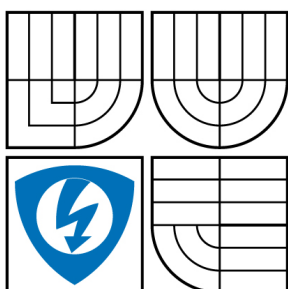


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BEZDRÁTOVÝ OPTICKÝ SPOJ V SÍTÍCH LAN A MAN

WIRELESS OPTICAL LINKS IN LAN AND MAN NETWORKS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

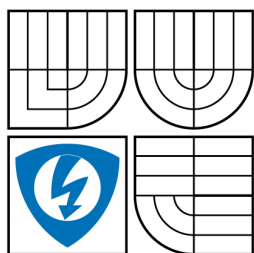
Bc. JAN ŠPORIK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Jan Šporik

ID: 83046

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátový optický spoj v sítích LAN a MAN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem projektu je návrh optického bezdrátového spoje přenosu volným prostorem, atmosférou. Provedte návrh simulačního modelu vysílače a přijímače v programu pspice. Navrhněte výkonovou bilanci optického spoje. Stanovte chybovost spoje BER. Provedte návrh a dle možností, otestování funkčních bloků jednotlivých částí optického spoje

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HARDY. D., MALLÉUS. G., MEREUR. N. Network. De Boeck. Paris 2002.
- [2] FILKA, M. Optické sítě. Skripta. VUT FEKT. Brno 2007.
- [3] HOSNDL, J. Optické jevy v atmosféře. Plzeň 2001. ISBN 80-7082-817-X.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 26.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

ABSTRAKT

Hlavním cílem této práce je návrh optického bezdrátového spoje přenosu volným prostorem, atmosférou. Práce popisuje skladbu hlavic atmosférického optického spoje. Část práce se zaměřuje na problematiku šíření optického paprsku atmosférou. Uvádí jevy, které mají zásadní vliv na přenos optického záření volným prostorem. V práci jsou zmíněny jevy absorpce, lomu světla, turbulence a rozptylu. Vlnové délky se atmosférou šíří s různým útlumem a proto uvádí rozbor použití vlnových délek v rozmezí 750 a 1600 nm v závislosti na meteorologické viditelnosti. Popisuje základy návrhu AOS pomocí stacionárního modelu využitím výkonové bilanční rovnice. Popisuje základy popisu statistického modelu, který umožňuje určit dostupnost na základě pravděpodobnosti. Obecně popisuje současné možnosti AOS.

V praktické části se práce zaměřuje na návrh simulačního modelu vysílače a přijímače AOS v programu PSPICE. Přijímač i vysílač jsou navrhovány tak, aby mohly nahradit transiver v media konvertoru. Přijímač hraje klíčovou roli, a proto je mu věnována velká část práce. Model přijímače je složen z fotodiody a transimpedančního zesilovače. Je provedeno testování obvodu přijímače. Model vysílače ukazuje princip modulování proudu, který teče laserovou diodou, vstupním modulačním napětím. V práci se nerealizuje model atmosféry, který by sloužil jako vazba mezi přijímačem a vysílačem. Obvod přijímače je podroben šumové analýze. Je určen parametr NEP a SNR. Pro modely přijímače a vysílače je vypočítána výkonová bilanční rovnice. Na základě požadavku na chybovost BER je stanovena maximální vzdálenost hlavic, které tuto podmínku spojují. Z modelů vysílače a přijímače vychází návrh praktické realizace. Jsou navrženy desky plošných spojů v programu EAGLE. V rámci práce není realizováno žádné schéma zapojení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Bezdrátový optický spoj, model přijímače, budič laseru, výkonová bilanční rovnice, 100 Mbit/s

ABSTRACT

The main aim of this thesis is the design of an optical wireless link that is transmitted in free space, in the atmosphere. The thesis describes the composition of heads of the atmospheric optical link. One part of this work focuses on the issue of the spread of optical beam in the atmosphere. The facts which have a major impact on the transmission of optical radiation in free space are pointed out here as well. In this work phenomena of absorption, refraction of light, turbulence and dispersion are discussed. Wavelengths spread in the atmosphere with different decline and therefore this thesis provides an analysis of the use of wavelengths between 750 and 1600 nm depending on the meteorological visibility. It describes the basis of the design of AOS through stationary model using power balance equation. It depicts the description of the statistical model, which makes possible to determine the availability on the basis of probability. Current possibilities of AOS are in general described in this work.

The practical part of the work is focused on the design of simulation model of transmitter and receiver AOS in the program Pspice. The receiver and transmitter are designed to replace transiver in the media converter. The receiver plays a key role, and therefore big part of the thesis is given to it. Receiver model is composed of a photodiode and of an transimpedance amplifier. The receiver circuit has been tested. The model of transmitter shows the principle of modulating of current, which flows in laser diode. This work does not carried the model of atmosphere, which would serve as a link between the receiver and the transmitter. The circuit of the receiver is subjected to the noise analysis. Parameter NEP and SNR is designed. Link budget is calculated for models of the receivers and the transmitters. The maximum distance of heads is set based on the requirements for a BER error rate which combine this condition. The design of the practical implementation results from the models of transmitters and receivers. Printed circuit boards are designed in EAGLE. Within the frame of this thesis no circuit diagram is carried out.

KEYWORDS

Free space optics, model of receiver, laser driver, link budget, 100 Mbit/s

ŠPORIK, J. *Bezdrátový optický spoj v sítích LAN a MAN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 84 stran.
Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Bezdrátový optický spoj v sítích LAN a MAN jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miloslav Filka, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

ÚVOD	6
1 BEZDRÁTOVÝ OPTICKÝ SPOJ	7
1.1 HLAVICE	7
1.2 PŘIJÍMAČ RX.....	8
1.3 VYSÍLAČ TX	8
2 ATMOSFÉRA PŘENOSOVÝM MÉDIEM	9
2.1 SLOŽENÍ ATMOSFÉRY	9
2.2 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	10
2.3 FYZIKÁLNÍ PODSTATA SVĚTLA	10
2.4 ŠÍŘENÍ SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ V ATMOSFÉŘE	11
2.4.1 ABSORPCE.....	12
2.4.2 LOM, ODRAZ SVĚTELNÝCH PAPRSKŮ V ATMOSFÉŘE	12
2.4.3 ROZPTYL	12
2.4.4 TURBULENCE	16
3 VLNOVÉ DÉLKY PRO AOS.....	18
4 SPOLEHLIVOST AOS	20
4.1 STATISTICKÝ MODEL OAS	20
4.2 BER PRO AOS.....	20
5 STACIONÁRNÍ MODEL AOS	21
5.1 VÝKONOVÁ BILANČNÍ ROVNICE.....	21
5.2 VÝKONOVÝ BILANČNÍ DIAGRAM.....	21
6 MOŽNOSTI A LIMITY AOS.....	22
6.1 PARAMETRY AOS	22
6.1.1 SCINTILACE.....	22
6.1.2 ZAMĚŘENÍ.....	23
6.1.3 SOLÁRNÍ INTERFERENCE.....	23
6.2 VYSÍLAČ.....	24
6.2.1 ZDROJ.....	24
6.2.2 STŘEDNÍ HODNOTA VÝSTUPNÍHO VÝKONU	25
6.2.3 DIVERGENCE PAPRSKU D.....	25
6.2.4 ŠÍŘENÍ PAPRSKU	25
6.2.5 VYUŽÍVÁNÍ MNOHONÁSOBNÝCH OPTICKÝCH CEST	25
6.3 PŘIJÍMAČ A MATERIÁLY	26
6.3.1 DETEKTORY PRO KRÁTKÉ VLNOVÉ DÉLKY	26
6.3.2 DETEKTORY PRO DLOUHÉ VLNOVÉ DÉLKY	26
6.4 BEZPEČNOST PŘI PRÁCI LASERY.....	26
6.5 VÝKONOVÁ BILANCE SPOJE	27
6.5.1 SYSTÉMOVÁ REZERVA M.....	28
7 VLASTNÍ NÁVRH AOS	29

7.1 TRANSIVER	29
7.1.1 ROZHRANÍ.....	30
7.1.2 LVPECL	30
7.1.3 100BASE-FX (IEEE 802.3U)	31
7.2 PŘIJÍMAČ	32
7.2.1 MODEL FOTODIODY	33
7.2.2 ZAPOJENÍ FOTODIODY	35
7.2.3 OBVOD FOTODIODY A OPERAČNÍHO ZESILOVAČE	36
7.2.4 ŠÍŘKA PÁSMO ZAPOJENÍ S OZ.....	38
7.2.5 ŠUMOVÁ ANALÝZA OBVODU S OZ.....	39
7.2.6 MODEL ZAPOJENÍ FOTODIODY S OZ	42
7.2.7 MODEL ZAPOJENÍ FOTODIODY S OZ S REVERZNÍM NAPĚTÍM	47
7.3 VÝSÍLAČ	50
7.3.1 LASEROVÁ DIODA	50
7.3.2 MODEL LASEROVÉ DIODY	50
7.3.3 BUDIČ LASERU	52
7.3.4 BUDIČ LASERU	53
7.4 VÝKONOVÁ BILANCE SPOJE	56
7.4.1 USPOŘÁDÁNÍ SPOJE, POŽADAVKY	56
7.4.2 PARAMETRY VYSÍLAČE A PŘIJÍMAČE.....	56
7.4.3 ROZMÍSTĚNÍ ZDROJŮ ÚTLUMU V AOS.....	57
7.4.4 VÝPOČET VÝKONOVÝCH ÚROVNÍ V ENERGETICKÉ BILANCÍ AOS	58
7.4.5 VÝPOČET ÚTLUMŮ V ENERGETICKÉ BILANCÍ AOS	59
7.4.6 VÝKONOVÁ BILANCE OBS	61
7.4.7 ZHODNOCENÍ, CHYBOVOST BER	62
8 ZÁVĚR.....	63
9 LITERATURA	65
SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ.....	68
PŘÍLOHA A SCHÉMA ZAPOJENÍ TIA V PROGRAMU TINA	74
PŘÍLOHA B NEP	75
PŘÍLOHA C VYSÍLAČ	78
PŘÍLOHA D TIA.....	79
PŘÍLOHA E TIA – LVPECL.....	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr.: 1-1 Základní spojené AOS.....</i>	<i>7</i>
<i>Obr.:1-2 Skladba hlavíc AOS.....</i>	<i>8</i>
<i>Obr.: 2-1 Rozložení intenzity světla ve slunečním spektru dle Planckova zákona [3].....</i>	<i>10</i>
<i>Obr.: 2-2 Závislost útlumu Mieovým rozptylem na vlnové délce, převzato z [9].....</i>	<i>13</i>
<i>Obr.: 2-3: Sloupcový graf hodnot útlumu $\alpha_{i,ATM}$ v závislosti na viditelnosti V_M.</i>	<i>16</i>
<i>Obr.: 4-1: Blokové schéma pro určení BER.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr.: 5-1 Výkonový úrovnňový bilanční diagram.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr.:6-1 Závislost vzdálenosti L_{12} na útlumu atmosféry pro různou systémovou rezervu.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr.: 7-1 Blokové zapojení návrhu</i>	<i>29</i>
<i>Obr.: 7-2 Vstupní a výstupní napěťové úrovně pro LVPECL</i>	<i>31</i>
<i>Obr.: 7-3 Kódování NRZI.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr.: 7-4 Náhradní model fotodiody z diskretních prvků.</i>	<i>33</i>
<i>Obr.: 7-5 Fotodioda zapojená ve fotovoltaickém a fotokonduktivním režimu.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr.: 7-6 Zapojení fotodiody s OZ ve fotovoltaickém režimu(transimpedanční OZ)</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 7-7 Zapojení fotodiody s OZ s přiloženým reverzním napětím U_R.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr.: 7-8 Zapojení fotodiody s OZ ve fotokonduktivním režimu.....</i>	<i>37</i>
<i>Obr.: 7-9 Graficky znázorněná závislost vlastností OZ</i>	<i>41</i>
<i>Obr.: 7-10 Základní zapojení fotodiody a TIA bez reverzního napětí v PSPICE</i>	<i>42</i>
<i>Obr.: 7-11 Průběh proudu I_d a výstupního napětí OZ</i>	<i>43</i>
<i>Obr.: 7-12 Oscilace výstupního napětí, vstupní proud s frekvencí 10 MHz</i>	<i>44</i>
<i>Obr.: 7-13 Výstupní napětí pro vstupní proud frekvence 66 MHz.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr.: 7-14 TINA, přenosová charakteristika obvodu modelu.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr.: 7-15 TINA, výstupní napětí.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr.: 7-16 TINA, Schéma zapojení PIN fotodiody S5971 s TIA THS4304.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr.: 7-17 TINA, Výstupní napětí obvodu s reverzním napětím.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr.: 7-18 TINA, přenosové charakteristiky obvodu.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr.: 7-19 Model LD MP85 s obvodem pro měření V-A charakteristiky.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr.: 7-20 V-A charakteristika modelu LD PH85</i>	<i>51</i>
<i>Obr.: 7-21 Vstupní napěťový signál do transiveru.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr.: 7-22 Model pro simulaci budiče laseru se zapojenou LD.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr.: 7-23 Průběh budícího napětí a modulačního proudu LD.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr.: 7-24 Zjednodušený model OAS.....</i>	<i>56</i>

<i>Obr.:7-25 Místa útlumu a zesílení ve výkonové bilanci AOS.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr.:7-26 Grafické řešení rovnice (7.24)</i>	<i>61</i>
<i>Obr.:7-27 Výkonová bilance AOS pro volené parametry a vzdálenost $L_{VP} = 485,4$ m.....</i>	<i>62</i>

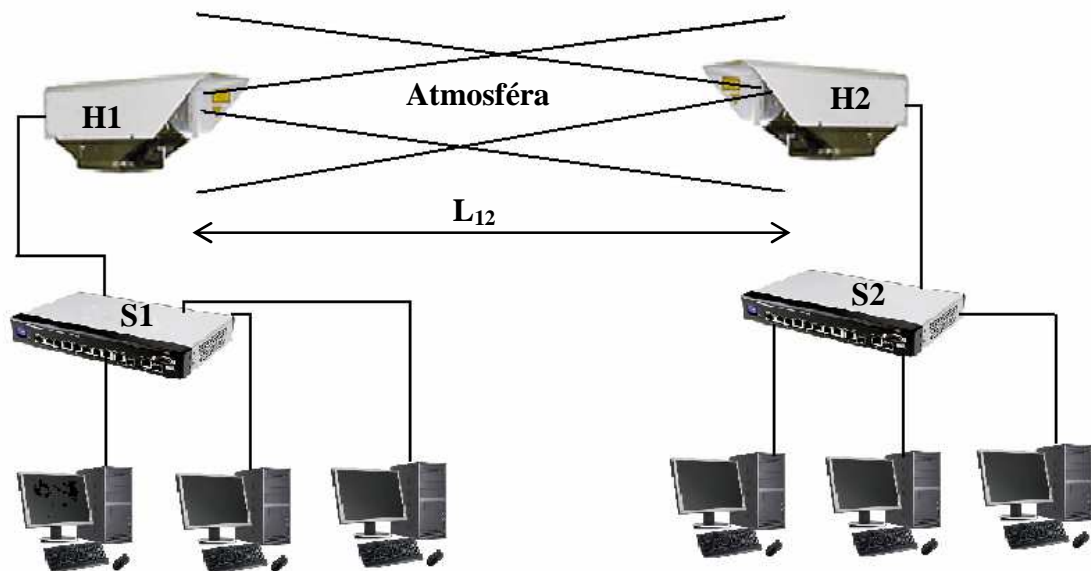
ÚVOD

Celý svět se globalizuje. Svět má potřebu spojit se v jednu velkou počítačovou síť. Stále rostoucí požadavky na propustnost v páteřních, přístupových sítích a už i při realizaci poslední míle. Také rostou nároky dostupnosti této služby, které zvyšují požadavky na fyzickou realizaci těchto sítí. Dnes, když je vznesen požadavek na vybudování vysokorychlostního datového spoje mezi dvěma budovami, které spolu sousedí, existují zhruba čtyři zajímavé možnosti na vybudování spoje. První dvě vyžadují fyzické spojení přenosovým médiem, která jsou buď měď nebo optické vlákno. Hlavní nevýhoda tohoto řešení je legislativa související s výkopem pro uložení kabeláže, doba realizace a praktická nemožnost tento spoj přemístit. Další dvě varianty spočívají v bezdrátovém spojení. Mění se prakticky frekvence nosného signálu. Jde o přenos radiovými vlnami a přenos pomocí úzkého světelného paprsku. Zde je naopak velká výhoda v rychlosti vybudování spoje a v jeho opakovatelnosti v jiné lokalitě. Využití radiových vln je v dnešním radiovými vlnami přesyceném éteru svázáno normami a regulacemi. Přenos světelným paprskem není zatím regulován. Je potřeba se jen řídit nařízeními vlády o neionizujícím záření. Hlavním cílem této práce je návrh optického bezdrátového spoje k přenosu volným prostorem. Popisuje skladbu hlavic atmosférického optického spoje. Velká část práce se zabývá problematikou šíření světelného paprsku volným prostorem. Uvádí jevy, které mají zásadní vliv na přenos optického záření volným prostorem. Vlnové délky se atmosférou šíří s různým útlumem a proto uvádí rozbor použití vlnových délek v rozmezí 750 a 1600 nm v závislosti na meteorologické viditelnosti. Popisuje základy návrhu AOS pomocí stacionárního modelu využitím výkonové bilanční rovnice. Seznamuje se základy popisu statistického modelu, který umožňuje určit dostupnost spoje na základě pravděpodobnosti. Je probrán současný stav a možnosti AOS.

V praktické části se práce zaměřuje na návrh simulačního modelu vysílače a přijímače AOS v programu PSPICE. Přijímač i vysílač jsou navrhovány tak, aby mohly nahradit transiver v media konvertoru. Přijímač hraje klíčovou roli, a proto je mu věnována velká část práce. Model vysílače ukazuje princip modulování proudu, který teče laserovou diodou, vstupním modulačním napětím. V práci se nerealizuje model atmosféry, který by sloužil jako vazba mezi přijímačem a vysílačem. Obvod přijímače je podroben šumové analýze. Je určen parametr NEP a SNR. Pro modely přijímače a vysílače je vypočítána výkonová bilanční rovnice. Na základě požadavku na chybovost BER je stanovena maximální vzdálenost hlavic, které tuto podmínku splňují. Z modelů vysílače a přijímače vychází návrh praktické realizace. Jsou navrženy desky plošných spojů v programu EAGLE. V rámci práce není realizováno žádné schéma zapojení.

1 BEZDRÁTOVÝ OPTICKÝ SPOJ

Dnešní představa je jednoduchá, z vysílače je úzký světelný paprsek vyslán skrz atmosféru k přijímači, kde je přijat. Stejně jako ve vláknové optice jsou pro AOS použity IR vlnové délky světla a komunikační systémy mají dokonce podobné šířky pásma. AOS je protokolově transparentní fyzické spojení, pracující zatím v bezlicenčním frekvenčním pásmu. Limitujícím faktorem je zajistit bezpečnost před poškozením kůže a pokožky v závislosti na neionizujícím záření. AOS pracují jak s digitální, tak i s analogovou modulací. Tato práce se ovšem zaměřuje na digitální AOS. Většina AOS využívá jednoduchou intenzitní modulaci IM/OOK (On-Off Keying), která je také využívá v digitálních systémech s vlákny. Většinou platí pro binární data, že pokud svítí reprezentuje log.1 a pokud nesvítí log.0. [1]



Obr.: 1-1 Základní spojené AOS

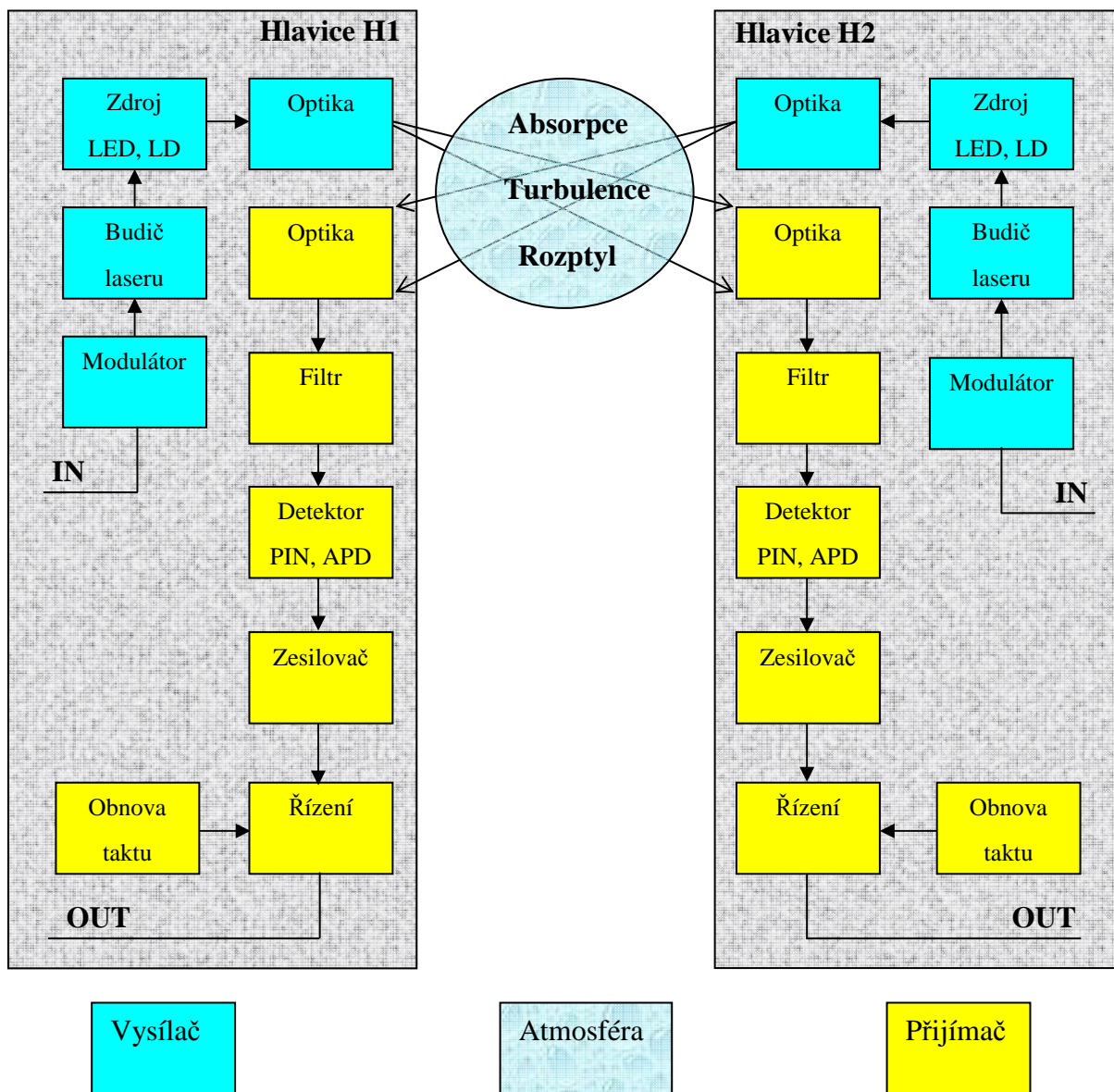
Na obrázku 1-1 je znázorněn plně duplexní AOS s hlavicemi H1 a H2 ve vzdálenosti L_{12} . Hlavice H jsou připojeny k aktivnímu S prvku metalickým, nebo optickým kabelem.

1.1 Hlavice

Hlavice AOS jsou většinou identické. Zaručují plný duplexní přenos dat. Na Obr. 1-2 je znázorněno blokové schéma hlavic H1 a H2. Tyrkysovou barvou jsou bloky tvořící vysílač a bloky přijímače mají žlutou barvu. Atmosféra je znázorněna jako kružnice.

1.2 Příjímač RX

Optický paprsek dopadá na optickou soustavu. Postupuje na optický spektrální pásmový filtr, který propustí pracovní vlnové délky. Detektor převádí tok fotonů na elektrický proud. Následuje zesílení na zesilovači. Než data opustí hlavici, většinou dojde k obnově taktu signálu.



Obr.:1-2 Skladba hlavic AOS

1.3 Vysílač TX

V případě, že je signál modulován v hlavici, obsahuje vysílač blok modulátoru, který řídí další obvod budiče laseru. Většinou je to napětím řízený zdroj proudu, který je dnes realizován jedním integrovaným obvodem. [2] Zdrojem světla může být LED dioda nebo laserová dioda.

Další oblast, která je zobrazena na Obr. 1-2 je atmosféra. Tomuto bloku je věnována celá následující kapitola.

2 ATMOSFÉRA PŘENOSOVÝM MÉDIEM

Mezi limitující faktory celého AOS patří paradoxně využití prostředí atmosféry jako přenosového média. V souvislosti s AOS bude dále v textu označováno jako APM (atmosférické přenosové médium). Nestálost a nehomogenita vlastností použitého APM klade limity v dosažitelné vzdálenosti a chybovosti pro AOS. Jejich překročení je možné pouze inovací v součástkové základně zdrojů a detektorů optického záření. Mezi nejdůležitější při návrhu AOS patří studie složení atmosféry v lokalitě předpokládané konstrukce, meteorologické údaje, jako například vzdušná vlhkost, dohlednost (viditelnost), rychlost větru, četnost mlh, přeháněk dešťových i sněhových.

2.1 Složení atmosféry

Zemská atmosféra se může rozdělit z hlediska jejího složení na tři základní složky.

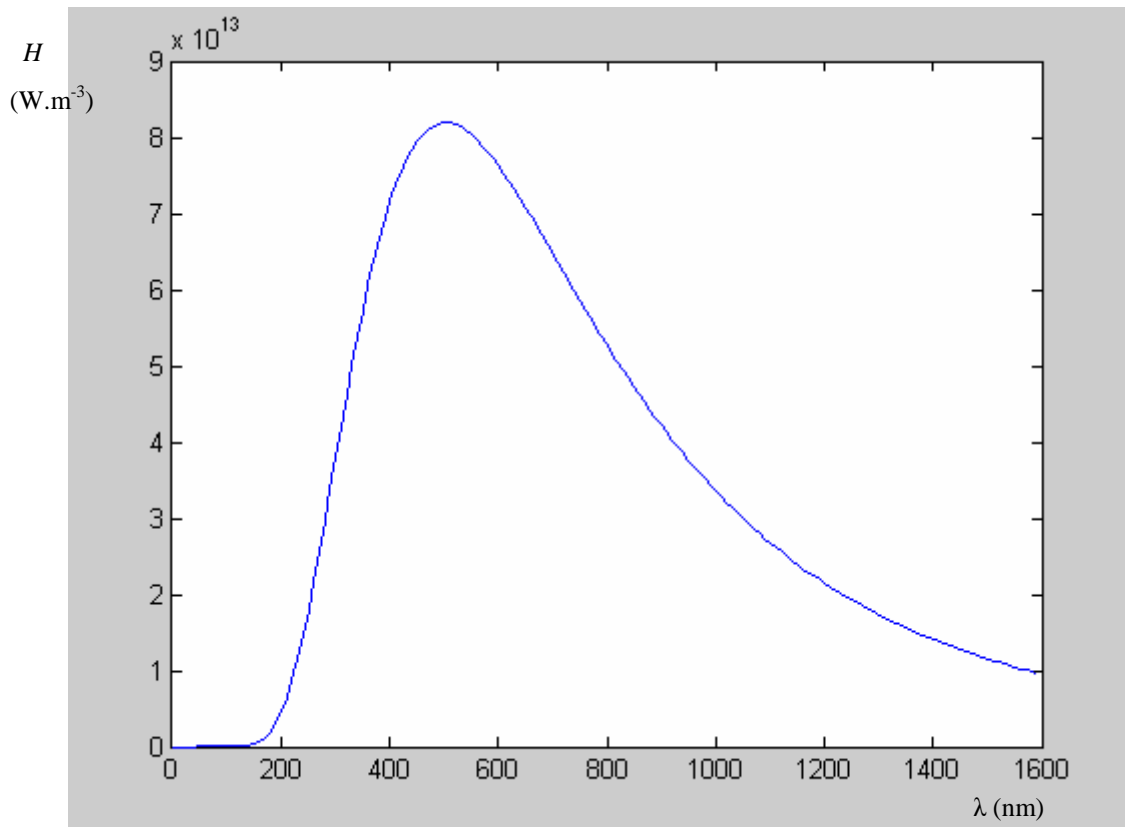
- Suchá a čistá část atmosféry tvořená směsí plynů (největší zastoupení má dusík a kyslík).
- Vodní páru, vodní kapičky nebo ledové částice. Množství vodní páry se časově a prostorově velmi dynamicky mění.
- Znečišťující příměsi přírodního typu. Například půdní a prachové částičky, jemné krystalky mořských solí, částice vulkanického popela, organického původu.

Z fyzikálního hlediska se může jednat o řídký aerosol představovaný soubory tuhých a kapalných částic rozprostřených v plynném prostředí.

Pro vertikální členění atmosféry se uplatňují různá hlediska. Například podle elektrických vlastností vzduchu, podle intenzity promíchání vzduchu nebo průběhu teploty vzduchu s výškou. Poslední uvedená možnost označuje nejspodnější část zemské atmosféry troposférou. S rostoucí výškou v ní u klesá teplota. V našich zeměpisných šířkách sahá do výšky asi 11 km, kde je teplota vzduchu $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Obsahuje podstatnou část vodní páry vyskytující se v atmosféře, vytvářejí se v ní oblaka a atmosférické srážky. [3] AOS používají jako APM právě troposféru.

2.2 Sluneční záření

Atmosférou na zemský povrch prostupuje sluneční záření a to přímé nebo rozptýlené. Rozložení intenzity světla ve slunečním spektru je definováno Planckovým zákonem a je zobrazeno pro teplotu černého tělesa $T = 5770$ K pomocí programu MATLAB na Obr.2-1.



Obr.: 2-1 Rozložení intenzity světla ve slunečním spektru dle Planckova zákona [3]

2.3 Fyzikální podstata světla

Světlo je elektromagnetické vlnění, které je možné popsat stejnými teoretickými principy, jak všechny druhy elektromagnetického záření. Vzniklo několik teorií, kterými se dá popsat chování světla. Nejstarší je teorie paprsková, ze které je analogicky odvozená paprsková (geometrická) optika. Následuje vlnová optika, která v sobě obsahuje problematiku paprskové optiky a popis světla jako elektromagnetického záření. Elektromagnetická optika obsahuje předchozí dvě teorie. Teorie kvantové optiky poskytuje vysvětlení vlastností všech optických jevů. Více v literatuře [4,5]. Kvantová teorie je založena na předpokladu, že světelné záření může být pohlcováno nebo vyzařováno v určitých energetických kvantech velikosti

$$E = h \cdot c \cdot \lambda^{-1} \quad (J; J \cdot s, m \cdot s^{-1}, m), \quad (2.1)$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu a λ je vlnová délka.

Albert Einstein nazval částice, ve kterých je soustředěna energie optického záření, fotony. Energie fotonu roste s kmitočtem optického záření podle vztahu [6]:

$$f = c \cdot \lambda \quad (\text{Hz}; m \cdot s^{-1}, m). \quad (2.2)$$

2.4 Šíření světelných paprsků v atmosféře

Světelné paprsky s vlnovými délkami odpovídajícím optickému záření (10nm až 1mm) je možné popsat jako elektromagnetické záření pomocí Maxwellových rovnic, které jsou uvedeny mimo jiné v literatuře [7]. Zde je také odvozena rychlost šíření elektromagnetických vln v v elektricky nevodivém prostředí o relativní permitivitě ϵ_r a relativní permeabilitě μ_r . V atmosférickém vzduchu se relativní permeabilita μ_r velmi blíží jedné a rychlost šíření je tedy:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (m \cdot s^{-1}; m \cdot s^{-1}, I) \quad (2.3)$$

V troposféře dochází ke kondenzaci vodních par, které způsobují vznik oblak, bouřek, mlh, deště, sněhu. Vlivem změn teplot dochází ke vzniku větrů a větrných turbulencí. Výše popsané jevy způsobují změny v indexu lomu, hustoty prostředí. Vznikají oblasti rozptylových a absorpčních center. Přenos optického výkonu přes APM budou ovlivňovat následující jevy:

- Absorpce a rozptyl světla na molekulách plynů a aerosolech
- Fluktuace optické intenzity vlivem turbulence atmosféry
- Záření pozadí
- Krátkodobé přerušení svazku například letícím ptákem

2.4.1 Absorpce

Pokud se šíří paprsek s určitou vlnovou délkou a určitou spektrální šířkou, dochází na molekulách plynu a částicích k úbytku jeho energie.

2.4.2 Lom, odraz světelných paprsků v atmosféře.

Relativní index lomu se může definovat jako podíl dvou rychlostí šíření světelných paprsků ve dvou různých prostředích, které jsou definovány pomocí relativní permitivity ϵ_r a relativní permeability μ_r . Popisujeme jej jako Snellův zákon. Více v literatuře [3].

Dřívější výzkumy šíření světla atmosférou vycházely ze zkoumání slunečního záření. Světelné paprsky se atmosférou nešíří přímočaře. Dochází k lomu (refrakci) vlivem změny hodnot indexu lomu. Ten se mění vlivem změny hustoty vzduchu a nebo změnou jeho teploty.

2.4.3 Rozptyl

Rozptyl souvisí s lomem optických paprsků, které se lámou ze směru šíření. U rozptylu rozeznáváme dva typy a to rozptyl na molekulách vzduchu (molekulární rozptyl) a na větších částicích přítomných v atmosféře.

Rayleighův rozptyl

Dochází u něj na molekulách, které jsou malé ve srovnání s vlnovou délkou. Účinnost molekulárního rozptylu i_R (tzv. Rayleighova rozptylu) je přímo úměrná převrácené hodnotě čtvrté mocniny vlnové délky λ rozptýleného záření, tj. [3]:

$$i \approx \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.4)$$

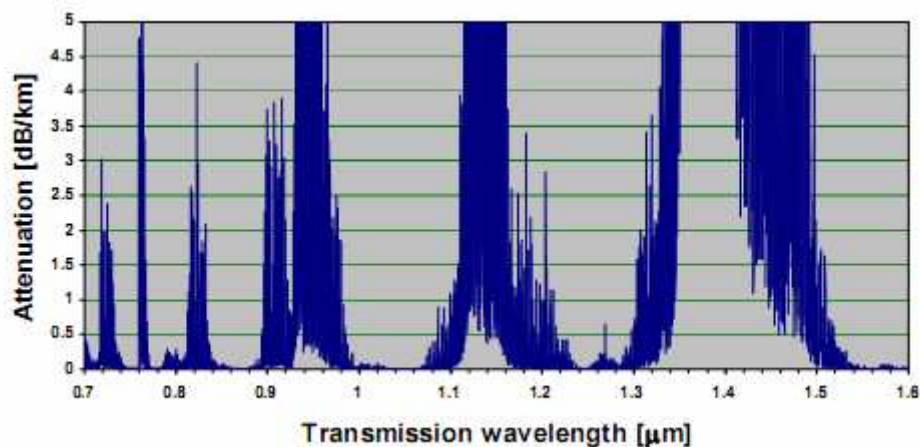
a proto jsou v rozptýleném slunečním záření nejvíce zastoupeny krátké vlnové délky, především odpovídající kratším vlnovým délkám odpovídající fialové a modré barvě.

Rozptyl na částicích, které jsou o několik řádů větší než molekuly vzduchu, má vzhledem k vlnové délce neutrální charakter. Všechny vlnové délky jsou rozptylovány stejně účinně a rozptýlené světlo má bílou barvu. Proto je například obloha modrá, převládají v ní molekuly vzduchu, a oblaka barvy bílé, protože obsahují kapky vody, nebo částice ledu.

Další rozdíl mezi rozptylem na molekulách a na aerosolových částicích je v odlišném směru rozdělení účinnosti rozptylu vzhledem ke směru dopadajícího světelného paprsku. Molekulární rozptyl má symetrický charakter. Rozptyl na větších částicích je asymetrický. [3]

Mieův rozptyl

Nastává na částicích, jejichž velikost je zhruba srovnatelná s vlnovou délkou.[8] Rozptyl na částicích ideálního sférického tvaru lze brát také jako Mieův rozptyl, který vzniká na částicích vodní kapky o velikosti řádově desetin milimetrů až několika milimetrů. Protože je vlnová délka mnohonásobně menší vzhledem k velikosti částice, může být pro výpočet rozptylu použita geometrická optika. [3] Mieovu teorii zpracovává i program MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmision), který slouží pro modelování šíření elektromagnetického vlnění atmosférou. Je schopen vypočítat například útlum vzniklý Mieovým rozptylem pro určité vlnové délky za určitých povětrnostních podmínek. [9] Na Obr.2-2. je znázorněn útlum trasy za dobrého počasí s viditelností >15 km.



Obr.: 2-2 Závislost útlumu Mieovým rozptylem na vlnové délce, převzato z [9].

Paprsky jsou v zemské atmosféře zeslabovány rozptylem a absorpcí, souhrn těchto jevů se označuje zeslabením optické intenzity (extinkcí). Dále také způsobují jev zvaný fluktuace optické intenzity, tedy kolísání kolem rovnovážné hodnoty.

Vliv absorpce a rozptylu se může vypočítat pomocí Lambertova-Beerova zákona, který vyjadřuje závislost absorpce světla při průchodu homogenní látkou tloušťky z [10, 11]:

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \cdot e^{-\alpha_s(\lambda) \cdot z} \quad (\text{W}; \text{W}) \quad (2.5)$$

kde $I_1(\lambda)$ je optická intenzita na začátku a $I_2(\lambda)$ je optická intenzita na konci vrstvy. α_e je koeficient extinkce v km^{-1} .

Z dvou hodnot optické intenzity se může vyjádřit spektrální propustnost atmosféry $T(\lambda)$ takto [11]:

$$T(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} = e^{-\alpha_e(\lambda) \cdot z} \quad (-) \quad (2.6)$$

Pokud je koeficient extinkce α_e konstantní je propustnost atmosféry rovna [11]:

$$T = \frac{I_2}{I_1} = e^{-\alpha_e \cdot z} \quad (-) \quad (2.7)$$

Koeficient extinkce α_e se dá popsat výčtem dílčích koeficientů odpovídajících jednotlivým jevům v atmosféře. [11]

$$\alpha_e = \alpha_{abs} + \alpha_{rr} + \alpha_{mr} + \alpha_{ra} \quad (dB; dB, dB, dB, dB), \quad (2.8)$$

kde α_{abs} odpovídá absorpci na molekulách, α_{rr} rozptylu na molekulách (Rayleighův rozptyl), α_{mr} rozptylu na částicích (Mieův rozptyl) a α_{ra} útlumu a rozptylu na aerosolech.

Meteorologická viditelnost (dohlednost) V_M

Je definována jako délka trasy v atmosféře, pro kterou propustnost dosahuje 2% pro vlnovou délku 555 nm. Tuto délku je možné měřit a na jejím základě vypočítat koeficient extinkce α_e z rovnice [11]:

$$T = 0,02 = e^{-\alpha_e(\lambda) \cdot V_M} \quad (-; \text{km}^{-1}, \text{km}), \quad (2.9)$$

kde úpravou vztahu získáme α_e

$$\alpha_e = \frac{3,91}{V_M} \quad (\text{km}^{-1}; \text{km}), \quad (2.10)$$

Na základě empirických poznatků je vztah pro jinou vlnovou délku upraven na tento tvar [8]:

$$\alpha_e = \frac{3,91}{V_M} \cdot \left(\frac{\lambda}{550 \cdot 10^{-9}} \right)^{-q} \quad (km^{-1}; m, km, km); \quad (2.11)$$

kde V_M je meteorologická viditelnost v km, λ je vlnová délka zadaná v metrech a q je dán podle tabulky:

Parametr q	Viditelnost V_M (km)	Stav atmosféry
0	$V_M < 0,5$	Silná mlha
$V_M - 0,5$	$0,5 < V_M < 1$	Střední mlha
$0,16 V_M + 0,34$	$1 < V_M < 6$	Opar
1,3	$6 < V_M < 50$	Čistá
1,6	$V_M > 50$	Velmi čistá

Tab. 2-1 Hodnoty parametru q v závislosti na viditelnosti V_M

Vztah mezi koeficientem extinkce α_e a $\alpha_{i,ATM}$ je dán takto [12]:

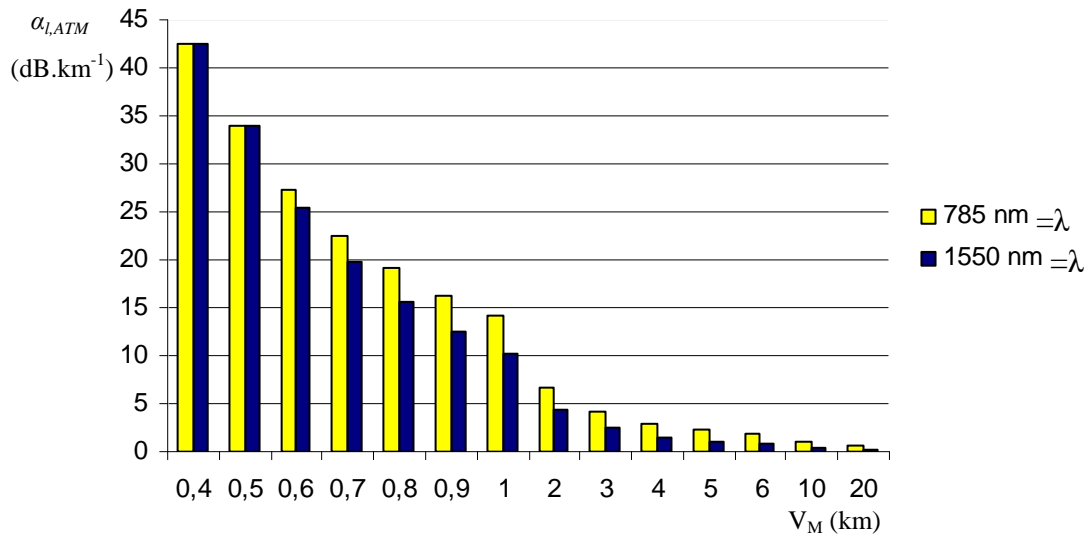
$$\alpha_{i,ATM} = |-4,34 \cdot \alpha_e| \quad (dB km^{-1}; km^{-1}) \quad (2.12)$$

Empiricky byly zjištěny tyto hodnoty útlumu $\alpha_{i,ATM}$ způsobené rozptylem a útlumem na molekulách a částicích a jsou zobrazeny v tabulce 2-2. [8]

Viditelnost V_M (km)	$\alpha_{i,ATM}$ (dB/km)		Stav atmosféry
	$\lambda = 785$ nm	$\lambda = 1550$ nm	
0,05	340	340	Silná mlha
0,2	85	85	
0,5	34	34	Střední mlha, déšť (180 mm/h), blizzard
1	14	10	Slabá mlha, déšť (100 mm/h), sněžení
2	7	4	Opar, déšť (10 mm/h)
4	3	2	
10	1	0,4	Čistá
23	0,5	0,2	

Tab. 2-2 Atmosférický útlum v závislosti na viditelnosti V_M pro různé vlnové délky

Největší útlum při šíření světelného paprsku atmosférou způsobuje mlha. Pro čistou standardní atmosféru se udává hodnota koeficientu útlumu 0,5 db/km, který se označuje například takto $\tilde{\alpha}_{l,ATM}$.



Obr.: 2-3: Sloupcový graf hodnot útlumu $\alpha_{l,ATM}$ v závislosti na viditelnosti V_M .

2.4.4 Turbulence

Vlivem teplotních a mechanických jevů dochází v atmosféře k proudění vzduchu. Různě teplý vzduch má různé indexy lomu, to způsobuje různé rozložení indexu lomu pro vrstvy vzduchu. Zavádí se strukturní parametr indexu lomu C_n^2 v ($m^{\frac{2}{3}}$), který je měrou pro sílu turbulence. Hodnoty C_n^2 leží v intervalu $10^{-14} m^{\frac{2}{3}}$ (slabá turbulence) a $10^{-12} m^{\frac{2}{3}}$ (silná turbulence). Jev turbulence způsobuje tyto jevy:

- Rozšiřování svazku, které způsobuje snížení přijímaného optického výkonu.
- Bloudění svazku.
- Fluktuační úhlu dopadu, která způsobuje pohyb optické skvrny po rovině plochy fotodiody.
- Scintilaci, jde o fluktuační intenzity optického svazku v průřezu svazku, což způsobuje zhoršení odstupů signál šum. V souvislosti s tímto problémem se zavádí scintilační index, více v literatuře. [12]

Všechny tyto jevy dohromady způsobují pokles přijímaného optického výkonu a pokud jeho hodnota klesne pod hodnotu citlivosti přijímače P_0 dojde k tzv. úniku trvajícím určitý časový interval a vyskytující se s určitou frekvencí.

Změny způsobené v přijímaném optickém výkonu způsobené turbulencemi se pohybují v řádech stovek Hz. V porovnání s vlivy extinkce, která nastupuje v intervalu desítek minut až hodin, jde o změny velmi rychlé.

3 VLNOVÉ DÉLKY PRO AOS

Rozdělení elektromagnetického spektra je v tabulka 2-1. Do optické oblasti spektra se počítají vlnové délky z oblasti $\lambda = 1\text{mm}-10\text{nm}$ a jsou v tabulce vybarveny. Donedávna se pro AOS používaly vlnové délky v oblasti viditelného spektra. Dnes je v komerčně vyráběných AOS systémech používán rozsah vlnových délek blízkého IR mezi 750 a 1600 nm. Jsou tedy i pokusy se systémy na 10 000nm. Fyzika a přenosové vlastnosti optické energie při průchodu atmosférou je podobná pro viditelné a blízké IR vlnové délky. Je zde několik faktorů, které určují, kterou vlnovou délku vybrat.

Radiové vlny	$\lambda > 1 \text{ m}$
Mikrovlny	$\lambda = 0,1 \text{ m} - 1 \text{ mm}$
Infračervené záření	$\lambda = 1 \text{ mm} - 750 \text{ nm}$
Dalekou infračervenou, (FIR, far-IR)	$\lambda = 1 \text{ mm} - 10 \text{ }\mu\text{m}$
Střední infračervenou, (MIR, mid-IR)	$\lambda = 10 - 2,5 \text{ }\mu\text{m}$
Blízkou infračervenou, (NIR, near-IR)	$\lambda = 2,500 - 750 \text{ nm}$
Viditelné světlo	$\lambda = 750 - 400\text{nm}$
Ultrafialové záření	$\lambda = 400 - 10 \text{ nm}$
Rentgenové záření	$\lambda = 10 - 0,1 \text{ nm}$
Gama záření	$\lambda < 0,1 \text{ nm}$

Tab. 3-1 Elektromagnetické spektrum s odpovídajícími vlnovými délkami

Atmosférická okna pro přenos

Určité vlnové délky se za určitých povětrnostních podmínek šíří lépe než jiné. V blízké IR, nastává absorpce na částicích vody (vlhkost), které jsou součástí atmosféry i při dobrém počasí. Příspěvek plynové absorpce (na molekulách plynu CO_x a NO_x) k celkovému absorpčnímu koeficientu nepřispívá tolik, jako absorpce na vodě. Pro větší vlnové délky ze vzdálené IR (>2000nm) roste podíl útlumu vlivem plynové absorpce. Pomocí programu MODTRAN byla odvozena některá pásma vlnových délek pro přenos standardní klidnou atmosférou. Jde o pásma 780-850nm a 1520-1600nm.

- **780-850nm**, na 780nm pracují například levné LD pro CD mechaniky. Pro 850nm je dostupná většina spolehlivých, levných, výkonných a kvalitních zdrojů a detektorů.

Velmi citlivé Si lavinové diody (APD) a k tomu pro vysílače VCSEL (Vertical-Cavity-Emitting Laser). Tyto vlnové délky již nejsou pouhým okem viditelné, což mírně komplikuje zaměření a zvyšuje požadavky na bezpečnost.

- **1520-1600nm**, vhodné pro AOS, jsou zde dostupné velmi kvalitní zdroje a detektory. V tomto pásmu je díky dostupnosti kvalitních komponent využít WDM (Wavelength-Division Multiplexing). Komponenty jsou ovšem dražší, detektory jsou méně citlivé a mají menší plochu pro příjem paprsků v porovnání s Si APD detektory. Použití detektorů ve vláknové optice snižuje jejich cenu. Je zde také možné využít EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) technologii, která nabízí velké výstupní výkony přes 500mW a velké přenosové rychlosti a to přes 2,5 Gbit/s. Nakonec je možné v této vlnové délce použít 50krat až 60krat větší vysílací výkon pro stejnou klasifikaci bezpečí oka v porovnání s vlnovými délkami na 850nm. Delší vlnové délky se nedostanou okem až k sítnici.
- **10 000nm**; relativně nová vlnová délka pro komerční AOS. V porovnání s předešlými pásmy má lepší přenosové vlastnosti v mlze. Energie na těchto vlnových délkách již neprojde sklem, což znemožňuje použití klasických čoček. Povoluje velké výstupní optické výkony.[9]

..

4 SPOLEHLIVOST AOS

Mezi parametry udávané výrobcí a návrháři AOS se využívá několika pojmů k popsání spolehlivosti a dostupnosti AOS. Využívá se statistický model, který bere přijímaný výkon a útlum trasy jako náhodné veličiny a jejich fluktuační se vyhodnocují statisticky.

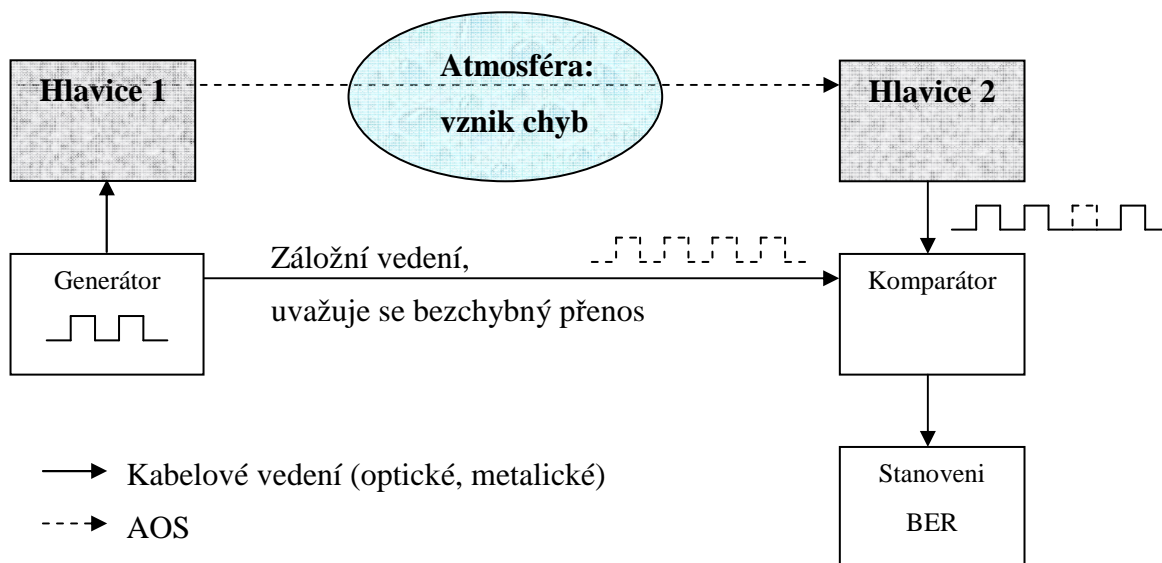
4.1 Statistický model OAS

Vlivem fluktuační přijímaného výkonu se může zvýšit chybovost BER (Bit Error Rate), nebo může dojít k tzv. úniku. Jako únik je vyhodnocena situace, kdy přijímaný výkon klesne pod úroveň citlivosti detektoru, nebo vzroste nad úroveň saturace. Pro ohodnocení úniků se zkoumá čas přerušení (stav úniku) vůči celkovému času sledování linky. Vyhodnocuje se tak dostupnost spoje v procentech, například 99,9%. Krátké úniky zvyšují BER a dlouhodobé přispívají k nedostupnosti spoje. [1]

4.2 BER pro AOS

Chybovost BER je pro AOS počítána stejným způsobem jako v jakémkoliv jiném komunikačním systému. Je dán poměrem chybně přenesených bitů n_{ch} k celkovému počtu bitů n . Za čisté atmosféry se BER pro méně kvalitní AOS pohybuje kolem 10^{-6} a pro velmi kvalitní zařízení, která využívají redundantní zálohy OAS například formou mikrovlnného spoje, je kolem 10^{-12} . Chybovost je zde dána minimálním odstupem signál šum SNR_0 , který zaručuje danou chybovost BER.

Možnosti měření BER jsou přes redundantní linku. Jak ukazuje obrázek 3-1.



Obr.: 4-1: Blokové schéma pro určení BER.

5 STACIONÁRNÍ MODEL AOS

Pro návrh AOS se vychází ze dvou modelů. Stacionárního modelu spoje a statistického modelu, který byl zmíněn v kapitole 4. Stacionární model se využívá pro energetickou bilanci spoje. Jde o matematický model tvořený výkonovou bilanční rovnicí a výkonovým úrovněm diagramem. Veličiny, které jsou zde použity považují za střední hodnoty.

5.1 Výkonová bilanční rovnice

Výkonová bilanční rovnice popisuje energetickou bilanci spoje pro standardní čistotu atmosféru, kde $\tilde{\alpha}_{l,ATM} = 0,5$ dB/km a strukturální parametr indexu lomu $\tilde{C}_n^2 \approx 10^{-14} m^{-\frac{2}{3}}$, a je možno ji zapsat například takto [1]:

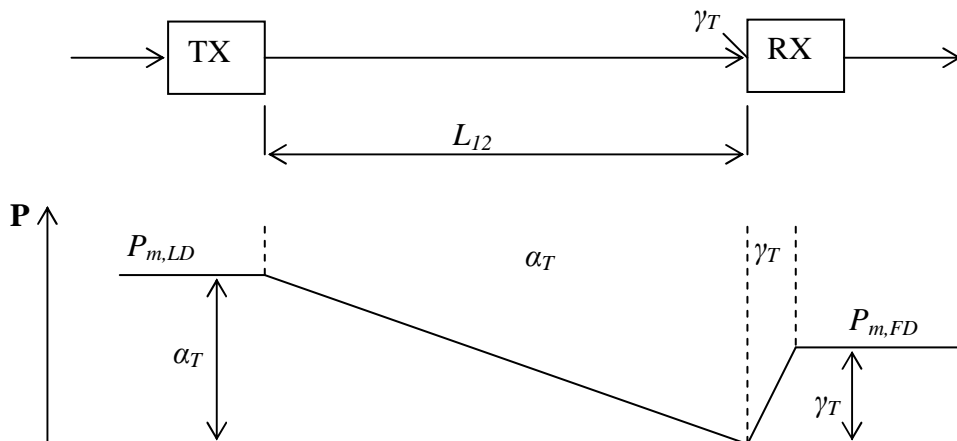
$$P_{m,FD} = P_{m,LD} - \alpha_T + \gamma_T \quad (\text{dBm}; \text{dBm}, \text{dB}, \text{dB}), \quad (5.1)$$

kde $P_{m,FD}$ je střední výkon na fotodiodě, $P_{m,LD}$ je střední výkon laserové diody, α_T je celkový útlum a γ_T je celkový zisk.

Celkový útlum α_T je dán součtem jednotlivých útlumů a to útlumy na vysílaci $\alpha_{\Sigma,TX}$ a přijímači $\alpha_{\Sigma,RX}$ dané průchodem čočkami, nedokonalostmi navázání svazku do čoček, geometrickým útlumem (útlumem šíření) α_{12} a útlumem atmosféry α_{ATM} . Zisk γ_T je dán součtem zisku, který vznikne větší plochou přijímací čočky v porovnání s vysílací, a jinými zisky. Více v literatuře [1].

5.2 Výkonový bilanční diagram

Výkonové bilanční rovnici odpovídá diagram. Na Obr 5-1 jsou zobrazeny přijímač RX a vysílač TX ve vzdálenosti L_{12} . Úroveň středního výkonu TX je $P_{m,LD}$ a na RX je rovna $P_{m,FD}$.



Obr.: 5-1 Výkonový úrovněv bilanční diagram

6 MOŽNOSTI A LIMITY AOS

Současné možnosti a limity AOS jsou rozepsány v následující kapitole. Asi nejdůležitější je porozumět parametrům, které jsou níže popsány. Následuje popis nynějších trendů v oblasti AOS. V poslední části jsou vybrány modelová řešení v závislosti na vzdálenosti spoje a porovnání některých parametrů.

6.1 Parametry AOS

Parametry se dají rozdělit podle mnoha kritérií. Následující rozdělení popisuje vnitřními parametry hlavičky AOS a vnějšími podmínkami proměnné parametry prostředí.

- Vnitřní parametry jsou důležité pro návrh. Optický výkon, vlnová délka, vysílací pásmo, divergence svazku, optické ztráty na straně vysílače a citlivost přijímače, BER, velikost přijímací čočky, ozářená plocha na straně přijímače FOV (Field Of View).
- **Vnější podmínky.** Viditelnost, plynoucí atmosférický útlum, scintilace, vzdálenost, ztráty okenní tabulí a ztráty nesprávným zaměřením systému.

Dostupnost AOS je primárně závislá na klimatu a fyzických charakteristikách v dané lokalitě. Snížení viditelnosti vede k snížení dostupnosti AOS. Obecně se říká, že AOS je schopno pracovat v takové vzdálenosti, která je 2krát větší jak viditelnost oka za všech specifických podmínek, např. déšť. Hlavní faktor snižující výkonnost obsahuje atmosférický útlum, scintilace, pohyb budov, interference se slunečním zářením (pozadí), přerušení optického svazku, např. ptákem.

6.1.1 Scintilace

Nebo také jiskření. Jiskření je jev na ploše detektoru, který je vyvolán refrakcí v atmosféře. Prakticky dochází ke změně intenzity v čase na ploše přijímače, který detekuje vysílaný signál přes určitou vzdálenost. To má za následek fluktuace výkonu, protože vlivem tepla se po trase optického paprsku mění index lomu, více v kapitole 2. Atmosféra je jako série malých čoček, které odklání světelný paprsek pryč z cesty. Časová míra fluktuací je řádu milisekund a je závislá na síle větru a teplotě. Mění se během dne. V poledne je nejhorší, když jsou teploty nejvyšší. Pokud dosáhne velikost maxima, tak se už se nezvyšuje se zvyšující vzdáleností.

Současné řešení problému

Scintilace způsobují fluktuace přijímaného výkonu a v nejhrošším případě vedou ke zvýšení BER. AOS instalace s dostupností 99,9% nebo lepší, mají na vzdálenosti do 1 km většinou dost velkou systémovou rezervu, aby je fluktuace neovlivnily. Na větší vzdálenost se pak využívá vícenásobných vysílacích cest, které snižují vliv scintilace.

6.1.2 Zaměření

Jednou z klíčových věcí pro funkci AOS je zasáhnout přijímací aperturu tenkým světelným paprskem z vysílače. AOS většinou vysílají jeden nebo více paprsků s průměrem 3-8 mm na vysílací straně a rozšířený na straně přijímače na 1 až 5 m ve vzdálenosti 1 km.

Velkým problémem je pohyb hlavic. Jde o pohyb budov, na kterých jsou AOS hlavice připevněny vlivem teplotní roztažnosti materiálu, silným větrem. Tento pohyb způsobuje výchylky až 2 mrad. Ve vzdálenosti 1 km dojde k výchylce až 2 m.

Současné řešení problému

- **Systém bez automatického zaměrování.** Je navržen přizpůsobením (zvýšením) divergence vysílacího paprsku tak, aby minimalizoval úniky a pokryl přijímací aperturu i v rámci pohybu budov. Je levnější, ale snižuje systémovou rezervu spoje, vlivem geometrických ztrát.
- **Systém s automatického zaměrování.** Může kompenzovat pohyb budov. Tyto systémy mají malé geometrické ztráty a menší ztráty prvotním zaměřením. Je podstatně dražší.

6.1.3 Solární interference

Detektor je velmi citlivý a ve spojení s velkou plochou přijímací čočky může dojít snadno k navázání slunečního záření, které může zarušit probíhající komunikaci. Proto je vhodné používat pro AOS vlnové délky mimo oblast nejvyšších intenzit slunečního záření, jak je uvedeno na Obr. 2-1.

Současné řešení problému

K odstranění tohoto nežádoucího jevu stačí použít optický spektrální filtr o určité vlnové délce. [9]

6.2 Vysílač

Návrh je svázán s cenou a také s požadovaným dosahem, dostupností, přenosovou rychlostí potřebou pro aplikaci. Rozhodnout mezi systémem s automatickým zaměřováním, nebo bez. S jedním přijímačem, vysílačem, nebo s mnoha. S přímou vaznou nebo vláknovou vaznou.

6.2.1 Zdroj

Zdrojem je buď laserová dioda LD nebo LED. Poskytuje systému optický signál a rozhoduje o schopnostech celého přenosového systému. Jen citlivost detektoru hraje podobnou roli pro celkové vlastnosti systému. Na trhu jsou komponenty pro přenos od 20 Mbit/s až do 2,5 Gbit/s. Důležitý je typ modulace a výstupní optický výkon. LD v 780-925nm a 1525-1580nm splňují frekvenční požadavky a díky rozvoji ve vláknové optice je jich dostatek ke koupi, ale ne v kusovém množství. Více v literatuře [4, 5, 6, 9, 10].

Nejčastěji jsou používány VCSEL v blízkém IR, Fabry-Perot (FP), Distributed-FeedBack (DFB) a Electro-absorption Modulated Laser (EML) lasery pro vzdálené IR

- VCSEL laser- na 850nm byl vlastně navržen pro vláknovou optiku. Představuje malou revoluci. Má nízké pořizovací náklady a výborné vlastnosti. Použití této komponenty je rozumné. Má průměrnou hodnotu výkonu několik mW, je vysokorychlostní a má dlouhou životnost. Je levnější než většina alternativ. Nejvíce je zastoupen v levných AOS, které většinou pracují pod 1 Gbit/s. Nepotřebuje aktivní chlazení. Emituje kruhový paprsek, ne eliptický, což byl problém s LED.
- FP a DFB laser- pracují kolem 1550nm a jsou používány převážně pro vláknovou optiku. Jsou nízkovýkonové, ale mají velké modulační rychlosti (40 Gbit/s), stabilitu vlnové délky, spolehlivost. Nejnovější trend pro vláknovou techniku je EML DFB laser, který vyžívá optické modulace pomocí elektro-absorpčního modulátoru ve spojení s DFB laserem.
- Zesilovače jako zdroje EDFA a SOA jsou použity pro zesílení zdrojů s malým výkonem. Pracují i s WDM. Mají velké optické zesílení až 30dB. Výkon pro AOS může být až 2 W pro 1550nm. Pokud je použit, jde o kvalitní zařízení pracující s přenosovými rychlostmi nad 1 Gbit/s. Po rozšíření této technologie snad dojde ke snížení její ceny.

6.2.2 Střední hodnota výstupního výkonu

Tato hodnota je nejdůležitější pro určení systémové rezervy spoje, protože pro digitální komunikaci s určitým kódováním je při 50% „duty cycle“ rovna asi polovině maximální hodnoty. Tato průměrná hodnota je použita pro klasifikaci bezpečnosti oka a označována jako vysílací výkon AOS vysílače.

6.2.3 Divergence paprsku D

Jednou z výhod AOS je vysílání úzkým světelným paprskem, tato úzkost zvyšuje bezpečnost přenosu a efektivitu zachycení paprsku na straně přijímače.

Typický AOS bez automatického zaměřování má divergenci svazku 2-10 mrad, což má za následek rozšíření svazku na vzdálenosti 1000m asi 2-10m. Pokud je použit zaměřovací systém, je rozptyl asi 0,05 až 1mrad, což na 1000 m rozprostře svazek do 5cm až 1 m. Je zvětšena systémová rezerva a tím zvýšena možnost funkce za nepříznivého počasí.

6.2.4 Šíření paprsku

Divergence a tvar optického paprsku v místě přijímače jsou důležité pro návrh systému, pro systémovou rezervu.

Většinou jsou používány dva typy profilů rozložení optické intenzity v optickém svazku a to Gaussův profil a profil Top-Hat. Gaussův je produkt rezonanční dutiny laseru. Je používám pro vláknovou optiku. Je výhodnější pro systémy s automatickým zaměřováním.

Top-Hat je výhodnější pro systémy bez automatického zaměřování. Jeho maximální intenzita pokrývá větší plochu, v porovnání s Gaussovým profilem, kde je maximální intenzita jen na malé ploše ve směru šíření. S ohledem na podmínky bezpečnosti oka, je lepší použít profil Top-Hat.

6.2.5 Využívání mnohonásobných optických cest

Mezi jasné výhody patří lepší resistance proti blokádam, menší náchylnost vůči scintilacím obzvláště na dlouhé vzdálenosti. S použitím více laserů na straně přijímače je zajištěna určitá nadbytečnost cest, pokud jeden laser přestane pracovat, nedojde k výpadku linky, ale jen ke snížení celkového výstupního výkonu.

Velkou nevýhodou je složitost realizace. Jednak budit více laseru, aby byla odezva úplně stejná (hlavně při změně teploty) a potom je komplikované zamířit svazky v přijímači na jeden nebo více detektorů.

6.3 Příjímač a materiály

Volba přijímače je mnohem více limitující než volba zdroje. Nejvíce se používají Si a InGaAs (Indium Gallium Arsen) materiály. Dále také germanium, které má velký temný proud (proud za tmy). Je většinou potřeba použít vlnové filtry. Více v literatuře[4, 5, 6, 9, 10].

6.3.1 Detektory pro krátké vlnové délky

Si je nejpoužívanější materiál pro blízké IR vlnové délky. Si přijímače jsou velmi vyspělé a dovolují příjem velmi malých úrovní světla. Je třeba vlnově závislou spektrální odezvu vybrat podle zdroje. Jejich maximální odezva je kolem 850nm, takže vhodná kombinace pro VCSEL. Pracují s velkou šířkou pásma a jsou schopny operovat na 10Gbit/s s Si APD. Jsou velmi rozšířené. Pro nižší šířku pásma je Si PIN dioda (1Gbit/s).

PIN pracuje s integrovaným transimpedančním zesilovačem (TIA). Zde se ovšem snižuje citlivost pro zvyšující se šířku pásma. Hodnoty pro PIN diody -34 dBm na 155Mbit/s.

Mnohem více citlivé jsou Si APD, které díky lavinovému procesu mají své vnitřní zesílení. Jejich citlivost je asi -55 dBm na Mbit/s a asi -52 dBm pro 155Mbit/s, -46 dBm pro 622 Mbit/s.

Výhodou Si detektorů je jejich velikost, takže se na ně lépe zaměřuje paprsek v přijímači. Velikost je například 0,2 x 0,2 mm.

6.3.2 Detektory pro dlouhé vlnové délky

InGaAs je využit pro tyto vlnové délky. Díky spojitosti s vláknovou optikou se tyto detektory stále více vyvíjí a zlepšují se jejich parametry. Jsou menší než Si, ale pracují při stejné citlivosti s vyšší šířkou pásma. Nejsou vhodné pro použití na 850nm.

6.4 Bezpečnost při práci lasery

Bezpečnost je velmi závažný problém. Pokud je pokožka nebo oko vystaveno expozici paprsku, může dojít k jejich poškození hlavně u vysokovýkonových laserů. V souvislosti s poškozením oka, je třeba se zaměřit na vlnové délky od 400 nm do 1400 nm, které jsou okem zaměřovány na sítnici. Jiné vlnové délky jsou absorbovány rohovkou a nedostanou se až k sítnici. Oko jako takové se umí bránit mrkacím reflexem pro viditelné vlnové délky, tedy až po 700 nm. Další vlnové délky jsou velmi nebezpečné, protože nejsou viditelné.

Standardy

Mnoho států podporuje bezpečnost při práci s lasery. Rozdělují se na bezpečnost používání a potom na bezpečnost laserových zařízení. Zavádí se rozdělení laserů do 4 tříd. Třída 1 a 1M se považují za zdraví nezávadné. Více v literatuře [9].

Česka norma zabývající se touto problematikou je ČSN EN 60825-12.

6.5 Výkonová bilance spoje

Jedna z metod, jak určit vlastnosti přenosové linky, je určit výkonovou bilanci. Více v kapitole 5. Pokud má být určena výkonová rezerva, je nutné udělat výkonovou bilanci. Výkonová rezerva představuje výkon zajišťující určité vlastnosti linky. Bilance může být spojena se statistickým modelem, viz kapitola 4, který popisuje vliv atmosférického útlumu. Je pak možno vypočítat očekávanou dostupnost linky na základě ztrát z scintilace a rozptylu.

Vysílací výkon je množství optické energie vysílané AOS, citlivost přijímače je minimální množství optické energie, které musí být přijato AOS pro specifickou chybovost. Oba tyto parametry jsou měřeny jako maximální hodnoty nebo střední hodnoty. Mohou být měřeny na aperturách přijímače a vysílače nebo až na laseru a detektoru. Pokud je měřeno přímo na laseru, je třeba počítat ještě se ztrátami optickými (navázání paprsku do čoček, atd). Optické ztráty zahrnují rozptyl, odlesk rozhraní, absorpci, ztráty nepřesným navázáním svazku.

Geometrické ztráty jsou ty, které vyplývají z rozšiřování vysílaného paprsku mezi vysílačem a přijímačem. Většinou se paprsek rozšíří do velikosti větší než přijímací apertura, a toto ozáření v okolí apertury je ztráta výkonu. Obecně větší přijímací apertura nebo menší divergence paprsku vede k menším geometrickým ztrátám na danou délku. Pro rovnoměrnou distribuci vysílacího výkonu mohou být geometrické ztráty rovny:

$$\alpha_{12} = \left\{ \frac{d_2}{d_1 + [R \cdot D]} \right\}^2 \quad (dB; m, m, km, mrad) \quad (6.1)$$

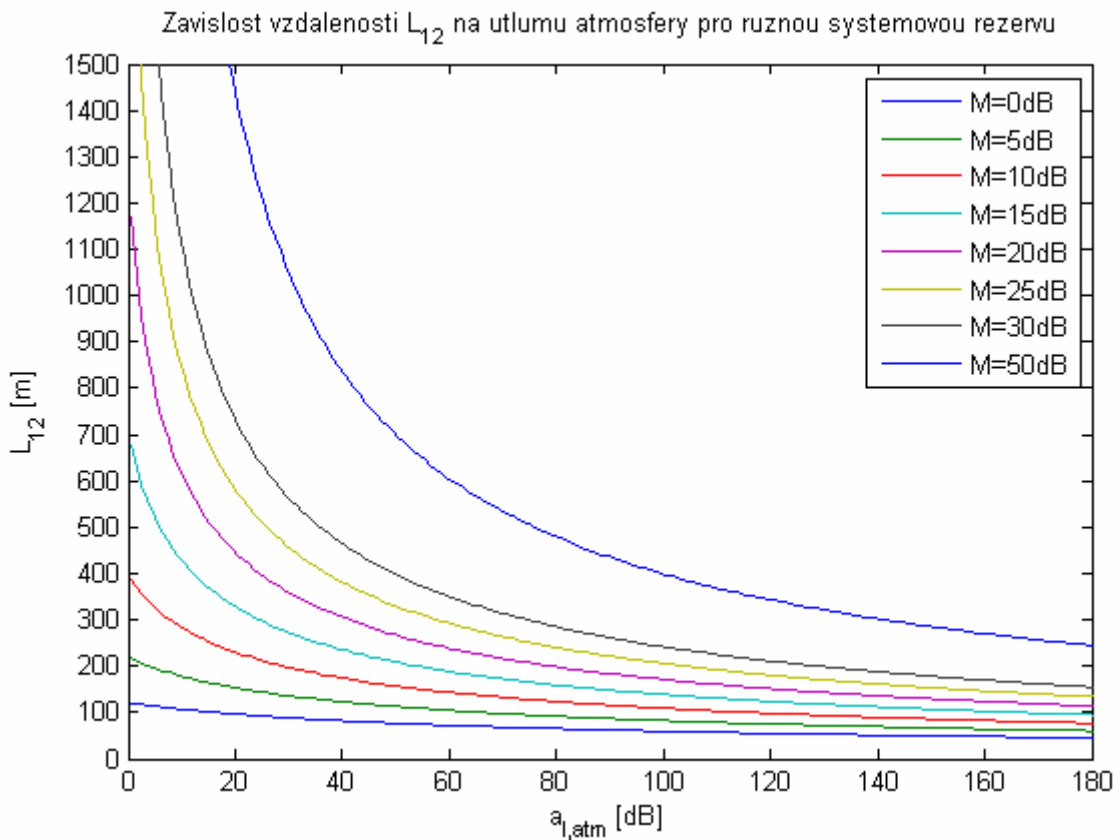
Tento vztah může být také použit pro Gaussovu distribuci výkonu, ale s nepatrně menší přesností, protože vztah předpokládá stejné rozložení výkonu.

Ztráty zaměřením, které není perfektní, jsou výsledkem toho, že většina AOS používá Gaussovu distribuci svazku (gauss power distribution). Jen čas paprsku zasáhne přijímač. Jinými slovy, zaměření je přesné, pokud střed Gaussova svazku je v centru přijímače. Pokud to tak není, přijímač může přijímat jen energii z hran svazku, kde je intenzita energie menší. Tento problém

většinou nastane při pohybu základny, na které je AOS připevněno. Jak bylo diskutováno výše, pokud je systém s automatickým zaměřováním, tak má mnohem menší geometrické ztráty. Nejde odstranit všechny pohyby, a tak může dojít k přerušení. Použití automatického zaměřování vede ke zvětšení systémové rezervy až od 30 dB.[9]

6.5.1 Systémová rezerva M

Je hodnota v decibelové míře, která je mezi citlivostí detektoru a přijímaného výkonu za standardní atmosféry. S rostoucí vzdáleností klesá systémová rezerva, která by měla stačit na pokrytí útlumů vzniklých atmosférickými jevy. Pokud budu uvažovat systémovou rezervu jako konstantu, je na Obr.6-1 znázorněn vliv na dosah AOS. Systémová rezerva spoje se dá zvýšit například zvýšením citlivosti detektoru, nebo zvětšením plochy čočky přijímače.



Obr.:6-1 Závislost vzdálenosti L_{12} na útlumu atmosféry pro různou systémovou rezervu.

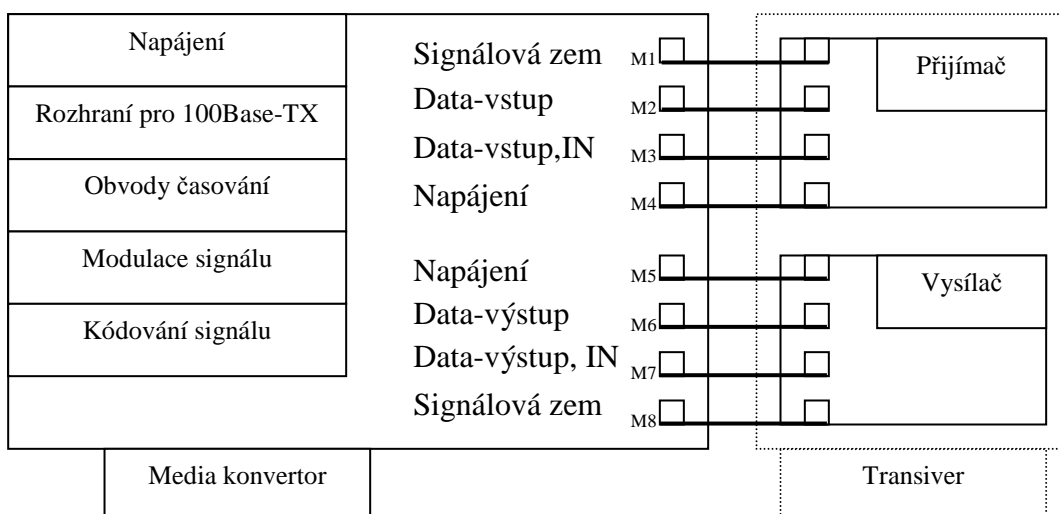
7 VLASTNÍ NÁVRH AOS

V kapitole 1 je teoreticky popsána skladba AOS a blokové schéma hlavic je na obrázku 1-2. Návrh se může rozdělit podle jednotlivých bloků. Nejdůležitější je kvalitní přijímač, který určuje kvalitu celého spoje. Zde je možnost se rozhodnout pro modulární řešení, které vyrábí mnozí výrobci, nebo využít jednoduchých součástek jako jsou operačního zesilovače. Bude proveden návrh vysílače a přijímače za použití OZ, tranzistorů a pasivních součástek.

Další důležitou částí je tzv. Interface, blok zajišťující převod mezi různými linkovými kódováními. Tuto funkci dnes realizuje jediný OI, který obsahují přepínače a media konvertory. V rámci tohoto návrhu uvažují využít volně dostupného media konvertoru TR-962D firmy TP-LINK. V něm nahradit transiver pro jednomódová vlákna HDTR-100-D3, který bude podrobněji popsán v kapitole 7.1. Zapojení je podle obrázku 7-1.

7.1 Transiver

Jde o transiver určený pro jednomódová vlákna dle standardu ITU-T G957 a G958. Napájecí napětí U_{CC} je 3,3V. Využívá rozhraní LVPECL (Low Voltage positive emitter-coupled logic), které bude popsáno následovně. Obsahuje lasery třídy 1 podle standardu IEC 60825-1. Pracuje na vlnových délkách 1310 nm. Je osazen InGAAs/InP PIN fotodiodou. Vysílač a přijímač mají stanoveny elektrické a optické parametry.



Obr.: 7-1 Blokové zapojení návrhu

7.1.1 Rozhraní

Rozhraní mezi media konvertorem a transiverem je realizováno 9 kontakty. Jeden kontakt není v návrhu využit, a tak není zakreslen. Napájení přijímače a vysílače je odděleno, aby nedocházelo přes společný obvod ke vzájemnému rušení. Napájecí proud je maximálně 70mA. Nejdůležitější je úroveň vstupního napětí do transiveru. Z hodnot v katalogu je sestavena tabulka 7-1, která udává hodnoty odpovídající logické úrovni „1“ a „0“. Dále je v tabulce také vstupní diferenční napětí U_{ID} a také výstupní napětí z přijímače odpovídající logickým úrovním „1“ (U_{OH}) a úrovni „0“ (U_{OL}). Další parametry přijímače jsou podrobně popsány v [13].

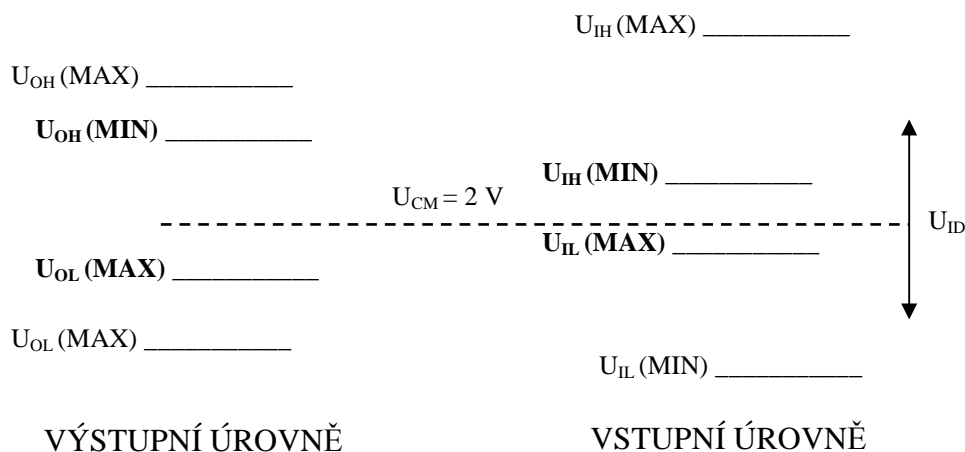
Parametr	Minimální hodnota	Typická hodnota	Maximální hodnota
Vstupní napětí U_I do transiveru (výstupní napětí z media konvertoru)			
$U_{IH}-U_{CC}$ (V)	-1,49	-1,30	-1,19
U_{IH} (V), $U_{CC} = 3,3V$	1,81	2,00	2,11
U_{ID} (V)	0,50	-	1,60
Výstupní napětí U_O z transiveru (vstupní napětí do media konvertoru)			
$U_{OH}-U_{CC}$ (V)	-1,10	-	-0,90
U_{OH} (V), $U_{CC} = 3,3V$	2,20	-	2,40
$U_{OL}-U_{CC}$ (V)	-1,89	-	-1,6
U_{OL} (V), $U_{CC} = 3,3V$	1,41	-	1,70

Tab. 7-1 Vstupní a výstupní hodnoty napětí pro transiver

7.1.2 LVPECL

Komunikační průmysl směřuje k stále vyšším přenosovým rychlostem, které jsou přenášeny sériově. Existuje řada standardů pro různé logické úrovně a jejich vzájemné propojování. Všechny se snaží o zvýšení výkonnosti, snížení spotřeby a hlavně snížení ceny. Dřívější technologie například ECL (Emitted-Coupled Logic), která využívala záporná napájecí napětí, se již nevyužívá. S nástupem technologií TTL (Transistor-Transistor-Logic) a CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor), které vyžadují kladná napájecí napájení, vznikl PECL (Positive emitter-coupled logic). Výstupní rozkmit napětí zůstal 800 mV, ale je posunut

do kladných hodnot napětí. LVPECL má stejnou koncepci jako PECL, ale nevyužívá napájecí napětí 5 V, ale většinou 3,3 V. Více v literatuře [14, 15]. Na obrázku 7-2 jsou zobrazeny vstupní a výstupní napěťové úrovně pro LVPECL se střídavou vazbou, která je realizována kapacitorem o hodnotě 10 nF. Tato vazba je vhodná pouze pro stejnosměrně vyvážené signály. Příkladem takového kódování je Manchester využitý v 10Base-T.



Obr.: 7-2 Vstupní a výstupní napěťové úrovně pro LVPECL

V tabulce 7-2 jsou uvedeny odpovídající napěťové úrovně pro napájecí napětí $U_{CC} = 3,3 \text{ V}$ a referenční napětí $U_{CM} = 2 \text{ V}$. Hodnoty jsou brány jako doporučení a nemusí se jimi všichni výrobci řídit.

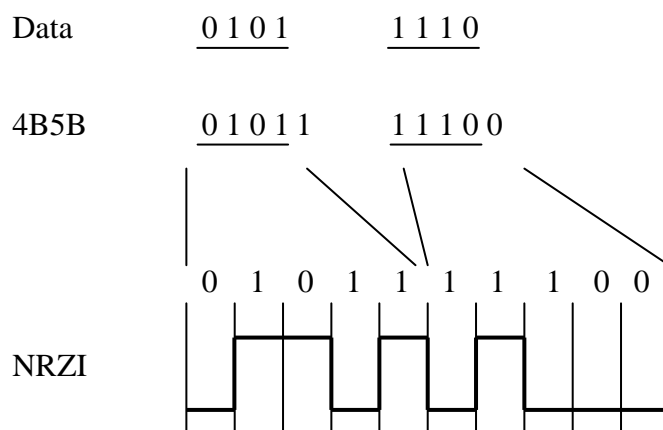
Výstupní hodnoty		Vstupní hodnoty	
$U_{OH} \text{ (MIN) (V)}$	2,275	$U_{IH} \text{ (MIN) (V)}$	2,135
$U_{OL} \text{ (MAX) (V)}$	1,680	$U_{IL} \text{ (MAX) (V)}$	1,824
		$U_{ID} \text{ (MIN) (V)}$	0,310

Tab. 7-2 Vstupní a výstupní úrovně LVPECL

7.1.3 100Base-FX (IEEE 802.3u)

Je verze rychlého Ethernetu (Fast Ethernet) využívající optické vlákno. Pracuje na vlnových délkách 1300 nm a blízkém infračerveném pásmu. Podstatné je, že využívá kódování 4B5B a jako linkové kódování NRZI (Non-Return-to-Zero-Inverted). Popis kódování je patrný z obr.7-3. NRZI je vhodné pro IM/OOK využívanou v AOS. Její nevýhodou je uplatnění stejnosměrné složky pro nesymetrický signál podle střední hodnoty. Tento jev může způsobit

problémy při použití střídavé kapacitní vazby. Výhodou je poloviční šířka pásma v porovnání se symetrickým kódem Manchester. Frekvence nosné u verze 100Base-FX je 62,5 MHz. Frekvence nosné u verze 100Base-FX je 62,5 MHz. Ve verzi 100Base-TX je jako linkové kódování využito MLT-3 (Multi-Level transmit), kde číslo 3 určuje počet logických úrovní. Proto je třeba konverze mezi těmito kódováními realizovaná media konvertorem.



Obr.: 7-3 Kódování NRZI

7.2 Přijímač

Blokové schéma přijímače je na obrázku 1-2. Přijímač bude obsahovat křemíkovou fotodiodu zapojenou s transimpedančním zesilovačem TIA, dále další stupeň zesílení, limitní zesilovač a diferenční zesilovač. V rámci diplomové práce je proveden návrh zapojení fotodiody s TIA. Nad rámec je uvedena možnost další úpravy signálu na úroveň LVPECL, která zajistí kompatibilitu s media konvertorem.

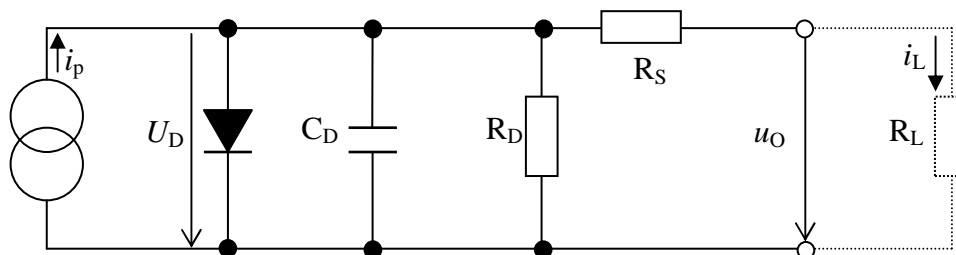
Možné alternativy fotodetektoru jsou popsány v kapitole 6.3. Pro vlastní zesílení je velmi lákavé využít APD. Nevýhodou je zajištění 200 V pro zapojení APD. Jako fotodetektor je zvolena PIN fotodioda. Na trhu je velký výběr. Pro vhodné vlastnosti, uvedené v tabulce 7-3, je preferován model S5971 od výrobce Hamamatsu v pouzdře TO-18. Je to křemíková PIN dioda na reverzní napětí $U_R = 10V$.

Velikost aktivní plochy S_P (mm^2)	Rozsah vlnových délek λ_Δ (nm)	λ_{MAX} (nm) pro max. citlivost	Citlivost R_i pro 830 nm (A/W)
1,2	320 – 1060	900	0,6
I_{tma} typ/max (nA)	Maximální frekvence (GHz)	C_D $U_R = 10$ V, (pF)	NEP $U_R = 10$ V, ($\text{W/Hz}^{1/2}$)
0,07/1	0,1	3	$7,4 \cdot 10^{-15}$

Tab. 7-3 Parametry fotodiody S5971

7.2.1 Model fotodiody

Model fotodiody je možno si představit jako zdroj proudu i_p , který reprezentuje opticko-elektrickou konverzi a výsledný fotovoltaiický proud, paralelně spojený s ideální polovodičovou diodou, parazitní kapacitou PN přechodu reprezentovanou kapacitorem C_D a vodivostí, která je reprezentována rezistorem R_D . Z diskrétních prvků lze sestavit obvodový model fotodiody, jak je ukázáno na obrázku 7-5.



Obr.: 7-4 Náhradní model fotodiody z diskrétních prvků.

Sériový rezistor R_S reprezentuje malý odpor dielektrika a přívodů a není často do modelu zařazen. Rezistor R_L představuje zátěž obvodu fotodiody. Napětí u_O a proud i_L reprezentují výstupní veličiny modelu fotodiody. Pro další analýzy je nejdůležitější kapacita přechodu PN fotodiody C_D a odpor diody R_D . Kapacita C_D je dána velikostí PN přechodu (aktivní plochy fotodetektoru) a pohybuje se v řádu pF. Její velikost ovlivňuje šířku pásma a šumové vlastnosti. Odpor R_D určuje velikost proudu za tmy a jeho velikost je až v jednotkách $\text{G}\Omega$. Pokud

na fotodiodu přiložíme závěrné napětí U_R , sníží se kapacita C_D , a tak vzroste šířka pásma. Vzroste ovšem proud za tmy I_{tma} , který je úměrný velikosti reverzního napětí na rezistoru R_D . Závislost je téměř lineární v oblasti ± 10 mV, proto je možno z hodnot proudu za tmy I_{tma} a napětí spočítat odpor fotodiody R_D dle rovnice 7.1. V katalogu jsou voleny hodnoty napětí -10 mV, více v literatuře [17, 18].

$$R_D = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{I_{tma}} \quad (\Omega; A). \quad (7.1)$$

Velikost odporu R_D ovlivňuje velikost šumu, především tepelného, nebo také nazývaného Jonsonův šum. S rostoucí hodnotou odporu klesá šum.

Celkový šum, který na fotodiodě vznikne je roven součtu dílčích zdrojů šumů a může se popsat rovnicí 7-2.

$$i_N = \sqrt{i_J^2 + i_S^2 + i_F^2} \quad (A/Hz^{1/2}), \quad (7.2)$$

kde i_N je celkový proudový šum, i_J je proud tepelného šumu, Jonsonův proud, i_S je proud výstřelového šumu a i_F je proud blikavého šumu.

Tepelný šum je dán teplotní závislostí generace elektronů a v modelu se uplatňuje na rezistoru R_D . S rostoucím odporem se snižuje velikost tohoto šumu. Je frekvenčně nezávislý, ale je možné ho vztáhnout k odmocnině z šířky pásma. Výstřelový šum je generován fluktuacemi proudu přes PN přechod. Projevuje se převážně při přiloženém reverzním napětí. Jde právě o proud za tmy, který je vztažen k odmocnině z šířky pásma, má charakter bílého šumu. Blikavý šum je dán výrobou PN přechodu. Pokud je přechod osvětlen, dochází ke vzniku fotovoltaického proudu, a tak jeho vlastního šumu. Více v literatuře [17].

Pokud je fotovoltaický proud $i_L \gg 0,026 R_D$ nebo $i_L \gg I_{tma}$, dominantním zdrojem šumu je výstřelový šum. Amplitudy tohoto šumu jsou úměrné druhé odmocnině z měřené šířky pásma, jako jednotka se používá $A/Hz^{1/2}$.

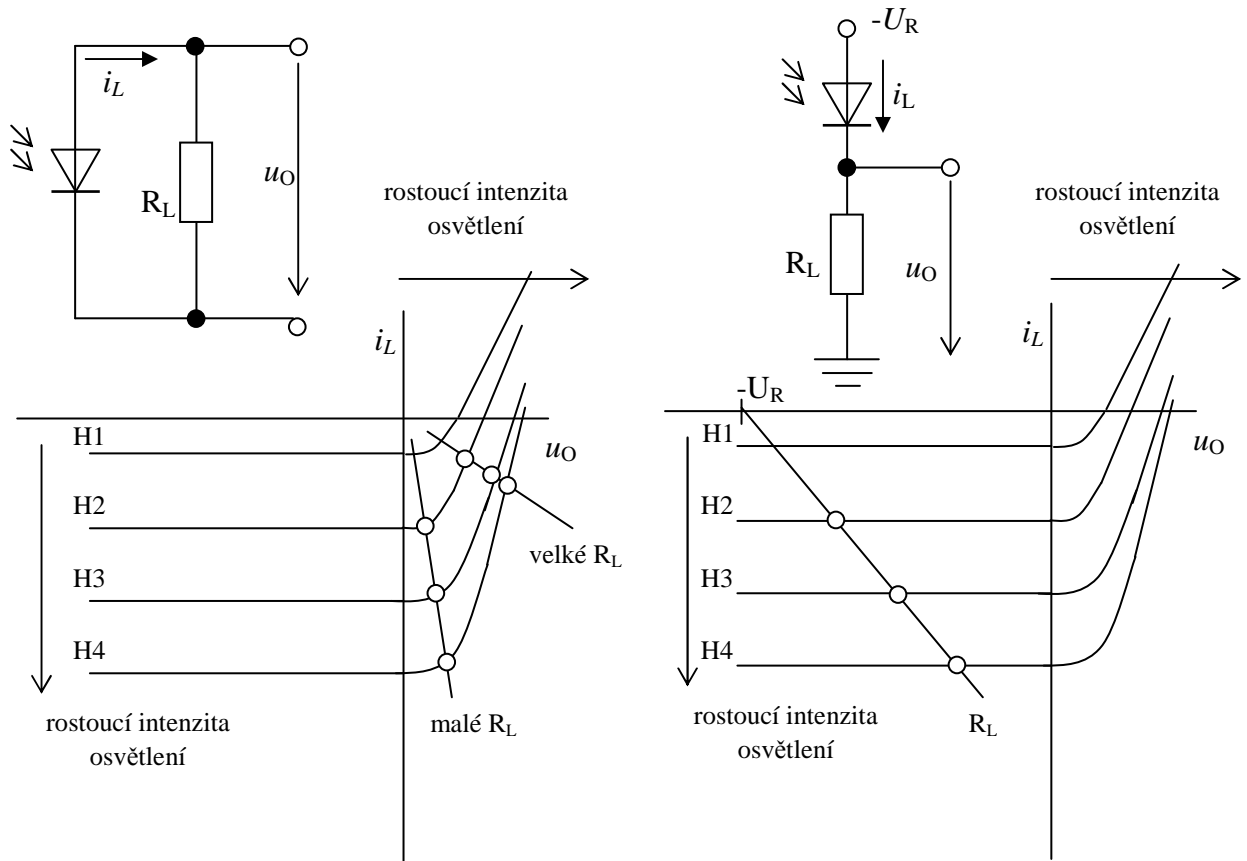
NEP (Noise Equivalent Power) je výkon ekvivalentní šumu. Tento parametr je uváděn v katalogu. Je definován jako hranice šumu detektoru, normalizovaná na šířku pásma 1 Hz. U PIN fotodiod nabývá hodnot v jednotkách $10^{-15} W/Hz^{1/2}$. Je dán rovnicí 7.3.

$$NEP = \frac{i_N}{R_i} \quad (W \cdot Hz^{\frac{1}{2}}; A \cdot Hz^{\frac{1}{2}}, A \cdot W^{-1}), \quad (7.3)$$

kde i_N je celkový šumový proud fotodiody v $A/Hz^{1/2}$ a R_i je relativní citlivost v A/W .

7.2.2 Zapojení fotodiody

Křemíková fotodioda může pracovat v několika režimech. Mezi nejpoužívanější patří fotovoltaický a fotokonduktivní, které jsou zobrazeny na obrázku 7-6. Literatura [17]. Intenzita H1 odpovídá neosvětlené fotodiodě a vzniklý proud reprezentuje proud za tmy. Hodnota proudu za tmy pro fotokonduktivní režim je podstatně větší než u fotovoltaického režimu. Pro zvolenou fotodiodu je její maximální hodnota 1 nA. Typická hodnota je 0,07 nA.

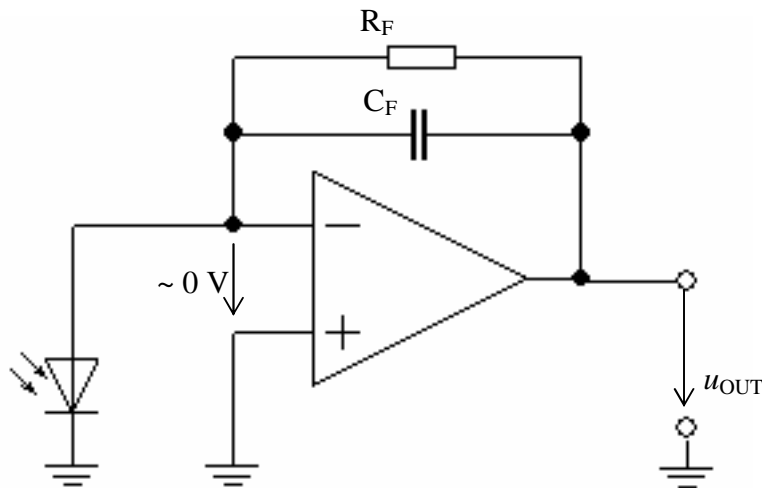


Obr.: 7-5 Fotodioda zapojená ve fotovoltaickém a fotokonduktivním režimu

Ve fotovoltaickém režimu není využito závěrného napětí. Pokud je fotodioda osvětlena světlem vhodné vlnové délky, bude generovat fotovoltaický proud, který se rozdělí mezi odpor diody R_D a externí zátěž reprezentovanou rezistorem R_L . Na R_L , vlivem tekoucího proudu i_L , bude vznikat napětí u_O . S rostoucí frekvencí signálu se bude více uplatňovat parazitní kapacita C_D , viz obrázek 7-5, a tak se bude snižovat výstupní napětí. PIN fotodioda má zisk roven 1, a proto je třeba zesílit malý fotovoltaický proud zároveň ho převést na signálové napětí. Tento krok se realizuje pomocí zapojení s OZ.

7.2.3 Obvod fotodiody a operačního zesilovače

PIN fotodiody mají ve fotovoltaickém režimu velmi nízký proud za tmy, ale jejich časová odezva, především u fotodiody s velkou aktivní plochou, není dostatečná pro vysokorychlostní komunikační systém. Zapojení v tomto režimu je na obrázku 7-7. Toto zapojení je někdy nazýváno jako zapojení s transimpedančním zesilovačem TIA.



Obr.: 7-6 Zapojení fotodiody s OZ ve fotovoltaickém režimu (transimpedanční OZ)

TIA jsou používány pro převod fotoproudů nízkých úrovní na použitelné napěťové signály. Při pohledu na obrázek 7-7 je patrné, že funkce TIA je ovlivněna vstupní kapacitou fotodiody C_D .

Ideální transimpedanční přenosová funkce je popsána takto:

$$u_{OUT} = -i_L \cdot Z_F \quad (\text{V; A, } \Omega), \quad (7.4)$$

Předešlý vztah lze dále upravit na tvar

$$u_{OUT} = -i_L \cdot \frac{R_F}{1 + j2\pi f R_F C_F} \quad (\text{V; A, } \Omega, \text{ Hz, } \Omega, \text{ F}), \quad (7.5)$$

kde i_L je vstupní proud, Z_F je impedance zpětné vazby. R_F a C_F jsou odpor a kapacita zpětné vazby.

Rovnice 7-5 uvádí, že frekvenční odezva obvodu je dána zpětnou vazbou. Nevysvětluje, proč jsou TIA náchylné ke vzniku oscilací. Pokud fotodiody nahradíme modelem z diskretních součástí, viz. obrázek 7-5, je na vstupu OZ připojena celková kapacita C_{DSUM} , která zahrnuje

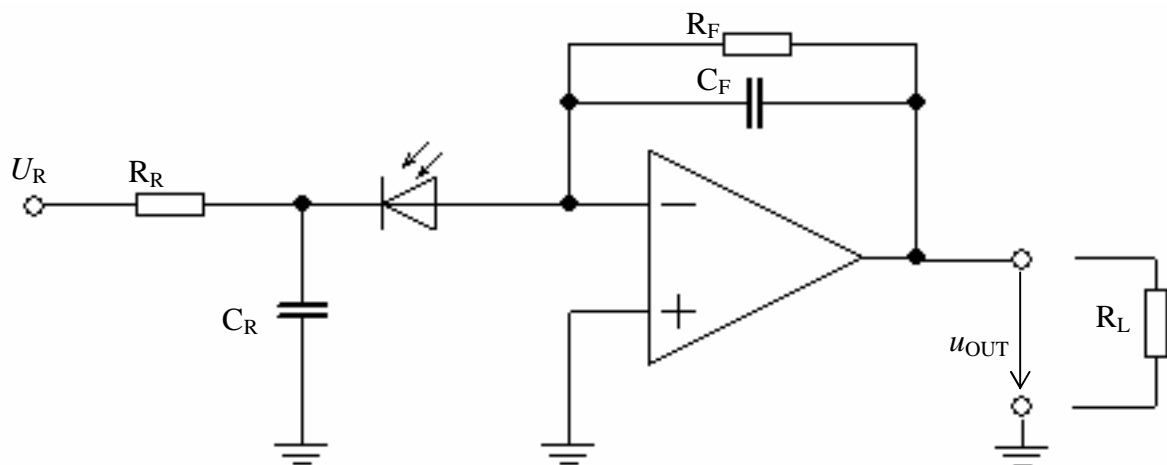
parazitní kapacitu fotodiody C_D , parazitní kapacitu vstupů OZ proti sobě a parazitní kapacitu jednotlivých vstupů proti zemi, dochází vlivem posunu fáze výstupního napětí proti vstupnímu proudu k nestabilitě obvodu. Může tak dojít ke špičkovému zesílení na určitých frekvencích, podrobněji v literatuře [18]. Pro stabilitu obvodu je tedy třeba zařadit do zpětné vazby kapacitor C_F o vhodné hodnotě, a tak stabilizovat obvod.

Vhodná zpětnovazební kapacita pro stabilní funkci je dána vztahem:

$$C_F = \frac{1}{4\pi R_F GBP} \cdot \left[1 + \sqrt{(1 + 8\pi R_F C_{DSUM} GBP)} \right] \quad (F; \Omega, Hz, \Omega, F, Hz), \quad (7.6)$$

kde R_F je hodnota zpětnovazebního rezistoru, C_{DSUM} je suma vstupních kapacit připojených na invertující vstup zesilovače včetně kapacity fotodiody C_D . GBP je šířka pásma daného OZ.

Fotokonduktivní zapojení je na obrázku 7-8. Připojením reverzního napětí se zlepší časová odezva, ale také se zvýší proud za tmy a přidá se do obvodu další zdroj šumu, zdroj reverzního napětí. Dochází také k přidání stejnosměrné složky tzv. offsetu. Zdroj napětí U_R je nutno filtrovat přes RC článek tvořený keramickým kapacitorem C_R a rezistorem R_R .



Obr.: 7-8 Zapojení fotodiody s OZ ve fotokonduktivním režimu

Rezistor R_R chrání fotodiodu. Jeho hodnota je volena tak, aby byl úbytek napětí způsobený maximálním proudem za tmy podstatně menší než reverzní napětí. Takto se docílí snížení vlivu změny teploty na velikost proudu za tmy. Pokud by měl zpětnovazební odpor R_F nekonečnou velikost, nevznikal by na něm téměř řádný tepelný šum. Tato úvaha není vhodná, protože ve zpětné vazbě je kapacita C_F . Velká hodnota odporu R_F s kapacitou určují časovou konstantu a tak časovou odezvu obvodu. Rezistor R_F je teoreticky možné úplně vynechat a z obvodu by se

stal integrační obvod reagující na špičky fotovoltaického proudu. Je ale třeba zajistit vybíjení kapacitoru. Proto je použit rezistor R_F . Výstupní napětí u_{OUT} je pro tento případ zapojení posunuto ve fázi o 180° v porovnání se vstupním proudem. Posun je také ve stejnosměrné složce vlivem reverzního napětí. [19]

Obvod zesilovače má druhý nejvýznamnější vliv na celkovou citlivost zapojení. Na výběr je možnost OZ 0PA657 se vstupy z tranzistorů řízených elektrickým polem JFET (junction gate Field-Effect Transistor). [20] Jejich výhodou je velmi vysoká impedance, která zajišťuje minimální proud tekoucí vstupy a to v jednotkách pA. Vstupy OZ, jejichž vstupy jsou z tranzistorů řízených elektrickým proudem do báze BJN (Bipolar Junction Transistor), propouští vyšší hodnoty proudu ve stovkách pA. Jako výhoda by se tedy zdálo zvolit OZ s JFET vstupy, ale JFET jsou teplotně velmi závislé. Jako OZ je použit obvod THS4304 firmy Texas Instruments. Je to OZ s napěťovou zpětnou vazbou. Má vysokou šířku pásma 3 GHz, vysokou rychlost přeběhu 830 V/ μ s, velmi nízkou hodnotu vstupního šumu 2,4 nV/Hz^{1/2}. Umožňuje zapojení pro symetrické i nesymetrické napájení 5 V. Podrobný katalog je v literatuře [21].

Jak bylo uvedeno výše, součin hodnot R_F a C_F tvoří časovou konstantu zapojení. Její vliv na šířku pásma bude probrán v následující kapitole.

7.2.4 Šířka pásma zapojení s OZ

Obvod uvedený na obrázku 7-7 má šířku frekvenčního pásma přijímače danou rovnicí 7.7 [22].

$$f_{-3dB} = \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_F C_F}} \quad (\text{Hz}; \text{Hz}, \Omega, \text{F}), \quad (7.7)$$

kde GBP je šířka pásma zesilovače, R_F je hodnota odporu zpětnovazebního rezistoru a C_F je kapacita zpětnovazebního kapacitoru.

7.2.5 Šumová analýza obvodu s OZ

NEP je základní výkonová úroveň, kterou je třeba zjistit, aby bylo možné určit SNR . V příloze B je popsána problematika vzniku šumu v obvodu fotodiodou zapojené s OZ. Vzor výpočtu je uveden také v příloze. V tabulce B-1 jsou uvedeny hodnoty NEP pro obvod z obrázku 7-11.

Velmi zajímavý je vztah převzatý z literatury [22], který ukazuje vztah mezi celkovým, frekvenčně omezeným výstupním šumem OZ a proudem šumu na vstupu a je uveden jako rovnice 7.8.

$$I_{EQ} = \sqrt{I_N^2 + \frac{4kT}{R_F} + \left(\frac{E_N}{R_F}\right)^2 + \frac{(E_N 2\pi C_{DSUM} F)^2}{3}} \quad (A \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}), \quad (7.8)$$

kde I_{EQ} je ekvivalentní vstupní proudový šum, pokud je výstupní šum frekvenčně omezen takto:

$$F < \frac{1}{2\pi R_F C_F} \quad (\text{Hz}; \Omega, F). \quad (7.9)$$

I_N je vstupní proud šumu pro invertující vstup. E_N je vstupní napětí šumu na neinvertujícím vstupu OZ. C_{DSUM} je kapacita na vstupu OZ, k je Boltzmanova konstanta a T je teplota v Kelvinech. Frekvence F slouží k určení šířky pásma, nad kterým je šum měřen.

V tabulce 7-4 jsou uvedeny parametry OZ vztažené k návrhu velikosti rezistoru R_F , určení zpětnovazební kapacity a výpočtu celkového vstupního proudového šumu.

OZ	GBP (MHz)	Vstupní šum E_N (nV/Hz ^{1/2})	Vstupní šum I_N (pA/Hz ^{1/2})	Vstupní kapacita C_{DSUM} (pF)
THS4304	870	2,4	2,1	6
OPA659	350	8,9	0,0018	6,5
OPA657	1600	4,8	0,0015	8,2

Tab. 7-4 Parametry vybraných operačních zesilovačů

V tabulce 7-5 jsou uvedeny hodnoty vypočítané vstupního proudového šumu dle rovnice 7.8, šířka pásma dle rovnice 7.7 a velikost zpětnovazební kapacity C_F dle rovnice 7.6. Počítáno

v programu EXEL pro jednotlivé modely OZ, velikosti rezistorů R_F a kapacit C_{DSUM} . Veškeré výpočty jsou vztaženy k použité fotodiodě, jejíž kapacita je $C_D = 3$ pF. Hodnoty jsou počítány s frekvencí $F = 65$ MHz.

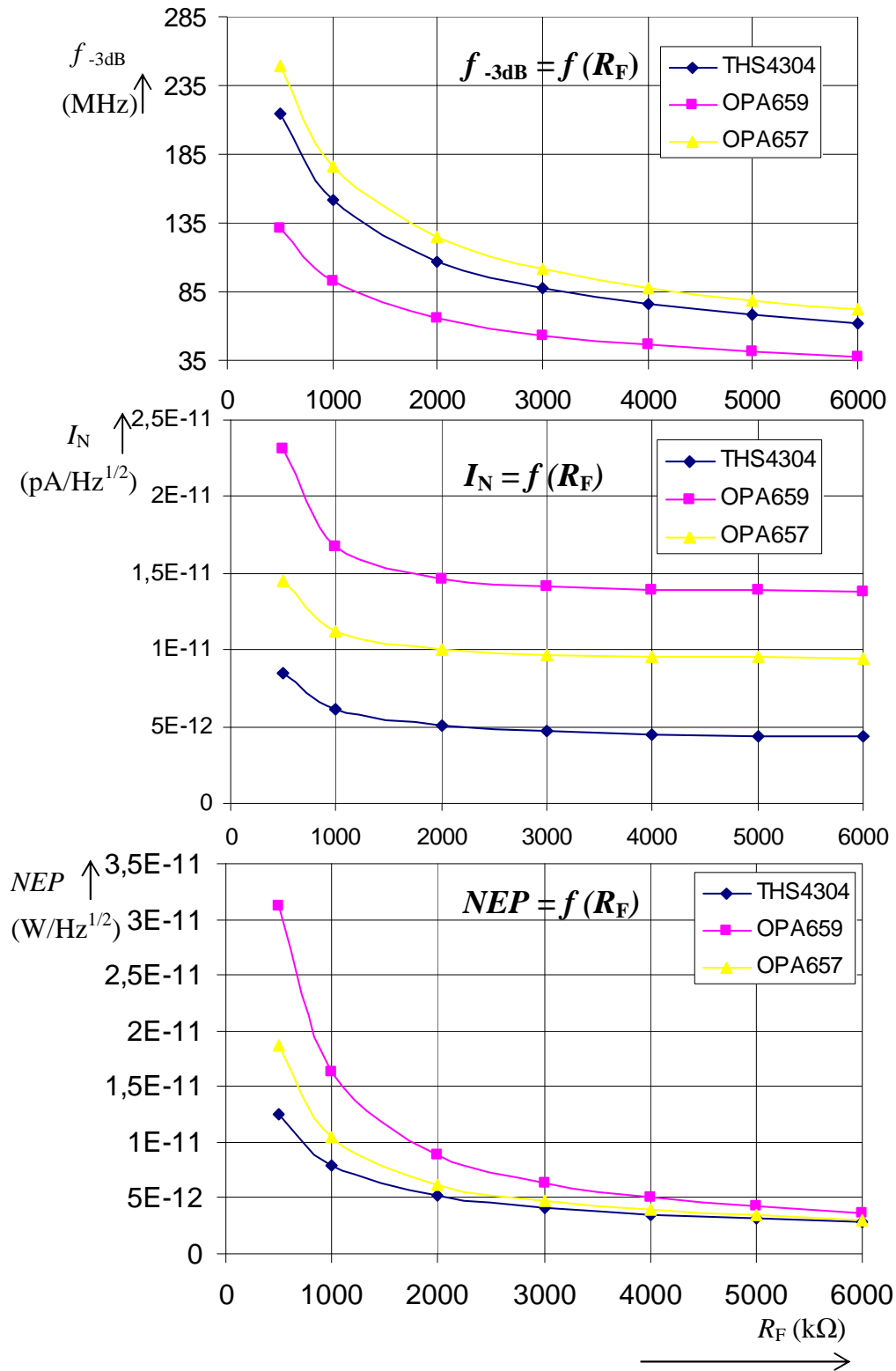
R_F (k Ω)	THS4304			OPA659			OPA657		
	C_F (pF)	I_{EQ} (*)	f_{-3dB} (MHz)	C_F (pF)	I_{EQ} (*)	f_{-3dB} (MHz)	C_F (pF)	I_{EQ} (*)	f_{-3dB} (MHz)
0,5	1,690	8,47	214	2,931	23,14,	130	1,382	14,53	249
1	1,143	6,18	151	1,963	16,82	92	0,954	11,20	176
2	0,788	5,06	107	1,332	14,61	65	0,664	10,00	124
3	0,636	4,71	87,7	-	-	-	0,538	9,70	101
4	0,547	4,52	75,9	-	-	-	0,464	9,58	88,1
5	0,487	4,41	67	-	-	-	0,414	9,51	78,8
6	-	-	-	-	-	-	0,377	9,46	71,9

* zastupuje (pA/Hz^{1/2})

Tab. 7-5 Navržené parametry pro stabilizaci OZ pro různé šířky pásma

Z hodnot z tabulky jde odvodit, že pokud bude zpětnovazební odpor R_F nastaven na menší hodnotu, může být využita větší kapacita C_F . Šířka pásma je počítána z rovnice 7.7. Na obrázku 7-5 jsou zobrazeny závislosti z tabulky 7-5.

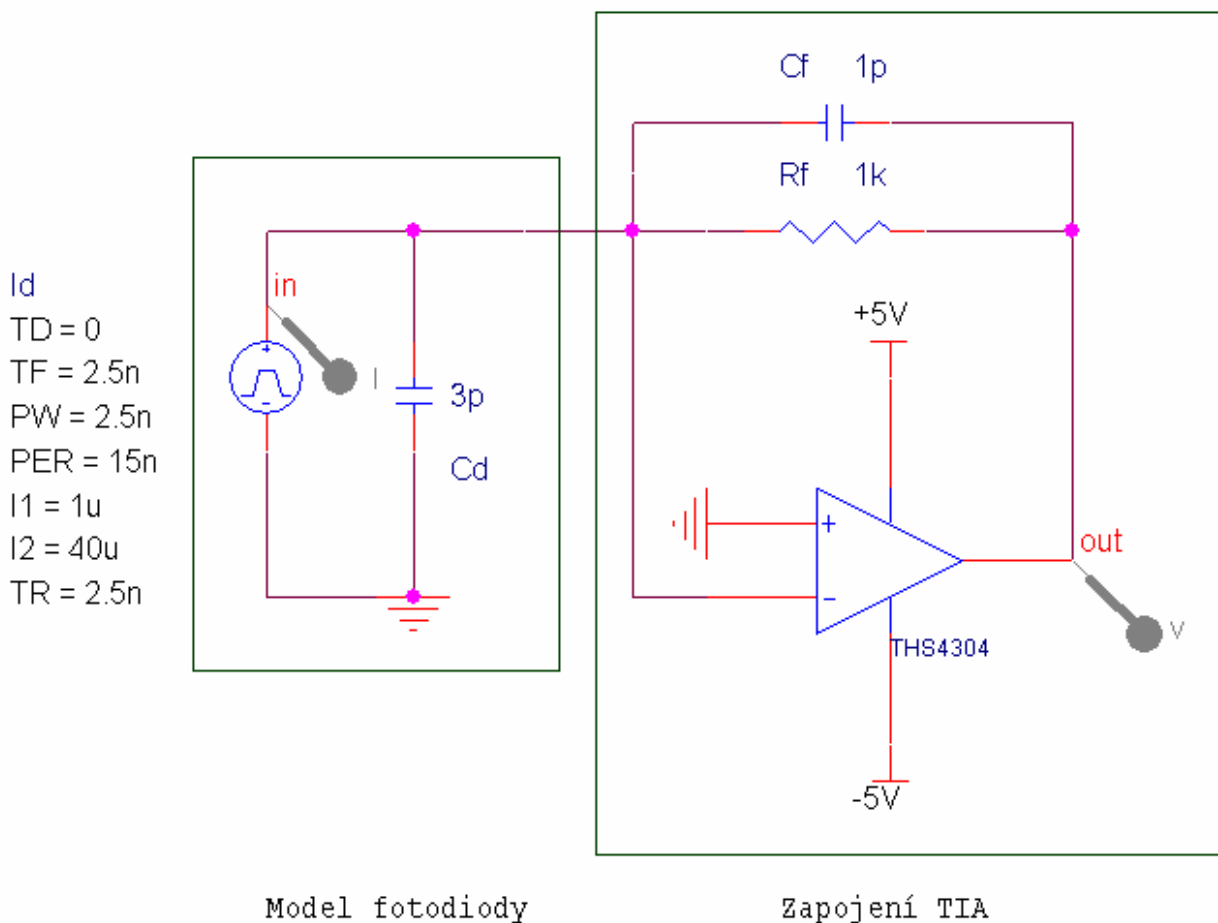
Po zhodnocení průběhů je výhodné volit největší hodnotu zpětnovazebního rezistoru R_F a přepočítat k němu hodnotu zpětnovazebního kapacitoru C_F , tak aby byla splněna podmínka pro požadovanou šířku pásma, viz. rovnice 7.7. Pro další simulace je zvolena hodnota $R_F = 1$ k Ω , Důvodem je možnost využít obvod pro frekvence až 150 MHz. Pokud by byl navržen obvod realizující převod z kódu NRZI na RZI, bude mít dvojnásobnou frekvenci, než současných 62,5 MHz.



Obr.: 7-9 Graficky znázorněná závislost vlastností OZ

7.2.6 Model zapojení fotodiody s OZ

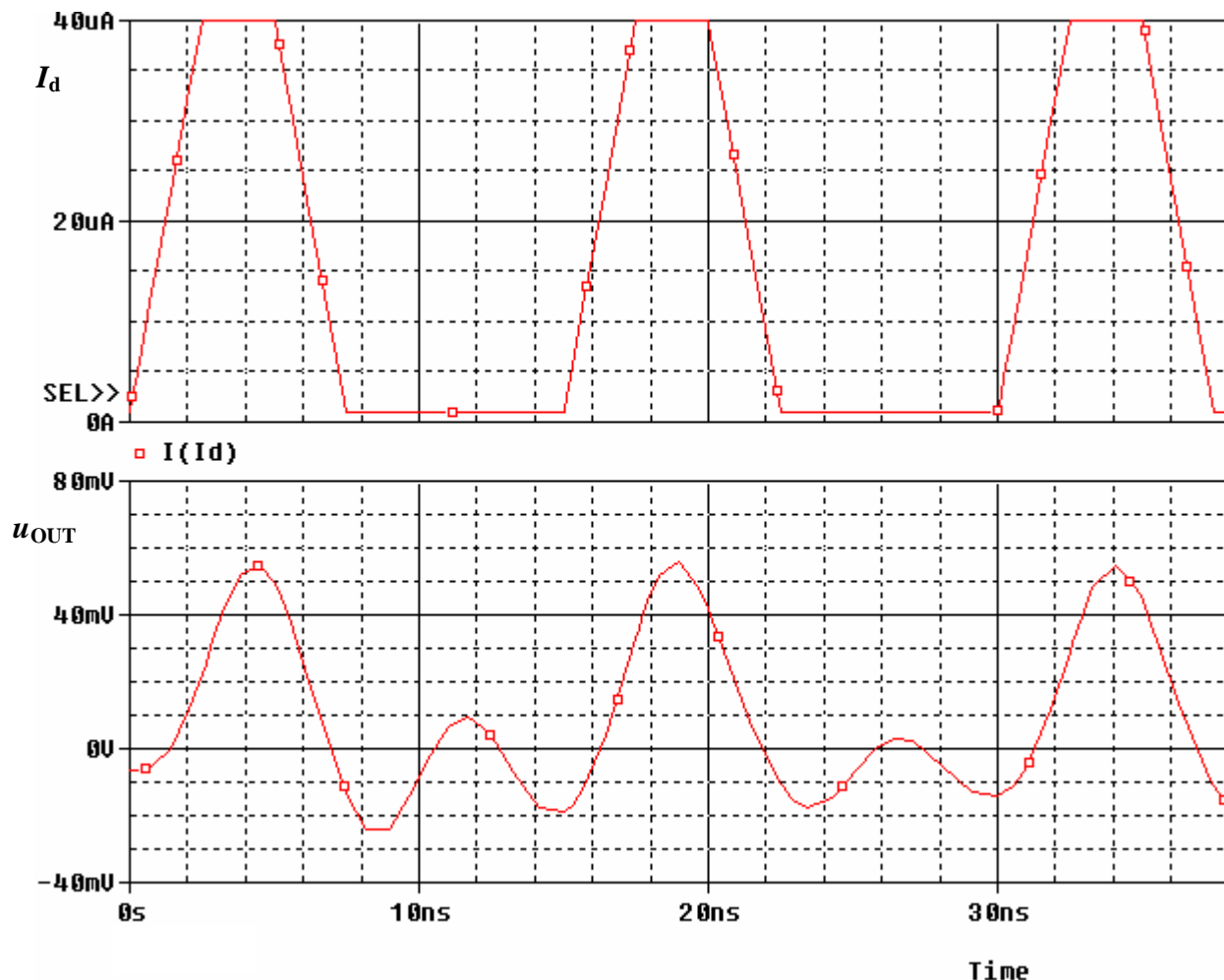
Modelování zapojení přijímače je v programu OrCad, jehož součástí je program PSPICE. Základní zapojení TIA je na obrázku 7-10. Obvod je zapojený bez reverzního napětí a slouží k nastavení parametrů TIA. PSPICE využívá schématické značky podle americké normy ANSI. Schémata nejsou předělána na značení podle evropské normy DIN. V modelech se nesimulují zdroje šumu. Model fotodiody je tvořen zdrojem proudu I_d a kapacitou diody C_d . Model je nastaven pro fotodiodu S5971 a její parametry. Nižší úroveň generovaného proudu simuluje proud za tmy dle tabulky 7-5 a vliv záření pozadí. Parazitní kapacita vstupů OZ je zahrnuta v jejich modelu.



Obr.: 7-10 Základní zapojení fotodiody a TIA bez reverzního napětí v PSPICE

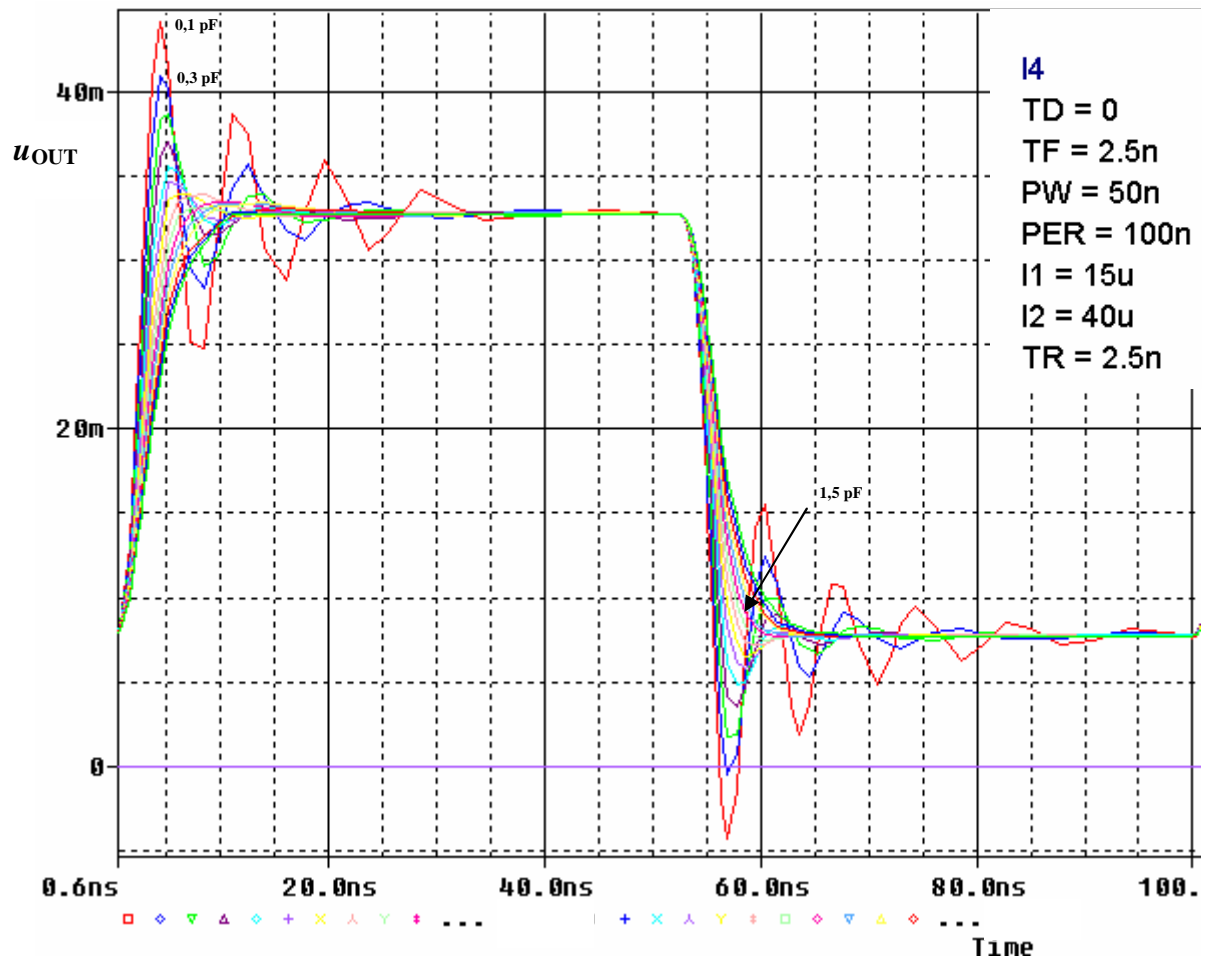
Zapojení TIA dle doporučení výrobce. Napájecí napětí je symetrické ± 5 V. Hodnota zpětnovazebního odporu je zvolena na základě hodnot z tabulky 7-5 na $R_F = 1$ k Ω . Proudová sonda umožňuje měřit protékající proud určitou svorkou, zde svorkou zdroje proudu I_d . Napěťová

sonda měří výstupní napětí z OZ. Na obrázku 7-11 je zobrazen simulovaný fotovoltaický proud a výstupní napětí z OZ, pokud není zapojen zpětnovazební kapacitor C_F .



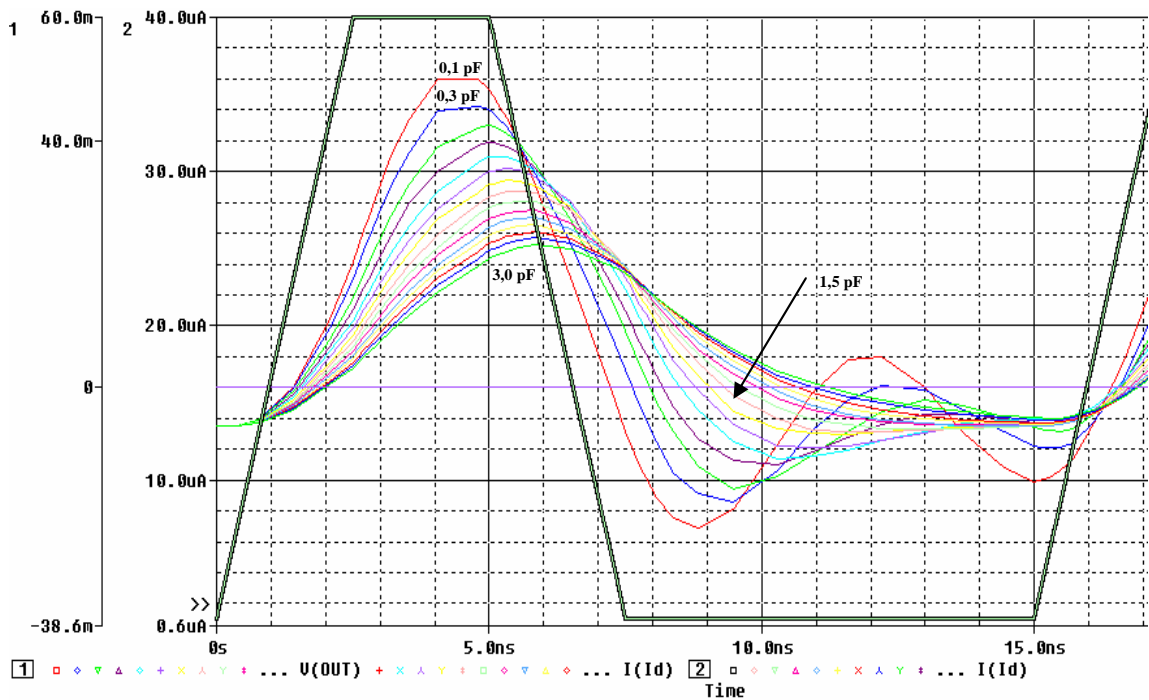
Obr.: 7-11 Průběh proudu I_d a výstupního napětí OZ

Proud je generován podle zadaných hodnot. Výstupní napětí je zkruseno vlivem nestability způsobené kapacitou diody na vstupu OZ. V následující simulaci je ověřena hodnota zpětnovazebního kapacitoru C_F . Pokud je vysílán signál s periodou 10 MHz je lépe vidět vliv vzniku oscilací. Na obrázku 7-12 je průběh výstupního napětí z OZ u_{OUT} pro krokování parametru C_F v rozsahu 0,1 pF až 4 pF s krokem 0,2 pF. Pokud je hodnota zpětnovazebního obvodu rovna 0,1 pF, chová se obvod, jako by nebyla zapojena žádná zpětnovazební kapacita a začíná oscilovat, viz. červený průběh.



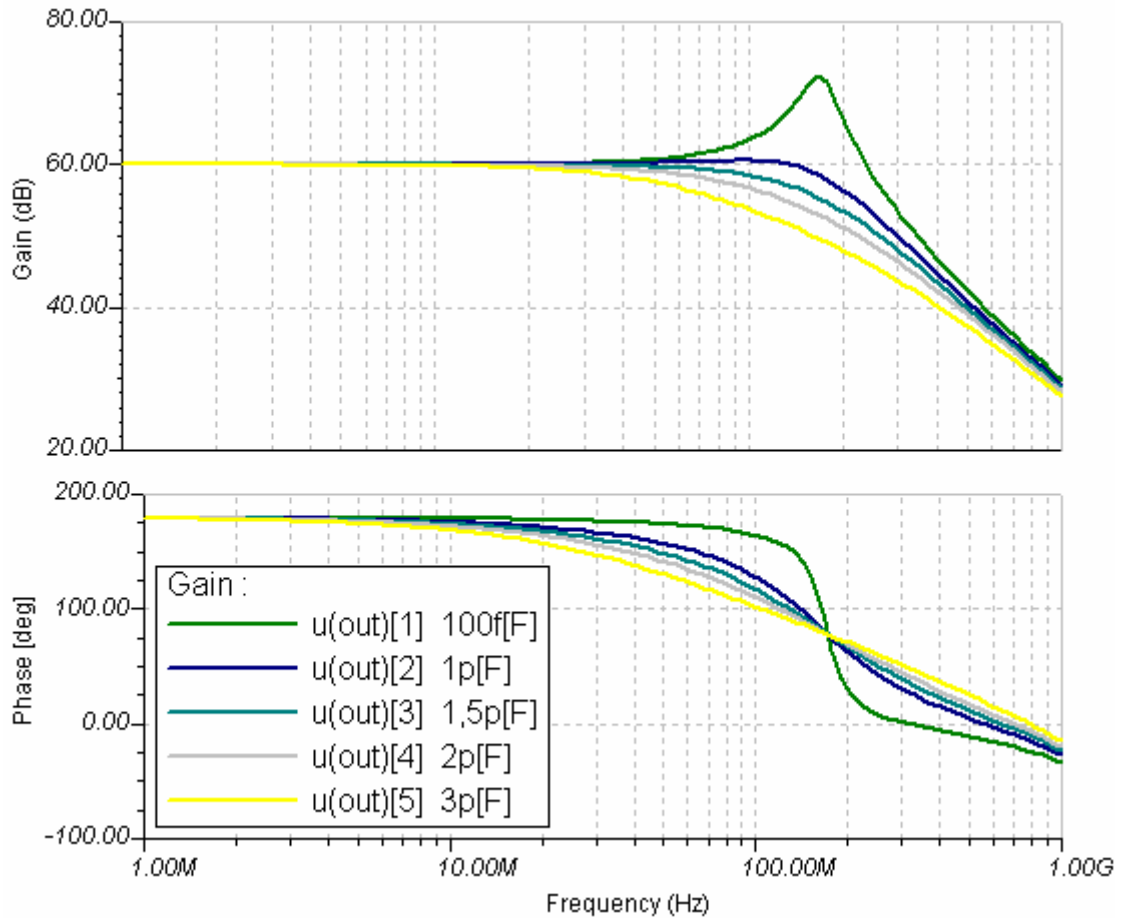
Obr.: 7-12 Oscilace výstupního napětí, vstupní proud s frekvencí 10 MHz

Na obrázku 7-13 je zobrazena jedna perioda výstupního napětí pro frekvenci 65 MHz. Průběhy jsou pro různé hodnoty zpětnovazební kapacity C_F v rozsahu 0,1 pF až 3 pF s krokem 0,2 pF. Hodnota odečtená z grafu, při které již nedochází k zakmitávání, je $C_F = 1,5$ pF. Při této hodnotě je již průběh výstupního napětí srovnatelný s průběhem vstupního proudu. Rozdíl mezi spočítanou hodnotou a hodnotou simulovanou je způsoben nedokonalostí modelu OZ a pro realizaci by byla zvolena hodnota blízká hodnotě vypočítané, od které by byla odečtena hodnota 0,2 pF, která představuje kapacitu připojeného zpětnovazebního rezistoru R_F .



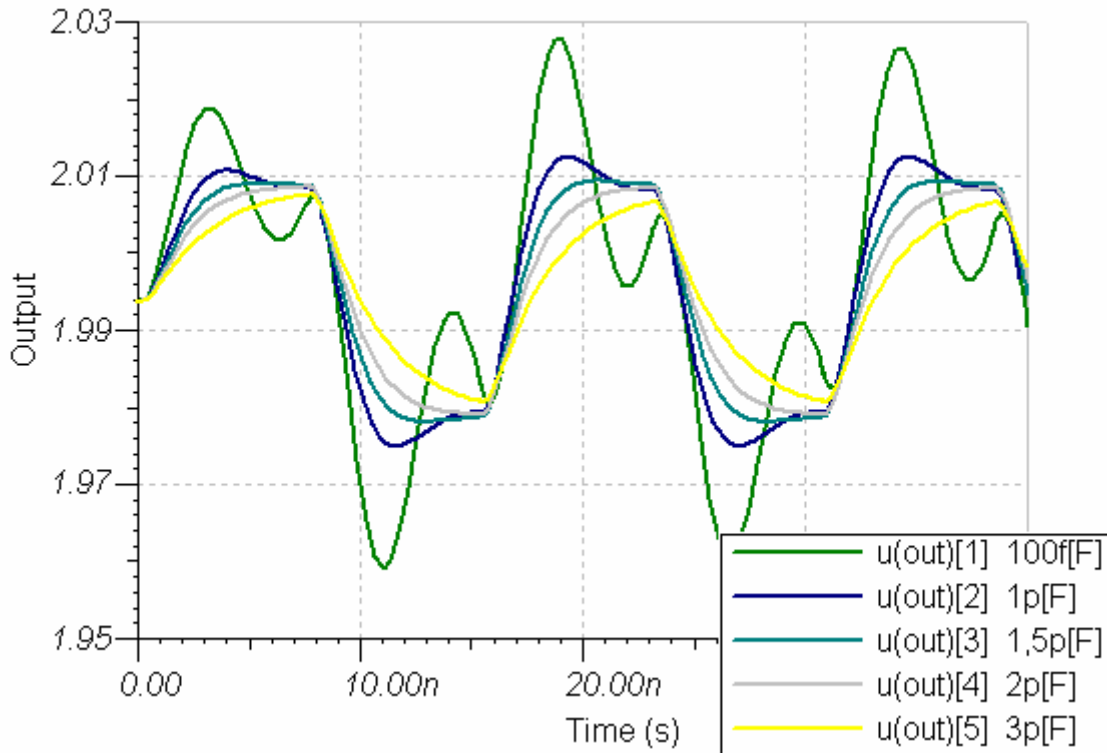
Obr.: 7-13 Výstupní napětí pro vstupní proud frekvence 66 MHz

Pomocí programu Tina, simulačního programu firmy Texas Instruments jsou simulovány přenosové funkce pro předchozí parametry. Schéma zapojení je stejné jako na obrázku 7-10, pro úplnost je zapojení přiloženo jako příloha A. Průběhy přenosových charakteristik pro jednotlivé kroky velikosti C_F jsou zobrazeny na obrázku 7-14. Vrchní část ukazuje závislost zesílení na frekvenci a další je zobrazení fáze. Vypočítaná hodnota C_F je uvedena v tabulce 7-5 a je rovna 1,14 pF. Hodnota určená v grafu programu PSPICE je 1,5 pF. Průběhy ověřují správnost předchozích výpočtů i simulace v programu PSPICE.



Obr.: 7-14 TINA, přenosová charakteristika obvodu modelu

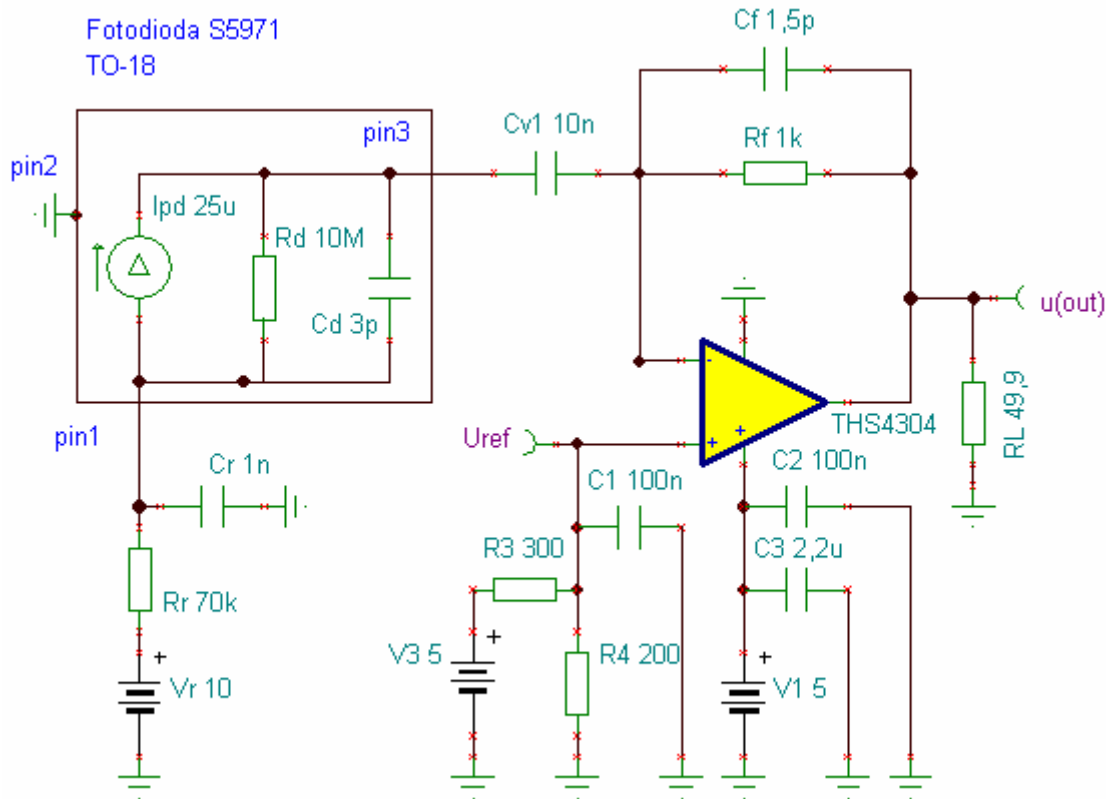
Dle teoretických předpokladů dochází při nezařazení zpětnovazební kapacity (nebo její minimální hodnoty $C_F = 0,1 \text{ pF}$), k posunu fáze o 180° mezi výstupním napětím a vstupním proudem vlivem parazitní kapacity. Posun fáze ukazuje spodní graf. Vlivem posunu dojde k zesílení nebo naopak zeslabení na odpovídající frekvenci. Obrázek 7-15 ukazuje průběhy výstupního napětí



Obr.: 7-15 TINA, výstupní napětí

7.2.7 Model zapojení fotodiody s OZ s reverzním napětím

Následující simulace jsou již prováděny pouze v programu TINA. Model je také vytvořen v programu PSPICE, ale TINA je preferována, protože má lepší uživatelské rozhraní. Po nastavení parametrů TIA je vhodné přejít k simulaci zapojení, které je možné prakticky realizovat. Zapojení ukazuje obrázek 7-16. V tomto zapojení je realizováno reverzní napětí U_R . Proud z fotodiody je nastaven podle potřeb simulace v rozsahu od 10 μA , což realizuje vyzařování pozadí a proud za tmy, a 40 μA . Náhradní model je z obrázku patrný. Fotodioda je připojena na kladné reverzní napětí přes odpor R_R . Společně s kapacitorem C_R tvoří integrační článek, dolní propust, která filtruje vysokofrekvenční rušení z reverzního napětí. Hodnota R_R je volena tak, aby při změně velikosti proudu za tmy, byl úbytek na tomto odporu podstatně menší než reverzní napětí. Tím se nebude při změně proudu za tmy měnit reverzní napětí na fotodiodě. Je nutné také zvolit vhodnou velikost kapacitoru C_R , která musí být podstatně větší než kapacita fotodiody C_D . S rostoucí kapacitou, bude klesat reaktance (imaginární část impedance). Proto poteče proud šumu kapacitorem s větší kapacitou, a tak se sníží vliv šumového proudu.

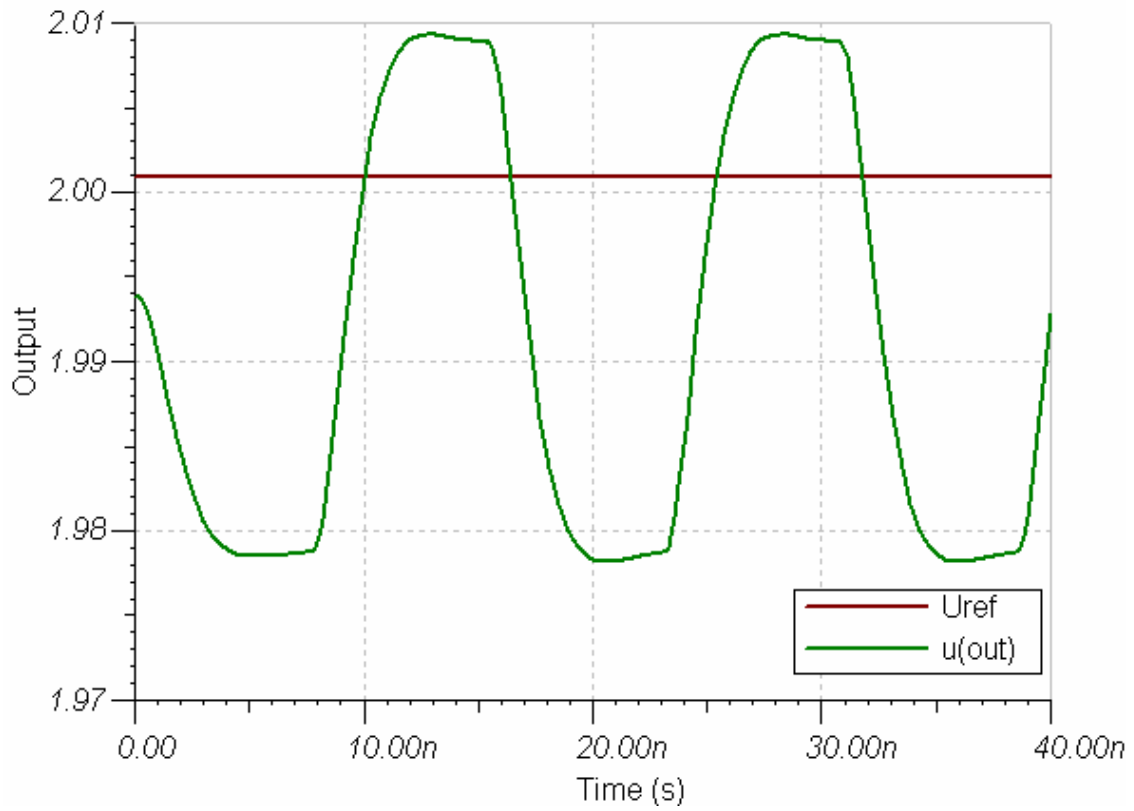


Obr.: 7-16 TINA, Schéma zapojení PIN fotodiody S5971 s TIA THS4304

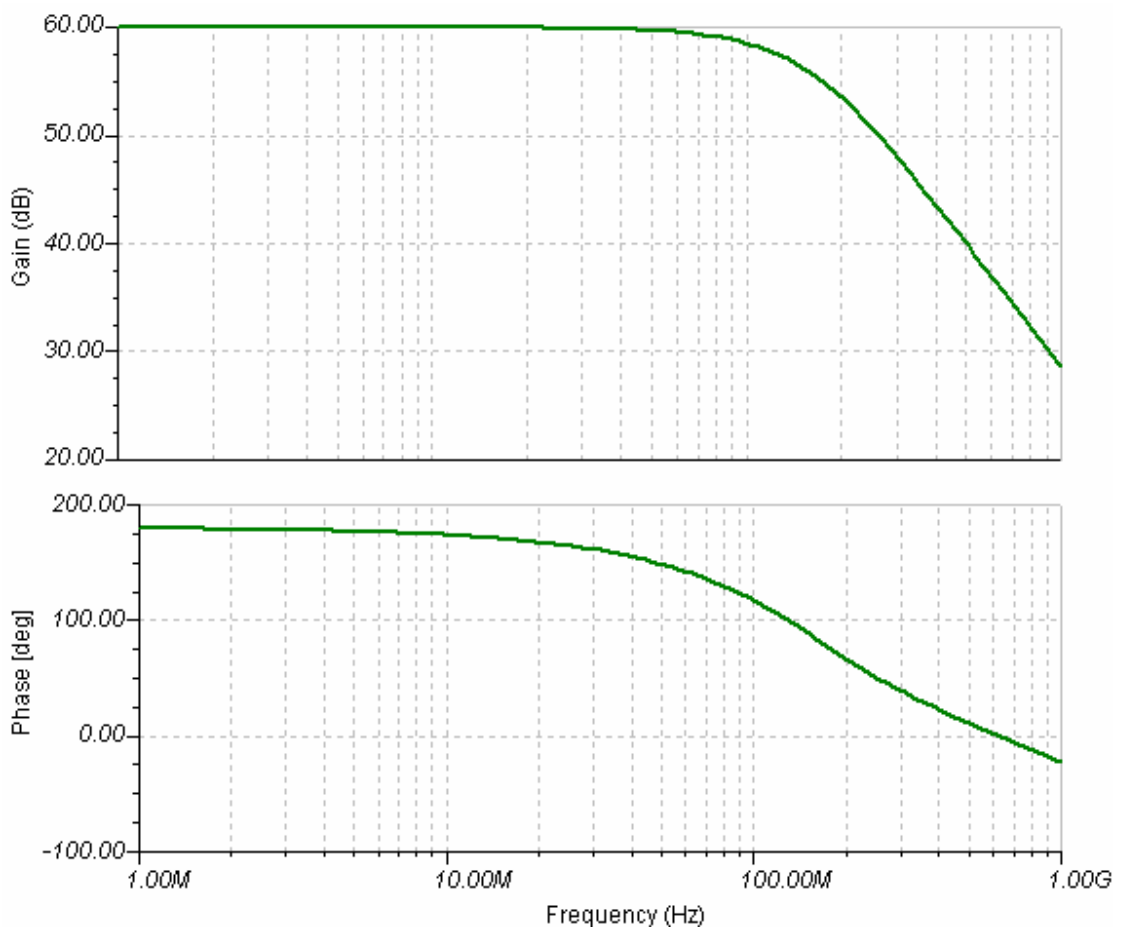
Pro spojení OZ a fotodiody je využita kapacitní vazba přes C_{V1} , která odstraní ze vstupu stejnosměrnou složku. C_{V1} je volena 10 nF.

Pro praktickou realizaci je výhodné použít nesymetrické napájení + 5 V, proto je třeba na neinvertující vstup OZ přivést referenční hodnotu U_{ref} . Zde je řešena odporovým děličem R_3 a R_4 připojeným na napájecí napětí. Hodnoty jsou voleny tak, aby referenční napětí bylo + 2 V, které je filtrované přes kapacitor C_1 . Napájecí napětí je filtrováno přes kapacitory C_2 a C_3 . Volba hodnoty kapacity a rezistoru zpětnovazební větve je probrána v kapitole 7.3.5. Rezistor R_L jen simuluje zatížení obvodu, v praktické realizaci je nahrazen konektorem.

Na obrázku 7-18 je zobrazen průběh výstupního napětí u_{OUT} a referenčního napětí U_{REF} . Vodorovná osa je časová v sekundách a svislá ukazuje hodnoty napětí ve voltech. Zesílení TIA se rovná dvacetinásobku dekadického logaritmu z hodnoty odporu R_F . Pro $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ je zesílení $A = 60 \text{ dB}$. Tato vlastnost se označuje jako transimpedance, více v literatuře [23].



Obr.: 7-17 TINA, Výstupní napětí obvodu s reverzním napětím



Obr.: 7-18 TINA, přenosové charakteristiky obvodu

7.3 VÝSÍLAČ

Tato práce se zabývá pouze návrhem elektronické části a hlavně simulací problematiky vysílače AOS. Není provedena simulace vlivu kolísání napájení. Vysílač musí obsahovat blok budiče laseru, zdroj záření. V kapitole 6.2.1 jsou popsány důležité parametry zdrojů záření, konkrétně VCSEL. V rámci simulace byl sestaven model zdroje záření podle katalogu. Pro navrhované řešení se vychází z obrázku 7-1. Elektrické spojení mezi modulem vysílače a media konvertoru je přes kontakty M5 až M8. Rozhraní je podle standardu LVPECL a je třeba dodržet vstupní napěťové úrovně definované v tabulce 7-1. Na obrázku 7-21 je zobrazen změřený průběh napětí z kontaktů M6 a M8 media konvertoru, které reprezentují výstup z media konvertoru do transiveru. Při porovnání hodnot z tabulky 7-2 a obrázku 7-21 musíme konstatovat, že výrobce dodržel napěťové úrovně signálu. Tento signál bude sloužit k modulaci proudu v budiči laseru.

7.3.1 Laserová dioda

Pro AOS je třeba laserových diod vyšších optických výkonů. Vhodné typy pro určité vlnové délky jsou popsány v kapitole 6.2.1. Pro velmi vhodné vlastnosti je volena technologie VCSEL. Zdrojem záření bude v zapojení laserová dioda PM85, podrobný popis v literatuře [24]. Klíčové parametry jsou popsány v tabulce 7-6.

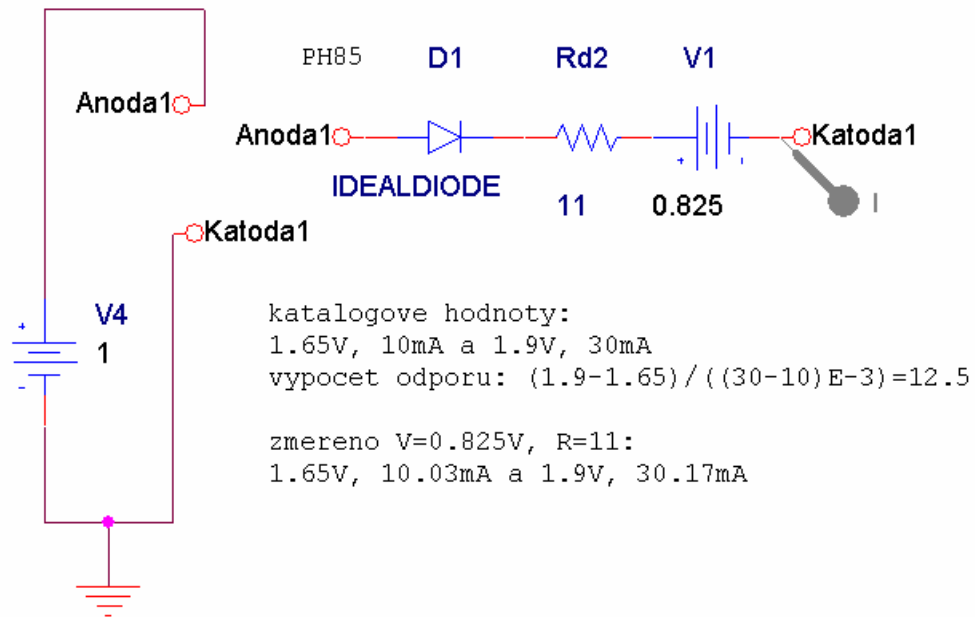
Optický výkon P_O (mW)	Vlnová délka λ_{LD} (nm)	Prahový proud I_{th} (mA)	Maximální prahový proud $I_{th,MAX}$ (mA)
10	850	5	30

Tab. 7-6 Parametry PM85

7.3.2 Model laserové diody

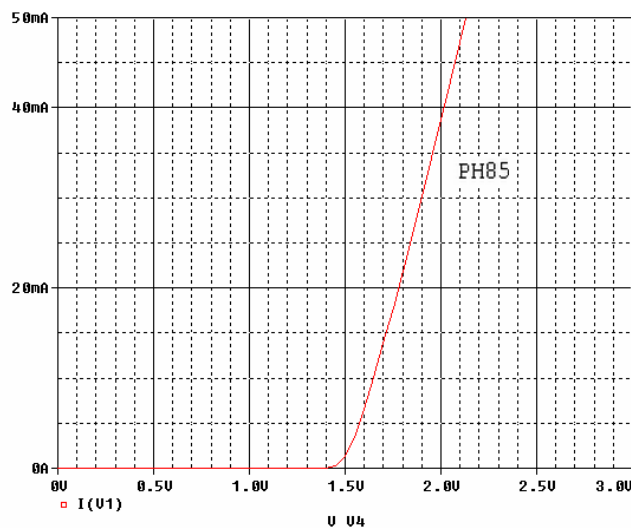
V programu PSPICE je realizován model laserové diody. Tento model s ohledem na potřeby, realizuje jen Voltampérovou charakteristiku laserové diody. Nepředpokládá se zapojení laserové diody s využitím zpětné vazby k realizaci kontroly optického výkonu. Nebude provedena simulace vyzářeného optického výkonu. Na obrázku 7-19 je zobrazen model LD společně

s obvodem pro simulaci Voltampérové charakteristiky. V obvodu je jen zdroj napětí, který je krokován, a proudová sonda, která měří proud modelem LD. Model LD je realizován modelem ideální diody D1, rezistorem R_{d2} a zdrojem stejnosměrného napětí V_1 . Hodnota rezistoru má vliv na strmost průběhu. Zdroj V_1 zaručuje posun po ose x, tak aby byl průběh srovnatelný s Voltampérovou charakteristikou skutečné LD PM85.



Obr.: 7-19 Model LD MP85 s obvodem pro měření V-A charakteristiky

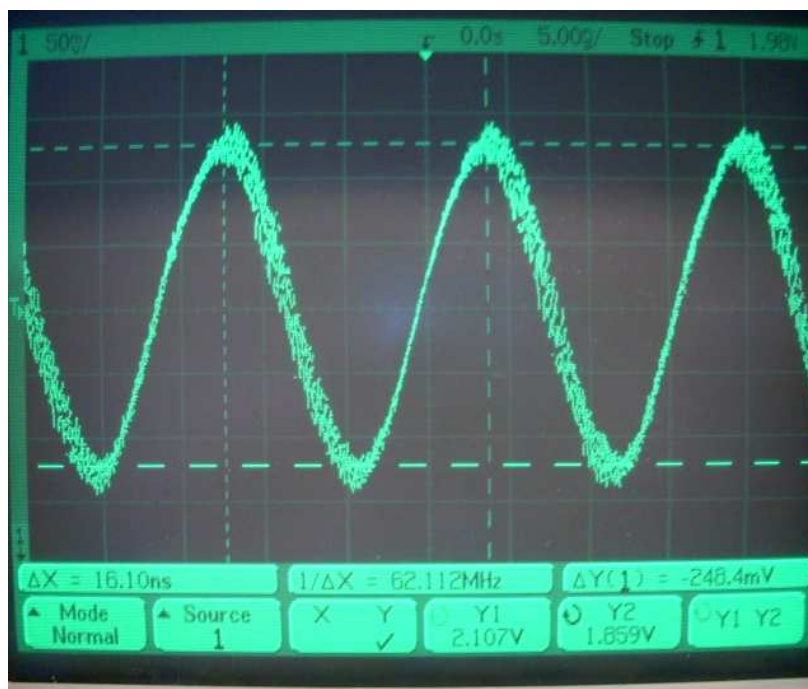
Na obrázku 7-20 je zobrazen průběh V-A charakteristiky modelu LD, který bude následovně sloužit k zapojení do obvodu budiče laserové diody a následné simulaci jeho funkce.



Obr.: 7-20 V-A charakteristika modelu LD PH85

7.3.3 Budič laseru

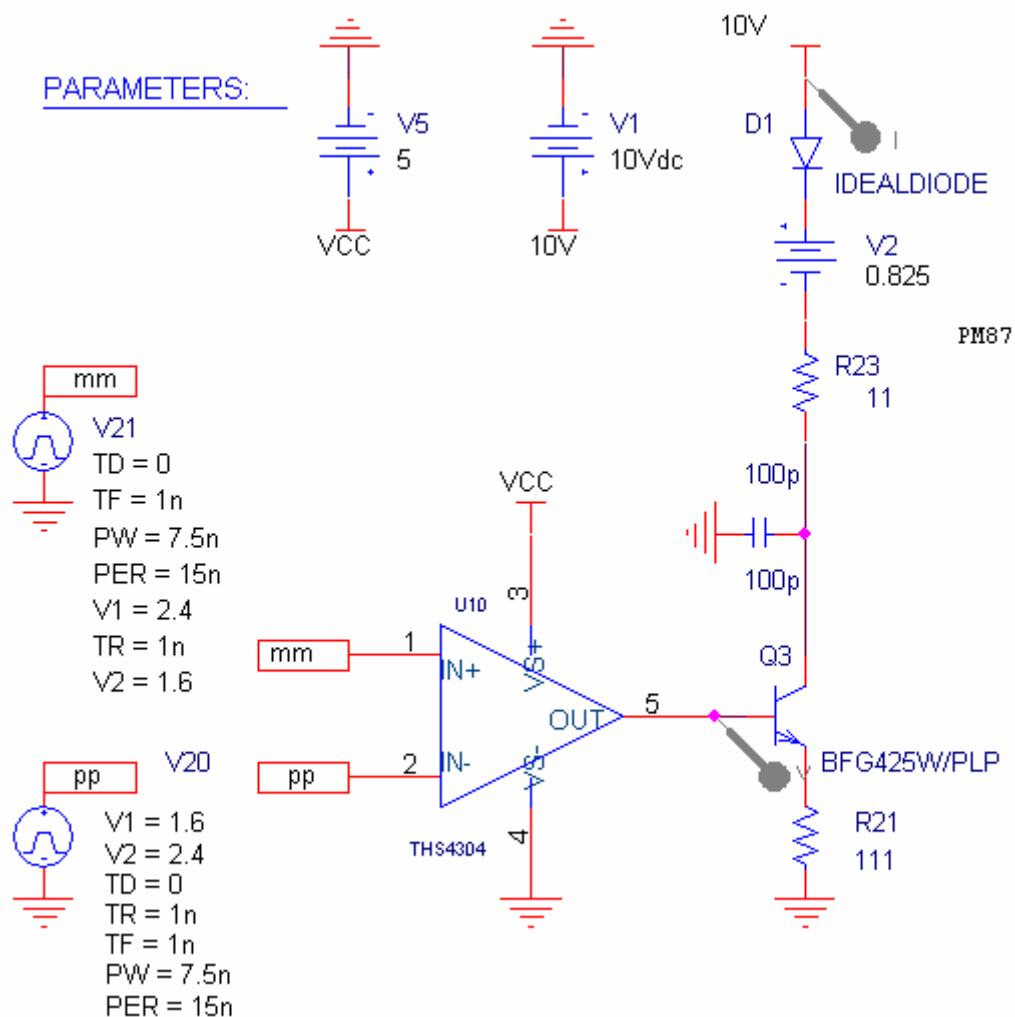
Budič laseru je dnes realizován jedním integrovaným obvodem. Jeho hlavním úkolem je modulovat proud do zdroje světla podle vstupního signálu. Dále by měl zajistit ochranu před přepětím, překročením maximální hodnoty proudu zdrojem světla, zajistit pomalý náběh, který ochrání především laserové diody před zničením špičkovým proudem po zapnutí napájení v obvodu. V neposlední řadě umožňuje na základě zpětné vazby, která je realizována proudem z fotodiody, ovlivnit výstupní optický výkon, a tak zajistit konstantní hodnotu výstupního optického výkonu při fluktuaci teplot, nebo stárnutím polovodičového materiálu. Protože jsou dnes dostupné právě tyto obvody, je zbytečné pokoušet se navrhovat obvodové řešení. Bohužel je problém tyto obvody simulovat, protože většina výrobců zatím nedodává simulační modely. Vnitřní zapojení těchto obvodů je velmi složité a vhodné modely pro simulace jsou dostupné jen pro nejnovější výrobky pro přenosové rychlosti nad 1 Gbit/s. Pro simulaci a návrh obvodu vysílače se vychází z předpokladu, že modulační napětí nepřekročí hodnoty definované v LVPECL. Napájení a přepěťová ochrana je realizována media konvertorem nebo externím zdrojem napětí. Není řešena problematika zpětné vazby realizované fotodiodou nebo omezení maximálního proudu laserovou diodou.



Obr.: 7-21 Vstupní napěťový signál do transiveru

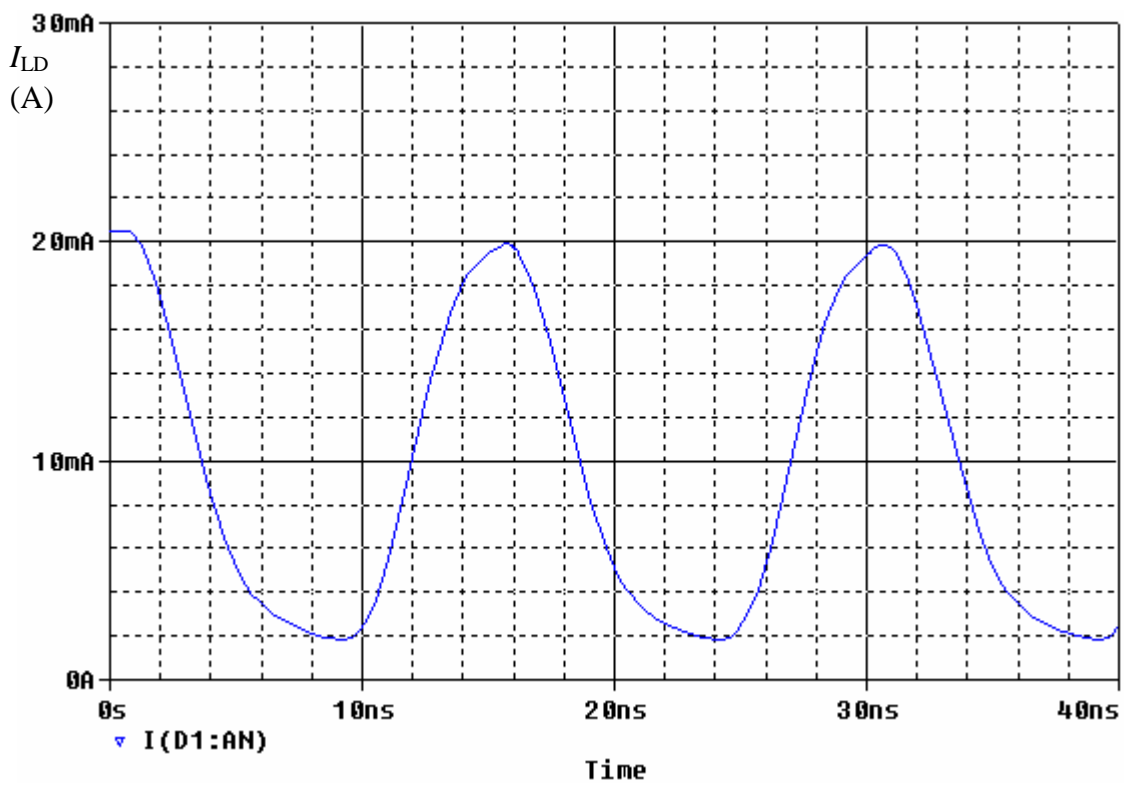
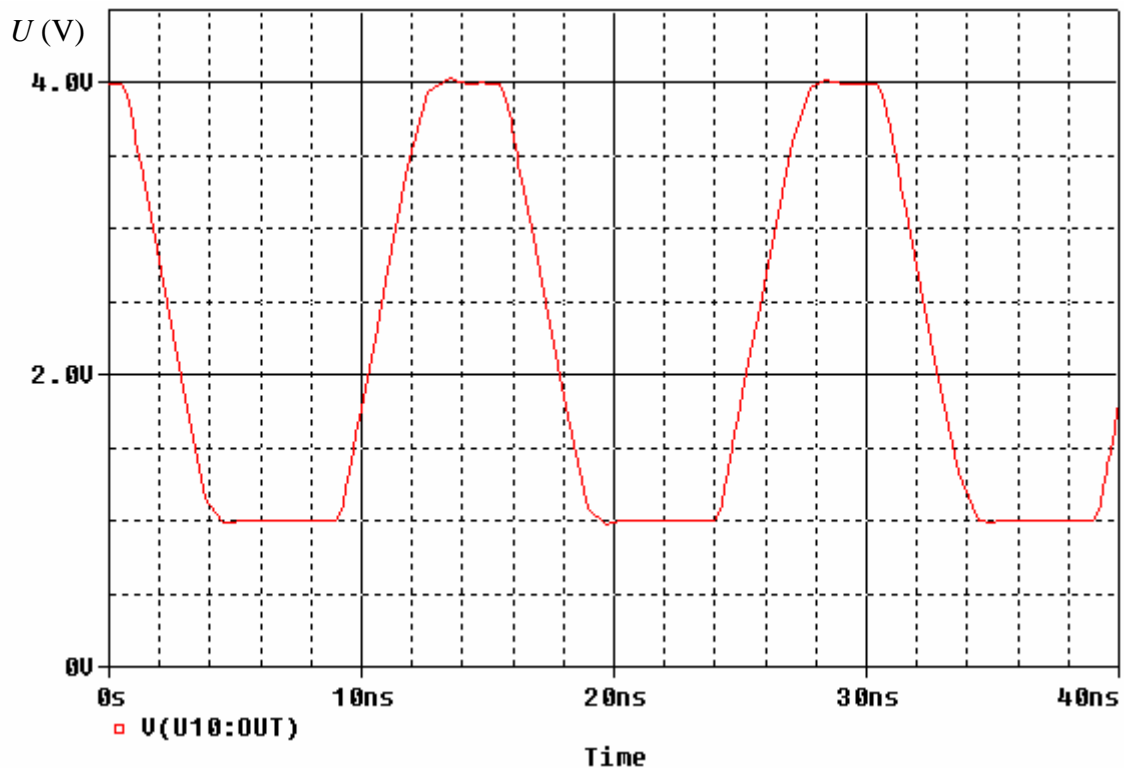
7.3.4 Budič laseru

Budič je složen z OZ, tranzistoru a LD(laserové diody). Oz je použit THS4304, tranzistor BFG425W. Hlavním účelem tohoto obvodu je řízení proudu přes LD podle vstupního napětí, přivedeného z externího generátoru (následně z kontaktů M6 a M7 z media konvertoru). Pokud je dostatečně velké vstupní napětí U_{CC} , je proud LD I_{LD} dán hodnotou rezistoru R_E , napětím přivedeným na vstupy OZ. Model zapojení ukazuje obrázek 7-22. Schéma, deska plošných spojů a seznam součástek je v příloze C.



Obr.: 7-22 Model pro simulaci budiče laseru se zapojenou LD

V modelu jsou použity dva zdroje napětí V_{20} a V_{21} , které simulují průběhy napětí přiváděné z media konvertoru. OZ THS 4304 je sčítá, přesněji odečítá vstupní napětí. Výstupní napětí bude mít úroveň pro úroveň logické „1“ 4 V a pro úroveň logické „0“ 1 V. Průběh výstupního napětí OZ a proudu LD je zobrazen na obrázku 7-23.



Obr.: 7-23 Průběh budícího napětí a modulačního proudu LD.

Pokud zanedbáme proud do báze TR, proud přes LD může být vyjádřen rovnicí 7.10.

$$I_{LD} \cong \frac{U_{IN}}{R_E} \quad (\text{A; V, } \Omega), \quad (7.10)$$

kde U_{IN} je vstupní napětí a R_E je hodnota odporu připojeného k emitoru TR.

Maximální výstupní napětí OZ je $\sim 4 \text{ V}$. Toto napětí je rovno maximálnímu napětí na bázi TR. Maximální napětí na emitoru TR je potom:

$$U_{EMAX} \cong U_{BMAX} - 0,7 \text{ V} = 3,3 \text{ V} \quad (\text{V; V}), \quad (7.11)$$

kde $0,7 \text{ V}$ je úbytek napětí mezi bázi a editorem TR. Maximální hodnota proudu se vypočítá podle rovnice 4.

$$I_{LD} \cong \frac{U_{EMAX}}{R_E} \cong \frac{U_{EMAX} - 0,7 \text{ V}}{R_E} \quad (\text{A; V, } \Omega), \quad (7.12)$$

Proud přes TR a LD nemůže téct zpět. V obvodu mohou nastat tři případy:

1. $U_{IN} > 3,3 \text{ V}$ a proud laserovou diodou bude roven rovnici 7-13:

$$I_{LD} \cong I_{LDMAX} \cong \frac{3,3\text{V}}{R_E} \quad (\text{A; V, } \Omega). \quad (7.13)$$

2. $0 \text{ V} < U_{IN} < 3,3 \text{ V}$ a proud laserovou diodou bude roven rovnici 7-14:

$$I_{LD} \cong \frac{U_{IN}}{R_E} \quad (\text{A; V, } \Omega). \quad (7.14)$$

3. $U_{IN} < 0 \text{ V}$ a proud laserovou diodou bude roven rovnici 7-15:

$$I_{LD} \cong 0 \quad (\text{A}). \quad (7.15)$$

Pro obvod, který je realizován je hodnota rezistoru R_E zvolena 150Ω , a tak je zajištěn maximální proud LD podle rovnice 8:

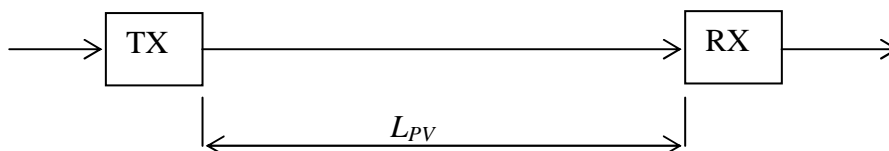
$$I_{LDMAX} \cong \frac{3,3\text{V}}{150} \cong 22 \text{ mA} \quad (7.16)$$

7.4 Výkonová bilance spoje

V Kapitole 4 a 5 je popsán úvod do problematiky návrhu AOS. Statistický model slouží pro ohodnocení vlivu vnějších vlivů na energetickou bilanci spoje. Stacionární model slouží pro návrh energetické bilance AOS. Dále bude následovat ukázka návrhu stacionárního modelu, který bude popsán výkonovou bilanční rovnicí a výkonovým diagramem spoje.

7.4.1 Uspořádání spoje, požadavky

Na obrázku 7-24 je znázorněný optický spoj. Jedná se o digitální optický bezkabelový spoj pracující s modulací IM/OOK. Spoj je tvořen optickým vysílačem s laserovou diodou VCSEL a optickým přijímačem s fotodiodou PIN. Přenosovým prostředím je atmosféra s koeficientem útlumu $\tilde{\alpha}_{i,ATM} = 2,7$ dB/km.



Obr.: 7-24 Zjednodušený model OAS

Požadavky na kvalitu přenosu a parametry použitých prvků:

- Přenosová rychlost $v_I = 100$ Mbit/s ; BER = 10^{-9}
- Výkonová systémová rezerva $M = 10,0$ dB

7.4.2 Parametry vysílače a přijímače

Ve vysílači je použita laserová dioda VCSEL. Použitá vlnová délka nosné vlny je $\lambda = 850$ nm; $\Delta\lambda = 0,1$ nm). Střední optický výkon vysílače je $P_{m,LD} = 10$ mW. Průměr vysílací čočky je $D_{VOS} = 30$ mm a ohnisková vzdálenost $f_{VOS} = 52$ mm. Úhlová šířka vyzařovací charakteristiky laserové diody $\varphi_{LD} = 32^\circ$ Úhlová šířka vyzařovaného svazku $\varphi_t = 8$ mrad.

V přijímači je použita fotodiody PIN s citlivostí $R_i = 0,6$ A/W @ 830 nm). Průměr aktivní plochy fotodiody $d_{PD} = 1,2$ mm. Průměr přijímací čočky $D_{POS} = 150$ mm; ohnisková vzdálenost $f_{POS} = 150$ mm.

Při použití IM/OOK a přenosové rychlosti 155 Mbit/s je pro BER = 10^{-9} potřeba zajistit SNR = 15,6 dB. Pro chybovost BER = 10^{-6} SNR = 13,5 dB [1]. Citlivost přijímače $P_{0,FD}$ je rovna

hodnotě NEP sečtené s doporučeným SNR pro specifickou chybovost. NEP bude brán pro hodnotu $R_F = 1 \text{ k}\Omega$ a je roven $-41,98 \text{ dBm}$, jak je vypracováno v tabulce B-1 v příloze B.

$$P_{0,6} = NEP + SNR = -41,98 + 13,5 = -28,5 \text{ dBm @ BER} = 10^{-6}.$$

$$P_{0,9} = NEP + SNR = -41,98 + 15,6 = -26,38 \text{ dBm @ BER} = 10^{-9}.$$

Na cestě optického paprsku se vyskytují různé optické prvky. Propustnost optického filtru: 80% @ 850 nm; (optický filtr je umístěn těsně před fotodiodou a jeho účelem je omezit vliv záření pozadí)

Útlum průzoru vysílače: 10%

Útlum průzoru přijímače: 10%

Útlum na vysílací čočce je zanedbán, útlum na přijímací (Fresnelově) čočce: 10%

Průměr „spotu“ v ohniskové rovině přijímací čočky je 1 mm.

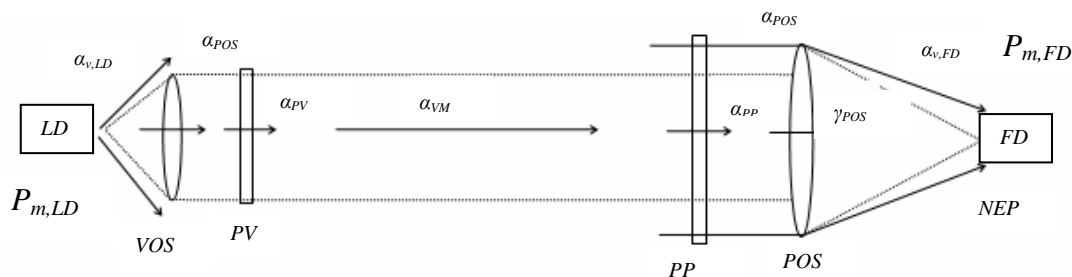
Šířka pásma atmosféry ($L.v_l$) = 20 km.Gbit.s⁻¹

Hodnoty, které nebylo možno změřit jsou převzaty z literatury [1]. Také jsou zanedbány vazby mezi laserovou diodou a vysílací čočkou, útlum vazby mezi přijímací čočkou a fotodiodou a útlum způsobený nedokonalým zaměřením hlavic.

7.4.3 Rozmístění zdrojů útlumu v AOS

Při stanovení útlumů a zesílení na trase od vysílače k přijímači vycházíme zjednodušeného modelu AOS dle obrázku 7-24. Na obrázku 7-25 je nakreslen podrobnější model AOS, který popisuje jednotlivé útlumy ve vysílací, přijímací i bezdrátové části modelu AOS.

Při návrhu optického spoje je třeba zajistit na vstupu přijímače RX dostatečnou výkonovou úroveň přijímaného výkonu s ohledem na požadovanou chybovost a systémovou rezervu. Na druhou stranu úroveň přijímaného výkonu nesmí být větší než P_{sat} , při které dochází k saturaci přijímače. Proto je třeba vhodně volit i výkon použité laserové diody, abychom docílili požadované úrovně přijímaného výkonu.



Obr.:7-25 Místa útlumu a zesílení ve výkonové bilanci AOS

Pomocnou délku L_0 určíme z rovnice 7.17. Musíme znát průměr vysílací čočky $D_{VOS} = 30$ mm a úhlovou šířku vyzařovaného svazku $\varphi_t = 8$ mrad.

$$L_0 = \frac{D_{VOS}/2}{\tan \varphi_t/2} \cong \frac{D_{VOS}}{\varphi_t} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{3,75m}} \quad (7.17)$$

7.4.4 Výpočet výkonových úrovní v energetické bilanci AOS

Vysílací část AOS

Přepočet středního výkonu laserové diody $P_{m,LD} = 10$ mW

$$P_{m,LD[dBm]} = 10 \log \frac{P_{m,LD}}{1 \cdot 10^{-3}} = 10 \log \frac{10 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{10dBm}} \quad (7.18)$$

Přijímací část OBS

Bereme v úvahu zisk přijímací optické soustavy γ_{POS} :

$$\gamma_{POS} = \left(20 \log \frac{D_{RXA}}{D_{TXA}} \right) + 3 = \left(20 \log \frac{150 \cdot 10^{-3}}{30 \cdot 10^{-3}} \right) + 3 \cong \underline{\underline{16,98dB}} \quad (7.19)$$

Stanovení střední výkonové úrovně na fotodiodě s ohledem na zajištění přenosové rychlosti 100 Mbit/s při chybovosti $BER = 10^{-9}$. (10^{-6}). Doporučená výkonová systémová rezerva spoje je $\rho = 10,0$ dB. Citlivost přijímače systému je $P_{0,9} = -26,38$ dBm.

$$P_{m,FD[dBm]} = P_{0,9} + \rho = -26,38 + 10 = \underline{\underline{-16,38dBm}} \quad (7.20)$$

7.4.5 Výpočet útlumů v energetické bilanci AOS

Vysílací část OBS

- útlum vazby mezi laserovou diodou a vysílací čočkou $\alpha_{v,LD}$ je zanedbán
- útlum na vysílací optické soustavě α_{VOS} je zanedbán
- útlum průzoru vysílače α_{PV} je 10%. $\alpha_{PV} = |10 \cdot \log 0,9| = \underline{\underline{0,46dB}}$

Přijímací část OBS

- útlum průzoru přijímače α_{PP} je 10% : $\alpha_{PP} = |10 \cdot \log 0,9| = \underline{\underline{0,46dB}}$
- útlum přijímací optické soustavy α_{POS} je 10% : $\alpha_{POS} = |10 \cdot \log 0,9| = \underline{\underline{0,46dB}}$
- propustnost optického filtru α_{OF} : 80% @ 850 nm : $\alpha_{OF} = |10 \cdot \log 0,8| = \underline{\underline{0,97dB}}$
- útlum vazby mezi přijímací čočkou a fotodiodou $\alpha_{v,FD}$ je zanedbán
- útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje α_z je zanedbán

APM (Atmosférické přenosové medium)

- útlum šířením α_{VP} :

$$\alpha_{VP} = 20 \log \frac{L_0 + L_{VP}}{L_0} \quad (7.21)$$

- spoj pracuje ve standardní čisté atmosféře s koeficientem útlumu $\tilde{\alpha}_{1,atm} = 2,7 \text{ dB/km}$

$$\alpha_{atm} = \tilde{\alpha}_{1,atm} \cdot L_{VP} \quad (7.22)$$

Podrobný vztah mezi výkonem laserové diody a výkonem dopadajícím na aktivní plochu fotodiody (za předpokladu klidné a čisté atmosféry) popisuje následující rovnice:

$$P_{m,FD} = P_{m,LD} - \alpha_{PV} - \alpha_{VP} - \alpha_{atm} - \alpha_{PP} - \alpha_{POS} - \alpha_{OF} + \gamma_{POS} \quad (7.23)$$

Protože $\alpha_{VP}, \alpha_{atm}$ jsou funkcí vzdálenosti mezi vysílací a přijímací hlavicí L_{VP} , upravíme rovnici do tvaru:

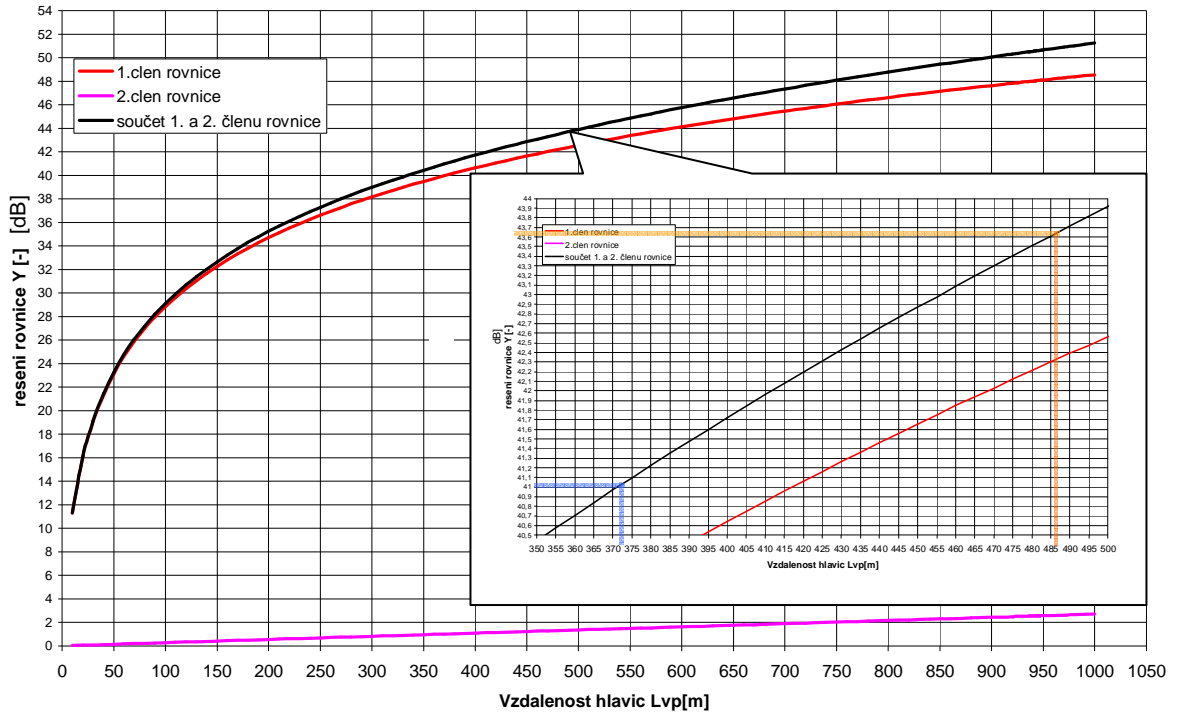
$$\begin{aligned}\alpha_{atm} + \alpha_{VP} &= P_{m,LD} - P_{m,FD} - \alpha_{PV} - \alpha_{PP} - \alpha_{POS} - \alpha_{OF} + \gamma_{POS} \\ \alpha_{atm} + \alpha_{VP} &= 10 + 16,38 - 0,46 - 0,46 - 0,46 - 0,97 + 16,98 \\ \alpha_{atm} + \alpha_{VP} &= \underline{\underline{41,01dB(43,63dB)}}\end{aligned}$$

Dosazením rovnic (7.21) a (7.22) získáme:

$$20 \log \frac{L_0 + L_{VP[m]}}{L_0} + \tilde{\alpha}_{1,atm} \cdot L_{VP[km]} = 41,01dB(43,63dB) \quad (7.24)$$

Tato rovnice (7.24) bude vyřešena grafickou metodou (viz obrázek 7-26), kde první člen rovnice je tvořen vztahem (7.21) a druhý člen rovnice dán vztahem (7.22). Proměnnou pro jednotlivé členy rovnice (7.24) je vzdálenost mezi vysílací a přijímací hlavicí L_{VP} . Součet prvního a druhého členu dává řešení rovnice. Hledaná vzdálenost L_{VP} pro $BER = 10^{-9}$ je ta, pro kterou je součet 1. a 2. členu roven 41,01 dB. Pro $BER = 10^{-6}$ je součet 1. a 2. členu roven 43,63 dB.

Pro přenosovou rychlost 100 Mbit/s, chybovost $BER = 10^{-6}$ a výkonovou systémovou rezervu $M = 10dB$ je maximální vzdálenost mezi vysílací a přijímací hlavicí L_{VPm} je 485,5 m. Pro $BER = 10^{-9}$ musí být vzdálenost menší a to 372 m. Výpočet je proveden pro standardní klidnou atmosféru. Pokud dojde k navýšení útlumu atmosféry většinu jak systémová rezerva



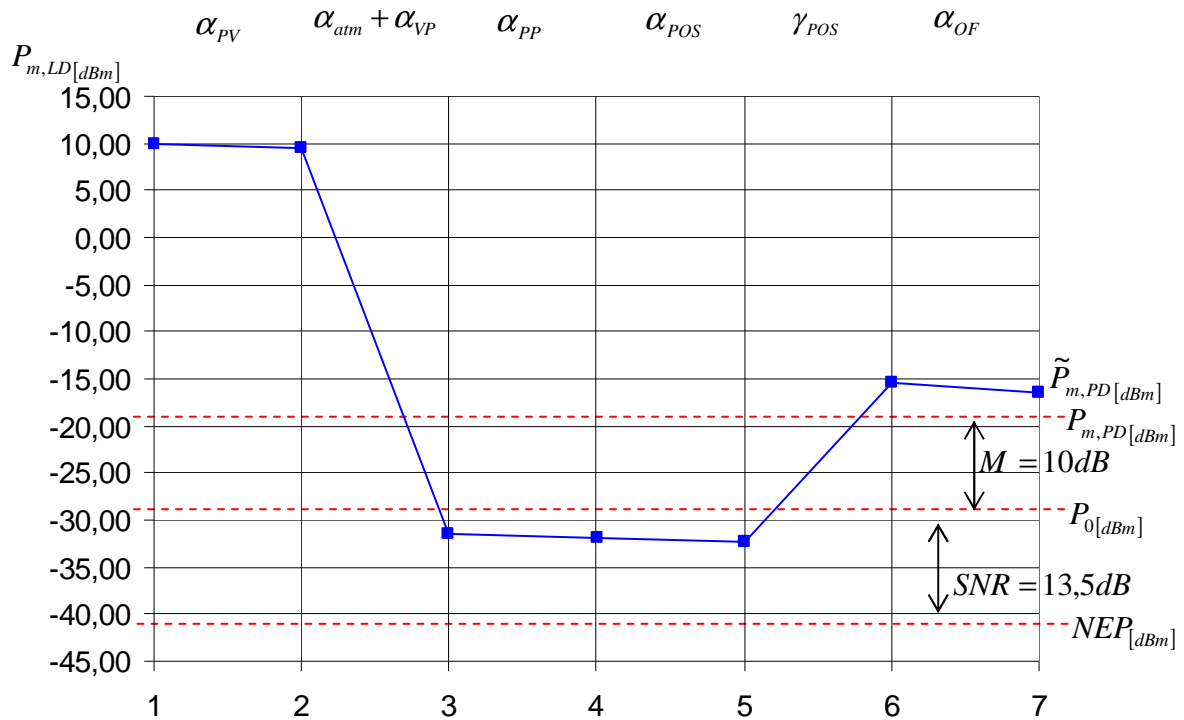
Obr.:7-26 Grafické řešení rovnice (7.24)

7.4.6 Výkonová bilance OBS

V následujícím obrázku 7-27 je vykreslena výkonová bilance AOS pro vzdálenost mezi vysílací a přijímací hlavici $L_{VP} = 485,5\text{m}$. Jednotlivé úrovně výkonu na trase od laserové diody až po fotodiodu jsou uvedeny v tabulce 7-6.

index	Komentář	označení	hodnota	Δ	Hodnota
1	výkon laserové diody	$P_{m,LD}(\text{dBm})$	10,00	$\alpha_{PV}(\text{dB})$	0,46
2	výkon za průchozem vysílací hlavice	$P_{PV}(\text{dBm})$	9,54	$\alpha_{atm} + \alpha_{VP}(\text{dB})$	41,01
3	výkon na průchozu přijímací hlavice	$P_{atm}(\text{dBm})$	-31,47	$\alpha_{PP}(\text{dB})$	0,46
4	výkon za průchozem přijímací hlavice	$P_{PP}(\text{dBm})$	-31,93	$\alpha_{POS}(\text{dB})$	0,46
5	výkon za přijímací čočkou	$P_{POS}(\text{dBm})$	-32,39	$\gamma_{POS}(\text{dB})$	16,98
6	výkon při uvážení zisku přijímací čočky	$P_{\gamma POS}(\text{dBm})$	-15,41	$\alpha_{oi}(\text{dB})$	0,97
7	výkon na fotodiodě	$P_{m,PD}(\text{dBm})$	-16,38	-	-

Tab. 7-7 Výkonové úrovně AOS



Obr.:7-27 Výkonová bilance AOS pro volené parametry a vzdálenost $L_{VP} = 485,4$ m

7.4.7 Zhodnocení, chybovost BER

Výkonová bilanční rovnice pomáhá určit parametry vysílače a přijímače. Většinou je daná neměnná citlivost přijímače. Pokud je třeba zvýšit dosah, nebo snížit chybovost BER, může se zvýšit výstupní optický výkon LD, snížit útlum šířením například použitím systému s automatickým zaměřováním. Další možnost je zvětšit plochu čočky přijímače a tak zvýšit zisk.

Navržený přenosový systém AOS bude mít za standardní atmosféry chybovost $BER = 10^{-6}$, pokud budou dodrženy parametry popsané v kapitole 7.4.4 a 7.5.5 a vzdálenost hlavic bude menší než 485 m. Tento navržený spoj bude splňovat požadavek na chybovost BER i v případě, že vlivem útlumu atmosféry dojde k poklesu úrovně signálu o 10 dB.

8 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce jsem se pokusil provést návrh AOS. Problematika přenosu informací volným prostorem pomocí světelných paprsků vypadá velmi zajímavě. K preciznímu návrhu optického spoje a jeho realizaci je potřeba rozsáhlá oblast znalostí z oblasti elektroniky, fotoniky, fyziky a dalších oblastí. Kompletní návrh AOS i s realizací není možné stihnout, pokud se nebude stavět stavebnice RONJA. V práci jsem se zaměřil na návrh modelů přijímače a vysílače, kterými by bylo možné si ověřit funkčnost zapojení. Koncepce návrhu je taková, že nahradím ve finančně dostupném media konvertoru transiver. Mnou navržené obvody musí být kompatibilní s media konvertorem. Problematika napěťových úrovní byla probrána. V rámci pokusů byl změřen průběh signálu mezi media konvertorem a transiverem. V návrhu vysílače je provedena nejprve simulace samotné laserové diody. Vycházel jsem z V-A charakteristiky v katalogu. V programu PSPICE úspěšně sestavil model laserové diody. Model budiče laseru je velmi jednoduchý. Měl sloužit k ověření funkčnosti zapojení přijímače. Pro reálnou aplikaci by bylo výhodnější využít integrovaný obvod budiče laseru, který se programuje pomocí paměti PROM.

Návrh přijímače je zásadní, protože citlivost přijímače velmi ovlivní celkovou bilanci spoje. V práci jsou rozpracovány možnosti zapojení fotodiody, jejich výhody a nevýhody. Pro realizaci byl zvolen fotokonduktivní režim. Jeho výhodou je použití detektoru s velkou aktivní plochou a tedy I kapacitou. Pro velmi velké přenosové rychlosti v řádu GBit/s se využívá fotovoltaického zapojení. Jeho hlavní výhodou je, že zde nefiguruje téměř žádný proud za tmy. Fotodiodu je třeba spojit s OZ, který převede vstupní proud na výstupní napětí. V práci je provedeno porovnání několika OZ. Je zvolen THS4304, protože podle teoretického výpočtu měl nejnižší úroveň šumu. V další části práce je provedena diskuze zpětnovazební větve OZ a její vliv na šířku pásma zapojení. Zapojení fotodiody a TIA tvoří už hotový přijímač. Aby bylo možné posoudit návrh přijímače, je třeba zjistit jeho citlivost. Nejprve jsem určil úroveň NEP a následně odstup signál šum SNR. Výpočet je uveden v příloze. Protože jsem se rozhodl realizovat zapojení, cíl další simulace vedl k upravení napěťových úrovní z výstupu TIA na úroveň LVPECL, na kterých funguje rozhraní media konvertoru a transiveru. Schéma zapojení je zařazeno v přílohách. Skládá se z bloku TIA, bloku limitního zesilovače a bloku diferenčního zesilovače. Velmi časově náročné bylo projít nabídku OZ a vybrat nejvhodnější pro danou problematiku. Z velké nabídky byli nakonec vybrány OPA659 jako limitní zesilovač a THS4509 jako diferenční zesilovač. Realizace modelu se zdařila a proud z fotodiody v jednotkách μA byl převeden na napětí 1,6 V až 2,4 V.

V další části jsem využil hodnot vypočítaných pro model a sestavil výkonovou bilanční rovnici. Některé hodnoty proměnných byly převzaty, protože je nebylo možné změřit. Například útlum čočky byl převzat z literatury [1]. Hodnoty, které jsem znal, výstupní optický výkon LD a NEP pro přijímač, jsem využil pro sestavení rovnice. V rámci práce jsem měl za úkol určit chybovost BER. Protože k realizaci zařízení nedošlo, nebylo možné BER měřit. V praxi se využívá konkrétních hodnot odstupů signál šum SNR pro zajištění určité chybovosti pro danou přenosovou rychlost a typ kódování. Proto jsem se rozhodl udělat návrh tak, aby zaručoval chybovost $BER = 10^{-6}$. Výsledkem jsou podmínky, za kterých by měl mít spoj chybovost $BER = 10^{-6}$. Výpočet je vztažen ke standardně čisté atmosféře, a tak pokud dojde ke zvýšení útlumu atmosféry, může dojít ke zvýšení chybovosti. Zde je do výkonové bilance zavedená veličina linková rezerva, která by měla zajistit určitou míru odolnosti. K ověření velikosti BER by mohl posloužit některý z testerů, který umožňuje měřit diagram oka. Z něj je možné určit potřebné parametry přenosu, včetně BER.

Praktická realizace není v rámci diplomové práce provedena. Nastudování dané problematiky bylo zdlouhavé. Realizaci také oddálilo nemožnost získat součástky v kusovém množství. K realizaci jsem se blížil a tak jsou navrženy desky plošných spojů.

Problematika, které jsem se věnoval poslední semestr je velmi zajímavá, ale částečně mimo můj obor. Díky vypracování diplomové práce jsem se obohatil o velké množství informací, které bohužel nejsem schopen všechny prezentovat. Práce na dané problematice probudila moji zvědavost a budu se jí věnovat a snad i reálně někdy testovat možnosti AOS.

9 LITERATURA

- [1] WILFERT, O. *Modelování atmosférických optických spojů. Současný stav, trendy vývoje a výuka*. Brno:VUTIUUM, 2007. 38 s. ISBN 978-80-214-3395-3.
- [2] MANOR, H; ARNON, S. *Performance of an optical wireless communication systém as a function of wavelength*. Applied Optics [online]. Červenec 2003, sv. 42, č. 21: 4285-94 s.[cit. 10. prosince 2008] .
- [3] HOSNEDL, J. *Optické jevy v atmosféře*. Plzeň, 2001. 104 s. ISBN 80-7082-817-X.
- [4] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. *Základy optiky, svazek 1*. DUŠEK, R. M.; FIALA, J.; VACEK, J. Praha:MATFYZPRESS, 1994. 226 s. ISBN 80-85863-01-4.
- [5] SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. *Základy fotoniky, svazek 3*. DUŠEK, R. M.; PANTOFLÍČEK, J. Praha:MATFYZPRESS, 1995. ISBN 80-85863-05-7.
- [6] DOLEČEK, J. *Moderní učebnice elektroniky 3.díl*. Optoelektronika a optoelektronické prvky. Praha:BEN, 2005. 158 s. ISBN 80-7300-184-5.
- [7] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fyzika*. KOMRSKA, J.; LENCOVÁ, B.; MUSILOVÁ, J. Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno:VUTIUUM, 2000. 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [8] KIM, I. I.; MCARTHUR, B.; KOREVAAR, E. *Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications*, Proc. Of SPIE [online]. Vol. 4214 Optical Wireless Communications III, ed. Eric J. Korevaar, 2001, 26-37 s.
- [9] GARLINGTON, T.; BABBITT, M. J.; LONG, G. *Analysis of Free Space Optics as a Transmission Technology*. USAISEC [online]. Březen 2005.[cit. 10.prosinec 2008]. Dostupný z WWW:<
http://www.hqisec.army.mil/isec/publications/Analysis_of_Free_Space_Optics_as_a_Transmission_Technology_Mar05.pdf>.
- [10] FILKA, M. *Optické sítě-přednášky*. VUT FEKT. Skripta. Brno 2007.
- [11] VAŠINEK, V. *Optoelektronika pro mobilní technologie*[online]. VŠB – TU Ostrava. 30. května 2008.[cit. 10.prosinec 2008]. Sylabus přednášek, díl 9. Dostupný z WWW:<
http://kat454.vsb.cz/download/predmety/opte_080530_sylabus%20prednasek,%20dil%209.pdf>.

- [12] WILFERT, O. *Fotonka a optické komunikace*. Přednášky. Brno:VUTBR, 2007. 128 s. ISBN 978-80-214-3537-7.
- [13] *Transceiver (HDTR-100-D3)* [online].27.březen.2008[cit.10.května.2009], Dostupný z WWW:< <http://www.hioptel.com/ois/usersites/hioptel/meta/1211165138593.pdf> >
- [14] HOLLAND, N. *Interfacing Between LVPECL, VML, CML, and LVDS levels*[online]. Texas Instruments. prosinec 2002.[cit. 10.května 2009]. Application Report, SLLA120. Dostupný z WWW:< <http://focus.ti.com/lit/an/slla120/slla120.pdf> >
- [15] . MUSTAFA, K, STERZIK, CH. *AC-Coupling Between Differential LVPECL, LVDS, HSTL and CML*. [online]. Texas Instruments. duben 2003.[cit. 10.května 2009]. Application Report, SCAA059C. Dostupný z WWW:< <http://focus.ti.com.cn/cn/lit/an/scaa059c/scaa059c.pdf> >
- [16] *Photodiode (S5971)* [online].srpen.2003.[cit.10.května.2009], KPIN1025E04. Dostupný z WWW:< http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/parts_S/S5971_etc.pdf >
- [17] *Application note 1. Light-Some Physical Basic*. Dostupný z WWW:< http://optoelectronics.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app_photoconductivecells.pdf>
- [18] Gray Cancer Institute, *Getting the best out of photodiode detectors*. 2005. Dostupný z WWW:< http://www.graylab.ac.uk/research/groups/atd/documents/Gettingthebestoutofphotodiode detectors_000.pdf >
- [19] WANG, T, ERHMAN, B. *Compensate Transimpedance Amplifiers Intuitively*. [online]. Texas Instruments. květen 2005.[cit. 10.května 2009]. Application Report, SBOA055A. Dostupný z WWW:< <http://focus.ti.com/lit/an/sboa055a/sboa055a.pdf> >
- [20] WWW: <http://sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/index.htm>
- [21] *OPA659*. [online]. Texas Instruments. květen 2008.[cit. 10.května 2009]. SBOA0S342A. Dostupný z WWW:< <http://focus.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?genericPartNumber=opa659&fileType=pdf> >
- [22] *THS4304*, . [online]. Texas Instruments. duben 2004.[cit. 10.května 2009]. SLOS436A. Dostupný z WWW:< <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/ths4304.pdf> >
- [23] *OPA657*, . [online]. Texas Instruments. duben 2004.[cit. 10.května 2009]. SBOS197E. Dostupný z WWW:< <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa657.pdf> >

-
- [24] MANCINI, R. *Op Amps For Everyone*. Design Reference[online]. Texas Instruments.srpen 2002.[cit. 10.května 2009]. SLOD006B. Dostupný z WWW:<
<http://focus.ti.com/lit/an/slod006b/slod006b.pdf>>
- [25] *HP85-B1P0S2*. Dostupný z WWW:< <http://www.optowell.com/homepage2/VCSEL/PH85-B1P0S2.pdf>>
- [26] LEVINGSTON, S. *Understanding Noise Equivalent Power in Radiometric Detectors and Instruments* [online]. Spektrum Detector. 20.březen 2007.[cit. 10.května 2009]. Application Note 1004. Dostupný z WWW:<
<http://www.spectrumdetector.com/pdf/applicationNotes/1004.pdf>>
- [27] BIOLEK, *NOISE-šumová analýza.přednášky*. Dostupný z WWW:<
http://www.vabo.cz/stranky/biolek/vyukaVUT/prednasky/BMPS/pro_studenty8.pdf>

SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

ZKRATKY A SYMBOLY

AL	<i>AirLaser</i>
AOS	<i>Atmosférický optický spoi</i>
APD	<i>Avalanche photodiode</i>
APM	<i>Atmosférické přenosové médium</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
BJN	<i>Bipolar Junction Transistor</i>
CMOS	<i>Complementary Metal–Oxide–Semiconductor</i>
CO _x	<i>Oxidy uhlíku</i>
DFB	<i>Distributed-feedback</i>
ECL	<i>Emitted-coupled logic</i>
EDFA	<i>Erbium-doped fiber amplifier</i>
EML	<i>Electro-absorption modulated laser</i>
FIR	<i>Far-infrared</i>
FOV	<i>Field of view</i>
FP	<i>Fabry-Perot</i>
FSO	<i>Free-space optics</i>
GBP	<i>Gain bandwidth produkt</i>
H	<i>Hlavice</i>
H1	<i>Hlavice č.1</i>
H2	<i>Hlavice č.2</i>
IM/OOK	<i>Intensit Modulation/On-Off Keying</i>
InGaAs	<i>Indium gallium arsen</i>
IO	<i>Integrovaný obvod</i>
IR	<i>Infra Red</i>
JFET	<i>Junction gate field-effect transistor</i>
LD	<i>Laser diode</i>
LED	<i>Light-emitting diode</i>
LVPECL	<i>Low Voltage positive emitter-coupled logic</i>
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MIR	<i>Mid-infrared</i>
MLT-3	<i>Multi-Level Transit</i>

MODTRAN	<i>MODerate resolution atmospheric Transmission</i>
NIR	<i>Near-infrared</i>
Nox	<i>Oxidy dusíku</i>
NRZI	<i>Non-return-to-zero-inverted</i>
OZ	<i>Operační zesilovač</i>
PECL	<i>Positive emitter-coupled logic</i>
POE	<i>Power over ethernet</i>
RX	<i>Receiver</i>
S	<i>Aktivní prvek</i>
SOA	<i>Semiconductor optical amplifier</i>
TIA	<i>Transimpedance amplifier</i>
TTL	<i>Transistor-transistor logic</i>
TX	<i>Transmitter</i>
VCSEL	<i>Vertical-cavity surface-emitting laser</i>
WDM	<i>Wavelength-division multiplexing</i>

VELIČINY

C_D	<i>Vlastní kapacita fotodiody</i>	F
C_{DSUM}	<i>Suma vstupních kapacit připojených na invertující vstup zesilovače</i>	F
C_F	<i>Kapacita zpětnovazebního kapacitoru</i>	F
C_{VI}	<i>Kapacitor kapacitní vazby</i>	F
C_n^2	<i>Strukturní index lomu</i>	$m^{-\frac{2}{3}}$
D	<i>Divergence paprsku</i>	rad
D_{POS}	<i>Průměr přijímací čočky</i>	M
D_{VOS}	<i>Průměr vysílací čočky</i>	M
E	<i>Energie</i>	J
E_N	<i>Vstupní napětí šumu u OZ</i>	$V \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}$
F	<i>Šířka pásma vztažená k frekvenčně omezenému šumu</i>	Hz
GBP	<i>Šířka pásma</i>	Hz
I_{EQ}	<i>Vstupní proud ekvivalentní šumu na výstupu OZ</i>	$A \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}$
I_{LD}	<i>Efektivní hodnota proudu LD v obvodu s budičem laseru</i>	A

I_{LDMAX}	Maximální hodnota proudu LD v obvodu s budičem laseru	A
I_N	Celkový vstupní proud šumu u OZ	$A \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}$
I_{ma}	Proud za tmy	A
$I_1(\lambda)$	Intenzita světla na začátku vrstvy	W
$I_2(\lambda)$	Intenzita světla na konci vrstvy	W
L_0	Pomocná délka pro výpočet útlumu šířením	M
M	Výkonová systémová rezerva	dB
NEP	Noise equivalent power	$W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}$
P_0	Citlivost přijímače	dBm
$P_{m,FD}$	Střední optický výkon na fotodiodě	dBm
$P_{m,LD}$	Střední optický výkon laserové diody	dBm
P_{sat}	Výkon saturace přijímače	dBm
R_D	Odpor reprezentující v modelu vlastní odpor fotodiody	Ω
R_E	Odpor rezistoru připojeného k emitoru tranzistoru	Ω
R_F	Zpětnovazební rezistor	Ω
R_L	Odpor rezistoru reprezentující zátěž fotodiody	Ω
R_R	Ochranný rezistor fotodiody	Ω
R_S	Sériový odpor reprezentující v modelu fotodiody odpor PN přechodu a kontaktů	Ω
R_i	Relativní citlivost fotodiody	$A \cdot W^{-1}$
S_P	Velikost aktivní plochy přijímače	m^2
T	Teplota	K
$T(\lambda)$	Spektrální propustnost atmosféry	1
U_{BMAX}	Maximální napětí na bázi TR	V
U_{CC}	Napájecí napětí	V
U_{CM}	Efektivní hodnota referenčního napětí	V
U_D	Napětí na diodě v modelu fotodiody	V
U_{EMAX}	Maximální napětí na emitoru TR	V
U_I	Vstupní napětí do transiveru	V
U_{ID}	Vstupní diferenční napětí	V
U_{IH}	Maximální hodnota vstupního napětí odpovídající logické úrovni „1“	V

U_{IL}	Maximální hodnota vstupního napětí odpovídající logické úrovni „0“	V
U_{IN}	Vstupní napětí měření na bázi tranzistoru	V
U_O	Výstupní napětí z transiveru	V
U_{OH}	Maximální hodnota výstupního napětí odpovídající logické úrovni „1“	V
U_{OL}	Maximální hodnota výstupního napětí odpovídající logické úrovni „1“	V
U_R	Reverzní napětí	V
U_{ref}	Referenční hodnota napětí u OZ	V
U_{SUM}	Efektivní hodnota napětí šumu	V
$U_e(f)$	Šumové napětí OZ dané šumovým proudem OZ	$V \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
$U_i(f)$	Šumové napětí OZ dané šumovým napětím OZ	$V \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
$U_j(f)$	Šumové napětí vzniklé na zpětnovazebním odporu	$V \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
V_M	Meteorologická viditelnost (dohlednost)	km
V_{20}	Zdroj napětí pro simulaci budiče LD	V
V_{21}	Zdroj napětí pro simulaci budiče LD	V
c	Rychlost světla ve vakuu	$m \cdot s^{-1}$
f	Frekvence	Hz
f_{-3dB}	Šířka pásma definovaná poklesem - 3dB	Hz
q	Parametr pro stanovení α_e	km
h	Planckova konstanta	$J \cdot s$
k	Boltzmanova konstanta	$J \cdot K^{-1}$
d_{PD}	Průměr aktivní plochy fotodiody	m
f_{VOS}	Ohnisková vzdálenost čočky vysílače	m
f_{POS}	Ohnisková vzdálenost čočky přijímače	m
i_F	Blikavý proud šumu	$A \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
i_J	Proudový šum teplotní, Jonsonův proud	$A \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
i_L	Výstupní proud z modelu fotodiody	$A \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
i_N	Celkový proudový šum fotodiody	$A \cdot Hz^{\frac{1}{2}}$
i_p	Proud reprezentující fotovoltaický proud v modelu fotodiody	A

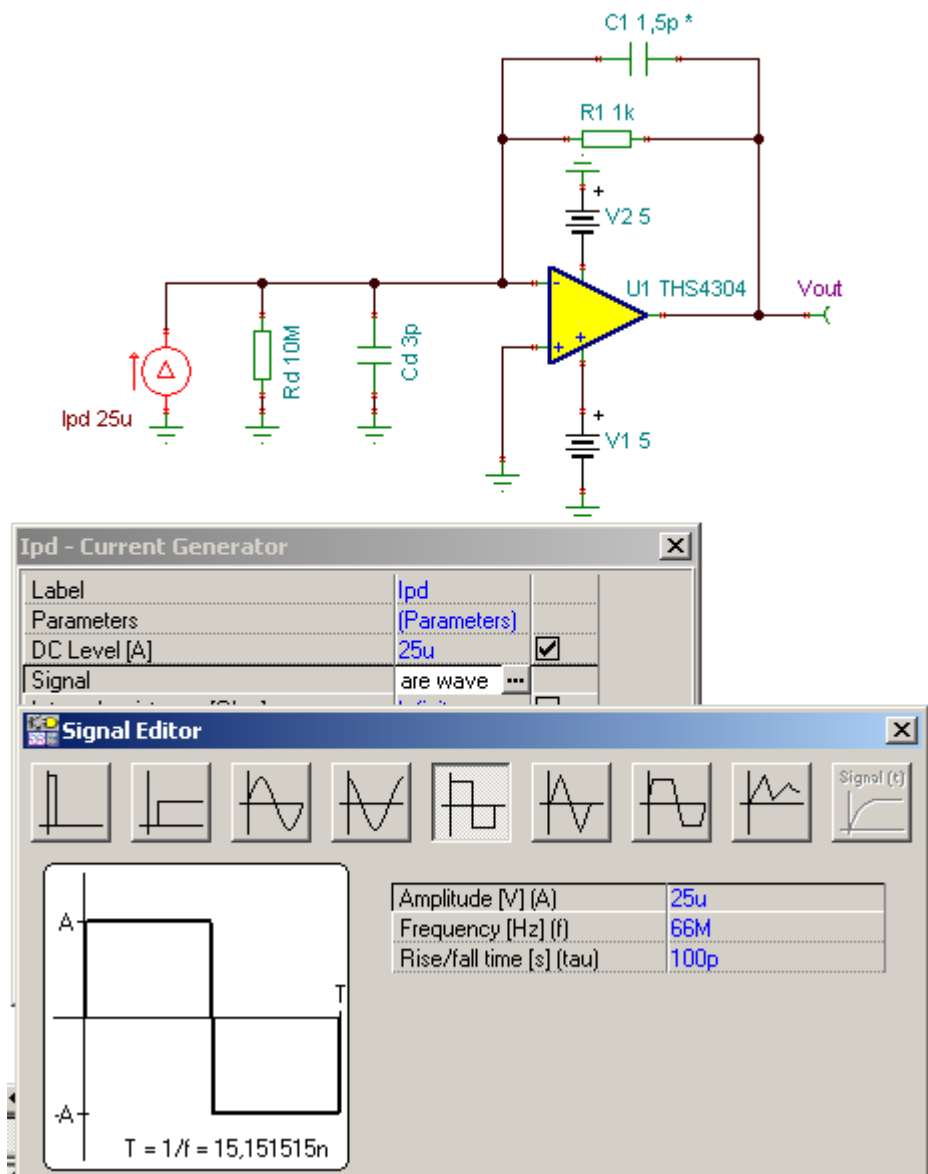
i_S	<i>Proud výstřelového šumu</i>	$A \cdot \text{Hz}^{\frac{1}{2}}$
u_O	<i>Výstupní napětí modelu fotodiody</i>	V
u_{OUT}	<i>Výstupní napětí</i>	V
V	<i>Rychlost šíření světla vzduchem</i>	$m \cdot s^{-1}$
α_{ATM}	<i>Útlumem atmosféry</i>	dB
α_{OF}	<i>Propustnost optického filtru</i>	dB
α_{POS}	<i>Útlum přijímací optické soustavy</i>	dB
α_{PV}	<i>Útlum průzoru vysílače</i>	dB
α_T	<i>Celkový útlum</i>	dB
α_{VOS}	<i>Útlum na vysílací optické soustavě</i>	dB
α_{abs}	<i>Koeficient vyjadřující absorpci na molekulách</i>	dB
α_e	<i>Koeficient extinkce</i>	km^{-1}
$\alpha_{l,ATM}$	<i>Atmosférický útlum</i>	dB km^{-1}
$\tilde{\alpha}_{l,ATM}$	<i>Atmosférický útlum pro standardní atmosféru</i>	dB km^{-1}
α_{mr}	<i>Rozptylu na částicích (Mieův rozptyl)</i>	dB
α_{ra}	<i>Útlumu a rozptylu na aerosolech</i>	dB
α_{rr}	<i>Rozptyl na molekulách (Rayleighův rozptyl)</i>	dB
$\alpha_{v,FD}$	<i>Útlum vazby mezi přijímací čočkou a fotodiodou</i>	dB
$\alpha_{v,LD}$	<i>Útlum vazby mezi laserovou diodou a vysílací čočkou</i>	dB
α_z	<i>Útlum vyvolaný nedokonalostí vzájemného zamíření hlavic spoje</i>	dB
α_{12}	<i>Geometrický útlum</i>	dB
$\alpha_{\Sigma,RX}$	<i>Součet jednotlivých útlumů na přijímači</i>	dB
$\alpha_{\Sigma,TX}$	<i>Součet jednotlivých útlumů na vysílači</i>	dB
γ_{POS}	<i>Zisk přijímací optické soustavy</i>	dB
γ_T	<i>Celkový zisk</i>	dB
ϵ_r	<i>Relativní permitivita prostředí</i>	1
λ	<i>Vlnová délka</i>	M
λ_{MAX}	<i>Vlnová délka pro maximální citlivost</i>	M
λ_{Δ}	<i>Rozsah vlnových délek</i>	M

μ_r	Relativní permeabilita prostředí	1
v_I	Přenosová rychlost	$\text{Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$
φ_{LD}	Úhlová šířka vyzařovací charakteristiky laserové diody	°
φ_t	Úhlová šířka vyzařovaného svazku	rad

PŘÍLOHY

Příloha A Schéma zapojení TIA v programu TINA

Schéma zapojení TIA v TINA. Z tohoto zapojení jsou odvozeny průběhy výstupního napětí a přenosových charakteristik na obrázku 7-14 a 7-15 v kapitole 7.3.5.



Obr A-1 Nastavení zdroje signálu pro simulace v programu TINA

Příloha B NEP

Výkon ekvivalentní šumu je základní parametr detektorů. NEP je výkonová úroveň šumu vztažená na šířku pásma 1 Hz. Jednotkou je $W/Hz^{1/2}$. Pro určení NEP musí být známy dva parametry, citlivost přijímače na určité frekvenci a efektivní hodnota šumu na stejné frekvenci. Je dán rovnicí B.1. Tato problematika je čerpána z [16, 24,26, 27].

$$NEP = \frac{U_{\text{sum}} / \sqrt{Hz}}{R_V} \quad (W/Hz^{1/2}; V/Hz^{1/2}, -) \text{ na frekvenci } f_0, \quad (B.1)$$

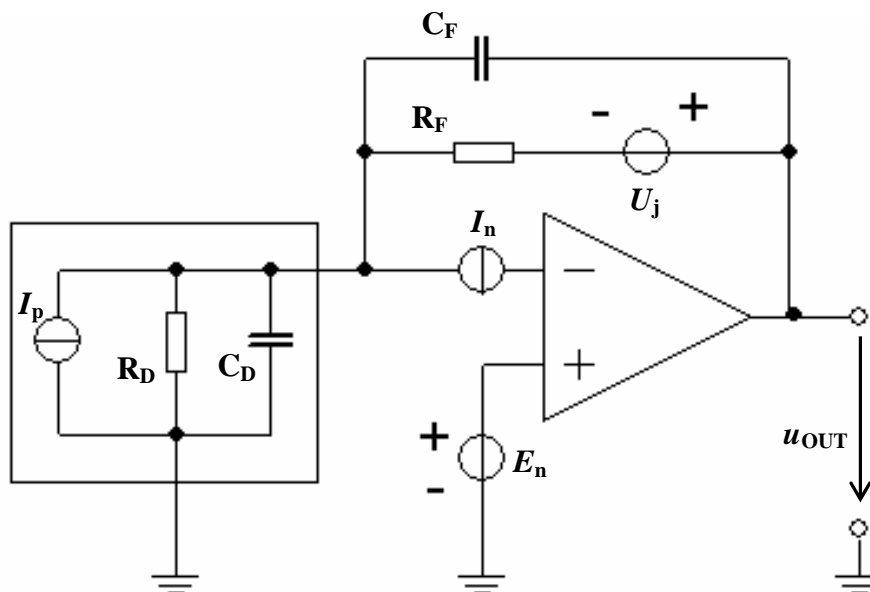
kde U_{SUM} je efektivní hodnota napětí šumu na výstupu OZ a R_V je citlivost přijímače.

Pokud je obvod zapojen dle obrázku B-1, je citlivost přijímače dána rovnicí:

$$R_V(f) = \frac{R_i \cdot R_F}{\sqrt{1 + (f \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_F)^2}}, \quad (B.2)$$

pokud platí $f < f_{RC} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_F}$.

R_i je citlivost fotodiody, R_F je hodnota zpětnovazebního rezistoru, C_F je hodnota zpětnovazebního kapacitou, f je frekvence, pro kterou je šum měřen.



Obr B-1 Model přijímače se zdroji šumu

Celkový šum na výstupu OZ je dán rovnicí B.3.

$$U_{\text{sum}}(f) = \sqrt{(U_e(f))^2 + (U_j(f))^2 + (U(f))^2} \cdot \left(1 + \frac{R_F}{R_D}\right) \quad (\text{V/Hz}^{1/2}), \quad (\text{B.3})$$

kde šum dílčích zdrojů je spočítán:

$$U_e(f) = \frac{E_n}{\sqrt{1 + (f \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_F)^2}} \quad (\text{V/Hz}^{1/2}), \quad (\text{B.4})$$

$$U_j(f) = \frac{\sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_F}}{\sqrt{1 + (f \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_F)^2}} \quad (\text{V/Hz}^{1/2}), \quad (\text{B.5})$$

$$U_i(f) = \frac{R_F \cdot \sqrt{2 \cdot e \cdot I_n}}{\sqrt{1 + (f \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_F \cdot C_F)^2}} \quad (\text{V/Hz}^{1/2}). \quad (\text{B.6})$$

R_D je odpor fotodiody, R_F je zpětnovazební odpor, $U_e(f)$ je šumové napětí OZ dané šumovým napětím OZ, $U_j(f)$ je šumové napětí vzniklé na zpětnovazebním odporu, $U_i(f)$ je šumové napětí OZ dané šumovým proudem OZ, C_F je hodnota zpětnovazebního kapacitoru.

Pokud chceme stanovit odstup signál šum SNR (signal noise ratio), je třeba zjistit rozložení šumu obvodu ve spektru, k tomu slouží šumová analýza. Poměr SNR je nezávislý na zátěži obvodu. Výpočet se provádí s tzv. normovanými výkony do odporu 1Ω . Normovaný výkon se počítá z napětí nebo proudu, číselně jsou hodnoty stejné. Jednotka je (A^2) nebo (V^2).

Na nízkých kmitočtech až do 1 kHz se u polovodičových součástek uplatňuje blikavý šum, jehož výkon s rostoucí frekvencí klesá. V navazujícím kmitočtovém pásmu se uplatňuje výkon zhruba konstantní úrovně šumu tepelného a výstřelového.

Za předpokladu, že rozložení šumu bude mít konstantní úroveň v určitém frekvenčním pásmu, můžeme výkon šumu určit součinem efektivní hodnoty napětí (proudu) s hodnotou šířky pásma. Efektivní hodnotu napětí šumu je možno spočítat z předchozích rovnic, nebo je přímo udávána výrobcem. Proud šumu I_n a napětí šumu E_n jsou vztaženy k odmocnině z šířky pásma a jsou to katalogové údaje OZ. Efektivní hodnota šumu se určí součinem I_n s odmocninou šířky pásma.

Pokud má OZ konstantní spektrální hustotu vstupního šumového napětí $2,4 \text{ nV/Hz}^{1/2}$ a kmitočtovém pásmu 10 Hz až 10 kHz, bude mít efektivní hodnotu $\sim 2,4 \mu\text{V}$ a mezivrcholovou hodnotu $\sim 12 \mu\text{V}$ (efektivní krát 5).

Z předcházejících rovnic je spočítán NEP pro jednotlivé hodnoty zpětnovazebních rezistorů R_F . Hodnoty jsou vypočítány pro zapojení obvodu s OZ THS4304.

GBP (Hz)	8,70E+08	8,70E+08	8,70E+08	8,70E+08	8,70E+08
U_e (V/Hz ^{1/2})	2,27E-09	2,17E-09	2,02E-09	1,89E-09	1,63E-09
U_i (V/Hz ^{1/2})	2,71E-09	3,68E-09	4,82E-09	5,54E-09	6,73E-09
U_i (V/Hz ^{1/2})	3,88063E-13	7,43E-13	1,38E-12	1,94E-12	3,33E-12
R_F (Ω)	500	1000	2000	3000	6000
C_F (F)	1,68E-12	1,14E-12	7,88E-13	6,36E-13	4,43E-13
F (Hz)	6,50E+07	6,50E+07	6,50E+07	6,50E+07	6,50E+07
R_v (-)	283,840198	543,6693	1009,065	1419,715	2438,44
U_{sum} (V)	3,53819E-09	4,27E-09	5,23E-09	5,86E-09	6,92E-09
R_i (A/W)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
I_n (A)	2,10E-12	2,10E-12	2,10E-12	2,10E-12	2,10E-12
E_n (V)	2,40E-09	2,40E-09	2,40E-09	2,40E-09	2,40E-09
NEP (W/Hz ^{1/2})	1,24654E-11	7,85E-12	5,18E-12	4,12E-12	2,84E-12
NEP (dbm)*	-39,97836444	-41,9842	-43,791	-44,7821	-46,4038

* hodnoty NEP (W/Hz^{1/2}) jsou vynásobeny odmocninou z šířky pásma F a následně převedeny na dBm

Tab B-1 Hodnoty pro výpočet NEP

Odstup signál-šum SNR na výstupu OZ je dán rovnicí B.7.

$$SNR = 20 \log \left(\frac{U_{OUT}}{U_{sum}} \right) \quad (\text{dBm; V, V}), \quad (B.7)$$

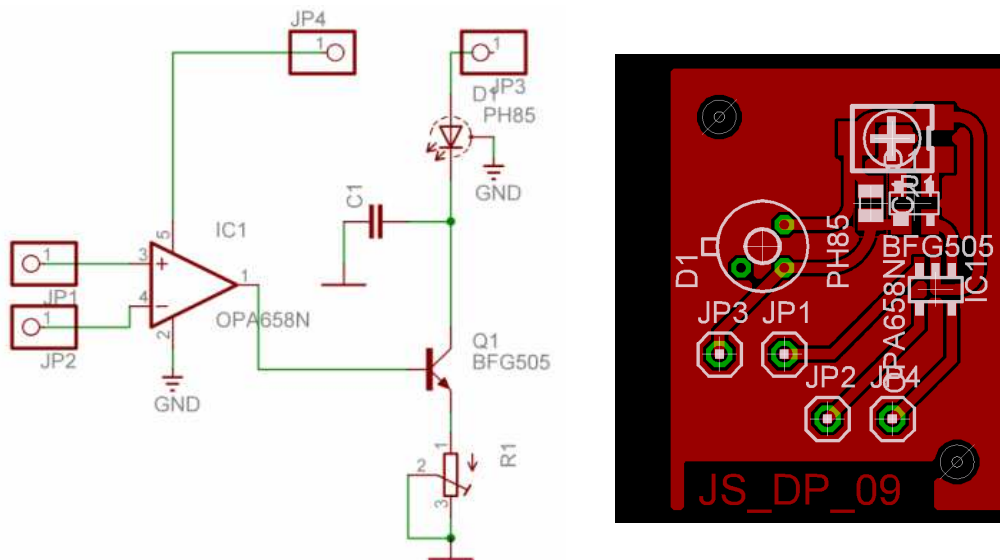
kde U_{OUT} je efektivní hodnota výstupního napětí OZ, U_{sum} je efektivní hodnota šumu na výstupu OZ.

Výstupní napětí by bylo vhodné změřit. Zde je k výpočtu SNR použita hodnota odečtená z průběhů výstupních napětí při jednotlivých simulacích. Pro hodnotu $R_F = 1 \text{ k}\Omega$, jsou hodnoty zvýrazněny v tabulce B-1. Odečtená efektivní hodnota $U_{OUT} = 8,838 \text{ mV}$. Normovaná hodnota výstupního šumu napětí $U_{sum} = 4,27 \text{ nV/Hz}^{1/2}$. Efektivní hodnota napětí šumu je dána součinem normované hodnoty a šířky pásma, pro tento případ $4,27 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{65 \cdot 10^6} = 3,44 \cdot 10^{-5}$.

Po dosazení do rovnice B.7 je $SNR = 48,2 \text{ dB}$.

Příloha C Vysílač

K navržení schématu zapojení a deska plošných spojů pro laser driver je využit program Eagle. Schéma a deska plošných spojů je na obrázku C-1. Doplněno vygenerovaným seznamem součástek.

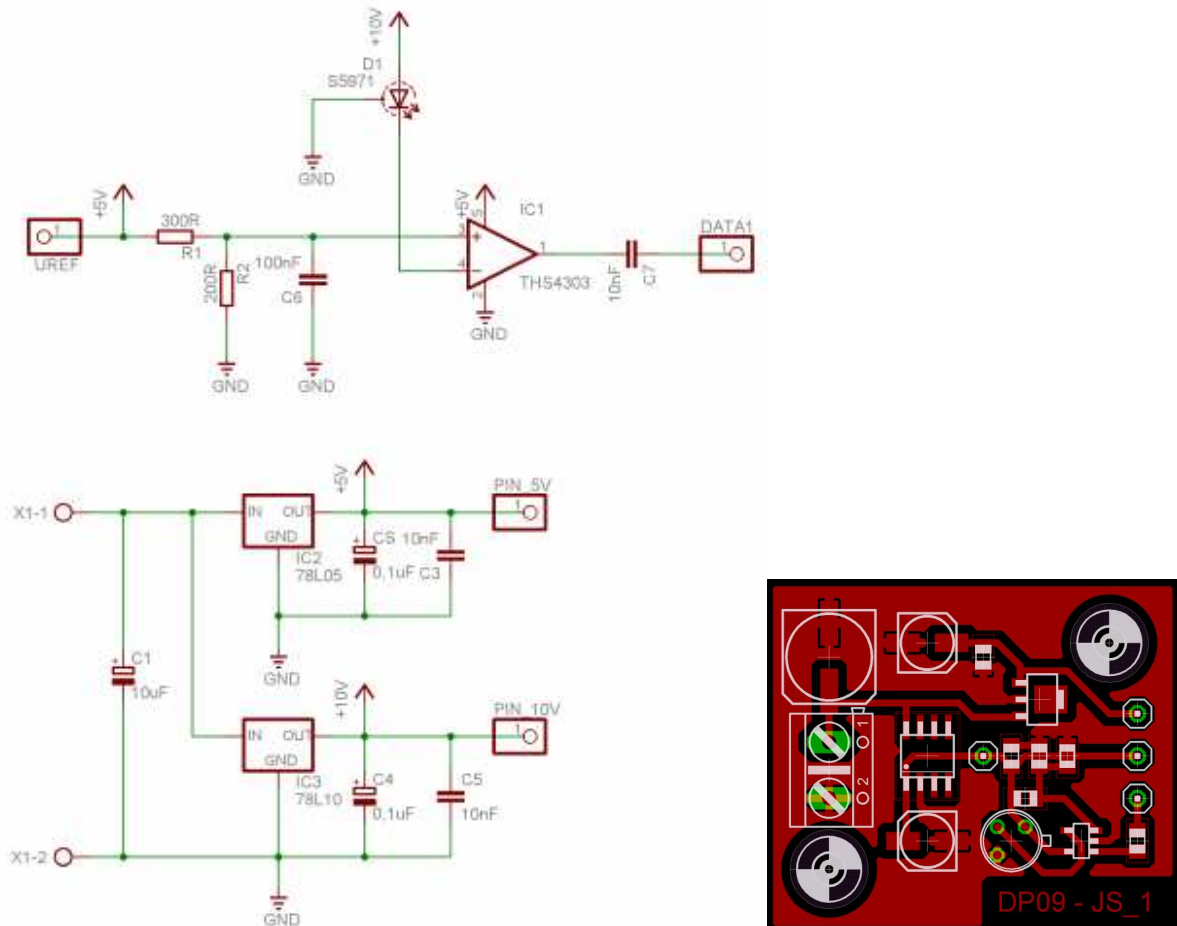


Obr C-1 Schéma zapojení budiče laseru pro praktickou realizaci

Part	Value	Device	Package
C1		C-EUC0805	C0805
D1	PH85	HFE4003	TO46-P3
IC1	OPA658N	OPA658N	SOT23-5
JP1		PINHD-1x1_2.54	1x01
JP2		PINHD-1x1_2.54	1x01
JP3		PINHD-1x1_2.54	1x01
JP4		PINHD-1x1_2.54	1x01
Q1	BFG505	BFG505	SOT143B
R1		R-TRIMM3374	RTRIM3374

Příloha D TIA

Na obrázku D-1 je zobrazeno schéma zapojení pro realizaci předzesilovače (PIN a TIA) společně s deskou plošných spojů.



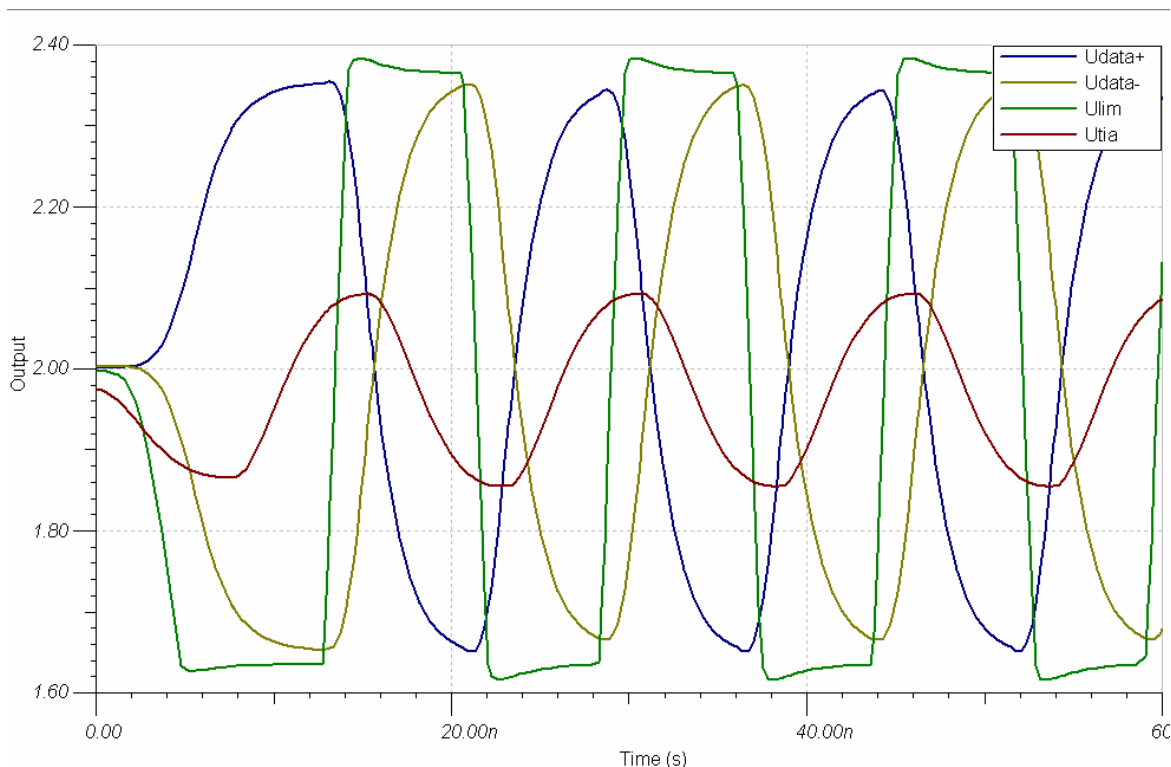
Obr D-1 Schéma zapojení TIA pro praktickou realizaci

Part	Value	Device	Package
C1	10uF	CPOL-EU153CLV-0807	153CLV-0807
C3	10nF	C-EUC0805	C0805
C4	0,1uF	CPOL-EU153CLV-0505	153CLV-0505
C5	10nF	C-EUC0805	C0805
C6	100nF	C-EUC0805	C0805
C7	10nF	C-EUC0805	C0805
C5	0,1uF	CPOL-EU153CLV-0505	153CLV-0505
D1	S5971	HFE4070	TO-18
DATA1		PINHD-1X1_2.54	1X01
IC1	THS4303	OPA643N	SOT23-5
IC2	78L05	78LXX-S08	S08
IC3	78L10	78LXX-SOT89	SOT89
PIN_5V		PINHD-1X1_2.54	1X01
PIN_10V		PINHD-1X1_2.54	1X01
R1	300R	R-EU_R0805	R0805
R2	200R	R-EU_R0805	R0805
UREF		PINHD-1X1_2.54	1X01
X1		AK500/2	AK500/2

Příloha E TIA – LVPECL

Obvodová realizace přizpůsobení napěťových úrovní TIA na LVPECL.

Nejprve v programu PSPICE a následně v programu TINA je provedena simulace praktické realizace přizpůsobení. Při vstupním proudu $I_{IN,p} = 30\mu A$ špička-špička jde z výstupu TIA napětí $U_{OUT,p,p} = 0,025 V$. Tuto hodnotu je třeba upravit, aby vyhovovala standardu LVPECL. Na obrázku E-3 je model v programu TINA, který realizuje tuto funkci. Mezi bloky TIA a Limitní zesilovač byl původně ještě blok Zesílení. Byl ale odstraněn a parametry TIA byly změněny takto : $R_F = 4 k\Omega$, $C_F = 0,54 pF$. Tyto hodnoty korespondují s hodnotami v tabulce 7-5. Model se skládá z bloku TIA, který byl simulován v kapitole 7.2.6. Další blok realizuje zesílení a následné limitní omezení výstupního napětí podle referenčních úrovní 1,6 V a 2,4 V. Poslední blok, Diferenční zesilovač, převádí vstupní napětí na výstupní napětí s určitým nastaveným zesílením a vytváří zároveň invertovaný výstupní signál. Mezi jednotlivými bloky je kapacitní vazba, která odstraňuje ze signálu stejnosměrnou složku.

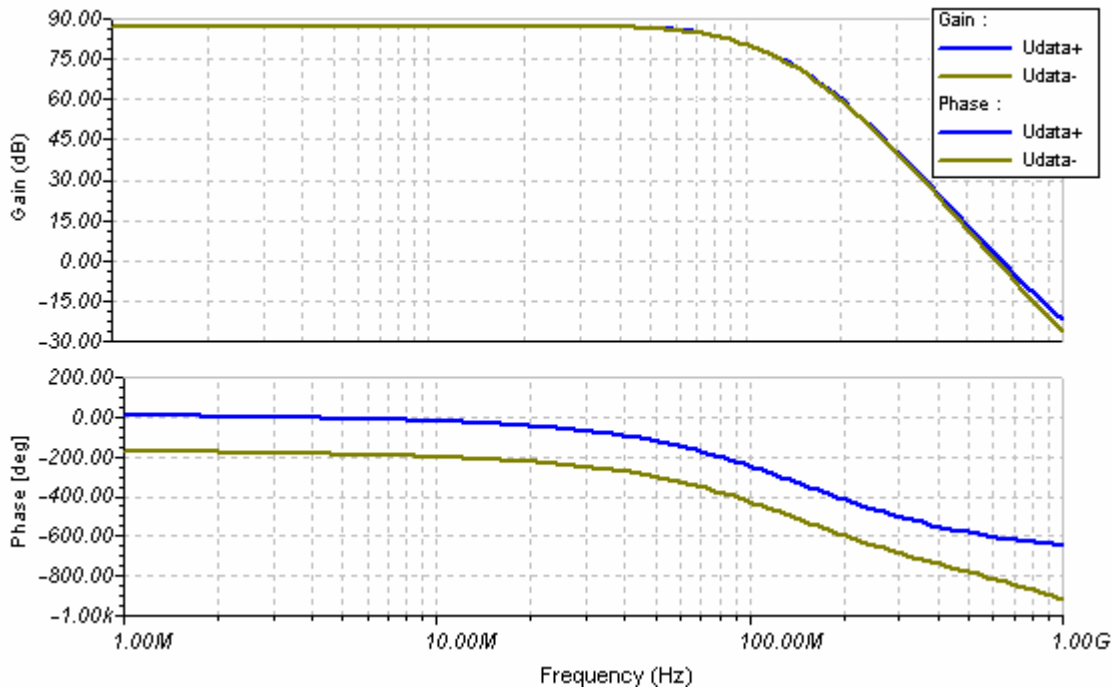


Obr E-1 Průběh napětí v obvodu realizující konverzi na LVPECL

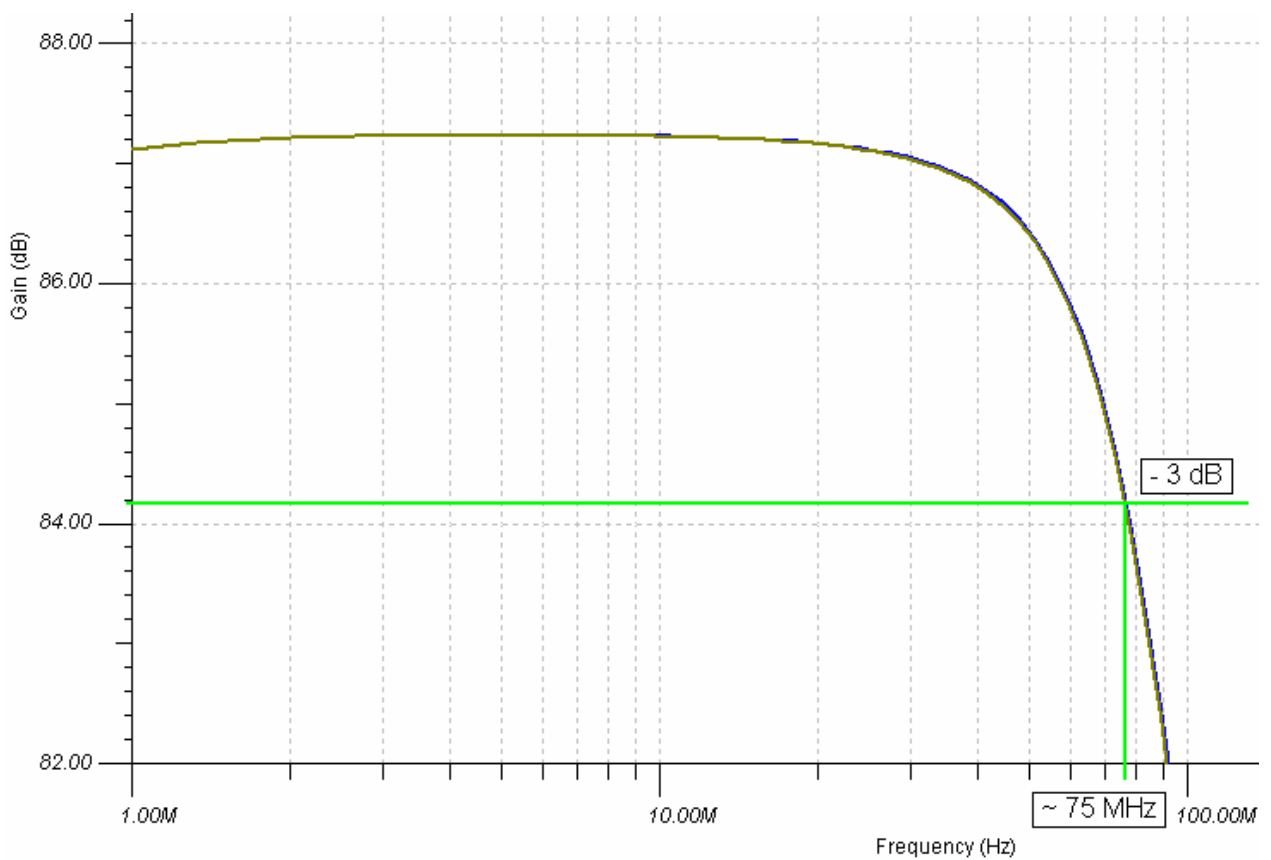
Na obrázku E-2 je zobrazena přenosová charakteristika pro celý obvod. Zisk se rovná 87 dB.

Fáze obou výstupů jsou proti sobě posunuty o 180° , což realizuje inverzní signál. Na obrázku E-3 je zobrazen odečet šířky pásma odpovídající poklesu o 3 dB. Hodnota se neliší s hodnotou vypočítanou v tabulce 7-5 a šířka pásma je $\sim 75 MHz$ pro TIA. Šířka pásma spojených OZ je

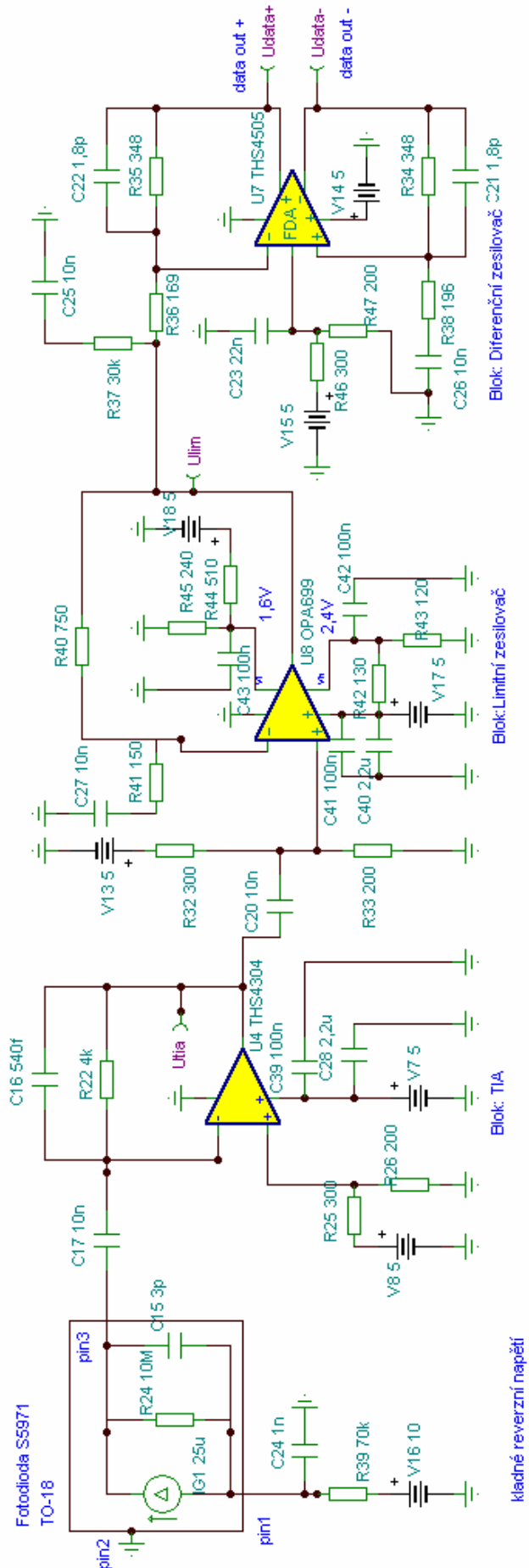
dána nemenší šířkou pásma určitého z nich. U TIA je kladen větší důraz na nízkou úroveň šumu, než na šířku pásma.



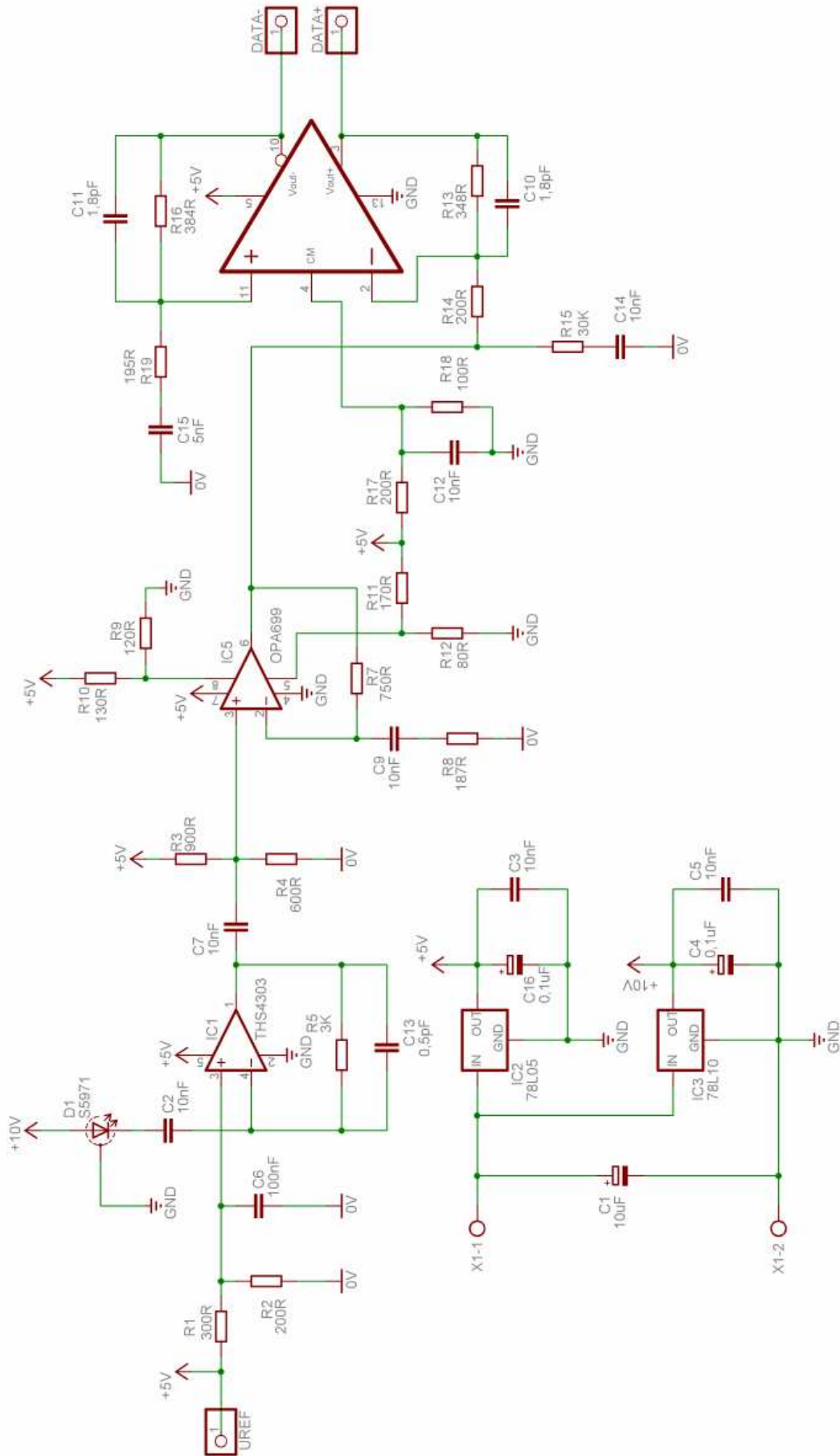
Obr E-2 Průběh napětí v obvodu realizující konverzi na LVPECL



Obr E-3 Šířka pásma přijímače

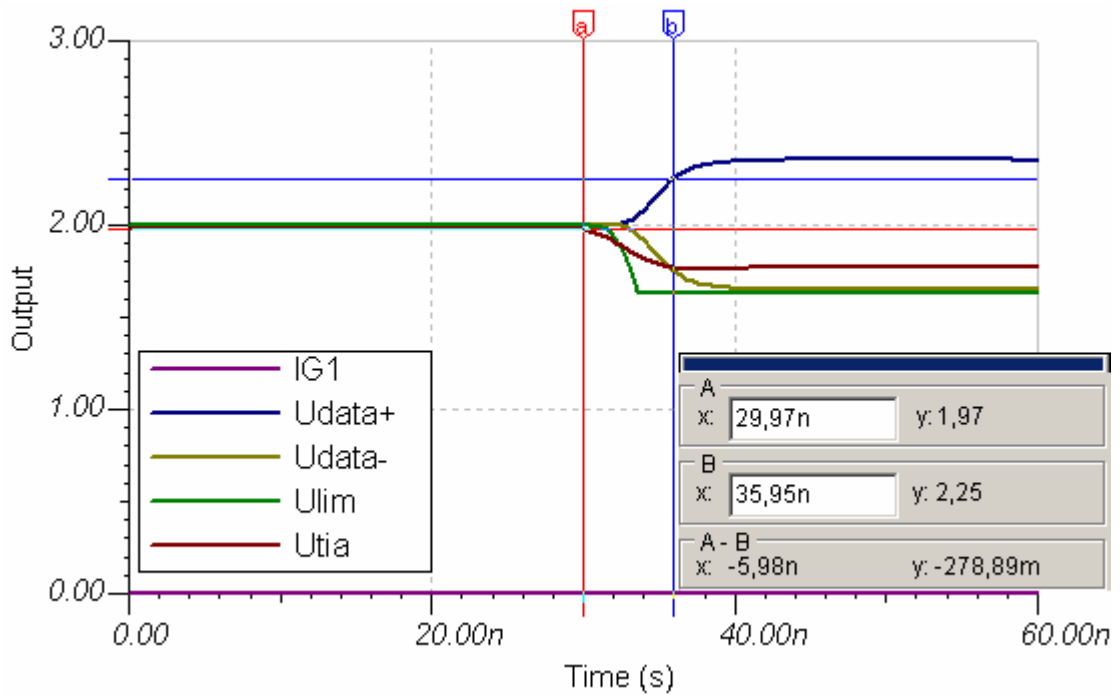


Obr E-4 Model realizující konverzi na LVPECL v TINA



Obr E-5 Schéma zapojení obvodu konverze na LVPECL

Na obrázku E-6 je zobrazena časová odezva výstupního napětí na jednotkový skok proudu z $0,25 \mu\text{A}$ na $0,55 \mu\text{A}$. Z obrázku se dá určit zpoždění, které vnáší jednotlivé bloky do zpracování signálu. Celkové zpoždění je určeno na 6 ns .



Obr E-5 Časová odezva na jednotkový skok