



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## NÁVRH OPTICKÉHO PŘEVODNÍKU PRO EMC

DESIGN OF EMC OPTICAL CONVERTER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Štěpánek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Krutílek

BRNO 2016

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá návrhem optického převodníku sloužícího k přenosu signálu v rámci měření elektromagnetické kompatibility zarušeným prostředím. V úvodní části je rozebráno šíření rušivých signálů a jejich měření, zejména jsou rozebrány měřicí sondy. V následující části je popsán optický přenosový řetězec, princip šíření světla optickým vláknem, a optické modulace. Další část se zabývá návrhem elektrooptického, optoelektrického převodníku a zdrojem pro napájení prototypů. Poslední část je věnována jeho realizaci.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Optický převodník, EMC, serializer, intenzitní modulace, optické vlákno, transimpedanční zesilovač, PCM, fotodioda, A/D převodník, D/A převodník, laserová dioda.

## **ABSTRACT**

Master's thesis is focused on designing optical converter for EMC measurement transferring signal through noisy environment. First part contains analysis of electromagnetic interference and its coupling and measurement, especially types of probes for interference measurement. Next part passing through designing of optoelectric and electrooptic converter with digital intensity modulation. Last part is about realization of optical converter.

## **KEYWORDS**

Optical converter, EMC, serializer, intensity modulation, optical fibre, transimpedance amplifier, PCM, photodiode, A/D converter, D/A converter, laser diode.

ŠTĚPÁNEK, A. *Návrh optického převodníku pro EMC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 65 s., 28 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. David Krutílek.

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Návrh optického převodníku pro EMC jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu 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 tohoto semestrálního jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému pedagogickému vedoucímu Ing. Davidu Krutílkovi a odbornému konzultantovi Ing. Josefu Vočhyánovi, Ph.D a v neposlední řadě firmě Automotive Lightning s.r.o. za poskytnutí zázemí.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072  
**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA</b>	<b>2</b>
1.1	Pojem EMC.....	2
1.2	Zdroje elektromagnetického rušení .....	3
1.3	Měření úrovně elektromagnetického rušení .....	5
1.3.1	Měřič rušení .....	5
1.3.2	Umělá zátěž vedení LISN .....	5
1.3.3	Napěťová sonda .....	5
1.3.4	Proudová sonda.....	6
1.3.5	Sonda blízkého magnetického pole .....	7
1.3.6	Absorpční kleště .....	7
1.3.7	Měřicí antény .....	8
1.3.8	Měření proudu pomocí bočníku.....	9
<b>2</b>	<b>PŘENOSOVÁ CESTA OPTICKÝM VLÁKNEM</b>	<b>11</b>
2.1	Optické vlákno.....	11
2.1.1	Šíření světla optickým vláknem.....	11
2.1.2	Fyzikální a materiálové vlastnosti optického vlákna .....	13
2.1.3	Útlum v optickém vlákně.....	14
2.1.4	Vidová (modální) disperze.....	14
2.1.5	Mnohavidová optická vlákna.....	15
2.1.6	Jednovidová optická vlákna.....	16
2.2	Optoelektronický přenosový systém.....	16
2.3	Elektrooptická modulace .....	17
2.3.1	Přímá modulace .....	17
2.3.2	Externí modulace .....	17
2.4	Zdroje optického záření .....	18
2.4.1	LED dioda.....	19
2.4.2	Laserová dioda.....	19
2.5	Optické detektory.....	20
2.5.1	P-I-N fotodioda .....	20

2.5.2	Lavinová fotodioda (APD) .....	20
2.6	Srovnání dostupných optických převodníků.....	20
2.6.1	Konvertory pro TOSLINK.....	20
2.6.2	EMP Centauri OT1/1+1PUU-2 .....	21
2.6.3	Analogová optická linka LTX-5515 .....	21
2.6.4	FO-HBST/HBSR .....	22
2.6.5	Model 732T/R.....	23
2.6.6	SLL-10M2G.....	23
2.6.7	LANGER EMV-Technik A300 .....	23
<b>3</b>	<b>NÁVRH OPTICKÉHO PŘEVODNÍKU</b>	<b>24</b>
3.1	Stanovení požadavků na převodník .....	24
3.2	Návrh optického přenosového řetězce .....	24
3.2.1	Způsob modulace optické nosné.....	24
3.2.2	Stanovení maximální rychlosti přenosu.....	26
3.2.3	Výběr světelného zdroje .....	26
3.2.4	Výběr světelného detektoru .....	27
3.2.5	Budič laserové diody .....	28
3.3	Návrh elektrooptického převodníku .....	28
3.3.1	A/D převodník .....	29
3.3.2	Výběr transportního protokolu.....	29
3.3.3	Serializer .....	30
3.3.4	Vstupní analogové obvody optického převodníku .....	31
3.3.5	Ochrana proti přepětí .....	34
3.3.6	Symetrizace vstupního signálu .....	35
3.3.7	Parametry vstupních analogových obvodů .....	35
3.3.8	Mikrokontroler.....	36
3.3.9	Budič laserové diody ONET4201LD .....	36
3.3.10	Zhodnocení návrhu elektrooptického převodníku (vysílače) .....	39
3.4	Návrh optoelektrického převodníku .....	40
3.4.1	Výběr D/A převodníku .....	40
3.4.2	Transimpedanční zesilovač.....	41
3.4.3	Deserializer .....	41
3.4.4	Výstupní obvody analogového optoelektrického převodníku .....	41

3.4.5	Mikrokontroler .....	42
3.4.6	Zhodnocení návrhu optoelektrického převodníku .....	42
3.5	Napájení .....	43
3.6	Návrh desek plošných spojů .....	45
3.6.1	Analogová a digitální zem .....	47
3.6.2	Opravy 1. verze elektro-opt. převodníku .....	48
3.6.3	Provedené opravy 2. verze eletro-opt. převodníku .....	49
<b>4</b>	<b>REALIZACE OPTICKÉHO PŘEVODNÍKU</b>	<b>50</b>
4.1	Software .....	50
4.1.1	Mikrokontroler PIC16F18875 .....	50
4.1.2	A/D převodník .....	50
4.1.3	Serializer .....	50
4.1.4	Zdroj hodinového signálu LTC6904.....	50
4.1.5	Další možnosti ovládání periferií vysílače.....	51
4.1.6	Deserializer .....	51
4.1.7	Další možnosti ovládání periferií přijímače.....	51
4.2	Výsledky měření .....	51
4.2.1	EMC měření vyzařovací charakteristiky dle normy CISPR 24 ed.4 ..	52
4.2.2	EMC měření rušivého napětí do napájecího vstupu dle normy CISPR 24 ed.4	56
4.2.3	Frekvenční charakteristiky vstupního analogového obvodu .....	57
4.2.4	Měření vysílače termokamerou .....	58
4.2.5	Doporučené nápravy problémů vyplívajících z naměřených výsledků 60	
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>61</b>
A.1	VSTUPNÍ ANALOGOVÉ OBVODY .....	66
A.2	A/D PŘEVODNÍK .....	67
A.3	SERIALIZER.....	68
A.4	BUDIČ LASEROVÉ DIODY .....	69
A.5	MIKROKONTROLER .....	70
A.6	Napájecí vstupy.....	71
B.1	Zpracování signálu z fotodiody + deserializer.....	72
B.2	D/A převodník .....	73
B.3	Úprava výstupního signálu z D/A převodníku .....	74



B.4	Mikrokontroler.....	75
B.5	Napájecí vstupy.....	76
D.1	TOP (1:1).....	78
D.2	BOTTOM (1:1).....	79
D.3	Rozmístění součástek (bez měřítka, otočeno o 90 stupňů).....	80
E.1	TOP (1:1).....	81
E.2	BOTTOM (1:1).....	82
E.3	Rozmístění součástek (bez měřítka, otočeno o 90 stupňů).....	83
F.1	TOP (1:1).....	84
F.2	BOTTOM (1:1).....	85
F.3	Rozmístění součástek (Bez měřítka, otočeno o 90 stupňů).....	86
G.1	TOP (1:1).....	87
G.2	BOTTOM (1:1).....	88
G.3	ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK (Bez měřítka, otočeno o 90 stupňů).....	89
H.1	Elektrooptický převodník (vysílač) - 1. verze.....	90
H.2	Elektrooptický převodník (vysílač) - 2. verze.....	91
H.3	Optoelektrický převodník (přijímač).....	92
H.4	Zdroj.....	93

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1: Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí. Přejvzato z [1].....	2
Obr.2: Příklad zemnicí smyčky. Přejvzato z [2] .....	4
Obr.3: Schéma zapojení napěťové sondy (Přejvzato z [1]) .....	6
Obr.4: Frekvenční závislost přenosové impedance sondy (Přejvzato z [1]).....	6
Obr.5: Detail absorpčních kleští (Přejvzato z [3]) .....	8
Obr.6: Možnosti zapojení bočníku (Přejvzato z [4]) .....	9
Obr.7: Paprsek světla dopadající na rozhraní mezi větším a nižším indexem lomu (například sklo - vzduch: (a) lom; (b) limitní případ s kritickým úhlem ( $\alpha_c$ ) dopadu; (c) totální odraz ( $\alpha > \alpha_c$ ); Přejvzato z [7] .....	12
Obr.8: Útlum optického vlákna v závislosti na vlnové délce (Přejvzato z [8]) .....	14
Obr.9: Vliv vidové disperze na obdélníkový průběh intenzity světla (Přejvzato z [8]) ..	15
Obr.10: Šíření paprsku v závislosti na typu opt. vlákna: a) mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexem lomu; b) mnohavidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu; c) jednovidové vlákno; (Přejvzato z [8]).....	16
Obr.11: Optický přenosový řetězec (volně inspirováno z [7]) .....	17
Obr.12: Elektrooptický (páskový) interferenční modulátor (Přejvzato z [10]) .....	18
Obr.13: Porovnání W/A charakteristiky laseru a LED diody (Přejvzato z [7]).....	19
Obr.14: Datový extender Toslink/analog audio (Přejvzato z: <a href="http://www.mader.cz/gembird-datovy-extender-digital-na-analog-audio-konvertor-spdif-rca">http://www.mader.cz/gembird-datovy-extender-digital-na-analog-audio-konvertor-spdif-rca</a> ) .....	21
Obr.15: Optický vysílač OT1/1+1PUU-2 (Přejvzato z <a href="http://www.emp-centauri.cz/index.php?lang=en&amp;page=prodview&amp;id_kateg=1&amp;id_pkateg=26&amp;id=115">http://www.emp-centauri.cz/index.php?lang=en&amp;page=prodview&amp;id_kateg=1&amp;id_pkateg=26&amp;id=115</a> ) .....	21
Obr.16: Optická linka LTX-5515 (Přejvzato z: <a href="http://www.photonicsonline.com/doc/fast-precision-analog-fiber-optic-link-ltx-0002">http://www.photonicsonline.com/doc/fast-precision-analog-fiber-optic-link-ltx-0002</a> ) .....	22
Obr.17: Optická analogová linka FO-HBST/HBSR (Přejvzato z <a href="http://www.michsci.com/Products/fiberoptics/fo-hbst.htm">http://www.michsci.com/Products/fiberoptics/fo-hbst.htm</a> ).....	22
Obr.18: Celkové blokové schéma optického převodníku.....	26
Obr.19: Laserová dioda OPV315AT (Přejvzato z: <a href="http://optekinc.com/datasheets/opv315.pdf">http://optekinc.com/datasheets/opv315.pdf</a> ) .....	27
Obr.20: W-A char. laserové diody OPV315AT .....	27
Obr.21: Adaptér fotodiody na konektor ST (Přejvzato z: <a href="http://cz.farnell.com">cz.farnell.com</a> ).....	28

Obr.22: Blokové schéma elektrooptického převodníku .....	28
Obr.23: Schéma osciloskopické sondy 10:1, Převzato z [25].....	32
Obr.24: Kompenzovaný napěťový dělič.....	33
Obr.25: Vstupní dělič se zesilovačem OPA659, který má velkou vstupní impedanci ...	34
Obr.26: Ukázka symetrizace kolem napětí 0,9 V .....	35
Obr.27: Simulace frekvenční char. vstupních analogových obvodů bez antialiasingového filtru .....	36
Obr.28: Simulace frekvenční char. vstupních obvodů se zařazeným antialiasingovým filtrem.....	36
Obr.29: Doporučené zapojení budiče LD ONET4201LD (převzato z [18]) .....	38
Obr.30: Blokové schéma optoelektrického převodníku (vysílač) .....	39
Obr.31: Konverze diferenciálního proudového výstupu na jednoduchý napěťový; převzato z [15] .....	40
Obr.32: Převod proudu z A/D převodníku na napětí .....	41
Obr.33: Optoelektrický převodník (Přijímač).....	42
Obr.34: Blokové schéma zdroje.....	44
Obr.35: Připojení napájení do IC přes blokovací kondenzátor (Převzato z [26]).....	46
Obr.36: Větvení cest: a) špatně b) dobře .....	46
Obr.37: Spojení sousedních pinů SMD součástky: a) špatně b) dobře.....	46
Obr.38: Napojení SMD pinů: a) špatně b) dobře.....	46
Obr.39: Rozdělení zemnicích ploch vysílače (elektrooptického převodníku); červená - vstupní analogová zem, fialová - signálová zem, modrá - digitální zem	47
Obr.40: Rozdělení zemnicích ploch přijímače (optoelektrického převodníku); červená - digitální zem, modrá - analogová zem.....	48
Obr.41: Vyzařované emise 100 kHz - 30 MHz .....	52
Obr.42: Uspořádání pracoviště při měření vyzařovaných emisí (1GHz - 2,6 GHz) .....	52
Obr.43: Vyzařované emise 30 MHz - 200 MHz, horizontální polarizace.....	53
Obr.44: Vyzařované emise 30 MHz - 200 MHz, vertikální polarizace.....	53
Obr.45: Vyzařované emise 200 MHz - 1 GHz, horizontální polarizace.....	54
Obr.46: Vyzařované emise 200 MHz - 1 GHz, vertikální polarizace.....	54
Obr.47: Vyzařované emise 1 GHz - 2,6 GHz, horizontální polarizace, na vynechaných úsecích není norma definována.....	55
Obr.48: Vyzařované emise 1 GHz - 2,6 GHz, vertikální polarizace, vynechaných úsecích není norma definována.....	55
Obr.49: Rušení do sítě .....	56
Obr.50: Uspořádání měřícího pracoviště při měření rušivého napětí .....	56

Obr.51: Frekvenční charakteristika vstupních analogových obvodů.....	57
Obr.52: Snímek vysílače z termokamery.....	58
Obr.53: Naměřené hodnoty.....	59

# SEZNAM TABULEK

Tab.1: Přehled pracovních kmitočtů sond podle materiálu jádra (Převzato z [1]) .....	7
Tab.2: Přehled měřících antén pro systémy EMI (Převzato z [1]) .....	8
Tab.3: Přehled frekvenčních rozsahů snímačů elektromagnetického rušení (Převzato z [1]) .....	10
Tab.4: Porovnání vlastností modulací .....	25
Tab.5: Přehled rozlišení maximálních vzorkovacích frekvencí při přenosové rychlosti 622 Mb/s a vstupním napětí 20 V .....	29
Tab.6: Datová prostupnost vybraných serializerů .....	31
Tab.7: Parametry laserové diody OPV315 .....	37
Tab. 8: Spotřeba elektrooptického převodníku (vysílač).....	43
Tab. 9: Spotřeba optoelektrického převodníku (přijímač).....	43
Tab.10: Parametry DPS (V závorce jsou uvedeny minimální rozměry ve výjimečných případech) .....	45
Tab.11: Naměřené teploty součástek s větší teplotou, než 40 °C .....	58

# ÚVOD

Zájem o problematiku EMC (Elektromagnetické kompatibility) se začal zvyšovat v 90. letech, kdy Mezinárodní evropská komise představila nařízení ohledně EMC, které se vztahovaly téměř na všechna elektrotechnická zařízení. K obdržení známky EC musely všechny tyto výrobky splňovat tehdejší standardy EMC.

Porozumění oblasti EMC je důležité při návrhu spolehlivých a odolných zařízení, a testování elektromagnetické kompatibility je klíčové k ověření, že dané zařízení splňuje legislativní normy a požadavky cílového zákazníka.

Tato problematika je dnes ještě důležitější z důvodu narůstajícího počtu elektrotechnických zařízení na čím dál menším prostoru, potřebou ověřovat vlastnosti výrobků odolávat elektromagnetickému rušení, či ho nepřekračovat, a to již při vývoji, neboť konečné testy jsou nákladné a v případě jejich nesplnění prodražuje vývoj o čas potřebný k nápravě.

Prostor EMC komory či testovacího prostoru se vyznačuje specifickými vlastnostmi v závislosti na prováděném testu. Jedním z důležitých požadavků je měřený signál, velkého dynamického rozsahu a velkou šířkou pásma, přenést nezměněný někdy i velice zarušeným prostředím se silným elektromagnetickým polem. Kromě konvenčního způsobu přenosu signálu metalickým kabelem, zpravidla koaxiálním, existuje ještě jedna alternativa a to optické vlákno, které nabízí mnohé přednosti. Tato práce se zabývá návrhem optického převodníku schopného převést elektrický signál na optický a zpět, s možným využitím při testech EMC.

# 1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

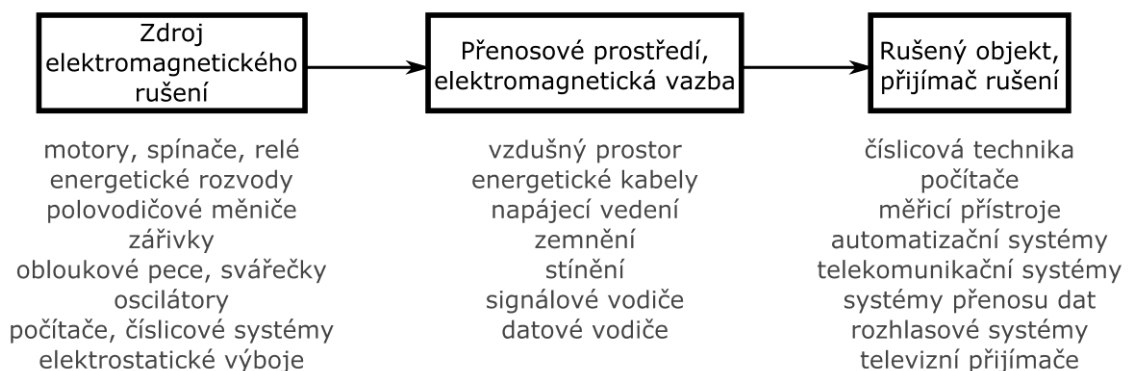
V následujícím textu budou rozebrány nezbytné teoretické prekvizity pro pochopení problematiky elektromagnetické kompatibility, měření a testů.

## 1.1 Pojem EMC

EMC je nyní nedílnou součástí každého návrhu elektronického zařízení. Se standardy, které jsou nyní ustanoveny a vyžadovány po celém světě, musí každý nový produkt splňovat příslušné normy EMC a tato skutečnost musí být doložena testováním o předepsaném způsobu.

Pojem elektromagnetická kompatibility lze definovat jako schopnost zařízení fungovat způsobem, jakým byl zamýšlen, v jejich předpokládaném provozním elektromagnetickém prostředí, aniž by samo způsobovalo nepřijatelné elektromagnetické rušení pro jiná zařízení. Cílem EMC při návrhu zařízení nebo systému je zajistit, aby poměrně různorodá škála elektrotechnických zařízení mohla koexistovat na relativně malém prostoru, bez nastání nepřijatelného vzájemného ovlivňování.

Vizualizace problematiky EMC lze vyjádřit pomocí znázornění průchodu rušivého signálu základním řetězcem EMC, jak je znázorněno na Obr.1. Vymezuje tři základní stádia rušení: jeho vznik, transport a přenos do ovlivňovaného zařízení.



Obr.1: Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí. Převzato z [1].

## 1.2 Zdroje elektromagnetického rušení

Existuje mnoho forem elektromagnetického rušení, které může mít vliv na správnou funkci zařízení. Toto rušení se prostřednictvím elektromagnetické vazby přenáší do rušeného zařízení. Otázkou zkoumání je posouzení jejich charakteru, intenzity, a identifikace parazitních cest, kterými se šíří. Tato oblast spadá pod souhrnné označení Elektromagnetická interference (EMI).

Zdroje můžeme kategorizovat podle různých kritérií, například podle jejich prapůvodce:

- Přirozené se vyskytující - kvůli jejich přírodní povaze je nelze přímo odstranit, můžeme pouze omezit důsledky jejich působení. Radí se mezi ně: elektrostatický výboj (ESD), kosmický šum nebo jiné atmosférické děje
- Vytvářené lidskou činností - vytváří je elektronické obvody a jiná zařízení. Hlavně tam, kde dochází k rychlým změnám napětí a proudu. Obecně platí, že čím rychlejší je změna napětí nebo proudu, tím širší je frekvenční spektrum rušení. Příkladů můžeme najít mnoho, některé jsou uvedeny na Obr.1.

Dále je možné dělit podle délky trvání:

- Kontinuální zdroje rušení - působí po delší dobu. Jejich zdrojem jsou ve většině případů radiofrekvenční vysílače a obvody, které při své činnosti vykazují elektromagnetickou emisi s téměř neměnným frekvenčním spektrem. Analyzujeme je ve frekvenčním spektru.
- Impulzní zdroje rušení - jsou charakterizovány jednorázovým nebo přerušovaným výskytem v nepředvídatelných časech. Často jde o signály krátkého trvání, a proto i velkou šířkou pásma. Analýza se provádí v časové doméně. Příčinou jejich vzniku bývá výboj ESD a spínací či rozpínací procesy uzavřených okruhů.

S ohledem na jejich šířku pásma:

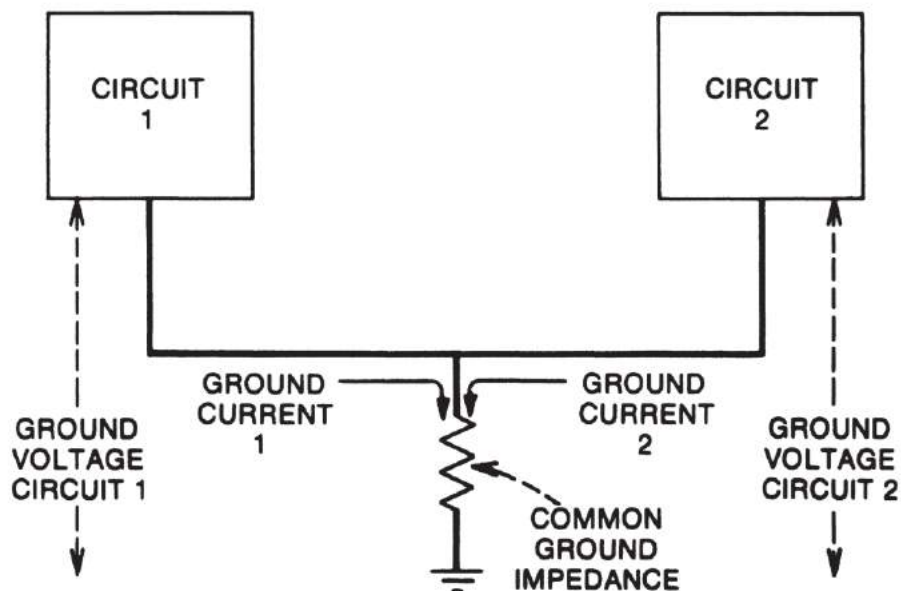
- Úzkopásmové - Například síťový kmitočet 50/60 Hz, zařízení využívající diskretní frekvenci (oscilátory) nebo parazitní signál vzniklý intermodulací vlivem nelinearit prvků.
- Širokopásmové - Typicky všechny radiofrekvenční vysílače.

Kromě pochopení, jak rušení vzniká a jakou má formu, je také nezbytné prozkoumat, jak se přenáší z ovlivňujícího zařízení do ovlivňovaného. Porozumění principu vazby je klíčové ke schopnosti omezit přenos rušení. Máme několik základních vazeb:

- Galvanická vazba - nastává, když elektrický proud teče ze dvou a více elektrických systémů přes společnou impedanci. Tento typ vazby obvykle pozorujeme v zemnicí smyčce a napájecí lince. Zemnicí smyčka se uzavírá přes společnou impedanci, která je uzemněna, a separátním uzemnění dvou a více elektrických systémů. Přičemž proud jednoho systému tekoucí společnou impedancí je rušivým pro další. Vliv této vazby se dá zmenšit uzemněním navázaných obvodů v jednom bodě a vhodným návrhem DPS.



Vazba přes společnou impedanci po napájecí lince, například vnitřní impedanci zdroje je vhodné odstranit galvanickým oddělením.



Obr.2: Příklad zemnicí smyčky. Převzato z [2]

- Kapacitní vazba - Pozorujeme ji nejčastěji tam, kde je třeba vodiče vést souběžně (napájecí, signálové linky atd.). Mezi vodiči rozdílného potenciálu vzniká kapacitní vazba, přes kterou se rušivý signál přenáší. Je tedy zřejmé, že s rostoucí frekvencí bude narůstat i míra rušení. Vzniká mezi galvanicky oddělenými obvody, mezi obvody se společným vztažným vodičem, nebo vodiči vůči zemi.
- Induktivní vazba - Stejně jako kapacitní vazba vzniká při souběžném vedení vodičů. Rušivý proud je přenášen mezi obvody elektromagnetickou indukcí, protéká-li alespoň jedním proud. Nejvíce se projeví tam, kde dochází k rychlým změnám velkého proudu, navíc její význam stoupá s rostoucí frekvencí. Minimalizujeme ji omezením vzájemné indukčnosti vodičů na minimum, stíněním a úpravou vzájemné polohy.
- Vazba vyzařováním - dochází k ní u vzdálenostech zdroje a přijímače rušení delších, než je vlnová délka rušivé frekvence. Kapacitní ani induktivní vazba mezi nimi není taky významná. Nejčastěji toto rušení postihuje radiofrekvenční přijímače nebo zařízení citlivé na vysokofrekvenční rušení. Rušivé napětí je indukováno působením elektromagnetické vlny.

## 1.3 Měření úrovně elektromagnetického rušení

Dodržení maximálních limitů úrovně rušivých signálů a stupeň dosáhnutého stupně EMC můžeme prakticky ověřit měřením. Způsob měření a prezentace naměřených výsledků musí splňovat podmínku jejich opakovatelnosti a možnost jejich srovnání. Provedení měření záleží na druhu testu a je kompletně specifikováno příslušnými nařízeními a normami. Vhodný výstup měření je úroveň rušivé veličiny v závislosti na frekvenci.

### 1.3.1 Měřič rušení

Slouží k měření různých druhů elektromagnetických rušení. Měřená veličina je snímána vhodnou sondou nebo snímačem, a ve většině případů je převedena na napětí, takže ve výsledku se jedná o měření napětí, a to relativně malé úrovně v definovaných frekvenčních pásmech. Musíme brát v úvahu, že měřič rušení může sám o sobě představovat přijímač i zdroj rušení. Druhy snímačů používaných pro měření EMC jsou:

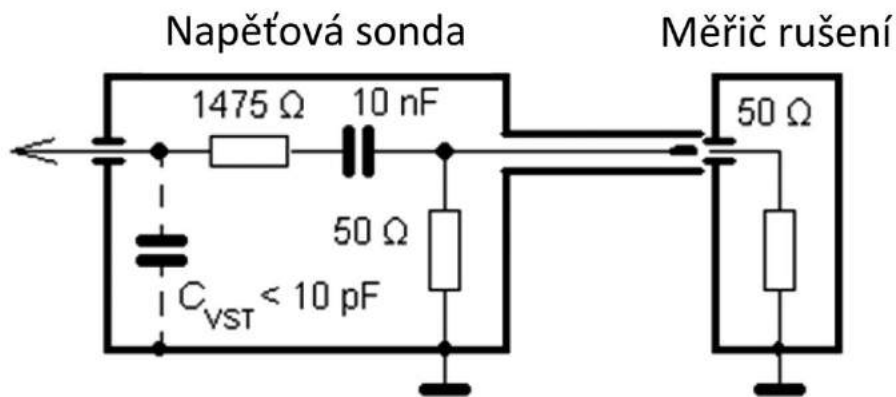
- Umělá zátěž vedení LISN
- Napěťová sonda
- Proudová sonda (proudový transformátor)
- Sonda blízkého magnetického pole
- Absorpční kleště
- Měřicí antény

### 1.3.2 Umělá zátěž vedení LISN

Často potřebujeme posoudit vliv zkoumaného zařízení na zdroj jeho napájení. Například z rozvodné elektrické sítě nebo z jiného zdroje napájení, které může současně využívat více zařízení. K tomuto účelu se používá LISN (Line Impedance Stabilizing Network), neboli umělá zátěž vedení. Rušivé signály z tohoto napájecího zdroje jsou při tomto měření nežádoucí. Jejich odfiltrování je jedna z funkcí LISN. Měřené zařízení je třeba k měřiči rušení impedančně přizpůsobit předem definovanou impedancí a zároveň zajistit, aby měřené rušivé signály pocházely pouze z měřeného zařízení, a nikoliv z napájecího zdroje. Všechny tyto předpoklady zajišťuje LISN.

### 1.3.3 Napěťová sonda

Použití LISN není vždy možné, a to hlavně z důvodu její nízké vstupní impedance. Také budeme chtít měřit i na jiných svorkách, než napájecích. Například k analýze chování zařízení v určitých podmínkách nás budou zajímat určitá napětí v měřících bodech. Jde především o to, aby připojení sondy k měřenému zařízení nezpůsobilo ovlivnění zkoumaného objektu, nebo změnu jeho činnosti.

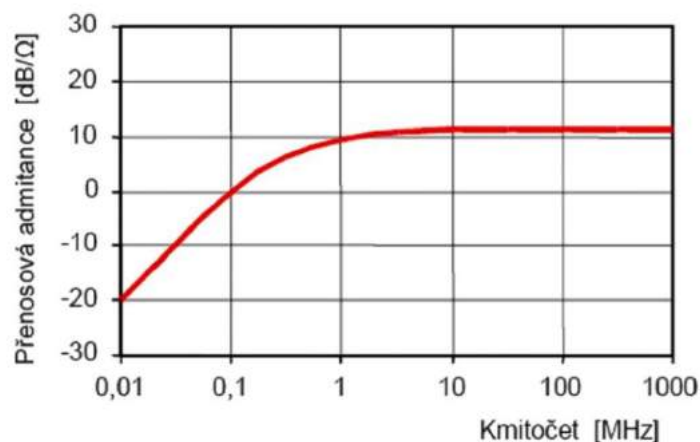


Obr.3: Schéma zapojení napěťové sondy (Převzato z [1])

Napěťová sonda disponuje velkou vstupní impedancí (jednotky  $\text{k}\Omega$  - jednotky  $\text{M}\Omega$ ), aby nepředstavovala přílišnou zátěž pro měřený obvod. Často bývá konstruována jako atenuátor se jmenovitou hodnotou útlumu jako např. 1:10 nebo 1:100. V takových případech sonda představuje napěťový dělič, který je nutné kapacitně kompenzovat. Důležitým parametrem je vstupní kapacita sondy, která by měla být co nejmenší, aby byla použitelná i pro větší frekvence. Menší vstupní kapacity dosahuje aktivní napěťová sonda. Případný předzesilovač by měl být navrhnout s ohledem na minimální zkreslení. Pro měření plovoucího napětí se používá diferenciální napěťová sonda. V testech EMC se používá i přímo připojený transformátor. Například pro nízkofrekvenční a audio signály, a pro vysoká napětí.

### 1.3.4 Proudová sonda

Vlastní sonda je tvořena sekundárním vinutím toroidního transformátoru, jehož primární vinutí tvoří právě měřený vodič. Konstrukce sondy umožňuje obehnout vodič a měřit tak průchozí rušivý proud bez nutnosti přerušení vodiče. Toho je dosaženo možností rozdělit toroidní jádro na dvě části. Obvykle bývá zhotovena jako kleště, které se po pojmnutí vodiče uzavřou.



Obr.4: Frekvenční závislost přenosové impedance sondy (Převzato z [1])

Její citlivost je dána přenosovou impedancí, což je poměr sekundárního napětí ku primárnímu proudu. Bývá vyjádřena v  $\Omega$  nebo v  $\text{dB}\Omega$ . Například sonda s citlivostí  $5 \Omega$  ( $14 \text{ dB}\Omega$ ) pro vstupní proud  $1 \mu\text{A}$  vytvoří na výstupu  $5 \mu\text{V}$ . Sonda dokáže měřit relativně malé proudy, už od několika  $\mu\text{A}$ . Jak je vidět na Obr.4, přenosová impedance je ale frekvenčně závislá, hlavně při nižších kmitočtech. Jedním z důležitých parametrů je tedy nejnížší pracovní kmitočet. Naopak maximální pracovní kmitočet je omezen její vlastní rezonancí a ztrátách v jádru transformátoru. Přehled použitého jádra cívky v závislosti na frekvenci je uveden v Tab.1.

Sekundární vinutí se zpravidla impedančně přizpůsobuje zakončovacím rezistorem, jehož impedance ovlivňuje citlivost sondy. Platí, že čím menší je zatěžovací impedance, tím je větší citlivost sondy a tím menší počet závitů je třeba na sekundárním vinutí. Při praktickém měření je třeba nalézt na vodiči místo s maximálním proudem a to měřit, protože na vedení může nastat stojaté vlnění. Moderní proudové sondy jsou tvořeny Hallovým snímačem. Celkově proudové sondy mají relativně malou přesnost.

Tab.1: Přehled pracovních kmitočtů sond podle materiálu jádra (Převzato z [1])

Pracovní kmitočet	Materiál jádra
< 100 kHz	jádro z ocelových plechů
100 kHz - 400 MHz	feritové jádro
200 MHz - 1 GHz	vzduchové jádro

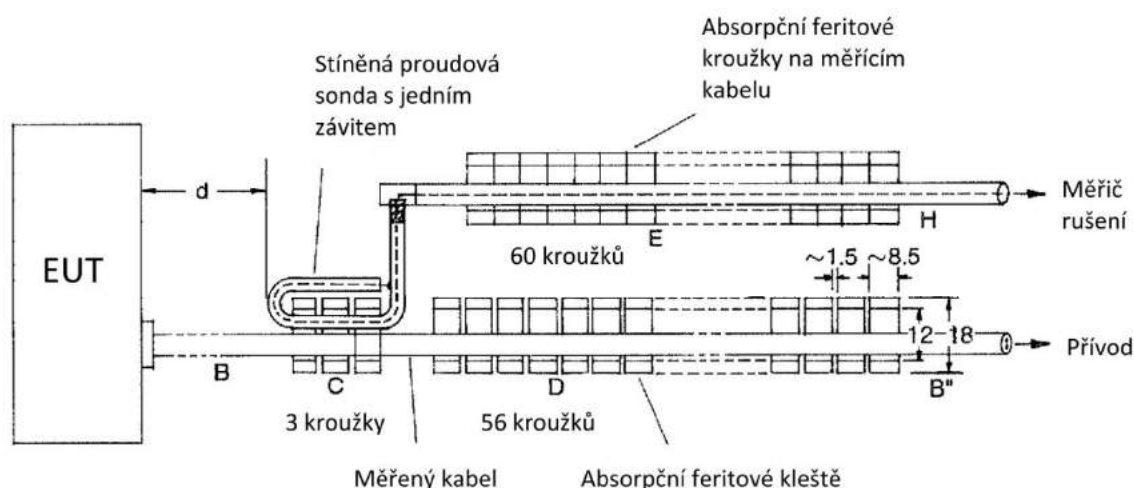
Dalším případem jsou sondy pro měření povrchových proudů, kde místo vodiče tvoří primární vinutí testovaný vodivý povrch, jímž měřený proud protéká.

### 1.3.5 Sonda blízkého magnetického pole

Rušivý proud se může uzavírat i ve smyčkách v diferenciálním módu, kdy jedním vodičem teče jedním směrem a druhým vodičem směrem opačným. V takovém případě by bylo výsledné napětí na proudové sondě nulové. Tyto proudové smyčky lze považovat za malé smyčkové antény, které ve svém bezprostředním okolí vytvářejí magnetické pole. Uzavírají se například v číslicových obvodech, na deskách plošných spojů atd. Toto vyzařování můžeme měřit sondou, která je v podstatě také smyčkovou anténou.

### 1.3.6 Absorpční kleště

Jedním z hlavních zdrojů vyzařování rušivého elektromagnetického pole bývají přírodní kabely. K měření výkonu tohoto vyzařování lze využít absorpční kleště. Jsou kombinací proudové sondy s velkým frekvenčním rozsahem a feritového absorbéru v podobě feritových kroužků. Absorbér poskytuje navíc vysokofrekvenční impedanční přizpůsobení kabelu. Další feritové kroužky jsou na kabelu, který slouží k přenášení měřeného signálu, aby se zamezilo vniku cizích rušivých napětí do měřiče rušení. Výhodou je relativně vysoká přesnost a reprodukovatelnost výsledků.



Obr.5: Detail absorpčních kleští (Převzato z [3])

### 1.3.7 Měřicí antény

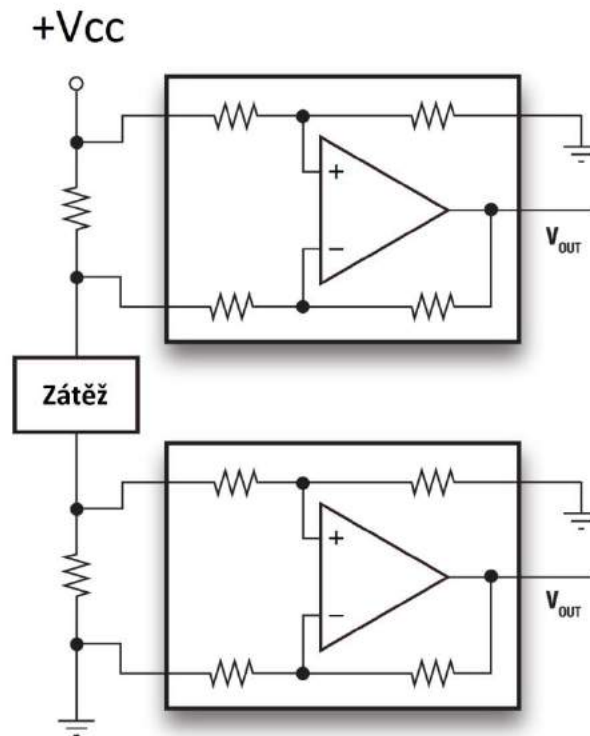
Popsané sondy mají omezenou šířku pásma, většinou do 300 MHz. Rušivé elektromagnetické pole nad touto frekvencí musíme tedy měřit jiným způsobem. Pomocí různých druhů měřicích antén můžeme pokrýt velkou šířku pásma. Výběr antény záleží na tom, na jakém frekvenčním rozsahu budeme měřit, jakou polarizaci bude mít elektromagnetická vlna (viz. Tab.2), vyzařovacím diagramu antény, zesílení, apod. Rušivý signál z antény je přiveden do měřiče rušení. Může jím být např. spektrální analyzátor. Vyzařovací charakteristika měřeného zařízení, přesněji řečeno závislost výkonu rušivého signálu vycházejícího ze zařízení v závislosti na frekvenci, je velmi hodnotným zdrojem informací při vývoji. Aby bylo měření opakovatelné a spolehlivé, provádí se na specifických testovacích stanovištích, jako například stíněné komory nebo volné prostranství (co nejvíce připomínající ideální).

Tab.2: Přehled měřicích antén pro systémy EMI (Převzato z [1])

Druh antény	Rozsah kmitočtů [MHz]	Měří složku
Rámová (smyčková)	0,009 - 30	<i>H</i>
Prutová (monopól)	0,009 - 30	<i>E</i>
Symetrické (laděné) dipóly	30 - 1000	<i>E</i>
Bikónická	20 - 300	<i>E</i>
Logaritmicko-periodická	200 - 3000	<i>E</i>
Kónicko-logaritmická	200 - 3000	<i>E</i>
Složená širokopásmová	30 - 2000	<i>E</i>
Trychtýřové antény	1000 - 40000	<i>E,H</i>

### 1.3.8 Měření proudu pomocí bočníku

Proudová sonda nemusí poskytovat dostatečnou přesnost při měření. Taktéž má omezenou možnost měřit proudy na nízkých kmitočtech. Další metoda měření proudu spočívá ve vložení nízkoohmového rezistoru (v angličtině shunt rezistor) do cesty, kterou měřený proud prochází. Podle Ohmova zákona vznikne na tomto rezistoru úbytek napětí přímo úměrný procházejícímu proudu. Výhoda oproti proudové sondě je v přesnosti, nižší ceně a menším zatěžování obvodu impedancí, navíc je přenosová charakteristika lineární. Ovšem za cenu nutnosti zásahu do vodivé cesty. Jsou dvě možnosti, jak měřicí rezistor zapojit:



Obr.6: Možnosti zapojení bočníku (Převzato z [4])

- mezi zátěž a zem (anglicky low side): Výhoda je v jednoduchosti provedení, k měření můžeme použít operační zesilovač, který se nemusí vypořádávat s poměrně velkým napětím na svorkách měřicího rezistoru. Neumí ovšem detekovat zkrat napájecí a jiné zemnicí svorky měřeného zařízení. Navíc přidává impedanci mezi zařízením a zem, která tak nemá stejný potenciál jako u měřeného zařízení. Zapojení je zobrazeno v dolní části Obr.6.

- mezi napájení a zátěž (anglicky high side): Říká se jí také plovoucí bočník a je vidět ve vrchní části Obr.6. Umí detekovat zkrat i odpojení EUT od napájení. Nepřidává impedanci mezi zátěž a zemní svorky. Nevýhodou je zapojení jedné svorky bočníku na zdroj napájení, jehož napětí se objeví i na svorce měřiče rušení.

Úbytek napětí na bočníku je velmi malý (jednotky až stovky mV). Toto napětí se obvykle zesiluje vhodným zesilovačem. Kromě operačních zesilovačů existují ještě speciální integrované obvody, které umožňují i nastavit zesílení, například INA225 od Texas Instruments. Bočník stejně jako napěťovou sondu můžeme využít k diagnostice a k "jednobodovému" měření.

Tab.3: Přehled frekvenčních rozsahů snímačů elektromagnetického rušení (Převzato z [1])

<b>Snímač EMI</b>	<b>Frekvenční rozsah</b>
Umělá síť (LISN)	9 kHz - 30MHz
Napěťová sonda	9 kHz - 30 MHz
Proudová sonda	9 kHz - 200 MHz
Absorpční kleště	30 MHz - 1 GHz
Sonda blízkého magnetického pole	100 kHz - 500 kHz
Měřicí anténa	9 kHz - desítky GHz
Bočník	0 - 500 kHz

## 2 PŘENOSOVÁ CESTA OPTICKÝM VLÁKNEM

Přenos informace optickým vláknem získává čím dál důležitější roli při přenosu velkých objemů dat, na velkou vzdálenost a při vysokých přenosových rychlostech. Optické vlákno díky svému nízkému útlumu (0,3 dB/km i méně) předčí dosah konvenčních přenosových médií. Kromě toho může nabídnout velkou širokopásmovost oproti metalickým kabelům, které jsou zatíženy parazitními vlastnostmi. Navíc přirozeně zajišťuje galvanické oddělení obvodů, čímž se hodí k oddělení vysoko- a nízkohybných obvodů, a míst s velkým rozdílem potenciálů. Další použití se vztahuje k okolnímu prostředí, které může být silně zarušené, nebo v něm hrozí nebezpečí výbuchu.

### 2.1 Optické vlákno

První optická vlákna byla v rámci prvních experimentů zhotovena z tenké skleněné tyčinky. Optické rozhraní sklo-vzduch postačilo k fungování tohoto jednoduchého světlovodu. Ztráty šíření byly ovšem velké a nebylo možné překlenout vzdálenost větší, než jednotky metrů. Následující vývoj se zaměřil na zkoumání dielektrického materiálu, který by dosahoval menšího útlumu.

#### 2.1.1 Šíření světla optickým vláknem

Fyzikální podstata šíření světla v optickém vlákně vychází z naplnění podmínek, za kterých dochází k totálnímu odrazu (Total Internal Reflection). Tyto podmínky můžeme odvodit ze Snellova zákona. Světlo dopadající na rozhraní dvou prostředí s nesejnou rychlostí šíření světla (obecně elektromagnetického záření) se láme, část jeho energie se odrazí zpět a část pronikne do jiného prostředí. Tuto rychlost vyjádříme pomocí indexu lomu (bezrozměrná veličina), což je poměr rychlosti světla ve vakuu a rychlosti šíření v daném prostředí, jak ukazuje následující vztah [8]:

$$n = \frac{c}{v} [-] \quad (2.1)$$

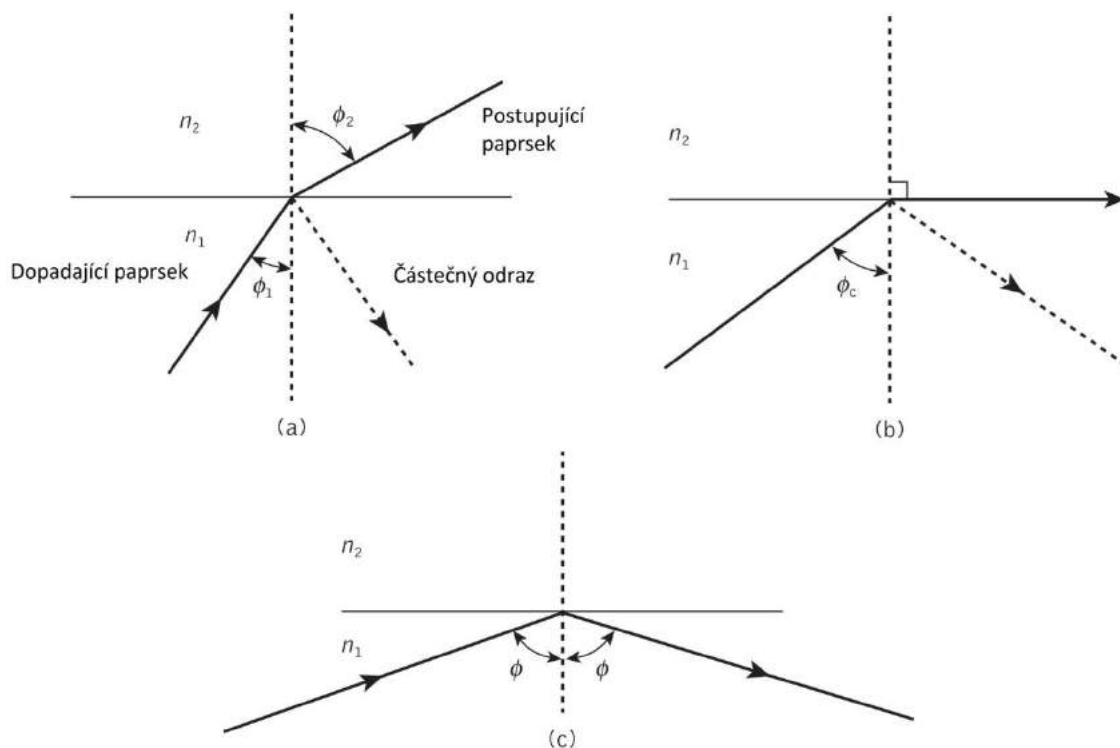
Bude nás zajímat případ, kdy světlo bude dopadat na rozhraní opticky hustšího a opticky řidšího prostředí, kdy  $n_1 > n_2$  (Obr.7), kdy se světlo láme směrem od kolmice rozhraní. Snellův zákon udává poměr funkcí sinus úhlů dopadu a odrazu v závislosti na poměru indexů lomů obou prostředí [8]:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.2)$$



K totálnímu odrazu dojde, pokud bude úhel dopadu vztažený ke kolmici větší, než kritický úhel pro dané prostředí ( $\alpha > \alpha_c$ ). Kritický úhel  $\alpha_c$  je největší úhel, při kterém ještě nastává lom světla a lomený paprsek splývá s rozhraním, to je  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Při větším úhlu dopadu již světlo do druhého prostředí nepronikne. Sinus  $90^\circ$  je 1, takže vztah se zjednoduší [8]:

$$\frac{\sin \alpha_c}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$



Obr.7: Paprsek světla dopadající na rozhraní mezi větším a nižším indexem lomu (například sklo - vzduch: (a) lom; (b) limitní případ s kritickým úhlem ( $\alpha_c$ ) dopadu; (c) totální odraz ( $\alpha > \alpha_c$ ); Převzato z [7]

Aby se paprsek do optického vlákna navázal, a tudíž došlo i k jeho přenesení, je třeba aby dopadl v rozmezí prostorového úhlu  $\Theta$ . Velikost tohoto úhlu určuje velikost lomů okolního prostředí, pláště a jádra[5]:

$$n * \sin \Theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

Výraz na pravé straně vyjadřuje numerickou aperturu (NA), což je bezrozměrná veličina, která je přímo úměrná výkonu, který je optické vlákno schopno navázat ze svého okolí. Je vyjádřena jako sinus maxima akceptačního úhlu:

$$NA = \sin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Fyzikální a materiálové vlastnosti optického vlákna

Oproti světlovodu s rozhraním sklo-vzduch potřebujeme, aby index lomu byl po celé délce vlákna konstantní, a optické rozhraní aby nepředstavovalo příliš velký rozdíl indexů lomů obou prostředí.

Optické vlákno se skládá z:

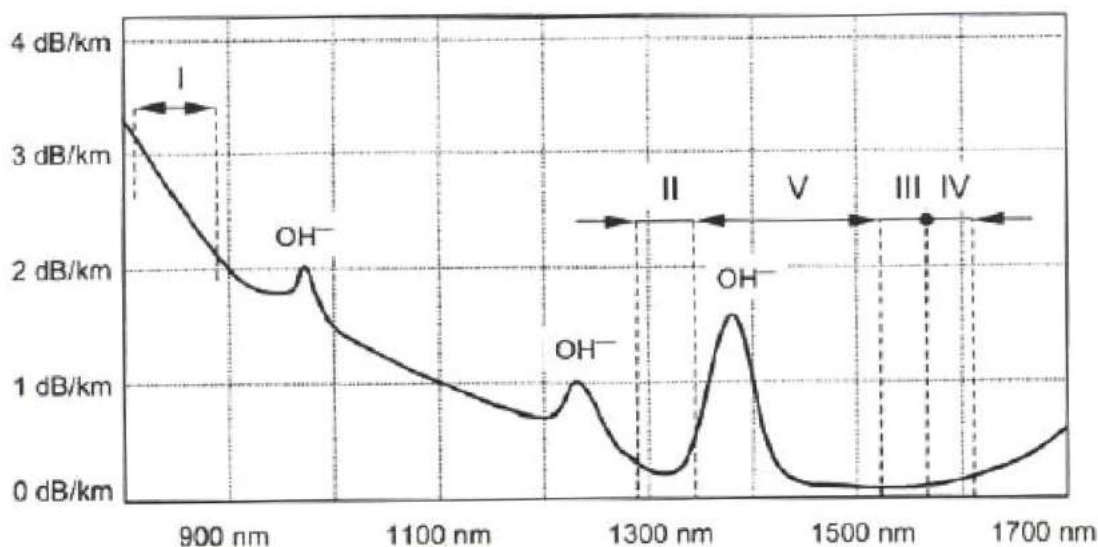
- jádra - má větší index lomu a průměr jednotky - desítky  $\mu\text{m}$
- pláště - menší index lomu než jádro
- primární ochrany - zvyšuje pružnost vlákna
- sekundární ochrany - zvyšuje odolnost vlákna

Plášť a jádro mohou být skleněné (čistý oxid křemičitý), plastové, nebo kombinací obojího. Podle průměru jádra rozdělujeme optická vlákna na jednojádřová a mnohójádřová.

Z důvodu technologie výroby a vlastností materiálu nemá oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) konstantní přenos pro všechny vlnové délky. Z tohoto důvodu jsou určité rozsahy vlnových délek méně vhodné, či zcela nevhodné pro přenos optickým vláknem (Obr.8). Proto jsou vhodnější rozsahy vlnových délek rozdělené do tzv. přenosových oken, které mají svoje specifické vlastnosti. Například:

- I. Okno má vlnovou délku okolo 850 nm a je vhodné spíše na kratší vzdálenost; nízká cena světelného zdroje.
- II. Okno (1280 - 1335  $\mu\text{m}$ ) se používá pro přenos jednojádřovým vláknem na delší vzdálenosti.
- atd.

Maxima v útlumové charakteristice jsou dána nežádoucím zavlečením OH- iontů při výrobě.



Obr.8: Útlum optického vlákna v závislosti na vlnové délce (Převzato z [8])

### 2.1.3 Útlum v optickém vlákně

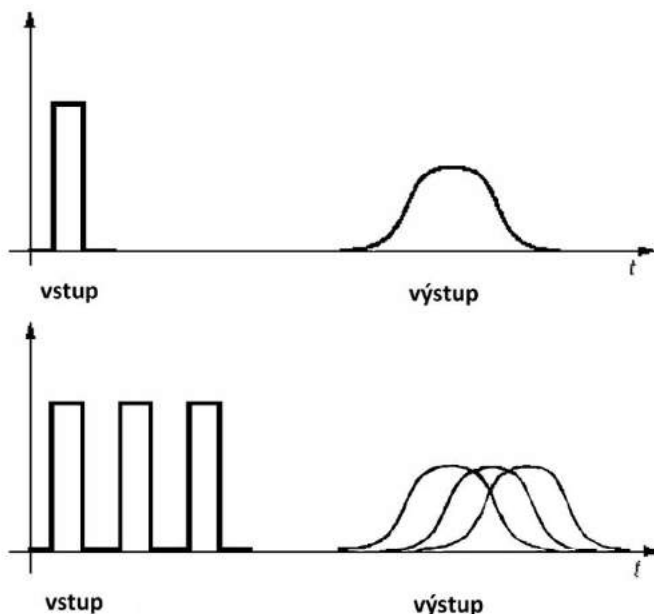
Je způsoben chemickými a fyzikálními vlastnostmi materiálu, nehomogenitami, a interakcí látky a světla. Např.:

- Vlastní absorpce - způsobuje ji interakce mezi procházejícím světlem a atomy materiálu, z něž je vlákno vyrobeno. Rozlišujeme mezi infračervenou, která je dominantní při kratších vlnových délkách a směrem k delším narůstá, a ultrafialovou, která naopak se zvětšující vlnovou délkou klesá.
- Nevlastní absorpce - vzniká na atomech příměsí, například již zmíněných vodních iontech  $\text{OH}^-$ , jejichž značný vliv je vidět na Obr.8, a iontech oxidů kovů.
- Materiálový rozptyl - podle toho, zda rozptýlené světlo má stejnou nebo jinou vlnovou délku, dělíme na lineární a nelineární. Mezi lineární patří například Rayleighův rozptyl, které způsobuje vlnění mřížek krystalické struktury vlivem tepla. Dále Mieův rozptyl, který souvisí s nehomogenitami geometrické struktury vlákna, srovnatelné s vlnovou délkou.
- Ztráty ohybem a namáháním
- Ztráty na konektorech - například vlivem nečistot

### 2.1.4 Vidová (modální) disperze

Světelné paprsky ze zdroje záření, které se navážou do optického vlákna dopadají pod různý úhlem, čímž se budou lišit i dráhy jednotlivých paprsků (budou různě dlouhé). Na výstupu se tedy kromě paprsku, který vstoupil do opt. vlákna pod nejmenším úhlem a urazil tak nejkratší trajektorii, objeví další paprsky zpožděné o rozdíl vzdálenosti jejich

dráhy. Popsaný jev nazýváme vidová (modální) disperze. Prakticky odpovídá Gaussovskému modelu chování, jak je vidět na Obr.9. Omezuje šířku pásma, maximální bitovou rychlost a vzdálenost přenosu.



Obr.9: Vliv vidové disperze na obdélníkový průběh intenzity světla (Převzato z [8])

### 2.1.5 Mnohavidová optická vlákna

Anglicky Multi Mode (MM). Mají širší průměr jádra (typicky 50 a 62  $\mu\text{m}$ ). Vidová disperze se díky tomu uplatňuje více, než u jednovidového vlákna, což značně omezuje maximální vzdálenost přenosu. I přes to má nesporné výhody.

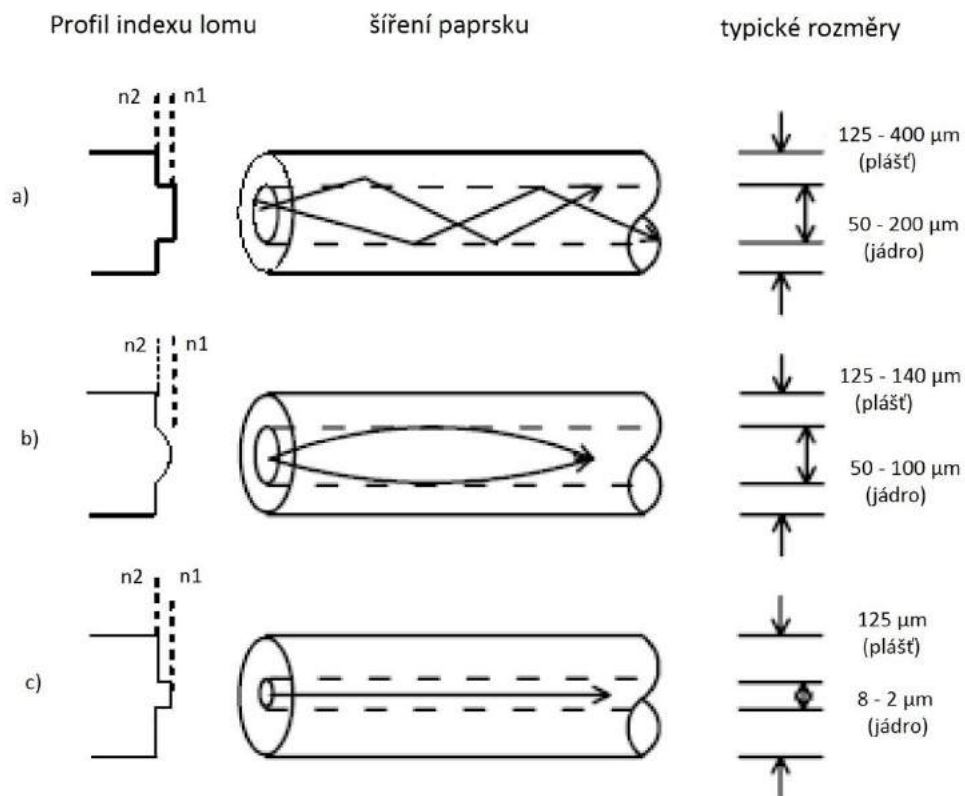
Umožňuje přenášet více vlnových délek a tím provoz vlnového multiplexu (WDM). Lépe váže optický výkon, k buzení je možné použít i nekoherentní zdroj záření (LED diodu). Obecně jsou zdroje světla použitelná pro tento typ optického vlákna levnější (včetně laseru s vlnovou délkou např. 850 nm, který je levnější než laser používané v jednovidových vláknech).

Mnohavidová vlákna dělíme ještě na:

- Se skokovou změnou indexu lomu - (SI - Step Index) - omezená šířka pásma, Obr.10 a).
- S gradientní změnou indexu lomu - (GI - Gradient Index) - index lomu klesá směrem od jádra, čímž v podstatě dochází k nekonečně malým, mnohočetným dílčím odrazům, a paprsek se tak z pohledu pozorovatele zakřivuje. Omezuje působení vidové disperze, schopnost navazovat optický výkon je ale menší než u SI. Obr.10 b).

## 2.1.6 Jednovidová optická vlákna

Anglicky SM (Single Mode). Průměr jádra (8 – 10  $\mu\text{m}$ ) je srovnatelný s vlnovou délkou. Prodloužení dráhy paprsku je menší, tudíž lze realizovat přenos na delší vzdálenosti. Vazební účinnost je velmi malá, vyžaduje monosměrové zdroje světla. Lze vidět na následujícím Obr.10 c).

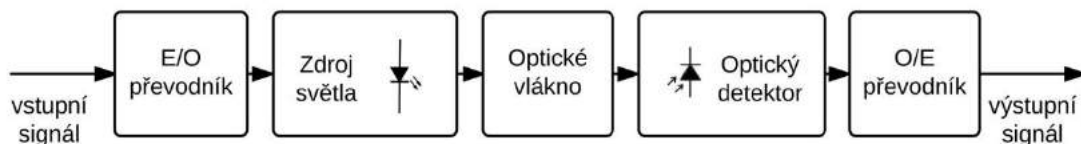


Obr.10: Šíření paprsku v závislosti na typu opt. vlákna: a) mnohavidové vlákno se skokovou změnou indexem lomu; b) mnohavidové vlákno s gradientní změnou indexu lomu; c) jednovidové vlákno; (Převzato z [8])

## 2.2 Optoelektronický přenosový systém

Aby se elektrický signál mohl přenést vláknem, je nutné ho modulovat na optickou vlnu. Optoelektronický přenosový řetězec se skládá z:

- Elektrooptický převodník (E/O) - určuje v jaké formě bude signál přenášen optickým vláknem, jeho součástí je modulátor optické vlny
- Zdroj světla - zpravidla LED nebo laserová dioda
- Optický detektor - např. lavinová nebo P-I-N fotodioda
- Optoelektrický převodník (O/E) - převádí optický signál zpět na elektrický, obsahuje transimpedanční zesilovač



Obr.11: Optický přenosový řetězec (volně inspirováno z [7])

## 2.3 Elektrooptická modulace

Jsou dva základní způsoby jak modulovat signál na optickou vlnu. Prvním z nich je přímá modulace, která využívá k modulaci budící proud optického zdroje. Naproti tomu externí modulace upravuje již existující světelný paprsek z externího zdroje, například pomocí polarizace.

### 2.3.1 Přímá modulace

V tomto případě je buzen zdroj záření přímo modulačním proudem, jehož amplituda je přímo úměrná amplitudě signálu. Vyslaný optický signál modulovaný optickou intenzitou zdroje záření vybudí v optickém přijímači (fotodiodě) elektrický proud přímo úměrný intenzitě světla, a tedy velikosti vstupního elektrického signálu. Jedná se o intenzitní modulaci s přímou detekcí (IM-DD).

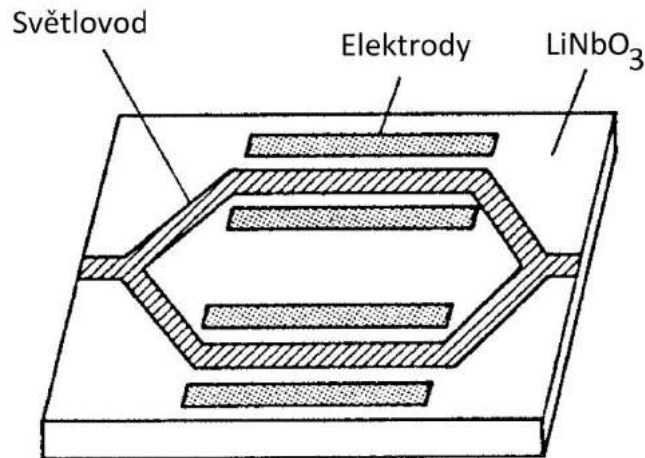
Při přenosu analogových signálů dochází k harmonickému zkreslení signálu vlivem W/A charakteristiky přijímače a vysílače. Vzniká tak šum, který zhoršuje S/N (poměr signál-šum). Zlepšením S/N lze dosáhnout předmodulováním signálu, např. frekvenční nebo fázovou modulací. Šířka pásma je zvláště u mnohavidových vláken omezena disperzí a také dobou odezvy optického vysílače a přijímače. Závisí také na vlnové délce a výkonu optického zdroje (laseru). Maximální frekvence analogového signálu, v rámci které je možné spolehlivě přenést signál, aniž by působením disperze došlo k nadměrnému zkreslení signálu, se pohybuje ve stovkách MHz pro mnohavidové vlákno.

Při přenosu digitálního signálu je situace jednodušší. Nesená informace je prakticky imunní vůči nelinearitám převodních charakteristik a kolísáním optické intenzity zdroje světla. Nejjednodušší digitální modulace je tzv. On-off keying, což v praxi znamená, že při log. 1 dioda svítí a při log. 0 nesvítí. Je možné aplikovat různé transportní kódy jak je známe z radiofrekvenční komunikace (NRZ, RZ, Manchester apod.). Lze dosáhnout velkých přenosových rychlostí typicky (jednotky - stovky Gb/s).

### 2.3.2 Externí modulace

Externí modulace využívá elektrooptického modulátoru k modulaci signálu na optickou nosnou. Modulátor pracuje na principu elektrooptického jevu, který ovlivňuje změnu fáze koherentního paprsku šířící se v substrátu elektrooptického materiálu, například niobičnanu lithného ( $\text{LiNbO}_3$ ). Fázová modulace se přemění na intenzitní optickou modulaci interferencí světla v intenzitním modulátoru. V praxi se používá elektrooptický (páskový) interferenční modulátor, což je modifikace Mach-Zehnderova interferometru. Elektrická intenzita vyvolá v každé větvi rozdíl konstanty šíření daného módu (Obr.12), to způsobí vznik fázového posuvu obou vln, a to se projeví ve výsledné

amplitudě vycházejícího paprsku.



Obr.12: Elektrooptický (páskový) interferenční modulátor (Převzato z [10])

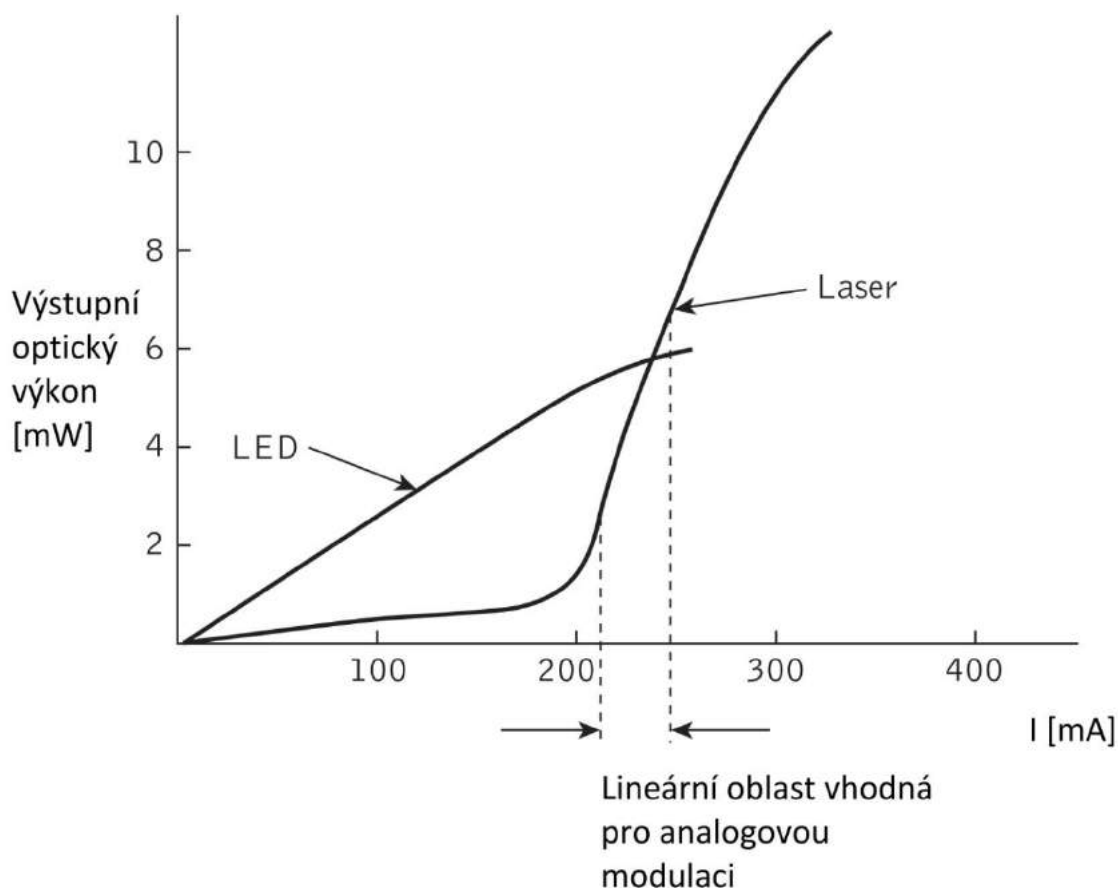
Výhody externí modulace jsou:

- tolerovány nelinearity ve W/A charakteristice laseru
- vhodný pro vyšší kmitočty nad 15 GHz
- elektrooptický modulátor snese větší napětí
- lepší poměr S/N oproti přímé modulaci
- může pracovat i bez napájení, pokud vynecháme LNA

Nevýhodou je však jejich vysoká cena a potřeba koherentního a opticky stabilizovaného zdroje, který poskytne konstantní intenzitu světla. Což může být u laserů problém, protože vyzařovaný výkon je velmi závislý na teplotě.

## 2.4 Zdroje optického záření

Jako zdroj optického záření se používají polovodičové diody LED a LD (Laserová dioda). Jak je vidět na Obr.13, laserová dioda potřebuje větší proud, než vůbec začne vyzařovat. Vazební účinnost (jak moc se optický výkon ze zdroje naváže do opt. vlákna) je u laseru asi 30%, kdežto u LED diody se pohybuje v rozmezí 1% – 30%. Pro LED diodu je vhodnější mnohavidové opt. vlákno s větším průměrem jádra. Z grafu na Obr.13 je na první pohled vidět, že LED dioda má lineárnější W-A charakteristiku. Ovšem v praxi je silně závislá na teplotě P-N přechodu, proto je potřeba charakteristiku linearizovat externě.



Obr.13: Porovnání W/A charakteristiky laseru a LED diody (Převzato z [7])

### 2.4.1 LED dioda

Impulsní odezva je poměrně velká, 2 – 50 ns. Může za to hlavně parazitní kapacita P-N přechodu. Hlavní výhodou oproti laseru je nízká cena a vysoká dostupnost. Používají se LED diody s vlnovou délkou okolo 850 nm.

### 2.4.2 Laserová dioda

Princip laseru spočívá ve stimulované emisi fotonů. U EEL (Edge Emitting Lasers) jsou plochy krystalu vhodně zabroušené a vzniklý Fabryho-Perotův rezonátor produkuje koherentní, monochromatické a monosměrové záření. U VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Lasers) je rezonátor tvořený Braggovým zrcadlem. Impulsní odezva je typicky 0,1 – 1 ns. W-A charakteristika je poznamenána nelinearitami (na Obr.13 nejsou vidět) vlivem defektů v krystalové mřížce a nestabilitě módu. Laserová dioda se značně zahřívá, proto je obvykle zapouzdřena i s fotodiodou, aby bylo možné stabilizovat její optický výkon. Laserové diody se vyrábějí v různých vlnových délkách. Volíme takovou, která bude kompatibilní s optickým detektorem a opt. vláknem.



## 2.5 Optické detektory

K přímému převedení světelného signálu na elektrický signál můžeme teoreticky využít různé optickým kabelem používá nejčastěji. S běžnou polovodičovou fotodiodou si zřejmě nevystačíme, protože má pro naše použití nízký mezní kmitočet. Fotodiody s krátkou odezvou se provozují v závěrném režimu s přiloženým závěrným napětím. Slabý signál z fotodiody je třeba zesílit zesilovačem s dobrými šumovými vlastnostmi. Fotodioda navíc představuje měkký zdroj napětí a je třeba ho impedančně přizpůsobit. K tomu se využívá transimpedanční zesilovač. detektory. My se budeme zabývat pouze fotodiodou, která se ve spojení s

### 2.5.1 P-I-N fotodioda

Obsahuje navíc semiizolační vrstvu I, která pohlcuje přebytečné fotony. Doba odezvy je pod 1 ns.

### 2.5.2 Lavinová fotodioda (APD)

Má navíc vnitřní zisk. Citlivost diody je mnohem větší než u PIN diody, díky tomu se používá při spojích na delší vzdálenost. Je provozovaná s vysokým závěrným napětím v řádu desítek až stovek voltů v blízkosti průrazu. Dosahují šířky pásma několik desítek až stovek GHz.

## 2.6 Srovnání dostupných optických převodníků

Na komerčním poli jsou dostupné převodníky obvykle pro distribuci audio nebo TV signálu. Specializované firmy vyrábějí i převodníky určené přímo k měření EMC.

Audio signál se přenáší optickým vláknem v digitálním proudu dat (PCM - Pulsně kódová modulace) přes systém Toslink, což je standardizovaný optický přenosový systém. Používá vlnovou délku červeného světla okolo 650 nm.

### 2.6.1 Konvertory pro TOSLINK

Převádí analogový audio signál na nekomprimovaný digitální signál. Vstupní signál je přiváděn na dvojici cinch konektorů nebo koaxiálního kabelu. Maximální vzdálenost je 20 m. Vzorkovací frekvence je do 48 kHz, vyrábí se i do 96 kHz. Cena setu vysílač/přijímač je okolo 1200 – 3000 Kč.



Obr.14: Datový extender Toslink/analog audio (Převzato z: <http://www.mader.cz/gembird-datovy-extender-digital-na-analog-audio-konvertor-spdif-rca>)

### 2.6.2 EMP Centauri OT1/1+1PUU-2

Optický převodník pozemních a satelitních TV signálů. Parametry:

- Kmitočtový rozsah: 88 MHz – 2150 MHz
- Vlnová délka světla: 1310 nm
- Minimální vstupní úroveň: 70 dB $\mu$ V
- Maximální vstupní úroveň: 90 dB $\mu$ V
- Cena kompletu TX/RX: cca 11.000,- vč. DPH.



Obr.15: Optický vysílač OT1/1+1PUU-2 (Převzato z [http://www.emp-centauri.cz/index.php?lang=en&page=prodview&id\\_kateg=1&id\\_pkateg=26&id=115](http://www.emp-centauri.cz/index.php?lang=en&page=prodview&id_kateg=1&id_pkateg=26&id=115))

### 2.6.3 Analogová optická linka LTX-5515

Tento převodník je již vhodný k přenosu měřených signálů například z EMC komory, nebo v rámci různých experimentů. Stejně tak je možné ho použít k přenosu video signálu. Elektrický signál převádí na digitální pomocí 12-bitového převodníku se vzorkovací frekvencí 100 MS/s. Má volitelný napěťový rozsah i vstupní impedanci. Výrobce udává parametry:

- Šířka pásma (- 3dB): 0 – 25 MHz
- Vstupní napěťový rozsah  $\pm 1$  V nebo  $\pm 5$  V
- Dosah až 10 km

- Zpoždění signálu okolo 300 ns/m opt. vlákna
- Přesnost:  $\pm 0.1 \%$
- Napěťový offset:  $\pm 20 \text{ mV}$
- Cena od 20.000,-

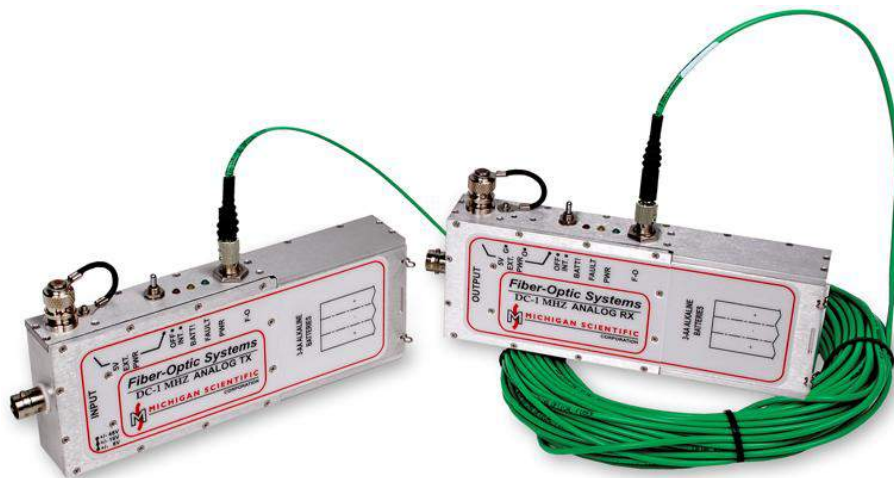


Obr.16: Optická linka LTX-5515 (Převzato z: <http://www.photoniconline.com/doc/fast-precision-analog-fiber-optic-link-ltx-0002>)

## 2.6.4 FO-HBST/HBSR

Analogová optická linka do 1 MHz používá k napájení baterie, jejichž výdrž je až 16 hodin. Výrobce neuvádí na jakém principu funguje. Parametry:

- Vstupní rozsahy:  $\pm 8 \text{ V}$ ,  $\pm 16 \text{ V}$ ,  $\pm 48 \text{ V}$
- Šířka pásma: 0 – 1 MHz (-3 dB)
- Maximální dosah 500 m
- Použití s mnohavidovým vláknem
- Odolnost vůči elektrickému poli 200 V/m (1 GHz – 18 GHz)
- Cena: neznámá, pravděpodobně v rozmezí 60.000,- – 100.000,- Kč



Obr.17: Optická analogová linka FO-HBST/HBSR (Převzato z <http://www.michsci.com/Products/fiberoptics/fo-hbst.htm>)

### **2.6.5 Model 732T/R**

Analogová/datová optická linka. Specifikace:

- Šířka pásma 0 – 10 MHz
- Vstupní rozsah  $\pm 2,5V$  nebo 0 – 5V
- Napájení  $\pm 15V$
- Cena neznámá

### **2.6.6 SLL-10M2G**

Firma Narda-Miteq vyrábí optické převodníky ve frekvenčním rozsahu 5 kHz – 18 GHz. Mají široký rozsah použití, od EMC testování až po distribuci radiofrekvenčního signálu. Jeden z mnoha vyráběných převodníků, SLL-10M2G má parametry:

- Šířka pásma 5 kHz – 2,5 GHz
- Maximální vstupní výkon 10 dBm
- Vlnová délka laseru 1550 nm
- Cena neznámá

### **2.6.7 LANGER EMV-Technik A300**

Jedná se o napěťovou sondy s 10-bitovým A/D převodníkem s rychlostí 12,5 MS/s. Parametry:

- Vstupní napětí  $\pm 1 V$
- Imunita vůči elektromagnetickému vyzařování 200 V/m
- Šířka pásma 5 Mhz
- Cena neznámá

## 3 NÁVRH OPTICKÉHO PŘEVODNÍKU

Nyní se zaměříme na návrh samotného převodníku. Stanovíme si požadavky a zvolíme vhodné řešení. Následující kapitoly mají ukázat logický postup řešení, ale v praktickém návrhu se často přehodnocovaly již uskutečněné kroky, a hledaly se alternativy, když zamýšlené řešení dílčího problému nešlo z nějakého důvodu uskutečnit. Výsledkem návrhu budou dvě samostatné jednotky - elektrooptický a optoeletrický převodník.

### 3.1 Stanovení požadavků na převodník

Ideálně bychom chtěli dosáhnout co největšího frekvenčního rozsahu, abychom mohli pokrýt širokou škálu EMC testů, jako například test vyzařování. Reálný frekvenční rozsah je ale jeden z hlavních parametrů, který určuje cenu celého převodníku. Přenos signálu bude uskutečněn na poměrně krátkou vzdálenost (do 6 m).

Převodník by měl sloužit k přenosu napětí ze sondy do měřicího přístroje. Sonda může být např. napěťová, nebo se může jednat o měření proudu pomocí bočníku. Tímto způsobem můžeme měřit přímo rušivé napětí, nebo se může jednat o diagnostiku při vystavení EUT různým podmínkám, třeba vf. rušivému poli.

Požadavky mimo jiné jsou co největší frekvenční rozsah včetně stejnosměrného signálu, maximální napětí alespoň 10 – 20 V, ochranu vůči přepětí ovým špičkám 40 V<sub>ss</sub>, odolnost vůči vf. rušení a pokusit se o možnost převodu i záporného napětí.

### 3.2 Návrh optického přenosového řetězce

Důležité je stanovit v jaké formě se signál bude přenášet, jakého způsobu bude použito k modulování optické nosné a volba komponentů bezprostředně souvisejících s optickým přenosem.

#### 3.2.1 Způsob modulace optické nosné

V kapitole 2.3 byly rozebrány různé způsoby, jak a v jaké formě lze přenášet signál po optickém vlákně. V úvahu připadají tyto možnosti:

- Intenzitní modulace s přímou detekcí - IM-DD
- Intenzitní modulace s přímou detekcí a předmodulovaných signálem - IM-DD s např. FM nebo PM
- Externí modulace - např. pomocí modulace založené na Mach-Zehnderově interferometru (MZM)
- Intenzitní modulace digitální - PCM přenášená pomocí On-off keying, analogový signál se převede na digitální

Tab.4: Porovnání vlastností modulací

Typ modulace	Frekvenční rozsah	Cena	Složitost
IM-DD	střední	malá	malá
IM-DD s FM nebo PM	střední	střední	střední
MZM	velký	vysoká	velká
On-off keying s PCM	malý	střední	střední

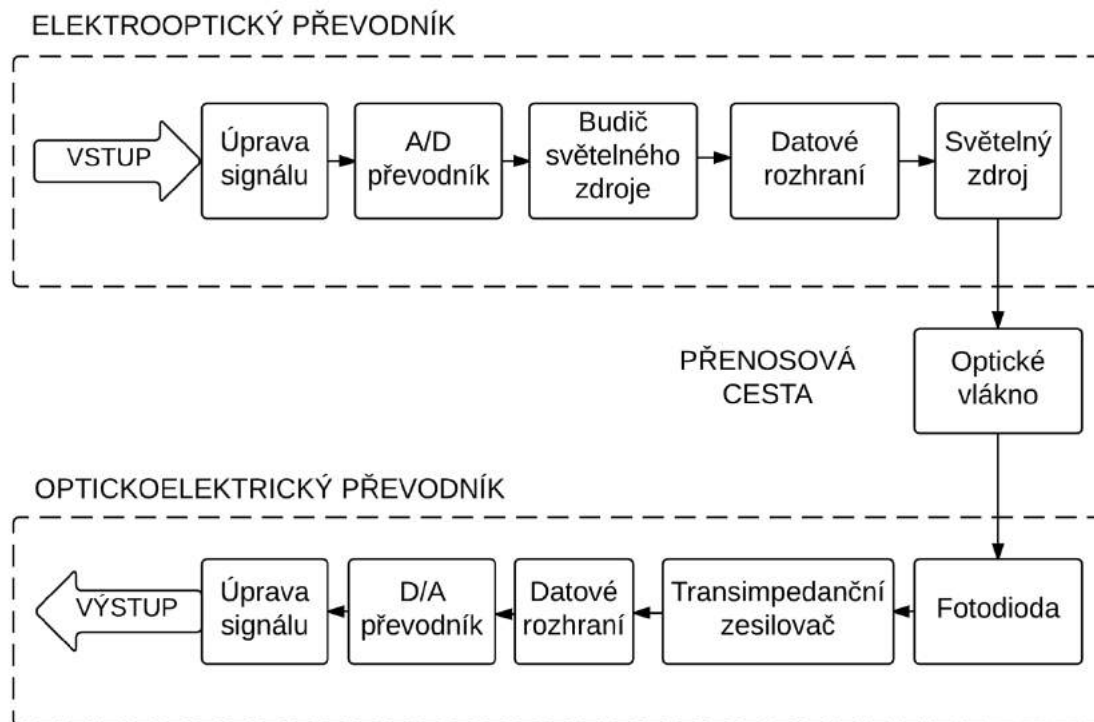
Externí modulace vyžaduje konstrukci světlovodu (např. v planární struktuře), což je konstrukčně náročné a jsou zapotřebí speciální nástroje, nebo zakoupení již hotového drahého řešení.

Podle Tab.4 by se mohlo zdát, že nejlepším řešením je IM-DD, ale toto řešení má nevýhodu v hrozbě útlumu na přenosové trase, které nebude konstantní, bude se měnit v závislosti na ohybu opt. vlákna, při manipulaci s kabely nebo nečistotách na konektorech. Těmto vlivům by šlo předejít nějakým systémem korekce zesílení (AGC), nebo předmodulováním signálu pomocí FM nebo PM modulace. Z důvodu požadavku na přenos i stejnosměrných signálů není předmodulování vhodné. Dalším problémem jsou drobné nelinearity na W-A charakteristice laseru a teplotní nestálost převodní charakteristiky LED diody. I přes všechny nedostatky je tento způsob přenosu pro nekritické aplikace dostačující, jednoduchý a oblíbený.

Čtvrtá možnost zaručuje přenos signálu optickým přenosovým řetězcem bez zkreslení (za předpokladu nulové chybovosti spojení). Nevýhoda je v potřebě signálu digitalizovat a také větší šířka pásma, než je frekvence samotného signálu, protože k přenosu zakódované informace (v tomto případě časového průběhu signálu) je třeba velkých bitových rychlostí. Předpokládáme přenos signálu v reálném čase s co nejmenším zpožděním.

Byla zvolena poslední možnost, protože nabízí dodatečné zpracování signálu a možnost kompenzovat nedokonalosti vstupních obvodů (např. napětový offset nebo chybu zesílení). Frekvenční rozsah bude pro některé aplikace dostačující, navíc by měla být zaručena velká přesnost měření.

Blokové schéma optického převodníku se zvolenou modulací by mělo vypadat zhruba takto:



Obr.18: Celkové blokové schéma optického převodníku

### 3.2.2 Stanovení maximální rychlosti přenosu

Jako nejslabší článek přenosového řetězce se ukázal být transimpedanční zesilovač (TIA). I když jsou dostupné TIA pro rychlosti i 11 Gb/s, jejich použití už není tak snadné. Jak už bylo řečeno, slouží k zesílení napětí, které se vytváří na svorkách fotodiody při osvětlení (např. laserem). Při velkých přenosových rychlostech může hrát parazitní kapacita vývodů fotodiody významnou roli. Z tohoto důvodu je snaha tuto kapacitu omezit na minimum. To znamená omezit délku přívodů, nebo umístit TIA co nejbližší k fotodiodě. Výrobci vychází tomuto požadavku vstříc, a výsledkem je integrování TIA do malého čipu, wafferu o rozměrech přibližně 1 mm x 1 mm a možností umístění přímo na pouzdře fotodiody. To poněkud znesnadňuje použití takové součástky s běžným vybavením. Řešením by mohla být konstrukce vlastního TIA, což není ani tolik složité. Problém je, že aktivní součástky by musely mít značnou šířku pásma (několik GHz).

Byly nalezeny pouze dva použitelné transimpedanční zesilovače: MAX3658 (622 Mb/s) a MAX3864 (2,5 Gb/s). Ovšem jeden z nich (MAX3864) se už v původním pouzdře nevyrábí a je jen obtížně sehnatelný. Výsledkem je tedy maximální přenosová rychlost 622 Mb/s při použití TIA MAX3658.

### 3.2.3 Výběr světelného zdroje

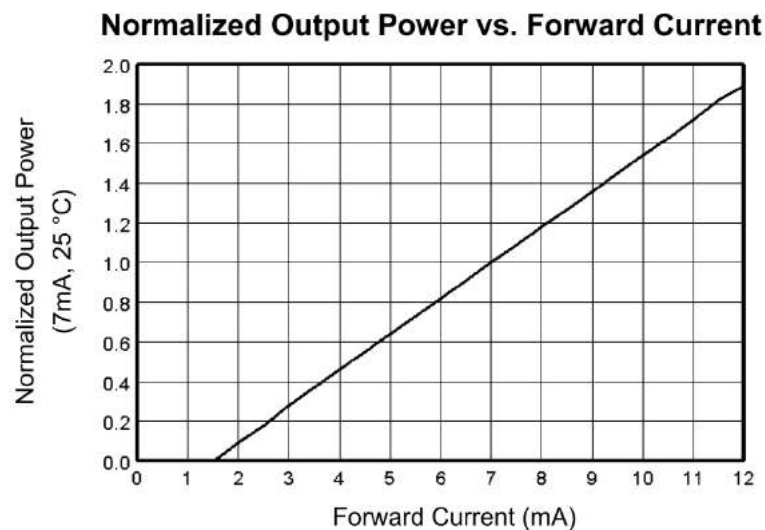
Při této zvolené rychlosti je dlouhá reakční doba LED diody nevyhovující. Zvolíme tedy laserovou diodu (LD). Jako levnější a více dostupné se zdají být LD pro mnohavidová vlákna s vlnovou délkou okolo 850 nm. Prodávají se přímo v kovovém pouzdře, na které je možné přímo připojit optický kabel (konektor ST), nebo je možné zakoupit toto

pouzdro samostatně a vložit do něj vybranou laserovou diodu. První řešení je ekonomičtější. Byla vybrána laserová dioda OPV315AT, která vychází na 23,5 € (při kurzu 27 Kč/1 € to je 635 Kč).



Obr.19: Laserová dioda OPV315AT (Převzato z: <http://optekinc.com/datasheets/opv315.pdf>)

Podle údajů výrobce by měla zvládnout bitové rychlosti až do 2,5 Gb/s. V pouzdře je spolu s fotodiódou, s pomocí které můžeme stabilizovat optický výkon laseru. Budící proud diody je maximálně 12 mA, v pulzním režimu až 48 mA. W-A charakteristika dané laserové diody jde vidět na Obr.20.



Obr.20: W-A char. laserové diody OPV315AT

### 3.2.4 Výběr světelného detektoru

Při 622 Mb/s potřebujeme reakční dobu okolo 1 ns. Musíme se také řídit závěrným napětím, který je TIA schopen poskytnout. To je jmenovitě 3,3 V. Při použití lavinové diody (APD) by bylo třeba vysoké závěrné napětí. Dané požadavky splňuje PIN fotodióda S5973 od firmy HAMATSU. Je použitelná do 1 GHz a to při závěrném napětí jen 3,3 V. Pouzdro fotodiódy TO-18 bude nutné vpravit do vhodného adaptéru na ST konektor. Celková pořizovací cena bude 780 Kč.





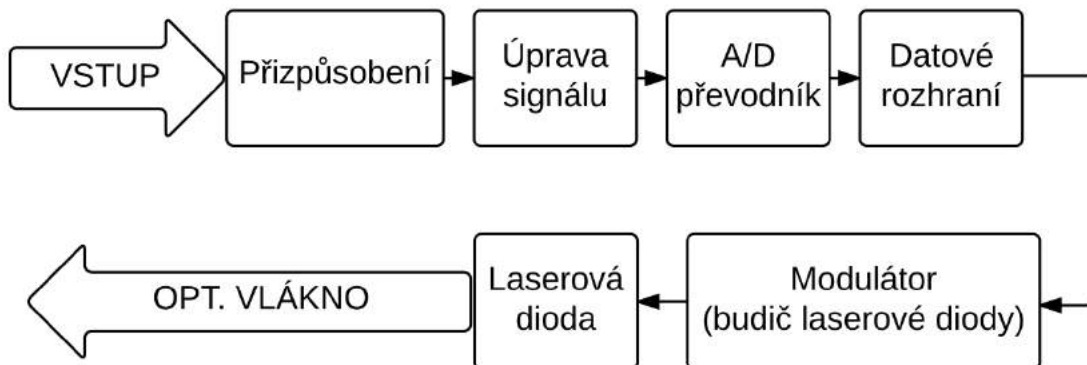
Obr.21: Adaptér fotodiody na konektor ST (Převzato z: [cz.farnell.com](http://cz.farnell.com))

### 3.2.5 Budič laserové diody

Texas Instruments nabízí budiče laserových diod, které přivedeným digitálním signálem přímo modulují LD. Umožňují nastavit například biasovací proud LD, i maximální proud LD, při kterém se budič deaktivuje. Snadno dostupné budiče se vyrábějí se až do 11,3 Gb/s, ale mají zároveň minimální frekvenci, se kterou ještě umí pracovat. Proto je vhodnější zvolit budič s menší přenosovou rychlostí. Byl vybrán ONET4201LD, který pracuje s přenosovými rychlostmi 155 Mb/s – 4,25 Gb/s. Má široké možnosti nastavení modulačního a pracovního proudu. Modulační proud lze nastavit od 5 mA do 85 mA.

## 3.3 Návrh elektrooptického převodníku

Elektrooptický převodník má za úkol vhodně upravit vstupní analogový signál (zesílení), převést ho na digitální, a výsledná data vyslat pomocí LD do opt. vlákna. To vše v reálném čase. Předpokládá se konstantní zpoždění každého vzorku. Blokové schéma na základě získaných poznatků je vidět na následujícím Obr.22.



Obr.22: Blokové schéma elektrooptického převodníku

### 3.3.1 A/D převodník

Přenosová rychlost, která byla stanovena, omezuje maximální vzorkovací kmitočet A/D převodníku. Protože přesnost optického převodníku nebyla stanovena, budeme uvažovat uspokojivé rozlišení A/D převodníku v řádech mV. V Tab.5 je srovnání vlastností A/D převodníku v závislosti na jeho bitovém rozlišení. Další chyby převodníku nejsou uvažovány. Jak je vidět, v rozlišení 1 LSB s 16 bitovým převodníkem se dostaneme pod 1 mV, což by mělo být dostačující. Při maximální rychlosti 38 milionů vzorků/s a 7 vzorky na 1 periodu dostaneme frekvenční rozsah asi 0 – 5 MHz.

Tab.5: Přehled rozlišení maximálních vzorkovacích frekvencí při přenosové rychlosti 622 Mb/s a vstupním napětí 20 V

Rozlišení [bit]	Rozlišení 1 LSB při 20 V [mV]	Rychlost vzorkování při 622 Mb/s
10	19,5	62,2 MS/s
12	4,9	51,8 MS/s
14	1,2	44,42 MS/s
16	0,3	38,8 MS/s
18	0,07	34,55 MS/s

Na základě těchto požadavků byl vybrán A/D převodník LTC 2161 s maximální frekvencí vzorkování 40 MS/s. Má rozsah vstupního napětí  $1 V_{\text{ss}}$  a  $2 V_{\text{ss}}$ . Protože má diferenciální vstup, v praxi to znamená maximální vstupní napětí  $\pm 1 V$ . Pokud je požadavkem vstupní rozsah napětí celého optického převodníku alespoň 10 – 20 V, je zřejmé, že vstupní signál budeme muset pro tyto hodnoty přizpůsobit (vstupní napětí zeslabit na vstupní úroveň A/D převodníku). V případě pouze kladných napětí je třeba i posunout napěťovou úroveň do rozsahu  $\pm 1 V$ , abychom využili plný rozsah převodníku.

A/D převodník má interní napěťovou referenci. Ovšem hodinový signál, který spouští konverzi je třeba generovat externě. Poslouží nám k tomu obvod LTC 6904, který má programovatelný rozsah kmitočtů 1 kHz – 68 MHz. Ačkoli je převodník napájen 1,8 V, toleruje vstup hodinového signálu 3,3 V.

Nabízí jak paralelní, tak sériový výstup dat. Sériový výstup LVDS (Low Voltage Differential Signaling) generuje velké bitové rychlosti, což vyžaduje značně rychlé číslicové obvody (FPGA). Naproti tomu paralelní výstup dat se s vhodnými obvody dá zpracovat efektivněji.

A/D převodník byl zapojen (příloha A5) podle katalogového listu výrobce. Vstup tvoří jednoduchý antialiasingový RC filtr.

### 3.3.2 Výběr transportního protokolu

Předpokládá se pouze jednosměrná komunikace. Vybraný laserový budič má pro vstupní digitální signál diferenciální vstup pro malé úrovně signálu. Možnosti tohoto datového vstupu odpovídají situaci, kdy přenášíme data pouze jedním vodičem. Z A/D převodníku dostáváme prakticky 2 datové toky. Jsou jimi bitové posloupnosti

jednotlivých vzorků (16 bitů pro zvolený převodník) a hodinový signál, který odděluje jednotlivé vzorky. Datová sběrnice je navíc paralelní, obsahuje tedy dohromady 17 výstupů. Naším úkolem je nyní data z A/D převodníku dopravit na vstup budiče LD. Popsaný případ odpovídá spíše asynchronní komunikaci, protože hodinový signál neodděluje jednotlivé bity, ale celý vzorek obsahující 16 bitů.

Mezi asynchronní komunikační protokoly patří například UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), Ethernet, nebo USB (Universal Serial Bus). Maximální rychlost UART se uvádí okolo 1 Mb/s, ve speciálních případech i více.

Existují mikrokontrolery s řadičem Ethernetu sice nabízí rychlosti 100 Mb/s až 1 Gb/s. Tato rychlost by sama o sobě stačila, ale pokud bychom chtěli posílat data v reálném čase, to znamená co jeden vzorek, to jeden paket, hlavičky protokolů by zabíraly většinu místa. Například hlavička protokolu UDP zabírá 8 bajtů, což je značný nepoměr vůči 2 bajtům, které potřebujeme přenést. USB 2.0 má maximální rychlost 480 Mb/s, navíc použití tohoto protokolu k takovému účelu je velmi netypické. Celkově tak možnosti protokolů asynchronní komunikace, které jsou schopny zprostředkovat mikrokontrolery, neodpovídají našim požadavkům.

Vhodným a častým řešením je FPGA (Field Programmable Gate Array), který by sloužil pouze k tomu, že by vyčetl data z A/D převodníku a pomocí jednoho diferenciálního výstupu LVDS je poslal do budiče LD.

Dalším alternativním řešením je zařadit mezi A/D převodník a budič laserové diody převodník z paralelního výstupu na sériový. Kompresi odpovídá 16:1 + hodinový signál. Tyto obvody najdeme pod označením serializer. Ten přečte paralelní výstup A/D převodníku a převede je na sériový výstup. Navíc do sériového toku dat zakóduje i informaci o hodinovém signálu, který potom na přijímací straně obnoví příslušný deserializer. Odpadá tak potřeba mikrokontroleru při zpracování dat alespoň ve vysílacím modulu optického převodníku.

Po předchozích úvahách může přirozeně vyvstat otázka, proč raději nepoužít A/D převodník přímo se sériovým výstupem. Tento výstup zahrnuje sériový výstup dat a hodinový signál. Tento hodinový signál však neodděluje jen jednotlivé vzorky, ale i jednotlivé bity. V tomto případě bychom museli použít serializer s kompresí 2:1, nebo modulátor, který by byl schopen tyto 2 informace složit do jedné. Případně na přijímací straně obnovit hodinový signál z datové. Paralelní výstup dat se ukázal být jako jednodušší řešení a proto byl zvolen A/D převodník s paralelním výstupem.

### 3.3.3 Serializer

Uvažované dostupné serializery jsou určeny hlavně pro převod RGB videosignálu ze zdroje, který má paralelní sběrnici a nijak tento signál nekomprimuje. Používá se například v automobilu pro přenos obrazu ze zadní kamery při couvání. Náš případ je v podstatě podobný. Přenášíme navzorkovaný analogový signál v reálném čase. Komprimaci nebudeme uvažovat, protože by vnesla do celého systému zbytečné zpoždění.

Většina převodníků přenáší kromě své jmenovité bitové šířky navíc informace o synchronizaci videa, redundantní bity pro řídicí signály a zabezpečení proti chybám (Tab.6). Ty snižují využitelnou šířku pásma. V Tab.6. můžeme vidět porovnání některých serializerů a počet bitů v jednom rámcu.

Tab.6: Datová prostupnost vybraných serializerů

Serializer	Jmenovitá bitová šířka	Skutečný počet přenášených bitů	Efektivní přenášená vzorkovací rychlost A/D převodníku při 622 Mb/s
DS90UR903	20	25	24,88 MS/s
DS90UR241	24	28	22,2 MS/s
DS92LV16	16	18	34,5 MS/s
MAX9271	16	24	25 MS/s

Navíc jak se ukázalo, že LVCMOS (Low Voltage CMOS) může být někdy zavádějící označení, které ne vždy označuje stejnou napětovou logickou úroveň. Například pro serializery je od Texas Instruments (v tabulce začínající písmenem D) je pro vysokou logickou úroveň minimální napětí 2 V. Kdežto pro námi zvolený A/D převodník LTC2161 je spodní hranice vysoké logické úrovně 1,3 V. Z tohoto důvodu byl zvolen MAX9271.

Serializer MAX9271 v každém hodinovém taktu posílá 24 bitů (v příslušném módu). Z 24 bitů tvoří 16 bitů samotná data, dále řídicí signály pro video a komunikační kanál mezi serializerem a deserializerem. Přenos některých bitů se dá deaktivovat (například synchronizační signály pro video), ale rámec zůstane 24 bitový. Těchto 6 uvolněných bitů lze využít pro zabezpečení proti chybám. Na výběr je CRC (Cyclic redundancy check) nebo Hammingův kód.

Kromě samotného paralelně/sériového převodu dat nabízí mnohé další funkce. Například nezávislý řídicí kanál mezi serializerem a deserializerem až 1 Mb/s. Jeho prostřednictvím lze ovládat z jedné strany obě zařízení, i další periferie se sběrnici I2C nebo UART.

Napájení pro digitální vstupy a výstupy (označené jako 0VDD) 1,8 V, aby byly digitální vstupy kompatibilní s A/D převodníkem. A to za cenu nekompatibility s mikrokontrolerem. S tím je nutné komunikovat přes posouvač logické úrovně mezi 1,8 V a 3,3 V. Napěťový překladač TXS0104E (příloha A3) byl zvolen s ohledem na to, že sběrnice vyžadují pull-up rezistory. Zapojení serializeru (příloha A6) bylo provedeno podle datasheetu.

Je třeba zmínit, že tento serializer není výrobcem explicitně určen pro použití v optických komunikacích. Jako přenosové médium se uvažuje koaxiální, nebo STP kabel. Úroveň signálu CML je však kompatibilní se vstupem zvoleného budiče LD (ONET4201LD). Navíc má 8b/10b kódování, které potlačuje stejnosměrnou složku.

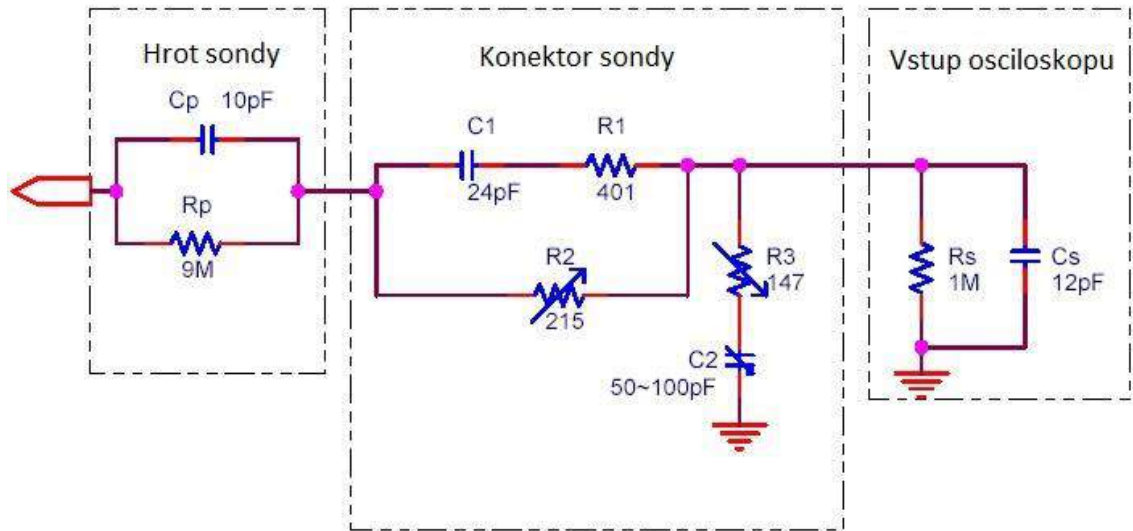
Serializer, který je výrobcem doporučený pro použití v optických sítích je MAX3690. Poměr komprese má 8:1, je možné ho použít i s námi zvoleným A/D převodníkem v double data rate módu, kdy se rámec rozdělí na 2x 8 bitů. Datasheet tohoto obvodu a deserializeru MAX3680 dobře popisuje doporučené zapojení a budič LD. Je však méně dostupný pro český trh a je také dražší.

### 3.3.4 Vstupní analogové obvody optického převodníku

Za normálních okolností by byl měřený obvod připojen přímo na měřicí přístroj. Ve

chvíli, kdy vkládáme mezi tyto dva prvky tento převodník, musíme na jeho vstup klást stejné požadavky. Mezi ty patří velká vstupní impedance, aby nedošlo k zatížení měřeného obvodu, a tím ke zkreslení měření.

Tento případ je obdobný, jako když vkládáme mezi měřený obvod a osciloskop osciloskopickou sondu s poměrem například 10:1 (Obr.23). Ta je tvořena napěťovým děličem se vstupní impedancí 10 MΩ. Navíc je dělič frekvenčně kompenzován kondenzátory a kapacitním trimrem lze kompenzaci doladit. Navíc lze přesně nastavit dělicí poměr.



Obr.23: Schéma osciloskopické sondy 10:1, Převzato z [25]

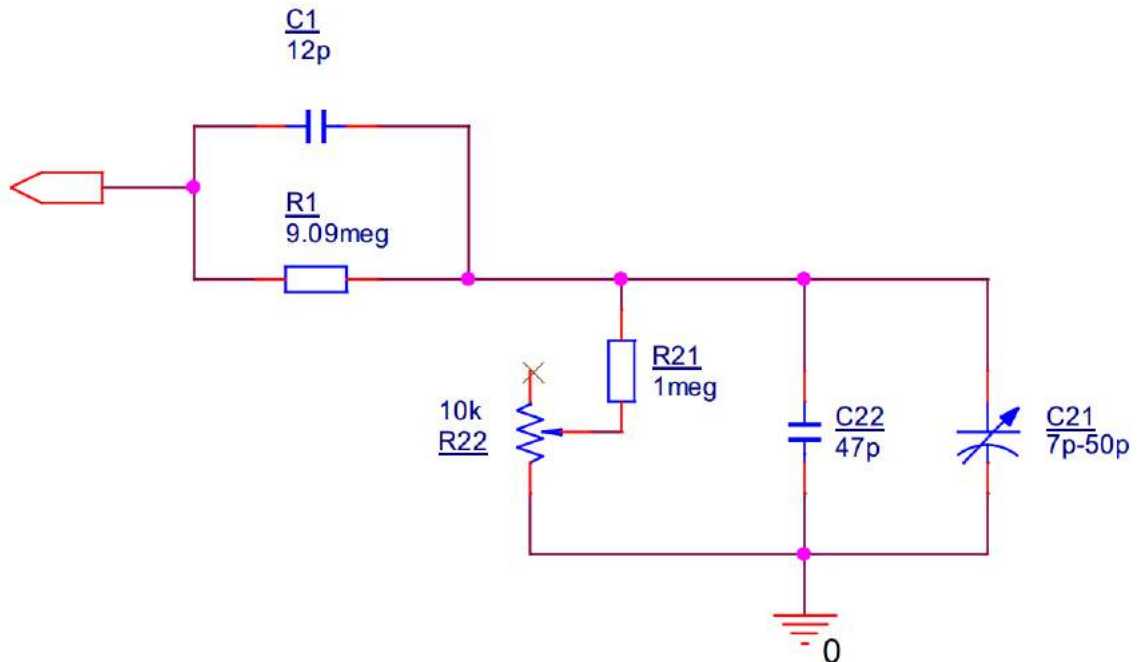
Pro naše účely bude postačovat napěťový dělič, který bude frekvenčně kompenzován. Kompenzace je důležitá, protože bude pracovat s frekvencí až do 5 MHz (případně 10 MHz). Tuto podmínku bude splňovat, pokud se budou časové konstanty obou rezistorů shodovat (vzorec 3.1). Zvolené hodnoty kondenzátorů přitom nesmí být příliš malé, aby nepředstavovaly pro vyšší kmitočty příliš nízkou vstupní impedanci a zároveň moc velké, aby neomezovaly šířku pásma.

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow \frac{1}{10} = \frac{R_2}{9,09 * 10^6 + R_2} \rightarrow R_2 = 1,01 \text{ M}\Omega \quad (3.1)$$

$$R_1 \times C_1 = R_2 \times C_2 \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{C_2}{C_1} \rightarrow \frac{9,09 \text{ M}\Omega}{1,01 \text{ M}\Omega} = \frac{C_2}{C_1} \rightarrow \frac{C_2}{C_1} = 9 \quad (3.2)$$

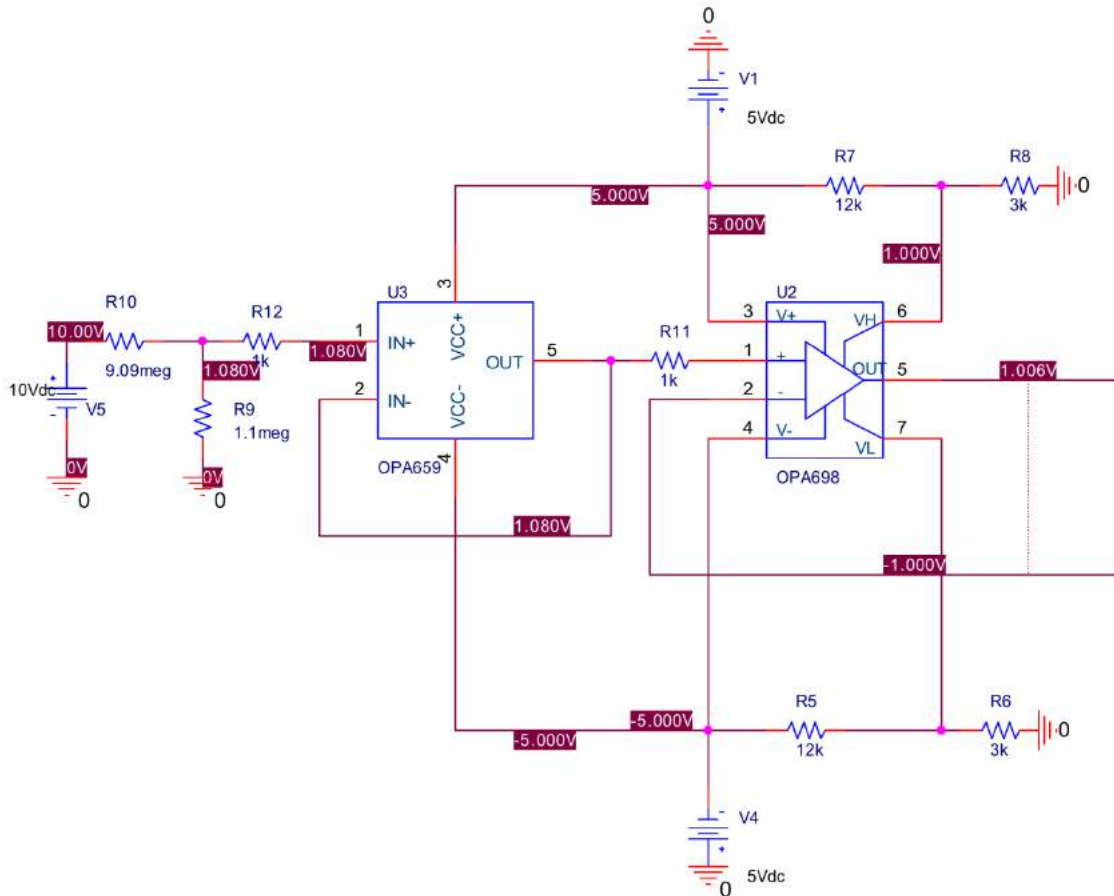
Spíše, než 9 MΩ rezistor je k dostání 9,09 MΩ. K tomu podle vzorce 3.1 pro napěťový dělič připadá R2 = 1,01 MΩ. Použijeme rezistor 1 MΩ a zbývající odpor 10 kΩ využijeme k doladění přesného dělicího poměru pomocí odporového trimru R22.

Kompenzační kondenzátory musí být v poměru vypočítaném ve vzorci 3.2. Zvolili jsme kapacity  $C1 = 12 \text{ pF}$  a  $C2 = 108 \text{ pF}$ .  $C2$  navíc rozdělíme na jeden kondenzátor a jeden kapacitní trimr pro doladění. Výsledný vstupní dělič je znázorněn na Obr.24. Parazitní kapacita použitých SMD rezistorů nejspíš nebude tak markantní, větší kapacitu bude mít vstupní konektor a operační zesilovač.



Obr.24: Kompenzovaný napěťový dělič

Pokud bychom tento vstupní napěťový dělič zatížili dalšími obvody, došlo by na něm k úbytku napětí, a tím ke zkreslení celého měření. Navíc je třeba tuto velkou vstupní impedanci přizpůsobit pro další obvody s menší impedancí, se kterými budeme pracovat. Za napěťový dělič přidáme operační zesilovač v zapojení napěťového sledovače. Běžné OZ nemají ideální nekonečně vysokou impedanci, ale pohybuje se řádově v  $\text{M}\Omega$ . Použijeme OZ, který má na vstupu JFET hradlo. Díky tomu jeho vstupní impedance dosahuje hodnoty  $10^{12} \Omega$ . Používá se např. na vstupech osciloskopů. Kompletní zapojení je v příloze A1.



Obr.25: Vstupní dělič se zesilovačem OPA659, který má velkou vstupní impedanci

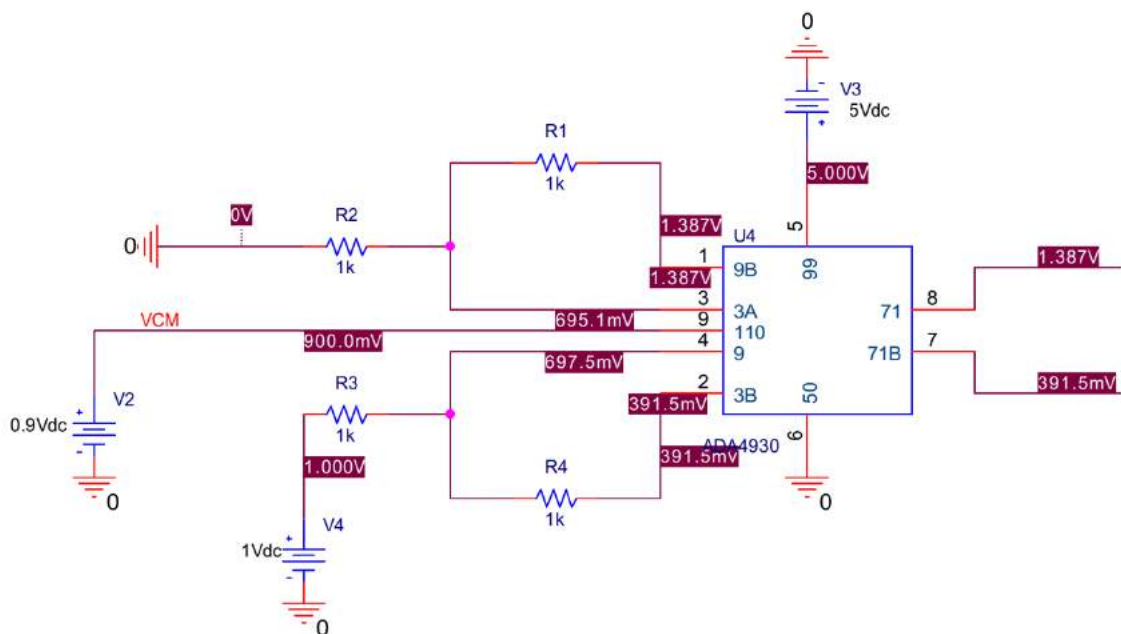
### 3.3.5 Ochrana proti přepětí

Požadavek byl i na odolnost vůči přepětovým špičkám. Vzhledem k vstupnímu frekvenčnímu rozsahu požadujeme co nejmenší vstupní kapacitu. Použitelnost některých součástek určených k tomuto účelu je tedy značně omezen. Mezi běžně používané prostředky k odstranění vlivu přepětových špiček řadíme různé Zenerovy a TVS diody.

Protože vstupní signál dělíme v poměru 10:1, projeví se přepětí např. 10 V pouhým jedním voltem. Vstupní OZ by měl zvládnout napětí v rozsahu svého napájecího napětí, tedy  $\pm 5$  V, což znamená  $\pm 50$  V na vstupu napětového děliče. Zajímavým řešením při ochraně A/D převodníku, na jehož vstup můžeme přivést maximálně  $\pm 1$  V, je použití limitujícího OZ. Např. OPA698. Ten má dostačující šířku pásma 450 MHz. Velikost limitovacího napětí určíme tak, že na určené piny ( $V_H$  a  $V_L$ ) toto napětí přivedeme přes jednoduchý dělič z napájecího napětí. Celkové zapojení lze vidět v příloze A1.

### 3.3.6 Symetrizace vstupního signálu

Nyní máme signál s napětím potřebné úrovně (min. -1 V a max. 1 V). Vstup A/D převodníku má ale diferenciální vstup. Prakticky by stačilo jeden vstup uzemnit. Potom by rozdíl mezi napětím na obou svorkách odpovídal vstupnímu napětí. V praxi, se ale diferenciální signál vztahuje k jiné napěťové úrovni než nulové. Je to z toho důvodu, že signál malé napěťové úrovně (např. 10 mV) se bude snáze zesilovat, když k němu připočteme určité předpětí. Diferenční signál má tu výhodu, že případné symetrické rušivé napětí má na obou vodičích stejnou velikost. Protože diferenční zesilovač zesiluje pouze rozdíl napětí na obou svorkách, toto napětí se vyruší. K symetrizaci vstupního napětí slouží symetrizující zesilovač ADA4930, který zároveň tvoří buffer A/D převodníku (příloha A1). Zesilovač byl zapojen podle katalogového listu jako napěťový sledovač. Na Obr.25 lze vidět jak zesilovač na výstupních svorkách vytvoří napětí vztažené k úrovni 0,9 V, toto napětí dodává A/D převodník ze vstupu VOCM.

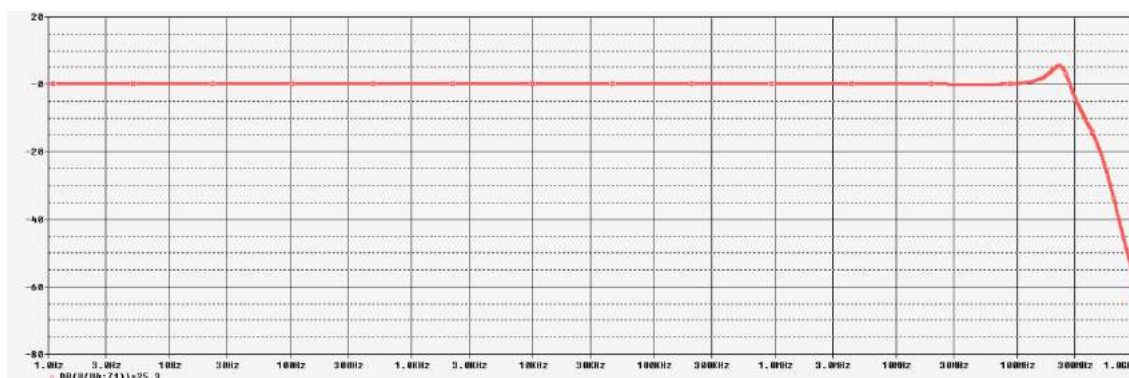


Obr.26: Ukázka symetrizace kolem napětí 0,9 V

### 3.3.7 Parametry vstupních analogových obvodů

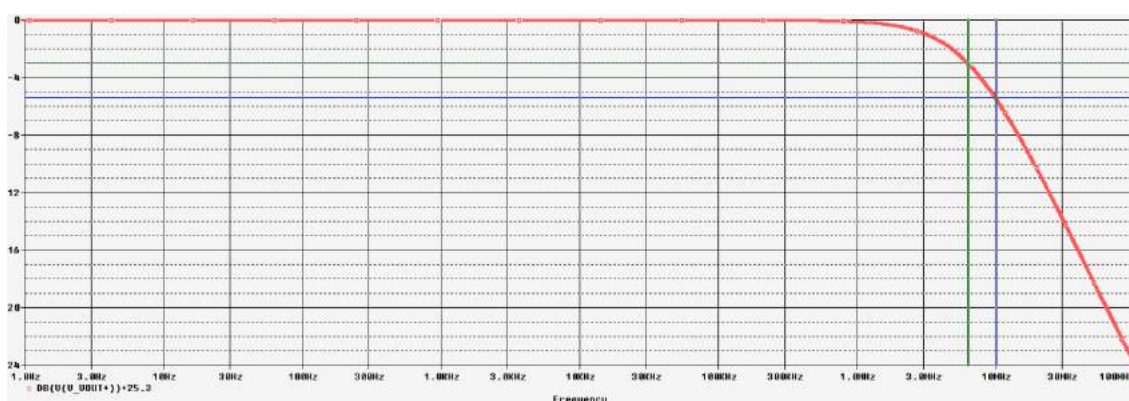
Na Obr.28 je zobrazena frekvenční charakteristika trojice zesilovačů v pořadí OPA659 - OPA689 a ADA4930. Jak je vidět, je tento řetězec použitelný až do frekvence 100 MHz. Poté se začne projevovat nestabilita zesilovačů a bylo by třeba např. do zpětné vazby zařadit kondenzátor.





Obr.27: Simulace frekvenční char. vstupních analogových obvodů bez antialiasingového filtru

Z Nyquistova kritéria o vzorkovací frekvenci vyplývá, že musíme zařadit mezi vstupní obvod a A/D převodník antialiasingový filtr. Předpokládáme vstupní frekvenci max. 10 MHz. Dosáhli jsme toho pomocí RC filtru s  $R = 25 \Omega$  a  $C = 1 \text{ nF}$ . Na Obr.29 lze vidět celkovou frekvenční charakteristiku. Ze simulací bylo odečteno zesílení  $-5,44 \text{ dB}$  na frekvenci 10 MHz a mezní frekvence vstupních obvodů ( $-3 \text{ dB}$ ) byl naměřena na 6,3 MHz. Při simulaci fázové char. jsme zjistili, že



Obr.28: Simulace frekvenční char. vstupních obvodů se zařazeným antialiasingovým filtrem

### 3.3.8 Mikrokontroler

Několik výše uvedených výše uvedených součástek potřebuje ke své správné funkci nastavit vnitřní registry, např.: A/D převodník, zdroj hodinového signálu, serializer, atd. K ovládání periferií byl zvolen 8-bitový mikrokontroler PIC16F18875. Má 35 vstupně/výstupních pinů, 2x sběrnici I2C/SPI a 1x UART. Bude napájen napětím 3,3 V. Přidáme k němu 3 signalizační diody (2 zelené a 1 červená) a 2 tlačítka (1 reset a 1 uživatelské). Kromě toho bude sloužit k monitorování proudu laserovou diodou. Zapojení mikrokontroleru je v příloze A5.

### 3.3.9 Budič laserové diody ONET4201LD

Parametry tohoto budiče již byly zmíněny. Protože tento typ neumožňuje komunikaci s MCU, nastavují se všechny hodnoty pomocí externích rezistorů. Je třeba nastavit hodnotu pracovního proudu atd. K tomu je důležité znát některé parametry laserové

diody, ty jsou shrnuty v Tab.7.

Tab.7: Parametry laserové diody OPV315

<b>Laserová dioda OPV315</b>		
<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>
Maximální hodnota budicího proudu ( $I_F$ )	12	mA
Maximální hodnota proudu v pulsním režimu	48	mA
Prahový proud ( $I_{TH}$ )	0,8 – 3	mA
Sériový odpor ( $R_S$ )	20 – 55	$\Omega$
Diferenciální účinnost ( $\eta$ )	20 – 30	$\mu\text{W}/\text{mA}$
Celkový vázaný výkon do 50/125 $\mu\text{m}$ optického vlákna ( $I_F = 7 \text{ mA}$ )	min. 200 – 300	$\mu\text{W}$
Proud fotodiodou při $I_F = 7 \text{ mA}$ ( $P_D$ )	30	$\mu\text{A}$
Teplotní koef. $\eta$ ( $T_C$ )	- 0,5	%/ $^\circ\text{C}$
Teplotní variance $I_{TH}$ ( $\Delta I_{TH}$ )	$\pm 1$	mA
Optický výkon na 850 nm	0,78	mW

Vypočteme podle datasheetu hodnoty rezistorů, kterými se nastavují parametry budiče. Nejprve vypočteme modulační proud. Špičkový výkon zvolíme pro začátek např. 0,4 mW:

$$I_{MOD} = \frac{P_{P-P}[\text{W}]}{\eta [\text{W/A}]} = \frac{0,4 \times 10^{-3}}{20 \times 10^{-6}} = \underline{\underline{20 \text{ mA}}} \quad (3.6)$$

Dále určíme hodnotu odporu pro zpětnovazební smyčku APC (Automatic Power Control):

$$R_{APCSET} = \frac{4,96 \text{ V}}{P_D} = \frac{4,96 \text{ V}}{30 \mu\text{A}} = 16,5 \text{ k}\Omega \rightarrow \underline{\underline{17,8 \text{ k}\Omega}} \quad (3.7)$$

Nyní vypočteme rezistor pro nastavení modulačního proudu 20 mA. Zvolíme si, že modulační proud může v rámci teplot 25  $^\circ\text{C}$  až 60  $^\circ\text{C}$  kolísat o 0,4 %, tomu odpovídá 4000 ppm:

$$R_{MODSET} = \frac{265 \text{ V}}{I_{MOD}} \times [1 + T_C \times (T[^\circ\text{C}] - T_0[^\circ\text{C}])] \quad (3.8)$$

$$R_{MODSET} = \frac{265 \text{ V}}{20 \text{ mA}} \times \left[ 1 + \frac{5000 \text{ ppm}}{^\circ\text{C}} \times (25 - 60) \right] = 11,4 \text{ k}\Omega \rightarrow \underline{\underline{10 \text{ k}\Omega}} \quad (3.9)$$

Další rezistor, jehož hodnotu je třeba určit nastavuje modulační teplotní koeficient pro kompenzaci teplotní závislosti diferenciální účinnosti  $\eta$ . Teplotní koeficient je podle

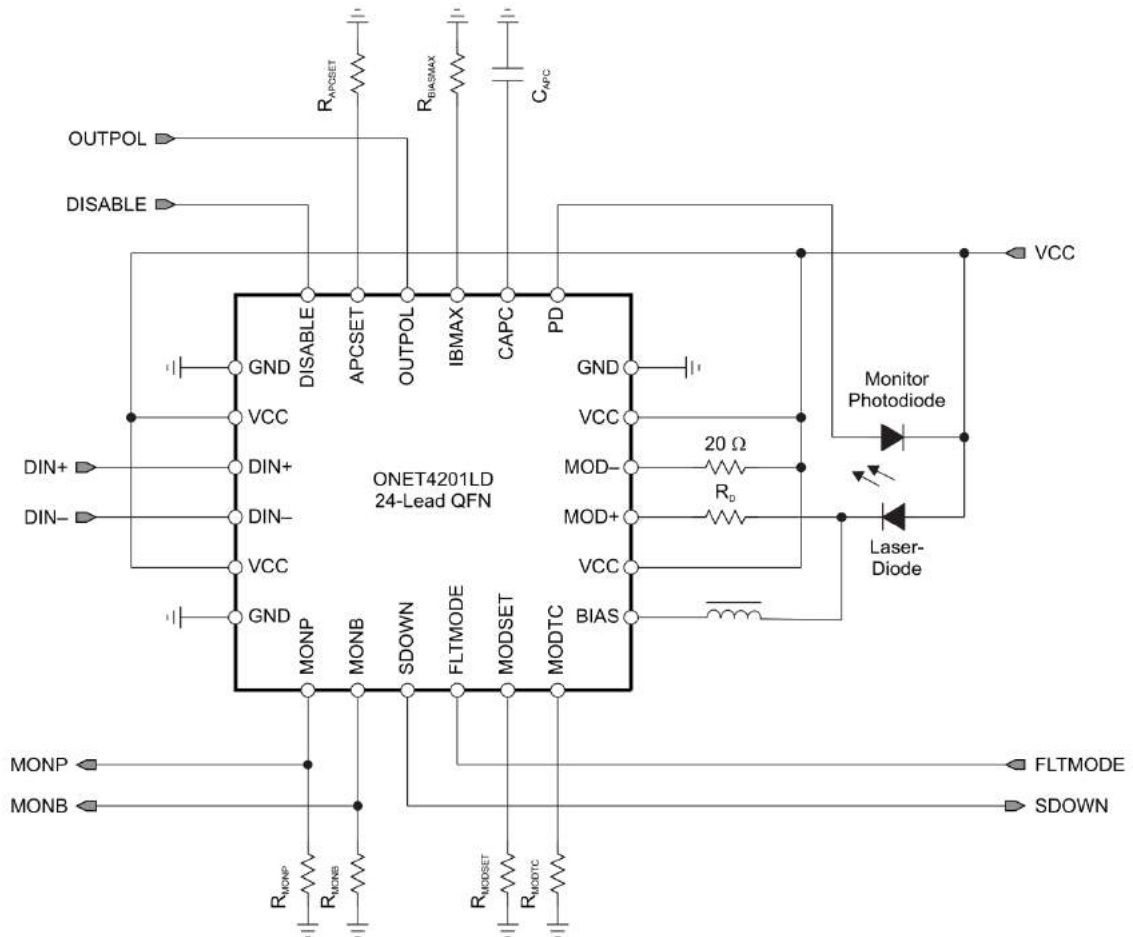
datasheetu - 0,5 %/ °C, což odpovídá 5000 ppm. Můžeme ho tedy spočítat:

$$R_{MODTC} = \frac{24 \Omega}{T_C - 630 \text{ ppm}} = \frac{24 \Omega}{5000 - 630} = 5,55 \text{ k}\Omega \rightarrow \underline{\underline{5,62 \text{ k}\Omega}} \quad (3.10)$$

Maximální hodnotu pracovního proudu určíme 3 mA, což je maximální hodnota prahového proudu:

$$R_{BIASMAX} = \frac{343 \text{ V}}{I_{BIASMAX}} = \frac{343 \text{ V}}{3 \text{ mA}} = 114,3 \text{ k}\Omega \rightarrow \underline{\underline{115 \text{ k}\Omega}} \quad (3.11)$$

Zbývá zvolit rezistory pro určení velikosti monitorovacího proudu, které jsou výstupem proudového zrcadla. Tyto hodnoty nejsou nijak kritické. Zvolíme monitorovací napětí pracovního proudu na asi 0,5 V, čemuž odpovídá  $R_{MONB} = 4,7 \text{ k}\Omega$  a rezistor na monitorovacím výstupu fotodiody necháme dle datasheetu na  $R_{MONP} = 200 \Omega$ .

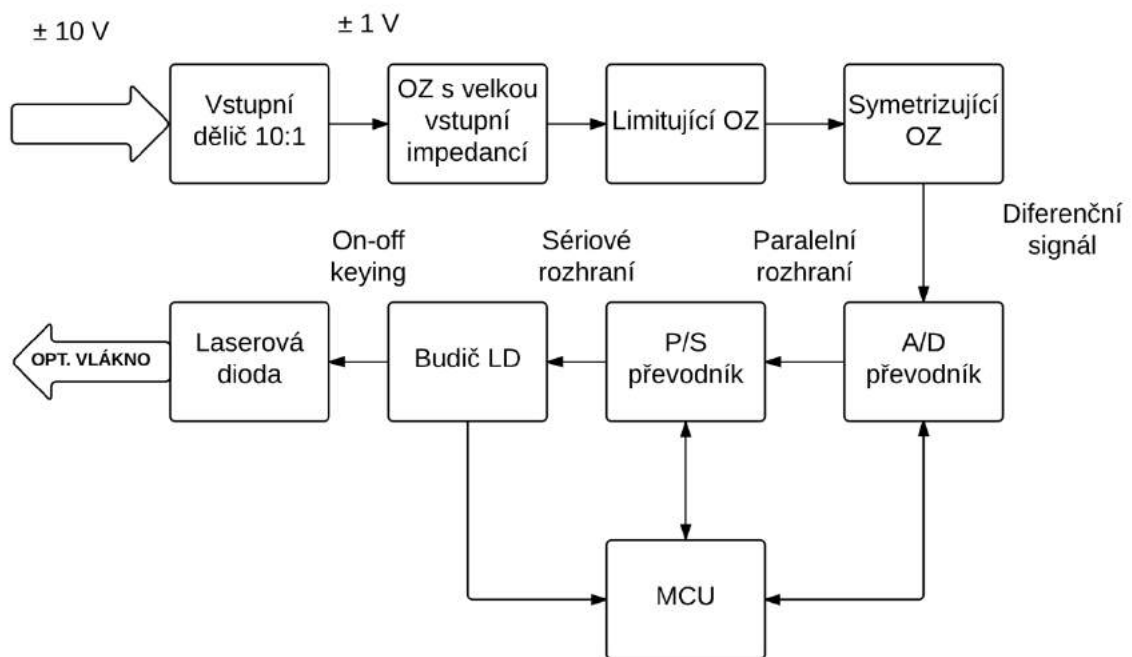


Obr.29: Doporučené zapojení budiče LD ONET4201LD (převzato z [18])

Doporučené zapojení nijak neřeší napětové špičky, které vzniknou v důsledku přímou modulací proudem. Pouze je naznačena induktivní zátěž na katodě LD, kterou je vhodné kompenzovat kondenzátorem. Anoda LD je připojena přímo na napájecí napětí a tyto napětové špičky se tedy mohou dostat do napájecí linky. V datasheetu novějšího modelu ONET110L jsou připojeny na každé větvi napájecí linky dvojice feritových jader BLM15HG601SN1, použijeme tedy tento způsob odrušení napětových špiček. Celkové zapojení lze vidět v příloze A4.

### 3.3.10 Zhodnocení návrhu elektrooptického převodníku (vysílače)

Vstupní napětí takto navrženého převodníku se může pohybovat v rozmezí  $\pm 10$  V. Ovšem není problém tento rozsah zvýšit výměnou odporů ve vstupním napětovém děliči a úpravou limitujícího napětí. Ovšem za cenu rozlišení. Maximální frekvence je určena vzorkovací rychlostí A/D převodníku. Při 20 MS/s a při splnění podmínky Nyquistova kritéria by maximální frekvence odpovídala 10 MHz. Reálná použitelná frekvence by se měla pohybovat v řádech MHz. Pokud by se podařilo dosáhnout vyšší přenosové rychlosti, zvýšila by se i maximální frekvence vstupního analogového signálu.



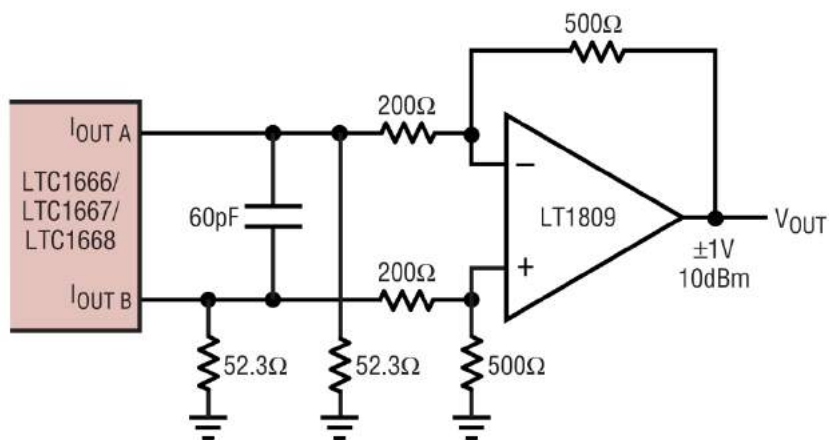
Obr.30: Blokové schéma optoelektrického převodníku (vysílač)

### 3.4 Návrh optoelektrického převodníku

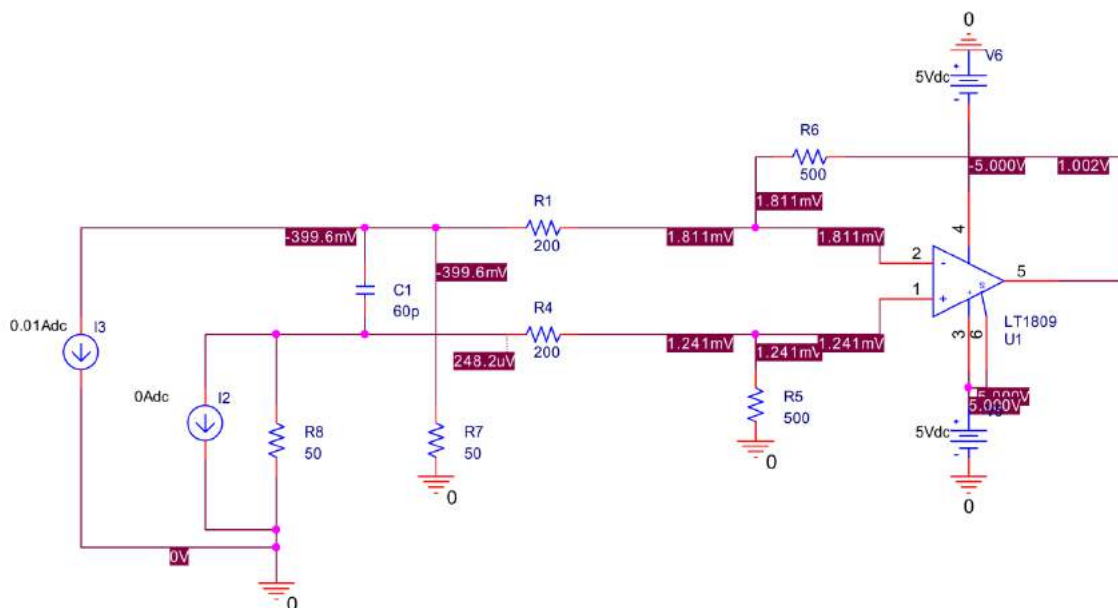
Dosáhli jsme převodu elektrického signálu na optický. Následující kapitola má za úkol objasnit návrh převodníku, který převede optický signál zpět na elektrický.

#### 3.4.1 Výběr D/A převodníku

Jeho požadované parametry jsou dány vybraným A/D převodníkem. Požadujeme alespoň 20-30 MS/s, paralelní rozhraní a rozlišení 16-bitů. Náš výběr se zúžil na jeden z mála vyhovujících převodníků, a to LTC1668. Dosahuje vzorkovací rychlosti až 50 MS/s. Má 2 diferenciální proudové výstupy s maximálním výstupním proudem 11 mA. Napěťový výstup dostaneme pomocí vhodného převodníkem proudu na napětí, datasheet nabízí dobrou inspiraci.



Obr.31: Konverze diferenciálního proudového výstupu na jednoduchý napěťový; převzato z [15]



Obr.32: Převod proudu z A/D převodníku na napětí

### 3.4.2 Transimpedanční zesilovač

Vlastnosti TIA MAX3658 již byly rozebrány. Obvod má filtrační výstup, který je připojený přes rezistorovou síť na napájení a spolu s externím kondenzátorem  $C_{\text{FILT}}$  zmenšuje vliv parazitní kapacity fotodiody, a tím zvyšuje citlivost přijímače. Doporučená kapacita kondenzátoru je dle datasheetu 400 pF. Proud fotodiodou můžeme sledovat na výstupu MON, který je spojen se zemí přes zvolený rezistor 10 k $\Omega$  (maximální monitorovací proud bude asi 220  $\mu\text{A}$ ).

### 3.4.3 Deserializer

Podle výrobce je k serializeru MAX9271 kompatibilní deserializer MAX9272, i když je 28-bitový. Má výstup hodinového signálu, který poukazuje při sestupné nebo nástupné (volitelné) na relevantní data na digitálních výstupech. Tímto hodinovým signálem lze přímo budít logické vstupy D/A převodníku, nebo jím spouštět přerušování mikrokontroleru.

S MCU komunikuje přes rozhraní I2C nebo UART. Na výstupu s označením LOCK je hodnota log. úrovně, která signalizuje správně naladěnou PLL smyčku, a tím i relevantní data na výstupu. Pokud je povolena detekce chyb, na výstupním pinu s označením ERROR signalizuje chybně přijatá data. Zapojení vychází z datasheetu a lze jej vidět v příloze B1.

Standardně by se mezi TIA a serializer zapojil ještě limitující zesilovač, který ještě více zesílí přijímaný signál z TIA. Nicméně deserializer má dostatečné zesílení a pravděpodobně bude schopen tuto funkci obstarat sám.

### 3.4.4 Výstupní obvody analogového optoelektrického převodníku

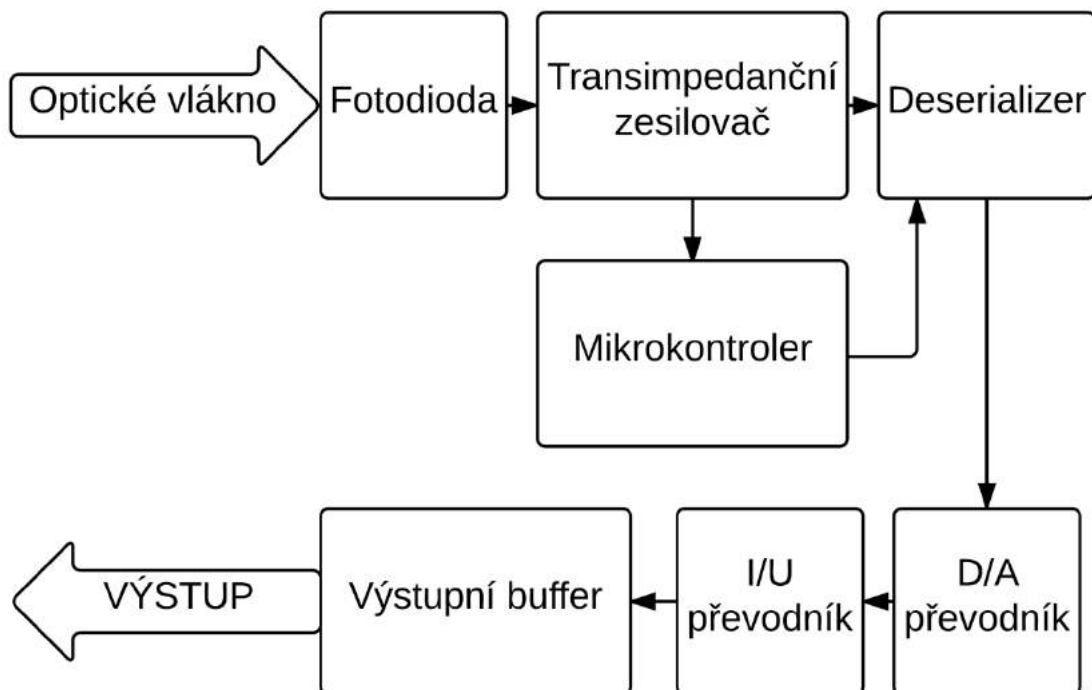
Operační zesilovače obvykle vyžadují napájecí napětí o něco vyšší, než bude na jejich

výstupu. V praxi bychom tak museli OZ napájet větším napětím, než 10 V. Už tak budeme potřebovat širokou škálu napájecích napětí. Nechme pro začátek výstupní napětí úměrné desetinně napětí vstupnímu. (Dělicí poměr 10:1). Svorčky pro napájení koncového OZ připravíme na možnost napájení jak  $\pm 5V$ , tak i více.

### 3.4.5 Mikrokontroler

V optoelektrickém převodníku je součástek, které vyžadují počáteční nastavení pomocí MCU výrazně méně – pouze deserializer MAX9272. Vystačíme si s menším mikrokontrolerem PIC16F1829. Má 17 vstupně/výstupních pinů. Stejně jako v předchozím případě 1x UART a 2x SPI/I2C.

### 3.4.6 Zhodnocení návrhu optoelektrického převodníku



Obr.33: Optoelektrický převodník (Přijímač)

### 3.5 Napájení

Elektrooptický převodník (vysílač), který by měl být umístěn např. v EMC komoře, je žádoucí napájet ze zdroje, který nebude představovat příliš velké rušení. Např. akumulátor s napětím 12 V. Použité součástky mají širokou škálu napájecích napětí. Potřebné napájecí úrovně budou distribuovány vhodnými DC-DC měniči nebo lineárními regulátory napětí. Nejprve určíme maximální proudy pro jednotlivé napájecí napětí:

Tab. 8: Spotřeba elektrooptického převodníku (vysílač)

Komponent	Maximální spotřeba			
	1,8 V	3,3 V	-5 V	+5 V
OPA659			32 mA	32 mA
OPA698			16 mA	16 mA
ADA4930	36 mA			35 mA
MAX9271	65 mA			
ONET4201LD		32 mA		
PIC16F18875		10 mA		
TXS0104E		5 mA		
<b>Celkem:</b>	<b>101 mA</b>	<b>47 mA</b>	<b>48 mA</b>	<b>83 mA</b>
<b>Celkem:</b>	<b>279 mA</b>			

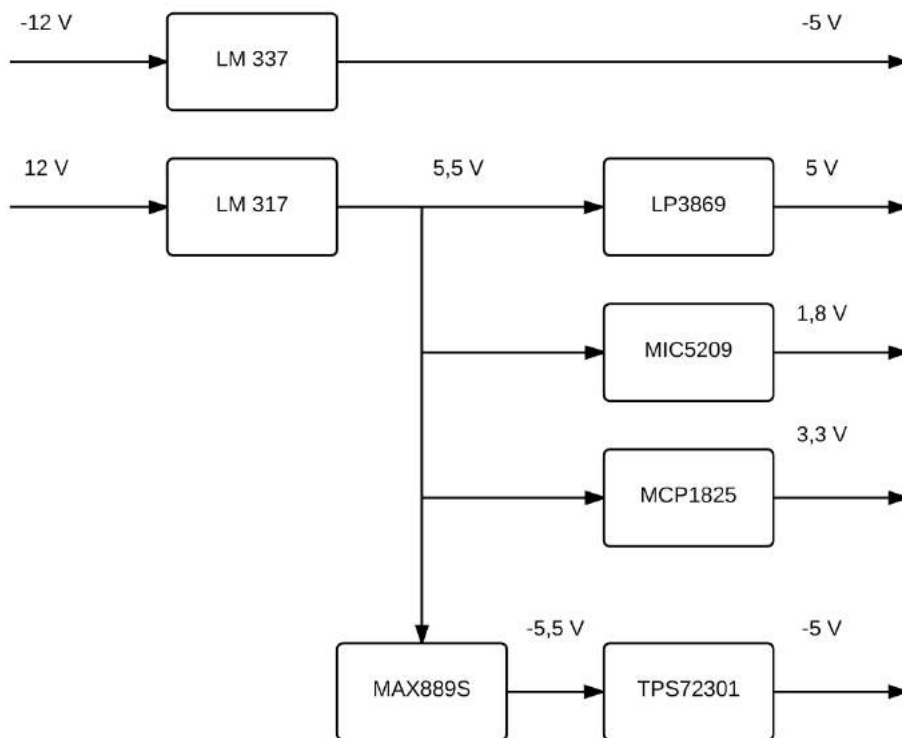
Tab. 9: Spotřeba optoelektrického převodníku (přijímač)

Komponent	Maximální spotřeba			
	1,8 V	3,3 V	-5 V	+5 V
MAX3658		26 mA		
MAX9272	36 mA	36 mA		
LTC1668			40 mA	5 mA
LT1809			20 mA	20 mA
THS4011			11 mA	11 mA
PIC16F1829		10 mA		
<b>Celkem:</b>	<b>36 mA</b>	<b>72 mA</b>	<b>71 mA</b>	<b>36 mA</b>
<b>Celkem:</b>	<b>215 mA</b>			

Vstupní napájecí napětí (12 V) upravíme na jednotlivé úrovně napájecího napětí pomocí lineárních regulátorů. K vytvoření záporného napětí z kladného použijeme invertující DC-DC měnič MAX889S. Ke své činnosti nepotřebuje externí cívku. Vyrábí se ve 3 provedeních lišících se ve spínací frekvenci (0,5 MHz, 1 MHz, a 2 MHz). My budeme mít k dispozici MAX889SESA se spínací frekvencí 1 MHz. Maximální vstupní napětí je 5,5 V. Výstupní napětí se nastavuje pomocí dvojice rezistorů ve zpětné vazbě. Je také možné na vstup zpětné vazby přivést vstupní napětí a provozovat měnič v tzv. "free-run" módu, kdy na výstupu měniče bude vstupní napětí ponížené o úbytek napětí na výstupní impedanci, která však činí pouze jednotky ohmů.



Za DC-DC měniče se obvykle zařazují LDO napěťové regulátory, protože takové prvky snižují výstupní zvlnění a potlačuje rušení, které je způsobeno spínací frekvencí. Údaj, který kvantifikuje potlačení rušení ze zdroje napětí je PSRR (Power-Supply Rejection) a udává se v dB. Pro nás je zajímavá jeho závislost na frekvenci. Běžně LDO mívají na nízkých frekvencích do 1 kHz 60-80 dB PSRR, potom strmě klesá. Vyrábějí se LDO, které dokáží účinně potlačovat i vyšší frekvence a tím i vyšší frekvence spínací, ale jejich nabídka je omezená a cena je o mnoho vyšší. Pro náš účel byl vybrán LDO TPS72301, který umí regulovat záporná napětí. Umí dodat proud až 200 mA. Výstupní napětí je regulovatelné, čehož využijeme pro přesné nastavení -5 V pro operační zesilovače. Na frekvenci 1 MHz má PSRR kolem 25 dB což není mnoho. Z toho důvodu byl za DC-DC měnič zařazen ještě navíc LC filtr.



Obr.34: Blokové schéma zdroje

### 3.6 Návrh desek plošných spojů

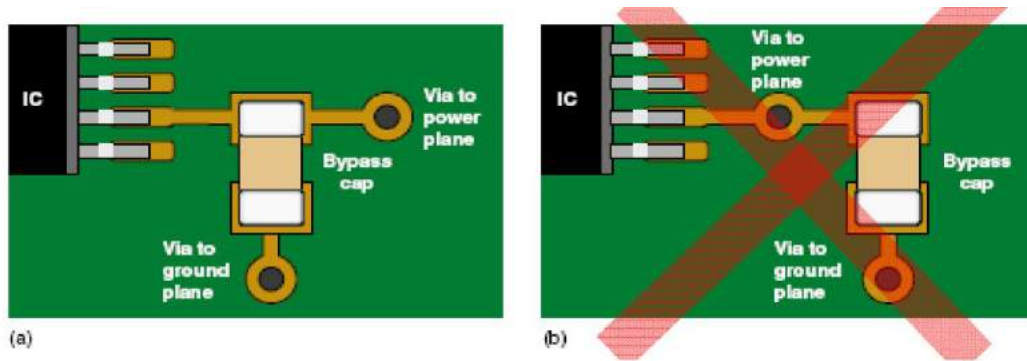
DPS byly navrženy v programu OrCad PCB Designer. Snaha byla se co nejvíce přiblížit správnému návrhu z hlediska EMC, ačkoli to nebylo vždy možné z důvodu použití pouze 2 vrstvé desky a technickými možnostmi výroby. Rozměry DPS jsou optimalizovány pro zabudování do stíněné krabičky AH102 (96 mm x 67 mm x 22 mm).

Tab.10: Parametry DPS (V závorce jsou uvedeny minimální rozměry ve výjimečných případech)

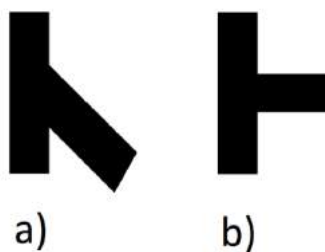
Parametr	
Materiál substrátu	FR4
Tloušťka mědi	35 $\mu$ m
Dodatečná úprava	Chemické pocínování
Způsob výroby DPS	Frézování
Minimální šířka spojů	0,35 mm (0,3 mm)
Minimální mezera mezi spoji	0,35 mm (0,3 mm)
Minimální průměr prokovů	0,5 mm (0,35 mm)

#### Pravidla respektované při návrhu (zvláště při výrobě DPS pomocí frézy):

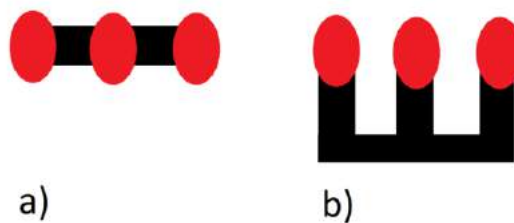
- Blokovací kondenzátory umístěné co nejbližší napájenému obvodu
- Co nejmenší plochy proudových smyček
- Eliminace slepých úseků mědi
- Proud protékající přímo přes filtrační a blokovací kondenzátory (Obr.36)
- Zbytečně nevést pod součástkami spoje a nenechávat pod nimi rozlitou měď
- Pájecí plošky SMD součástek napojovat rovnoběžně (Obr.39)
- Sousední pájecí plošky SMD součástek spojovat ve větší vzdálenosti od součástky (Obr.38)
- Na spodní straně DPS vést co nejméně spojů
- Oddělená digitální a analogová zem
- Co nejkratší spoje (zvláště u hodinových a VF signálů)
- Větvení spojů provádět pod úhlem minimálně 45° (Obr.37)
- Volba vhodných typů součástek
- Ochranné prokovy u hodinových signálů a na krajích DPS



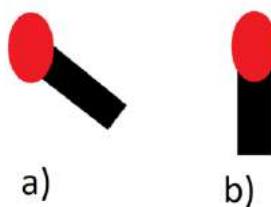
Obr.35: Připojení napájení do IC přes blokovací kondenzátor (Převzato z [26])



Obr.36: Větvení cest: a) špatně b) dobře



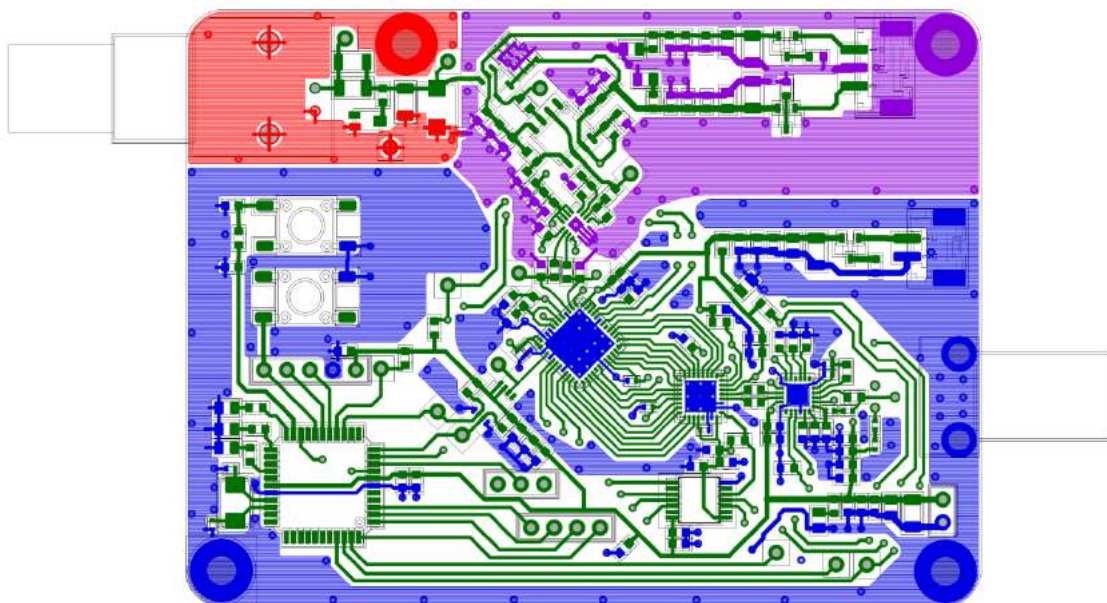
Obr.37: Spojení sousedních pinů SMD součástky: a) špatně b) dobře



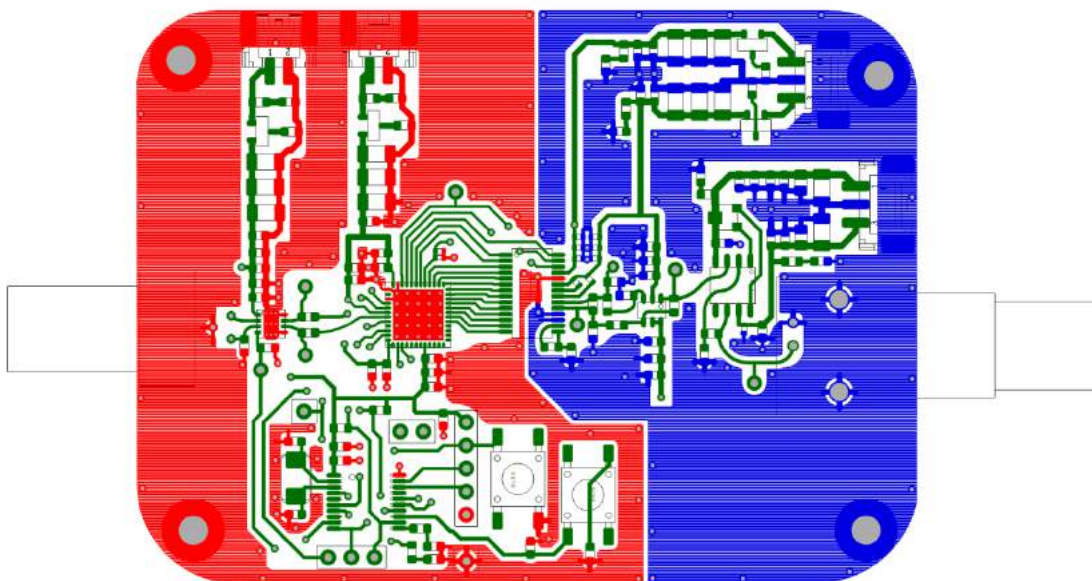
Obr.38: Napojení SMD pinů: a) špatně b) dobře

### 3.6.1 Analogová a digitální zem

Zemní plochy jsou spojené jednou krátkou cestou. Tím je zaručeno, že proud bude procházet právě tímto jedním bodem. Smyslem je zmírnit rušení mezi součástkami, které pracují s analogovým a digitálním signálem. U el.-opt. převodníku (Obr.40) tvoří červená plocha vstupní analogovou zem. Tato je spojena se vstupním BNC konektorem a do dalších analogových obvodů se dostává krátkým spojením do signálové země (fialová). Při umístění do stíněné krabičky by tato země byla spojena přímo se šasi a tvořila by tak stíněnou zem. Další rozhraní nastává u A/D převodníku, který obvykle tvoří hranici mezi analogovou a digitální zemí. Rozhraní bylo zvoleno mezi symetrizujícím zesilovačem a A/D převodníkem. Jeden z důvodů je poměrně složité rozmístění součástek v okolí A/D převodníku a nutnost spojit spodní plošku pouzdra (QFN) přímo na spodní stranu desky prokovy. Na rozhraní mezi symetrizujícím zesilovačem a A/D převodníkem je již signál vztažen k napětí Vocm, které je na výstupu A/D převodníku. U opto-el. převodníku je situace jednodušší, protože můžeme oddělit digitální a analogovu zem přímo pod pouzdem (SSOP) D/A převodníku (Obr.41).



Obr.39: Rozdělení zemních ploch vysílače (elektrooptického převodníku); červená - vstupní analogová zem, fialová - signálová zem, modrá - digitální zem



Obr.40: Rozdělení zemních ploch přijímače (optoeletrického převodníku); červená - digitální zem, modrá - analogová zem

### 3.6.2 Opravy 1. verze elektro-opt. převodníku

2. verze elektro-opt. převodníku obsahuje tyto opravy:

- Zlepšení návrhu z hlediska EMC
- Do A/D převodníku je přiveden pouze jeden hodinový výstup z generátoru LTC6904 a druhý vstup je uzemněn. Tím je vybrána CMOS úroveň signálu a toleruje hodinový vstup s napětovou úrovní 3,3 V
- Zmenšení DPS pro možnost zabudování do stíněné krabičky AH102
- Opraven footprint generátoru hodinového signálu LTC6904, který měl příliš malé mezery mezi pájecími ploškami
- Opraven footprint zesilovače ADA4930, u kterého bylo špatné číslování pinů
- ADA4930 již není v úsporném režimu, protože byl na odpovídající pin převedeno napájení
- Přidány některé blokovací kondenzátory a ostatní byly umístěny ještě blíže příslušným obvodům
- Odstraněny přebytečné prokovy
- Zmenšeny pouzdra některých blokovacích kondenzátorů z 0603 na 0402
- Opraveny footprinty pro LED diody
- Opravené napojení pinů součástek podle Obr.38 a Obr.39
- Odstraněna měď zpod součástek
- Zvětšení fontu písma pro nápisy

- Byla vyřazena smyčka APC (Automatic Power Control) u budiče laserové diody ONET4201LD, z důvodu nekompatibilní laserové diody OPV315AT (opačně připojená fotodioda v pouzdře)
- atd.

### 3.6.3 Provedené opravy 2. verze elektro-opt. převodníku

Tyto úpravy byly provedeny během oživování přímo na DPS:

- Vstup pro povolení výstupů u napěťového překladače TXS0104E se nepovedlo řídit logickým signálem z MCU, bylo provedeno přímě spojení tohoto pinu s napájením
- Budič laserové diody ONET4201LD nejspíše vyhodnotil některé vynechané rezistory APC smyčky jako FAULT podmínku (stav, kdy se na některých pinech omylem očitne Vcc nebo GND) a tudíž vyřadil budič z činnosti. Pin č. 10 určuje, co se v takovém případě stane. Buď se připojí na zem a v případě FAULT podmínky se budič deaktivuje, nebo se připojí na napájení a budič pouze upozorní na FAULT podmínku a pokračuje ve své činnosti. Na pin č.10 tedy bylo převedeno napájecí napětí 3,3 V pomocí drátku.
- Byl přidán 1 k $\Omega$  rezistor mezi vstupní dělič 10:1 a transimpedanční zesilovač OPA659
- Piny serializeru MAX9271 s číslem 18 a 19 byly odpojené od GND, aby komunikační protokol s MCU byl I2C.
- Komunikační protokol serializeru byl změněn na I2C a tudíž bylo nutné přivést signály sběrnice I2C do serializeru

## 4 REALIZACE OPTICKÉHO PŘEVODNÍKU

Následující text popisuje, realizaci návrh optického převodníku. Cílem je výroba a oživení 3 desek plošných spojů - elektrooptický převodník (vysílač), optoelektrický převodník (přijímač) a zdroj k napájení prototypů.

### 4.1 Software

Aby mohl celý převodník správně fungovat, musíme nejprve správně inicializovat periferie a nastavit potřebné parametry. Na vysílací straně se jedná o tyto komponenty: A/D převodník, serializer, zdroj hodinového signálu a budič laserové diody. Na přijímací straně deserializer. Pojdme se podívat, jaké parametry je nutno nastavit, a jak se jednotlivé periferie ovládají.

#### 4.1.1 Mikrokontroler PIC16F18875

Protože vstupy a výstupy sběrnic I2C a SPI nejsou na výchozích pinech, přemostíme sběrnici na námi zvolené piny.

#### 4.1.2 A/D převodník

A/D převodník komunikuje pomocí sběrnice SPI. Podle datasheetu je doporučeno provést po přivedení napájení softwarový reset. To je provedeno zápisem binární hodnoty 1xxxxxxx do registru A0. Tento bit se sám po provedení resetu vynuluje. Protože serializer čte vstupní data při nástupné hraně, je třeba invertovat výstupní hodinový signál z A/D převodníku nastavením 3. bitu v registru A2. Základní nastavení lze také provést přivedením požadovaných logických úrovní na příslušné piny.

#### 4.1.3 Serializer

Existuje několik možností, jak nastavit registry tohoto obvodu. Opět lze využít pro základní nastavení přivedení Vcc nebo GND na příslušné piny. Pro více možností nastavení je k dispozici sběrnice I2C nebo UART. UART komunikace je poměrně složitá, každý zápis obsahuje několik rámců jako např. synchronizační, potvrzovací atd. Ovládání pomocí I2C sběrnice je o mnoho jednodušší, protože posíláme jen adresu zařízení, registru a data do registru. Základní inicializace pro náš účel představuje nastavení 24 bitového módu, data čtená při nástupné hraně, zakázání vertikální a horizontální synchronizace a detekce chyb pomocí lichého paritního bitu. Další nastavení jsou volitelné.

#### 4.1.4 Zdroj hodinového signálu LTC6904

Jako poslední nastavíme výstupní frekvenci oscilátoru, čímž uvedeme celý vysílač do chodu. Obvod obsahuje pouze 2 registry. Pomocí nich nastavujeme děličku a frekvenci vnitřního oscilátoru. A/D převodník je v režimu spánku, dokud se na hodinovém vstupu neobjeví hodinový signál s frekvencí větší, než 300 kHz. Rovněž serializer potřebuje ke své funkci hodinový signál s minimální frekvencí závislou na jeho módu. Zapnutím výstupu tohoto oscilátoru aktivujeme i ostatní obvody.

### **4.1.5 Další možnosti ovládání periférií vysílače**

Na vstup mikrokontroleru je přivedeno napětí (LD MONITOR z budiče laserové diody), ze kterého lze odvodit proud laserovou diodou. To může být převedeno vnitřním A/D převodníkem na binární hodnotu a přepočteno na proud. Dále je zde signalizace FAULT podmínky (již popsáno). Signál ADC\_OF (viz. schéma) je ve vysoké logické úrovni, pokud vstupní napětí na A/D převodníku je mimo rozsah (větší, než 1 V nebo menší jak -1 V). DPS pro vysílač dále obsahuje jedno uživatelské tlačítko a 3 LED diody. Pomocí DISABLE\_DRIVER lze vypnout budič laserové diody.

### **4.1.6 Deserializer**

Základní nastavení je již zajištěno hodnotami logických úrovní na příslušných pinech. Další nastavení jako např. zesílení vstupního signálu či změna spreading faktoru se provádí přes sběrnici I2C. Podmínka pro správné fungování obvodu je, aby nastavení určitých parametrů bylo stejné jako v serializeru. Základní nastavení určuje šířku datové sběrnice, povolení či zakázání vertikální a horizontální synchronizace pro video, typ zabezpečení proti chybám a nastavení typu sběrnice pro komunikační kanál.

### **4.1.7 Další možnosti ovládání periférií přijímače**

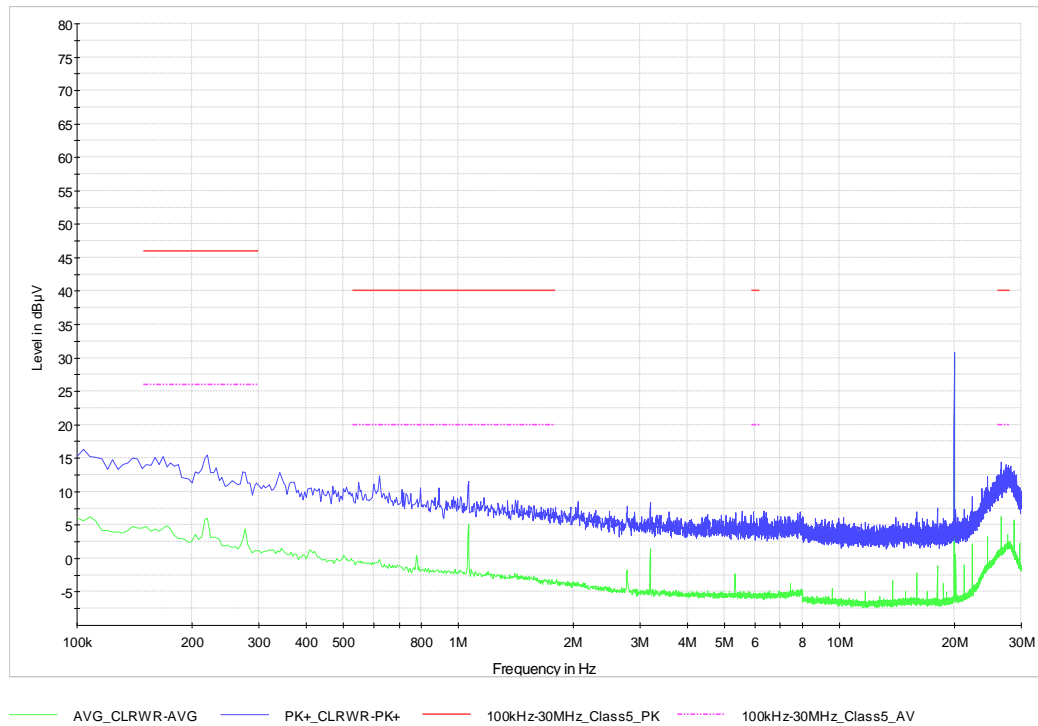
Na mikrokontroler je přiveden monitorovací výstup z TIA MAX3658, ze kterého lze odvodit proud fotodiodou a tím úroveň přijímaného signálu. Je zde také indikace LOCK (to znamená, že se deserializeru podařilo obnovit hodinový signál a data ze vstupního signálu) a ERR (právě přijímaný rámec obsahuje chyby). Na DPS se nachází 1 uživatelské tlačítko a 2 LED diody.

## **4.2 Výsledky měření**

Byla provedena série měření v EMC komoře a za pomoci funkčního generátoru a osciloskopu. Z hlediska EMC je nejdůležitější prvek elektrooptický převodník. S ním byl v EMC komoře přítomen i realizovaný napájecí zdroj. Ve vyzařovacích charakteristikách se projevil hodinový signál s kmitočtem 20 MHz a jeho násobky. Na frekvencích mezi 400 MHz - 500 MHz a násobcích těchto frekvencí je patrný výstupní signál ze serializeru. Největší rušení v měřeném rozsahu se projevilo na frekvenci okolo 2 GHz. Nejspíš je způsobeno vyzařováním vodivých cest mezi serializerem a laserovou diodou, na přívodech a pouzdře laserové diody.



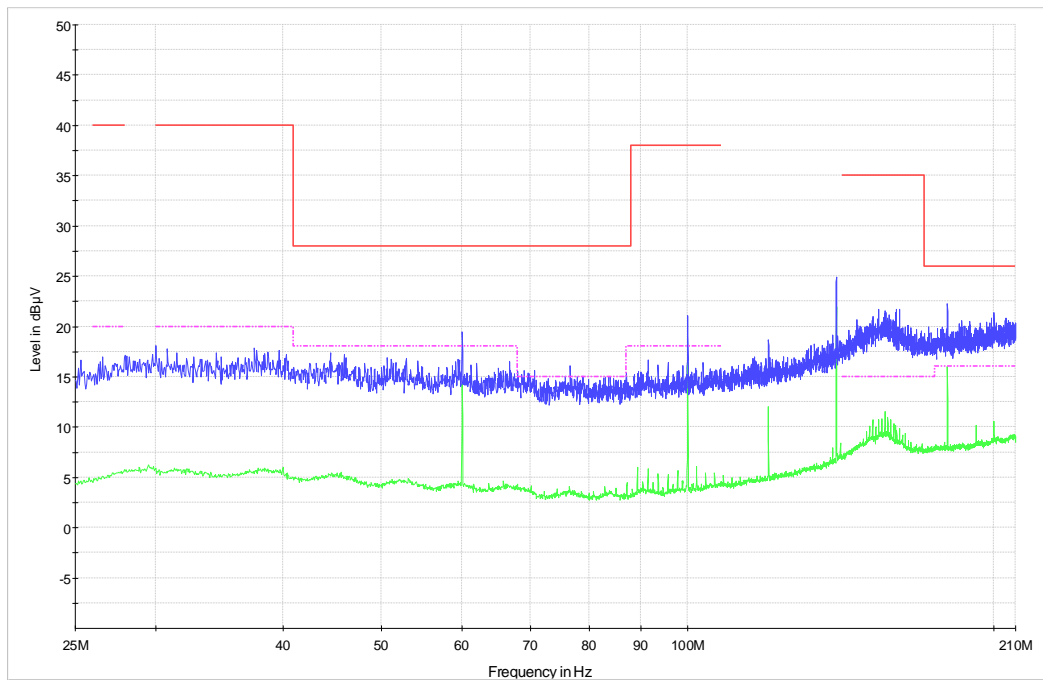
## 4.2.1 EMC měření vyzařovací charakteristiky dle normy CISPR 24 ed.4



Obr.41: Vyzařované emise 100 kHz - 30 MHz

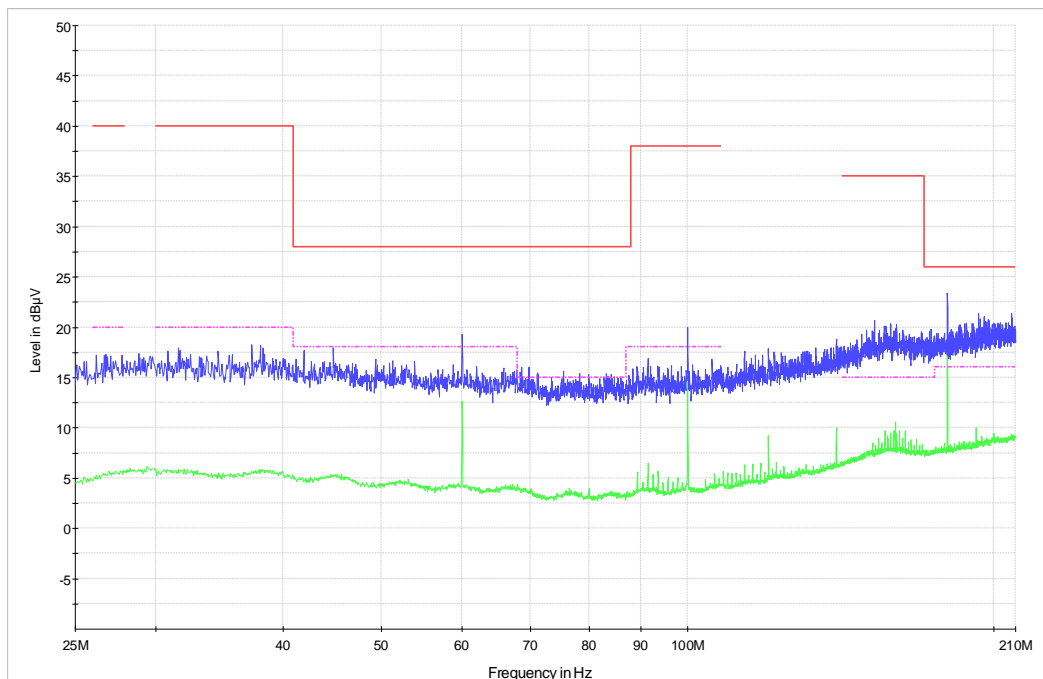


Obr.42: Uspořádání pracoviště při měření vyzařovaných emisí (1GHz - 2,6 GHz)



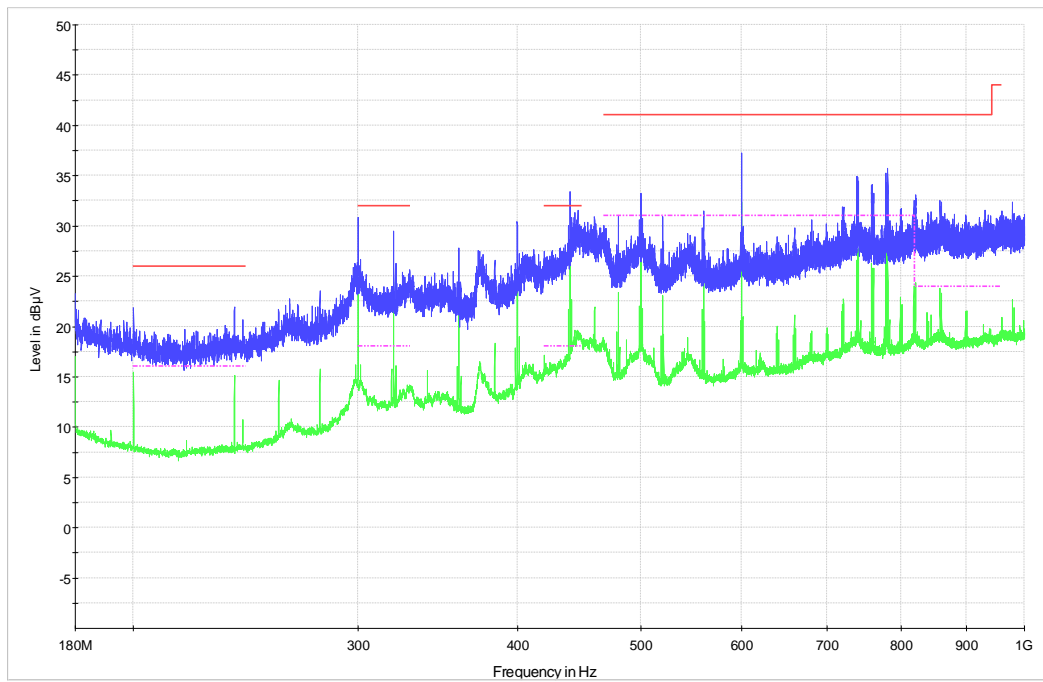
— AVG\_CLRWR-AVG — PK+\_CLRWR-PK+ — 25MHz-310MHz\_Class5\_PK — 25MHz-310MHz\_Class5\_AV

Obr.43: Vyzařované emise 30 MHz - 200 MHz, horizontální polarizace



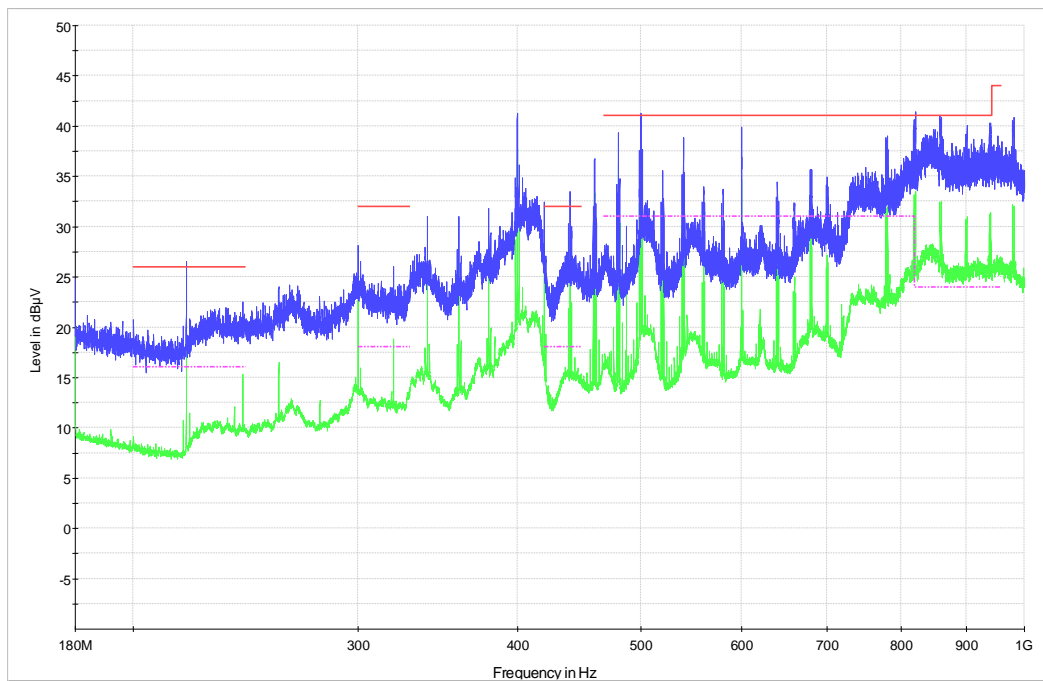
— AVG\_CLRWR-AVG — PK+\_CLRWR-PK+ — 25MHz-310MHz\_Class5\_PK — 25MHz-310MHz\_Class5\_AV

Obr.44: Vyzařované emise 30 MHz - 200 MHz, vertikální polarizace



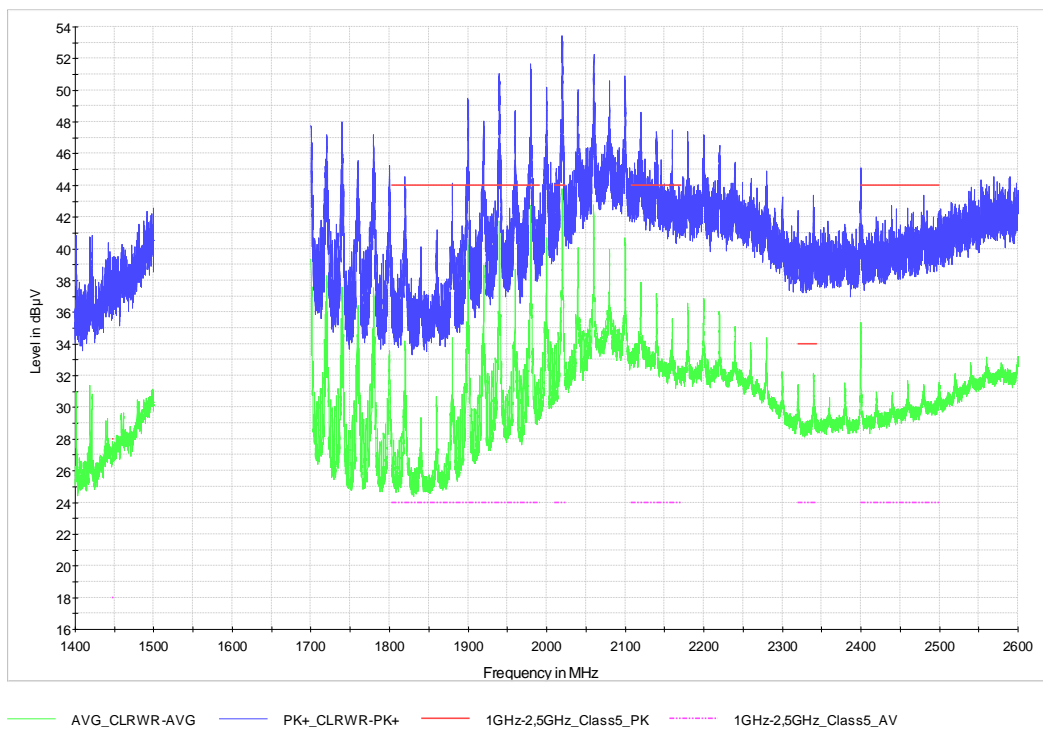
— AVG\_CLRWR-AVG   
 — PK+\_CLRWR-PK+   
 — 200MHz-1GHz\_Class5\_PK   
 - - - 200MHz-1GHz\_Class5\_AV

Obr.45: Vyzařované emise 200 MHz - 1 GHz, horizontální polarizace

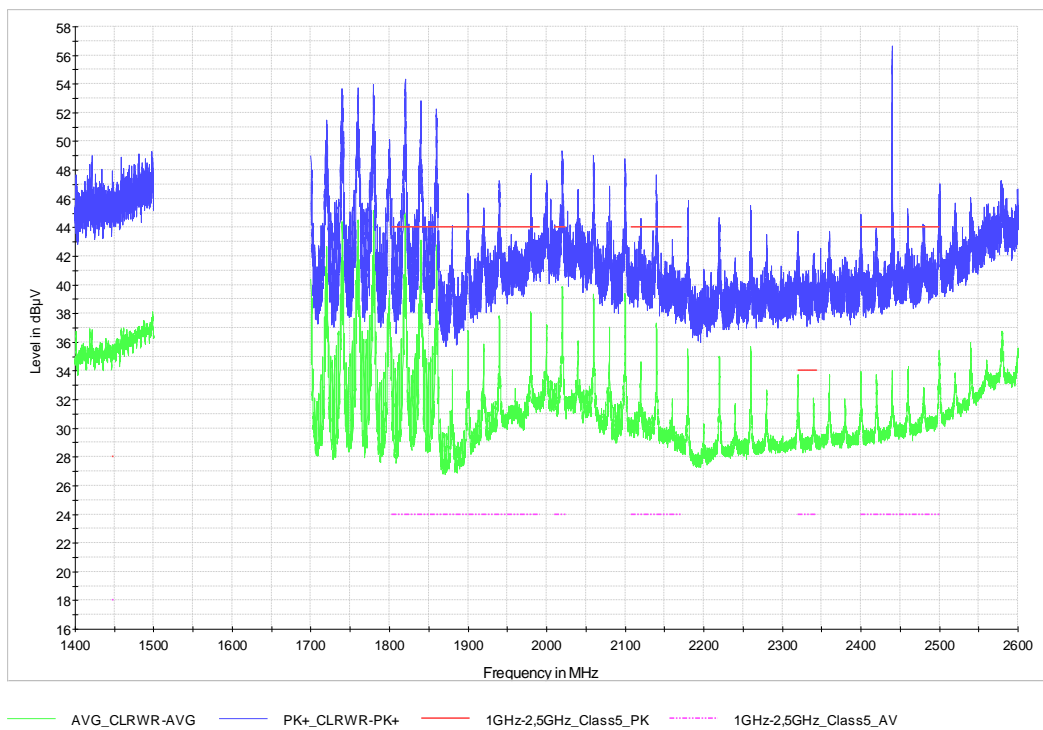


— AVG\_CLRWR-AVG   
 — PK+\_CLRWR-PK+   
 — 200MHz-1GHz\_Class5\_PK   
 - - - 200MHz-1GHz\_Class5\_AV

Obr.46: Vyzařované emise 200 MHz - 1 GHz, vertikální polarizace

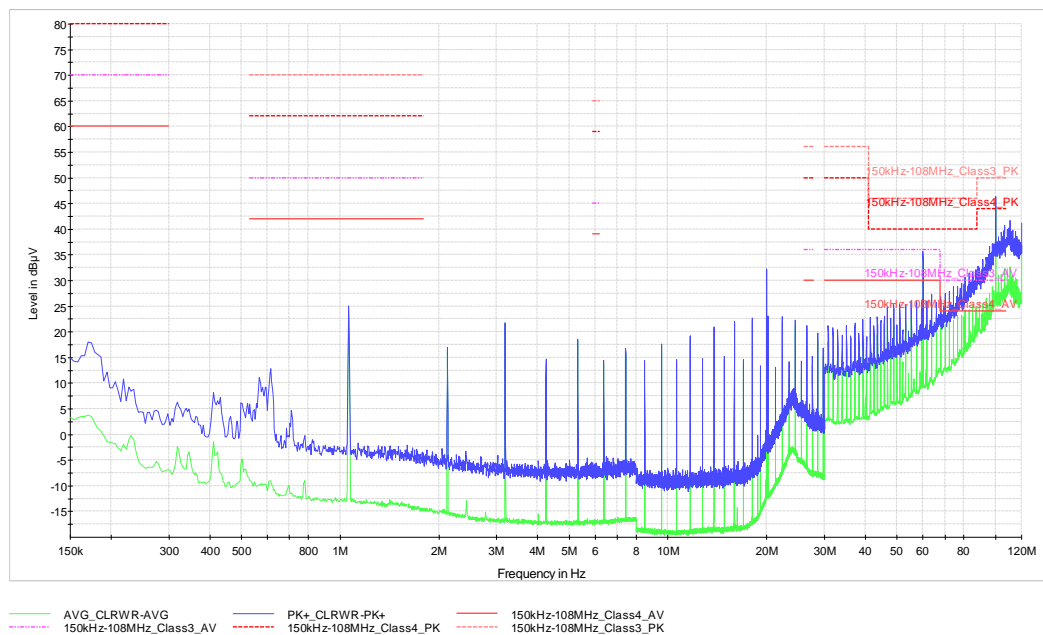


Obr.47: Vyzařované emise 1 GHz - 2,6 GHz, horizontální polarizace, na vynechaných úsecích není norma definována

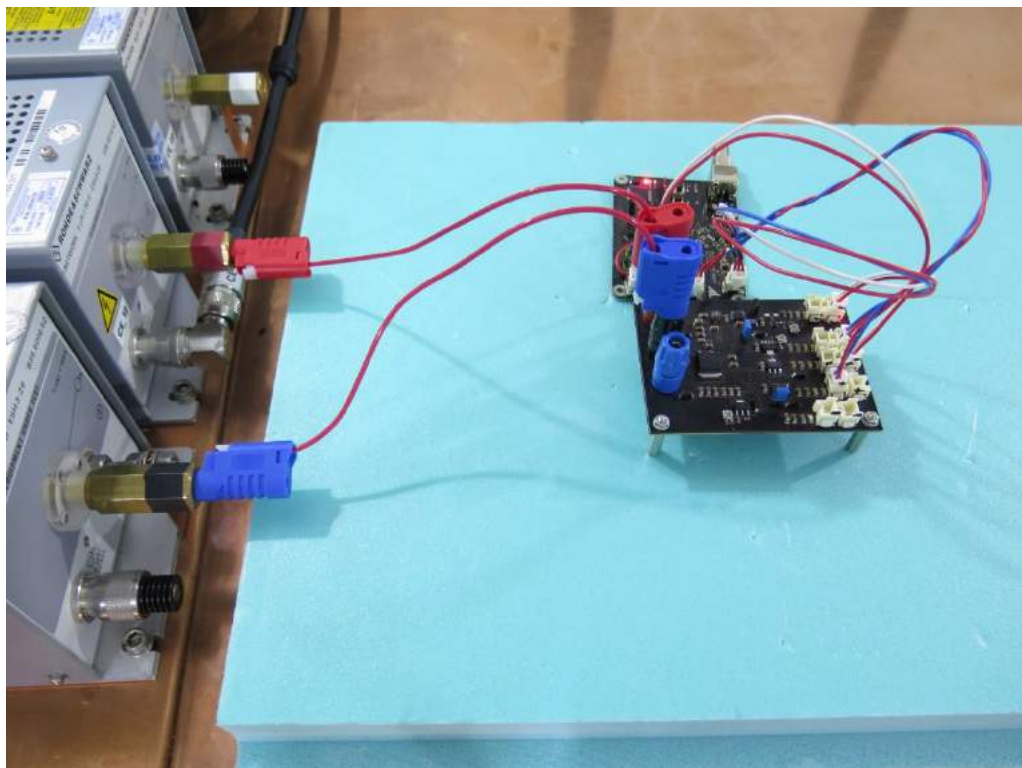


Obr.48: Vyzařované emise 1 GHz - 2,6 GHz, vertikální polarizace, vynechaných úsecích není norma definována

## 4.2.2 EMC měření rušivého napětí do napájecího vstupu dle normy CISPR 24 ed.4



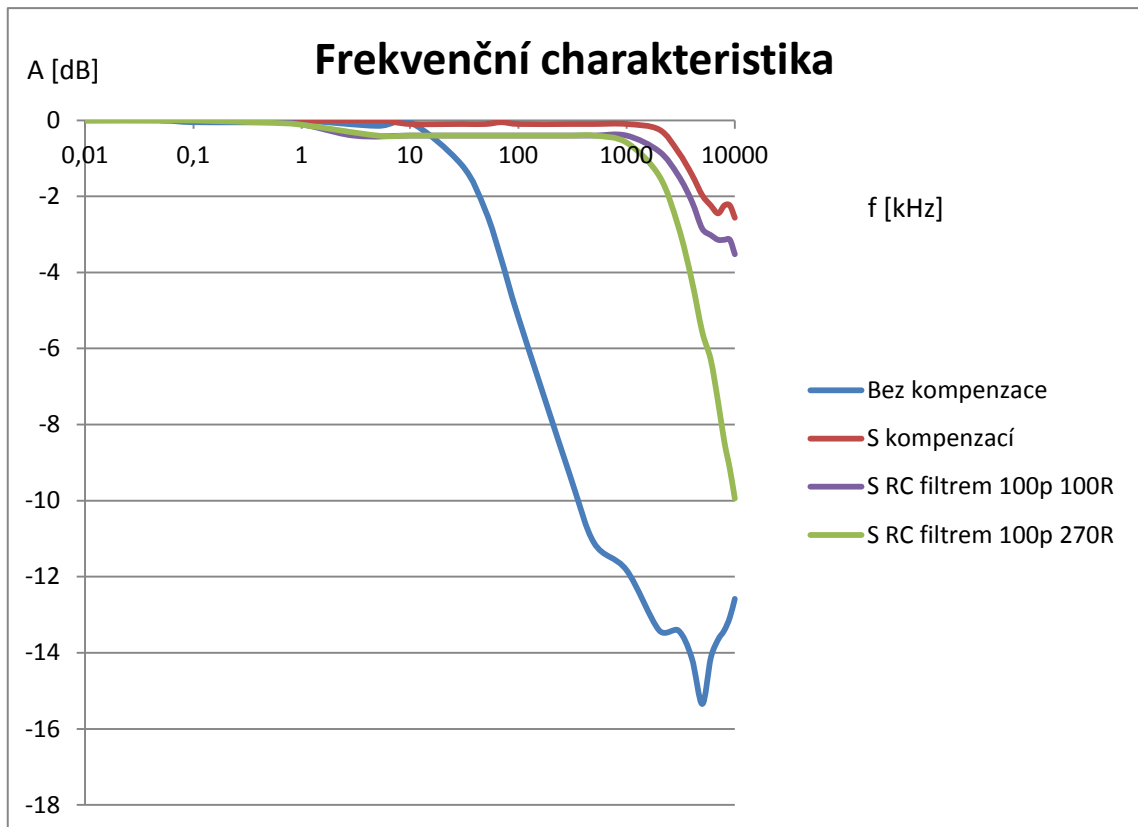
Obr.49: Rušení do sítě



Obr.50: Uspořádání měřicího pracoviště při měření rušivého napětí

### 4.2.3 Frekvenční charakteristiky vstupního analogového obvodu

Frekvenční charakteristika vstupního analogového obvodu na vysílači byla změřena pomocí osciloskopu LeCroy 24XS a funkčního generátoru Tektronix AFG 3011C, který má frekvenční rozsah do 10 MHz. Měřili jsme frekvenční char. bez kompenzovaného napěťového děliče, následně s kompenzovaným děličem a nakonec s 2 různými antialiasingovými RC filtry.



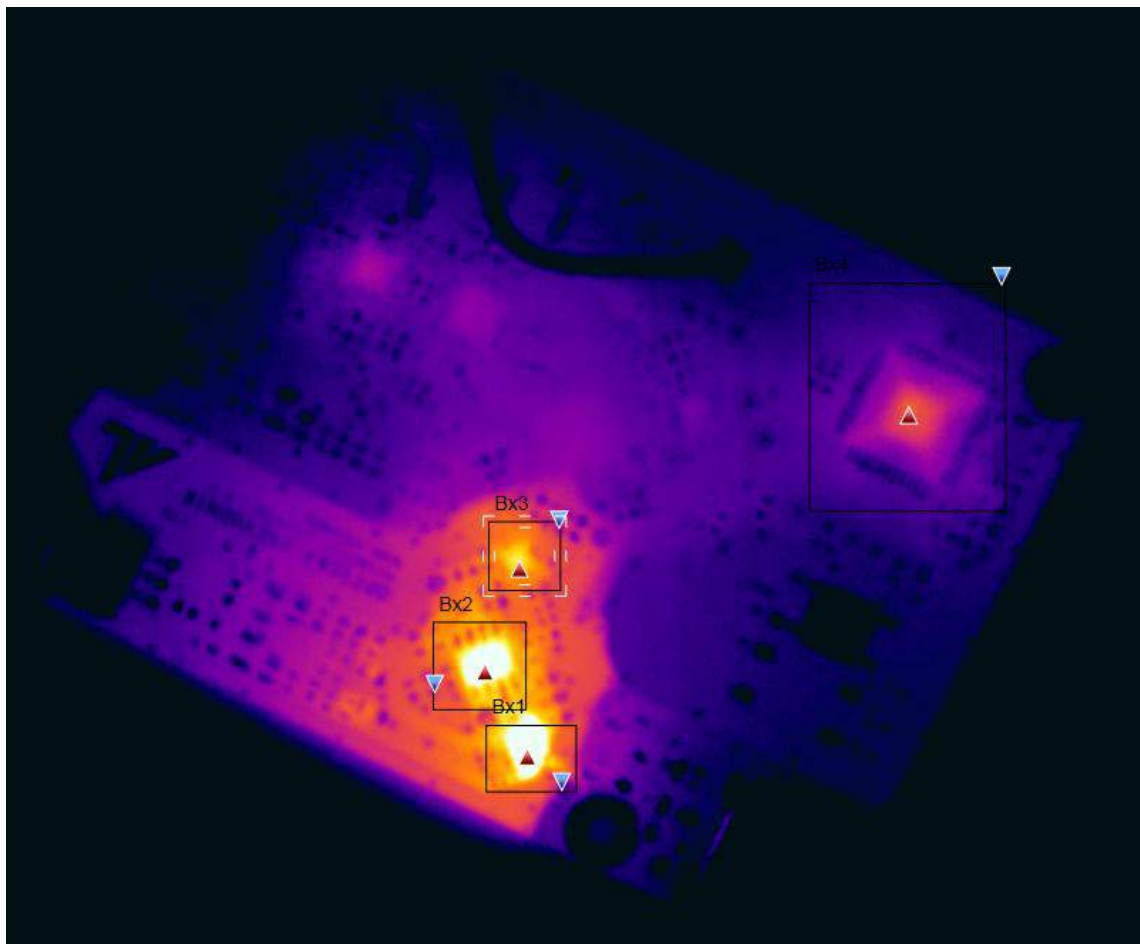
Obr.51: Frekvenční charakteristika vstupních analogových obvodů

#### 4.2.4 Měření vysílače termokamerou

Teplota součástek ovlivňuje její parametry. U operačních zesilovačů zvýšená teplota může např. omezit šířku pásma, zvýšit úroveň šumu a drift (napětí a proudu). Bylo provedeno měření termokamerou SC640 Wes. Na obvod vysílače bylo přivedeno napájení a zařízení bylo takto ponecháno po dobu 5 minut, aby se ustálila teplota.

Tab.11: Naměřené teploty součástek s větší teplotou, než 40 °C

Název součástky	Funkce	Naměřená teplota
OPA659	Operační zesilovač (transimpedanční)	72,1 °C
OPA698	Operační zesilovač (limitující)	55,4 °C
ADA4930	Operační zesilovač (symetrizující)	48,2 °C
PIC16F18875	Mikrokontroler	41,3 °C



Obr.52: Snímek vysílače z termokamery

Nejvíce se zahřívaly operační zesilovače. Je vidět rozdíl mezi pouzdrem, které má na spodní straně termální plošku (Na Obr.50 označený jako Bx3) a pouzdry, které ji nemají (Na Obr.50 Bx1 a Bx2). Řešením by bylo použití vhodnějších pouzder, které tuto termální plošku mají. Například u obvodu OPA659 můžeme vyměnit pouzdro SOT-23 za SON-8, které je o něco dražší. U OPA698 tuto možnost nemáme, řešením by mohlo být umístění prokůvů pod pouzdro a tím lepší odvod tepla na spodní zemnicí vrstvu, ale pod pouzdem součástky vedou některé spoje.

ThermaCAM SC640 Wes		°C
Bx1	Max	72,1
	Min	32,7
	Average	46,9
Bx2	Max	55,4
	Min	38,6
	Average	45,5
Bx3	Max	48,2
	Min	36,2
	Average	42,3
Bx4	Max	41,3
	Min	26,9
	Average	33,4
Parametry (ThermaCAM SC640 Wes)		
Emisivita	0,95	
Odr. tepl.	23,0°C	
Vzdálenost	1,0m	
Atmosférická teplota	23,0°C	
Teplota externí optiky	20,0°C	
Propustnost externí optiky	1,00	
Relativní vlhkost	50,0%	

Obr.53: Naměřené hodnoty



#### **4.2.5 Doporučené nápravy problémů vyplívajících z naměřených výsledků**

Největší rušení z hlediska vyzařování se objevilo na frekvencích, které jsou mimo pracovní frekvence. Jak už bylo napsáno, pravděpodobně jsou způsobeny vyzařováním vodivých částí DPS. Kritické budou vodivé cesty mezi serializerem a laserovou diodou. Měli bychom se zaměřit na změnu návrhu DPS v okolí této kritické vysokofrekvenční cesty. Jedná se hlavně o zkrácení přívodů laserové diody. Její pouzdro by mělo být také lépe uzemněno. Budou se muset omezit některé logické signály vedoucí do mikrokontroleru, i když je využíváme jen krátkou dobu po připojení napájení. Na tyto cesty je indukován VF signál, který z nich poté vyzařuje do okolí. Je třeba zkrátit jejich délku, nebo pokud nejsou potřeba, úplně je zrušit. Jejich zkrácení a vedení mimo VF cesty by nám mohlo ulehčit použití vícevrstvé desky. Tu by bylo vhodné použít také z toho důvodu, abychom získali celistvou zemní plochu. Nejen okolí budiče laserové diody by prospělo zmenšení všech pasivních součástek z SMD pouzdra 0603 na 0402. Nezbytným krokem je uzavřít celý elektrooptický převodník do stíněné krabičky a použít vhodné uzemnění jak této krabičky, tak DPS.

Rušení, které se šířilo po napájecí lince bylo způsobeno invertujícím DC-DC měničem na pracovní frekvenci okolo 1 MHz a násobcích tohoto základního kmitočtu. Řešením je použití LC filtru na vstupu i výstupu zdroje.

## 5 ZÁVĚR

Byly rozebrány teoretické prekvizity, které se dotýkaly jednotlivých zájmových oblastí EMC a optoelektroniky. Byl zvolen způsob přenosu dat po optickém vlákně pomocí PCM a On-off keying. Teoretické parametry navrženého převodníku jsou: frekvenční rozsah 0 – 10 MHz, rychlost vzorkování 20 MS/s, přenosová rychlost max. 622 Mb/s, rozsah napětí  $\pm 10$  V. Zvýšení vstupního rozsahu napětí by bylo možné změnou dělicího poměru vstupního napěťového děliče výměnou rezistorů a upravením prahu limitace napětí.

Byly zhotoveny celkem 4 DPS (2 verze elektrooptického převodníku, 1 optoelektrický a 1 zdroj pro napájení prototypů). Napájecí zdroj je plně funkční a umožňuje nastavit přesné napětí pro operační zesilovače. Rozměry DPS (kromě zdroje a 1. verze) jsou optimalizovány pro zabudování do stíněné krabičky AH102 (96 mm x 67 mm x 22 mm).

Druhá verze elektrooptického převodníku je funkční a na výstupu serializeru bylo možné pomocí osciloskopu zobrazit tok sériových dat. Byla ověřena správná funkčnost vstupních analogových obvodů a změřena jejich frekvenční charakteristika. Byly provedeny testy EMC a změřena vyzařovací charakteristika a rušení, které se přenáší po napájecí lince. Byly navrženy doporučení k zlepšení EMC charakteristik vhodnějším návrhem DPS.

Optoelektrický převodník je schopen převést optický signál na digitální elektrický, v současné chvíli však není schopen tento digitální signál převést zpět na analogový. Opakovaně se však podařilo obnovit hodinový signál z optického signálu a nejspíš i data. To však jen na přechodnou dobu. Problémy způsobily nepřesné pájení SMD pouzdra TQFN se 48 vývody a několikrát přehlédnuté studené spoje. Lze se domnívat, že obvod je schopen správně fungovat po důkladné kontrole a opravě letovaných spojů na DPS a kompletní zprovoznění převodníku je nejspíš jen otázkou času.

# LITERATURA

- [1] SVAČINA, J.: Elektromagnetická kompatibilita.: Analysis and Design, Přednášky. Brno, Ústav UREL FEKT VUT,2002.
- [2] OTT, Henry W a Henry W OTT. *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2009, xxv, 843 p. ISBN 0470189304.
- [3] MORGAN, David. *A handbook for EMC testing and measurement*. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 1994, xi, 290 pages. ISBN 0863417566.
- [4] *Current Shunt Monitors*. Dallas, Texas: Texas Instruments, 2014, 7 s.
- [5] WILFERT, O. Optoelektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT, VUT v Brně, 2008.
- [6] COX, Charles Howard. *Analog optical links: theory and practice*. New York: Cambridge University Press, 2004, xiv, 288 p. ISBN 05-216-2163-1.
- [7] SENIOR, John M a M JAMRO. *Optical fiber communications: principles and practice*. 3rd ed. New York: Financial Times/Prentice Hall, 2009, 1, 1075 p. ISBN 01-303-2681-X
- [8] PUNČOCHÁŘ, J. Přenosová cesta optická. Katedra elektrotechniky. [Online]. [cit. 2015 12-10]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO\\_02.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf)
- [9] HENN, CH. Fiber optic transmission. *Texas Instruments* [online]. USA: Burr-Brown Corporation, 1993, 2000 [cit. 2015-10-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sboa051/sboa051.pdf>
- [10] AGRAWAL, G. *Fiber-optic communications systems*. 3rd ed. New York: John Wiley, 2002, xvii, 546 s. Wiley Series in Microwave and Optical Engineering. ISBN 04-712-1571-6.
- [11] ANALOG MODULES, INC.. *MODEL 732T/R ANALOG/DIGITAL FIBER OPTIC LINK* [online]. . [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.analogmodules.com/admincenter/datasheets/732tr.pdf>
- [12] MITEQ. *SLT-5K2P5G-20-20* [online]. . [cit. 2015-12-10]. ISBN . Dostupné z: <http://www.miteq.com/docs/MITEQ-SLL-5K2P5G.PDF>
- [13] LANGER EMV-Technik. *Optical fibre probe A 100 / A 200 / A 300 set* [online]. . [cit. 2015-12-10]. ISBN . Dostupné z: <https://exportpages.cn/media/fe2f624d-9352-4e69-a084-a3814a723042/test-probe.pdf>
- [14] OPTEK TECHNOLOGY. *TT ELECTRONICS*. [online]. [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://optekinc.com/datasheets/opv315.pdf>
- [15] *LTC1668* [online]. vymazat: Linear Technology, 2000 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/166678f.pdf>
- [16] Christophe Peucheret. *Direct and External Modulation of Light*. Denmark: Technical University of Denmark, 2009.
- [17] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996, 479 s. ISBN 80-901984-3-0.
- [18] ONET4201LD [online]. Texas Instruments, 2005 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/onet4201ld.pdf>

- [19] MAX3658 [online]. Maxim Integrated, 2007 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3658.pdf>
- [20] MAX9271 [online]. Maxim Integrated, 2012 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9271.pdf>
- [21] MAX9272 [online]. Maxim Integrated, 2012 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9272.pdf>
- [22] LTC2161 [online]. Linear Technology, 2011 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/216210f.pdf>
- [23] Horevaj, M. Kompenzované děliče.[online].poslední aktualizace: February, 2005.[ cit. 2015-12-10] Dostupný z Dostupný z URL: [http://www.horevaj.com/horevaj/K1\\_files/K1\\_17.pdf](http://www.horevaj.com/horevaj/K1_files/K1_17.pdf)
- [24] Tranzistor polopatě [online]. RoboDoupě.cz, 2011 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: [http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2012/01/tranzistor\\_polopate.pdf](http://robodoupe.cz/wp-content/uploads/2012/01/tranzistor_polopate.pdf)
- [25] electronics-diy.com. Oscilloscope Probe Schematic & Anatomy. [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://electronics-diy.com/electronic\\_schematic.php?id=967](http://electronics-diy.com/electronic_schematic.php?id=967)
- [26] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

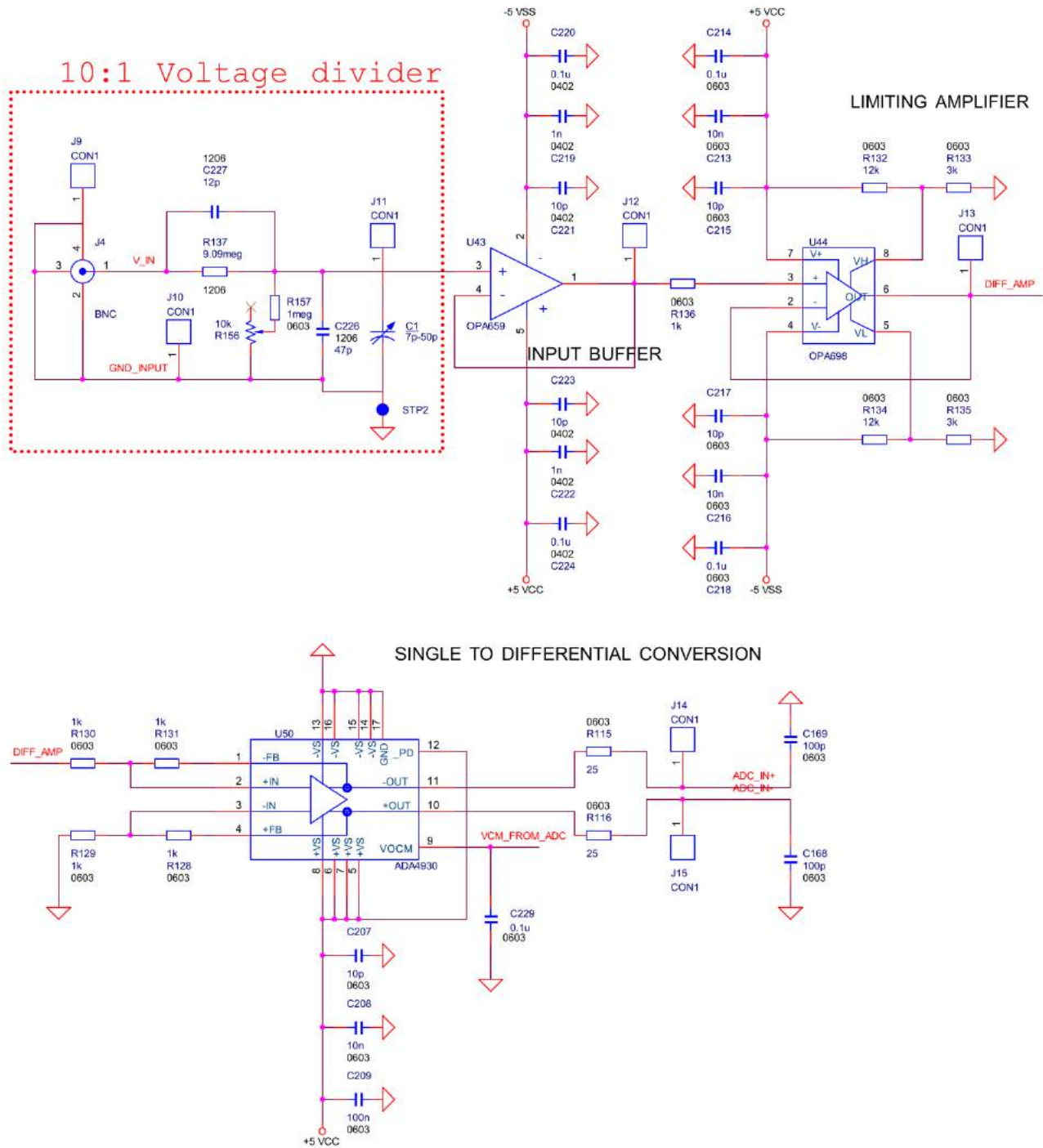
## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

A/D	Analogově-digitální
APC	Automatic Power Control
APD	Lavinová fotodioda
BNC	Bayonet Neill Concelman connector
D/A	Digitálně-analogový
E/O	Elektrooptický
EC	Europe Comission
EEL	Edge Emitting Lasers
EMI	Elektromagnetická interference
EMC	Electromagnetic compatibility, elektromagnetická kompatibilita.
ESD	Elektrostatický výboj
EUT	Equipment Under Test
FM	Frekvenční modulace
FPGA	Field Programmable Gate Array
GI	Gradientní index
GND	Ground
I2C	Inter-integrated circuit
HW	Hardware
IM-DD	Intenzitní modulace - přímá detekce
JFET	Junction Field Effect Transistor
LD	Laserová dioda
LDO	Low-dropot regulator
LED	Light Emitting Diode
LISN	Line Impedance Stabilizing Network
LVC MOS	Low Voltage Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
MM	Mnohavidový
MZM	Mach Zehnderův modulátor
NA	Numerická apertura
NRZ	Null Return Zero
O/E	Optoelektrický

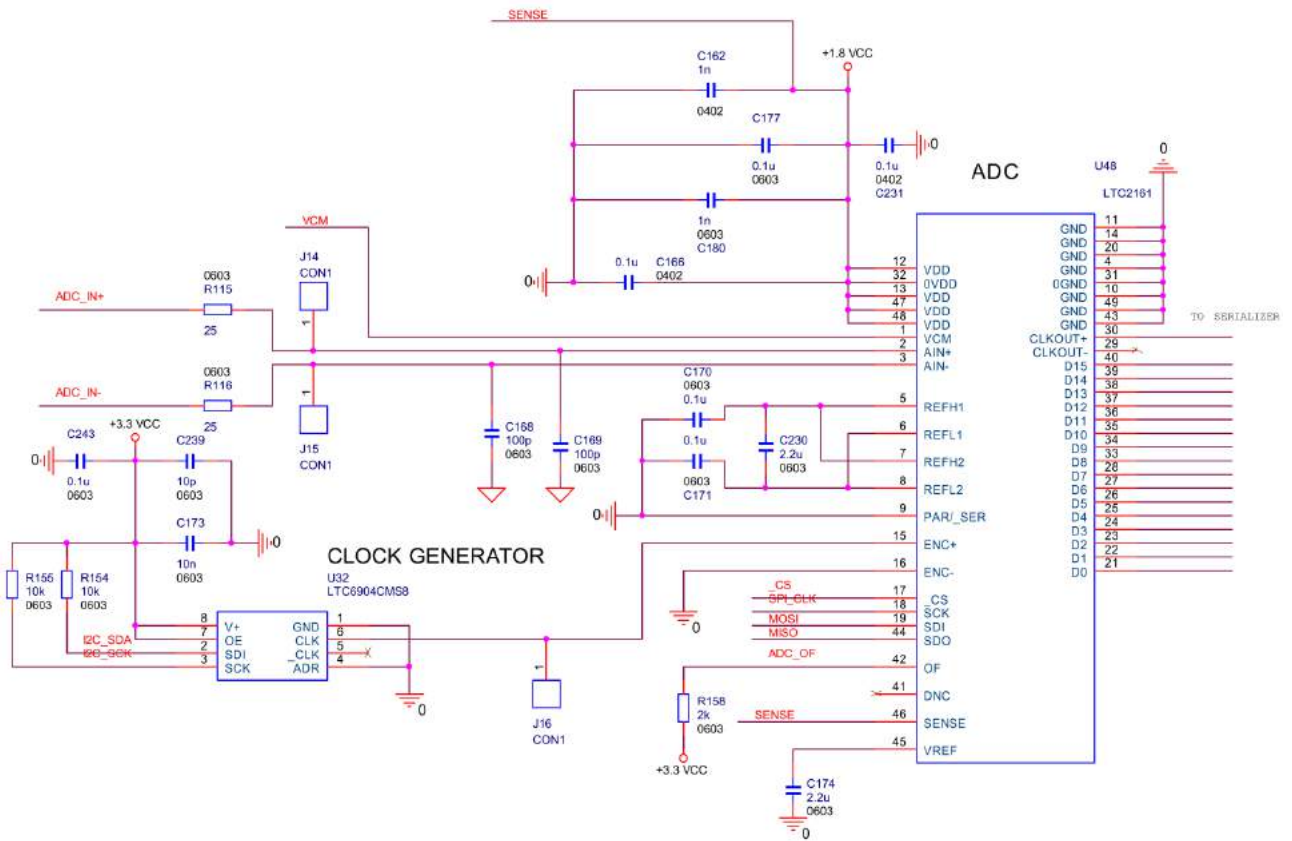
OZ	Operační Zesilovač
PLL	Phase Locked Loop
PCM	Pulzně kódová modulace
PGA	Zesilovač s programovatelným zesílením
PM	Fázová modulace
PMC	Pulsně kódová modulace
PSRR	Power-Supply Rejection
RZ	Return Zero
S/N	Poměr signál k šumu
SI	Skokový index
SM	Jednovidový
SMD	Surface Mount Device
TIA	Transimpedanční zesilovač
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UDP	User Data Protocol
USB	Universal Serial Bus
VF	Vysokofrekvenční
VOCM	Voltage Common Mode
VSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Lasers
WDM	Vlnový multiplex

# A NÁVRH ELEKTROOPTICKÉHO PŘEVODNÍKU (VYSÍLAČ) - SCHÉMA

## A.1 VSTUPNÍ ANALOGOVÉ OBVODY

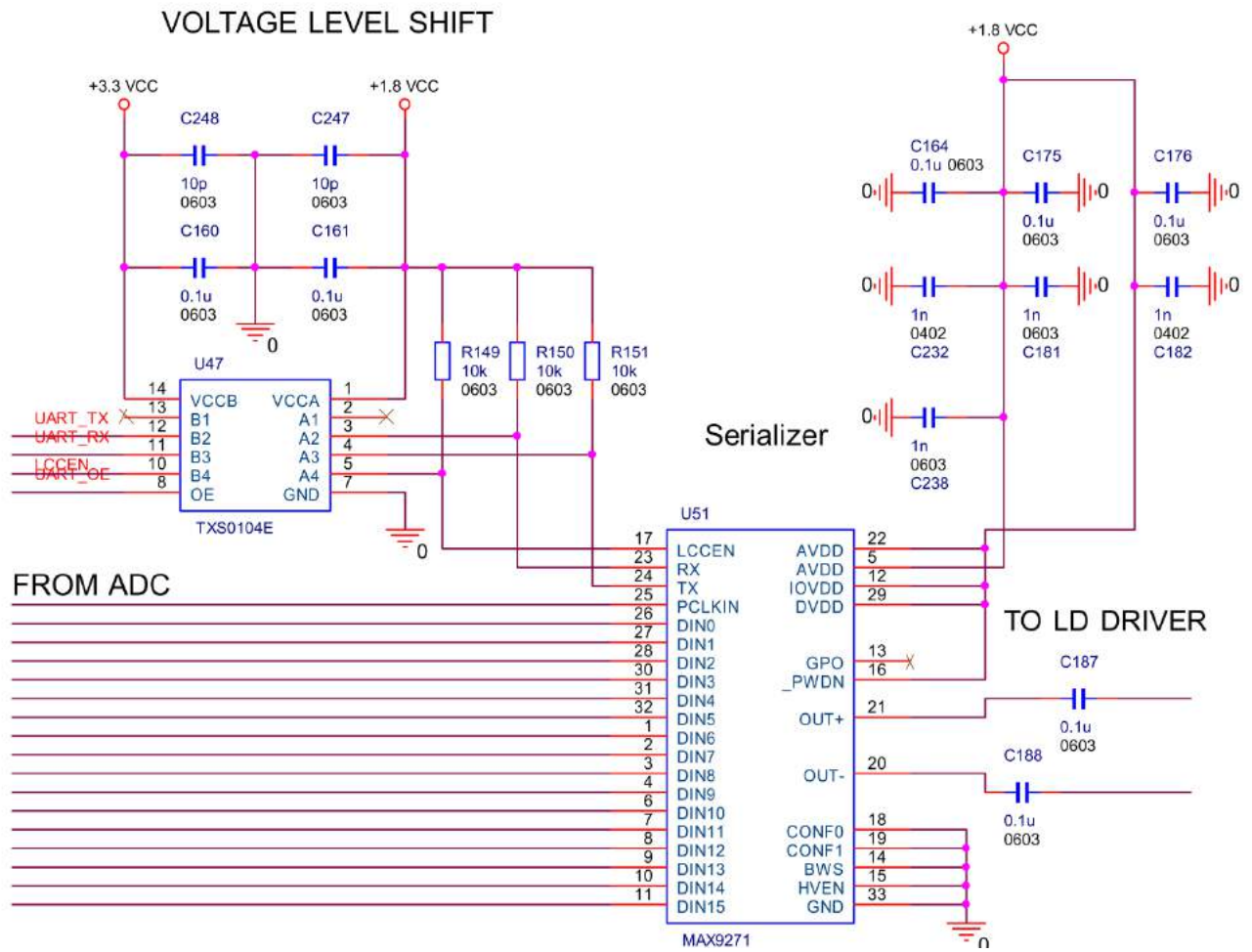


## A.2 A/D PŘEVODNÍK

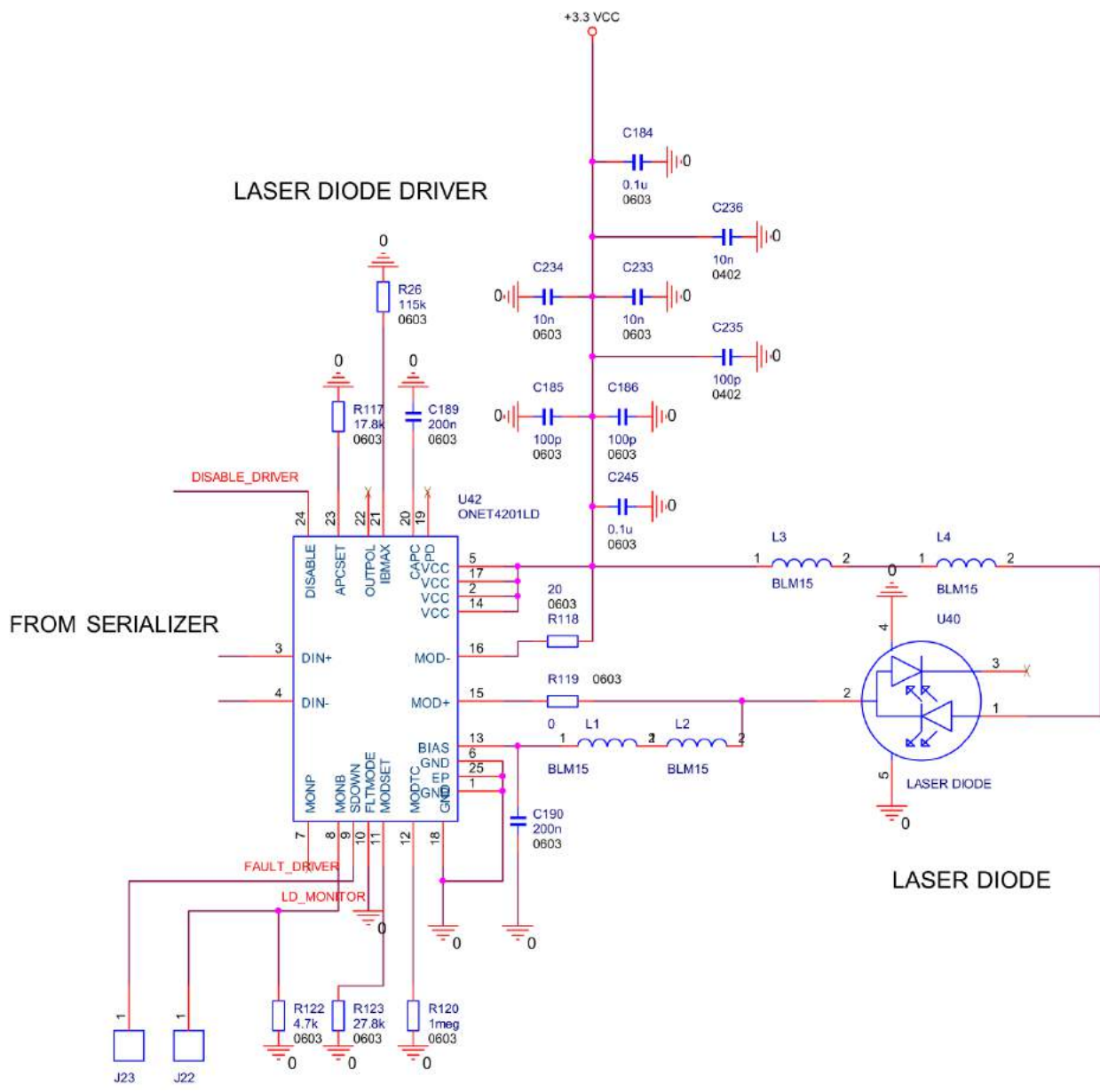




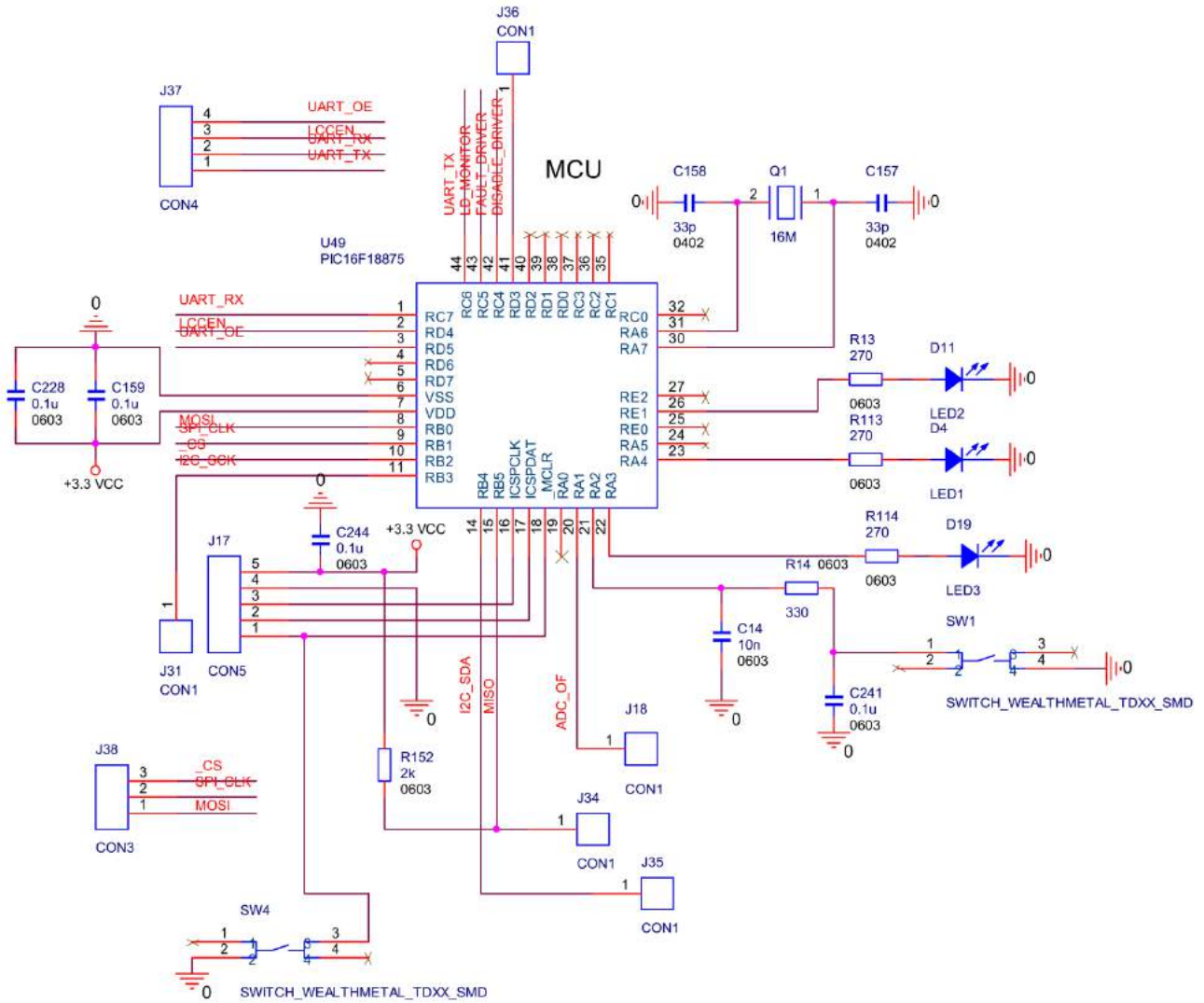
## A.3 SERIALIZER



# A.4 BUDIČ LASEROVÉ DIODY

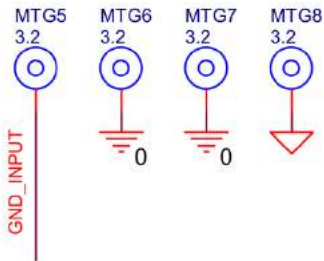


# A.5 MIKROKONTROLER

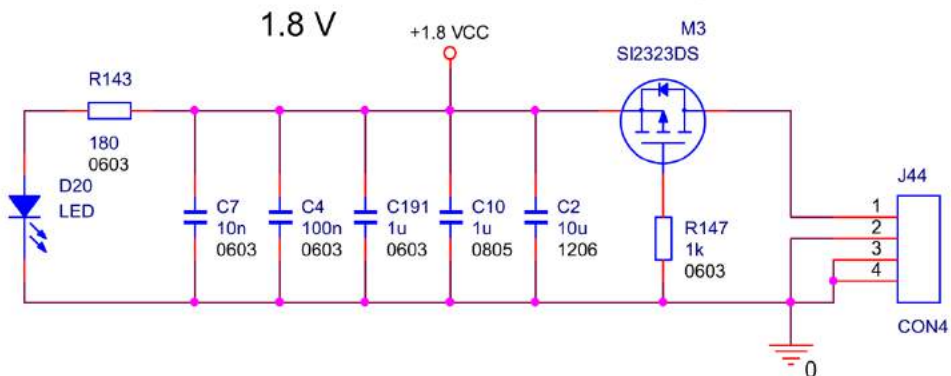
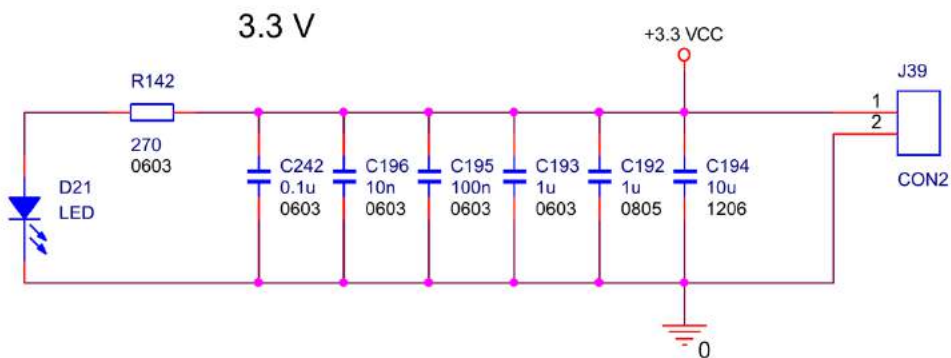
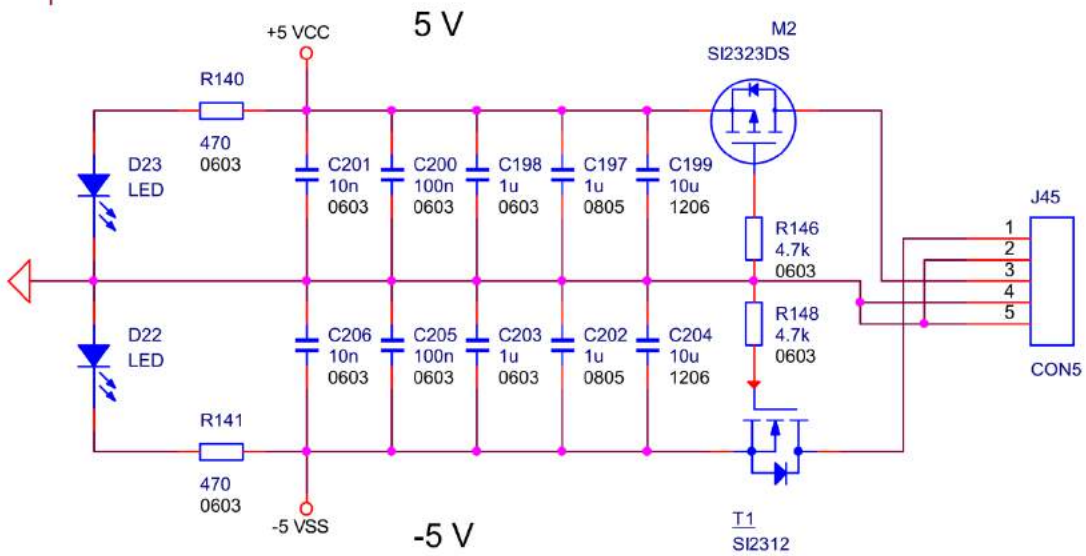
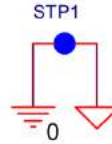


## A.6 Napájecí vstupy

MOUNTING HOLE

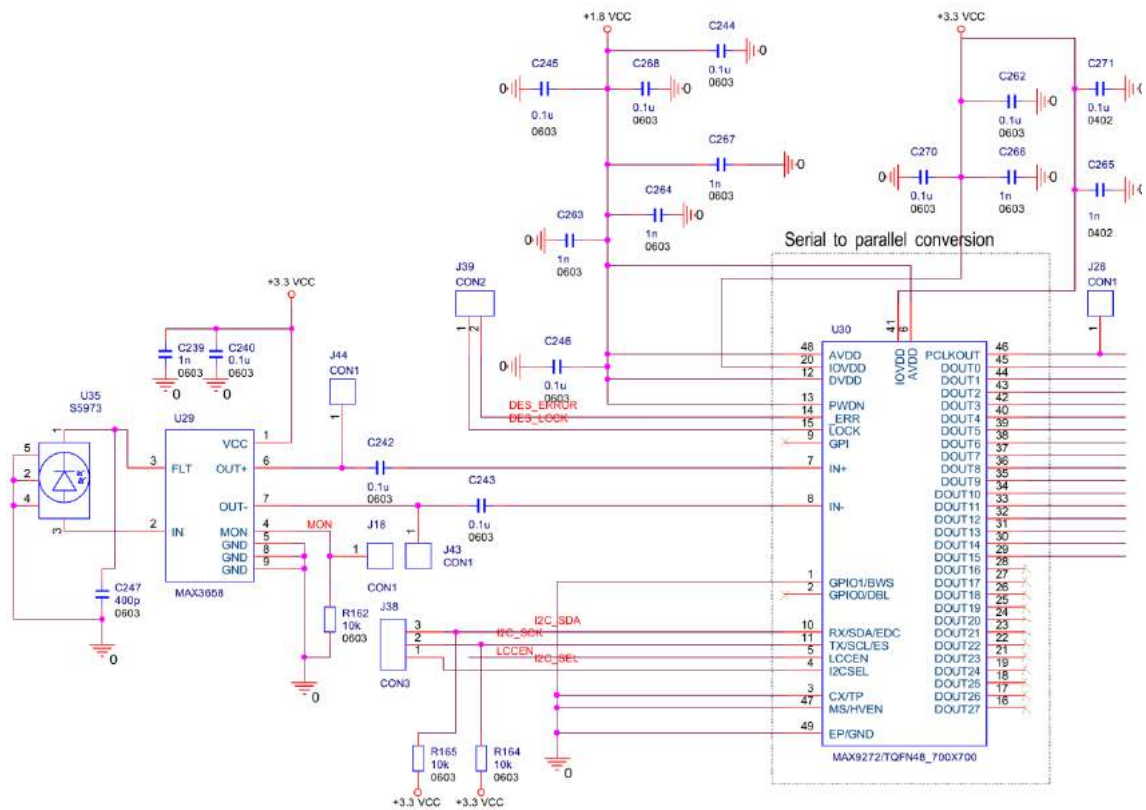


ANALOG GND TO DIGITAL GND

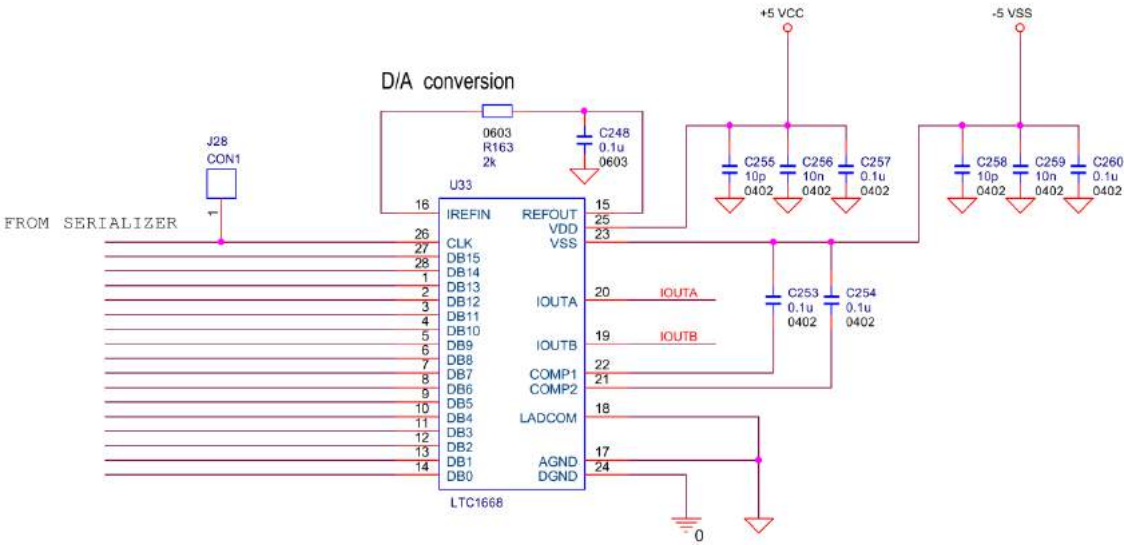


# B NÁVRH OPTICKOELEKTRICKÉHO PŘEVODNÍKU (PŘIJÍMAČ) - SCHÉMA

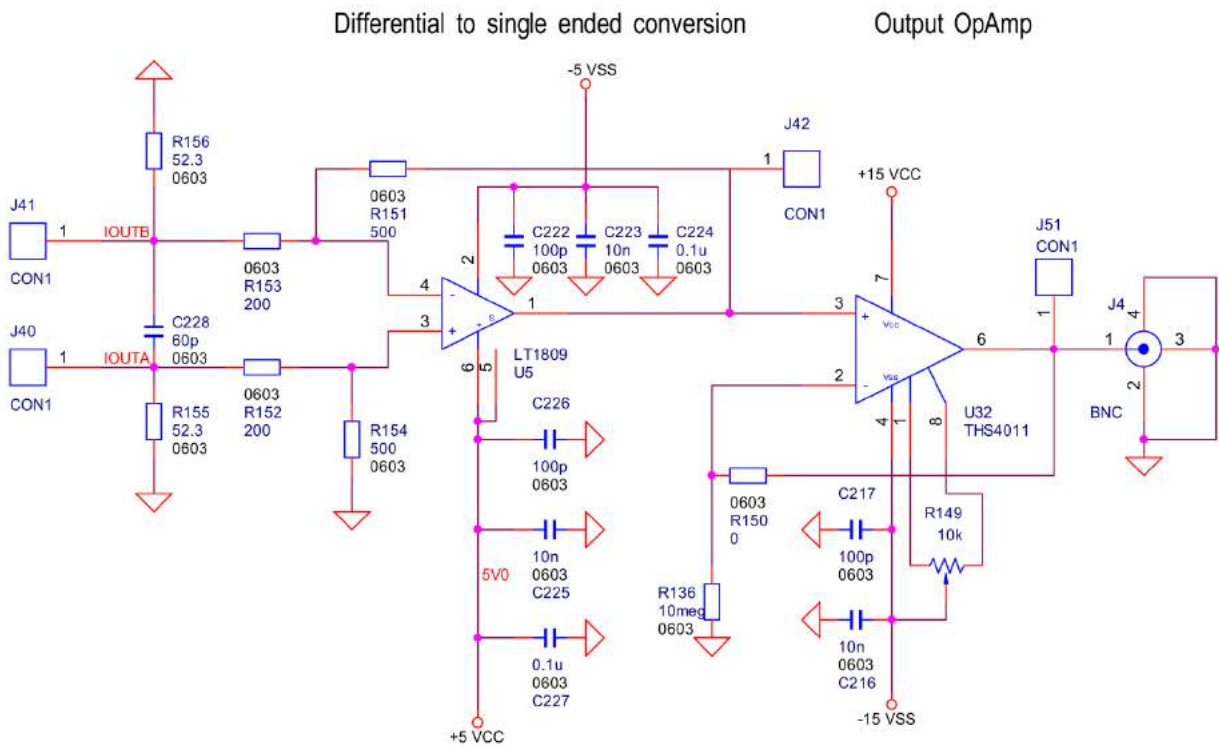
## B.1 Zpracování signálu z fotodiody + deserializer



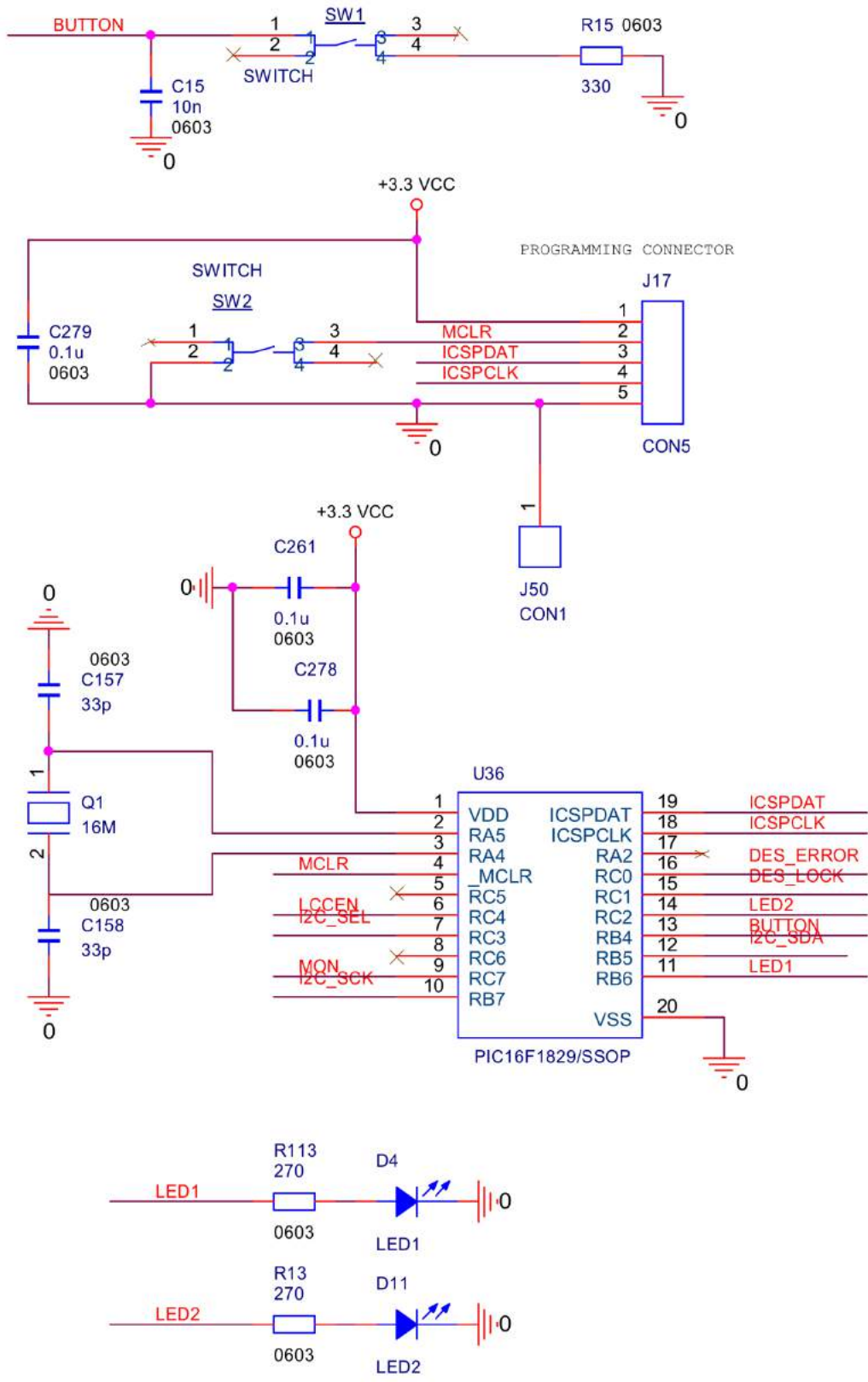
## B.2 D/A převodník



## B.3 Úprava výstupního signálu z D/A převodníku

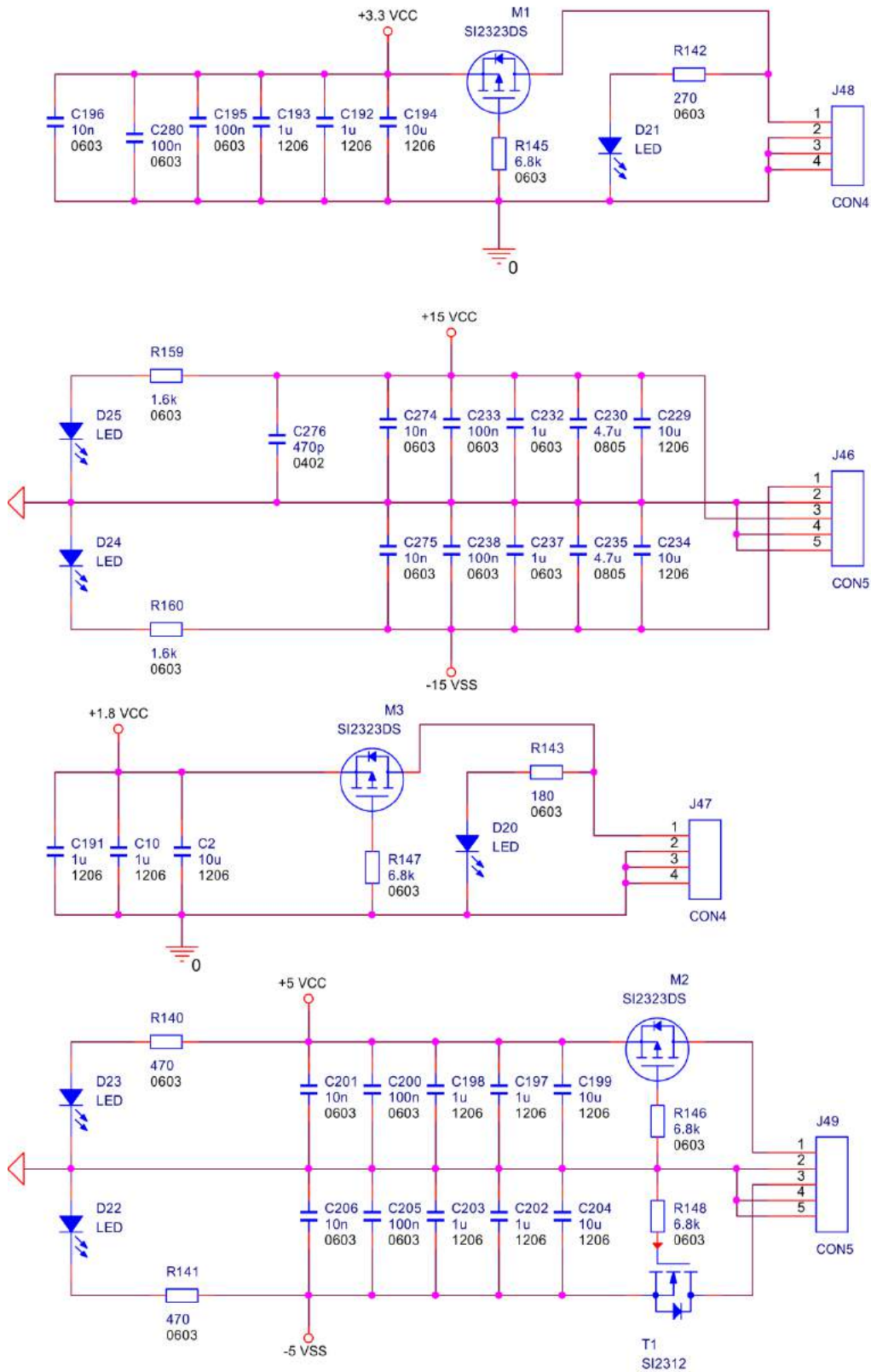


## B.4 Mikrokontroler

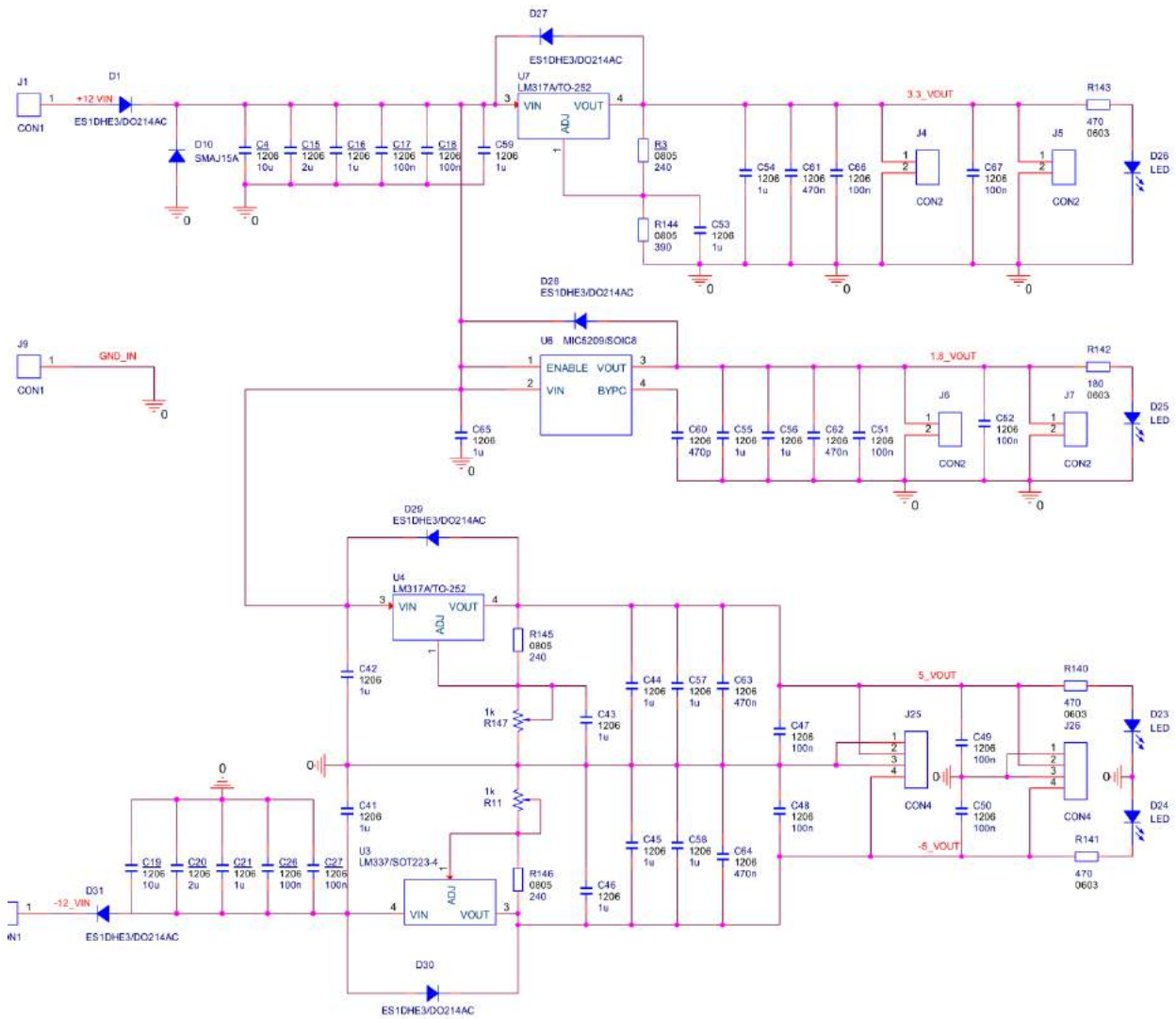




## B.5 Napájecí vstupy

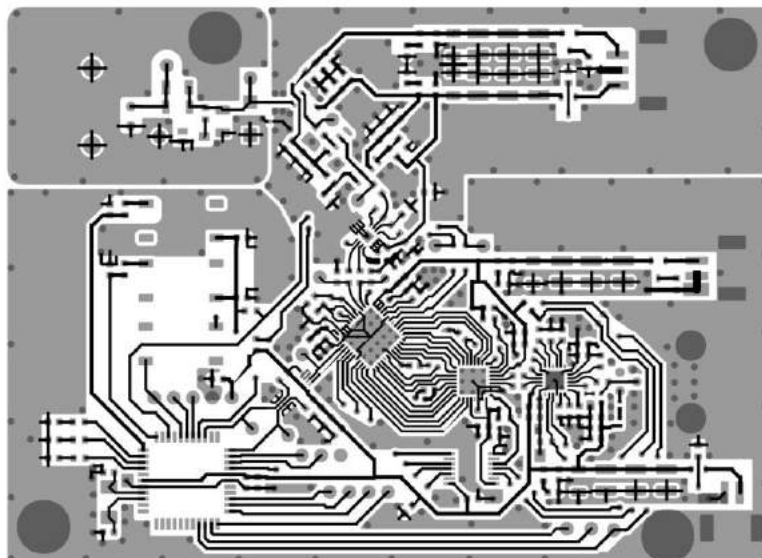


# C NÁVRH ZDROJE - SCHÉMA

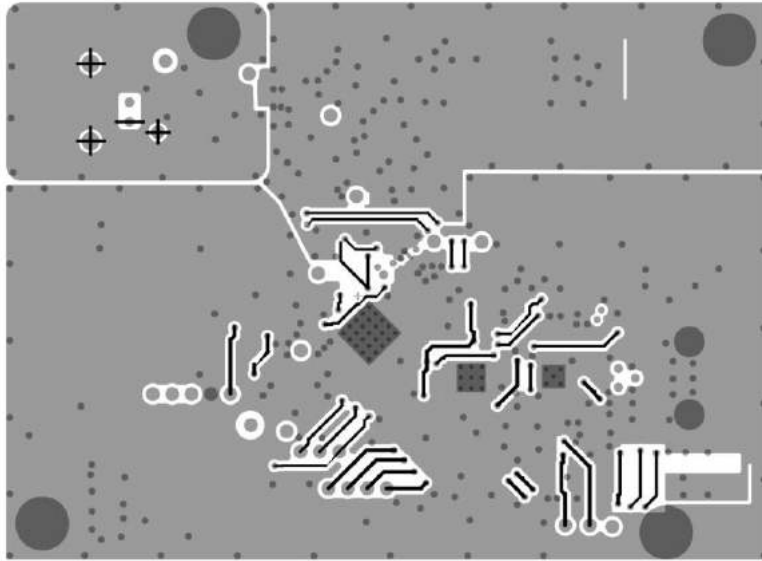


# D 1. VERZE ELEKTROOPTICKÉHO PŘEVODNÍKU (VYSÍLAČE) - DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

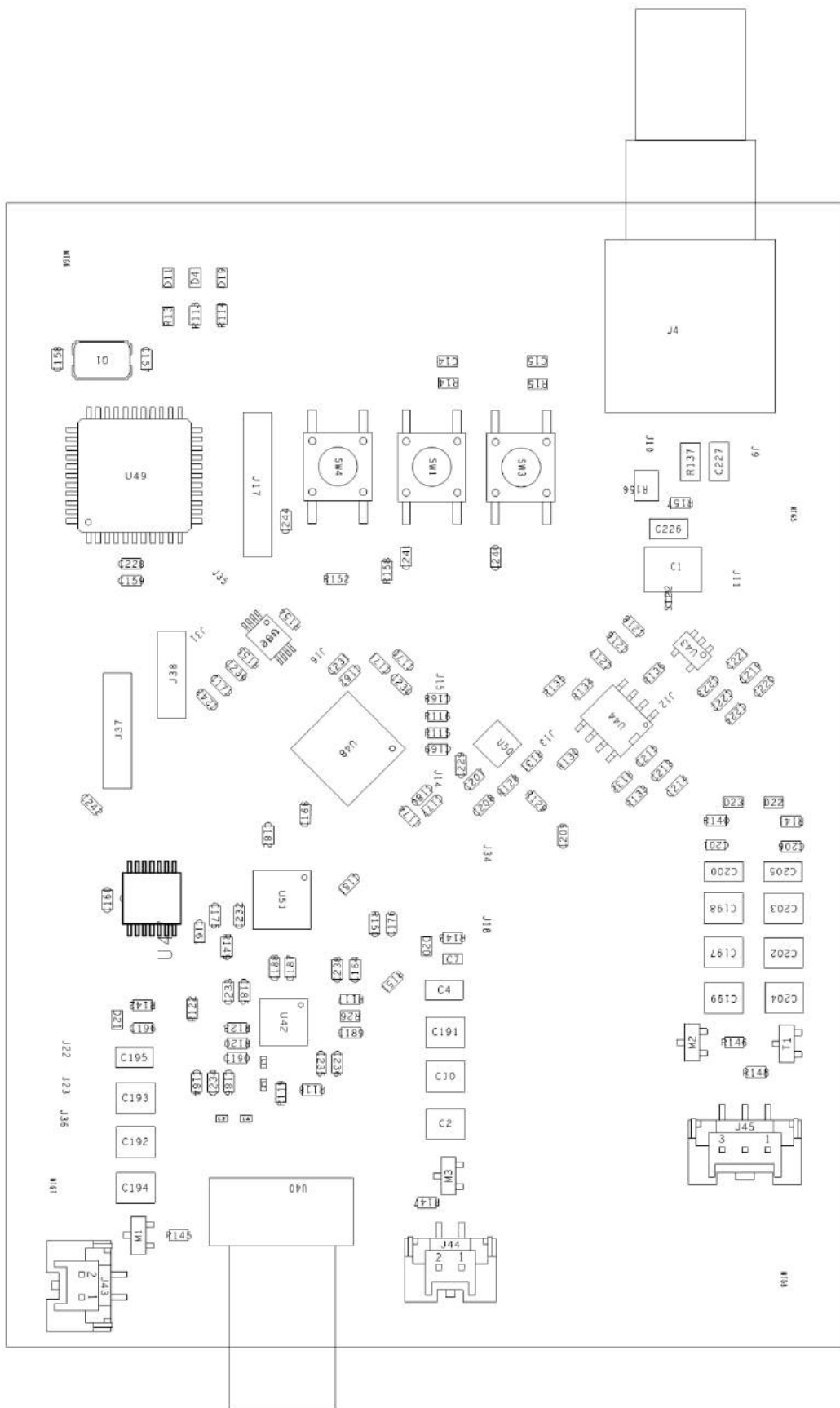
## D.1 TOP (1:1)



## D.2 BOTTOM (1:1)

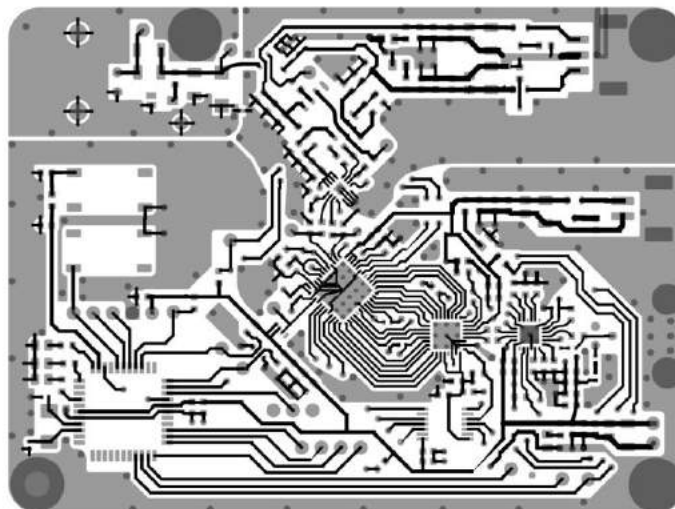


### D.3 Rozmístění součástek (bez měřítka, otočeno o 90 stupňů)

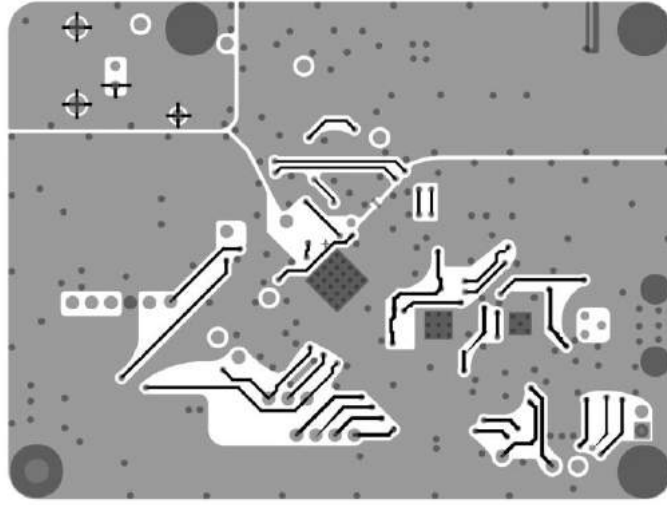


## **E 2. VERZE ELEKTROOPTICKÉHO PŘEVODNÍKU (VYSÍLAČE) - DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ**

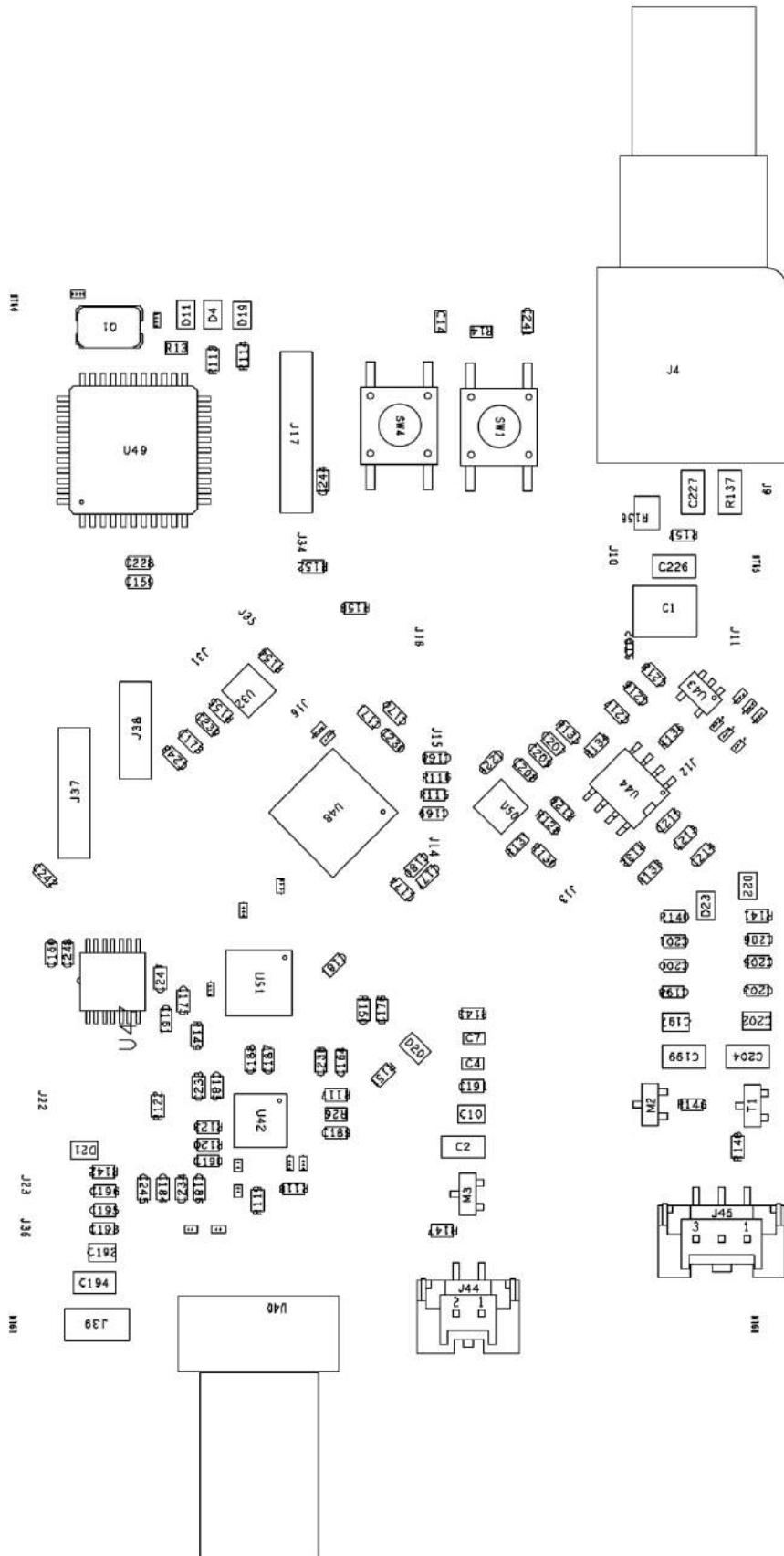
### **E.1 TOP (1:1)**



## E.2 BOTTOM (1:1)



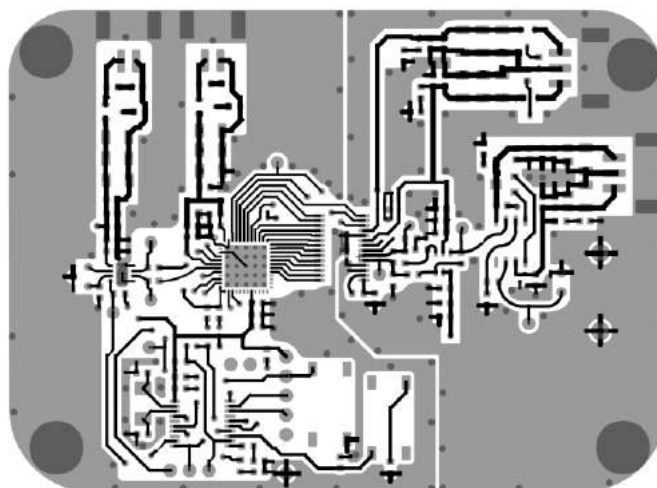
### E.3 Rozmístění součástek (bez měřítka, otočeno o 90 stupňů)



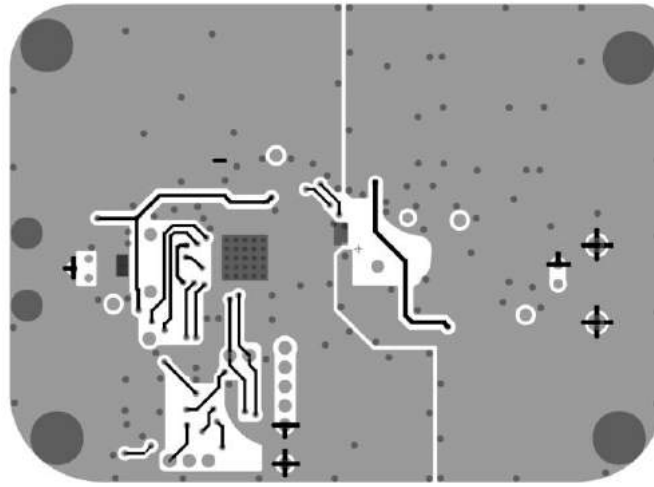


# F OPTOELEKTRICKÝ PŘEVODNÍK (PŘIJÍMAČ) - DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

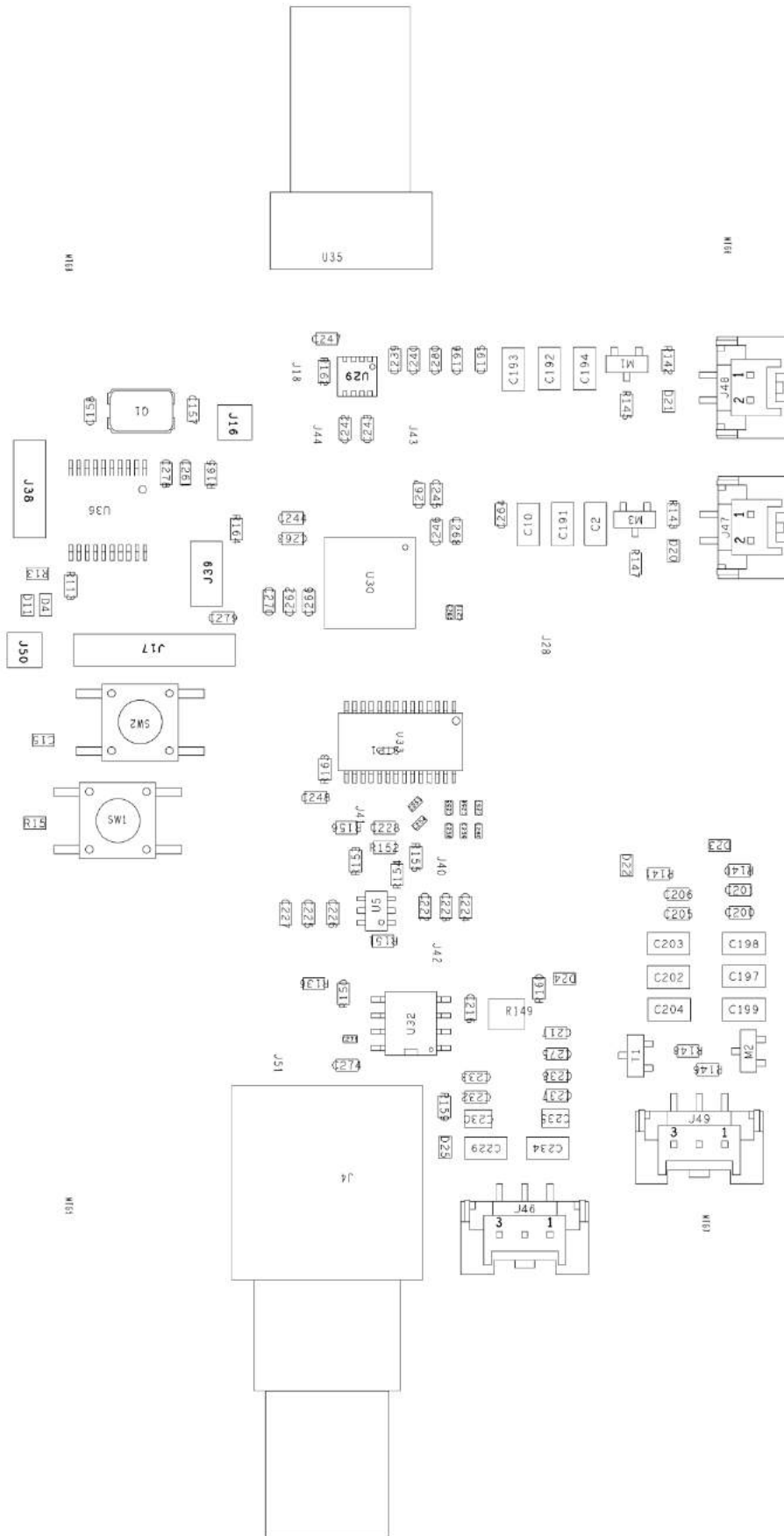
## F.1 TOP (1:1)



## F.2 BOTTOM (1:1)

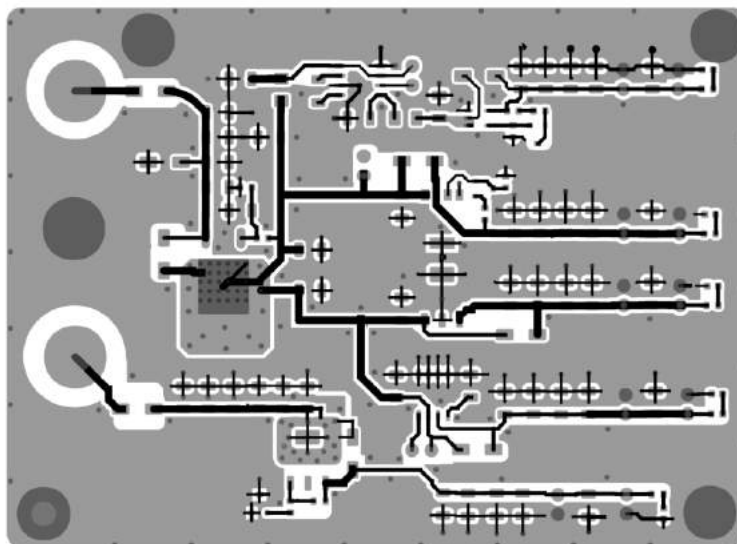


### F.3 Rozmístění součástek (Bez měřítka, otočeno o 90 stupňů)

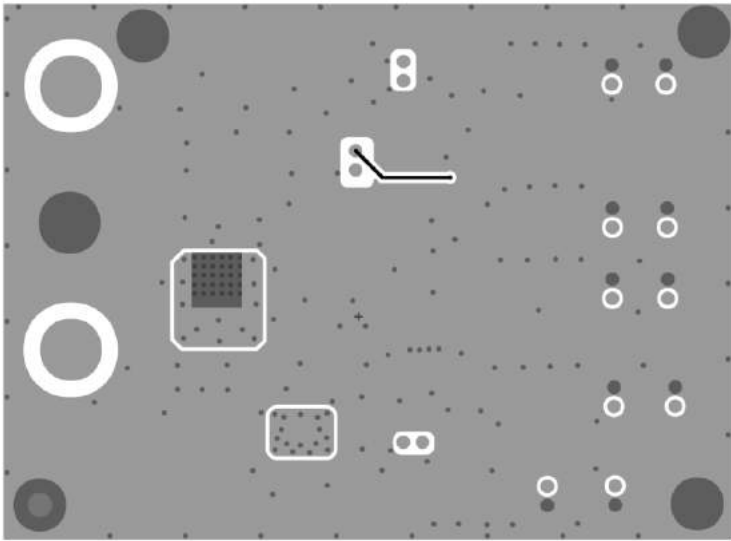


# G ZDROJ - DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ

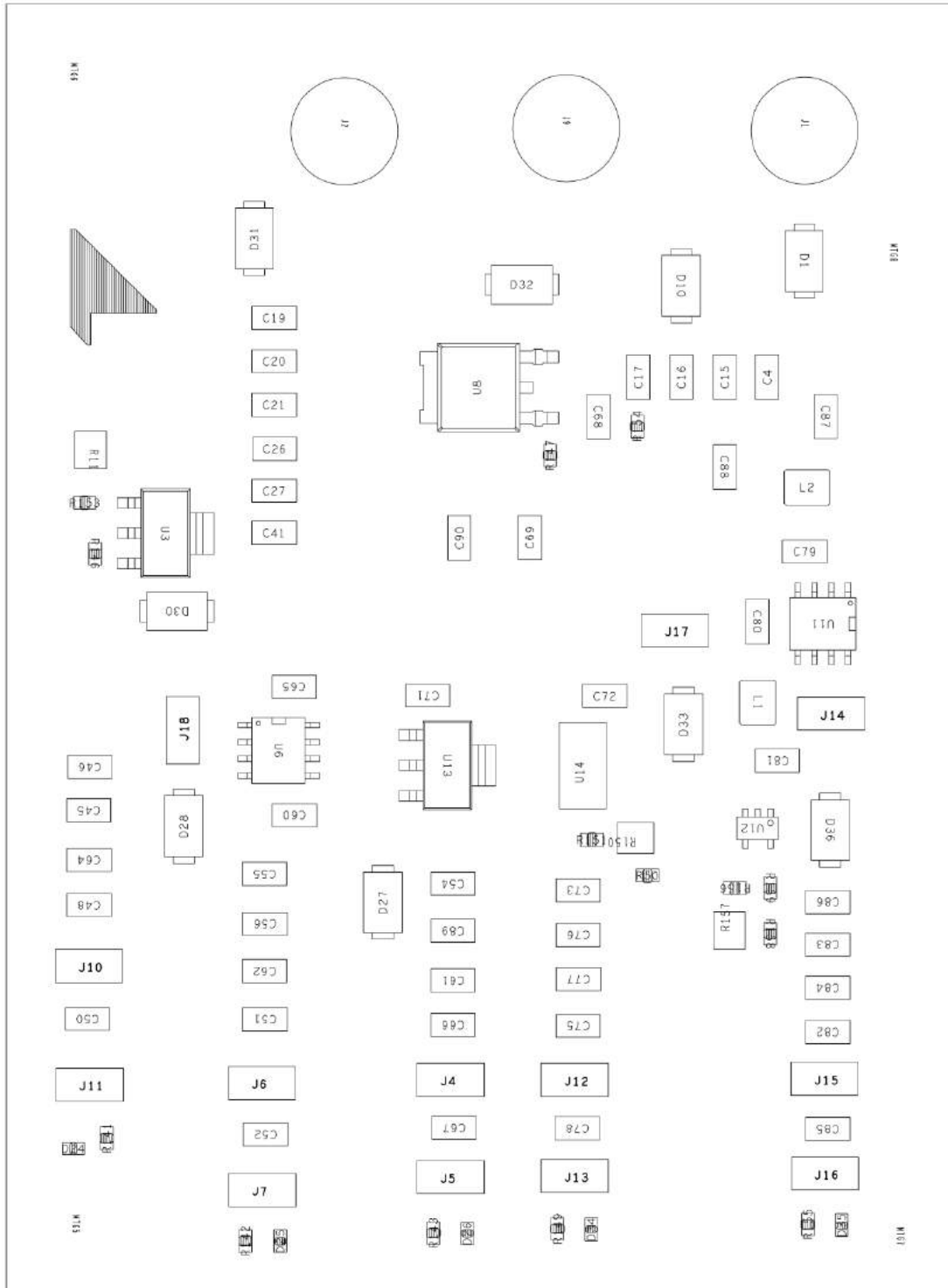
## G.1 TOP (1:1)



**G.2 BOTTOM (1:1)**

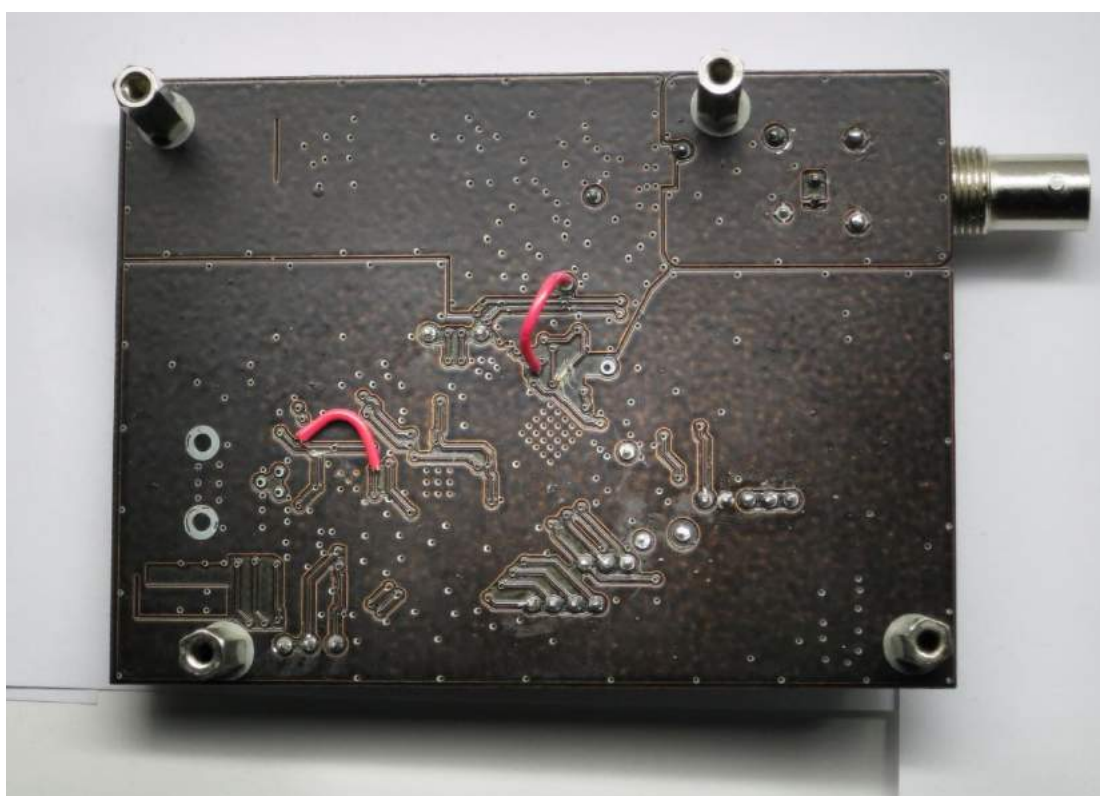
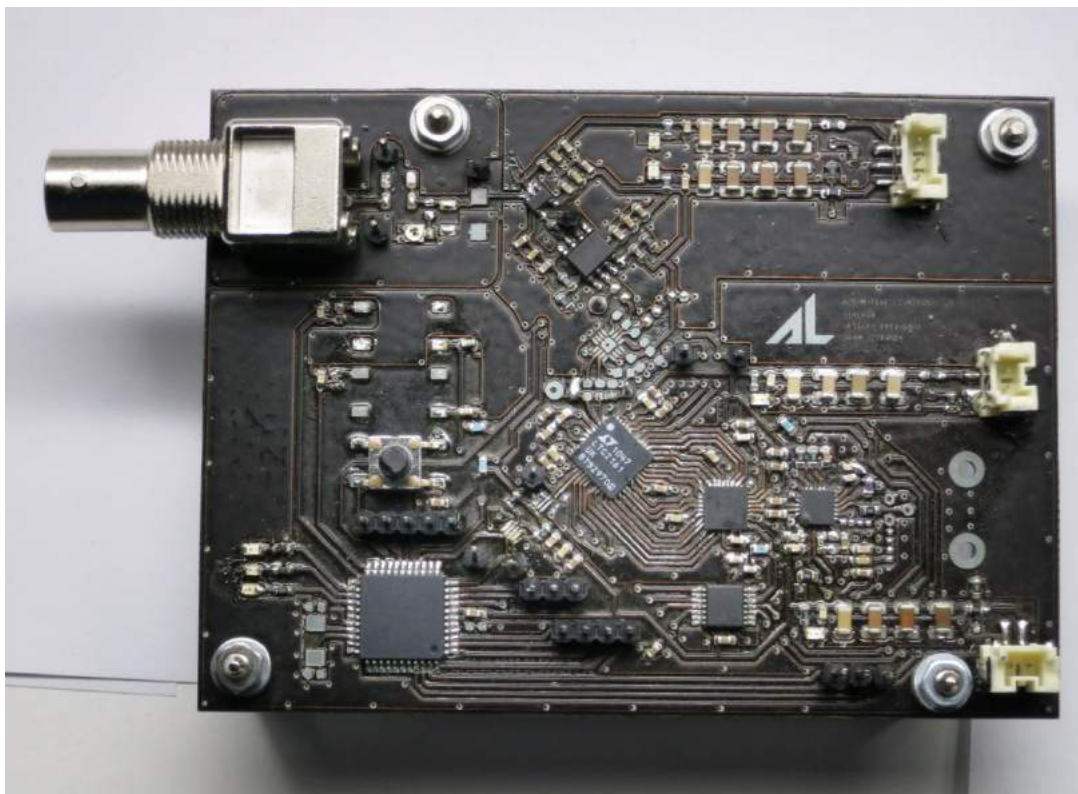


### G.3 ROZMÍSTĚNÍ SOUČÁSTEK (Bez měřítka, otočeno o 90 stupňů)

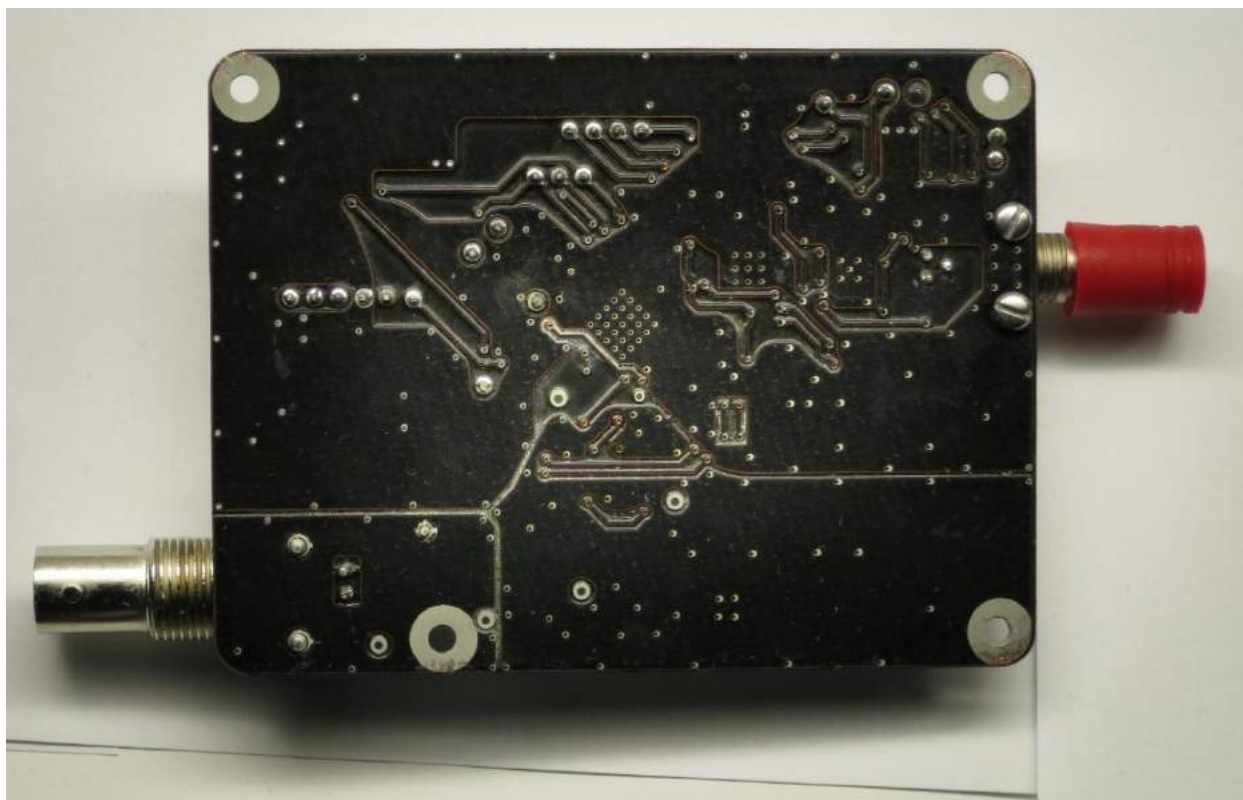
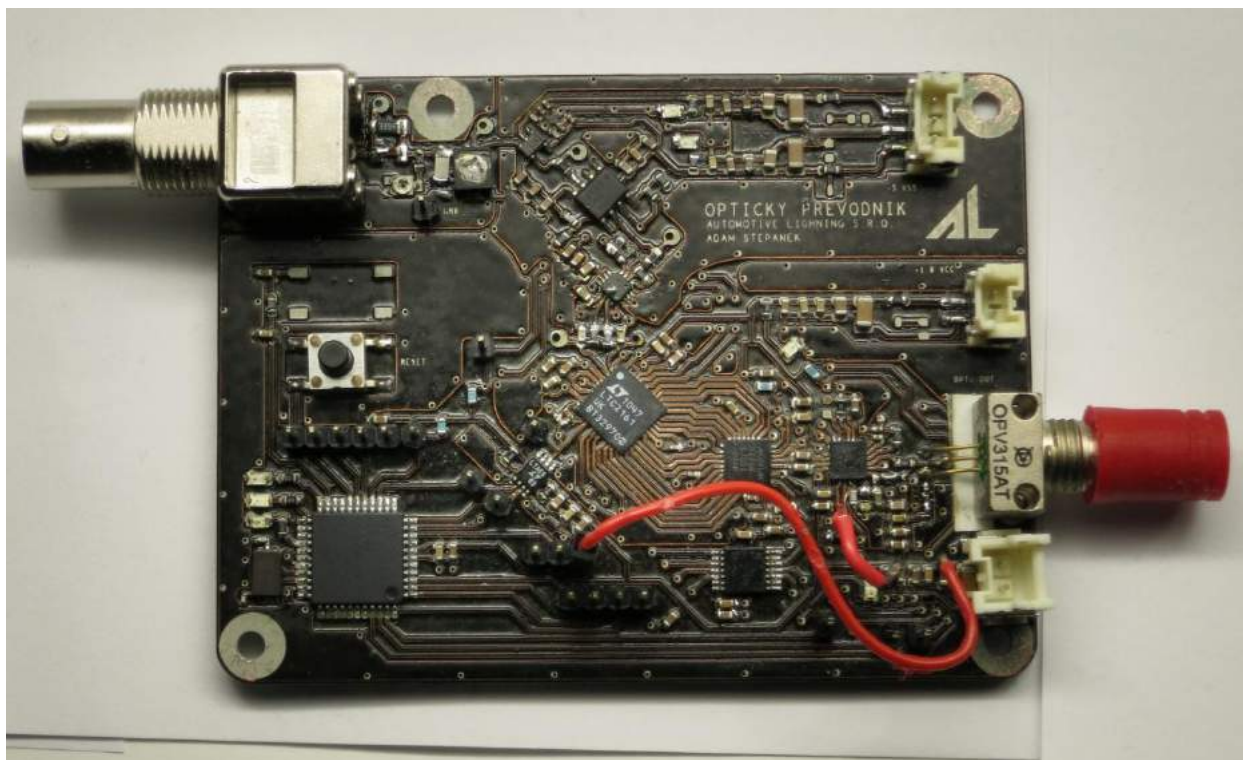


# H FOTOGRAFIE DPS

## H.1 Elektrooptický převodník (vysílač) - 1. verze

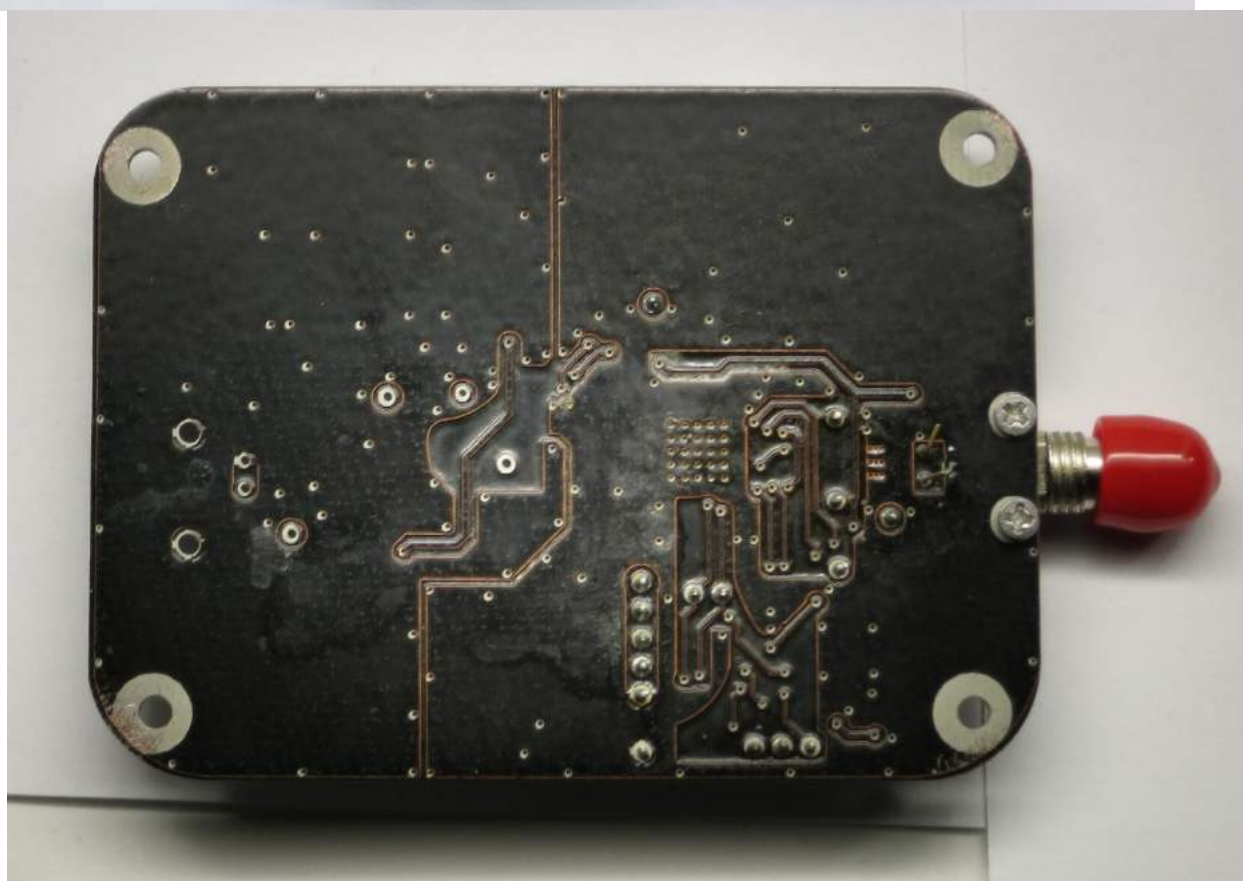
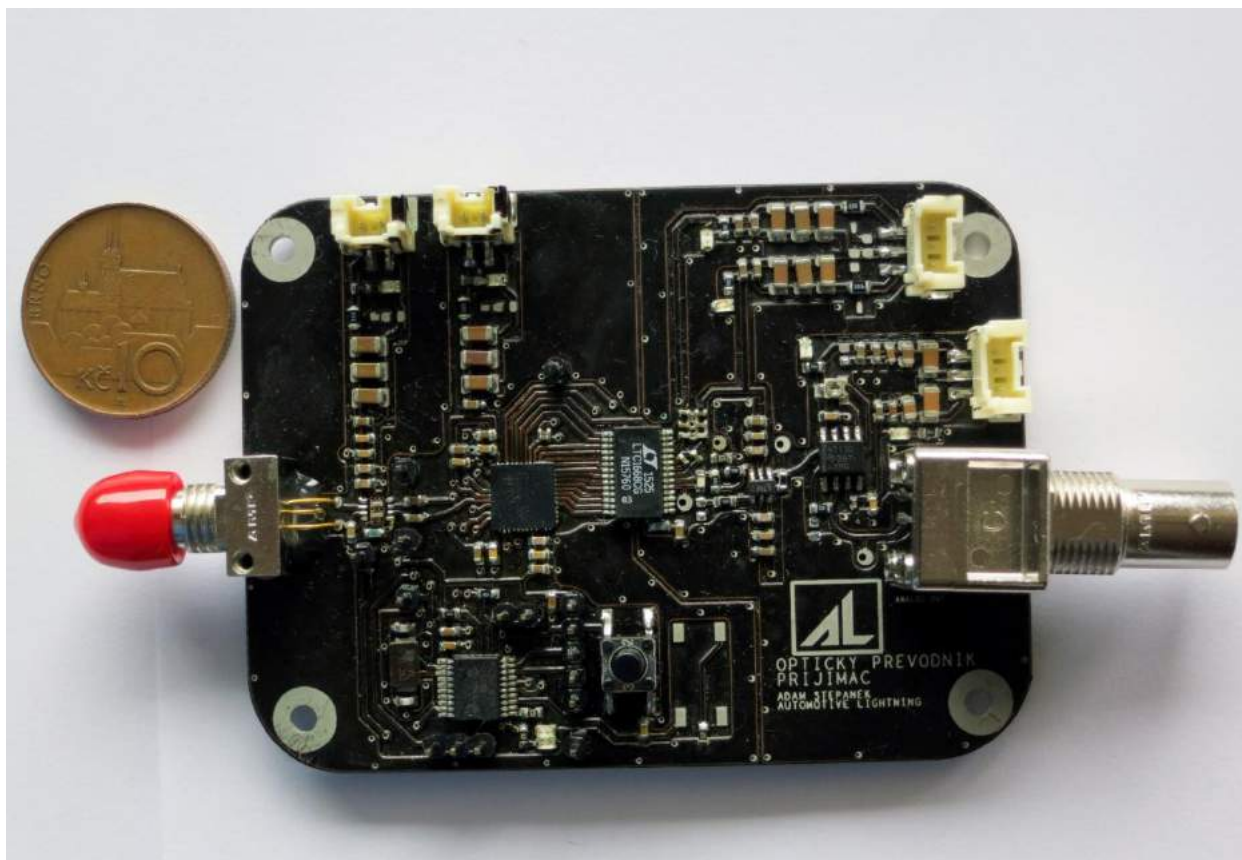


## H.2 Elektrooptický převodník (vysílač) - 2. verze

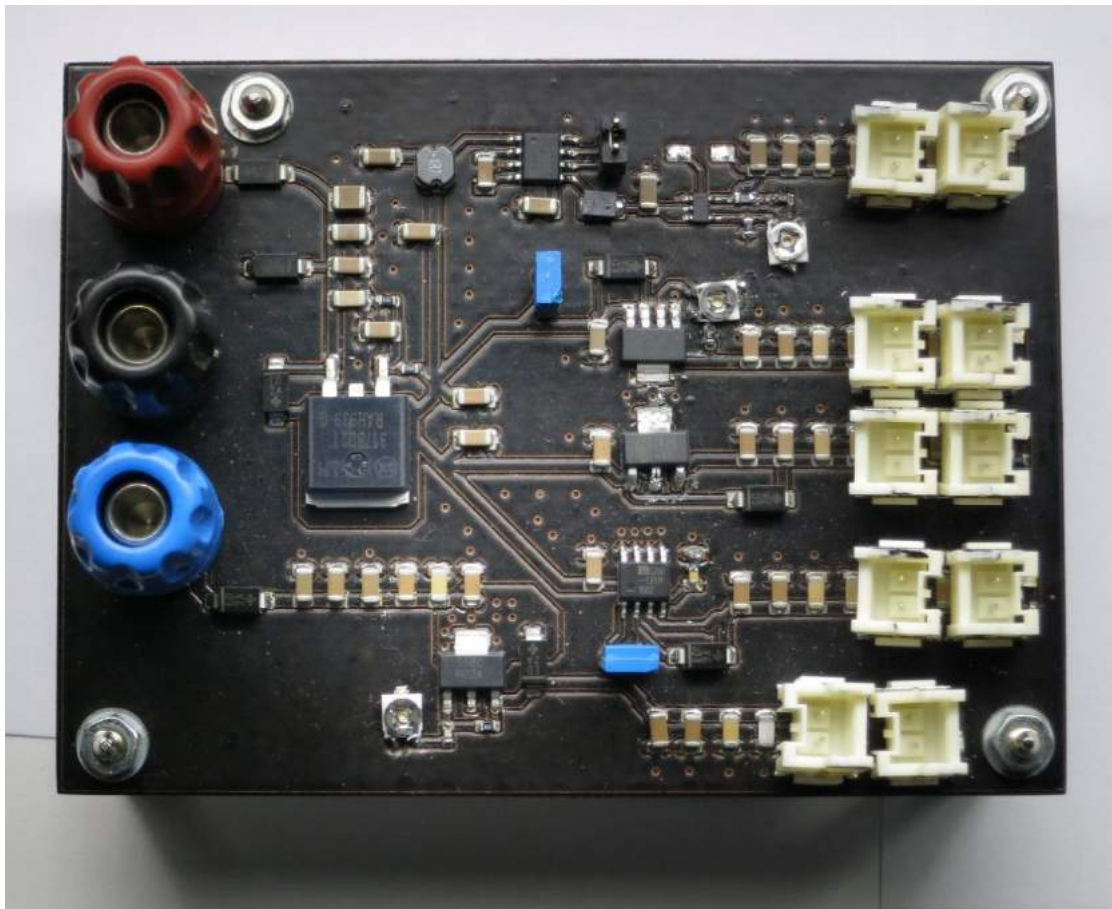




### H.3 Optoelektrický převodník (přijímač)



## H.4 Zdroj



# I OBSAH DOPROVODNÉHO CD

Příložené CD obsahuje tyto složky:

<b>/DPS</b>	Návrh DPS
<b>/DPS - foto</b>	Foto výsledných DPS
<b>/Schémata</b>	Schémata, BOM
<b>/Software_MCU</b>	Software pro mikrokontroler
<b>/Testy</b>	Výsledky měření