

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2017

Jan Chlápek



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## VYSOKORYCHLOSTNÍ (100G) PŘÍSTUPOVÉ SÍŤ.

HIGH SPEED (100G) ACCESS NETWORKS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jan Chlápek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Tomáš Horváth**

**BRNO 2017**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**  
Ústav telekomunikací

**Student:** Jan Chlápek

**ID:** 173659

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Vysokorychlostní (100G) přístupové sítě.

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

V rámci bakalářské práce se student seznámí s dostupnými standardy pro přístupové sítě o rychlostech 100G (od 10G výše). Teoretická část bude věnována aktuálně připravovanému standardu IEEE 802ca a již dostupným standardům pasivních optických přístupových sítí. V praktické části budou provedeny simulace těchto sítí a jejich vzájemné porovnání. Důraz bude kladen na obousměrné simulace, a to zejména sítí 100G. Student bude diskutovat výsledky a vhodnost daných řešení.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] TROWBRIDGE, Steve. Ethernet and OTN: 400G and beyond. In: Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C: OSA, 2015, Th3H.1-. DOI: 10.1364/OFC.2015.Th3H.1. ISBN 978-1-55752-937-4. Dostupné také z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=OFC-2015-Th3H.1>

[2] KNITTLE, Curtis. IEEE 100G-EPON. In: Optical Fiber Communication Conference. Washington, D.C: OSA, 2016, Th11.6-. DOI: 10.1364/OFC.2016.Th11.6. ISBN 978-1-943580-07-1. Dostupné také z: <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=OFC-2016-Th11.6>

**Termín zadání:** 1.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Horváth

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

V práci byl popsán vývoj, parametry a potřeby pro vysokorychlostní přístupové sítě. Úvodní část teoretického rozboru tématu je věnována popisu obecných poznatků o optických přístupových sítích. Dále je pozornost směřována na porovnání standardů pasivních optických sítí organizací ITU-T a IEEE. Hlavní část statí je zaměřena na vývoj pasivních optických sítí nové generace, kde jsou podle nejaktuálnějších informací rozebrány standardy NG-PON2 a 100G EPON, nacházející se aktuálně ve fázi vývoje. Praktická část byla soustředěna na aplikaci získaných informací o pasivních optických sítích, a to vytvořením simulací sítí XG-PON, NG-PON2 a 100G EPON. Cílem simulací bylo porovnat vhodnost jednotlivých řešení na základě analýzy výsledků obousměrného přenosu z hlediska kvality signálu a bitové chybovosti.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokorychlostní přístupové sítě, PON, Přístupové sítě nové generace, NG-PON2, 100G EPON

## ABSTRACT

This paper was focused on describing the development, parameters and needs for High Speed Access Networks. The introductory part of the theoretical analysis is devoted to a basic description of optical access networks. Next the attention is aimed at comparing Passive Optical Network standards of organizations ITU-T and IEEE. The main part of the thesis focuses on the development of passive optical networks of the new generation where, according to the most up-to-date information, standards NG-PON2 and 100G EPON, currently in development, were analyzed. The practical task was focused on application of gained information about Passive Optical Networks by creating simulations of XG-PON, NG-PON2 and 100G EPON. The goal of these simulations was to assess all solutions based on an analysis of bidirectional transmission in terms of signal quality and bit error rate.

## KEYWORDS

High Speed Access Networks, PON, Next Gen Access Networks, NG-PON2, 100G EPON

CHLÁPEK, Jan *Vysokorychlostní (100G) přístupové sítě*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 83 s. Vedoucí práce byl Ing. Tomáš Horváth

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Vysokorychlostní (100G) přístupové sítě“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Tomáši Horváthovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále má mé díky pan Curtis Knittle, předseda *100G-EPON Task Force*, za doplňující odpovědi na mé otázky ohledně standardu 100G EPON.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	14
<b>1 Optická přístupová síť</b>	<b>15</b>
1.1 Aktivní optická síť	15
1.2 Pasivní optická síť	15
1.2.1 Fiber to The x	16
1.2.2 Fyzické parametry PON	17
<b>2 Vývoj PON</b>	<b>18</b>
2.1 ITU-T a FSAN	18
2.2 IEEE	18
2.3 Základní PON standardy	19
2.3.1 APON (ITU-T G.983.1)/BPON (ITU-T G.983.3)	19
2.3.2 GPON (ITU-T G.984)	19
2.3.3 EPON (IEEE 802.3ah)	20
2.4 Navazující PON standardy	21
2.4.1 XG-PON (ITU-T G.987)	21
2.4.2 XGS-PON (ITU-T G.9807.1)	22
2.4.3 10G-EPON (IEEE 802.3av)	23
<b>3 NG-PON2 (ITU-T G.989)</b>	<b>24</b>
3.1 Architektura	24
3.1.1 Přenosové parametry	24
3.1.2 Vlnové délky	25
3.1.3 PTP Overlay	26
3.1.4 Laditelné optické moduly	26
<b>4 100G EPON (IEEE 802.3ca)</b>	<b>28</b>
4.1 Cíle standardu	29
4.2 Architektura	29
4.2.1 Vlnové délky	30
4.2.2 Přenosové parametry	34
<b>5 Simulace pasivních optických sítí</b>	<b>36</b>
5.1 Simulační celky	36
5.1.1 Vysílač	36
5.1.2 Optická distribuční síť	37
5.1.3 Přijímač	38

5.2	Simulace sítě XG-PON . . . . .	39
5.2.1	OLT . . . . .	40
5.2.2	ODN . . . . .	40
5.2.3	ONU . . . . .	41
5.3	Simulace sítě NG-PON2 . . . . .	42
5.3.1	OLT . . . . .	43
5.3.2	ODN . . . . .	44
5.3.3	ONU . . . . .	45
5.4	Simulace sítě 100G EPON . . . . .	46
5.4.1	OLT . . . . .	47
5.4.2	ODN . . . . .	49
5.4.3	ONU . . . . .	49
5.5	Výsledky simulací . . . . .	50
5.5.1	Výsledky simulace XG-PON . . . . .	51
5.5.2	Výsledky simulace NG-PON2 . . . . .	53
5.5.3	Výsledky simulace 100G EPON . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>58</b>
	<b>Literatura</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>64</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>66</b>
<b>A</b>	<b>Výsledky Diagramy oka</b>	<b>67</b>
A.1	Diagramy oka simulace XG-PON . . . . .	67
A.1.1	Dělicí poměr 1:4 . . . . .	67
A.1.2	Dělicí poměr 1:16 . . . . .	68
A.1.3	Dělicí poměr 1:64 . . . . .	69
A.2	Diagramy oka simulace NG-PON2 . . . . .	70
A.2.1	Dělicí poměr 1:4 . . . . .	70
A.2.2	Dělicí poměr 1:16 . . . . .	71
A.2.3	Dělicí poměr 1:64 . . . . .	72
A.3	Diagramy oka simulace 100G EPON . . . . .	73
A.3.1	Dělicí poměr 1:4 . . . . .	73
A.3.2	Dělicí poměr 1:16 . . . . .	74
A.3.3	Dělicí poměr 1:64 . . . . .	75

<b>B</b>	<b>Výsledky BER</b>	<b>76</b>
B.1	Výsledná BER simulace XG-PON . . . . .	76
B.1.1	Sestupný směr . . . . .	76
B.1.2	Vzestupný směr . . . . .	76
B.2	Výsledná BER simulace NG-PON2 . . . . .	77
B.2.1	Sestupný směr . . . . .	77
B.2.2	Vzestupný směr . . . . .	78
B.3	Výsledná BER simulace 100G EPON . . . . .	80
B.3.1	Sestupný směr . . . . .	80
B.3.2	Vzestupný směr . . . . .	81
<b>C</b>	<b>Obsah příloženého CD</b>	<b>83</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Grafické znázornění PON . . . . .	16
1.2	Grafické znázornění FTTx . . . . .	17
2.1	GEM rámec . . . . .	19
2.2	Struktura rámce pro EPON síť . . . . .	20
3.1	Znázornění TWDM-PON síť . . . . .	25
4.1	Vývoj maximálních přenosových rychlostí [22] . . . . .	28
4.2	Blokové schéma architektury vlnových párů [23] . . . . .	30
4.3	Sdružování kanálů u 100G EPON . . . . .	34
5.1	Návrh optického vysílače . . . . .	36
5.2	Návrh ODN . . . . .	37
5.3	Návrh optického přijímače pro sestupný směr . . . . .	38
5.4	Návrh optického přijímače pro vzestupný směr . . . . .	39
5.5	Návrh simulace XG-PON . . . . .	40
5.6	Návrh simulace NGPON2 . . . . .	43
5.7	Vysílač s vlnovým multiplexem sítě NGPON2 . . . . .	44
5.8	Návrh simulace 100G EPON . . . . .	47
5.9	Vysílač s vlnovým multiplexem sítě 100G EPON . . . . .	48
5.10	Diagram oka kvalitního signálu . . . . .	50
5.11	Diagram oka nečitelného signálu . . . . .	51
5.12	Závislost BER na vzdálenosti v sestupném směru sítě XG-PON . . . . .	52
5.13	Závislost BER na vzdálenosti v vzestupném směru sítě XG-PON . . . . .	53
5.14	Závislost BER na vzdálenosti v sestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	54
5.15	Závislost BER na vzdálenosti v vzestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	55
5.16	Závislost BER na vzdálenosti v sestupném směru sítě 100G EPON . . . . .	56
5.17	Závislost BER na vzdálenosti v vzestupném směru sítě 100G EPON . . . . .	57
A.1	Diagram oka pro rozbočení 1:4 v sestupném směru sítě XG-PON . . . . .	67
A.2	Diagram oka pro rozbočení 1:4 v vzestupném směru sítě XG-PON . . . . .	67
A.3	Diagram oka pro rozbočení 1:16 v sestupném směru sítě XG-PON . . . . .	68
A.4	Diagram oka pro rozbočení 1:16 v vzestupném směru sítě XG-PON . . . . .	68
A.5	Diagram oka pro rozbočení 1:64 v sestupném směru sítě XG-PON . . . . .	69
A.6	Diagram oka pro rozbočení 1:64 v vzestupném směru sítě XG-PON . . . . .	69
A.7	Diagram oka pro rozbočení 1:4 v sestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	70
A.8	Diagram oka pro rozbočení 1:4 v vzestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	70
A.9	Diagram oka pro rozbočení 1:16 v sestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	71
A.10	Diagram oka pro rozbočení 1:16 v vzestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	71
A.11	Diagram oka pro rozbočení 1:64 v sestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	72
A.12	Diagram oka pro rozbočení 1:64 v vzestupném směru sítě NG-PON2 . . . . .	72

A.13 Diagram oka pro rozbočení 1:4 v sestupném směru sítě 100G EPON .	73
A.14 Diagram oka pro rozbočení 1:4 v vzestupném směru sítě 100G EPON	73
A.15 Diagram oka pro rozbočení 1:16 v sestupném směru sítě 100G EPON	74
A.16 Diagram oka pro rozbočení 1:16 v vzestupném směru sítě 100G EPON	74
A.17 Diagram oka pro rozbočení 1:64 v sestupném směru sítě 100G EPON	75
A.18 Diagram oka pro rozbočení 1:64 v vzestupném směru sítě 100G EPON	75

# SEZNAM TABULEK

2.1	Srovnání parametrů GPON a EPON. . . . .	21
2.2	Srovnání parametrů XG(S)-PON a 10G-EPON . . . . .	23
3.1	Počáteční vysílací výkony a útlumy ODN útlumových tříd . . . . .	25
3.2	Vlnové délky pro NG-PON2 . . . . .	26
3.3	Srovnání parametrů XG(S)-PON a NG-PON2 . . . . .	27
4.1	Pilotní vlnové délky pro plán A . . . . .	31
4.2	Návrh útlumových tříd plánu A . . . . .	31
4.3	Pilotní vlnové délky pro plán B . . . . .	32
4.4	Pilotní vlnové délky pro plán D . . . . .	32
4.5	Návrh změn vlnových délek 1 . . . . .	33
4.6	Návrh změn vlnových délek 2 . . . . .	33
4.7	Návrh změn vlnových délek 3 . . . . .	34
4.8	Srovnání parametrů 10G-EPON a 100G EPON . . . . .	35
5.1	Hodnoty pro simulaci dělicích poměrů . . . . .	37
5.2	Tabulka simulovaných vzdáleností . . . . .	38
5.3	Parametry útlumové třídy N1 . . . . .	39
5.4	Parametry OLT v simulaci XG-PON . . . . .	40
5.5	Parametry ODN v simulaci XG-PON . . . . .	40
5.6	Parametry ONU v simulaci XG-PON . . . . .	41
5.7	Parametry útlumové třídy N1 . . . . .	42
5.8	Parametry OLT v simulaci NGPON2 . . . . .	44
5.9	Parametry ODN v simulaci NGPON2 . . . . .	45
5.10	Parametry ONU v simulaci NGPON2 . . . . .	45
5.11	Parametry útlumové třídy PR30 . . . . .	46
5.12	Parametry OLT v simulaci 100G Epon . . . . .	48
5.13	Parametry ODN v simulaci 100G Epon . . . . .	49
5.14	Parametry ONU v simulaci 100G Epon . . . . .	49
B.1	BER sítě XG-PON v sestupném směru . . . . .	76
B.2	BER sítě XG-PON v vzestupném směru . . . . .	76
B.3	BER sítě NGPON2 lambdy 1 v sestupném směru . . . . .	77
B.4	BER sítě NGPON2 lambdy 2 v sestupném směru . . . . .	77
B.5	BER sítě NGPON2 lambdy 3 v sestupném směru . . . . .	77
B.6	BER sítě NGPON2 lambdy 4 v sestupném směru . . . . .	78
B.7	BER sítě NGPON2 lambdy 1 v vzestupném směru . . . . .	78
B.8	BER sítě NGPON2 lambdy 2 v vzestupném směru . . . . .	78
B.9	BER sítě NGPON2 lambdy 3 v vzestupném směru . . . . .	79
B.10	BER sítě NGPON2 lambdy 4 v vzestupném směru . . . . .	79

B.11 BER sítě 100G EPON lambdy 1 v sestupném směru . . . . .	80
B.12 BER sítě 100G EPON lambdy 2 v sestupném směru . . . . .	80
B.13 BER sítě 100G EPON lambdy 3 v sestupném směru . . . . .	80
B.14 BER sítě 100G EPON lambdy 4 v sestupném směru . . . . .	81
B.15 BER sítě 100G EPON lambdy 1 v vzestupném směru . . . . .	81
B.16 BER sítě 100G EPON lambdy 2 v vzestupném směru . . . . .	81
B.17 BER sítě 100G EPON lambdy 3 v vzestupném směru . . . . .	82
B.18 BER sítě 100G EPON lambdy 4 v vzestupném směru . . . . .	82

# ÚVOD

Stejně jako dopravní komunikace nebo energetická rozvodná síť, patří i vysokorychlostní přístup k internetu mezi důležité pilíře moderní společnosti. Nároky na rychlost přístupu k internetu dnes daleko převyšují hodnoty, které ještě před ani ne deseti lety nadmíru dostačovaly. Plány Evropské unie na modernizaci a rozšíření vysokorychlostního internetu, však mají tuto skutečnost brzy změnit. Díky aktuálně probíhajícímu procesu digitalizace s názvem „Digitální Česko 2.0“, jehož součástí je mimo jiné také plán na rozvoj vysokorychlostních přístupových sítí, by mělo dle aktuálních informací být do roku 2020 zajištěno připojení o minimální rychlosti 30 Mb/s pro každého obyvatele a 100 Mb/s až pro polovinu obyvatelstva.

Pro uskutečnění těchto plánů je třeba vybudovat novou infrastrukturu založenou na sítích nové generace (NGA). Ty v přístupových sítích nahradí již zastaralé xDSL technologie, které s rozvojem chytrých zařízení, IoT technologií, ale především s využíváním moderních streamovacích služeb ve vysokém rozlišení nezvládají držet krok. Nejideálnější náhradu tvoří optické přístupové sítě, které přináší výrazně vyšší přenosovou kapacitu, a tím i vyšší poskytované rychlosti připojení. V tomto ohledu se pro přístupové sítě používají především přístupové sítě pasivní, u kterých je přenosová kapacita optického vlákna rozdělena mezi více účastníků.

Tato bakalářská práce se zabývá pasivními přístupovými sítěmi, které za svou téměř dvacetiletou existenci prošly výraznými změnami. Původní rychlosti v řádech stovek Mb/s byly s postupem času navýšeny až na aktuální přenosovou rychlost 10 Gb/s. V práci jsou standardy těchto sítí stručně rozebrány, a dále je podstatná část práce věnována aktuálně vyvíjeným standardům s plánovanými přenosovými rychlostmi až 100 Gb/s.

Praktická část je věnována vytvořením jednoduchých simulací pasivních přístupových sítí podle specifikací jednotlivých standardů. Simulace jsou cíleny na získání hodnot bitové chybovosti a diagramů ok pro vzdálenosti a dělicí poměry ve specifikacích útlumových tříd standardů. Získané výsledky jsou závěrem okomentovány a je provedeno vyhodnocení vhodnosti jejich použití.

# 1 OPTICKÁ PŘÍSTUPOVÁ SÍŤ

Pojem přístupová síť je obecně možno definovat jako soubor všech technických prostředků, které umožňují přístup koncových účastníků ke službám poskytovaným provozovatelem sítě [1]. Jsou to tedy všechny prostředky sítě zajišťující připojení koncových uživatelů k prvnímu uzlu transportní sítě.

Optická přístupová síť díky svým vlastnostem, a sice odolnosti vůči elektromagnetickému záření, nízkému útlumu a vysoké přenosové kapacitě, spadá mezi nejvýhodnější řešení připojení z hlediska poměru cena/výkon pro koncového uživatele. Je využívána nejen k širokopásmovému připojení k internetu, ale i k distribuci služeb jako IPTV (Internet protocol television) a komunikaci prostřednictvím VoIP (Voice over Internet Protocol) technologie. Tato kombinace služeb je také známa pod pojmem tzv. triple play [2].

## 1.1 Aktivní optická síť

Aktivní optická síť (AON), též nazývaná jako Point-to-Point (PTP), se vyznačuje především využíváním aktivních síťových prvků, jako jsou směrovače a prepínače, na trase mezi OLT a ONU. Disponuje vyhrazeným symetrickým kanálem pro každého koncového účastníka. Maximální délka trasy může v závislosti na počtu koncových uživatelů dosahovat vzdáleností až 80 km. Nevýhodou tohoto typu přístupové sítě jsou především vyšší náklady na instalaci, údržbu a provoz aktivních prvků na síťové trase [2].

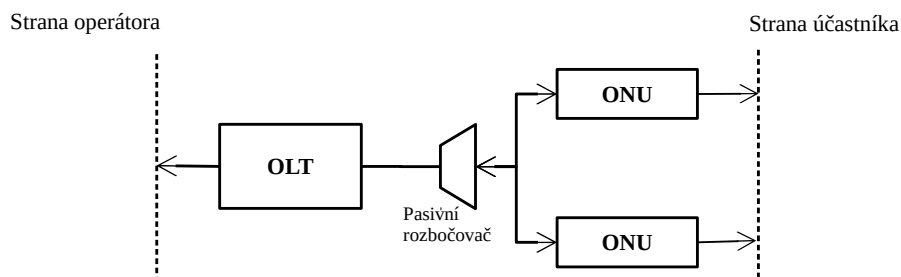
## 1.2 Pasivní optická síť

Pasivní optické sítě (PON) jsou sítě typu Point-to-Multipoint (PTMP) [2]. Oproti AON mají velkou výhodu v nižších nákladech na provoz a instalaci, čehož dosahují díky využití pasivních prvků, to jest prvků nevyžadujících napájení a řídicí logiku, na trase mezi OLT a ONU. K distribuci přenosové kapacity koncovým účastníkům se nejčastěji využívá jedno sdílené vlákno s dosahem okolo 20 km.

Základní funkční celky PON:

- Optické linkové zakončení (OLT) – jedná se o zařízení s funkcí rozhraní mezi páteřní telekomunikační sítí a přístupovou optickou sítí,
- Optická distribuční síť (ODN) – je tvořena všemi přenosovými prostředky mezi OLT a ONU,
- Optické ukončující jednotky (ONU) – je zařízení s funkcí rozhraní mezi přístupovou sítí poskytovatele služeb a navazující sítí účastníka,

- Optické rozbočovače – jsou pasivní prvky, jenž disponují jedním vstupním a několika výstupními porty. Prvek slučuje dvě funkce, a sice ve směru k uživateli rozdělují signál na jednotlivé dílčí části, zatímco ve směru k ústředně jednotlivé signály slučuje [2].

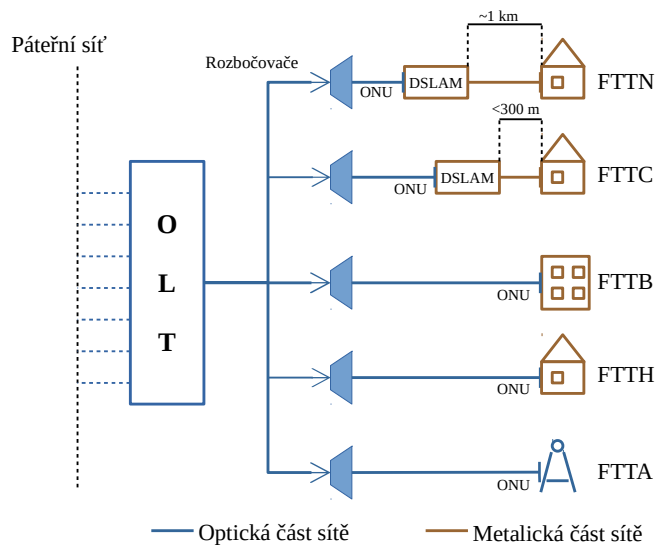


Obr. 1.1: Grafické znázornění PON

### 1.2.1 Fiber to The x

Název Fiber to The X, známý pod zkratkou FTTX, v překladu vypovídá o typu zakončení optického vlákna, zavedeného od centrální ústředny ke koncovému bodu X. Ten v názvu označuje rozdílný koncový bod, od kterého je připojení dále šířeno pomocí jiných technologií [3].

- FFTN (Fiber to the Neighborhood) – optické vlákno je přivedeno do vzdálenosti okolo jednoho kilometru od koncových uživatelů [3].
- FTTC (Fiber to the Curb) – optické vlákno je přivedeno do účastnického rozvaděče, umístěného do maximální vzdálenosti 300 metrů od koncového uživatele. Dnes se především používá k přivedení širokopásmové přístupové sítě do míst, odkud již vedou existující metalická vedení [2] [3].
- FTTB (Fiber to the Building) – optické vlákno je přivedeno do rozvaděče uvnitř budovy [2].
- FTTH (Fiber to the Home) – optické vlákno přivedeno až do domu či bytové jednotky koncového uživatele [2] [3].
- FTTO (Fiber to the Office) – optické vlákno je přivedeno do areálu firmy či kanceláře [2] [3].
- FTTA (Fiber to the Antenna) – s rostoucí rychlostí a množstvím přenesených dat pomocí mobilní datové sítě, je při implementaci této technologie optického vlákna zavedeno až do distribučního boxu antén telekomunikačních věží, případně antén instalovaných na střechy budov [3] [4].



Obr. 1.2: Grafické znázornění FTTx

### 1.2.2 Fyzické parametry PON

- Přenosová rychlost – rychlost přenosu na médiu, ve sestupném směru znamená přenos k uživateli, v vzestupném znamená přenosovou rychlost směrem od uživatele k ústředně [9].
- Vlnová délka – určuje službou využitý rozsah vlnové spektra pro přenos [9].
- Logický dosah sítě – teoretická maximální vzdálenost mezi OLT a ONU bez ohledu na limitující fyzickou vrstvu [9].
- Fyzický dosah sítě – fyzicky maximální vzdálenost mezi OLT a ONU s ohledem na limity optických zdrojů [9].
- Dělicí poměr – vyjadřuje maximální poměr rozvětvení sítě. S počtem účastníků v síti, roste i útlum sítě, a zároveň klesá poměrová přenosová kapacita na jednoho uživatele [9].
- Rozdílová vzdálenost koncových uživatelů – popisuje vzdálenost mezi nejbližší a nejvzdálenější ONU k jejich OLT [9].
- Střední doba šíření optického signálu – průměrné zpoždění signálu mezi OLT a ONU [9].
- Linkové kódování – jedná se o způsob, jakým je přenášený digitální signál kódován [9].
- FEC – je opravné kódování, které má za úkol zachovat integritu dat, a to i za cenu snížení maximální přenosové rychlosti [9].

## 2 VÝVOJ PON

Pro umožnění globální komunikace jsou celosvětově jednotné standardy důležité, protože zajišťují, aby se všechny světové ICT sítě „navzájem domluvili“. Za hlavní iniciativou vývoje a uvedení standardů pro pasivní optické sítě stojí 2 organizace, které nadále spolupracují s telekomunikačními operátory pro zajištění maximální rozšířitelnosti nového standardu s ohledem na nákladnost jeho implementace.

### 2.1 ITU-T a FSAN

„*International Telecommunication Union*“ (Mezinárodní komunikační unie) je organizací spadající pod OSN se zaměřením na informační a komunikační technologie [5]. Byla založena v roce 1865 a v oblasti telekomunikací figuruje od jejích samotných prvních počátků.

Hlavní prvek procesu standardizace je tvořen tzv. „study groups“ (studijními skupinami). Tyto skupiny jsou zakládány nejen pro působnost v oblasti sítí, ale i dalších odvětví ICT např. multimédia, bezpečnost, IoT a jiné ... [5].

Velký vliv na standardizaci a rozvíjení PON sítí obstarává sdružení FSAN (Full Service Access Network), založené v roce 1995 [2]. Skládá se z více než 70 organizací, včetně největších síťových operátorů a vedoucích expertů na ITU-T standardy jako jsou GPON, XG-PON a další. Cílem sdružení je spolupracovat na vývoji a zavedení standardů optických přístupových systému tak, aby byly uživateli poskytnuty všechny důležité služby s co možná nejnižší nutností změn v existující optické infrastruktuře. [6]

V oblasti OAN působí dvě tzv. „*Task groups*“ (Pracovní skupiny):

- Operation and Engineering Task Group – jejím úkolem je zprovoznění PON systémů založených na ITU-T/FSAN specifikacích s ohledem na různé výrobce těchto systémů [6].
- Next Generation PON Task Group – má za úkol zanalyzovat potřeby operátora a vyvinout nové specifikace pro OAN s ohledem na zajištění co nejsnadnějšího přechodu a použití stávající síťové infrastruktury [6].

### 2.2 IEEE

„*Institute of Electrical and Electronics Engineers*“ (Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství) je největší světovou organizací zaměřenou na technologický vývoj. Dnes má přes 420 000 členů a je jedním z největších vydavatelů publikací z oblasti ICT [7]. Organizace vznikla v roce 1963 sloučením institucí IRE a AIEE.

Počátek vývoje začíná obdobně jako u ITU-T založením skupiny odborníků nazvanou jako „*Task Force*“. Ta má za úkol prozkoumat technologické možnosti a navrhnout novou technologii tak, aby ideálně mohla fungovat na stejné ODN se svým předchůdcem.

## 2.3 Základní PON standardy

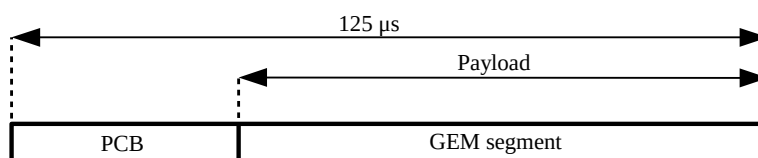
### 2.3.1 APON (ITU-T G.983.1)/BPON (ITU-T G.983.3)

ATM PON, neboli PON s využitím ATM k přenosu dat, je standard schválený v roce 1998 organizací ITU-T. Nabízí dvě rychlostní varianty, a sice symetrickou s rychlostmi 155,52 MB/s a asymetrickou s poměrem rychlostí 622,8/155,52 MB/s.

V roce 2001 bylo přijato rozšíření v podobě Broadband PON [2]. Novinka ne-zavedla nové vyšší rychlostní varianty, pouze přidala možnost symetrické rychlosti 622,8 MB/s. Dále se soustředila na přidání nových funkcí jako dynamickou distribuci pásma (DBA) a podporu vlnového multiplexu (WDM) [9]. Díky tomu, je mezi OLT a ONU, umožněno využití jednoho vlákna k obousměrnému přenosu, a to vyhrazením odlišných vlnových délek pro přenosy v sestupném a vzestupném směru, případně i dalších služeb.

### 2.3.2 GPON (ITU-T G.984)

V roce 2003 byl organizací ITU-T schválen nový standard s názvem Gigabit PON. Hlavním cílem bylo navýšit maximální přenosové rychlosti, a zároveň umožnit přenos Ethernet protokolu, a dalších služeb v jedné rámcové struktuře tzv. „GEM“ (GPON encapsulation method) rámci s pevnou délkou trvání 125  $\mu$ s. Podpora ATM protokolu byla v roce 2014 ukončena (doplněk G.984.5.) [10]. Skladba GEM rámce zobrazena na obr. 2.1 [3].



Obr. 2.1: GEM rámeček

Přenosové rychlosti nově dosahují hodnot 1,244 a 2,488 Gb/s s možností symetrické i asymetrické varianty. Maximální dosah je z pohledu TC vrstvy (logický

dosah) 60 km, zatímco reálné maximum fyzické vrstvy se pohybuje do vzdáleností  $\leq 20$  km [8].

Standard rovněž implementuje ochranný mechanismus tzv. „protection switching“, který v případě poškození kabelu umožní u ochrany „1+1“ rychlé přepnutí na dedikované záložní vlákno nebo při použití ochrany „1:N“ využije jednoho sdíleného ochranného vlákna určeného pro více pracovních vláken [3].

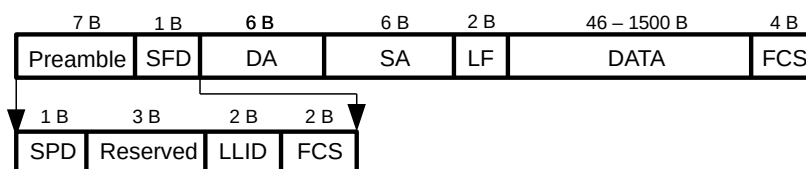
Z hlediska fyzické vrstvy je možné provést rozdělení až 1:64, avšak kvůli možnému technologickému zdokonalení optických modulů počítá TC vrstva až s dělicími poměry do 1:128 [8].

### 2.3.3 EPON (IEEE 802.3ah)

S přístupovou sítí EPON (také GEPON nebo Gigabit Ethernet PON) přišla organizace IEEE v roce 2004. Jejím cílem bylo zavést standard Ethernet až k uživateli (EFMF – Ethernet in the First Mile Fiber) a tím nejen zjednodušit návaznost lokálních sítí, ale také výrazně snížit náklady na vybudování PON [2].

Byl odvozen od standardního gigabitového Ethernet protokolu, od kterého si ponechává symetrickou přenosovou rychlost 1,25 Gb/s s linkovým kódováním 8B/10B, tedy dvěma paritními bity navíc ke každému 8bitovému bloku dat. Pro datové přenosy jsou u EPON použity stejné vlnové délky jako u předchozího APON/BPON, a sice 1480-1500 nm pro sestupný směr a 1260-1360 nm pro vzestupný směr. Dále se počítá s využitím vlnové délky 1550 nm pro distribuci jiných služeb např. vícekanálové video přenosy [3].

Pro přenos využívá ethernetových rámců s pevnou délkou trvání 2 ms, které nepotřebují dodatečné zapouzdření či konverzi a jsou dnes využívány nejen v lokálních, ale i metropolitních sítích. Na rozdíl od standardního ethernetového rámce, má EPON rámec pro fungování v PON upravené složení prvních 8 bytů [3]. Změna standardního ethernetového rámce od rámce EPON je znázorněna na obr.2.2 [3].



Obr. 2.2: Struktura rámce pro EPON síť

- SPD – obsahuje informace o hodinovém signálu.
- Reserved – tři rezervované byty pro budoucí účely.

- LLID – slouží k identifikaci ONU.
- FCS – obsahuje informaci o detekci chyb.

Aby nedocházelo ke kolizi paketů, je zapotřebí korigovat síťovou komunikaci v EPON pomocí protokolu MPCP (MultiPoint Control Protocol). Ten má za úkol detekovat přítomnost ONU, domluvit se na provozních parametrech a následně jej registrovat přidělením LLID[3].

Tab. 2.1: Srovnání parametrů GPON a EPON.

Typ PON	GPON	EPON (PX20)
Označení standardu	G.984	802.3ah
Sestupný přenos [Gb/s]	1,244 nebo 2,488	1,25
Vzestupný přenos [Gb/s]	1,244 nebo 2,488	1,25
Sestupná vlnová délka [nm]	1480–1500	1480–1500
Vzestupná vlnová délka [nm]	1260–1360	1260–1360
Protokol na druhé vrstvy [-]	GEM	Ethernet
Linkové kódování [-]	NRZ	8B/10B
Zabezpečení [-]	sestupný směr	obousměrné (AES)
Maximální dělicí poměr [-]	1:64 (1:128 TC)	1:32
Maximální dosah sítě [km]	20 (60 TC)	20
FEC [-]	RS (255, 223)	není povinné

## 2.4 Navazující PON standardy

Při vývoji nových technologií, nejsou tou nejzásadnější otázkou jen samotné specifikace nového standardu, ale také zpětná kompatibilita s předchozími technologiemi. Musí být umožněno provozovat starší i nový standard současně v jedné optické distribuční síti. Pozitivum tohoto přístupu spočívá v možnosti postupného přechodu na nový standard, kde je potřeba výměna prvků v OLT a ONU bez nutnosti přestavby již fungující ODN.

### 2.4.1 XG-PON (ITU-T G.987)

Také označován jako 10G-PON, je standard uvedený organizací ITU-T v roce 2010. Konceptně vychází ze standardu GPON a doplňků do něj implementovaných během jeho sedmileté existence.

Pro sestupný směr byla zvolena vlnová délka 1575–1580 nm, zatímco u vzestupného směru je, kvůli zajištění koexistence obou standardů, potřeba použít vlnového

dělení k vyhrazení vlnové délky 1260–1280 nm pro XG-PON. Vzhledem k původní použité vlnové délce 1260–1360 nm u GPON, bylo kvůli zajištění rezervy mezi přenosovými kanály obou standardů, včetně pilotní vlnové délky 1310 nm, nutno v doplňku G.984.5 upravit vlnovou délku vzestupného směru na 1290–1330 nm[13].

U XG-PON dosahuje maximální dělicí poměr fyzické vrstvy hodnoty 1:64 na vzdálenost 20 km. S možností budoucího rozšíření je v TC vrstvě počítáno teoreticky až s rozdělením 1:256 a maximální délkou vlákna 60 km. Rovněž je TC vrstvě počítáno s rozdílovou vzdáleností koncových uživatelů až 40 km[13].

XG-PON nově nabízí četné změny a vylepšení oproti původnímu GPON. V oblasti zabezpečení je na žádost operátora možné zabezpečit přenos obousměrně[13]. Vylepšením protokolu GEM (nově XGEM) bylo docíleno efektivnějšího přenosu dat libovolného formátu, avšak standard nabízí pouze asymetrickou variantu přenosu v poměru 10/2,5 Gb/s, někdy označovanou jako XG-PON1[13]. Kvůli použití opravného kódování (FEC) se maximální přenosové rychlosti pohybují okolo 8,5 Gb/s. Parametry standardu jsou shrnuty v tab2.2

#### **2.4.2 XGS-PON (ITU-T G.9807.1)**

V únoru roku 2016 byla skupinou SG15 představena nová specifikace, která by se mohla stát odpovědí na otázku složitého a nákladného přechodu z GPON a XG-PON na modernější technologii[15]. Na rozdíl od svého předchůdce, přidává nově představený XGS-PON (původně XG-PON2) možnost symetrického přenosu s maximální přenosovou rychlostí 10 Gb/s, se zachováním podpory asymetrické varianty 10/2,5 Gb/s[13] [15].

Použitím stejných vlnových délek jako u předchozího XG-PON, se pro operátory naskytuje příležitost nasazení univerzálních prvků na straně OLT, kde je potřeba nasadit dvou rychlostní dávkovací přijímač pro podporu symetrického i asymetrického přenosu, zatímco na straně ONU bude mít uživatel možnost výběru asymetrického nebo symetrického řešení [17].

Důležitou novinkou je nově navržená TC vrstva, která je částečně odvozená z TC vrstvy standardu NG-PON2, avšak nepočítá s použitím laditelných optických filtrů [15]. Využití tak tento nový standard najde především částech světa s vysokým využitím technologie GPON a XG-PON jako mezikrok při přechodu na sítě nové generace.

Vývoj je podporován několika velkými operátory např. China Telecom, ZTE, Huawei a další. V září 2016 spustila společnost Huawei první komerční provoz XGS-PON pro podnikovou sféru [17].

### 2.4.3 10G-EPON (IEEE 802.3av)

S cílem zachovat kompatibilitu nově vyvíjeného standardu, byl v roce 2009 schválen standard 10G-Epon organizace IEEE. Při jeho vývoji byl velký ohled brán na možný provoz obou standardů na téže ODN. Vzhledem k použití stejných vlnových délek 1260–1280 nm (10G-EPON) a 1260–1360 nm (EPON) pro přenos v vzestupném směru, bylo důležité zajistit, aby je přijímač optického signálu od sebe uměl rozlišit. Toho je dosaženo dvou rychlostním dávkovým módem, kdy dojde k časovému oddělení 10G-EPON a EPON a přidělení vysílacího okna (Time slot) pro možnost vysílání [14].

Nově je nabízena nejen symetrická varianta přenosové rychlosti, ale také asymetrická varianta se zachováním přenosové rychlosti v vzestupném směru původního standardu EPON. Asymetrické řešení otevírá možnost využití levnějších optických zdrojů a tím snížení ceny služby pro koncového zákazníka [14]. Funkčnost 10G-EPON se svým předchůdcem na stejném ODN je zajištěna pomocí vlnového dělení (WDM), kde nový standard využívá pro přenos v sestupném směru vlnovou délku 1575–1580 nm a v vzestupném směru jsou pomocí časového dělení (TDM) využity délky 1260–1280 nm pro 10G-EPON a 1260–1360 nm pro EPON.

V oblasti zabezpečení implementuje opravné kódování (FEC), a dále bylo docíleno snížení režie odlišným kódováním 64B/66B. Parametry standardu jsou shrnuty v tab2.2

Tab. 2.2: Srovnání parametrů XG(S)-PON a 10G-EPON

Typ PON	XG(S)-PON	10G-Epon
Označení standardu [-]	G.987 (G.9807.1)	802.3av
Sestupný přenos [Gb/s]	9,9533	10,3125
Vzestupný přenos [Gb/s]	2,4883 (9,9533)	10,3125 nebo 1,25
Sestupné vlnové délky [nm]	1575–1580	1575–1580
Vzestupné vlnové délky [nm]	1260–1280	1260–1280 a 1260–1360
Linkové kódování	NRZ	64B/66B
Zabezpečí [-]	obousměrné	obousměrné
Protokol na druhé vrstvě [-]	XGEM	Ethernet
Maximální dělicí poměr [-]	1:64 (1:256 TC)	1:32
Maximální dosah sítě [km]	20 (60 TC)	20
FEC [-]	RS (255, 223)	RS (248, 216)

## 3 NG-PON2 (ITU-T G.989)

Při vývoji předchozí generace telekomunikačních standardů označované jako NG-PON1, bylo klíčové zachování koexistence se svými předchůdci, aby se co nejvíce snížily náklady na vylepšení stávající sítě.

Cílem nové generace PON bylo dosáhnout minimální sestupné přenosové rychlosti 40 Gb/s, s možností škálování skrze budoucí technologické pokroky až k hranici 80, potažmo 100 Gb/s [15] [16]. K dosažení těchto cílů bylo pro vývoj nové generace pasivních optických sítí organizací FSAN zvažováno několik variant. Výběr probíhal na základě několika sledovaných parametrů: „technologická vyspělost, škálovatelnost, energetická náročnost a poměr cena/výkon systému“ [16].

Příklad evolučních PON:

- TDM-PON – je poměrně cenově dostupná technologie založená na časovém dělení přenosu s vyhrazeným vysílacím oknem v vzestupném směru pro každé ONU, avšak vzhledem k sdílenému pásmu mezi všemi ONU, přináší obtíže u rychlostí nad 10 Gb/s s rychle rostoucí složitostí a cenou systému [16].
- WDM-PON – byl navržen jako alternativa k TDM s využitím virtuálního PTP spojení mezi OLT a několika ONU. Každému ONU byla k přenosu přiřazena jiná vlnová délka, což by sice zajistilo každému ONU vysokou přenosovou rychlost, nicméně by si implementace vynutila výraznou změnu v ODN a nekompatibilitu s předchozími standardy na stejném ODN [16].

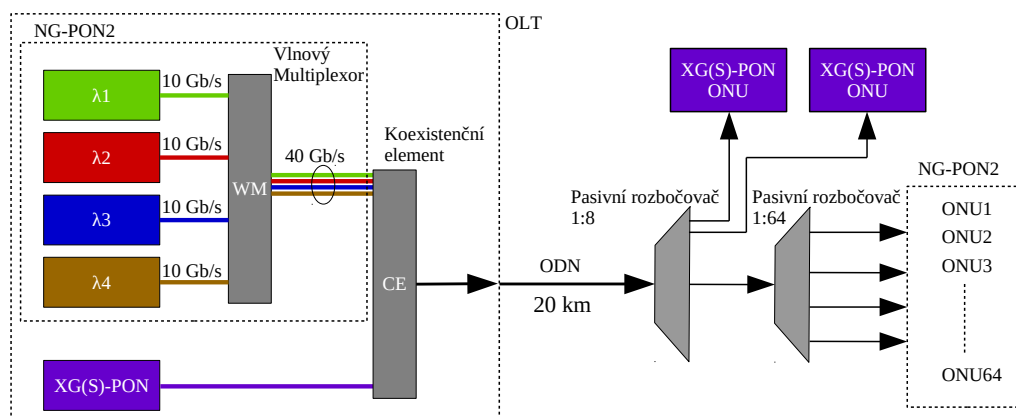
### 3.1 Architektura

V roce 2012 bylo organizací FSAN vybrán jako budoucí standard pro sítě nové generace hybridní typ TWDM-PON[16]. TWDM-PON kombinuje vlastnosti standardního časově děleného přenosu, čímž je v kombinaci s využitím několika vlnových délek umožněn provoz s předchozími standardy založenými na časovém dělení (GPON, XG-PON) ve stávajících ODN. Perspektivně je nabízen jako vhodné řešení pro firemní i domácí sektor s potenciálem postupného růstu přenosové kapacity.

#### 3.1.1 Přenosové parametry

Dosažení přenosových rychlostí nad 10 Gb/s je možné docílit za pomoci techniky známé jako sdružení kanálů (Channel Bonding). Princip této techniky spočívá ve využití vlnového multiplexoru (WDM), což je pasivní optický prvek na straně OLT, umožňující sdružení více kanálů o různých vlnových délkách s rychlostmi 10 Gb/s na každý kanál. S rychlostí kanálu 10 Gb/s se počítá především kvůli kompatibilitě s předchozími PON standardy a dále snížením nákladů na optické moduly[18].

Současné možnosti umožňují asymetrické a nově i symetrické přenosy s maximálními přenosovými rychlostmi 40/10 Gb/s, respektive 40/40 Gb/s, dělicím poměrem 1:64 a dosahem  $\geq 20$  km [15]. Na obr. 3.1 je znázorněna NG-PON2 síť se 4 kanály společně v koexistenci s XG(S)-PON [19]. Do budoucna se počítá až s rychlostmi 80/20 Gb/s u asymetrické varianty, respektive 80/80 Gb/s v případě symetrické varianty. Dosaženo toho bude sdružením 8 párů vlnových délek [15].



Obr. 3.1: Znázornění TWDM-PON sítě

NG-PON2 definuje stejné útlumové třídy, jako předchozí standard XG-PON [19]. V tab. 3.1 jsou rozebrány počáteční výkony společně s útlumy v ODN všech tříd.

Tab. 3.1: Počáteční vysílací výkony a útlumy ODN útlumových tříd

Třída	Min. výkon	Max. výkon	Min. útlum ODN	Max. útlum ODN
N1	+3 dBm	+7 dBm	14 dB	29 dB
N2	+5 dBm	+9 dBm	16 dB	31 dB
E1	+7 dBm	+11 dBm	18 dB	33 dB
E2	+9 dBm	+11 dBm	20 dB	35 dB

### 3.1.2 Vlnové délky

Současná koexistence na stejném ODN je umožněna využitím vlnových délek sestupného směru v L-pásmu (1565–1625 nm), potažmo vlnové délky v zestupného směru v C-pásmu (1530–1565). Použity jsou rozsahy, dosud nevyužité u ostatních standardů v kombinaci s ochrannými prostředky na straně ONU, jenž zamezí tomu, aby ONU přijímalo vlnové délky jiných služeb v síti [15]. Využité vlnové délky jsou zobrazeny v tab. 3.2 [18].

Tab. 3.2: Vlnové délky pro NG-PON2

TWDM	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
	1596–1603	široký 1524–1544 zúžený 1528–1540 úzký 1532–1540
PTP WDM	Vlnová délka [nm]	
Sdílené spektrum	1603–1625	
Rozšířené spektrum	1524–1625	

- Sdílené spektrum – rozsah vlnového spektra pro použití PTP WDM, za předpokladu plného využití TWDM pásem a koexistenci s předchozími standardy [18].
- Rozšířené spektrum – rozšířený rozsah vlnového spektra pro použití v PTP WDM, za předpokladu nevyužití některých TWDM pásem [18].

Kromě použití zmíněných vlnových délek je zapotřebí, pro zajištění koexistence, také implementovat do OLT nový optický prvek tzv. Koexistenční element (CE) jak bylo zobrazeno na obr 3.1.

### 3.1.3 PTP Overlay

Díky implementaci vlnového dělení v nové TWDM architektuře, je umožněno provozovat kromě standardní PTMP komunikace, typicky používané v PON, také dedikované PTP připojení o vyhrazené vlnové délce pro každé ONU. Vlnové délky pro PTP WDM jsou v tab. 3.2.

V základní konfiguraci NG-PON2, se počítá až s 8 dostupnými kanály o vlnových délkách mimo použité spektrum v PTP komunikaci a možností rozšíření o další kanály za předpokladu nevyužití jiných služeb na použitelných vlnových délkách pro PTMP [18].

### 3.1.4 Laditelné optické moduly

Jedná se o jednu z klíčových technologií sítí NG-PON2. Laditelné optické vysílače a přijímače umožní operátorům vzdálenou změnu přidělené vlnové délky ONU. Dá se říci, že ONU jsou tak tzv. „bezbarvé“ [18].

## Režim spánku

Vzhledem ke snaze snižování provozních nákladů operátorů telekomunikačních služeb, umožňují sítě nové generace přejít v době nízkého využití sítě (např. v noci) do „režimu spánku“.

Princip tohoto režimu spočívá ve vypnutí 1 až 3 ze 4 WDM portů na straně OLT, bez toho, aniž by byly od služeb sítě odpojeny některé ONU. Umožněno je to pomocí nových vlnově laditelných optických modulů u ONU, u kterých operátor může vzdáleně naladit některá nebo všechna TWDM-ONU na společnou vlnovou délku používanou aktivním WDM portem v OLT a nevyužité porty vypnout [18].

## Ochrana sítě

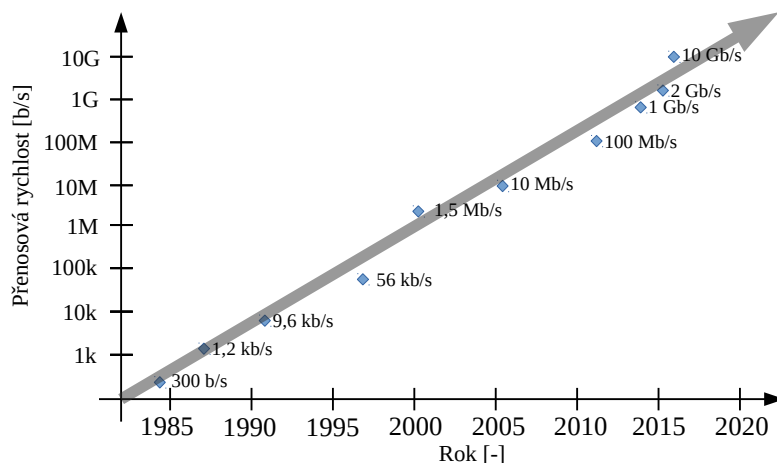
Dalším využitím technologie laditelných optických prvků je možno využít v případě poruchy v síti např. selhání WDM-OLT portu nebo konektivity k OLT. Je možné přerozdělit ONU závislé na vadném WDM-OLT portu k ostatním kanálům, respektive v případě ztráty konektivity k OLT je možné všechna ONU přeladit na jednu vlnovou délku a využitím ochranného OLT zajistit alespoň základní služby [18].

Tab. 3.3: Srovnání parametrů XG(S)-PON a NG-PON2

Typ PON	XG(S)-PON	NG-PON2 (TWDM)
Označení standardu [-]	G.987 (G.9807.1)	G.989
Sestupný přenos [Gb/s]	9,9533	40 (až 80)
Vzestupný přenos [Gb/s]	2,4883 9,9533	10 (až 20) asymetricky 40 (až 80) symetricky
Sestupné vlnové délky [nm]	1575–1580	1596–1603
Vzestupné vlnové délky [nm]	1260–1280	1524–1540 – široký 1528–1540 – zúžený 1533–1540 – úzký
Linkové kódování	NRZ	NRZ
Zabezpečí [-]	obousměrné	obousměrné
Protokol na druhé vrstvě [-]	XGEM	XGEM
Maximální dělicí poměr [-]	1:64 (1:256 TC)	1:64 (až 1:256 TC)
Maximální dosah sítě [km]	20 (60 TC)	20 (60 TC)
FEC [-]	RS (255, 223)	RS (248,232) RS (248,216)

## 4 100G EPON (IEEE 802.3ca)

Může se zdát, že vysokorychlostní připojení k Internetu v řádu jednotek či desítek Gb/s pro uživatele nemá příliš velký význam. Nicméně dle odhadů [21] je možné, že by do období 4–5 let mohli někteří telekomunikační operátoři, vzhledem k narůstajícím nárokům na přenosové rychlosti, narazit na problém nedostatečné přenosové kapacity svých přístupových sítí.



Obr. 4.1: Vývoj maximálních přenosových rychlostí [22]

Na obr. 4.1 můžeme vidět přibližný vývoj maximálních nabízených přenosových rychlostí operátory v USA. Největší pozornost si zaslouží vývoj v posledních několika letech, kdy je možné zaznamenat veliké skoky v nabízených rychlostech. V roce 2015 začali v USA v omezené míře nabízet připojení do domu o přenosové rychlosti 10 Gb/s [22].

Největší vlivy na růst vyšších přenosových rychlostí [21] [22]:

1. Celosvětový růst počtu uživatelů, v rezidentní i firemní sféře, vyžadujících vysokorychlostní připojení.
2. Rostoucí počet připojených zařízení na jednoho uživatele (odhadem bude do roku 2020 připojeno přes 40 miliard zařízení).
3. Zvyšující se potřebné přenosové pásmo pro každé zařízení např. streamováním multimediálního obsahu ve 4K rozlišení.

Vzhledem k trendu exponenciálního růstu požadavků na přenosové kapacity, je nutno včas zajistit řešení, které operátorům umožní zvýšit přenosovou kapacitu na stávajících ODN, a tak byla v roce 2014 zahájena studie na prozkoumání technických požadavků a ekonomické přijatelnosti pro NG-EPON. V červenci 2015 byla odsouhlaseno vzniknutí studijní skupiny s úkoly vytyčit cíle a kritéria pro nový EPON standard [22].

## 4.1 Cíle standardu

1. Použití PTMP topologie přístupové sítě.
2. Uvést specifikaci umožňující fyzické vrstvě pracovat přes jedno jednovlákenné vlákno se symetrickými i asymetrickými variantami s minimálními přenosovými rychlostmi v sestupném směru 25 Gb/s, 50 Gb/s, 100 Gb/s.
3. Mít na linkové vrstvě podíl ztrátovosti rámců (Frame Loss Ratio) nebo minimální bitovou chybovost (BER) lepší nebo rovnou  $10^{-12}$ .
4. Koexistence s 10G-EPON.

Od nového EPON standardu není, jakožto od cenově dostupného řešení vysokorychlostní přístupové sítě nové generace, očekávána implementace nových a nákladných technologií, jako v případě NG-PON2. Především se dle dostupných informací [21] nepočítá s implementací laditelných optických modulů. Cílem vývoje je zajistit maximální funkčnost na již stávajícím ODN bez implementace rozšiřujících optických prvků.

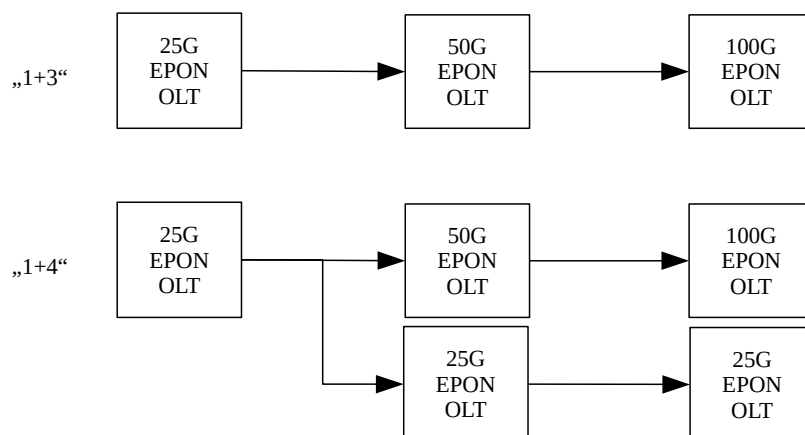
Jelikož vývoj nového standardu trvá několik let, mělo by, na rozdíl od předešlých EPON standardů, nové řešení vynikat ve způsobu, jakým je na něj během vývoje nahlíženo z hlediska časové životnosti. V návrhu je počítáno s třígeneračním vývojem, kdy budou jednotlivé generace postupně uváděny do provozu v rozmezí několika let od sebe. Vývojové generace jsou podrobněji rozebrány v podkapitole 4.2.2.

## 4.2 Architektura

Při vývoji standardu, zaměřeném na jeho aktuálnost po mnohem delší dobu oproti svým předchůdcům, je důležité aby se hned zpočátku rozhodlo o tom, jakým způsobem bude nový standard fungovat, na kterých vlnových délkách bude pracovat a jakým rozsahem bude kompatibilní se svými předchůdci s čímž souvisí i změny ve stávajících OAN.

U vývoje byly zvažovány dvě varianty rozdělení vlnových páru [23]:

1. Architektura „1+3“ – do budoucna počítá s využitím vlnových páru 1. generace v následujících generacích.
2. Architektura „1+4“ – na rozdíl od architektury „1+3“ počítá s vytvořením jednoho vlnového páru pro kanál 1. generace a použití odlišných vlnových páru pro další generace.



Obr. 4.2: Blokové schéma architektur vlnových párů [23]

V listopadu 2016, bylo rozhodnuto o použití architektury s „1+3“ vlnovými páry [24], což znamená, že vlnové délky 1. generace budou využity i v konečném standardu.

### 4.2.1 Vlnové délky

Výběr vlnových délek je jeden z nejdůležitějších aspektů, a proto se také jedná o jeden z nejdéle diskutovaných parametrů celého standardu. Téměř od začátku práce na 100G EPON bylo diskutováno o pevně zachovaných vlnových délkách pro všechny čtyři 25 Gb/s kanály napříč všemi generacemi [24].

Od ledna roku 2016 bylo celkově představeno 6 plánů (A–F) s několika dalšími revizemi o rozdělení vlnových délek pro sestupný a vzestupný směr. Zvažován byl výběr nejvhodnější vlnových délek z hlediska energie, nákladů a jejich následné simulace. Vzhledem k výběru „1+3“ architektury, se od listopadu 2016 rozhoduje mezi 3 plány (A, B, D), s různými následky na použití optických komponent v OLT a ONU a koexistenci s předchozími standardy na jedné ODN [24] [25].

#### Plán A

Cílem plánu A je pro všechny vlnové páry využít O-pásmo (1260–1360 nm), což by díky nízké disperzi umožnilo využití přenosů NRZ linkovým kódem bez použití prostředků proti disperzi. Pásmo rovněž umožňuje nasazení DML (Directly Modulated Laser) i EML (Electro-absorption Modulated Laser). Existující optické prostředky pro O-pásmo navíc mohou být z velké části upraveny pro použití v 100G EPON [26].

Koexistence s 10G EPON symetrickou variantou je možná pomocí vlnového dělení (WDM), avšak je nutné přidat optické filtry na straně OLT kvůli malému ochrannému pásmu mezi vlnovými délkami vzestupného směru obou standardů. V tab. 4.1 jsou zobrazeny předpokládané pilotní vlnové délky pro sestupný a vzestupný směr tohoto plánu.

Tab. 4.1: Pilotní vlnové délky pro plán A

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1334,874	1289,985
1	1344,361	1294,441
2	1349,201	1298,927
3	1354,076	1303,445

Největší nevýhodou tohoto plánu je jeho samotné nasazení ve velice úzkém pásmu, kde se cena navýší kvůli nízkým tolerancím a užším optickým filtrům [29]. Krom potřeby vyhnout se vlnovým délkám v rozsahu 1260–1280 nm kvůli zajištění koexistence s 10G-EPON vlnovým dělením, je také nutné se vyhnout vlnovým délkám v rozsahu 1302–1324 nm, které patří do pásma nulové disperze [26]. Nákladnost je rovněž navýšena, vzhledem k vysoké polarizační vidové disperzi (PMD), potřebou použití optických zesilovačů signálu [26].

Tab. 4.2: Návrh útlumových tříd plánu A

OLT Parametry	PR10	PR20	PR30
Max. vysílací výkon	+5 dBm	+5 dBm	+9 dBm
Min. vysílací výkon	+1 dBm	+1 dBm	+6 dBm
Max. útlum ODN	20 dB	24 dB	29 dB
Min. útlum ODN	5 dB	10 dB	15 dB
Dělicí poměr	1:16	1:16	1:32
TDP	1,5 dB	1,5 dB	1,5 dB
ONU Parametry	PR10	PR20	PR30
Max. vysílací výkon	+5 dBm	+9 dBm	+9 dBm
Min. vysílací výkon	+1 dBm	+5 dBm	+5 dBm
Max. útlum ODN	20 dB	24 dB	29 dB
Min. útlum ODN	5 dB	10 dB	15 dB
TDP	1 dB	1 dB	1 dB

## Plán B

Plán B se rovněž zabývá využitím O-pásma pro všechny vlnové délky, avšak hledá úspornější řešení implementace 1. generace (25 Gb/s EPON) oproti plánu A. Docieno je toho vyhrazením vlnové délky 1260–1280 nm pro vzestupný směr kanálu 1. generace, což dovolí na straně ONU využít vzhledem k širokému 20 nm pásmu ty nejlevnější optické prostředky ve formě nechlazených DML laserů [27].

Vlnové délky použité v plánu B jsou v tab. 4.3. Koexistence s 10G-EPON je kvůli okupaci stejného pásma vzestupného směru nutno zajistit časovým dělením (TDM) [27].

Tab. 4.3: Pilotní vlnové délky pro plán B

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1328,87	1260–1280
1	1343,16	1292,77
2	1347,99	1297,24
3	1352,85	1301,75

K nevýhodám zmíněných v podkapitole 4.2.1 bude navíc u plánu B, díky použití širokého pásma v vzestupném směru, zřejmě potřeba použití dvou SOA zesilovačů [27].

## Plán D

Tento plán částečně vychází z plánu A, avšak pro vlnové délky sestupného směru zvažuje použití C-pásma (1530–1565 nm). Od posunutí do C-pásma si plán slibuje možnost využití nízko nákladových optických diplexorů, nízkého útlumu vlákna a použití zesilovačů EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier) na straně OLT [29].

Pro přenosy v sestupném směru počítá s využitím chlazených EML laserů, zatímco v vzestupném směru je možné využití levnějších chlazených DML laserů. Koexistence s 10G-EPON je možná pomocí vlnového dělení (WDM) [29].

Tab. 4.4: Pilotní vlnové délky pro plán D

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1532,681	1289,985
1	1545,322	1294,441
2	1551,721	1298,927
3	1558,173	1303,445

Nevýhodou C-pásma je vyšší disperze signálu oproti O-pásmu, avšak dle [28] jsou přenosy  $\leq 10$  km pomocí NRZ linkového kódu v C-pásmu možné bez nutnosti kompenzace disperze. Pro přenosy nad 10 km by kompenzace disperze byla nutná, nicméně dle [29] by navýšení celkových nákladů nebylo vysoké, protože je využívá jen malé procento sítí.

### Problémy s disperzí v O-pásmu

Podrobnější studie plánu A z listopadu 2016 naznačují problémy v simulacích s použitou vlnovou délkou kanálu 3, kde dochází vlivem FWM (Four-Wave Mixing) jevů na hranici pásma nulové disperze k poklesu vysílacího výkonu oproti ostatním kanálům [31].

Jako řešení byly navrženy tři možnosti odlišného rozmístění vlnových délek pro vzestupný směr, kde možnosti 1 a 2 pracují s návrhem snížení odstupů kanálů na 400 GHz, zatímco návrh 3 pracuje s původním odstupem 800 GHz, ale vzhledem k posunutí přenosových kanálů mimo pásmo nulové disperze je sníženo ochranné pásmo s 10G-EPON na pouhé 3,3 nm a bude vyžadována implementace koexistenčního filtru pro zachování WDM koexistence [32]. Ačkoliv byla provedena podrobnější studie pouze plánu A, vzhledem k tomu, že plán D používá identické vlnové délky pro vzestupný směr, tak se jej tento problém rovněž týká.

Tab. 4.5: Návrh změn vlnových délek 1

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1338,359	1289,985
1	1343,156	1292,209
2	1346,777	1295,559
3	1349,201	1300,054

Tab. 4.6: Návrh změn vlnových délek 2

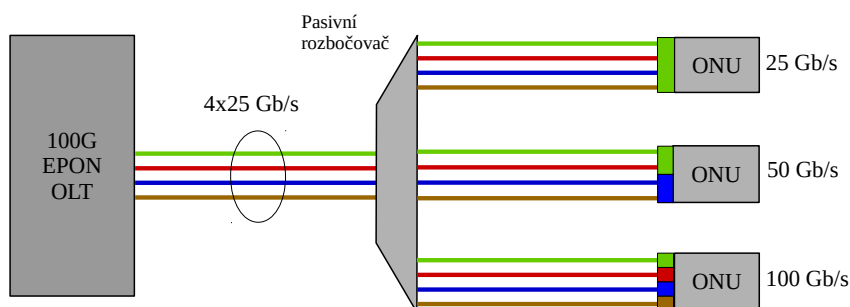
Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1339,555	1291,096
1	1344,361	1293,324
2	1346,777	1295,559
3	1349,201	1300,054

Tab. 4.7: Návrh změn vlnových délek 3

Kanál [-]	Sestupný směr [nm]	Vzestupný směr [nm]
0	1339,555	1285,559
1	1344,361	1289,985
2	1346,777	1294,441
3	1349,201	1298,927

## 4.2.2 Přenosové parametry

Pro získání přenosové rychlosti 100 Gb/s je řešením sdružení 4 vlnových párů o jednotlivých přenosových rychlostech 25 Gb/s využitím techniky sdružování kanálů [21].



Obr. 4.3: Sdružování kanálů u 100G EPON

Na obr. 4.3 je možné vidět reprezentaci plně funkčního 100G EPON. Za povšimnutí stojí 100G EPON OLT, schopné přenosové rychlost 100 Gb/s, zatímco na straně ONU se rychlosti mohou pohybovat na všech třech rychlostních variantách. Starší optické prostředky ONU tedy mohou být připojené k novějšímu OLT, jelikož ONU bude moci přijímat pouze vlnové délky, které mu jeho optické prostředky dovolí [21].

### 1. generace

Trendem všech vlnových plánů zmíněných v podkapitole 4.2.1, je co nejnižší cena optických prvků této generace, obzvláště pak na straně ONU a přesunutí nákladnějších řešení do generací následujících [30].

1. generace, označována také jako 25G EPON, by dle současných plánů měla nabízet symetrickou variantu s rychlostmi 25/25 Gb/s a asymetrickou variantu s rychlostmi 25/10 Gb/s, která je možná díky koexistenci se symetrickou variantou stan-

dardu 10G EPON. Pro přenos byl zvolen linkový kód NRZ [24] s opravným kódováním (FEC), avšak prozatím není přesně známý jeho typ.

Ačkoli se fyzické dosahy mohou lišit v závislosti na výběru vlnových délek, je počítáno s maximálním dosahem  $\geq 20$  km (plány A, B) nebo  $\geq 10$  km (plán D) při dělicím poměru 1:32 pro útlumovou třídu PR30.

## 2. generace

Sdružením dvou kanálů (dvou vlnových párů) o přenosových rychlostech 25 Gb/s vznikne druhá generace standardu 802.3ca, nazývaná jako 50G EPON. Nabídne symetrickou variantu přenosu s rychlostmi 50/50 Gb/s a asymetrickou variantu s použitím pouze původní vlnové délky 25G EPON s rychlostí 50/25 Gb/s [30].

## 3. generace

Finalizovaný standard 100G EPON vznikne sdružením 4 kanálů (vlnových párů) a je očekáván přibližně 5 až 6 let od uvedení 25G EPON. Nabídne symetrickou variantu přenosu s rychlostmi 100/100 Gb/s a asymetrickou variantu s použitím stejných vlnových délek jako předchozí dvě generace [30].

Tab. 4.8: Srovnání parametrů 10G-EPON a 100G EPON

Typ PON	10G-EPON	100G Epon (3. generace)
Označení standardu [-]	802.3av	802.3ca
Sestupný přenos [Gb/s]	10,3125	100 (4×25)
Vzestupný přenos [Gb/s]	10,3125 nebo 1,25	100 (4×25) nebo 50 (2×25)
		plán A – 1335–1354
Sestupné vlnové délky [nm]	1575–1580	plán B – 1329–1353
		plán D – 1532–1558
		plán A – 1290–1304
Vzestupné vlnové délky [nm]	1260–1280	plán B – 1260–1302
		plán D – 1290–1304
Linkové kódování	64B/66B	NRZ
Zabezpečí [-]	obousměrné	obousměrné
Protokol na druhé vrstvě [-]	Ethernet	Ethernet
Maximální dělicí poměr [-]	1:32	1:32
Maximální dosah sítě [km]	20	20
FEC [-]	RS (248, 216)	ano (neznámé)

## 5 SIMULACE PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍ

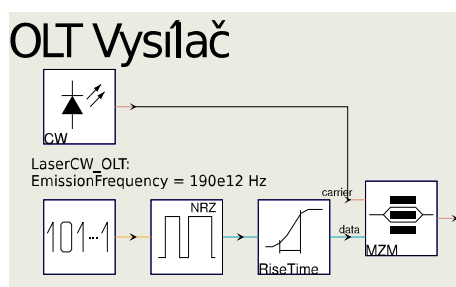
V praktické části je prostor věnován vytvořením návrhu simulace pasivních optických sítí nové generace s následným odsimulováním obousměrného provozu v sítí. Cílem simulací je získání diagramů ok a hodnot bitové chybovosti (BER) pro vybrané vzdálenosti a dělicí poměry. Výsledky všech simulací budou následně vyhodnoceny a porovnány.

K návrhu simulací byl zvolen program VPITransmissionMaker™ ve verzi 9.7, který je součástí balíku komplexních simulačních nástrojů společnosti VPIphotonics. Použitý simulační nástroj obsahuje rozsáhlé knihovny modulů, ve kterých lze nalézt většinu potřebných optických a analytických prvků pro vytvoření jednoduchých i komplexních simulací. Nástroj rovněž umožňuje naprogramování vlastních funkčních modulů v programovacím jazyce Python, tato funkcionality však v práci nebyla využita. Pro snadnější orientaci v nabízených funkcích, je v programu možné vyzkoušet několik ukázkových příkladů.

### 5.1 Simulační celky

#### 5.1.1 Vysílač

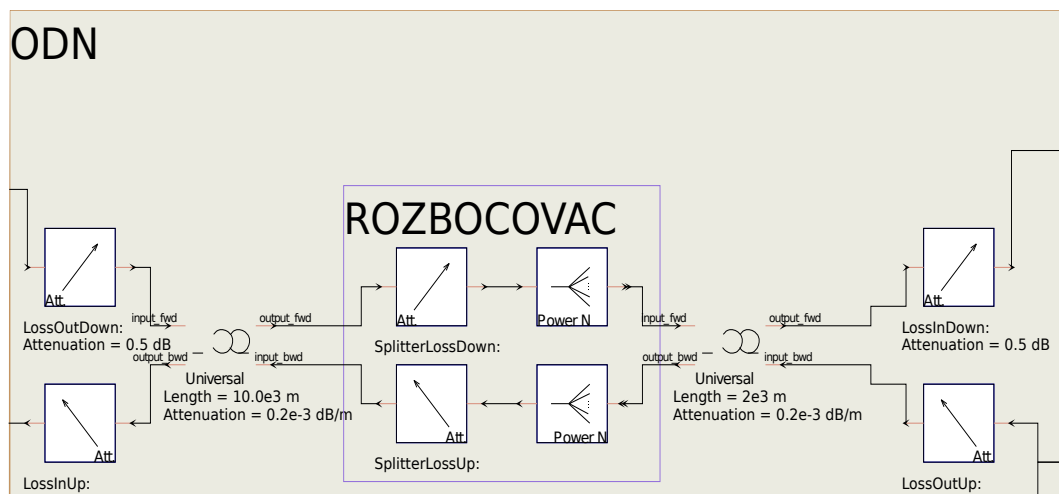
Pro funkci vysílače použitého v OLT i ONU, je použit základní princip optického přenosu. Jak je vyobrazeno na obr. 5.1, vysílač se skládá z modulů generujícího náhodná data (PRBS), kodéru NRZ (Non-return to Zero) a modulátoru typu MZM (Mach-Zehnder Modulator), ke kterému je rovněž připojen laserový modul „LaserCW“ (Continuos wave). Důležitým nastavitelným parametrem je ve vysílači především jeho vysílací výkon v modulu laseru a hodnota Extinction ratio modulátoru.



Obr. 5.1: Návrh optického vysílače

## 5.1.2 Optická distribuční síť

Optická distribuční síť je tvořena hlavním vláknem o délce 10 km. Parametry, které v ODN výrazně ovlivňují provoz sítě jsou měrný útlum, délka vlákna a chromatická disperze. V programu VPITransmissionMaker™ bohužel není možné nastavit správné parametry chování vlákna při různých vlnových délkách pro sestupný i vzestupný směr zároveň. Je nutno nejdříve nastavit parametry pro sestupný směr podle parametrů v tabulce parametrů příslušné simulace a po odsimulování všech scénářů u sestupného směru, přepsat parametry v modulech vlákna na směr vzestupný. Celá distribuční síť je zobrazena na obr. 5.2.



Obr. 5.2: Návrh ODN

V ODN se nachází modul ideálního pasivního rozbočovače typu „1:N“. Tento modul je ideální, tedy bez jakýchkoliv parazitních vlastností. Pro nastavení dělicího poměru, je před samotným rozbočovačem modul vložného útlumu „Attenuation“. Tento modul umožňuje simulovat vložný útlum vybraných dělicích poměrů nastavením hodnot útlumu specifikovaných v Tab. 5.1

Tab. 5.1: Hodnoty pro simulaci dělicích poměrů

Dělicí poměr	Hodnota ideálního útlumu [dB]
1:4	6
1:8	9
1:16	12
1:32	15
1:64	18
1:128	21

Z rozbočovače vede vlákno směřující k ONU. V tomto vlákně je možné změnit parametr délky na hodnoty v Tab 5.2, a tím ovlivňovat vzdálenost mezi OLT a ONU. Nastavení ostatních parametrů musí být stejné jako u hlavního vlákna.

Tab. 5.2: Tabulka simulovaných vzdáleností

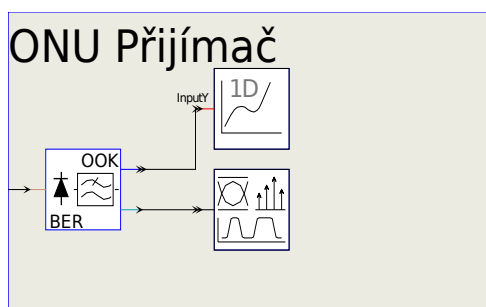
Vzdálenost [km]	12	14	16	18	20	30
-----------------	----	----	----	----	----	----

Další prvek, který přispívá co k nejreálnější reprezentaci simulací je vložný útlum konektorů na všech vstupech a výstupech z ODN. Nastavená hodnota útlumu konektorů ve všech simulacích je 0,5 dB.

### 5.1.3 Přijímač

Přijímač je zastoupen modulem „RX\_OOK\_BER“. Tento modul kombinuje hned několik funkcí. Implementuje kompletní vybavení přijímače, skládající se z fotodiody, vstupních filtrů a obnovy hodin. Dále se v něm nachází i modul pro výpočet odhadu hodnoty BER.

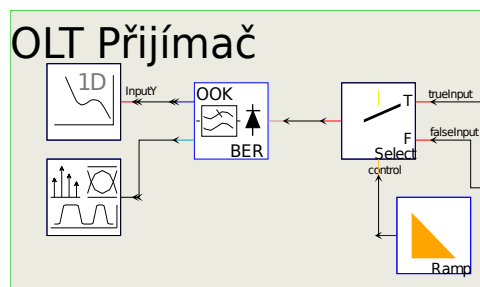
Za samotné zobrazení výsledků BER je zodpovědný jednoduchý modul grafu, jenž umožňuje zobrazit odhadnutou hodnotu BER v závislosti na počtu běhů simulace. Dále je pomocí optického spektrálního analyzátoru (OSA) analyzován optický signál mezi OLT a ONU. OSA zobrazuje výsledky měření do tří grafů, a sice vlnového spektra, elektrického spektra a pak do tzv. „diagramu oka“. Ten svým tvarem vyznačuje kvalitu přenosu v síti a je z něj možné získat hodnotu kolísání zpoždění signálu (jitter) a mezisymbolovu interferenci (ISI).



Obr. 5.3: Návrh optického přijímače pro sestupný směr

Protože je v vzestupném směru použit zpoždovací článek, je nutné se této skutečnosti v programu VPI přizpůsobit, jinak měření skončí chybou na straně přijímače. Počet běhů simulace je nutné nastavit na hodnotu 2 nebo vyšší. Před vstupem do přijímače je přidán modul „select“, který má tři vstupy a jeden výstup. Do vstupu

„true“ je přiveden skutečný signál vedený přes ODN, zatímco do vstupu „false“ je přiveden signál přímo z vysílače ONU. Ten zde má však pouze logický význam, pro správné zaregistrování prvního běhu simulace. Třetím vstupem je vstup „control“ na který je připojen modul „Ramp“, který prvnímu běhu nastaví hodnotu „0“ a v dalších bězích hodnotu inkrementuje o „1“.



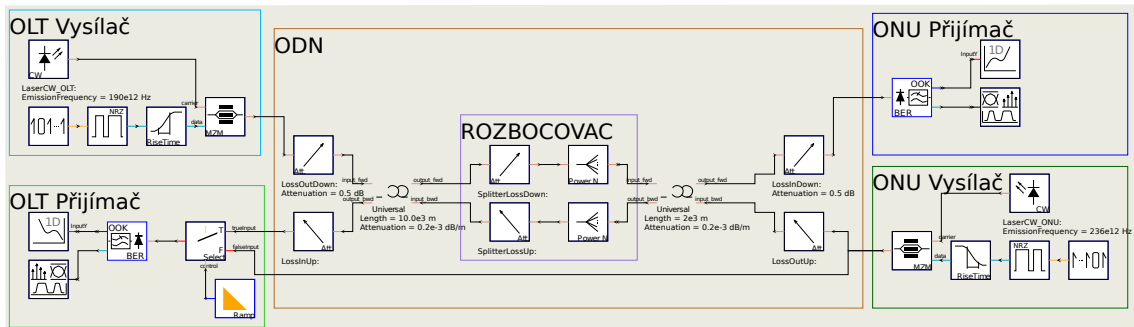
Obr. 5.4: Návrh optického přijímače pro vzestupný směr

## 5.2 Simulace sítě XG-PON

Cílem simulace je obousměrný 10 Gb/s PON systém vycházející z typu XG-PON a útlumové třídy N1. Parametry útlumové třídy N1 se nachází v tab. 5.3. Na obr. 5.5 je možné vidět exportovanou reprezentaci simulovaného XG-PON systému v programu VPITransmissionMaker™.

Tab. 5.3: Parametry útlumové třídy N1

Parametry	OLT	ONU
Max. vysílací výkon	+6 dBm	+7 dBm
Min. vysílací výkon	+2 dBm	+2 dBm
Max. útlum ODN	29 dB	29 dB
Min. útlum ODN	14 dB	14 dB
Minimální Extinction ratio	8,2 dB	9 dB
Citlivost přijímače	-27,5 dBm	-28 dBm
Vlnové délky	1577 nm	1270 nm
Dělicí poměr	1:64	1:64
Linkový kód	NRZ	NRZ
Fyzický dosah	20 km	20 km
BER	$10^{-4}$	$10^{-3}$



Obr. 5.5: Návrh simulace XG-PON

### 5.2.1 OLT

V simulaci je v případě OLT použit standardní sestavení vysílače i přijímače popsané v podkapitole 5.1.1, respektive v podkapitole 5.1.3. V tab. 5.4 jsou popsány všechny změny v OLT oproti výchozímu nastavení jednotlivých modulů.

Tab. 5.4: Parametry OLT v simulaci XG-PON

Parametry	Hodnoty
Vysílací výkon	+6 dBm
Emisní frekvence	190 THz
Linkový kód	NRZ
Extinction ratio	8,2 dB
Citlivost přijímače	-27,5 dBm
BER	$10^{-4}$

### 5.2.2 ODN

Tab. 5.5 popisuje parametry nastavení v modulech vláken. Parametry měrného útlumu, chromatické disperze i Referenční frekvence vlákna zůstávají stejné po celou dobu simulování v jednom směru.

Tab. 5.5: Parametry ODN v simulaci XG-PON

Parametry	Sestupný směr	Vzestupný směr
Měrný útlum vlákna	0,2 dB/km	0,35 dB/km
Chromatická disperze	17 ps/nm/km	-4 ps/nm/km
Ref. frekvence vlákna	190 THz	236 THz

### 5.2.3 ONU

Standardní sestavení vysílače i přijímače z podkapitol 5.1.1, respektive 5.1.3 je u simulace XG-PON použito i na straně ONU.

V modulu PRBS na straně ONU je nutno nastavit přenosovou rychlost na čtvrtinu výchozí hodnoty nebo číselně na hodnotu 2,5 Gb/s, aby byla dodržena asymetrie přenosových rychlostí tohoto standardu. Nastavení parametrů na straně ONU je popsáno v tab. 5.6.

Tab. 5.6: Parametry ONU v simulaci XG-PON

Parametry	Hodnoty
Vysílací výkon	+3 dBm
Emisní frekvence	236 THz
PRBS	BitRateDefault/4
Linkový kód	NRZ
Extinction ratio	9 dB
Citlivost přijímače	-28 dBm
BER	$10^{-3}$

## 5.3 Simulace sítě NG-PON2

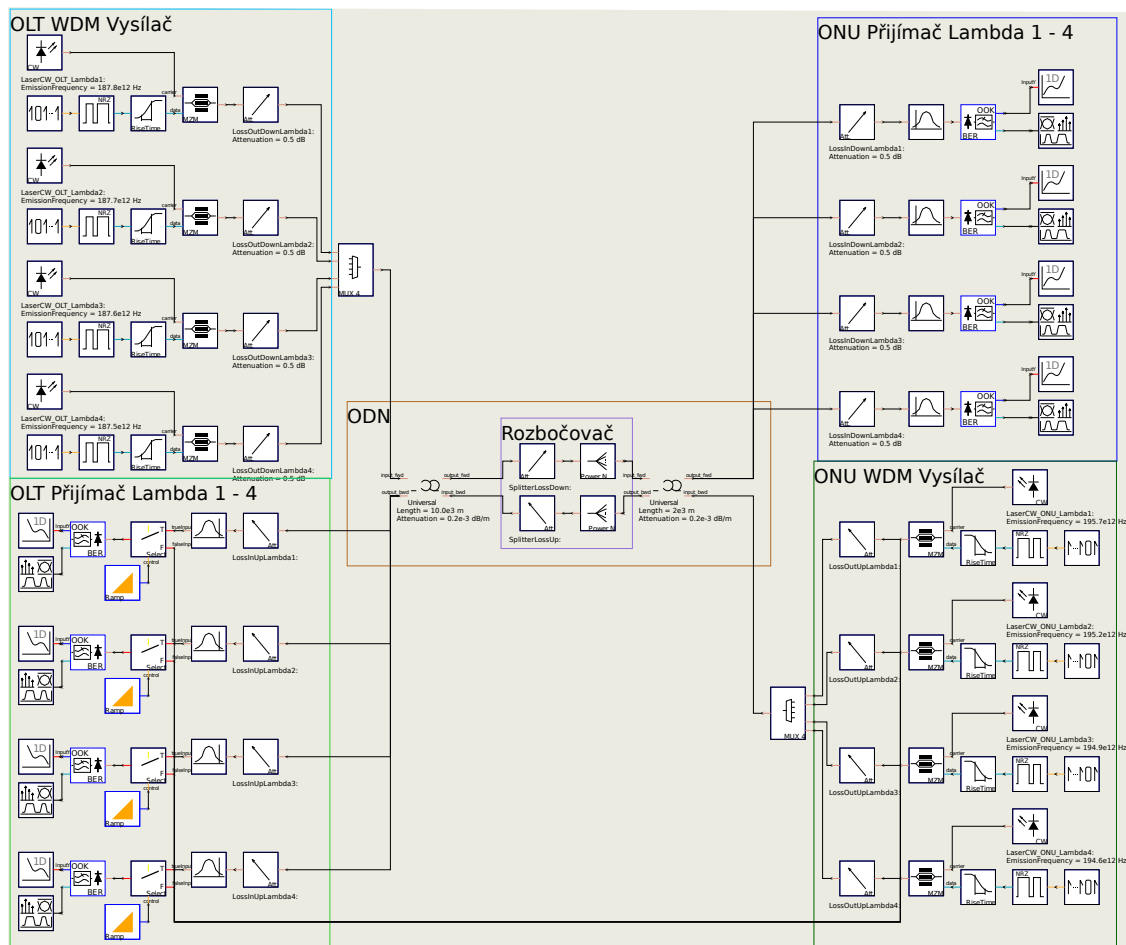
Simulace pasivní optické sítě NG-PON2 obr. 5.6 je první ze simulací standardů nové generace, které jsou v této práci rozebrány. Standard má již definovány útlumové třídy, z nichž byla pro simulaci vybrána třída N1, jejíž parametry se nacházejí v tab. 5.7.

V simulaci je brán ohled na základní parametry standardu, tedy rychlostní poměr 40/10 Gb/s s použitím 4 multiplexovaných kanálů v obou směrech, nikoliv jeho rozšířené možnosti, jako jsou např. souběžné fungování se staršími verzemi standardů založených na typu GPON na stejném ODN s pomocí koexistenčního elementu. Důvodem proč tato funkcionality nebyla použita, spočívá v chybějících prostředcích simulačního softwaru.

Přesná simulace použití přijímače, jak popisuje standard NGPON2, rovněž není možná. Standard definuje „bezbarvá“ ONU, a to díky speciálním optickým filtrům v jejich přijímači, jenž umožňují přeladování i příjem více vlnových délek současně. Tato funkcionality není v simulačním softwaru podporována, proto byla pro co největší přiblížení zvolena cesta 4 nezávislých přijímačů, kde každý přijímač je vybaven vlastním optickým filtrem s možností propustit právě jednu vlnovou délku. Simulace příjmu datového toku s rychlostmi 40/10 Gb/s tak není přesná, jedná se o příjem 4 datových toků o rychlostech 10/2,5 Gb/s pomocí 4 přijímačů.

Tab. 5.7: Parametry útlumové třídy N1

Parametry	OLT	ONU
Max. vysílací výkon	+7 dBm	+9 dBm
Min. vysílací výkon	+2 dBm	+4 dBm
Max. útlum ODN	29 dB	29 dB
Min. útlum ODN	14 dB	14 dB
Minimální Extinction ratio	8,2 dB	8,2 dB
Citlivost přijímače	-26,5 dBm	-28 dBm
Lambda 1	1596 nm	1532 nm
Lambda 2	1597 nm	1535 nm
Lambda 3	1598 nm	1538 nm
Lambda 4	1599 nm	1540 nm
Dělicí poměr	1:64	1:64
Linkový kód	NRZ	NRZ
Fyzický dosah	20 km	20 km
BER	$10^{-3}$	$10^{-4}$



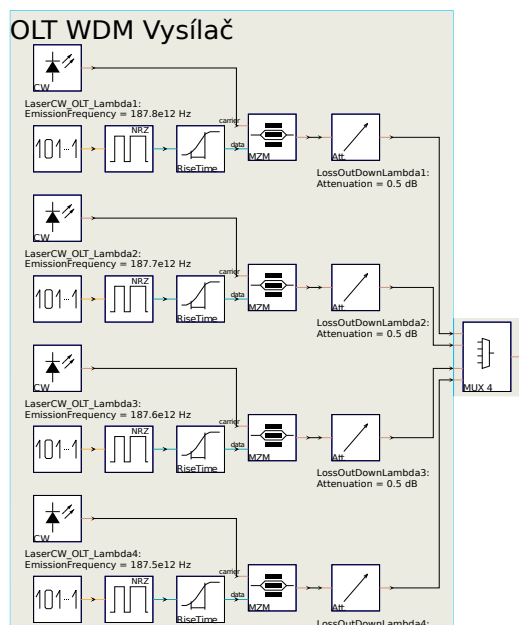
Obr. 5.6: Návrh simulace NGPON2

### 5.3.1 OLT

Ve standardu NG-PON2 je používán vysílač, který sdružuje 4 kanály o různých vlnových délkách do vlnového multiplexoru. V simulaci jsou použity 4 identické vysílače popsané v podkapitole 5.1.1. Výstupy z těchto čtyř vysílačů vedou do modulu ideálního vlnového multiplexoru, a následně do ODN.

Přijímače na straně OLT jsou oproti výchozímu sestavení přijímače z podkapitoly 5.1.3 doplněny o optický filtr, s jehož pomocí je možné k přijímači propustit právě jednu ze čtyř vlnových délek a ostatní odfiltrovat.

V tab. 5.8 jsou vypsány provozní parametry OLT použité v simulaci.



Obr. 5.7: Vysílač s vlnovým multiplexem sítě NGPON2

Tab. 5.8: Parametry OLT v simulaci NGPON2

Parametry	Hodnoty
Vysílací výkon	+6 dBm
Emisní frekvence $\lambda_1$	187,8 THz
Emisní frekvence $\lambda_2$	187,7 THz
Emisní frekvence $\lambda_3$	187,6 THz
Emisní frekvence $\lambda_4$	187,5 THz
Linkový kód	NRZ
Extinction ratio	8,2 dB
Citlivost přijímače	-26,5 dBm
BER	$10^{-3}$

### 5.3.2 ODN

Tab. 5.9 popisuje parametry nastavení v ODN. Parametry měrného útlumu jsou stejné pro oba směry, zatímco chromatická disperze a Referenční frekvence vlákna je nutné měnit podle měřeného směru, respektive podle měřené vlnové délky.

Tab. 5.9: Parametry ODN v simulaci NGPON2

Parametry	Sestupný směr	Vzestupný směr
Měrný útlum vlákna	0,2 dB/km	0,2 dB/km
Disperze	18 ps/nm/km	16,6 ps/nm/km
Ref. frekvence $\lambda_1$	187,8 THz	195,7 THz
Ref. frekvence $\lambda_2$	187,7 THz	195,2 THz
Ref. frekvence $\lambda_3$	187,6 THz	194,9 THz
Ref. frekvence $\lambda_4$	187,5 THz	194,6 THz

### 5.3.3 ONU

Podobně jako u OLT, i v ONU je použit vysílač o čtyřech sdružených kanálech pomocí vlnového multiplexeru, ovšem s tím rozdílem, že se jedná o kanály s přenosovou rychlostí  $4 \times 2,5$  Gb/s, nastavenou v modulech PRBS. Pro vzestupný směr bylo použito úzké vlnové pásmo, blíže popsané v tab. 3.2, kapitoly NG-PON2

V části přijímače jsou použity 4 nezávislé přijímače pro příjem 4 vlnových délek podle úvodního popisu k simulaci NG-PON2 5.3. Velmi atraktivní funkce bezbarvých ONU není simulačním softwarem podporována, a proto jsou v optických filtrech vysílané vlnové délky pevně nastaveny.

Tab. 5.10: Parametry ONU v simulaci NGPON2

Parametry	Hodnoty
Vysílací výkon	+4 dBm
Emisní frekvence $\lambda_1$	195,7 THz
Emisní frekvence $\lambda_2$	195,2 THz
Emisní frekvence $\lambda_3$	194,9 THz
Emisní frekvence $\lambda_4$	194,6 THz
Moduly PRBS	BitRateDefault/4
Linkový kód	NRZ
Extinction ratio	8,2 dB
Citlivost přijímače	-27,5 dBm
BER	$10^{-4}$

## 5.4 Simulace sítě 100G EPON

Druhou ze simulací standardů nové generace je 100G EPON. Tento standard se aktuálně nachází ve velmi rané fázi vývoje a nebude dokončen dříve než v roce 2019. K dubnu roku 2017 prozatím stále není schválen konkrétní vlnový plán, který by standard měl použít. Nejsou k dispozici plány pro útlumové třídy, použité typy laserů ani přijímačů.

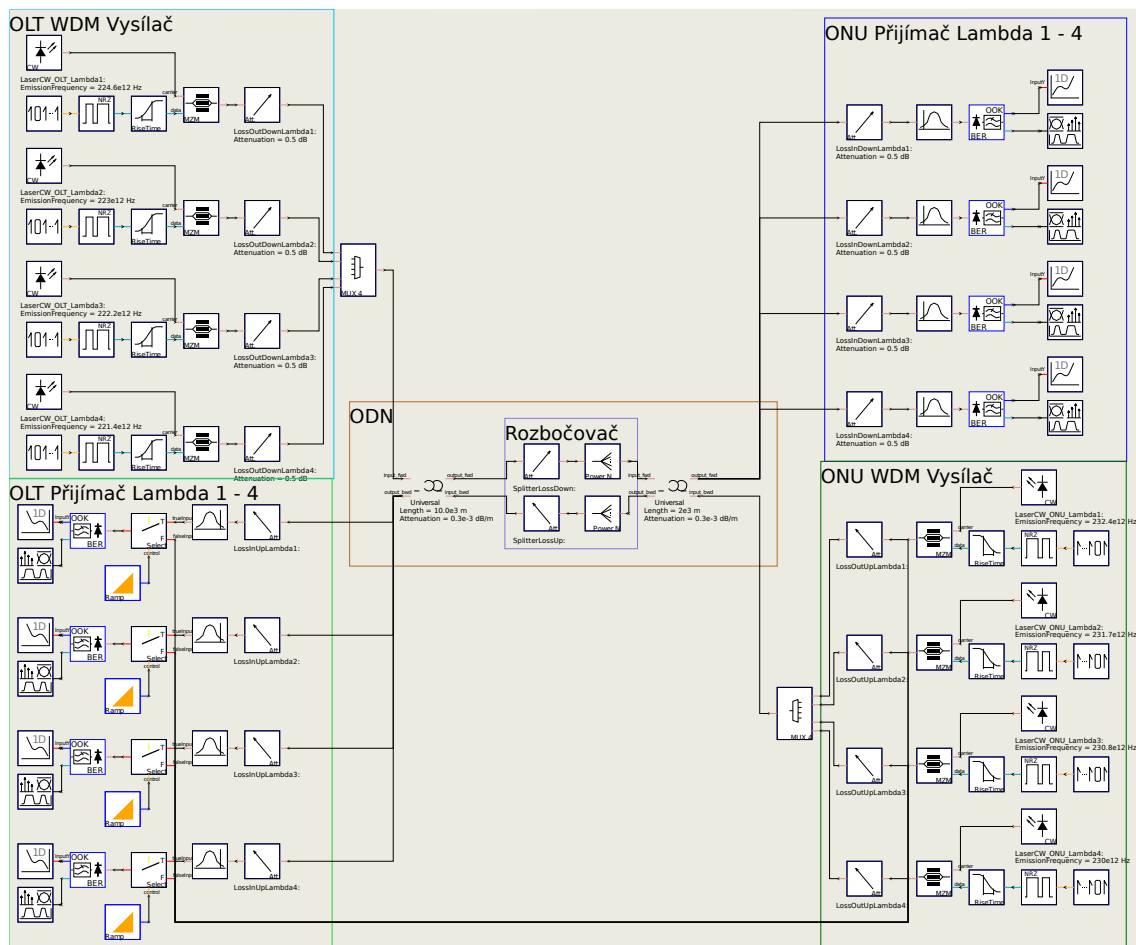
Vzhledem k této skutečnosti byl k účelům simulace použit identický návrh, jako u simulace NG-PON2, protože by se strukturně od sebe neměli v základní funkcičnosti lišit. Rozdíly v standardech jsou především na straně ONU, kde u standardu 100G EPON nebudou použity laditelné optické filtry nebo bezbarvá ONU.

V simulaci 100G EPON, jak ukazuje obr. 5.8, je použit návrh simulace NG-PON2. V globálních parametrech této simulace je nicméně nutné změnit hodnotu výchozího nastavení přenosové rychlosti (BitRateDefault) na 25 Gb/s.

V tab. 5.11 se nachází parametry útlumové třídy PR30 standardu 10G-EPON [34]. Předpokládané parametry z tab. 4.2 nebyly použity, protože se jedná pouze o částečný návrh, nikoliv finální řešení.

Tab. 5.11: Parametry útlumové třídy PR30

Parametry	OLT	ONU
Max. vysílací výkon	+5 dBm	+9 dBm
Min. vysílací výkon	+2 dBm	+4 dBm
Max. útlum ODN	29 dB	29 dB
Min. útlum ODN	14 dB	15 dB
Minimální Extinction ratio	9 dB	6 dB
Citlivost přijímače	-26 dBm	-28 dBm
Lambda 1	1335 nm	1290 nm
Lambda 2	1344 nm	1294 nm
Lambda 3	1349 nm	1299 nm
Lambda 4	1354 nm	1303 nm
Dělicí poměr	1:32	1:32
Linkový kód	NRZ	NRZ
Fyzický dosah	20 km	20 km
BER	$10^{-3}$	$10^{-4}$

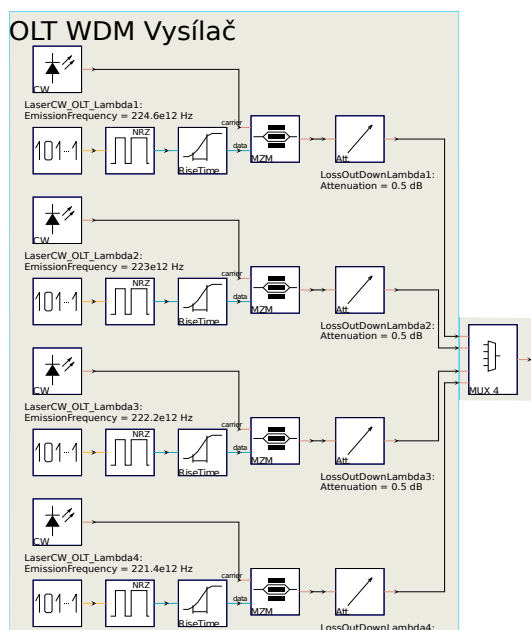


Obr. 5.8: Návrh simulace 100G EPON

### 5.4.1 OLT

Ačkoliv nejsou známy finální specifikace vysílače, je známo již nyní, že bude použit princip vlnového sdružení čtyřech kanálů o rychlostech 25 Gb/s. Na rozdíl od standardu NG-PON2, nastane sdružování kanálů až od 2. generace tohoto standardu, sdružením dvou vlnových délek. Výsledný standard bude sdružovat za pomoci vlnového multiplexoru 4 vlnové délky.

V simulaci je simulován pouze finální standard, tedy vlnový multiplex 4 vlnových délek obr. 5.9. Použité vlnové délky byly převzaty z původní podoby vlnového plánu A, coby nejrozpracovanější verze v době simulace. Použité parametry pro nastavení OLT jsou vyznačeny v tab. 5.12.



Obr. 5.9: Vysílač s vlnovým multiplexem sítě 100G EPON

Tab. 5.12: Parametry OLT v simulaci 100G Epon

Parametry	Hodnoty
Počáteční vysílací výkon	+5 dBm
Emisní frekvence $\lambda_1$	224,6 THz
Emisní frekvence $\lambda_2$	223,0 THz
Emisní frekvence $\lambda_3$	222,2 THz
Emisní frekvence $\lambda_4$	221,4 THz
Linkový kód	NRZ
Extinction ratio	9 dB
Citlivost přijímače	-27,5 dBm
BER	$10^{-4}$

## 5.4.2 ODN

Ačkoliv je u třídy PR30 specifikován pouze dělicí poměr 1:32 na vzdálenost 20 km, byly pro srovnávací účely provedeny simulace i pro dělicí poměry 1:64 a 1:128. Tab. 5.13 popisuje parametry nastavení v modulech vláken.

Tab. 5.13: Parametry ODN v simulaci 100G Epon

Parametry	Sestupný směr	Vzestupný směr
Měrný útlum vlákna	0,3 dB/km	0,35 dB/km
Disperze	-3 ps/nm/km	-4 ps/nm/km
Ref. frekvence	224,6 THz	232,4 THz
Ref. frekvence	223,0 THz	231,7 THz
Ref. frekvence	222,2 THz	230,8 THz
Ref. frekvence	221,4 THz	230,0 THz

## 5.4.3 ONU

O podobě ONU, standardu 100G EPON, je v současné chvíli známo velice málo. Je známo, že budou využity optické filtry schopné přijímat jeden, dva nebo všechny čtyři vlnové délky. V tab. 5.14 jsou vypsány použité nastavení parametrů na straně ONU.

Tab. 5.14: Parametry ONU v simulaci 100G Epon

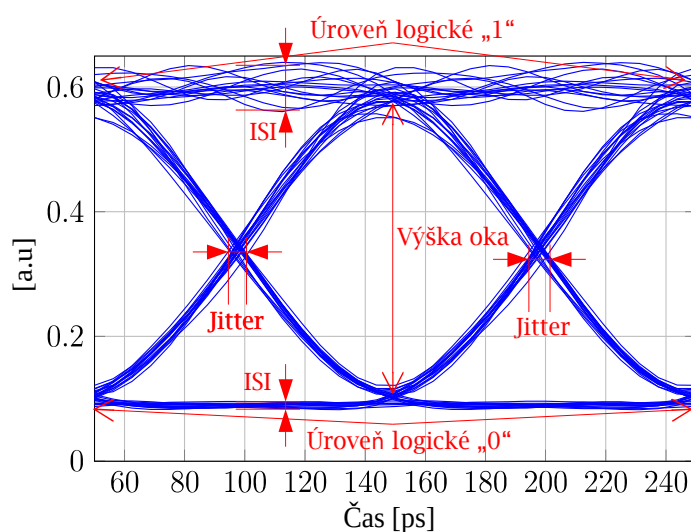
Parametry	Hodnoty
Počáteční vysílací výkon	+4 dBm
Emisní frekvence $\lambda_1$	232,4 THz
Emisní frekvence $\lambda_2$	231,7 THz
Emisní frekvence $\lambda_3$	230,8 THz
Emisní frekvence $\lambda_4$	230,0 THz
Linkový kód	NRZ
Extinction ratio	6 dB
Citlivost přijímače	-28 dBm
BER	$10^{-4}$

## 5.5 Výsledky simulací

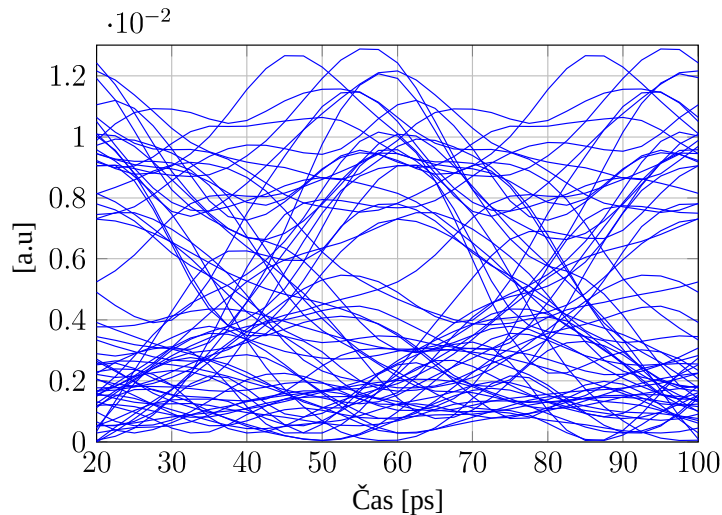
Výstup všech simulačních scénářů tvoří dva typy výsledků pro každý scénář. Simulačním scénářem je myšlena simulace provozu sítě podle určitého dělicího poměru na danou vzdálenost, směr a vlnovou délku.

Prvním výsledkem je bitová chybovost (BER). Hodnota BER vyjadřuje počet chybně přenesených bitů digitálního signálu vůči celkovému počtu přijatých bitů za určitou dobu. Doba je v simulacích stanovena na jeden simulační běh, v případě simulace vzestupného směru na dva simulační běhy, kdy první bude vždy nulový. Komunikační systém má vždy specifikovanou maximální hodnotu BER, při které je schopen kvalitního přenosu. Mezi parametry, ovlivňující BER v přenosových systémech této práce, jsou, vzhledem k simulovaným ideálním podmínkám, měrný útlum, rozbočovací poměr a disperze.

Dalším výsledkem je tzv. diagram „oka“. Je využíván především k získání představy o kvalitě signálu a efektu rušících vlivů v digitálních systémech. Vzniká superpozicí všech možností přenesených bitových sekvencí a od výsledných diagramů jsou očekávány viditelně zhoršující se vlastnosti optického přenosu, které by měly způsobit postupnou degradaci jasně rozeznatelného diagramu oka. Na obr. 5.10 je zobrazen jasně čitelný diagram oka, doplněný o popis. Vytyčeny jsou vlastnosti ovlivňující celkovou kvalitu signálu. Mezisymbolová interference (ISI) je forma zkreslení zapříčiněná špatnou posloupností symbolů. Jedná se o nežádoucí vliv na chybovost v přijímači, který lze snížit opravným kódováním. Dalším nežádoucím vlivem je tzv. jitter, nebo-li kolísání zpoždění. Ideální diagram je možné srovnat s diagramem nečitelným na obr. 5.11.



Obr. 5.10: Diagram oka kvalitního signálu



Obr. 5.11: Diagram oka nečitelného signálu

V této podkapitole jsou výsledky BER prezentovány pouze pomocí vykreslených grafů vlnové délky 1, kompletní výsledky BER pro všechny simulační scénáře se nachází v příloze B. V dokumentu se dále diagramy oka nacházejí v příloze A, a to pro dělicí poměry 1:4, 1:16 a 1:64. Diagramy jsou rovněž vykresleny pouze pro vlnovou délku 1. Zdrojová data diagramů v souboru .csv, se nacházejí na přiloženém CD viz příloha C.

### 5.5.1 Výsledky simulace XG-PON

Tato simulace slouží k získání výchozích hodnot pro porovnání standardů nové generace, které jsou aktuálně stále ve vývoji a nejsou prozatím dostupné informace z reálného nasazení.

Vzhledem k použití vlnových délek v jiných optických pásem, jako způsob oddělení sestupného (L-pásmo) a vzestupného (O-pásmo) směru, by v každém kroku simulace měly být pozorovatelné rozdílné charakteristiky úpadku kvality signálu a růstu bitové chybovosti.

#### Diagramy oka

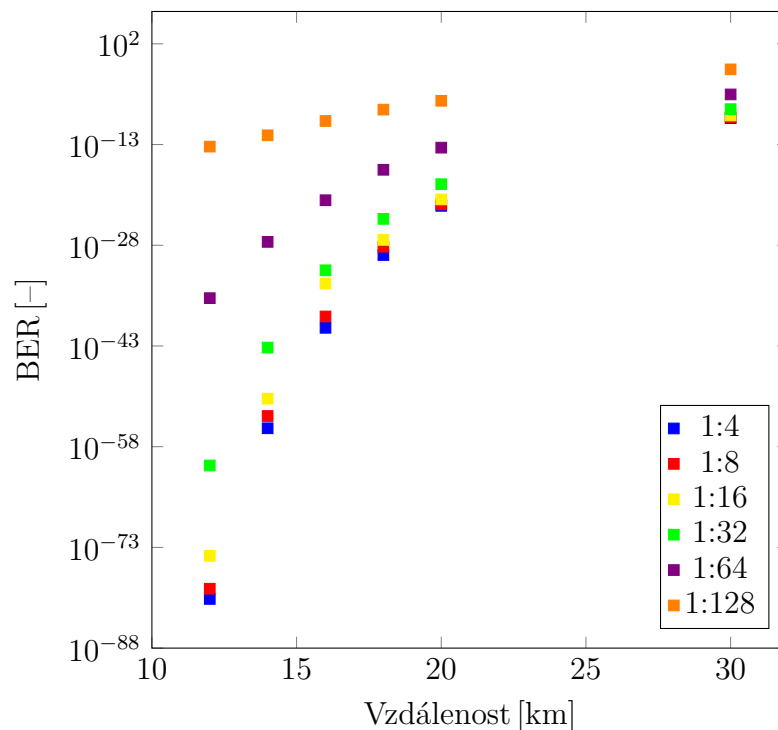
U dělicího poměru 1:4, leč se jedná o rozdílná vlnová pásma, nelze pozorovat příliš mnoho rozdílů. Signál je pro oba směry a všechny vzdálenosti nezkraslený. U sestupného směru je pouze možné zpozorovat nepatrně vyšší rozptyl ISI a jitteru obr. A.1. Minimální rozdíly pokračují i pro dělicí poměr 1:16 obr. A.3, kdy znatelnější rozdíl lze zaznamenat až u dělicího poměru 1:64. Zatímco v sestupném směru obr. A.5 je diagram oka stále snadně rozeznatelný pro všechny vzdálenosti, vzestupný směr

obr. A.6 zaznamenal výrazný nárůst ISI u obou úrovní signálu. Významně narostl oproti předchozímu diagramu i jitter. Tento signál lze zhodnotit jako čitelný, byť těžce. V reálném přenosovém systému by kvalita signálu byla posílena opravným kódováním RS(255,233), což by zajistilo výrazně nižší rozptyl ISI a celkovou degradaci signálu na tuto vzdálenost.

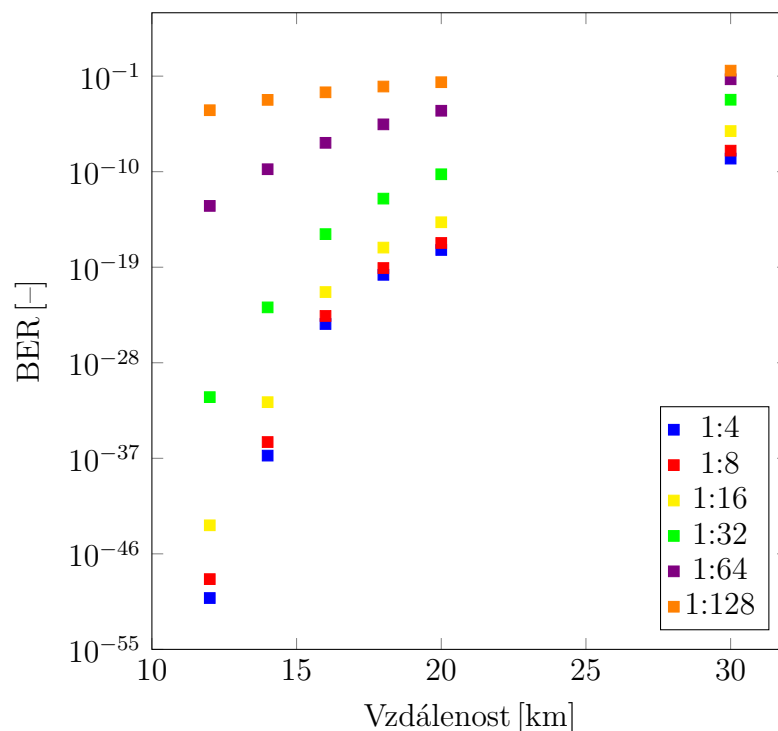
## BER

V grafech 5.12 a 5.13 jsou vykresleny charakteristiky BER pro sestupný, respektive vzestupný směr simulace XG-PON. Z charakteristik plynou zásadní rozdíly v hodnotách chybovosti, kde charakteristiky sestupného směru výrazněji mění svůj průběh až při dělicím poměru 1:64. Charakteristika vzestupného směru poukazuje na mnohem horší přenosové vlastnosti, způsobené nižším vysílacím výkonem a vyšším měrným útlumem O pásma. S implementací opravného kódování by se hodnota bitové chybovosti v vzestupném směru zvedla o několik řádů a lépe by reprezentovala reálný systém.

Z vyobrazených charakteristik lze potvrdit specifikace třídy N1, a konstatovat její nevyužitelnost pro dělicí poměry vyšší než 1:64 a vzdálenost 20 km bez použití aktivních prvků a opravného kódování. Dělicí poměr 1:128 by dle odhadu, na základě výsledků, byl možný na vzdálenosti nižší než 10 km.



Obr. 5.12: Závislost BER na vzdálenosti v sestupném směru sítě XG-PON



Obr. 5.13: Závislost BER na vzdálenosti v vzestupném směru sítě XG-PON

### 5.5.2 Výsledky simulace NG-PON2

Použití vlnových délek v pásmu L, pro oba směry simulace NG-PON2, zajišťuje relativně stejné přenosové vlastnosti. Na charakteristiky BER by tak měl působit pouze rozdílný vysílací výkon a mírný rozdíl v přednastavené disperzi vláken.

Diagramy oka by měli ukázat přibližně stejný rozptyl ISI a jitteru, byť s rozdílnými amplitudami vlivem rozdílných vysílacích výkonů.

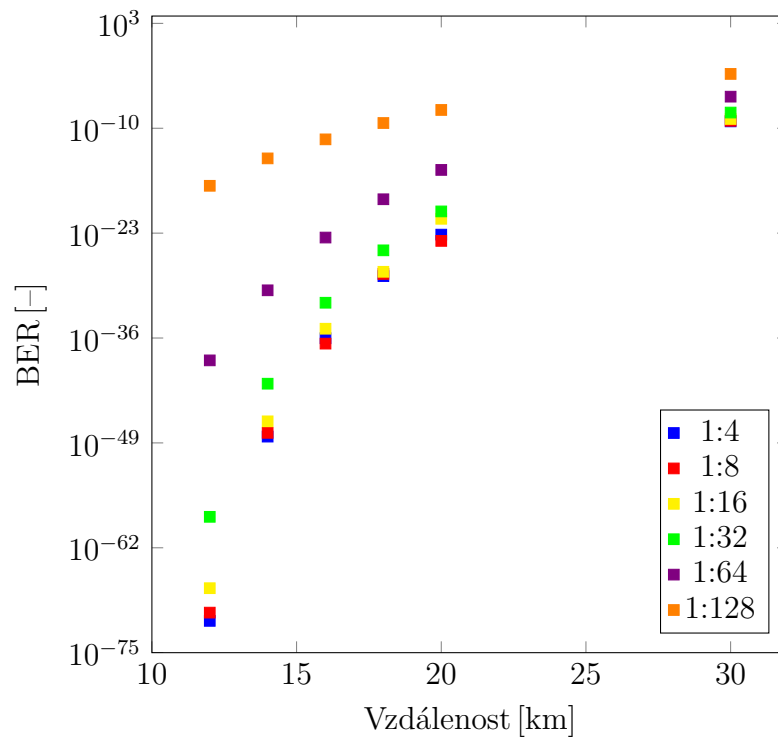
#### Diagramy oka

Ve výsledných diagramech pro dělicí poměry 1:4 a 1:16 je možné zpozorovat jasně čitelné diagramy oka bez viditelné degradace signálu nebo zvýšeného rozptylu ISI a jitteru viz přílohy A.2.1, A.2.2. U dělicího poměru 1:64 dochází u vzestupného směru obr. A.12 k výraznějšímu nárůstu ISI, avšak diagram je s přehledem považován za čitelný. Z výsledků diagramů plyne bezproblémová kvalita signálu v obou směrech pro dělicí poměr 1:64 a vzdálenosti 20 km, jenž je třídou N1 specifikován.

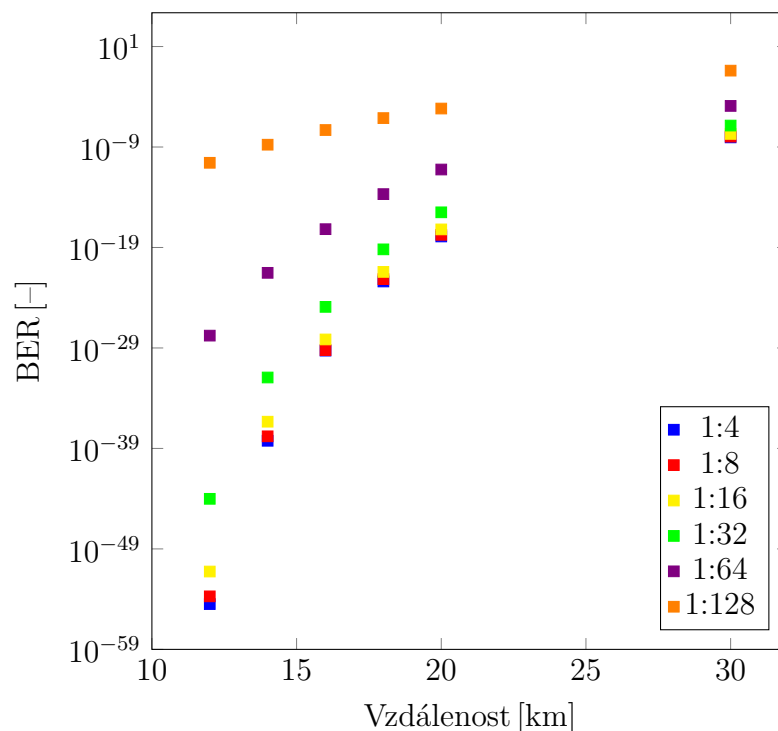
## BER

Výsledná bitová chybovost simulace NG-PON2 dopadla výrazně lépe oproti svému předchůdci. Výrazný rozdíl nastal v vztupném směru, kde se již nesetkáváme s výrazným růstem chybovosti u vyšších dělicích poměrů. Jak dokazují charakteristiky BER na obr. 5.14 a 5.15, třída N1 u pasivní optické sítě NG-PON2 je vhodná pro použití až na vzdálenost 30 km pro dělicí poměry 1:4, 1:8 a 1:16.

S vhodnou implementací opravného kódování, lze předpokládat, že by tato vzdálenost mohla být ještě navýšena. Samotná funkčnost specifikace této třídy byla prokázána a za předpokladu implementace FEC by v síti neměl být problém použít i dělicí poměr 1:128 na vzdálenost do 20 km.



Obr. 5.14: Závislost BER na vzdálenosti v sestupném směru sítě NG-PON2



Obr. 5.15: Závislost BER na vzdálenosti v vzestupném směru sítě NG-PON2

### 5.5.3 Výsledky simulace 100G EPON

Simulace sítě 100G EPON byla vytvořena na základě malého množství relevantních informací. S použitím návrhu simulace NG-PON2, avšak s nastavením parametrů zmíněných v podkapitole 5.4, bylo dosaženo nejbližší možné přiblížení k finálnímu standardu, jaké je v současnosti možné.

#### Diagramy oka

V případě dělicího poměru 1:4 nelze pozorovat žádné výrazné rušení signálu v obou směrech obr. A.13 a A.14. Jak je však možné zpozorovat na obr. A.15., již u dělicího poměru 1:16 můžeme viditelný nárůst degradace signálu a nárůstu ISI i jitteru, především pak v vzestupném směru na vzdálenost 16 a 20 km obr. A.16.

Pro dělicí poměr 1:64 a vzdálenost 20 km není třída PR30, standardu 10G-EPON, specifikována, pro udržení konzistence výsledků však byla provedena. Nevhodnost tohoto dělicího poměru byla potvrzena na obr. A.17 a A.18, na který dochází k silné degradaci signálu v obou směrech, vysokou úrovní ISI a jitteru. Funkčnost by při implementaci vhodného opravného kódování byla možná pouze pro vzdálenosti do 12 km.

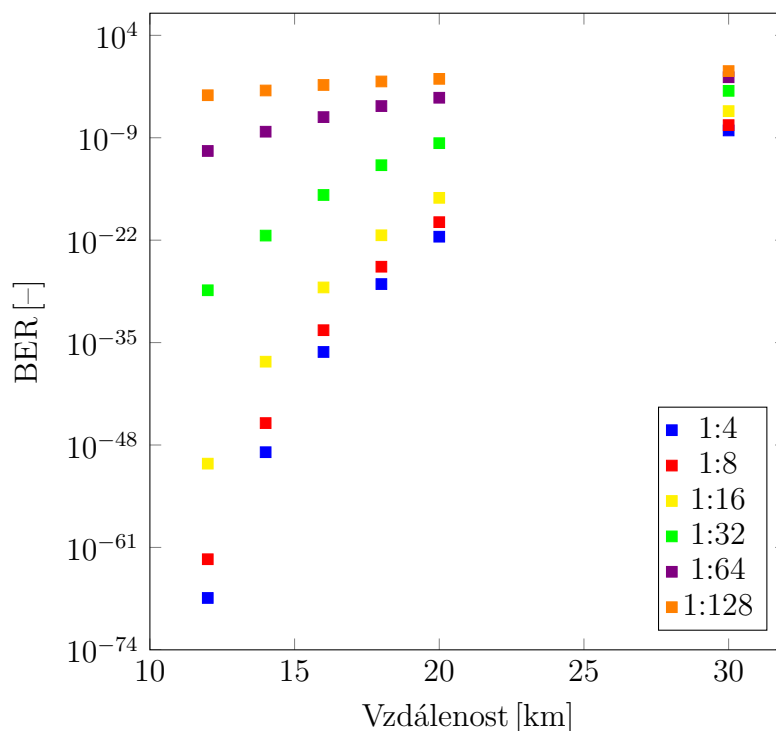
## BER

Ve výsledcích bitových chybovostí na obr. 5.16 a 5.17 je možné vidět charakteristiky dělicího poměru 1:4 a 1:8, které kopírují průběh simulace NG-PON2 s pouze rozdílem několika málo desetinných řádů.

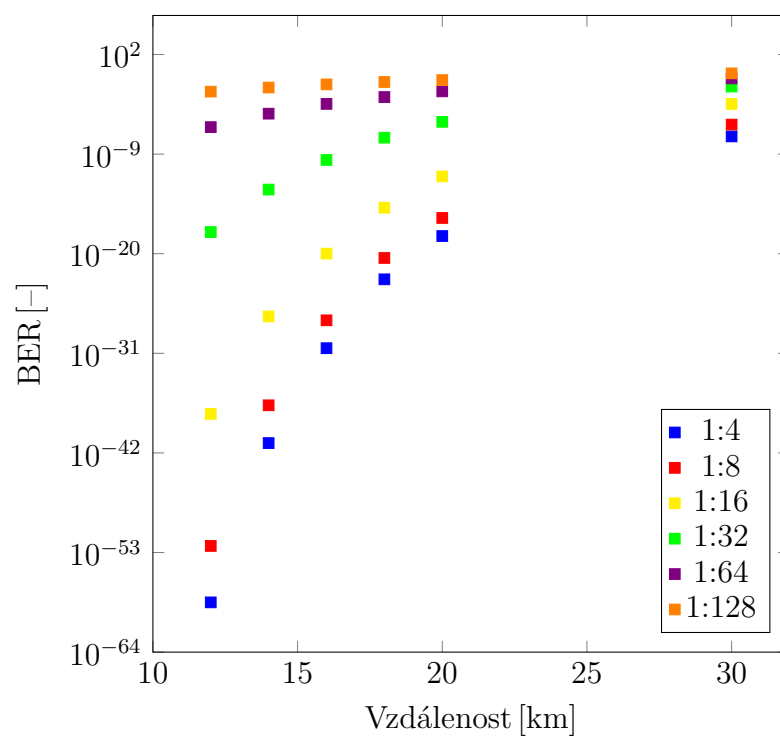
Výrazné zvýšení chybovosti, asi o deset řádů, nastává obzvláště u vzestupného směru dělicího poměru 1:16. Ve srovnání se simulací NG-PON2 nastává výrazný pozorovatelný rozdíl u dělicího poměru 1:32, kdy chybovost prudce roste až k hranici chybové akceptovatelnosti.

Použitelnost vyšších dělicích poměrů na simulované vzdálenosti je dle výsledků BER takřka nemožná, a to s nejvyšší pravděpodobností ani s implementací FEC. Výjimku tvoří vzdálenost 12 km u poměru 1:64, kdy je hodnota BER téměř identická s hodnotou pro dělicí poměr 1:32 a vzdálenost 20 km.

Ačkoliv není možné pokládat výsledky této simulace za směrodatné, je zřejmé, že budou specifikace útlumových tříd nového standardu muset projít výraznější změnou.



Obr. 5.16: Závislost BER na vzdálenosti v sestupném směru sítě 100G EPON



Obr. 5.17: Závislost BER na vzdálenosti v vztupném směru sítě 100G EPON

## 6 ZÁVĚR

Bakalářská práce je úvodem teoretické části zaměřena na vysvětlení základních principů fungování optických přístupových sítí (OAN), z nichž byly stručně srovnány dva základní typy, a sice optické sítě aktivní a pasivní. Následně bylo navázáno na téma pasivní optické sítě (PON) s popsáním jejich základních funkčních prvků a srovnáním typů optických přípojek FTTx.

Po seznámení s organizacemi, odpovědnými za převážnou část vývoje nových standardů, jsou popsány a porovnány parametry standardů PON, především pak standardy GPON a EPON. Dále jsou popsány a porovnány navazující standardy

V hlavní části teoretické části, se práce zabývá aktuálně vyvíjenými standardy nové generace pasivních přístupových sítí. Jsou rozebrány důvody, proč jsou tyto standardy potřeba, a dále jsou dle nejaktuálnějších informací podrobně rozebrány jejich známé parametry a funkce, které nabízí.

Praktická část byla zaměřena na získání co možná nejrealnější představy o provozních vlastnostech sítí, a to pomocí simulací pasivních optických sítí NG-PON2 a 100G Epon s odkazem na síť typu XG-PON, jakožto zástupce současné generace PON. Simulace byly navrženy, a následně provedeny pomocí simulačního softwaru VPITransmissionMaker™ 9.7.

U simulací byl první krok jejich samotný návrh. Ten se skládá celkem ze tří celků, a sice vysílače, optické distribuční sítě a přijímače, detailně popsaných v podkapitole 5.1. V simulaci XG-PON bylo použita základní podoba těchto celků, zatímco u simulací sítí nové generace bylo potřeba simulační celky modifikovat o funkční vlnový multiplex 4 vlnových délek.

Jako výstupy simulací slouží hodnoty bitové chybovosti a diagramy oka. Protože obousměrná simulace jedné vlnové délky čítá celkem 72 simulačních scénářů, jsou, kvůli jejich velkému množství, výsledky BER rozebrány pouze na vykreslených charakteristikách jedné vlnové délky a kompletní tabulky s výslednou BER se společně s diagramy ok nacházejí v přílohách A a B.

Z výsledků simulací je patrná výrazná nadřazenost standardu NG-PON2, jehož útlumová třída N1 by po implementaci vhodného opravného kódování zvládala i dělicí poměr 1:128 na vzdálenost 20 km. Nabízí tak výrazně lepší provozní vlastnosti než její předchůdce, standard XG-PON, a výrazným způsobem překonává aktuálně vyvíjený standard 100G EPON. Ten se svými výsledky umístil za simulaci XG-PON, na niž ztrácí v použití v dělicí poměrech nad 1:32 vlivem vyšší bitové chybovosti. Je však důležité zmínit, že standardy EPON dosud nebyly pro vyšší dělicí poměry specifikovány a na základě elektronické komunikace s předsedou *100G-EPON Task Force*, panem Curtisem Knittlem, je nepravděpodobné, že by se to u nového standardu

měnilo. Dále je nutné zmínit, že výsledky simulace 100G EPON nelze považovat za jednoznačně směrodatné, a to především kvůli rané fázi vývoje standardu, kdy pro účely simulace nebyly z důvodu jejich nedostupnosti použity oficiální specifikace.

Z hlediska lepší využitelnosti pro distribuci vysokorychlostního Internetu se jasným vítězem jeví standard NG-PON2 se svým vyšším dělicím poměrem, je však potřeba zohlednit i další faktory. Důležitým faktorem bude cena těchto nových řešení. Z historického hlediska byly standardy EPON výrazně cenově dostupnější oproti řešení GPON. Aktuálně není možné diskutovat nad cenovým rozdílem nových standardů, lze však předpokládat, že by se cenový rozdíl mezi nimi mohl snížit z důvodu použití nového vysílače s rychlostí 25 Gb/s standardu 100G EPON. Důležitějším faktorem než cena je vzájemná kompatibilita standardů na stejném ODN. Je vysoce nepravděpodobné, že by telekomunikační operátoři se sítěmi typu EPON a 10G-EPON přecházeli na standard NG-PON2 a opačně, protože by přišli o možnost provozovat tyto služby ve vzájemné kompatibilitě ve své síťové infrastruktuře.

## LITERATURA

- [1] ŠKORPIL, V. *Přístupové a transportní sítě*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2012 [cit. 2016-10-20]. ISBN 978-80-214-4457-7.
- [2] FILKA, M. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. 1. vyd. Brno. 369 s. ISBN 978-80-214-4444-7.
- [3] KEISER, G. *FTTX concepts and applications* První vydání. Canada: Wiley, 2006. 312 s. ISBN 978-0-471-70420-1.
- [4] Fiber To The Antenna For Wireless *The Fiber Optic Association, Inc.* [online]. 2014 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z URL: <<http://www.thefoa.org/tech/ref/appln/FTTA.html>>.
- [5] ITU-T in brief. *ITU* [online]. [cit. 2016-11-1]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/en/ITU-T/about/Pages/default.aspx>>.
- [6] About FSAN *FSAN* [online]. [cit. 2016-11-1]. Dostupné z URL: <<https://www.fsan.org/>>.
- [7] About IEEE. *IEEE* [online]. [cit. 2016-11-1]. Dostupné z URL: <<https://www.ieee.org/about/index.html>>.
- [8] LAFATA, P. a J. VODRÁŽKA Současné a budoucí varianty pasivních optických přístupových sítí. *Elektrorevue* [online] 26. 7. 2009 [cit. 2016-10-20]. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/45/\soucasne-a-budouci-varianty-pasivnich-opticky-ch-pristupovych-siti/>>.
- [9] G.984.1: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics. *ITU* [online]. 2008 [cit. 2016-11-5]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1-200803-I/en>>.
- [10] G.984.5: Gigabit-capable passive optical networks (GPON): Enhancement band. *ITU* [online]. 2008 [cit. 2016-11-5]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.5/en>>.
- [11] PON Types APON BPON GPON EPON WDM-PON. *GPON Solution* [online]. 2012 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z URL: <<http://gponsolution.com/pon-types-apon-bpon-gpon-epon-wdm-pon.html>>.

- [12] What's The Difference Between EPON And GPON Optical Fiber Networks? *Electronic design* [online]. 2014 [cit. 2016-10-23]. Dostupné z URL: <<http://electronicdesign.com/what-s-difference-between/what-s-difference-between-epon-and-gpon-optical-fiber-networks>>.
- [13] G.987.1: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements *ITU* [online]. 2008 [cit.2016-11-5]. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201603-I/en>>.
- [14] LAFATA, P. a J.VODRÁŽKA Pasivní optická síť 10GEPON. *Elektrorevue* [online] 31.8.2010, 12(4) [cit. 2016-11-5]. ISSN 1213-1539. Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/10/pasivni-opticka-sit-10gepon/>>.
- [15] *The Future of GPON, XGS-PON and NG-PON2* YouTube [online]. 1.9.2016 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z URL: <<https://www.youtube.com/watch?v=8JS0Xi0j2fQ&t=985s>>.
- [16] ABBAS, H. S. a M. A. GREGORY. The next generation of passive optical networks: A review *Journal of Network and Computer Applications*. [online]. 2016(67) [cit.2016-11-10]. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.02.015. Dostupné z URL:<<http://electronicdesign.com/what-s-difference-between/what-s-difference-between-epon-and-gpon-optical-fiber-networks>>.
- [17] Huawei Launches the First Commercial Symmetric 10G GPON Solution, Bringing Gigabit Access to Enterprises *Huawei* [online]. 20.9.2016 [cit.2016-11-11]. Dostupné z URL: <<http://www.huawei.com/minisite/ubbf/2016/en/newsinfo1-9.html>>.
- [18] NESSET, D. NG-PON2 Technology and Standards *Journal of Lightwave Technology*. [online]. IEEE, 2015(5), [cit. 2016-11-11]. DOI: 10.1109/JLT.2015.2389115. ISSN 1558-2213. Dostupné z URL:<<http://ieeexplore.ieee.org/document/7005437/>>.
- [19] YUANQIU, L. X. ZHOU, F. EFFENBERG, X. YAN, G. PENG, Y. QIAN a Y. MA Time- and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2) *Journal of Lightwave Technology*. [online]. IEEE, 31(4), [cit. 2016-12-1]. DOI: 10.1109/JLT.2012.2215841. ISSN 1558-2213. Dostupné z URL:<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6289432>>.

- [20] G.989.2: 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification *ITU* [online]. 2014 [cit.2017-5-22]. Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.2-201412-I/en>>.
- [21] KNITTLE, C. 100G EPON: IEEE 802.3ca prezentace *Optical Fiber Communication Conference and Exhibition*. [online]. 24. 3. 2016, [cit. 2016-11-15].
- [22] KNITTLE, C. 100G EPON: IEEE 802.3ca *Optical Fiber Communication Conference and Exhibition*. [online]. 24. 3. 2016, [cit. 2016-11-15]. DOI: 10.1364/OFC.2016.Th1I.6. Dostupné z URL:<<http://ieeexplore.ieee.org/document/7537333/>>.
- [23] LIU, D. 100G EPON wavelenght plan discussion *May 2016 Task force meeting*. [online]. 24. 5. 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/05/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/05/index.shtml)>.
- [24] IEEE P802.3ca *100G-EPON Task Force. Baseline Proposals and Technical Motions* [online]. [cit. 2016-11-26]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/living\\_documents/motions.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/living_documents/motions.shtml)>.
- [25] KNITTLE, C. *100G EPON* [e-mail]. 30. 11. 2016 17:24 [cit. 2016-12-1]
- [26] JOHNSON, J. F. EFFENBERG, Y. GUO a X. HUANG. Wavelength „Plan A“ - All channels in O-Band *September 2016 Task force meeting*. [online]. 13. 9. 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/09/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/09/index.shtml)>.
- [27] HARSTEAD, E. 25G/50G/100G EPON wavelength plan B *September 2016 Task force meeting*. [online]. 13. 9. 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/09/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/09/index.shtml)>.
- [28] HARSTEAD, E. 25G/50G/100G EPON wavelength plan C *September 2016 Task force meeting*. [online]. 13.–15. září [cit. 2016-11-30]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/09/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/09/index.shtml)>.
- [29] JOHNSON, J. Wavelength „Plan D“ O-band upstream, C-band downstream *September 2016 Task force meeting*. [online]. 13. 9. 2016 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/09/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/09/index.shtml)>.

- [30] MIGUELEZ, P. Operator Consensus for NG-EPON *September 2016 Task force meeting*. [online]. 13. září [cit. 2016-12-3]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/09/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/09/index.shtml)>.
- [31] DAI, E. Simulation Study on 100G EPON Wavelength Plan A *November 2016 Task force meeting*. [online]. 7. 11. 2016 [cit. 2016-12-2]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/11/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/11/index.shtml)>.
- [32] DAI, E. All O band Uneven Spacing Wavelength Plan for 100G EPON *November 2016 Task force meeting*. [online]. 7. 11. 2016 [cit. 2016-12-2]. Dostupné z URL:<[http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting\\_archive/2016/11/index.shtml](http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2016/11/index.shtml)>.
- [33] Testing Fiber Optic Couplers, Splitters Or Other Passive Devices *The Fiber Optic Association, Inc.* [online]. 2013 [cit. 2016-12-8]. Dostupné z URL:<<http://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/couplers.html>>.
- [34] Power Budget Parameters for PR10, PR20, and PR30 *IEEE P802.3av 10G-EPON Task Force* [online]. 2007 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z URL:<<http://www.ieee802.org/3/av/public/baseline.html>>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

AON	Active Optical Network
APON	ATM Passive Optical Network
ATM	Asynchronous Transfer Mode
a.u	Amplitude Unit
BPON	Broadband Passive Optical Network
BER	Bit Error Rate
DFB	Distributed Feedback Laser
DML	Directly Modulated Laser
DSL	Digital Subscriber Line
EDFA	Erbium Doped Fibre Amplifier
EFMF	Ethernet in the First Mile Fiber
EML	Electro-absorption Modulated Laser
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FEC	Forward Error Correction
FTTx	Fiber To The x
FWM	Four-Wave Mixing
GPON	Gigabit Passive Optical Network
ICT	Information and Communication Technologies
IoT	Internet of Things
IPTV	Internet Protocol Television
MPCP	MultiPoint Control Protocol
NGA	Next Generation Access
NRZ	Non Return to Zero
PON	Passive Optical Network

PTMP	Point To MultiPoint
PTP	Point To Point
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
OSA	Optical Spectral Analyzer
SG	Study Group
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
TC	Transmission Convergence
TDM	Time Division Multiplex
TDP	Transmitter and Dispersion Penalty
TS	Time Slot
TWDM	Time Wavelength Division Multiplex
VDSL	Very High Speed DSL
VoIP	Voice over Internet Protocol
WDM	Wavelength Division Multiplex

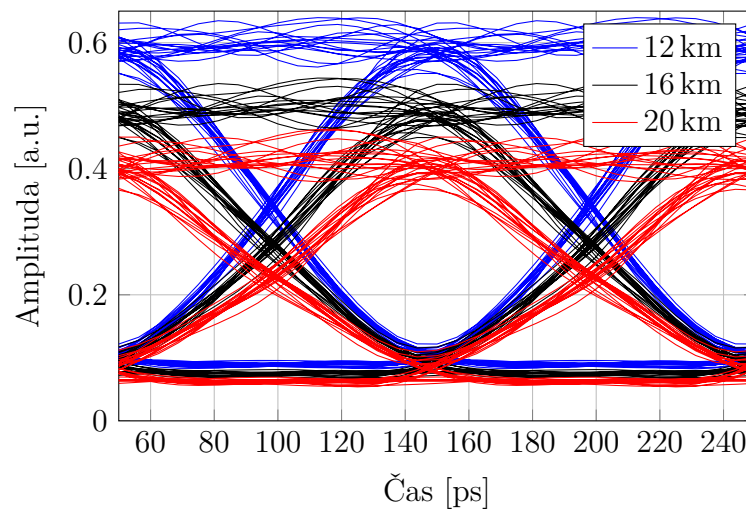
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Výsledky Diagramy oka</b>	<b>67</b>
A.1	Diagramy oka simulace XG-PON . . . . .	67
A.1.1	Dělicí poměr 1:4 . . . . .	67
A.1.2	Dělicí poměr 1:16 . . . . .	68
A.1.3	Dělicí poměr 1:64 . . . . .	69
A.2	Diagramy oka simulace NG-PON2 . . . . .	70
A.2.1	Dělicí poměr 1:4 . . . . .	70
A.2.2	Dělicí poměr 1:16 . . . . .	71
A.2.3	Dělicí poměr 1:64 . . . . .	72
A.3	Diagramy oka simulace 100G EPON . . . . .	73
A.3.1	Dělicí poměr 1:4 . . . . .	73
A.3.2	Dělicí poměr 1:16 . . . . .	74
A.3.3	Dělicí poměr 1:64 . . . . .	75
<b>B</b>	<b>Výsledky BER</b>	<b>76</b>
B.1	Výsledná BER simulace XG-PON . . . . .	76
B.1.1	Sestupný směr . . . . .	76
B.1.2	Vzestupný směr . . . . .	76
B.2	Výsledná BER simulace NG-PON2 . . . . .	77
B.2.1	Sestupný směr . . . . .	77
B.2.2	Vzestupný směr . . . . .	78
B.3	Výsledná BER simulace 100G EPON . . . . .	80
B.3.1	Sestupný směr . . . . .	80
B.3.2	Vzestupný směr . . . . .	81
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>83</b>

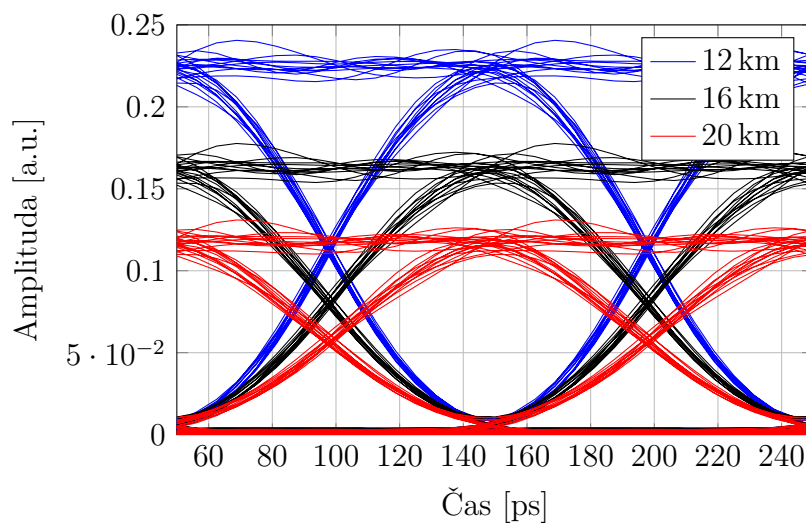
# A VÝSLEDKY DIAGRAMY OKA

## A.1 Diagramy oka simulace XG-PON

### A.1.1 Dělicí poměr 1:4

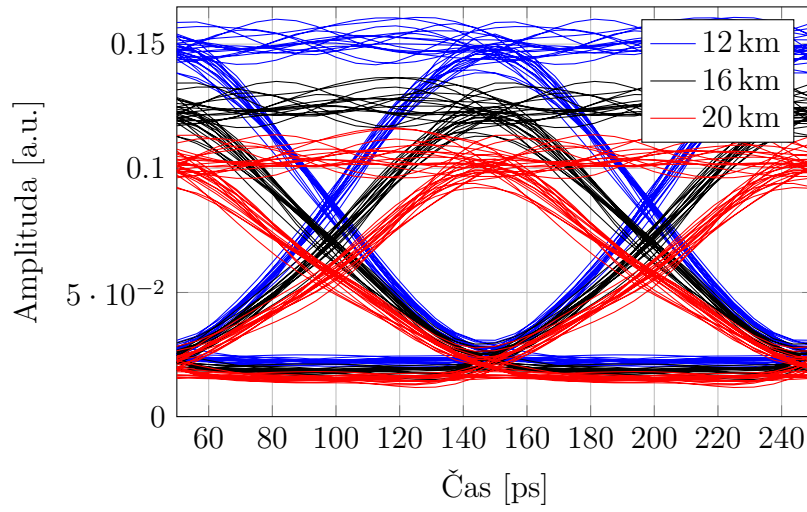


Obr. A.1: Diagram oka pro rozbočení 1:4 v sestupném směru sítě XG-PON

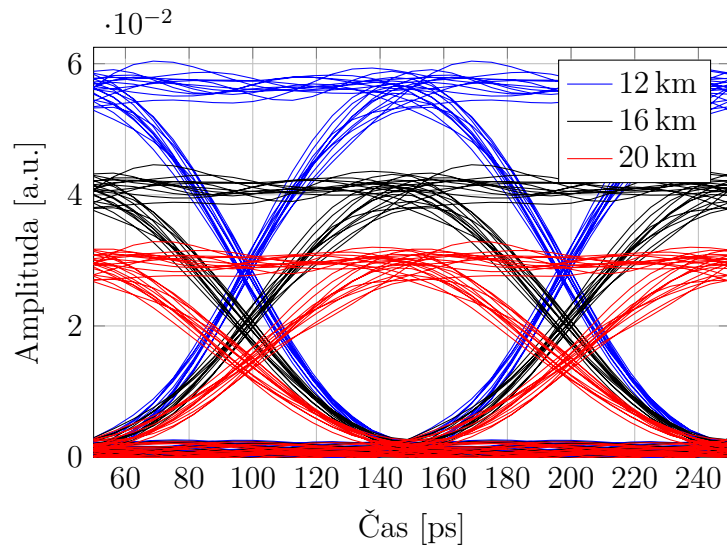


Obr. A.2: Diagram oka pro rozbočení 1:4 v vzestupném směru sítě XG-PON

### A.1.2 Dělicí poměr 1:16

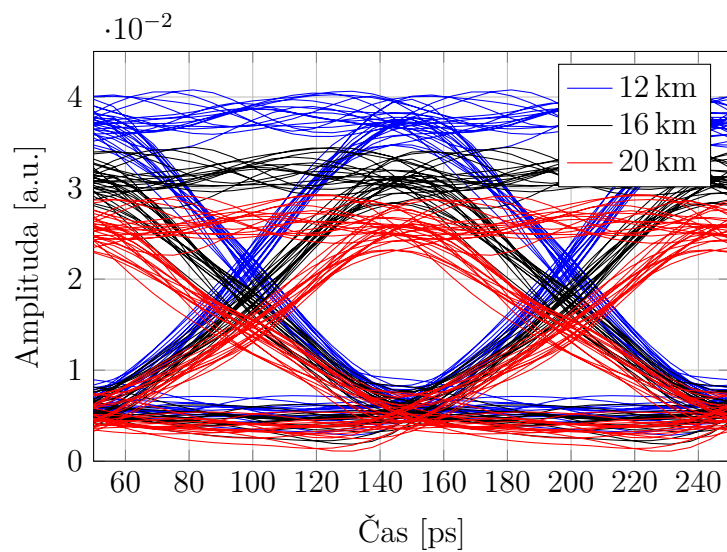


Obr. A.3: Diagram oka pro rozbočení 1:16 v sestupném směru sítě XG-PON

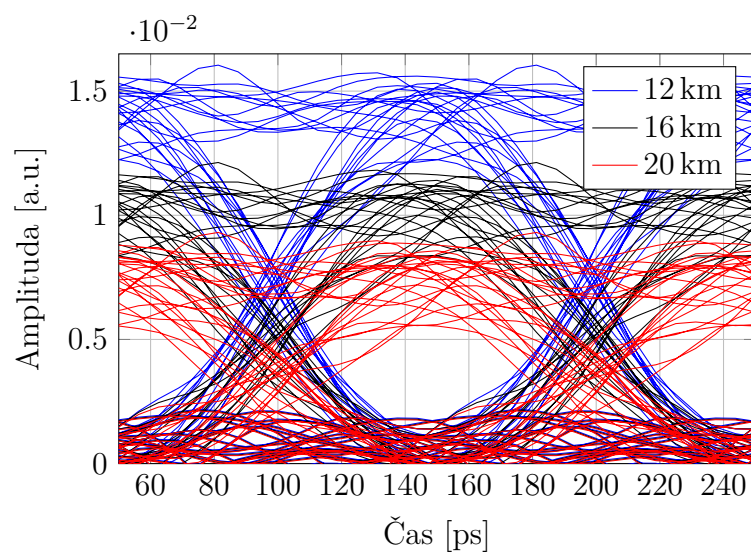


Obr. A.4: Diagram oka pro rozbočení 1:16 v vzestupném směru sítě XG-PON

### A.1.3 Dělicí poměr 1:64



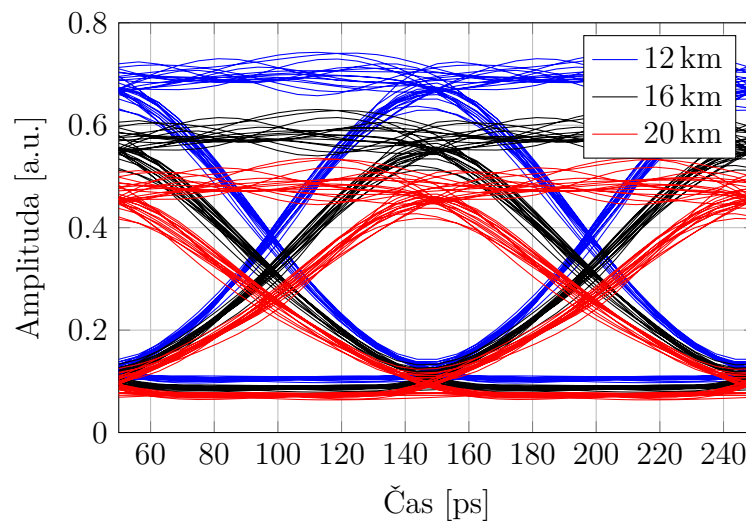
Obr. A.5: Diagram oka pro rozbočení 1:64 v sestupném směru sítě XG-PON



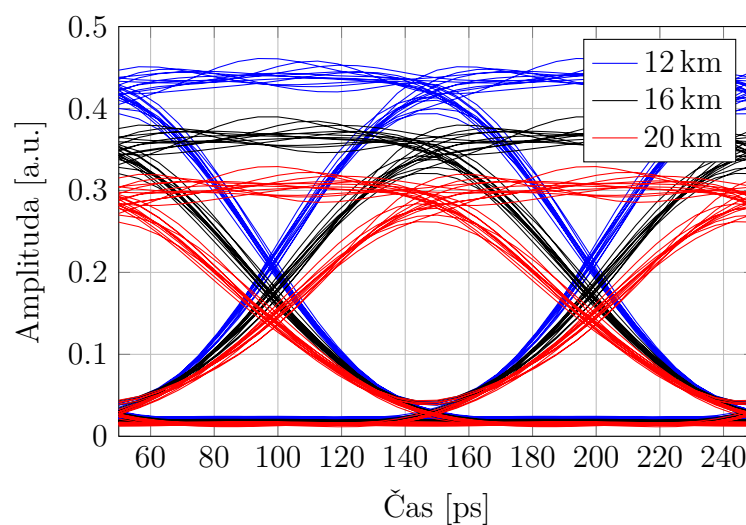
Obr. A.6: Diagram oka pro rozbočení 1:64 v vzestupném směru sítě XG-PON

## A.2 Diagramy oka simulace NG-PON2

### A.2.1 Dělicí poměr 1:4

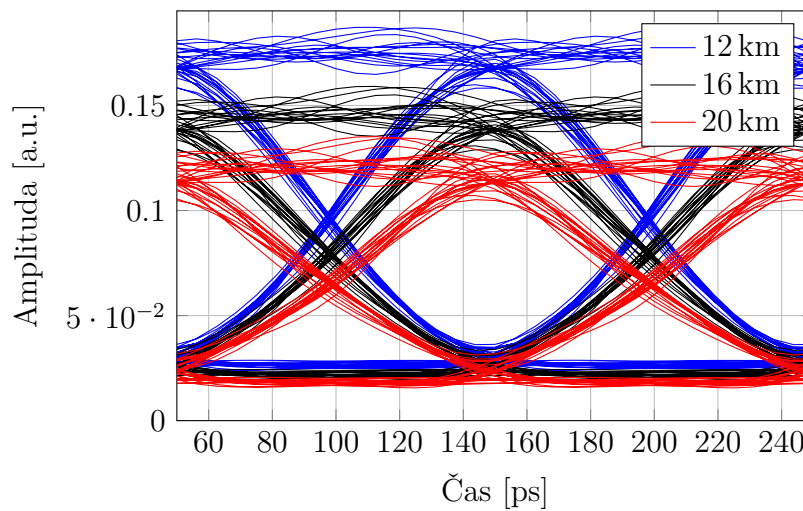


Obr. A.7: Diagram oka pro rozbočení 1:4 v sestupném směru sítě NG-PON2

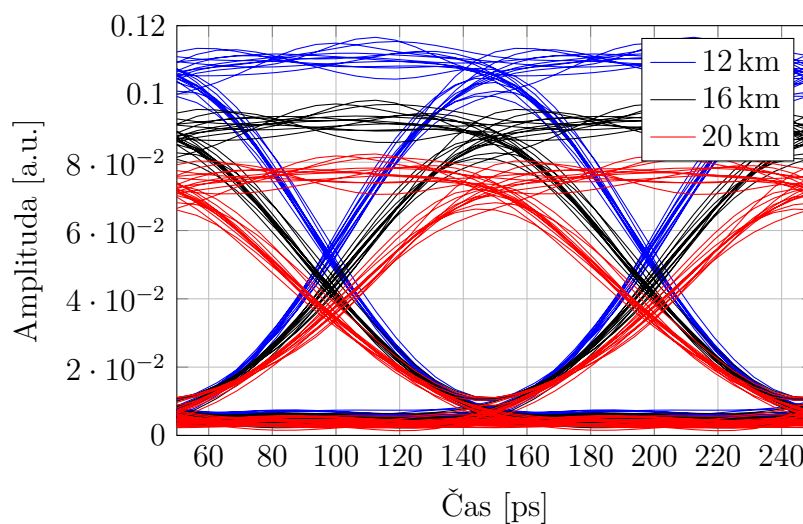


Obr. A.8: Diagram oka pro rozbočení 1:4 v vzestupném směru sítě NG-PON2

## A.2.2 Dělicí poměr 1:16

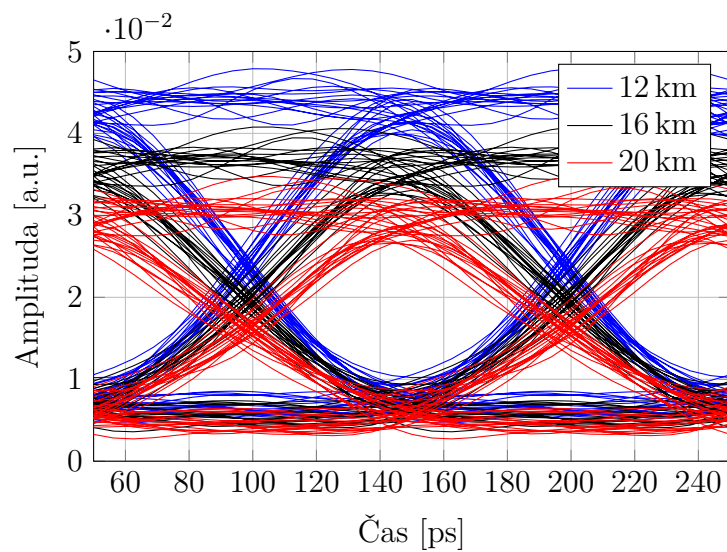


Obr. A.9: Diagram oka pro rozbočení 1:16 v sestupném směru sítě NG-PON2

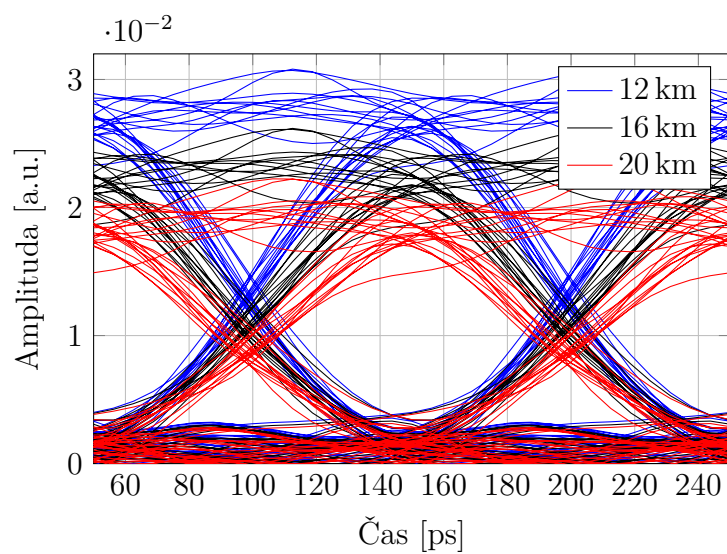


Obr. A.10: Diagram oka pro rozbočení 1:16 v vzestupném směru sítě NG-PON2

### A.2.3 Dělicí poměr 1:64



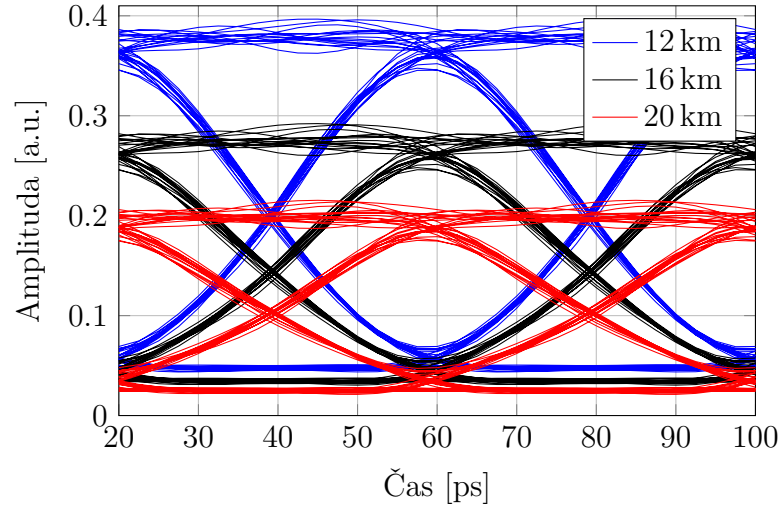
Obr. A.11: Diagram oka pro rozbočení 1:64 v sestupném směru sítě NG-PON2



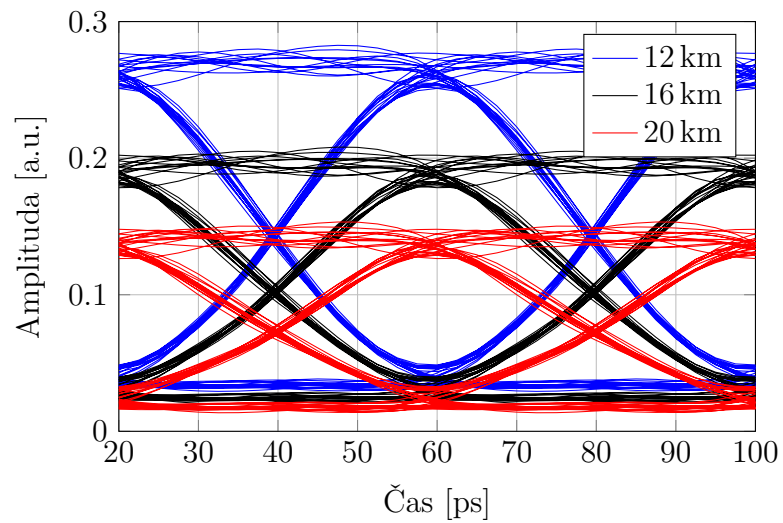
Obr. A.12: Diagram oka pro rozbočení 1:64 v vzestupném směru sítě NG-PON2

## A.3 Diagramy oka simulace 100G EPON

### A.3.1 Dělicí poměr 1:4

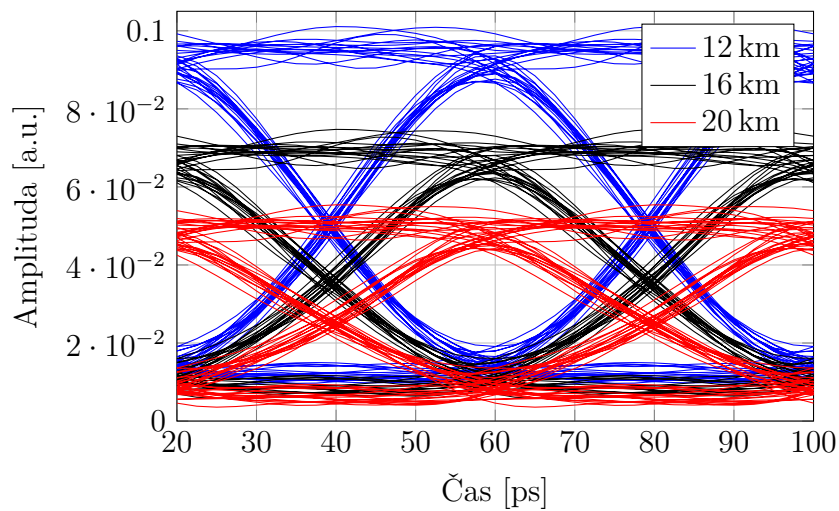


Obr. A.13: Diagram oka pro rozbočení 1:4 v sestupném směru sítě 100G EPON

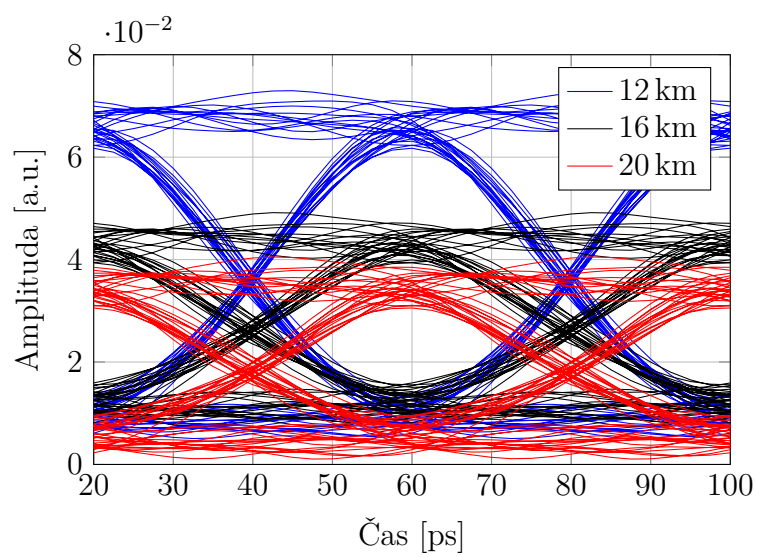


Obr. A.14: Diagram oka pro rozbočení 1:4 v vzestupném směru sítě 100G EPON

### A.3.2 Dělicí poměr 1:16

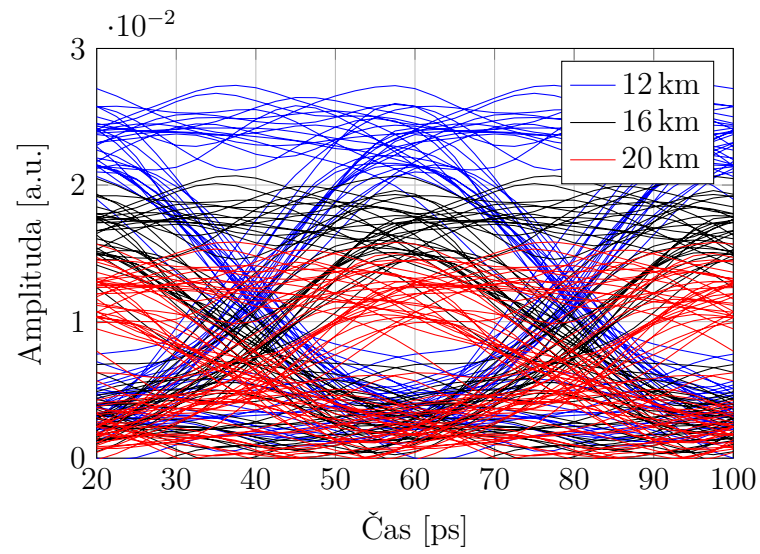


Obr. A.15: Diagram oka pro rozbočení 1:16 v sestupném směru sítě 100G EPON

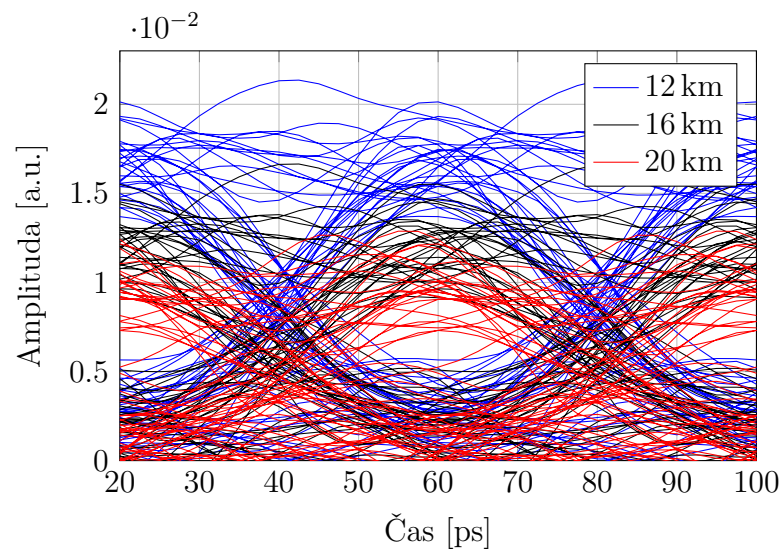


Obr. A.16: Diagram oka pro rozbočení 1:16 v vzestupném směru sítě 100G EPON

### A.3.3 Dělicí poměr 1:64



Obr. A.17: Diagram oka pro rozbočení 1:64 v sestupném směru sítě 100G EPON



Obr. A.18: Diagram oka pro rozbočení 1:64 v vzestupném směru sítě 100G EPON

## B VÝSLEDKY BER

### B.1 Výsledná BER simulace XG-PON

#### B.1.1 Sestupný směr

Tab. B.1: BER sítě XG-PON v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	2,12E-81	5,54E-56	5,08E-41	3,54E-30	7,39E-23	8,57E-10
1:8	7,00E-80	3,69E-54	2,47E-39	6,04E-29	1,26E-22	1,07E-09
1:16	5,40E-75	1,42E-51	1,96E-34	6,28E-28	6,72E-22	2,15E-09
1:32	1,60E-61	5,75E-44	1,87E-32	8,51E-25	1,24E-19	1,87E-08
1:64	1,32E-36	3,19E-28	5,08E-22	1,75E-17	3,45E-14	2,92E-06
1:128	4,93E-15	2,38E-12	3,20E-10	1,59E-08	3,30E-07	1,58E-02

#### B.1.2 Vzestupný směr

Tab. B.2: BER sítě XG-PON v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	6,87E-51	1,79E-37	4,49E-25	1,92E-20	4,22E-18	1,70E-09
1:8	4,16E-49	3,40E-36	2,56E-24	8,36E-20	1,92E-17	9,56E-09
1:16	4,88E-44	1,94E-32	4,58E-22	7,07E-18	1,72E-15	6,69E-07
1:32	5,78E-32	1,65E-23	1,31E-16	2,90E-13	5,70E-11	5,99E-04
1:64	5,97E-14	1,70E-10	5,23E-08	2,87E-06	5,50E-05	5,07E-02
1:128	6,16E-05	5,82E-04	3,00E-03	1,05E-02	2,68E-02	3,30E-01

## B.2 Výsledná BER simulace NG-PON2

### B.2.1 Sestupný směr

Tab. B.3: BER sítě NGPON2 lambdy 1 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	8,74E-72	6,04E-49	9,35E-37	4,75E-29	6,54E-24	7,09E-10
1:8	9,20E-71	1,76E-48	2,02E-36	8,80E-29	1,09E-23	1,09E-10
1:16	9,81E-68	4,71E-47	1,42E-35	1,62E-28	6,00E-22	6,00E-09
1:32	6,90E-59	2,18E-42	2,36E-32	7,39E-26	4,93E-21	4,93E-09
1:64	1,70E-39	8,22E-31	2,84E-24	1,58E-19	6,84E-16	6,84E-07
1:128	7,38E-18	1,84E-14	4,20E-12	4,45E-10	1,85E-08	1,85E-04

Tab. B.4: BER sítě NGPON2 lambdy 2 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	7,44E-73	8,92E-46	6,09E-35	2,14E-27	5,54E-22	1,14E-09
1:8	6,66E-72	3,11E-45	1,40E-34	3,86E-27	8,78E-22	1,46E-09
1:16	5,32E-69	1,23E-44	1,49E-33	2,06E-26	3,00E-21	2,45E-09
1:32	3,21E-60	9,42E-40	3,51E-30	5,30E-24	1,96E-20	2,36E-08
1:64	2,34E-40	8,58E-32	5,22E-22	6,50E-18	9,15E-15	1,49E-06
1:128	4,46E-18	9,94E-14	2,03E-11	1,38E-09	4,00E-08	6,12E-04

Tab. B.5: BER sítě NGPON2 lambdy 3 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,31E-69	6,12E-49	1,23E-36	2,78E-25	2,97E-22	2,11E-09
1:8	1,93E-67	1,66E-48	2,50E-36	4,82E-25	4,72E-22	2,66E-09
1:16	7,29E-65	6,32E-47	3,63E-35	1,93E-24	1,57E-21	4,33E-09
1:32	3,78E-57	4,35E-42	5,67E-32	1,60E-22	9,84E-20	2,72E-08
1:64	2,30E-39	2,98E-30	1,12E-23	1,55E-17	3,20E-15	1,74E-06
1:128	6,53E-18	1,38E-14	5,50E-12	1,09E-09	2,79E-08	7,56E-04

Tab. B.6: BER sítě NGPON2 lambdy 4 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	2,07E-70	4,80E-50	2,13E-38	1,27E-29	3,31E-24	4,68E-09
1:8	1,63E-69	1,63E-50	5,70E-38	2,33E-29	1,94E-23	5,41E-09
1:16	7,06E-67	6,69E-49	5,50E-37	8,88E-23	5,47E-23	7,46E-09
1:32	2,34E-59	4,80E-44	1,40E-33	5,23E-21	2,27E-21	2,45E-08
1:64	2,56E-41	5,67E-32	3,91E-25	2,57E-16	1,17E-16	6,29E-07
1:128	1,03E-18	2,42E-15	7,95E-11	4,19E-09	4,56E-09	1,00E-04

## B.2.2 Vzestupný směr

Tab. B.7: BER sítě NGPON2 lambdy 1 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,24E-55	5,79E-39	5,41E-30	4,14E-23	1,25E-18	9,08E-09
1:8	1,90E-54	1,61E-38	6,11E-30	7,05E-23	1,82E-18	1,09E-08
1:16	5,61E-52	4,59E-37	7,02E-29	3,72E-22	6,30E-18	2,01E-08
1:32	9,67E-45	1,15E-32	1,23E-25	6,52E-20	3,17E-16	1,37E-07
1:64	1,69E-28	3,00E-22	6,65E-18	2,05E-14	5,76E-12	1,23E-05
1:128	2,69E-11	1,70E-09	4,90E-08	7,56E-07	6,75E-06	4,00E-02

Tab. B.8: BER sítě NGPON2 lambdy 2 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	2,27E-55	2,74E-39	4,49E-29	1,15E-22	1,44E-19	4,00E-09
1:8	1,36E-54	7,69E-39	8,04E-29	1,77E-22	2,11E-19	4,76E-09
1:16	1,79E-52	1,45E-37	5,19E-28	7,06E-22	7,22E-18	8,59E-09
1:32	3,16E-46	1,03E-33	1,70E-25	5,13E-20	3,31E-17	5,20E-08
1:64	1,75E-31	2,87E-24	4,05E-19	2,48E-15	4,72E-13	3,74E-06
1:128	8,39E-12	9,63E-10	4,38E-09	1,03E-07	1,30E-06	2,00E-03

Tab. B.9: BER sítě NGPON2 lambdy 3 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,45E-57	6,95E-41	1,17E-30	3,48E-24	8,46E-20	4,15E-09
1:8	2,64E-56	2,10E-40	2,35E-30	5,97E-24	1,28E-19	4,93E-09
1:16	9,56E-54	6,97E-39	2,36E-29	3,32E-23	4,99E-19	9,00E-09
1:32	4,00E-46	3,61E-34	3,47E-26	7,68E-21	3,81E-17	6,19E-08
1:64	6,96E-29	8,08E-23	2,76E-18	6,71E-15	2,15E-12	7,08E-06
1:128	2,17E-11	1,38E-09	3,90E-08	6,02E-07	5,56E-06	3,00E-03

Tab. B.10: BER sítě NGPON2 lambdy 4 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	6,18E-57	8,01E-40	4,69E-31	7,03E-24	9,30E-20	6,66E-09
1:8	4,45E-56	2,69E-39	1,00E-30	1,13E-23	1,42E-19	7,81E-09
1:16	1,23E-53	7,00E-38	1,05E-29	5,56E-23	5,30E-19	1,36E-08
1:32	1,84E-46	1,23E-33	1,47E-26	8,25E-21	3,32E-17	7,82E-08
1:64	3,90E-30	2,09E-23	6,89E-19	2,52E-15	1,04E-12	5,82E-06
1:128	5,29E-12	4,30E-10	1,49E-08	2,63E-07	2,89E-06	2,70E-03

## B.3 Výsledná BER simulace 100G EPON

### B.3.1 Sestupný směr

Tab. B.11: BER sítě 100G EPON lambdy 1 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,84E-68	1,22E-49	6,45E-37	2,68E-28	2,76E-22	8,45E-09
1:8	3,17E-63	6,06E-46	3,74E-34	4,27E-26	1,93E-20	4,01E-08
1:16	4,31E-51	3,77E-38	1,00E-28	4,18E-22	2,37E-17	2,41E-06
1:32	4,38E-29	3,82E-22	5,44E-17	3,27E-13	2,05E-10	9,04E-04
1:64	2,10E-11	5,87E-09	4,18E-07	1,05E-05	1,20E-04	4,80E-02
1:128	2,50E-04	1,00E-03	5,00E-03	1,40E-02	3,00E-02	2,90E-01

Tab. B.12: BER sítě 100G EPON lambdy 2 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,54E-66	1,35E-47	1,69E-36	2,34E-27	1,12E-21	5,42E-09
1:8	1,19E-61	1,42E-44	2,50E-33	1,08E-25	2,47E-20	3,47E-08
1:16	7,45E-50	1,55E-36	1,68E-27	3,16E-21	9,50E-17	2,44E-06
1:32	8,05E-29	9,68E-22	1,18E-16	4,63E-13	2,80E-10	9,27E-04
1:64	2,20E-11	6,52E-09	4,62E-07	1,14E-05	1,29E-04	4,90E-02
1:128	2,62E-04	1,50E-03	5,30E-03	1,45E-02	3,20E-02	2,90E-01

Tab. B.13: BER sítě 100G EPON lambdy 3 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,13E-68	3,10E-49	9,94E-37	3,06E-28	2,74E-22	7,56E-09
1:8	2,41E-63	5,61E-46	2,09E-34	1,79E-26	7,07E-21	4,29E-08
1:16	1,20E-50	2,67E-37	4,01E-28	1,08E-21	4,47E-17	2,76E-06
1:32	1,02E-28	9,48E-22	1,07E-16	4,33E-13	2,70E-10	9,80E-04
1:64	2,39E-11	6,74E-09	4,65E-07	1,13E-05	1,28E-04	4,86E-02
1:128	2,50E-04	1,37E-03	5,00E-03	1,40E-02	3,10E-02	2,95E-01

Tab. B.14: BER sítě 100G EPON lambdy 4 v sestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	8,58E-68	4,24E-49	3,94E-36	1,94E-27	1,98E-21	1,63E-09
1:8	3,66E-63	7,46E-46	7,53E-34	9,75E-26	4,32E-20	9,92E-08
1:16	4,86E-51	2,23E-37	8,03E-28	3,19E-21	1,49E-16	4,71E-06
1:32	2,33E-29	4,55E-22	8,89E-17	3,24E-13	3,08E-10	1,37E-03
1:64	1,83E-11	5,92E-09	4,50E-07	1,16E-05	1,35E-04	5,10E-02
1:128	2,60E-04	1,40E-03	5,30E-03	1,49E-02	3,20E-02	2,90E-01

### B.3.2 Vzestupný směr

Tab. B.15: BER sítě 100G EPON lambdy 1 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	3,13E-59	1,22E-41	3,68E-31	1,49E-23	8,95E-19	9,01E-08
1:8	5,33E-53	1,82E-37	4,40E-28	3,40E-21	8,85E-17	1,83E-06
1:16	2,04E-38	1,19E-27	1,02E-20	1,20E-15	3,47E-12	3,52E-04
1:32	2,48E-18	1,21E-13	2,26E-10	6,57E-08	3,67E-06	2,89E-02
1:64	9,60E-07	2,92E-05	3,52E-04	2,00E-03	8,50E-03	2,30E-01
1:128	8,00E-03	2,26E-02	5,00E-02	9,20E-02	1,50E-01	8,30E-01

Tab. B.16: BER sítě 100G EPON lambdy 2 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	2,02E-59	3,89E-42	9,04E-32	1,64E-25	3,62E-20	2,21E-08
1:8	5,14E-54	2,20E-38	7,25E-30	3,44E-23	2,74E-18	3,42E-07
1:16	1,64E-40	7,51E-29	1,36E-22	2,02E-17	1,24E-13	8,72E-05
1:32	5,31E-20	4,75E-14	1,82E-11	7,48E-09	6,24E-07	1,50E-02
1:64	1,99E-07	8,40E-06	1,31E-04	1,00E-03	4,60E-03	1,80E-01
1:128	4,00E-03	1,00E-02	3,50E-02	6,90E-02	1,20E-01	7,80E-01

Tab. B.17: BER sítě 100G EPON lambdy 3 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	7,04E-57	1,15E-42	4,52E-32	5,37E-25	1,26E-20	2,34E-08
1:8	8,56E-51	8,96E-39	4,33E-30	1,16E-23	8,96E-18	1,02E-06
1:16	3,32E-37	1,15E-27	3,39E-21	2,15E-16	9,17E-13	3,97E-04
1:32	6,92E-18	2,30E-13	4,02E-10	8,33E-08	4,36E-06	3,30E-02
1:64	1,25E-06	3,58E-05	4,16E-04	2,50E-03	9,52E-03	2,50E-01
1:128	8,00E-03	2,40E-02	5,30E-02	9,70E-02	1,60E-01	9,90E-01

Tab. B.18: BER sítě 100G EPON lambdy 4 v vzestupném směru

Vzdálenost	12 km	14 km	16 km	18 km	20 km	30 km
1:4	4,82E-60	8,06E-43	5,12E-33	1,51E-25	3,01E-20	3,94E-08
1:8	2,05E-53	4,36E-39	1,99E-29	1,11E-22	7,44E-18	1,19E-06
1:16	4,14E-38	4,64E-28	4,37E-21	4,03E-16	1,65E-12	3,38E-04
1:32	4,97E-18	1,70E-13	3,16E-10	7,26E-08	3,88E-06	2,94E-02
1:64	1,08E-06	3,15E-05	3,71E-04	2,30E-04	8,80E-03	2,34E-01
1:128	8,20E-03	2,30E-02	5,10E-02	9,33E-03	1,52E-01	8,38E-01

## C OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

Na přiloženém CD se nachází elektronická verze práce ve formátu PDF, zdrojové kódy a schémata nutná k úspěšné kompilaci bakalářské práce v programu  $\text{\LaTeX}$ .

Dále jsou přiloženy složky se soubory simulací, spustitelné v programu VPIT-ransmissionMaker<sup>TM</sup>. V těchto složkách se rovněž nacházejí kompletní výsledky všech simulací s hodnotami BER ve formátu „.xlsx“, diagramů ok ve zdrojovém formátu „.csv“ a v bitmapovém formátu „.png“.