8,TP15,TP16,TP17, TP18,TP19,TP20,TP21	TEST POINT
80	1	TRS1	1.5KE36CA
81	1	T2	2DD2661-13
82	1	U1	FT232R

F. 3D model navržené převodníkové karty

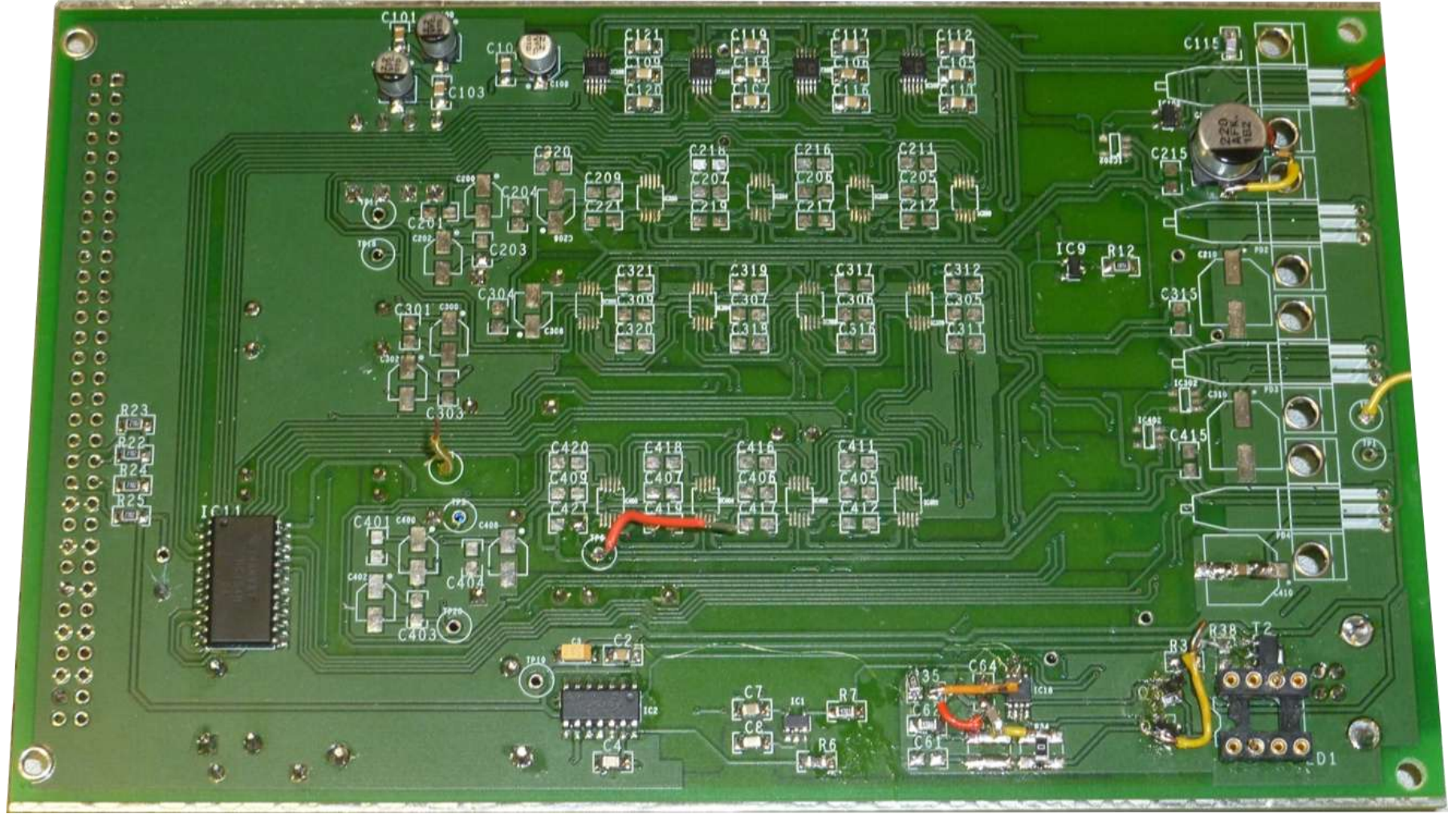
F. 1. 3D model – pohled vrchní stranu (TOP)



F. 2. 3D model – pohled na spodní stranu (BOTTOM)



G. 2. Spodní strana (BOTTOM)



H. Vývojové diagramy

H. 1. Stavový automat pro příjem rámce přes rozhraní UART

